



Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez
Facultad de Ciencias Técnicas
Centro de Estudios Hidrotécnicos



**PALEOHURACANES Y HURACANES RECIENTES EN CUBA.
REGISTROS E IMPACTOS EN ECOSISTEMAS COSTEROS Y EL
SECTOR AGROPECUARIO**

**Tesis presentada en opción al grado científico de
Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias**

Felipe Matos Pupo, Lic.

Ciego de Ávila, octubre de 2023



Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez
Facultad de Ciencias Técnicas
Centro de Estudios Hidrotécnicos



PALEOHURACANES Y HURACANES RECIENTES EN CUBA. REGISTROS E IMPACTOS EN ECOSISTEMAS COSTEROS Y EL SECTOR AGROPECUARIO

**Tesis presentada en opción al grado científico de
Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias**

Autor: Felipe Matos Pupo, Lic.

Tutores: Matthew Charles Peros, Lic., Dr.C.

Roberto González de Zayas, Ing., Dr.C.

Ciego de Ávila, octubre de 2023

"La emergencia climática es una carrera que estamos perdiendo, pero es una carrera que podemos ganar. La crisis climática está causada por nosotros y las soluciones deben venir de nosotros. Tenemos las herramientas: la tecnología está de nuestro lado"

Antonio Guterres, Secretario General de la ONU

"Cuarenta es la vejez de la juventud. Cincuenta es la juventud de la vejez"

Victor Hugo

"La emoción del aprendizaje separa a la juventud de la vejez.

Mientras estés aprendiendo, no eres viejo"

Rosalyn S. Yalow

AGRADECIMIENTOS

Una tesis de doctorado nunca podrá visualizarse como resultado de la labor de un hombre. En la base de ese edificio que uno va construyendo en ese ejercicio académico, está el apoyo de amigos y profesores, también de investigadores ya formados y la experiencia de nuestros tutores, y se deben sumar nuestros compañeros del mundo profesional, que se acercan y te animan. Es muy difícil listar a todos aquellos que aportaron su ayuda en mi empeño; estoy convencido que aquellos que no sean nombrados, será por olvido totalmente involuntario. Nuestro inmenso agradecimiento a todos los que, de diferentes maneras, colaboraron con el autor en lograr su sueño.

Mi agradecimiento especial a dos amigos-hermanos, mejor hermanos-amigos, uno de estos es tutor. Refiero sus nombres: el Dr. Roberto González de Zayas y el Lic. Vicente Osmel Rodríguez Cárdenas. De ellos he recibido las críticas más fuertes que jamás me hayan hecho en mis más de 50 años, pero con esas críticas que te ayudan a reflexionar, y a luchar por ser mejores. Gracias a ambos por estar ahí siempre. También agradecer a Leslie Hernández, por estar pendiente de mi proceso, de la cual igualmente he recibido sus críticas y buenos deseos.

Agradecimiento además a Raúl Gómez Fernández, ese que hace un chiste de cualquier tema, y que con su buen humor me ha transmitido los mejores ánimos. Pero igual, un poco en serio y un poco en broma, muy preocupado por mi tesis.

Agradecer también a mi otro tutor, el Dr. Matthew Charles Peros, que aunque canadiense tiene su mezcla de cubanía, por sus innumerables visitas a Cuba desde finales del '90. Gracias a Matthew, Vicente y Roberto, el autor de esta tesis se adentró en el mundo de los huracanes del pasado. De Matthew también he recibido apoyo de todo tipo, incluido el compartir con sus familias y hacer más placenteras mis visitas a Canadá.

Hasta Canadá también llegue el agradecimiento para el Dr. Paul Gallina, que además de estar muy pendiente de mi proceso doctoral, su casa ha servido de nido para mis producciones científicas.

A otras personas e instituciones también debo agradecer: al Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros, allí inicié como investigador gracias a los consejos de Luis M. Batista Tamayo. En la actual institución, el Centro Meteorológico Provincial de Ciego de Ávila, también he recibido el apoyo de todos, con las preocupaciones constantes de su Director Oscar Benedico y la Subdirectora Técnica Aliana López. Gracias a todos por estar ahí también, brindando sus buenos ánimos y apoyos (directos e indirectos). Como institución foránea, resalto la Universidad de Bishop (Canadá), por el apoyo recibido desde el 2011 en estudios paleoclimáticos.

La coincidencia en el tiempo de tareas científicas con la vida de un hogar, muchas veces conducen a controversias familiares. Creo este ha sido uno de los obstáculos más difíciles en mi formación. Aun así, en medio de las mismas controversias salía a la luz la frase: pero no te detenga, sigue en la batalla!. Mi agradecimiento entonces también a la familia, en la que incluyo a todos mis hermanos y hermanas; entonces son muchos agradecimientos a enviar, pero aquí también los dejo plasmado en este documento.

No puedo dejar de mencionar al Programa de Doctorado en el cual presento el documento de tesis. Por mi edad y otros obstáculos, ocurrieron varios cambios de mi tema de tesis y de las instituciones para presentar el tema, y este programa abrió las puertas al autor de este trabajo. Este paso ha sido muy importante y decisivo para el cierre de mi posible proceso de doctorado. Debo trasladar un agradecimiento especial al Dr. Oscar Brown Manrique, por ser, junto con el Dr. Roberto González, los autores de esta excelente idea. Mi agradecimiento general a la UNICA, particularmente al Centro de Estudios Hidrotécnicos.

Mi gratitud infinita a mi madre, que aunque ya fallecida, en vida me brindó un apoyo de tal magnitud, que sin ese gran apoyo, como joven de ascendencia muy humilde no hubiese podido aspirar probablemente a un título universitario; menos aun al sueño de alcanzar un grado científico.

RESUMEN

Ciego de Ávila no había sido afectada por un huracán de categoría 5, tomando como base la data histórica desde 1851, por tanto, la población avileña no tenía la experiencia de inundaciones costeras asociadas a un huracán de esta intensidad. Al mismo tiempo, existe un gran vacío de conocimientos acerca de los huracanes del pasado para Cuba, así como de los impactos de estos fenómenos en el sector agropecuario, a pesar de ser este uno de los sectores económicos priorizados del país. El objetivo general de esta investigación consistió en identificar huracanes del pasado en Cuba y analizar las inundaciones costeras generadas por el huracán Irma (2017), así como los impactos asociados a huracanes recientes, con énfasis en el sector Agropecuario. Para cumplimentar los objetivos específicos, se trabajó con dos escalas espaciales: nacional y provincial, y de esta última se enfatizaron los análisis en las zonas costeras y particularmente la cayería norte de Ciego de Ávila. Se aplicaron fundamentalmente: herramientas de Sistema de Información Geográfica; diferentes técnicas de proxy data para la identificación de paleohuracanes, incluido el uso de ecuaciones hidrodinámicas en uno de estos proxies; así como análisis estadísticos elementales para el estudio de los impactos de los ciclones tropicales. Las principales contribuciones de la investigación: (1) logro del plano de inundación costera asociada a Irma, y su comparación con otros escenarios de peligro; (2) nuevos registros de eventos de oleaje extremo en Cuba; (3) identificación de las potencialidades de los huracanalitos para estudio de tsunamis y huracanes en Cuba; (4) resultados importantes sobre los impactos de ciclones tropicales en el sector agropecuario, a partir de un compendio de diez temporadas ciclónicas. Todos estos resultados contribuyen a mejorar los planes de enfrentamiento a desastres, a partir de una reducción de los riesgos por huracanes, determinada por la disminución de las vulnerabilidades, fundamentalmente las sociales y económicas.

SUMMARY

Ciego de Avila had not been affected by a category 5 hurricane, based on historical data since 1851, therefore, the population of this province had no experience of coastal flooding associated with a hurricane of this intensity. At the same time, there is little knowledge about past hurricanes in Cuba, as well as the impacts of these phenomena on the agricultural sector, which is one of the country's prioritized economic sectors. The general objective of this research consisted of identifying past hurricanes in Cuba and analyzing the coastal flooding generated by Hurricane Irma (2017), as well as the impacts associated with recent hurricanes, with emphasis on the agricultural sector. Two spatial scales were used to meet specific objectives: national and provincial; in Ciego de Avila, priority was given to coastal areas, mainly the keys in the north of the province. In the research were applied: Geographic Information System tools; different proxy data techniques for the identification of paleohurricanes, including the use of hydrodynamic equations in one of these proxies; as well as elementary statistical analysis for the study of the impacts of tropical cyclones. The main contributions of the research: (1) achievement of the coastal flooding plane associated with Irma, and its comparison with other hazard scenarios; (2) new records of extreme wave events in Cuba; (3) identification of the potentialities of coastal boulders for the study of tsunamis and hurricanes in Cuba; (4) important results on the impacts of tropical cyclones on the agricultural sector, based on a compendium of ten cyclonic seasons. All these results contribute to a reduction of hurricane risks, determined by the decrease of vulnerabilities, mainly social and economic.

TABLA DE CONTENIDO

	<u>Pág.</u>
INTRODUCCION	1
1. HURACANES Y PALEOHURACANES. ESTADO DEL ARTE	9
1.1. Huracanes: características y zonas de ciclogénesis.....	9
1.2. Afectaciones asociadas a huracanes.....	10
1.2.1. Inundaciones costeras asociadas a huracanes.....	10
1.2.2. Afectaciones socioeconómicas de huracanes. Impactos en el sector agropecuario.....	11
1.3. Paleotempestología: uso de multiproxis.....	15
1.3.1. Uso de proxy data en estudios paleotempestológicos.....	15
1.3.1.1. Proxis comúnmente establecidos.....	15
1.3.1.1.1. Análisis granulométrico.....	15
1.3.1.1.2. Loss-on-ignition.....	16
1.3.1.1.3. Indicadores paleoecológicos: análisis micropaleontológico.....	17
1.3.1.2. Métodos geoquímicos.....	17
1.3.1.2.1. Escaneo del núcleo sedimentológico con Fluorescencia de Rayos X.....	17
1.3.1.2.2. Indicadores geoquímicos de isótopos estables.....	20
1.3.1.3. Datación y construcción cronológica.....	22
1.3.2. Huracanólitos en zonas costeras: aplicación como técnica proxi.....	23
1.3.3. Movimiento de huracanólitos: ecuaciones hidrodinámicas.....	24
1.3.4. Tsunamis vs Huracanes.....	25
1.4. La Paleotempestología. Origen y evolución en el contexto histórico y socioeconómico.....	26
1.4.1. Investigaciones sobre paleohuracanes a través de sedimentos de lagunas costeras: Estudio bibliométrico.....	28
1.4.2. Acumulaciones de huracanólitos en zonas costeras. Indicadores bibliométricos.....	29
1.4.3. Paleotempestología: breve resumen desde los Problemas Sociales de la Ciencia.....	30
1.5. Paleotempestología: Principales antecedentes en Cuba.....	32
1.6. Conclusiones parciales.....	34
2. MATERIALES Y METODOS	35
2.1. Inundaciones e impactos asociados al huracán Irma: información básica y métodos usados.....	35
2.1.1. Área de estudio: Ciego de Ávila.....	36
2.1.2. Datos meteorológicos e información del huracán Irma.....	37
2.1.3. Medición del límite máximo de inundación.....	39
2.2. Fuentes de datos de ciclones tropicales.....	40

2.3. Impactos asociados a organismos ciclónicos.....	40
2.3.1. Evaluaciones de Impactos Ambientales.....	41
2.3.2. Afectaciones asociadas a ciclones tropicales: fuentes de información.....	41
2.4. Estudio de núcleos sedimentológicos de una laguna costera. Metodología aplicada.....	41
2.4.1. Cayo Coco como área de estudio.....	41
2.4.2. Datos meteorológicos. Inundaciones costeras asociadas al huracán Irma.....	43
2.4.3. Registros del nivel del agua.....	44
2.4.4. Perfil de playa.....	44
2.4.5. Trabajo de campo. Muestras de sedimentos.....	44
2.4.6. Análisis de laboratorio de muestras sedimentológicas.....	44
2.4.6.1. Datación de las muestras.....	45
2.4.6.2. Tamaño de grano y proceso de ignición.....	46
2.4.6.3. Análisis de elementos geoquímicos.....	46
2.4.6.4. Análisis estadístico.....	47
2.5. Huracanitos en Cuba. Materiales y métodos para su investigación.....	47
2.5.1. Área de estudio: Cuba en el contexto del Caribe.....	47
2.5.2. Consideración de los principales antecedentes de la investigación.....	48
2.5.3. Trabajos de campo. Métodos aplicados.....	48
2.5.4. Ecuaciones hidrodinámicas para estudiar movimiento de huracanitos.....	50
2.6. Conclusiones parciales.....	51
3. HURACAN IRMA EN CIEGO DE AVILA: INUNDACIONES COSTERAS E IMPACTOS SOCIALES.....	52
3.1. Distribución espacial de las inundaciones costeras.....	52
3.2. Inundaciones costeras asociadas al huracán Irma. Comparación con otros escenarios de peligro.....	54
3.3. Efectos socioeconómicos en Venezuela y Chambas.....	58
3.4. Conclusiones parciales.....	63
4. PALEOHURACANES EN CUBA POR TECNICAS DE MULTIPROXIS.....	64
4.1. Paleohuracanes a través de sedimentos de una laguna costera.....	64
4.1.1. Inundaciones costeras en Cayo Coco.....	65
4.1.2. Registros del nivel del mar en la laguna.....	66
4.1.3. Perfil de Playa Larga.....	68
4.1.4. Perfiles litológicos de los núcleos de sedimentos.....	69
4.1.5. Resultados de datación.....	71

4.1.6. Análisis de componentes principales.....	73
4.1.7. Tamaño de grano y LOI.....	74
4.1.8. Elementos geoquímicos.....	75
4.1.9. Eventos y paleoeventos identificados en los perfiles sedimentológicos.....	77
4.1.10. Inundaciones costeras asociadas al huracán Irma. Implicaciones a la Paleotempestología.....	80
4.2. Huracanolitos en Cuba: una vía para estudiar paleohuracanes.....	83
4.2.1. Distribución espacial de huracanolitos en Cuba.....	83
4.2.2. Distribución espacial de huracanolitos. Comparación con otros resultados.....	85
4.2.3. Ecuaciones de Engel & May (2016). Aplicación en los bloques del norte de Ciego de Ávila.....	87
4.2.4. Huracanolitos vs eventos de oleaje extremo.....	89
4.2.4.1. Tsunamis en Cuba.....	90
4.2.4.2. Huracanes en Cuba.	91
4.3. Huracanes del pasado. Relación con índices climáticos (globales-regionales).....	94
4.4. Conclusiones parciales.....	97
5. CICLONES TROPICALES RECIENTES. IMPACTOS SOCIALES Y EN EL SECTOR AGROPECUARIO.....	99
5.1. Ciclones tropicales con incidencias en Ciego de Ávila (1851-2021).	99
5.2. Ciclones tropicales en Cuba. Impactos socioeconómicos en el periodo 2005-2017.....	101
5.2.1. Impactos sociales en Cuba asociados a tormentas tropicales y huracanes (2005-2017).....	102
5.2.2. Impactos económicos de ciclones tropicales a escala nacional (2005-2017).....	104
5.2.3. Impactos en el sector agropecuario en Cuba durante el periodo 2005-2017.....	105
5.3. Impactos de huracanes en el sector agropecuario de Ciego de Ávila. Estudio de casos.....	106
5.3.1. Incidencia del huracán Ike (2008) en Ciego de Ávila. Evaluación de impactos.....	106
5.3.2. Huracán Irma (2017) en Ciego de Ávila y sus impactos asociados.....	107
5.3.3. Impactos de huracanes en el Sector Agropecuario: Ike vs Irma.....	111
5.4. Huracanes vs Agricultura. Discusión.....	112
5.5. Conclusiones parciales.....	113
CONCLUSIONES GENERALES.....	115
RECOMENDACIONES Y PROYECCIONES DE INVESTIGACION.....	116
ANEXOS	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

INTRODUCCION

Conforme pasan los años, las más diversas ciencias colaboran para un bien común; la comunidad científica se ha percatado que pocas ciencias pueden presumir de sus avances por sí solas. Así es el enfoque de la Paleoclimatología, en la que se combinan diversas especialidades como vía para buscar respuestas a las interrogantes del actual cambio climático, utilizando como premisa fundamental el incremento de los conocimientos sobre el clima del pasado. Particularmente, a través de la Paleotempestología se ha demostrado que la actividad ciclónica posee carácter cíclico y alcanza períodos de máxima virulencia cada 1500 años, situación en la que estamos entrando; además, se ha corroborado que ocurrió un “período hiperactivo” en las costas de E.U. aproximadamente entre 3400 y 1000 años atrás (Liu & Fearn, 2000; Liu, 2004).

Actualmente toman fuerza estas investigaciones, realizadas a través de datos climáticos afines o proxy-data, ya que no se cuenta con series largas (un siglo o más), sobre todo las instrumentales; además, según Martín-Vide (2003), “... la percepción, siempre subjetiva y selectiva, realza ciertos episodios recientes como excepcionales o inalcanzados en el pasado, cuando el repaso de una serie climática larga correspondiente rescata del olvido la existencia de otros sucesos similares, si no más extremos, o atribuye a aquellos una cierta normalidad”.

Se conoce relativamente poco sobre la afectación de estos sistemas en el pasado, a pesar del desarrollo de un mayor número de trabajos dedicados a conocer más sobre el paleoclima cubano (Ortega, 1983; Peñalver et al., 1999; Pajón et al., 2001; Gregory et al., 2015). Estas investigaciones, en algunos casos pueden ser útiles a los estudios paleotempestológicos, debido a los nexos del desarrollo de los huracanes con las condiciones ambientales imperantes, especialmente las atmosféricas y oceánicas. Por ejemplo, la génesis y evolución de los ciclones tropicales es muy dependiente de la temperatura superficial del mar (Mitrani et al., 2017).

La costa norte de la región central de Cuba, con énfasis en Ciego de Ávila, ha sido muy favorecida con el desarrollo de trabajos centrados en el análisis de cambios ambientales en el área, conectando estos cambios con la vida aborígen durante el período Holoceno (Peros, 2000; Peros, 2005; Peros et al., 2007a). En dos áreas relativamente muy cercanas al sitio arqueológico Los Buchillones, también se desarrollaron estudios paleoambientales: en Laguna de la Leche y en Cayo Coco.

En Laguna de la Leche se obtuvieron dos resultados en la línea paleoambiental: la reconstrucción de alta resolución de la paleosalinidad (Peros et al., 2007c); el registro de 6000 años de cambios hidrológicos y ecológicos (Peros et al., 2007b). En Cayo Coco, a partir del análisis de muestras sedimentológicas del Cenote Jennifer, se realizó una reconstrucción ambiental de más de 9000 años y se identificó el evento 8,2 ka (Peros et al., 2017).

Las investigaciones sobre paleohuracanes y huracanes recientes se complementan entre sí. Los nuevos registros de los primeros contribuyen a enriquecer la cronología existente. Al mismo tiempo, la climatología y cronologías de huracanes en Cuba, constituyen referencias obligadas.

Varios trabajos sobre cronologías de huracanes se obtuvieron entre 1871 y 1993; pero otras publicaciones de alcance nacional sobre el particular a partir de 2000, lograron nuevos y mejorados resultados: Pérez et al. (2001); Limia et al. (2003).

También se han realizado estudios sobre el comportamiento histórico de los ciclones tropicales en provincias específicas de Cuba. Sin embargo, existe un gran vacío de conocimientos sobre los paleohuracanes en el Caribe, especialmente en Cuba (Oliva et al., 2017; Oliva et al., 2018), a pesar que a inicios de este siglo, ya se había señalado la necesidad de estudiar los huracanes del pasado en Cuba (Peros, 2005). Oliva et al. (2017), identificaron un solo trabajo sobre paleohuracanes en Cuba (Peros et al., 2015).

La vía más usada en el Atlántico occidental para estudiar los huracanes del pasado es a través del análisis de muestras sedimentológicas de lagunas costeras, a partir del transporte de sedimentos del mar a estos ecosistemas, generado por estos meteoros. Sin embargo, en el Pacífico y otras cuencas oceánicas, el archivo geológico que más se aplica es la acumulación de huracanolitos en zonas costeras (*coastal boulders*), y lo relacionan con otro tipo de evento de oleaje extremo (tsunamis) (Matos, 2017), donde son más frecuentes estos fenómenos (Sheffers & Kelletat, 2003; Goto et al., 2010b).

No obstante, también existen reportes de tsunamis en el Caribe. Engel et al. (2016) obtuvieron en Bonaire registros de paleotsunamis, que es una de las zonas más estudiadas en el Caribe en cuanto a la acumulación de bloques en el litoral costero (Aguirre et al., 2021).

Esta técnica tampoco ha sido aplicada en Cuba, con todas las potencialidades que ofrece para estudiar eventos de oleaje extremo del pasado. De ahí la necesidad de investigar en una primera fase, acerca de sus distribuciones y las posibles causas que las generan.

Los resultados derivados de estas investigaciones tienen una importante aplicación en los estudios de las inundaciones costeras, ya que las costas se convierten en el primer punto de contacto de los huracanes. Además, la frecuencia de estos fenómenos es considerable, así como los impactos socioeconómicos y ambientales generados por estos. De ahí la necesidad investigar sobre estas temáticas, incluidas las relaciones de los eventos del pasado y el presente, con vista a estimar cambios del futuro.

Las inundaciones costeras resultantes de los eventos hidrometeorológicos extremos, son uno de los principales problemas de las zonas costeras en Cuba. Este fenómeno no ha sido estudiado con la misma profundidad en todos los sectores de costa cubana. El Malecón Habanero ha sido el más favorecido en cuanto a número de estudios (Mitrani et al., 1984; Mitrani et al., 1994; Portela, 1998; Pérez-Osorio et al., 2001; Casals, 2002). Otras zonas entre las más estudiadas son: Cienfuegos (Regueira & Barcia, 2019); y el sector costero extendido desde Gibara (Holguín) hasta Punta de Maisí (Guantánamo) (Hidalgo et al., 2019).

En Ciego de Ávila también se ha estudiado el fenómeno (Córdova et al., 2018a); aunque limitado solo a un estudio de siete casos, desde 1964 hasta el 2017, aun así, los autores plantean que es una cronología. El trabajo contempla la inundación asociada al huracán Irma, aunque los autores solo tratan las características generales de cada inundación, para definir su clasificación según Hidalgo et al. (2017). Nunca antes se ha tenido en esta provincia, un estudio sobre el proceso físico y los impactos asociados a una inundación costera generada por un huracán de máxima categoría, lo cual constituye otra de las necesidades de investigación.

Respecto a los impactos en sectores económicos asociados a huracanes, con énfasis en la agricultura, constituye otra prioridad como tema de investigación. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), reconoce los daños en este sector asociado a eventos meteorológicos extremos, incluidos los ciclones tropicales.

Según la FAO (2018), los cambios en el clima están afectando la producción de cultivos relevantes para la alimentación mundial, y es probable que estos efectos aumenten en el futuro. Las inundaciones, sequías y tormentas tropicales son las que más afectan a la producción de alimentos.

Sin embargo, en Cuba son escasos los trabajos que han tratado los impactos de huracanes en el sector agropecuario, y los desarrollados han estado centrados en territorios específicos, como el

obtenido en Santiago de Cuba (Salmón-Cuspinera, 2020), o han sido estudios asociados a un ciclón tropical en particular, como el caso del huracán Irma (Vázquez-Moreno, 2021). Por lo que este tema constituye otra de las prioridades de investigación.

Esta investigación se fundamenta sobre la base del desconocimiento acerca de los huracanes del pasado en Cuba; el desconocimiento en Ciego de Ávila sobre las inundaciones costeras provocadas por un huracán de categoría 5 (máxima de la escala Saffir-Simpson); y, desconocidos también los impactos asociados a huracanes en Cuba, con énfasis en sectores económicos priorizados, como el agropecuario. Constituyen estas tres fundamentaciones el problema científico a resolver.

La **hipótesis de la investigación** es la siguiente: si se obtiene el plano de inundaciones costeras y la evaluación de los impactos en Ciego de Ávila, asociado al huracán Irma, como la primera experiencia de un huracán de máxima intensidad, y se reconstruye la actividad de huracanes del pasado en Cuba, con ello se contribuye a nuevos registros de paleohuracanes en Cuba y la cuenca del Atlántico, al mismo tiempo, estos nuevos conocimientos acerca de estos fenómenos extremos en el pasado y el presente, ayudarían a disminuir los riesgos asociados a huracanes, incluidos los impactos en sectores económicos importantes, como el agropecuario.

Como **objetivo general** de la investigación se plantea: Identificar huracanes del pasado en Cuba y analizar las inundaciones costeras generadas por el huracán Irma (2017), así como los impactos asociados a huracanes recientes, con énfasis en el sector Agropecuario, para reducir riesgos por huracanes intensos. Para lograr este objetivo se proponen cuatro **objetivos específicos**:

1. Obtener el plano de inundaciones costeras en Ciego de Ávila asociadas al huracán Irma.
2. Evaluar las afectaciones del huracán Irma en asentamientos costeros más vulnerables.
3. Reconstruir registros de paleohuracanes a partir del análisis de muestras de sedimentos de una laguna costera.
4. Identificar las potencialidades de los huracanólitos en la costa cubana, como una técnica de proxy data de interés para estudiar paleoeventos de oleaje extremo.
5. Evaluar los impactos generados por ciclones tropicales en Cuba, con énfasis en Ciego de Ávila y en uno de sectores económicos priorizados del país (el agropecuario).

La **novedad científica** de esta investigación radica en la identificación de nuevos registros de huracanes del pasado en Cuba, con su contribución a la base de datos de paleohuracanes en el

Atlántico; además, la evaluación de las inundaciones costeras e impactos asociados a un huracán de máxima intensidad (Irma) se identifica también como novedoso, clasificado como la única experiencia vivida por la actual población avileña (primero de este tipo desde 1851).

La **contribución a la teoría** consiste en nuevos registros de paleohuracanes para la cuenca del Caribe, Golfo de México y el Océano Atlántico. También se visualiza contribución teórica en cuanto a una de las técnicas proxis aplicadas en la investigación paleotempestológica. El estudio de paleohuracanes usando sedimentos de laguna costera como archivo geológico, está incluido entre los dos estudios pioneros en Cuba; no obstante, categóricamente es la primera vez que se desarrolla tomando en consideración los niveles del agua en el interior de la laguna, y las variaciones del perfil de playa adyacente a la laguna; ello contribuye a conocer más sobre este proceso físico en zona costera.

La **contribución a la práctica** de esta investigación, se visualiza desde cinco puntos de vista:

- El plano de inundación costera asociado al huracán Irma, tiene también un aporte práctico, al constituir una herramienta útil para rectificar los resultados de los Estudios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgos (PVR).
- Nuevos registros de huracanes del pasado a incorporar en la base de datos regional de paleohuracanes, data incluida en la web de la NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Association*).
- La actualización de la distribución espacial de huracanolitos en Cuba, incluida una capa SHP con la presencia de estos bloques en zona costera, de gran utilidad para nuevas investigaciones sobre eventos de oleaje extremo (tsunamis y huracanes), al mismo tiempo, útiles para estudios de inundaciones costeras en el pasado cubano.
- La reconstrucción de paleorecords de eventos de oleaje extremo, tiene también una gran utilidad práctica, ya que los nuevos registros de tsunamis y huracanes del pasado, serán básico para incrementar la percepción de riesgos asociados a estos fenómenos naturales.
- La evaluación de los impactos de ciclones tropicales al sector agropecuario, resumiendo dicho análisis en información de más de 10 temporadas ciclónicas, constituye un importante aporte desde el punto de vista económico y con mirada hacia la prevención de riesgos en este priorizado sector.

Actividad científica del autor

El autor ha aportado conocimientos a través de investigaciones sobre: Variabilidad y cambio climático, Paleotempestología, Bioclimatología, Fuente Renovable de Energía (FRE) con énfasis en la Eólica, tratamientos estadísticos de la precipitación, estudio de situaciones extremas de precipitación (intensas lluvias y procesos de sequía), riesgos asociados a eventos meteorológicos peligrosos. Se mencionan a continuación el proyecto relacionado con el tema central de la tesis, las publicaciones obtenidas en los últimos cinco años, así como la participación en eventos, tutorías de tesis y otras actividades científicas de interés para este ejercicio académico. Las informaciones son brindadas cronológicamente en orden descendente.

Proyecto científico: La investigación tributa al proyecto “Paleotempestología en Cuba: variabilidad espacio-temporal de la actividad de huracanes usando proxy data”, insertado en el Programa Nacional “Caracterización Integral de la Geología de Cuba”, programa coordinado por el Instituto de Geología y Paleontología (IGP); el proyecto fue aprobado con el código P104LH001-049 y el coordinador general del proyecto: Felipe Matos.

Publicaciones obtenidas entre 2019 y 2023

Año	Revista	WoSy/o Scopus	Grupo	FI
2023	Atmosphere Journal	WoS y Scopus	Grupo 1 (Q2)	3.110
2022	Revista de Teledetección	Scopus	Grupo 1 (Q3)	0.27
2022	Holos Environment	-	Grupo 2	-
2022	Scientia Marina	WoS y Scopus	Grupo 1 (Q2)	1.53
2022	Geoconservation Research	-	Grupo 2	-
2022	Springer (Capítulo de Libro)	-	Grupo 1	-
2021	Revista Avances	-	Grupo 3	-
2021	Universidad & Ciencia	-	Grupo 3	-
2021	Revista de Geografía Norte Grande	WoS	Grupo 1 (Q3)	0.26
2021	Journal of Water and Climate Change	WoS y Scopus	Grupo 1 (Q2)	2.803
2020	International Journal of Limnology	WoS y Scopus	Grupo 1 (Q3)	0.944
2020	Atmosphere Journal	WoS y Scopus	Grupo 1 (Q2)	3.110
2019	Bibliotecas. Anales de Investigación	-	Grupo 3	-
2019	Springer (Capítulo de Libro)	-	Grupo 1	-

Ello suma un total de 14 publicaciones en los últimos cinco años, con siete de estas en la WoS y/o Scopus, y de la totalidad, nueve son del Grupo 1, dos del Grupo 2 y tres del Grupo 3.

Participación en eventos en el periodo 2019-2023

- XXI Congreso de *International Union for Quaternary Research*, INQUA 2023 (Italia, 14-20/Julio/2023).

- Conferencia Internacional sobre Turismo "Entre la Recuperación y la Transformación" (España, 20-22/Octubre/2022).
- I Paleo Stats Conference: Chronology Building and Beyond (Montreal, Canada, 19-23/Junio/2022).
- XIII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo - VII Congreso sobre Cambio Climático (La Habana, 5-9/Julio/2021).
- XII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo (La Habana, 1-5/Julio/2019).
- II Convención Científica Internacional UCLV 2019 - I Conferencia Internacional de Procesamiento de la Información TICI 2019 (Villa Clara, Cayos de Santa María, 23-30/Junio/2019).
- II Convención Científica Internacional UCLV 2019 - III Conferencia Internacional sobre BioGeoCiencias (Villa Clara, Cayos de Santa María, 23-30/Junio/2019).

Se resume este indicador, con siete eventos, todos de carácter internacional. Un trabajo relacionado con el tema central de la investigación, fue aprobado y será presentado en el XI Congreso Internacional sobre Desastres (La Habana, Diciembre de 2023), además de otros trabajos que forman parte de un Panel Temático dedicado especialmente al huracán Irma; el Doctorando es el coordinador de dicho Panel.

Tutorías de tesis (tesis de grado relacionadas con el tema, en los últimos cinco años): (1) Tesis de Ingeniería Hidráulica (Universidad de Ciego de Ávila, 2022): Distribución espacio-temporal de la precipitación en los cayos Coco y Guillermo (Cuba) en el periodo 1961-2020; (2) Tesis de Ingeniería Hidráulica (Universidad de Ciego de Ávila, 2022): Caracterización del nivel de la superficie libre y la temperatura del agua en una laguna costera tropical durante la temporada poco lluviosa de 2013; (3) Tesis de Licenciatura en Geografía (Universidad de la Habana, 2021): Huracanolitos en Cuba. Condiciones naturales que favorecen su sedimentación; (4) Tesis de Licenciatura en Física (Universidad Central de Las Villas, 2019): Huracanolitos en Baitiquirí (Guantánamo), movidos por el huracán Matthew: análisis del proceso físico. Aplicación en estudios de paleodeposiciones.

Otras actividades científicas de interés

Diferentes premios, incluidos un Premio Provincial de Medio Ambiente (2023), uno de la ACC y siete reconocimientos del CITMA, uno de estos en 2022. Actualmente con categorías científica y

docente (ambas como Auxiliar); Secretario del Consejo Técnico Asesor (CTA) del CMP y miembro del CTA Provincial. Además, miembro de un Grupo Nacional de Expertos para Estudios de Prevención de Riesgos, y Jefe de un Programa Territorial (Medio Ambiente, Recursos Naturales y Cambio Climático). Miembro del Comité Científico del evento internacional BioGeoCiencias (2017-Presente).

1. HURACANES Y PALEOHURACANES. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se abordan aspectos relacionados con los temas centrales de la investigación, y que forman parte de los objetivos de la tesis.

En primer lugar, se realiza una revisión bibliográfica sobre los paleohuracanes o huracanes del pasado, como una vía para dar respuestas a interrogantes sobre el cambio climático, aplicando métodos establecidos en la Paleotempestología. Son consideradas las técnicas proxis usadas comúnmente en esta ciencia, y se visualiza la incorporación de los estudios de huracanólitos en las costas, como otro proxy data, para conocer más sobre el comportamiento de los eventos de oleaje extremo en el pasado (tsunamis o huracanes).

Se realiza también una búsqueda de los temas relacionados con las inundaciones costeras en Cuba y los impactos socioeconómicos asociados a huracanes, con énfasis en Ciego de Ávila y en el sector agropecuario. Lo primero, por la atención prestada a los asentamientos costeros más vulnerables, según el Plan de Estado Tarea Vida. Lo segundo, por ser este uno de los sectores económicos priorizados del país.

Además, el estudio de los paleohuracanes es evaluado desde el enfoque de los problemas sociales de las ciencias. Se analiza el origen de la Paleotempestología como ciencia relativamente nueva, y su evolución en el tiempo, contextualizado por factores sociales y económicos, y aplicando indicadores bibliométricos, desde la visión de otra rama del saber (Ciencia de la Información).

1.1. Huracanes: características y zonas de ciclogénesis.

Los niveles de impactos de un ciclón tropical en un territorio, dependen de las características del sistema, siendo significativo considerar la intensidad del mismo. Los organismos ciclónicos se clasifican según la intensidad de los vientos máximos sostenidos en superficie, considerando la media de este valor en un minuto. De esta forma, los ciclones clasifican como depresión tropical, tormenta tropical y huracán, cuando esta variable alcanza valores respectivos de: menor o igual a 62, entre 63 y 117, y mayor o igual a 118 km/h. A su vez, los huracanes tienen su propia clasificación de acuerdo a la escala Saffir-Simpson (Simpson, 1974) (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Clasificación de los huracanes según la escala de Saffir-Simpson.

Categoría	Presión central (hPa)	Viento máximo sostenido (km/h)	Marea de tormenta (m)	Daños
1	980	118 – 153	1,2 – 1,5	Mínimos
2	965 – 979	154 – 177	1,8 – 2,4	Moderados
3	945 – 964	178 – 209	2,7 – 3,7	Extensos
4	920 – 944	210 – 250	4,0 – 5,5	Extremos
5	< 920	> 250	≥ 5,5	Catastróficos

Las zonas de ciclogénesis o formación de ciclones tropicales, constituye otra información de mucho interés, ya que los niveles de afectación a un territorio dependen de la zona de formación y la evolución de su trayectoria. El Atlántico y Pacífico son dos de las cuencas más activas en cuanto a formación de organismos ciclónicos, y dentro de una misma cuenca, existen zonas con mayor frecuencia de formación que otras.

Córdova et al. (2007), dividiendo en siete zonas de ciclogénesis (ANEXO I, Fig. 1.1) el área del Golfo de México, Mar Caribe y Océano Atlántico, determinaron el porcentaje de incidencia de organismos ciclónicos en la provincia de Ciego de Ávila, considerando las estadísticas de formación de estos meteoros en cada una de las zonas de ciclogénesis.

Estos autores obtuvieron que D, A y F son las zonas con mayores probabilidades de formación; sin embargo, las mayores incidencias de ciclones tropicales en esta provincia, tienen sus orígenes en el Caribe Occidental (zona A) y el Caribe Oriental (B).

1.2. Afectaciones asociadas a huracanes.

1.2.1. Inundaciones costeras asociadas a huracanes.

El elemento determinante de la ocurrencia de las inundaciones costeras es la sobre elevación del nivel del mar, a partir del sistema meteorológico que la genera y el movimiento de dicho sistema respecto a la línea de costa, proceso en el cual las características físico geográficas de la zona afectada también juegan un papel importante, por ejemplo, la profundidad de las aguas, la pendiente marina y la batimetría. Bajo la incidencia de un huracán, siempre están presentes tres tipos de sobre elevación del nivel del mar (surgencia ciclónica, rompiente de oleaje y arrastre del viento); aunque predomine uno de estos en dependencia de las fuerzas actuantes y las condiciones naturales en la zona de impacto (Mitrani et al., 2017).

Mitrani et al. (2017) plantearon también que la frecuencia y magnitud de las inundaciones costeras en Cuba esta modulada por la variabilidad interanual y multianual, característica de los sistemas

meteorológicos causantes, principalmente, en presencia del evento El Niño – Oscilación del Sur (ENOS).

Otros estudios sobre inundaciones costeras han estado enfocados en el análisis de sus impactos sociales (Mitrani, 2006); análisis del fenómeno desde el punto de vista metodológico (Hidalgo, 2016); sus consecuencias en áreas protegidas (Casals et al., 2016); y su clasificación en las costas cubanas (Hidalgo et al. 2017).

En los últimos años, la frecuencia de los huracanes y los vientos extremos asociados a estos, fundamentalmente las inundaciones costeras, se han incrementado en el archipiélago cubano, con incremento notable tanto en frecuencia como intensidad del fenómeno (Ballester et al., 2010; Mitrani et al., 2017).

A partir de 1995 ha estado ocurriendo incremento del número de ciclones tropicales en el Atlántico (Ballester et al., 2010). Desde el 2005 se han generado inundaciones fuertes en todo el país, llegando a ser las más intensas en algunas provincias, según registros de cada territorio (Hidalgo et al., 2020); estos autores mencionan algunos ejemplos de inundaciones en zonas específicas, relacionándolas con el fenómeno asociado: Granma en 2005 (huracán Dennis); Malecón Habanero en 2005 (huracán Wilma); Isla de la Juventud en 2008 (huracán Gustav); Santiago de Cuba en la temporada ciclónica de 2012 (huracán Sandy); costas norte y sur de Guantánamo asociado al huracán Matthew (2016).

Otros trabajos se han dedicado al análisis de las inundaciones costeras e incidencias negativas ocurridas en las costas, asociadas a huracanes específicos. Las afectaciones del huracán Irma en zonas costeras fueron analizadas en Mayabeque (González-Ramírez et al., 2017) y la ciudad de la Habana (Casals-Taylor et al., 2019); pero con metodologías diferentes a las aplicadas en la presente investigación.

1.2.2. Afectaciones socioeconómicas de huracanes. Impactos en el sector agropecuario.

Los ciclones tropicales son considerados los eventos meteorológicos extremos más destructivos del planeta. Estos fenómenos pueden generar impactos, determinados por tres condiciones: fuertes vientos, inundaciones por intensas precipitaciones e inundaciones costeras. Los daños se hacen más severos cuando están presentes al unísono las tres condiciones, conduciendo al origen de multipeligro y multiriesgo.

En el área del Caribe y Estados Unidos, existen ejemplos importantes sobre impactos de huracanes muy intensos. El huracán de Galveston (1900) cubrió con la marea de tormenta toda la Isla de Galveston, provocando que se ahogaran alrededor de 5000 personas. Más de un siglo antes de este impacto, el huracán de 1780 ocasionó alrededor de 23000 víctimas en el SE del Caribe, cerca de la Isla Martinica. Ambos ejemplos aparecen recogidos en el resumen del Instituto de Meteorología (INSMET) de la temporada ciclónica de 1998 (García et al., 1998).

El rápido calentamiento global y la frecuente ocurrencia de ciclones tropicales obstaculizan el éxito del desarrollo sostenible a escala mundial (IPCC, 2013; Kalantari et al., 2019). De acuerdo a una de las bases de datos más grandes del mundo, vinculadas al control y gestión de los desastres naturales (EM-DAT), la media anual de daños económicos causados por organismos ciclónicos fueron de 69,9 billones de dólares USD, entre los años 2008 y 2017. Los ciclones tropicales constituyen los desastres naturales más destructivos y con mayor número de muertes a nivel mundial (Needham et al., 2015).

Tan et al. (2020) realizaron una evaluación de los impactos económicos asociados a ciclones tropicales, a partir de un análisis de datos bibliométricos. Estos autores realizaron un estudio sobre la producción científica de esta temática entre 1983 y 2019.

Según Tan et al. (2020), esta línea de investigación muestra una clara evidencia al incremento, con un solo trabajo en 1983, mientras que en 2019 se realizaron 44 investigaciones de este tipo, y de forma general, ese incremento ha sido más acentuado a partir de 2005, resaltando Estados Unidos y China como los países más productivos. Así mismo, estos autores mostraron los 14 trabajos más citados, señalando los autores, el método aplicado y la o las principales conclusiones obtenidas (Tabla 1.2). Todos estos trabajos tuvieron un alcance global, excepto tres de estos (Pielke et al., 2008; Nordhaus, 2010; Strobl, 2011), que fueron aplicados solo en Estados Unidos.

Tabla 1.2. Investigaciones que tratan los impactos económicos de los ciclones tropicales: los 14 trabajos más citados (Top 10, información adaptada de Tan et al., 2020).

Autores	Metodología aplicada	Conclusión principal
Pielke et al. (2008)	Método de normalización con datos históricos	No se observa tendencia al incremento de daños absolutos por Ciclones Tropicales (CT) en EUA
Knutson et al. (2010)	Análisis/Datos históricos	Daños de cambios proyectados difieren según modelos aplicados
Mendelsohn et al. (2012)	Modelo climático y daños con datos históricos	El cambio climático duplica los daños económicos, y estos concentrados en América (Norte y Central) y Asia Oriental
Emanuel (2005)	Construcción de un sistema de índices con datos históricos	El calentamiento puede incrementar el potencial destructivo de CT
Webster et al. (2005)	Análisis/Datos históricos	Tendencia en últimos 30 años a huracanes más frecuentes y destructivos
Nordhaus (2010)	Función intensidad- daños con datos históricos	La media anual de daños por huracanes se ha incrementado en EUA
Emanuel et al. (2008)	Modelo de análisis climatológico con datos históricos	Se observa aumento de frecuencia de CT en todo el mundo, con cierta tendencia a disminuir en el Hemisferio Sur, lo que provocará cambios en las pérdidas
Neumayer & Barthel (2011)	Método de normalización mejorada con datos históricos	No existen pruebas de que el cambio climático haya aumentado las pérdidas económicas normalizadas por CT
Bouwer (2011)	Análisis/Datos históricos	Aunque han aumentado los daños a la economía asociados a eventos meteorológicos, el cambio climático causado por la actividad humana no tuvo un impacto significativo en tales pérdidas
Elsner et al. (2008)	Modelo climático y análisis de datos históricos	El océano tiene más energía debido al calentamiento de los mares, lo que genera huracanes más intensos y destructivos
Toya & Skidmore (2007)	Modelo de regresión con datos históricos	Los países ricos tienen las mayores pérdidas económicas; los gobiernos más pequeños sufren menos pérdidas
Landsea et al. (2006)	Análisis/Datos históricos	Debe continuar el incremento de la intensidad de los CT y su poder destructivo, debido al aumento de la temperatura del mar
Strobl (2011)	Modelo de regresión con datos históricos	A escala anual, el impacto de los CT no afecta el crecimiento económico nacional de EUA
Bender et al. (2010)	Modelo de predicción de huracanes con datos históricos	La frecuencia de huracanes muy intensos (categorías 4 y 5), casi se duplicará para finales del siglo XXI, el impacto será más grave

Aunque las investigaciones muestran diferentes resultados, algunos de estos evidencian lo observado en los últimos años, referido a la ocurrencia de huracanes más intensos, por tanto, con mayor poder destructivo, relacionado esto con el incremento de la temperatura, incluido el sobrecalentamiento de los océanos, así lo corroboran cinco de estos trabajos (Emanuel, 2005; Webster et al., 2005; Landsea et al., 2006; Elsner et al., 2008; Bender et al., 2010). Este incremento del poder destructivo de los huracanes, conduce a que aumenten los impactos asociados a estos eventos extremos.

El impacto de los huracanes debe observarse no solo en la esfera social; la economía es también afectada por estos fenómenos. Aunque se plantea que particularmente la sequía causa más del 80 por ciento del total de daños y pérdidas en la agricultura, de forma general, las inundaciones, sequías y tormentas tropicales son las que más afectan a la producción de alimentos, asociados estos impactos a cambios en el clima, y es probable que estos efectos negativos aumenten en el futuro (FAO, 2018).

En este escenario de cambios, los impactos de estos eventos, fundamentalmente los huracanes, afectan la seguridad alimentaria y causan interrupciones adicionales en las cadenas de valor, lo que afecta además a la economía en su conjunto, particularmente en los países donde la producción agropecuaria tiene una participación relevante en el producto bruto interno (FAO, 2017). A pesar de la importancia que reviste el tema, este ha sido tratado en escasos trabajos en Cuba (Salmón-Cuspinera, 2020; Vázquez-Moreno, 2021). Los trabajos donde se analiza el impacto del cambio climático a este sector han sido tratados con mayor frecuencia. El INSMET, a través del Centro de Agrometeorología, ha desarrollado diferentes investigaciones en esta línea.

Centella et al. (2001) realizaron en Cuba la primera valoración de los posibles impactos del cambio climático en el sector agrícola, realizada además, en el marco de la Primera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC); pero no trataron de forma concreta los impactos de los huracanes en este sector. Así mismo ocurrió con la Tercera Comunicación de Cuba a la CMNUCC (Planos et al., 2013).

Considerando la importancia de este sector, como una de las prioridades económicas del país, se hace necesario cuantificar los impactos en la agricultura asociados a organismos ciclónicos.

1.3. Paleotempestología: uso de multiproxis.

La Paleotempestología es el campo de la ciencia que estudia los ciclones tropicales del pasado, usando un gran espectro de técnicas proxy en diferentes ambientes naturales (Liu, 2004). Estos tipos de análisis ayudan a los hidroclimatólogos a entender mejor los mecanismos de gran escala que intervienen en el origen y evolución de estos meteoros, como la temperatura de la superficie del mar y las teleconexiones océano-atmósfera, ello a través de la comparación de las reconstrucciones paleotempestológicas con modelos climáticos y otros proxis (Liu, 2013).

Extendiendo los registros históricos en el pasado por medio de archivos geológicos, se contribuye a comprender como las tormentas y huracanes pueden cambiar en el futuro (Liu & Fearn, 1993). A continuación se brinda información general de los proxis comúnmente establecidos en estudios paleotempestológicos, sin discutir las ventajas y desventajas de cada una. Para esto último se sugiere el trabajo de Oliva et al. (2017).

1.3.1. Uso de proxy data en estudios paleotempestológicos.

En este aspecto se abordan los proxis comúnmente establecidos: análisis granulométrico, pérdida por ignición (*Loss-on-ignition*, LOI en inglés) e indicadores micropaleontológicos. Luego se tratan los métodos geoquímicos: escaneo de muestras con Fluorescencia de Rayos X (XRF, por siglas en inglés) e indicadores geoquímicos de isótopos estables, que de los seis materiales más usados para análisis de isotopía (anillo de los árboles, estalagmitas, material orgánico contenido en las muestras, microfósiles calcáreos, corales y muestras de rocas), en el presente trabajo solo se abordan los tres primeros casos, aun así, solo se tratan aspectos generales. Finalmente, se dedica un acápite al proceso de datación de las muestras.

1.3.1.1. Proxis comúnmente establecidos.

1.3.1.1.1. Análisis granulométrico.

El análisis granulométrico de un núcleo sedimentológico puede revelar los cambios medioambientales del pasado, fundamentalmente los relacionados con el transporte de energía (Donnelly & Woodruff, 2007; Liu, 2013). Las capas de sedimentos más gruesos, comúnmente son usadas como evidencia de un cambio energético en el medioambiente, asociado al sedimento que desde el mar supera los límites de altura de una barrera natural (puede ser una duna), ello debido a una marejada u oleaje extremo (Donnelly et al., 2004; Donnelly & Webb, 2004).

Algunos autores han realizado este análisis con un enfoque más cualitativo, identificando la presencia de capas de arena visibles en el núcleo, atribuyendo estas acumulaciones a huracanes conocidos (Liu & Fearn, 2000; Donnelly et al., 2001a; Donnelly et al., 2001b; Scott et al., 2003; Hansom & Hall, 2009; Liu et al., 2008; Liu et al., 2011).

Un método cuantitativo y es ampliamente usado, consiste en tamizar las muestras sedimentológicas, separando las partículas con un tamaño límite, que generalmente se fija como umbral el valor $\geq 63 \mu\text{m}$ (Hippensteel & Martin, 1999; Reese et al., 2008; McCloskey & Keller, 2009; Williams, 2009, 2010; Kiage et al., 2011; Lane et al., 2011; McCloskey & Liu, 2013; Brandon et al., 2014; Donnelly et al., 2015; Mattheus & Fowler, 2015).

Los Analizadores de Tamaño de Partículas por Laser (*Laser Particles Size Analyzers* – LPSA, en inglés), es un nuevo método, que aunque más costoso es más preciso, ya que genera una distribución granulométrica en fracciones más finas que por la vía del tamizado mecánico (Donnelly & Woodruff, 2007; Horton et al., 2009; Boldt et al., 2010; Malaizé et al., 2011; Hawkes & Horton, 2012; McCloskey & Liu, 2012; Toomey et al., 2013; Brown et al., 2014; Naquin et al., 2014; Nikitina et al., 2014; Van Hengstum et al., 2014; Peros et al., 2015).

En la aplicación de este proxy, generalmente se intenta aislar los componentes minerales (carbonatos y siliciclásticos), para no sesgar los resultados de la distribución granulométrica con partículas orgánicas (más gruesas), que pueden no estar relacionadas con el nivel de energía (Oliva et al., 2017). Aunque no existe una definición clara sobre el método idóneo para separar los componentes minerales, existen dos vías que actualmente son aplicadas: combustionar la materia orgánica exponiendo la muestra en un horno a una temperatura de $550 \text{ }^\circ\text{C}$ (Boldt et al., 2010); disolver la materia orgánica en Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) (Malaizé et al., 2011).

1.3.1.1.2. Loss-on-ignition.

El proceso de ignición (LOI) constituye otro método comúnmente usado, que provee información de las tormentas del pasado, bajo la premisa que una capa de sobrelavado asociada a una onda extrema, tendrá menos contenido orgánico que los sedimentos de la laguna depositados durante periodos normales de sedimentación.

Por esta vía se cuantifica la materia orgánica, el carbonato total y el contenido siliciclástico, todo ello en función del peso seco de la muestra de sedimento analizada (McCloskey & Liu, 2012). Estos autores basaron su análisis utilizando un método similar al establecido por Ball (1964), consistente

en la combustión en un horno de alta temperatura, seguida del pesaje del residuo en una balanza de alta precisión, para calcular la masa perdida en el proceso de combustión.

1.3.1.1.3. Indicadores paleoecológicos: análisis micropaleontológico.

El método micropaleontológico usado más comúnmente es a través del análisis de la presencia de foraminíferos bentónicos (los que viven en el fondo marino) (Hippensteel & Martin, 1999; Peros et al., 2007b; Liu et al., 2008; Lane et al., 2011), y las mareas de tormentas pueden transportar y depositar en una laguna (por ejemplo), donde a menudo se conservan (Murray, 2006; Adomat & Gischler, 2016), por lo que la presencia de estas especies en estos ecosistemas es útil como indicador de paleohuracanes (Collins et al., 1999; Hippensteel & Martin, 1999; Scott et al., 2003; Horton et al., 2009; Lane et al., 2011; Hawkes & Horton, 2012; Hippensteel et al., 2013; Williams, 2013; Hippensteel & García, 2014).

En cualquiera de los casos, es siempre importante conocer la salinidad del entorno del sitio de estudio, para considerar aquellas especies que pueden desarrollarse de forma natural en el humedal (Gupta, 1999). Es esta precisamente una de las principales limitantes de este proxy, ya que la salinidad de un humedal puede variar por otros factores, y no estar asociada a la actividad ciclónica la presencia de foraminíferos en el sedimento (Peros et al., 2015). Entre los factores que pueden generar estos cambios, Peros et al. (2015) mencionan dos fundamentales: sequías de corta duración o intrusión marina relacionada con la ruptura de la barrera, como dos condiciones que pueden incrementar la salinidad de la laguna, ocurriendo un desplazamiento hacia especies más tolerantes a la alta salinidad.

Con el fin de detectar registros de actividad ciclónica en un núcleo sedimentológico, o para validar dichos registros, también se han utilizado otros indicadores ecológicos, tales como: diatomeas (Liu & Fearn, 1993, 2000; Liu et al., 2008; Hansom & Hall, 2009; McCloskey & Keller, 2009; McCloskey & Liu, 2012); dinoflagelados (Liu et al., 2008, 2011); polen (Liu et al., 2008; 2011; McCloskey & Liu, 2012), ostrácodos (Malaizé et al., 2011); o bivalvos (Van Hengstum et al., 2014).

1.3.1.2. Métodos geoquímicos.

1.3.1.2.1. Escaneo del núcleo sedimentológico con Fluorescencia de Rayos X.

En la última década, en estas investigaciones se ha introducido un número de proxis basados en datos geoquímicos. Uno de los procedimientos utilizados para generar dichos datos es la Fluorescencia de Rayos X (XRF, por siglas en inglés), que consiste en una técnica analítica

consolidada y bien establecida, que permite la obtención cuantitativamente de elementos químicos presentes en el testigo sedimentológico, a través de un escaneo de alta precisión (Kylander et al., 2011).

Uno de los equipos más utilizados en el proceso de escaneo es el ITRAX, de fabricación sueca, aplicado en investigaciones paleotempestológicas desde el 2007 (Donnelly & Woodruff, 2007; Boldt et al., 2010; Toomey et al., 2013; Donnelly et al., 2015). Este equipo permite lo siguiente: resolución de análisis hasta la escala sub-milimétrica; análisis de hasta 62 elementos, desde la gama del Aluminio hasta el Uranio; adicionalmente permite la obtención de una radiografía del testigo geológico analizado (núcleo sedimentario, testigo de estalagmita, etc.).

También existen estos equipos portables (pXRF), como el Olympus Delta Mining and Geochemistry hand-held XRF Analyzer (McCloskey & Liu, 2013), que aunque menos precisos (resoluciones de mm y cm), han sido muy útiles en trabajos de campo (Weindorf et al., 2014).

La tecnología XRF ha sido aplicada en estudios de paleohuracanes, con tres salidas fundamentales: (1) desarrollo de una radiografía del núcleo, con el fin de diferenciar las secciones sedimentarias más densas de las menos densas (en ocasiones no perceptibles visiblemente, Toomey et al., 2013), con la posibilidad de relacionar las porciones más densas con actividades ciclónicas (Boldt et al., 2010; Brandon et al., 2014); (2) para generar datos de elementos químicos con muy alta resolución, útiles también para relacionar con actividades ciclónicas (Woodruff et al., 2009; Naquin et al., 2014); (3) para datar secciones del núcleo, normalmente cerca de la parte superior, basándose en la identificación de elementos relacionados con actividades humanas, como el Mercurio y el Plomo, siendo útiles para validar resultados obtenidos por otros métodos de datación (Brandon et al., 2014; Donnelly et al., 2015).

Una ventaja importante de este método es que requiere invertir poco tiempo en la generación de datos, ya que en el proceso de análisis se generan automáticamente los datos necesarios. Según Oliva et al. (2017), esta técnica parece estar más aplicada en estudios paleotempestológicos de otras cuencas, como el Pacífico y Mediterráneo. No obstante, de forma general, del uso de esta técnica se tiene la experiencia de la conexión de elementos químicos muy específicos con la actividad de huracanes.

Woodruff et al. (2009) mostraron que el Sr es abundante en las conchas marinas, siendo utilizado como un buen indicador del registro de paleohuracanes en el sur de Japón. En otros trabajos se ha

usado la relación o el radio entre elementos químicos, por ejemplo, Si/Al y Zr/Al fueron usadas para identificar paleotormentas en núcleos sedimentológicos tomados en la costa sur de Francia, mostrándose que el incremento de estos radios estaban altamente correlacionados con el aumento del tamaño del grano en el sedimento (Sabatier et al., 2012).

Naquin et al. (2014) en un estudio de paleohuracanes del Océano Atlántico, aunque ya contaban con los resultados por la vía de LOI y granulometría, interpretaron la evidencia de sobrelavado (*overwash*) de tormentas, relacionando este proceso físico con un decrecimiento de indicadores químicos terrestres, como el Ti, Fe y Zn. Estos mismos elementos habían sido tratados por McCloskey & Liu (2013), identificados también como de origen terrestre, que al detectar incremento de sus contenidos en las muestras sedimentológicas, evidenciaron el transporte de sedimentos terrestres hasta el sitio de estudio, generado por marejadas ciclónicas.

Finalmente, el cambio de contenido de un elemento químico, detectado por la técnica XRF, puede relacionarse con el uso de la tierra o las actividades industriales (Oliva et al., 2017). Este método ha sido aplicado exitosamente en el sureste de Estados Unidos, donde los impactos humanos han sido significativos y es bien conocido el inicio de los impactos (Boldt et al., 2010; Donnelly et al., 2015). Además, esta técnica es muy útil para refinar la cronología obtenida por datación del ^{210}Pb . Se resume que esta es una técnica que comúnmente es menos aplicada. Sobre ello, Oliva et al. (2017) señalaron como posibles causas: primero, que existen otras técnicas más defendidas (como la granulometría); segundo, que aún no existe una comprensión total, sobre qué elementos o fracciones de elementos reflejan mejor el sobrelavado generado por un huracán; y tercero, la falta de acceso a estas tecnologías.

Sin embargo, la técnica es defendida por algunos autores, por las facilidades y rapidez del proceso de análisis. Cuvén et al. (2010) y Sabatier et al. (2012), demostraron que el tamaño del grano de los sedimentos están correlacionados con ciertos elementos, como el K, Fe y Ti. Además, las estimaciones del tamaño de grano generadas por XRF estaría con una mayor resolución, lo que permitiría detectar eventos muy puntuales o periodos de actividad ciclónica de menor duración, lo que puede conducir a que los núcleos con menor tasa de sedimentación proporcionen mayor información de paleoeventos (Oliva et al., 2017); aunque el tamaño del grano obtenido por esta técnica es cualitativa y de forma indirecta, y considerar el valor cuantitativo es muy útil para conocer la fuente de origen de los sedimentos (Cuvén et al., 2010). Además, los vacíos, grietas y superficies

irregulares del núcleo, también pueden provocar resultados erróneos por la técnica de XRF (Löwemark et al., 2011).

1.3.1.2.2. Indicadores geoquímicos de isótopos estables.

Los ciclones tropicales tienden a tener una firma isotópica única. El agua de lluvia asociada a huracanes pierden hasta un 10 % de los isótopos estables más pesados ($\delta^{18}\text{O}$), en comparación con el agua de lluvia “normal” (Lawrence & Gedzelman, 1996) (ANEXO I, Fig. 1.2), por lo que el uso de la química de isótopos estables es una técnica útil en este tipo de investigaciones (Frappier et al., 2007; Lawrence et al., 2008; Kolodny et al., 2009; Kilbourne et al., 2011; Li et al., 2011).

Algunos investigadores también han contemplado isótopos de Carbono, Nitrógeno o combinación de estos elementos (Frappier et al., 2007; Lambert et al., 2008; Li et al., 2011, Malaizé et al., 2011; Das et al., 2013). Los materiales típicamente analizados por isotopía, incluyen estalagmitas (Frappier et al., 2007); material orgánico extraído de núcleos de sedimentos (Lambert et al., 2008); los microfósiles calcáreos (como ostrácodos) en sedimentos lacustres (Lawrence et al., 2008; Malaizé et al., 2011; Das et al., 2013); muestras de rocas (Kolodny et al., 2009); anillos de los árboles (Li et al., 2011); y corales (Kilbourne et al., 2011). Por la importancia, considerando las potencialidades que ofrecen, a continuación se exponen tres vías de mucho interés científico en la Paleotempestología (los tres primeros casos que se mencionan).

Anillos de los árboles: Teniendo en cuenta que los valores de $\delta^{18}\text{O}$ en la celulosa de los anillos de los árboles, refleja principalmente la fuente de agua utilizada por el árbol, el valor de isotopía correspondiente a los ciclones tropicales debe relacionarse con la firma isotópica concentrada en los anillos de los árboles (Miller et al., 2006). No obstante, dependiendo de las condiciones edáficas y geomórficas, el agua asociada al CT puede ser capturada por la celulosa hasta unas pocas semanas después del evento (Miller et al., 2006).

Las especies arbóreas con sistemas radiculares poco profundos, como la mayoría de las especies de Pinos, son más afectadas por el agua del suelo, lo que la convierten en especies sensibles para detectar eventos ciclónicos (Anderson et al., 2002). Aun así, el drenaje del suelo es un factor importante a considerar en el estudio de esta relación, por lo que los valores isotópicos pueden ser un indicador fiable de la frecuencia de CT en el pasado; pero no de su intensidad (Miller et al., 2006).

Para estos casos, las incertidumbres de datación son debidas a anillos falsos o ausentes; aunque la solución de esta problemática radica en el diseño experimental, haciendo análisis con un conjunto de datos (generalmente se toman de 50 a 100 árboles), y la datación se hace cruzada, para desarrollar una cronología maestra (Speer, 2010), de manera que contribuya a seleccionar las muestras más fiables para el análisis isotópico.

Espeleotemas: Estas constituyen otra fuente prometedora para estas investigaciones (Malmquist, 1997; Frappier et al., 2007). Estas son acreciones formadas por la disolución de caliza o dolomita en las cavernas cársticas (Ford & Williams, 2007).

La solución calcárea por goteo se solidifica en capas, que en regiones con precipitaciones de estaciones bien definidas, puede producir características de escala anual. En el caso de las precipitaciones asociadas a CT, estas dejarán su firma isotópica del $\delta^{18}\text{O}$ en las espeleotemas (McDermott, 2004).

Frappier et al. (2007) reconstruyeron un registro de 23 años de actividad ciclónica utilizando una estalagmita de calcita en Belice. McDermott (2004) señala los ambientes cársticos como completamente protegidos de los factores meteorológicos exteriores, como la temperatura y la humedad, por lo que reflejan más fielmente los valores isotópicos relacionados con actividades ciclónicas. Este autor plantea además, que las cuevas suelen ser húmedas, condición que limita la evaporación del agua precipitada, limitando así el fraccionamiento cinético.

A pesar de ello, no todas las cuevas y espeleotemas son apropiadas para el muestreo. Frappier (2008) definió los criterios para la selección de muestras idóneas: (1) espeleotemas de crecimiento rápido, con el fin de garantizar el registro de los huracanes de corta duración; (2) cuevas rodeadas de suelos finos, de manera que permita una mejor infiltración del agua de precipitación relacionada con el evento; (3) espeleotemas que hayan sufrido el mínimo de alteración o recristalización.

Geoquímica orgánica: El uso de Proxis Geoquímicos Orgánicos (OGPs, por siglas en inglés) en estudios de paleohuracanes, se ha aplicado poco; sin embargo, pueden aportar nuevos conocimientos, allí donde las técnicas establecidas aún tienen interrogantes (Lambert et al., 2008; Das et al., 2013). Los OGPs pueden utilizarse para identificar la fuente de la materia orgánica (terrestre, lacustre o marina), básico para identificar cambios en el estado del humedal, que al mismo tiempo, pueden relacionarse con actividad ciclónica (Das et al., 2013). Por ejemplo, estos autores señalan que los isótopos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ pueden tener valores relativamente más bajos en

una laguna en estado “normal”, que cuando este ecosistema está inundado o inundado después de una tormenta.

En estos casos, los aportes de nutrientes procedentes del agua marina, combinado con una mayor exposición a la luz, estimularán el crecimiento de las algas (eutrofización, Lambert et al., 2008), y la materia orgánica de fuente marina podría tener mayores valores de $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ y C/N, comparado con los valores correspondientes a la materia orgánica de la laguna (Lambert et al., 2008; Das et al., 2013).

Estos indicadores fueron investigado en el Lago Shelby (Alabama, Estados Unidos), y se observó una estrecha correlación de los valores isotópicos de la materia orgánica del medio marino, con los valores de las capas de arena generadas por huracanes en la zona de estudio (Lambert et al., 2008). Los resultados de este estudio mostraron que 11 huracanes catastróficos golpearon esta zona costera en los últimos 682 años, y que la capacidad de detectar huracanes severos usando este método isotópico se incrementó significativamente sobre los proxies establecidos (Das et al., 2013).

1.3.1.3. Datación y construcción cronológica.

Los tres principales métodos de datación absoluta, aplicadas en las investigaciones paleotempestológicas, consisten en el uso de Carbono-14 (^{14}C), Cesio-137 (^{137}Cs) y/o Plomo-210 (^{210}Pb). Pocos trabajos han aplicado las tres vías de datación (Lane et al., 2011; Brandon et al., 2013; Van Hengstum et al., 2014); aunque aquellas investigaciones donde se aplicaron el ^{137}Cs y el ^{210}Pb como métodos principales, también se basaron de forma complementaria en el ^{14}C (Liu & Fearn, 1993; Donnelly et al., 2004; Donnelly & Woodruff, 2007; Woodruff et al., 2008; Boldt et al., 2010; Toomey et al., 2013; Williams, 2013; Brandon et al., 2014; Brown et al., 2014; Denomme et al., 2014; Nikitina et al., 2014; Peros et al., 2015). Estos apuntes están referenciados en Oliva et al. (2017).

Algunos estudios han utilizado otros medios para validar sus cronologías, como el uso de microfósiles marinos (Williams, 2013), polen (Donnelly et al., 2015) y otras concentraciones elementales, Titanio (Ti) por ejemplo (Woodruff et al., 2008). También se ha demostrado el uso eficaz del ^{137}Cs para datar paleoeventos específicos, ocurridos muy cercanos a las pulsaciones de la bomba de 1963 (Williams, 2013; Brandon et al., 2014).

La datación radiométrica moderna es otra vía en uso; pero con la limitante del llamado efecto reservorio o error de carbono antiguo, el cual se produce cuando la muestra tiene menos ^{14}C con relación a la abundancia del isótopo en el medioambiente, generando una edad radiocarbónica más antigua (Yu et al., 2007).

La principal limitante del método usando ^{210}Pb , consiste en la selección del modelo para calcular las edades, que los dos principales existentes son: Modelo de Concentración Inicial Constante (*Constant Initial Concentration* – CIC, siglas en inglés), y el Modelo de Tasa de Sedimentación o de Suministro Constante (*Constant Rate of Supply* – CRS, siglas en inglés). El Modelo CIC se aplica en sitios con tasa de sedimentación constante y el CRS en sitios con tasas sedimentarias variables; esto segundo puede ser lo habitual en estudios paleotempestológicos. Aplicar el CIC en un sitio con características del segundo caso, genera resultados erróneos (Ghaleb, 2009).

1.3.2. Huracanolitos en zonas costeras: aplicación en estas investigaciones.

Las acumulaciones de huracanolitos en zonas costeras están estrechamente relacionadas con los impactos de eventos de oleaje extremo en zonas costeras, por lo que constituye un tema de gran interés para la comunidad científica, por contribuir no solo a la modelación de estos procesos físicos a partir de fenómenos extremos conocidos, sino también a profundizar en el comportamiento de los tsunamis y/o huracanes del pasado.

Estas acumulaciones han sido objeto de estudio en varias zonas geográficas a escala mundial, considerando los tsunamis y huracanes como causas de la generación de estos procesos costeros (Scheffers, 2004; Scheffers et al., 2005; Scheffers & Kelletat, 2006; Goto et al., 2007; Goto et al., 2009).

El primer trabajo realizado en Cuba sobre esta temática fue desarrollado por Núñez Jiménez (1959), considerado además uno de los pioneros en esta temática en el Caribe. Este autor utiliza el término “huracanolitos” para identificar los bloques depositados en las costas, teniendo en cuenta los huracanes como la principal causa, y con el requisito que los bloques tengan dimensiones superiores a un metro de longitud (eje mayor). De esta manera, en el trabajo serán utilizados indistintamente los calificativos: huracanolitos, *boulders* o bloques.

Estos temas están muy relacionados con el Cambio Climático y con las variaciones del comportamiento de frecuencia e intensidad de determinados eventos meteorológicos extremos, que a su vez se relacionan con la vulnerabilidad y los riesgos en zonas costeras.

Cuba también se encuentra afectada por estos cambios; además, sus características de insularidad la hacen más vulnerables a los efectos del cambio del clima, como el aumento del nivel del mar y el incremento de frecuencia e intensidad de eventos extremos (IPCC, 2014).

Aunque a escala mundial, acumulaciones de estos bloques en zonas costeras han sido utilizadas para estudiar huracanes del pasado (Aguirre et al., 2021), este archivo geológico no está identificado oficialmente como una de las vías en los estudios paleotempestológicos. Así lo evidencian los resultados de Oliva et al. (2017), que en la revisión realizada sobre las técnicas proxias que se aplican en este tipo de investigación, no mencionan los *boulders*.

Además, en algunos tramos costeros de Cuba existe presencia de bloques de grandes proporciones, movidos o transportados por huracanes conocidos. También existen bloques, que por su textura y otras características físicas, son considerados bloques antiguos, los cuales pueden contribuir a identificar nuevos registros de eventos de oleaje extremo en la mayor isla del Caribe. Urge así la necesidad de contemplar este archivo geológico en las investigaciones sobre paleohuracanes, especialmente en el Caribe, zona geográfica con escasos estudios paleotempestológicos, señalado al mismo tiempo por Oliva et al. (2017).

En el caso del estudio de los bloques, específicamente en la búsqueda de identificación del paleoevento o los paleoeventos causante(s) de sus movimientos, el proceso de datación es por otra vía. El método más usado es por medio de la aplicación de Fotoluminiscencia (Brill & Tamura, 2021).

1.3.3. Movimiento de huracanolitos: ecuaciones hidrodinámicas.

Nott (2003) fue el pionero en la obtención de las ecuaciones hidrodinámicas para el transporte de los *coastal boulders*, basando los análisis en tres escenarios: *boulders* de unión limitada, *boulders* sumergidos, *boulders* subariales. La ecuación fue ajustada por Nott & Bryant (2003). En 2011 se realizaron otros aportes: Nandasena et al. (2011) tuvieron en cuenta el modo inicial de transporte (deslizamiento, rodamiento, saltación o elevación), mientras que Frohlich et al. (2011) estimaron la velocidad mínima para el movimiento de los bloques, en relación con la altura de la onda.

Igualmente, Engel & May (2012) realizaron nuevas consideraciones a partir de una investigación sobre los *boulders* acumulados en Bonaire. Estas ecuaciones han sido comparadas entre sí; pero de forma general, todas han sido útiles para explicar el movimiento y transporte de estos bloques en zonas costeras.

1.3.4. Tsunamis vs Huracanes.

La mayoría de los estudios sobre los *boulders* han estado centrados en el análisis de los nexos de estas deposiciones con los tsunamis (Scheffers, 2002; Scheffers & Kelletat, 2003; Goto et al., 2010a); aunque también se han relacionado con los huracanes (Scheffers & Scheffers, 2006; Goto et al., 2011; May et al., 2015; Engel et al., 2016), mientras que otros trabajos han abordado ambos fenómenos (Scheffers, 2005; Goto et al., 2010b).

Este tipo de investigación también ha sido desarrollada en el Caribe. Las zonas costeras más estudiadas en el área caribeña, sobre esta temática, corresponden a la Isla Bonaire, Antillas Holandesas (Scheffers, 2002; Scheffers, 2004; Scheffers, 2005; Scheffers & Scheffers, 2006; Spiske et al., 2008; Engel et al., 2009; Engel et al., 2010; Pignatelli et al., 2010; Engel & May, 2012; Engel et al., 2013).

También han sido bien estudiadas la Isla Anegada, perteneciente a las Islas Vírgenes Británicas (Buckley et al., 2012; Atwater et al., 2014; Spiske & Halley, 2014; Atwater et al., 2017), e islas de Bahamas (Boss & Neumann, 1993; Hearty, 1997; Kindler & Strasser, 2002; Kelletat et al., 2004; Mylroie, 2008).

Sobre los tsunamis, algunos han tenido tratamiento especial en algunos trabajos, como el Tsunami del Océano Índico de 2004 (Goto et al., 2010c); y el Tsunami de Tohoku-oki, Japón, ocurrido en 2011 (Goto et al., 2012). También han sido tratados organismos ciclónicos específicos, como el caso del Super Typhoon Haiyan (May et al., 2015; Kennedy et al., 2016).

En estos estudios también existen las mayores incertidumbres, en la identificación del tipo de paleoevento (tsunamis o huracanes) como causa, ya que aunque son fenómenos físicos con características muy particulares, constituyen procesos costeros con cierto nivel de similitud, al analizar la sedimentación que genera cada uno de estos. En el caso específico de los bloques de Cuba, se ha considerado relacionar los de mayores dimensiones con los tsunamis; sin embargo, Matos (2017) tiene evidencias gráficas de bloques con longitud del eje central que supera los 10 m, que han sido movidos por huracanes intensos. Se deben proyectar nuevas investigaciones para dar respuesta a esta interrogante: cómo lograr una mejor diferenciación entre tsunamis y huracanes, en muestras de sedimentos lacustres y en los estudios de los *boulders*.

1.4. La Paleotempestología. Origen y evolución en el contexto histórico y socioeconómico.

Aunque el Dr. Kam-biu Liu, del Departamento de Oceanografía y Ciencias Costeras (Universidad de Louisiana, Estados Unidos), es considerado el padre de la Paleotempestología, el término fue introducido por el Dr. Kerry Emanuel, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (*MIT*, por sus siglas en inglés), Estados Unidos.

Para evaluar una ciencia específica, desde el enfoque de los Problemas Sociales de las Ciencias (PSC), es muy útil considerar el origen y evolución de la misma, tener en cuenta el contexto histórico de su surgimiento, y observar su desarrollo en su relación con factores sociales, económicos y científicos, sobre todo si se tienen en cuenta que algunas ciencias surgen a partir de otras, como es el caso de la Paleotempestología, una ciencia relativamente reciente (surgida en primeros años de 1990), por lo que es obligatorio recurrir a la historia de la ciencia que en particular se evalúa.

La historia de la ciencia es el campo de la historia que estudia el desarrollo temporal de los conocimientos científicos y tecnológicos de las sociedades humanas. Este campo de la historia también estudia el impacto que la ciencia y la tecnología han tenido históricamente en la cultura, la economía y la política.

Por otra parte, la ciencia es un cuerpo de conocimiento ya sea empírico o teórico, por una comunidad global de investigadores que hacen uso de técnicas específicas para observar y explicar los fenómenos de la naturaleza, reconocidas dichas técnicas como método científico. La historia de la ciencia recurre al método histórico, tanto de la historia intelectual como de la historia social.

Al mismo tiempo, cuando se abordan aspectos sociales resulta obligatorio tratar situaciones históricas contextuales, que abarcan como se mencionan más arriba, desde lo político hasta lo económico. También resulta imprescindible considerar el desarrollo tecnológico, por los nexos de este con el desarrollo socioeconómico y con el propio desarrollo de una ciencia en particular.

Una de las causas principales de preocupación y controversia en la filosofía de la ciencia ha sido la de preguntarse sobre la naturaleza "del cambio de teoría" en la ciencia. Tres filósofos en particular, son los que representan los pilares principales de este debate: Feyerabend (1975), quien argumentó que el conocimiento científico no es acumulativo o progresivo, y que no puede haber problema de demarcación en términos de método entre la ciencia y cualquier otra forma de investigación; Popper (1995), quien argumentó que el conocimiento científico es progresivo y

acumulativo; y Kuhn (2005), quien argumentó que el conocimiento científico se mueve gracias a la "Revolución científica" y no es necesariamente progresiva.

En no pocas ocasiones se hace necesario no solo conocer las teorías que encierra una ciencia en sí, sino conocer la evolución de esta en el tiempo, pues ello conduce al planteamiento de nuevas teorías y métodos de investigación, o al empleo de métodos propios de diferentes ciencias, dando origen a una nueva ciencia.

Por otra parte, cuando se habla de estudio de huracanes y paleohuracanes, se hace necesario visualizar los impactos de estos sistemas en zonas costeras, y mayormente son priorizados los impactos sociales, pero sin dejar de proyectar la protección de todo tipo de recursos (económicos y naturales) en estos espacios geográficos.

La necesidad de proteger nuestros recursos naturales sin frenar el aparejado desarrollo socioeconómico que necesitaba la sociedad cubana, impuso la aprobación de la Ley 81 de Medio Ambiente. Como parte de este proceso surgieron los Estudios de Impacto Ambiental (EIA), de gran aplicación en las evaluaciones de afectación de los ciclones tropicales y evaluaciones de impactos generados en los procesos constructivos, por medio de inversiones.

Los EIA tienen entre sus objetivos fundamentales el análisis y evaluación de daños y beneficios desde una perspectiva eminentemente social, tomando en consideración el fenómeno científico-tecnológico en el contexto social, tanto en relación con sus condicionantes sociales como en lo que atañe a sus consecuencias sociales y ambientales (Núñez Jover, 2004).

Realizando evaluaciones de incidencias de huracanes en zonas costeras, incluyendo análisis de cambios geomorfológicos (métodos propios de la Geología), fueron observados en un registro sedimentario algunas capas de arena, que al estudiarlas se relacionaron con huracanes que habían afectado el área. Surge así el primer trabajo aplicando estos métodos (archivos geológicos), para identificar huracanes del pasado (Liu & Fearn, 1993). A partir de esta fecha, estas investigaciones fueron aumentando, además de incorporarse nuevos métodos y tecnologías, para dar respuesta a nuevas interrogantes que surgían durante el desarrollo de las investigaciones.

A continuación se muestra, a través de indicadores bibliométricos, métodos característicos de otra rama del saber (Ciencias de la Información), como las investigaciones relacionadas con la Paleotempestología, tienen estrecha relación con el desarrollo económico de los países, por tanto, con las diferencias notables entre estos para acceder a revistas de alto impacto. Al mismo tiempo,

La temporada del año 2005 resultó ser excepcional desde muchos puntos de vista (Ballester & Rubiera, 2005). Fue una temporada “récord” en cuanto a número de Tormentas Tropicales y Huracanes, pasando al segundo lugar en el área atlántica a la temporada de 1933. En efecto, esta última alcanzó 21, mientras que en la temporada del 2005 se formaron 27, rompiendo en 5 ocasiones su propio “récord”. Fue también “récord” en cuanto al número de huracanes, al registrarse 15, de ellos 7 huracanes de gran intensidad, superado sólo por la temporada de 1950. La temporada del 2005 colocó a tres huracanes entre los 6 primeros lugares de presión central más baja en la cuenca atlántica. Estas condiciones la pudieron convertir en una temporada de mucho interés para los paleotempestólogos, para estudiar nuevos huracanes y al mismo tiempo, validar resultados ya obtenidos del registro de paleoeventos identificados.

Las instituciones más destacadas en cuanto a producción científica del tema son: Universidad del Estado de Louisiana – LSU (Departamento de Oceanografía y Ciencias Costeras) y la Institución Oceanográfica de Woods Hole – WHOI (Departamento de Geología y Geofísica), ambas de Estados Unidos. Aunque de forma general, se obtuvo que todas las instituciones contempladas en la red pertenecen a países del primer mundo, con mayor acceso a las tecnologías, por tanto, con las mayores potencialidades para este tipo de estudio, que exige de análisis de laboratorio de costos económicos elevados.

1.4.2. Acumulaciones de huracanolitos en zonas costeras. Indicadores bibliométricos.

Para este acápite también se tuvo en cuenta un estudio bibliométrico. En este caso, sobre las deposiciones de huracanolitos en las costas, a escala mundial y correspondiente al período 1985-2017, a partir del análisis de la producción científica en seis fuentes de información (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Springer Link, Google Académico y Dialnet). Se tuvo en cuenta: la productividad científica por países (Fig. 1.4a) y las revistas que más publican sobre la temática (Fig. 1.4b).

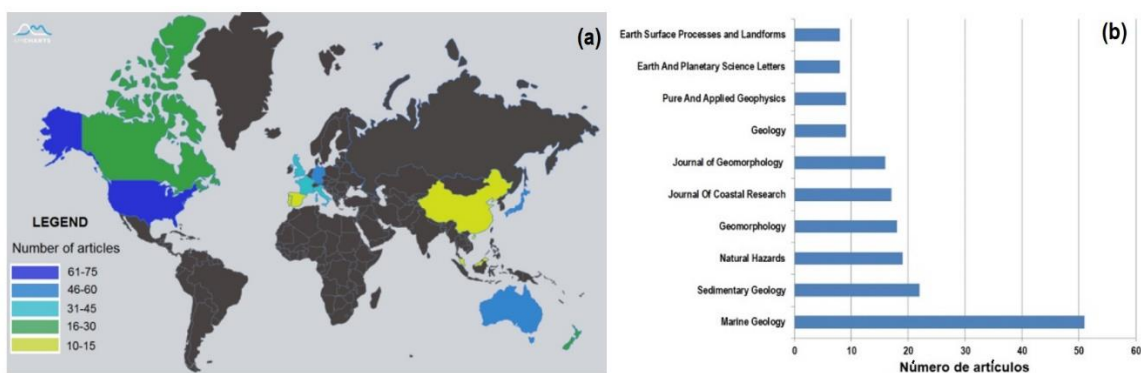


Figura 1.4. Distribución de artículos (Top 10) por países en estudios de *Coastal Boulders* (a). Número de publicaciones por revistas (b). *Elaboración propia.*

En el estudio se identificaron 62 países; pero en la evaluación de los países con número de artículos igual o superior a 10, el más destacado en la producción científica sobre la temática es Estados Unidos, con 73 artículos (18%), seguido por Australia, Alemania y Japón, con 59, 57 y 53 artículos, respectivamente.

En la distribución espacial por países, resalta que de los 12 países de mayor productividad, los de América Latina y países del Caribe están poco representados en el mapa. Estos últimos no tienen un lugar destacado en las investigaciones sobre los “*coastal boulders*”, al menos con artículos científicos en las bases de datos donde se realizó el estudio y se encuentran las revistas indexadas más importantes.

En general, en el Caribe existen muy escasos trabajos en comparación con la producción a escala internacional. Ello es una fiel evidencia, que la mayor producción científica sobre el tema está muy centrada en los países más desarrollados.

En la información tabulada sobre las 10 revistas más destacadas en el estudio (revistas que más publican sobre los *boulders*), evidencia que son revistas incluidas en importantes bases de datos (WoS y Scopus). Entre estas, resaltan seis con más de 10 artículos: Marine Geology, Sedimentary Geology, Natural Hazards, Geomorphology, Journal Of Coastal Research y Journal of Geomorphology.

1.4.3. Paleotempestología: breve resumen desde los Problemas Sociales de la Ciencia.

Los últimos planteamientos del acápite anterior, tienen estrecha relación con los resultados obtenidos por Oliva et al. (2017) y Oliva et al. (2018); aunque el primer trabajo visualiza mejor este comentario. Estos autores contemplaron en sus investigaciones, referidas a paleohuracanes en la

cuenca del Atlántico, información contenida en 61 artículos científicos sobre el tema, obtenidos en el periodo comprendido entre 1993 y 2018.

Entre sus importantes resultados, señalan aquellas zonas donde existe vacío de información de paleohuracanes (Fig. 1.5), por ser zonas con escasos estudios del tema, o que hasta la fecha no han sido investigadas.

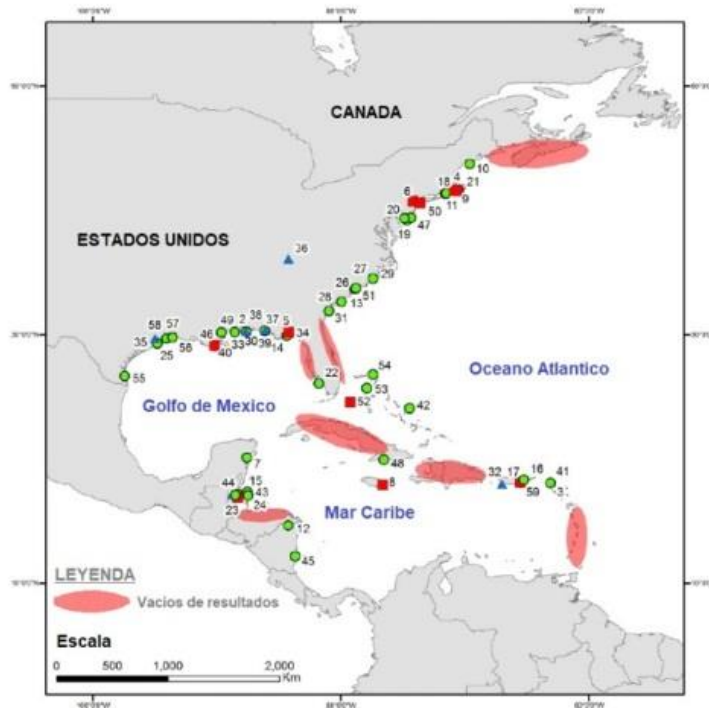


Figura 1.5. Sitios de estudios paleotempestológicos en la cuenca del Caribe, Golfo de México y Atlántico: los números representan los trabajos realizados en estos sitios (adaptado de Oliva et al. (2017)).

Son desconocidas las causas del por qué son señaladas áreas costeras de Honduras, La Florida (Estados Unidos) y Canadá. No obstante, se puede afirmar que las restantes áreas señaladas con vacíos de resultados de esta temática (Cuba, La Española y las islas del Arco de las Antillas Menores), es debido a situaciones económicas de estos países, con limitaciones de acceso a las tecnologías que exigen este tipo de investigación, así como las limitaciones financieras para tributar a revistas de alto impacto.

Este análisis corrobora que el mayor número de investigaciones en esta línea de trabajo, está concentrado en países desarrollados, con las mayores potencialidades para contar con laboratorios de primer nivel, por tanto, cuentan con las tecnologías que estos estudios exigen. En las ciencias y uso de las tecnologías, también se reflejan esas diferencias muy bien marcadas entre zonas

geográficas del planeta, muy relacionadas con las diferencias económicas entre los países, donde los que tienen las mayores limitaciones financieras no pueden contar con tecnologías de primer nivel, como también serán limitadas las publicaciones logradas en revistas de alto impacto, ya que en las grandes editoriales también prima la parte económica.

1.5. Paleotempestología: Principales antecedentes en Cuba.

Por medio del estudio de estratos sedimentológicos de una laguna costera de Santiago de Cuba, Peros et al. (2015) obtuvieron evidencias de afectaciones de huracanes en el pasado en esa porción del país, con periodo de mayor actividad de 2600 a 1800 AP. Constituye este el primer trabajo obtenido en Cuba, aplicando como proxy data el análisis de sedimentos de lagunas costeras.

En Cuba también han sido estudiadas las acumulaciones de *boulders* en diferentes espacios geográficos, tratando los huracanes y los tsunamis como causas de estos procesos físicos en zonas costeras. No obstante, existe mayor incertidumbre sobre la causa del movimiento de los bloques en el litoral costero cubano (Matos, 2017), debido a las dimensiones significativas en algunos casos. A pesar de que se ha incursionado en el estudio de los huracanes del pasado cubano (Matos, 2010; Peros et al., 2015), aun son insuficientes estas investigaciones.

No obstante, se han realizado más investigaciones sobre la presencia de huracanolitos en la costa cubana, que las relacionadas con técnicas comúnmente establecidas. Se enfatiza que por medio del análisis de sedimentos de laguna costera, existe un solo trabajo (Peros et al., 2015), sumando un nuevo sitio de estudio con la presente investigación.

Aguirre et al. (2021) realizaron un estudio bibliométrico aplicando el dominio "Huracanolitos en la costa de Cuba", usando el periodo de estudio 1959-2019. Estos autores recogen toda la producción científica en Cuba sobre este tema, mostrando que el número de estas investigaciones es escasa e inestable en el tiempo; no obstante, muestra una tendencia al incremento entre el 2007 y el 2019, con el mayor número de trabajos en el 2015 (Fig. 1.6).

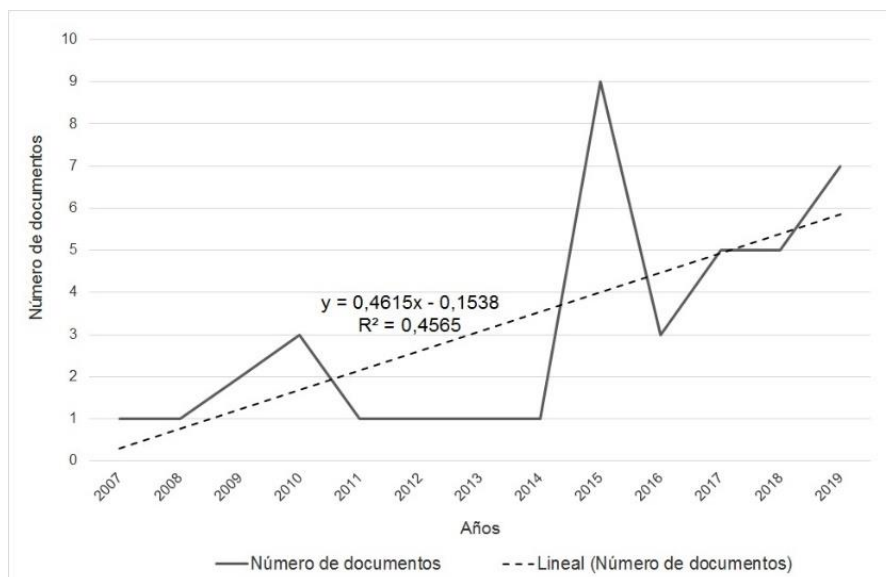


Figura 1.6. Evolución de la producción científica en el dominio "Huracanolitos en la costa de Cuba", correspondiente al periodo 2007–2019: número de documentos por años y análisis de tendencia. *Elaboración propia.*

En cuanto a los niveles de impactos de esta temática, aunque el 2015 recoge la mayor cantidad de documentos (nueve trabajos), concentrando casi el 25% del total de trabajos analizados, solo el 67% de estos han sido referenciados. Mientras que el 2017, que resume algo más del 10 % del total de los trabajos, experimentó el mayor número de citas (Fig. 1.7).

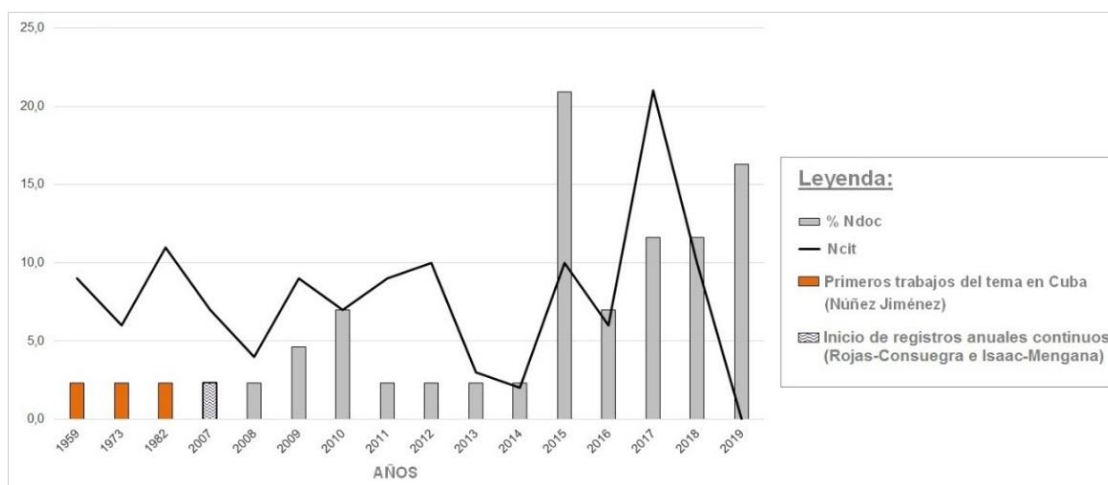


Figura 1.7. Relación entre citas y número de documentos del dominio "Huracanolitos en la costa de Cuba". Periodo: 1959–2019. *Elaboración propia.*

El área de investigación muestra el primer trabajo obtenido en 2007, con una investigación sobre el tema en una zona geográfica específica (Cojímar, La Habana), y dedicando el análisis de las

acumulaciones provocadas por el huracán Wilma en particular (Rojas-Consuegra & Isaac-Mengana, 2007). Este resultado se obtuvo luego de un prolongado periodo sin trabajos de esta temática (24 años), antecedido solo por el trabajo de Núñez Jiménez (1982). A partir de 2007 se observa al menos un trabajo anual, por lo que este resultado es considerado como un punto de cambio importante, a partir del cual se retoma el tema en Cuba.

Aunque el Dr. Iturralde-Vinent es identificado por Aguirre et al. (2021), como el más productivo, otros cinco autores son los únicos que cuentan con publicaciones en revistas y boletines científicos, distribuidos en tres trabajos: Rodríguez et al. (2016); Rodríguez & Acosta (2017); Magaz & Portela (2017).

1.6. Conclusiones parciales.

- El territorio avileño no tiene la experiencia de afectación directa por un huracán de categoría 5, según la escala Saffir-Simpson. Al mismo tiempo, no ha vivido las inundaciones costeras asociadas a un evento meteorológico de este tipo. Se hace necesaria la obtención del plano de inundación costera asociada a un huracán con esta intensidad.
- El desarrollo agropecuario es uno de los sectores económicos priorizados del país; sin embargo, recibe impactos considerables por organismos ciclónicos. Por otra parte, existen pocos trabajos que traten el tema a través de un compendio de impactos económicos en la agricultura. Constituye una necesidad evaluar los impactos asociados a ciclones tropicales en el sector agropecuario, vistos en diferentes temporadas ciclónicas, con el fin de visualizar los porcentajes de afectación con relación a otros sectores (sociales y económicos).
- Las investigaciones referidas al estudio de paleohuracanes se están incrementando a escala mundial; sin embargo, existe un gran vacío de conocimientos de esta temática en el área del Caribe, con énfasis en el caso Cuba. Deben proyectarse nuevas investigaciones en esta línea, considerando la tendencia actual al incremento de los huracanes recientes, con un aumento del impacto de huracanes intensos en Cuba en los últimos años.

2. MATERIALES Y METODOS

El documento de tesis contempla tres resultados, por lo que estos están repartidos en tres capítulos diferentes (3, 4 y 5); aunque relacionados entre sí. Al mismo tiempo, en este capítulo se desglosan los materiales y métodos, así como las técnicas estadísticas aplicadas, correspondientes a cada uno de estos resultados, incluyendo áreas de estudios diferentes en los tres resultados.

En la evaluación de las inundaciones costeras asociadas al huracán Irma, como estudio de caso del huracán más intenso que ha afectado la provincia de Ciego de Ávila (CA), el área de estudio es toda la provincia, excluyendo los cayos. La investigación de paleohuracanes vistos a través de dos técnicas de proxy data: sedimentos de laguna costera y *coastal boulders*, las áreas de estudio fueron Cayo Coco y Cuba, respectivamente. Los resultados de los impactos de los ciclones tropicales, con énfasis en el sector agropecuario, se analizan en un primer momento para Cuba y en un segundo momento, se trata a Ciego de Ávila como caso específico. A continuación se tratan los materiales y métodos correspondientes a estos tres resultados.

2.1. Inundaciones e impactos asociados al huracán Irma: información básica y métodos usados.

Durante la temporada ciclónica de 2017, entre los días 8 y 9 de septiembre, CA fue impactada por el huracán Irma, y se procedió a obtener el plano de inundaciones costeras generadas por este sistema, realizando cuatro expediciones científicas.

Durante los trabajos de campo se realizaron entrevistas a residentes afectados y se tomaron fotos, como evidencias gráficas de los impactos; además, se realizaron mediciones del nivel del agua alcanzado en algunas casas, georreferenciando dichos puntos de control.

Se recopiló la información generada por los organismos vinculados a la prevención de riesgos, fundamentalmente dirigentes de Gobiernos y Especialistas del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), en los municipios visitados. Los días comprendidos entre el 13 y el 15 de septiembre del 2017, se evaluaron los cuatro municipios con los mayores impactos (Chambas, Morón, Bolivia y Venezuela); el día 18 se realizó la evaluación del municipio Baraguá. En todos los casos se utilizó la guía de elaboración del informe de Evaluación de Impacto Ambiental de Desastres, elaborada por la Agencia de Medio Ambiente (AMA), la cual forma parte de lo indicado en la Directiva 1/2010 del Consejo de Defensa Nacional.

Se evaluaron fundamentalmente los impactos sociales asociados a este poderoso huracán. Localmente se profundizó en el análisis de las inundaciones en los asentamientos costeros más vulnerables.

2.1.1. Área de estudio: Ciego de Ávila.

Cuba es la mayor isla del Caribe. La provincia de CA, surgida como resultado de la división político administrativa de 1976, se localiza en la región central de Cuba (Fig. 2.1), limitando al norte con el Canal Viejo de Bahamas, al sur con el Golfo de Ana María, al oeste con la provincia de Sancti Spíritus y al este con la provincia de Camagüey. La ubicación de CA, de acuerdo a sus coordenadas geográficas, es como sigue: sur ($20^{\circ}50'00''N$), norte ($22^{\circ}27'00''N$), oeste ($79^{\circ}07'42''O$) y este ($78^{\circ}08'42''O$).

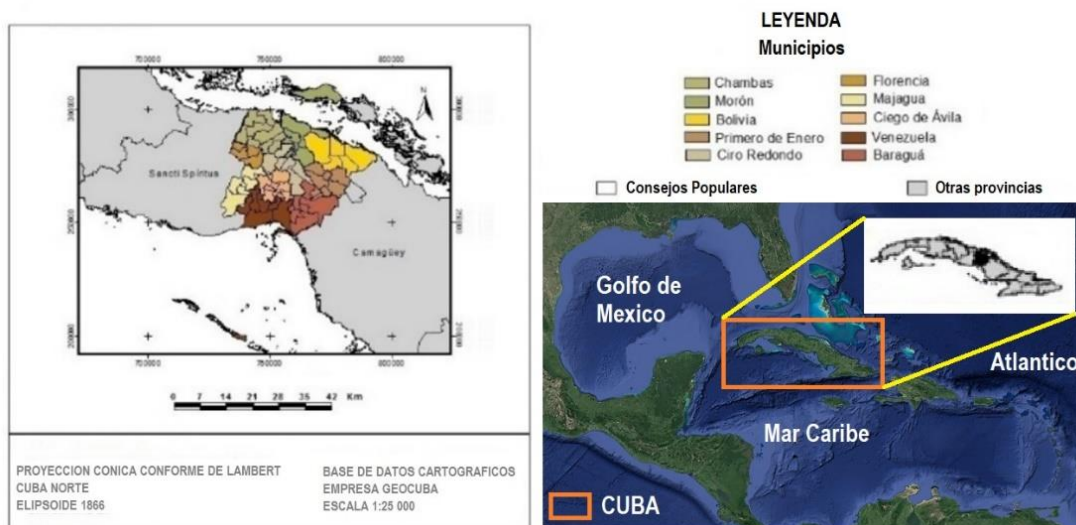


Figura 2.1. Mapa de localización del área de estudio. *Elaboración propia.*

CA tiene un área total de 6,971.63 km², incluidos 776 cayos (654 en la costa norte y 122 en la costa sur). No obstante, el área de estudio incluye solamente 6,124.69 km² (no incluido los cayos), lo que representa el 88 % del área total de CA. Por tanto, la longitud de costa considerada en el estudio fue de 268,70 km (no incluidos los cayos); incluyendo los cayos, la provincia tiene una longitud total de costa de 338,00 km (265 en la costa norte y 73 km en la costa sur). Además, la estructura del territorio cubano está organizada por provincias y estas divididas en municipios, que a su vez, están divididos en Consejos Populares (CP). La provincia de CA tiene 62 CP, distribuidos en 10 municipios.

El relieve de CA es predominantemente llano (Fig. 2.2), cubriendo su mayor parte la gran llanura Júcaro-Morón, como elemento geográfico muy significativo. Las elevaciones de Punta Alegre, Turiguanó y Cunagua, resaltan en esta gran llanura. Dentro de los límites geográficos de CA se incluye una porción de las montañas Bamburanao-Jatibonico, como las elevaciones más altas de esta provincia, con el Pico Merino como la mayor altura, con 396,6 m sobre el nivel medio del mar (s.n.m.m.). La Fig. 2.2 contiene la ubicación de las cuatro estaciones meteorológicas de CA, de las cuales fueron utilizados datos meteorológicos medidos durante el paso del huracán Irma por este territorio.

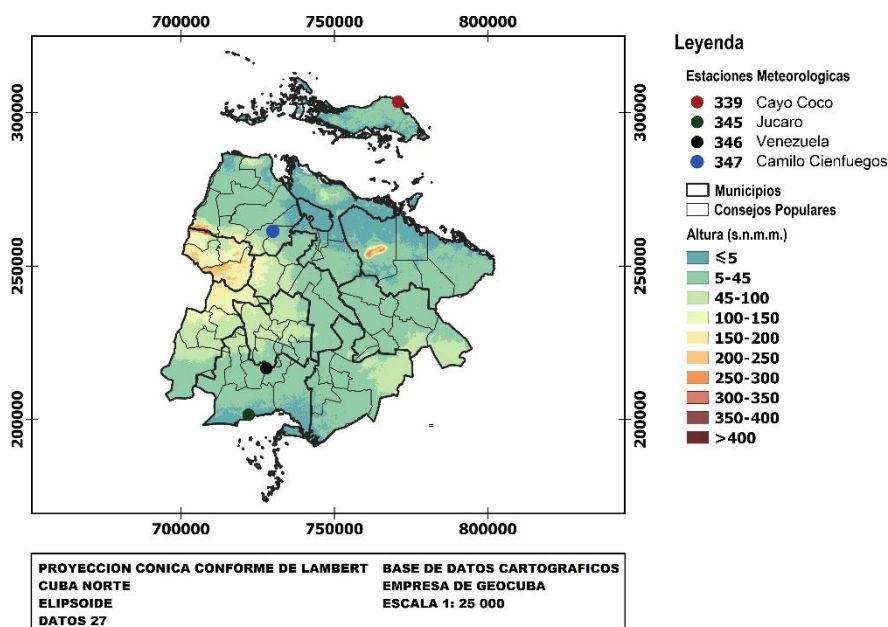


Figura 2.2. Mapa de altimetría de Ciego de Ávila (Cuba), con la ubicación de las estaciones meteorológicas de la provincia. *Elaboración propia.*

2.1.2. Datos meteorológicos e información del huracán Irma.

El huracán Irma ha sido uno de los más poderosos que se han desarrollado en el Atlántico Oriental (al este de 35°O). Además, fue el cuarto huracán y el segundo de gran intensidad de la temporada ciclónica de 2017.

Este sistema se desarrolló el 30 de agosto en Cabo Verde. Gracias a las condiciones favorables, se intensificó rápidamente, fundamentalmente debido a las temperaturas de las aguas del Caribe (Casals-Taylor et al., 2019). Con solo 24 horas, se convirtió en un huracán de categoría 2 y muy rápidamente, en un huracán de gran intensidad. Su intensidad fluctuó durante los días siguientes

debido a la formación del ojo; el 4 de septiembre cambió a categoría 5 con vientos de 295 km/h. Eso lo hizo el más intenso desde Félix, en la temporada de 2007.

El huracán Irma comenzó su influencia sobre el territorio de CA con un incremento notable en la velocidad del viento, intensidad de las precipitaciones y altura de las olas en la cayería norte desde la tarde del 8 de septiembre, extendiéndose gradualmente sobre toda la provincia durante la tarde-noche en la medida que se acercaba a esta provincia. Este sistema penetró por las inmediaciones de la cayería norte en los límites entre Camagüey y CA, al este de Cayo Romano con categoría 5 en la escala Saffir-Simpson de un máximo de 5 (Fig. 2.3a).

En su traslado al oeste, con su centro en movimiento sobre las bahías de Buena Vista y Los Perros en las primeras horas de la madrugada del 9 de septiembre, el sistema generó en este horario los mayores impactos en la porción norte de la provincia, incluyendo la cayería norte, zona geográfica de CA más cercana al centro del huracán (Fig. 2.3b).

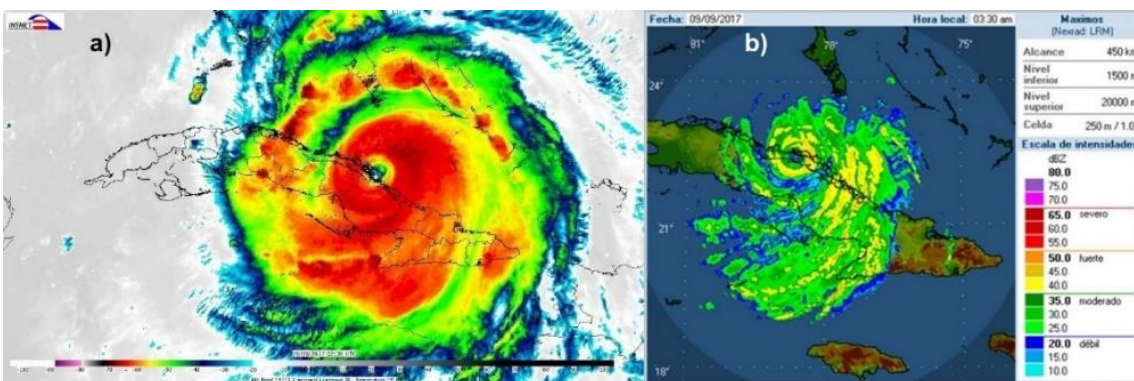


Figura 2.3. Imágenes con la ubicación del huracán Irma: imagen infrarroja del sistema sobre Cayo Romano (tomado de González-Ramírez et al., 2017), durante el primer contacto con el territorio cubano, el 9 de septiembre de 2017, a las 00:30 UTC (a); Radar de Camagüey, mostrando el centro del sistema en la Bahía de Buena Vista (tomado de <http://www.insmet.cu>), una porción del ojo cubre el suroeste de Cayo Coco (b).

La mayor incidencia con máxima categoría de huracán ocurrió en el territorio de CA, con un cambio a esa categoría a partir de las 2 am sobre Cayo Romano (provincia Camagüey), previo a su llegada a CA. A partir del punto de ubicación sobre Cayo Romano disminuye a categoría 4 en el litoral norte de Sancti Spíritus. El día 9 de septiembre en el norte de Matanzas, el huracán tenía categoría 3, pero a partir de la medianoche del día 10 se volvió a intensificar a categoría 4. Durante ese período (día 10), la costa de La Habana recibía vientos entre 100 y 110 km/h con rachas huracanadas, también con incidencias notables en el litoral habanero.

Según la trayectoria de Irma (http://hurricanes.ral.ucar.edu/repository/data/bdecks_open/), los mayores impactos en CA ocurrieron en la costa norte (Fig. 2.4); aunque el radio de vientos con categoría de tormenta tropical cubrieron hasta el sur de la provincia (Cangialosi et al., 2018), excepto en Jardines de la Reina, donde la incidencia fue como depresión tropical.

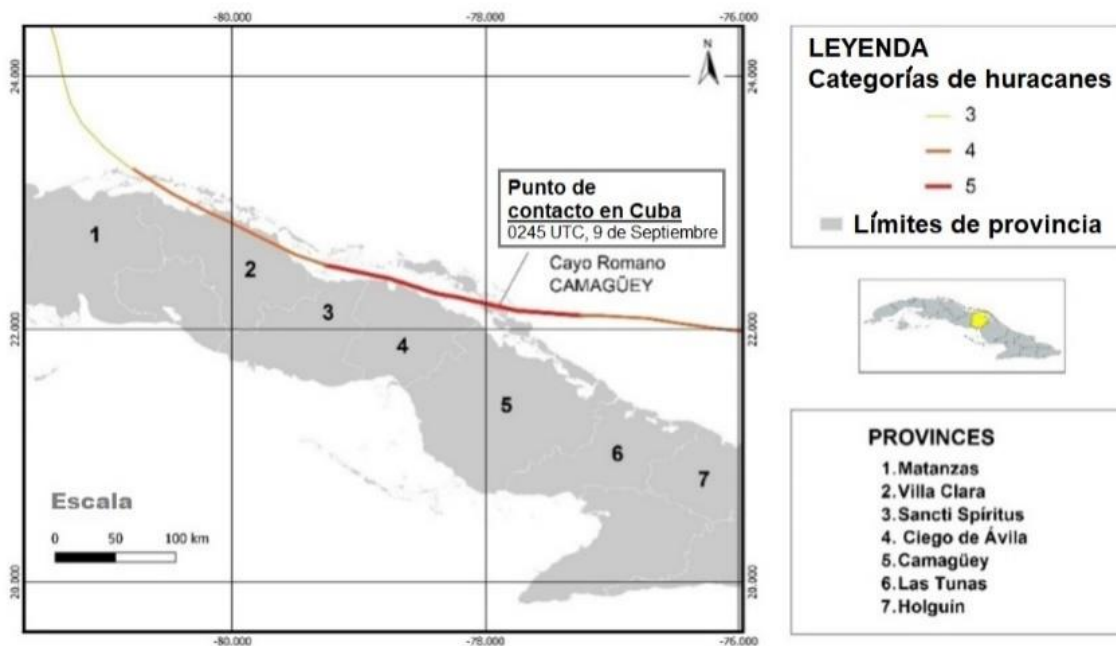


Figura 2.4. Trayectoria del huracán Irma en el territorio cubano. *Elaboración propia.*

2.1.3. Medición del límite máximo de inundación.

El método más empleado para la obtención de los planos de inundaciones, fue la observación directa de las marcas visibles de los alcances máximos de las inundaciones, registrando las coordenadas con un GPS (Global Position System), de marca GARMIN (error de 3 m), el registro de puntos de estas líneas-límites de inundación y variando las distancias entre estos puntos en dependencia de los obstáculos que impedían mediciones favorables. Las coordenadas registradas en el campo con GPS fueron ubicadas en el mapa Modelo Digital de Elevación (MDE) para la determinación de las cotas de inundaciones.

Generalmente estas distancias de mediciones fluctuaron entre 0,70 y 0,85 m, siendo más precisas en la costa norte. Además, fueron consultados avisos marinos e informes del estado del tiempo, emitidos por el Instituto de Meteorología. Como información complementaria se recopilieron fotos y videos de aficionados. Los mapas fueron actualizados con el empleo de la versión 3.16 del Q-GIS.

Se realizó una descripción del huracán Irma, como causa natural de estas inundaciones, considerando la escala de intensidades de los huracanes de acuerdo con las velocidades del viento, y su relación con la surgencia ciclónica asociada (ver Tabla 1.1).

Los planos de inundaciones asociados a Irma, fueron comparados con otros escenarios de inundaciones (Matos et al., 2022). En la costa sur la comparación se realizó con áreas de inundaciones asociadas a huracanes de categoría 1, mientras que en la costa norte se hizo con huracanes de categorías 3 y 5, debido a los mayores grados de similitudes. Al mismo tiempo, las áreas de inundaciones generadas por el huracán Irma fueron consideradas en las afectaciones de los asentamientos costeros más vulnerables.

2.2. Fuentes de datos de ciclones tropicales.

La información referida a los organismos ciclónicos fue recopilada de diferentes fuentes, incluidos artículos científicos. En primer lugar, fue básico la búsqueda de información de la base de datos de la NOAA (<http://www.noaa.gov>) y del Instituto de Meteorología (INSMET) (<http://www.insmet.cu>).

Fue consultado además, el resultado sobre los huracanes más intensos que han afectado a Cuba (Pérez et al., Limia, 2001), los huracanes con incidencia en CA durante el periodo 1851 y 2017 (Córdova et al., 2018b) y la cronología de inundaciones costeras ocurridas en esta provincia, entre los años 1960 y 2017 (Córdova et al., 2018a).

Para determinar los huracanes intensos que han impactado al territorio cubano, y los sectores costeros que han recibido mayor energía del oleaje, también fue utilizada la base de datos Hurdad 2 (www.nhc.noaa.gov/data/#tcr), desarrollada por el Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos de América y considerada la más completa en relación a estos fenómenos meteorológicos (Landsea et al., 2014). La misma dispone de los registros de los ciclones tropicales en la cuenca del Atlántico, desde 1851.

2.3. Impactos asociados a organismos ciclónicos.

Se consultaron las referencias bibliográficas que trataban el tema de los impactos de los ciclones tropicales en territorios y sectores económicos específicos, compilando a partir de estas informaciones básicas para la investigación.

2.3.1. Evaluaciones de Impactos Ambientales (EIA).

En este caso, la principal fuente de información fue el CITMA provincial, a través de los estudios realizados en el proceso de evaluación de impactos asociados a los huracanes que han afectado la provincia: EIA del huracán Ike (2008) y EIA del huracán Irma (2017).

2.3.2. Afectaciones asociadas a ciclones tropicales: fuentes de información.

Las afectaciones de las tormentas tropicales y huracanes, fueron extraídas del modelo 1502 de la Oficina Nacional de Estadísticas (ONEI), a través de consultas directas a la Oficina Provincial, para recopilar afectaciones en Ciego de Ávila. Las afectaciones a escala nacional fueron tomadas de la web de ONEI (<http://www.onei.gob.cu>).

Otras informaciones referentes a daños asociados a huracanes, fueron extraídas de una Base de Datos Internacional de Desastres (EM-DAT), una de las mayores existentes a escala global, con más de 26000 registros desde 1900. Esta base de datos es de acceso abierto, desde el Centro para la Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED por sus siglas en inglés), perteneciente a la Universidad Católica de Lovaina (Bélgica).

También se consideró la guía para estimar las pérdidas por eventos climáticos extremos en el sector agropecuario (FAO, 2018).

2.4. Estudio de núcleos sedimentológicos de una laguna costera. Metodología aplicada.

2.4.1. Cayo Coco como área de estudio.

Esta investigación se realizó en una laguna costera (Laguna Larga) de Cayo Coco (Fig. 2.5), cayo del Archipiélago Sabana-Camagüey, en la costa norte del centro de Cuba. Cayo Coco tiene una superficie de 370 km², dimensión que la convierte en la cuarta isla más grande de Cuba, luego de la isla mayor, Isla de Juventud y Cayo Romano. Larga es una laguna tropical de una dimensión relativamente pequeña (67.059 m²), ubicada en 22.538°N y 78.365°O (Fig. 2.6). Publicaciones han documentado los impactos antrópicos sobre la laguna (González-De Zayas et al., 2013; González-De Zayas et al., 2018), mayormente asociado al desarrollo del turismo desde 1992. El área fue impactada por el huracán Irma, en septiembre de 2017, depositando sedimentos en la laguna debido a los efectos del oleaje. La figura 2 recoge los puntos de muestreo de muestras de sedimentos, y la ubicación de dos estaciones (HOBO), a través de las cuales se midió la altura del nivel del agua generado por el huracán Irma en el interior de la laguna.

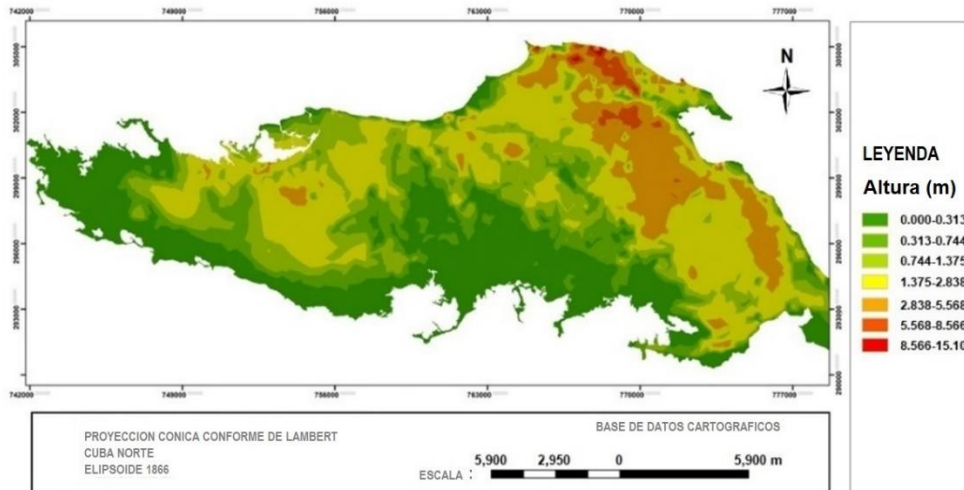


Figura 2.5. Mapa de altimetría de Cayo Coco Key, provincia de Ciego de Ávila (Cuba). *Elaboración propia.*

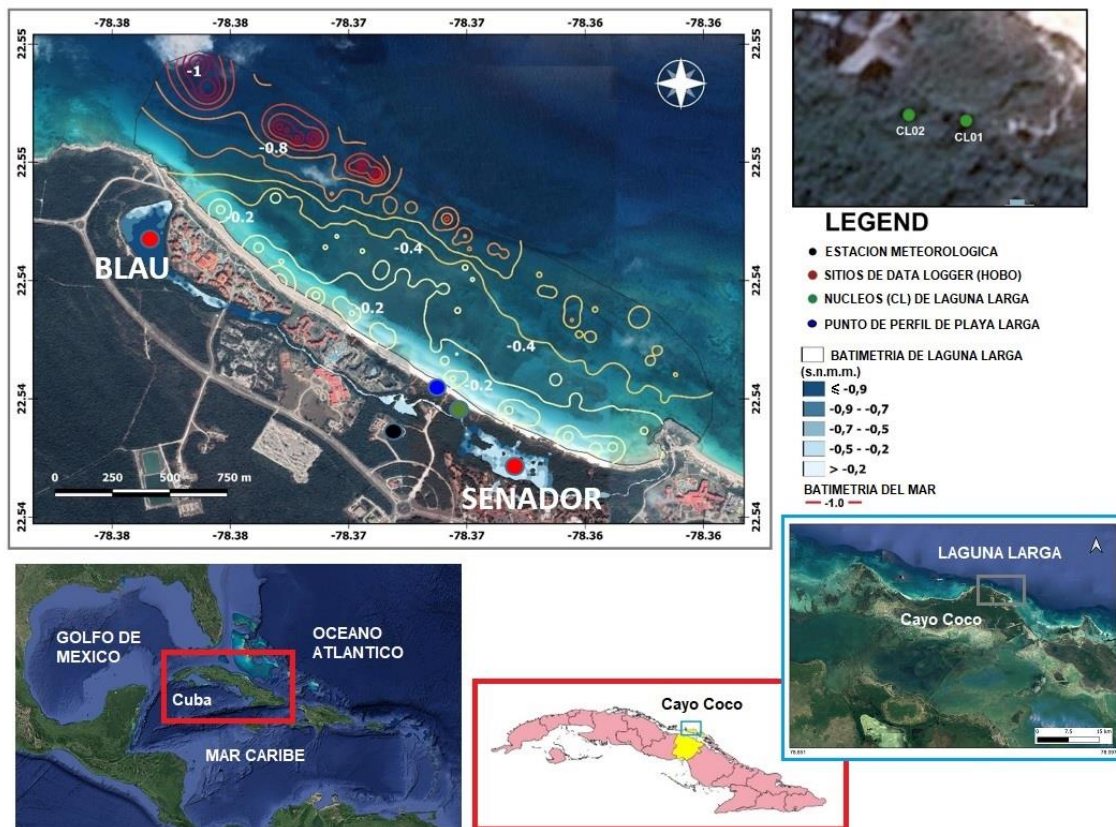


Figura 2.6. Área de estudio: Laguna Larga con la ubicación de los núcleos sedimentológicos y las estaciones HOBO. *Elaboración propia.*

La laguna se caracteriza por ser alargada y estrecha, con manglares que bordean sus canales. La alimentación natural está sujeta a la presencia de un estrecho canal que la comunica con el mar

por su porción más oriental, canal que tiene 8-15 m de ancho (González-De Zayas et al., 2013). Además, es una laguna somera, con profundidades que oscilan entre 0,2 y 0,9 m, con las mayores profundidades en porción occidental. Las mareas tienen una amplitud muy pequeña en la región. Desde el punto de vista geológico y sedimentológico, el entorno de Laguna Larga está constituido fundamentalmente por rocas carbonatadas del Pleistoceno Medio-superior (calcarenitas y biocalcarenitas), pertenecientes a la formación Jaimanitas. En el área ocupada por la laguna, sobre las rocas carbonatadas, yacen sedimentos areno-limosos de edad Holocénica con una potencia aproximada en su centro de 2 m de profundidad. A lo largo de la parte norte de la laguna se encuentra una duna de edad reciente, que sobreyace en algunos lugares la playa de igual nombre, a una duna más antigua con estratificación cruzada, perteneciente a la formación Guillermo del Pleistoceno superior. La arena de ambas dunas es de origen biogénico, así como las arenas que constituyen la playa hasta una profundidad aproximada de 3,50 m, lugares donde reaparecen las rocas carbonatadas de la formación Jaimanitas cubiertas por corales y gorgóneas. La laguna se caracteriza por poseer fondos sedimentosos fangosos, con la mayor tasa de sedimentación en la porción Este.

2.4.2. Datos meteorológicos. Inundaciones costeras asociadas al huracán Irma.

Los datos de la estación meteorológica de Cayo Coco (78339) de la red nacional del Instituto de Meteorología, fue utilizada para conocer el comportamiento de las variables durante la trayectoria del huracán Irma a través del área de estudio. Las principales variables que se consideran en estos casos son los acumulados de precipitación, la dirección y velocidad del viento, y la presión atmosférica, estas dos últimas más relacionadas con la intensidad del sistema. También fueron revisados los reportes del huracán Irma.

Se realizaron observaciones directas de las marcas visibles de los alcances máximos de las inundaciones, tomando las coordenadas del registro de puntos de estas líneas-límites de inundación, variando las distancias entre estos puntos según los obstáculos que impedían mediciones favorables. También se midió la altura del nivel del agua en algunas infraestructuras del turismo. Toda esta información fue georeferenciada usando un equipo GPS (*Global Position System*), marca GARMIN (error de 3 m). El trabajo de campo se realizó en toda la costa norte de Cayo Coco. Las coordenadas registradas fueron ubicadas en el mapa Modelo Digital de Elevación (MDE) para la determinación de la cota máxima de inundación. Como información complementaria

se recopilaron fotos y videos durante el trabajo de campo. Los mapas fueron elaborados con el empleo de la versión 3.16 del Q-GIS.

2.4.3. Registros del nivel del agua.

A través de sensores de variación del nivel del agua y la temperatura (estaciones HOBO) (ver González-De Zayas et al., 2021), ubicadas en Laguna Larga fue medido el nivel del agua en el interior de esta durante el impacto del huracán. Los datos fueron procesados con la versión 3.7.13 del software HOBOWare, aunque los gráficos fueron elaborados en Excel. En este análisis se tuvo en cuenta la marea en el área de estudio; se utilizó para ello el software WXTide 32 (versión 4.2).

2.4.4. Perfil de playa.

En un punto cercano a la toma de los núcleos sedimentológicos, fue realizado un perfil en Playa Larga, y se había monitoreado el perfil antes de la incidencia del huracán Irma. Ello permitió evaluar la variación de dicho perfil antes-después del impacto del huracán; las mediciones del perfil de playa fueron realizadas con un Teodolito de tipo brújula (GEOMAX). Estos análisis aparecen recogidos en Informe de Evaluación de Impactos del Huracán Irma en la provincia de Ciego de Ávila (UMA, 2017). Los datos primarios fueron re-evaluados. Los cálculos y gráficos fueron procesados en Excel.

2.4.5. Trabajo de campo. Muestras de sedimentos.

Para la identificación del sitio para la toma de muestra sedimentológicas se tuvo en cuenta la porción de la laguna con menor antropización, y su coincidencia con el punto más cercano al perfil de Playa Larga. Se tomaron dos núcleos (CL01 y CL02). Las muestras fueron tomadas el día 18 de enero de 2022, con un Livingstone Corer (diámetro interior de 5 cm). Los sedimentos superficiales no estaban alterados. Los núcleos fueron sellados con papel de aluminio en el campo, y almacenados en nevera (-6 °C). La longitud de los núcleos (CL01 y CL02) fue de 44 y 35 cm, respectivamente, mientras que la altura sobre el nivel medio del mar, tuvo valores respectivos de 0,33 y 0,31 m.

2.4.6. Análisis de laboratorio de muestras sedimentológicas.

La datación de las muestras fue analizada, para establecer relación con la profundidad del perfil sedimentológico. También fueron analizados el tamaño de granos, la pérdida por ignición y los elementos geoquímicos presentes en los diferentes estratos sedimentarios. Previamente se realizó un análisis litológico de cada núcleo, teniendo en cuenta la escala de Munsell, con el fin de

identificar las unidades o zonas litológicas con características de composición química y mineralógica más o menos homogéneas.

2.4.6.1. Datación de las muestras.

Se utilizaron dataciones para generar una cronología correspondiente a ambos núcleos sedimentológicos. La datación de las muestras se realizó usando ^{210}Pb y ^{14}C , este último aplicando Espectrometría de Masas con Acelerador (AMS del inglés *Accelerator Mass Spectrometry*).

El análisis de ^{210}Pb fue realizado en el Departamento de Geografía y GEOTOP, de la Universidad de Montreal en Quebec (GEOTOP & Département de Géographie, Université du Québec à Montréal - UQAM). El análisis de ^{14}C fue realizado por el Servicio de Datación por Radiocarbono, DirectAMS (Seattle, Washington) de Estados Unidos.

Para la datación con ^{210}Pb se prepararon 10 muestras de cada núcleo, hasta los 19 cm de profundidad. Estas muestras con un centímetro de espesor, se tomaron de forma alterna, iniciando y finalizando con las muestras en las profundidades 0-1 y 18-19 cm, respectivamente. El año base a partir del cual se calculó el ^{210}Pb fue 2022, el año en que se extrajeron los núcleos (puede ser también considerando la capa que contiene la deposición sedimentológica asociada al huracán Irma, 2017).

Para la datación radiocarbónica, se tomaron dos muestras de cada núcleo a profundidades mayores a los 19 cm. Del núcleo CL01 se tomó una ramita de una capa de turba de mangle (20-22 cm de profundidad), y sedimento tomado de una capa de espesor 2 cm (38-40 cm de profundidad). Las muestras tomadas de CL02 fueron de carbón vegetal, en las profundidades 20-21 y 30-31 cm. Las fechas de radiocarbono se calibraron utilizando los programas CALIB (Stuiver & Reimer, 1993) y el conjunto de datos IntCal09 (Reimer et al., 2009).

La tasa de acumulación de sedimentos presenta cierta variabilidad a lo largo del núcleo, por lo que se utilizó el modelo de tasa de suministro constante para crear un modelo de edad-profundidad para las profundidades entre 0 y 19 cm. El modelo de edad-profundidad, obtenido por la combinación de los datos de ^{210}Pb y ^{14}C , se generó en R (versión 3.0.1 de R Development Core Team, 2014), utilizando el paquete CLAM 2.2 (Blaauw, 2010), realizando una interpolación lineal entre los puntos de datos para generar estimaciones de edad para cada intervalo de profundidad o capa de sedimento.

Los sedimentos de Laguna Larga tienen distintas laminaciones que permitieron una correlación estratigráfica extremadamente fiable de CL01 y CL02. Esta correlación permitió generar un modelo combinado de edad-profundidad para ambos núcleos.

Para la datación con ^{210}Pb , fue necesario establecer años tomados como referencia, como los cambios ocurridos en el área de estudio, asociados a influencias antrópicas. Estos cambios se analizaron a partir de las variaciones ocurridas en cinco elementos químicos: Mercurio (Hg), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Cobre (Cu) y Cadmio (Cd).

2.4.6.2. Tamaño de grano y proceso de ignición.

El tamaño de grano de los sedimentos se midió a intervalos de 1 cm, tras eliminar el carbono inorgánico con HCl al 10% y la materia orgánica utilizando H_2O_2 al 15% con Hexametáfosfato de Sodio como agente dispersante. El sesgo de las mediciones estaba dentro del 5%. Fue tamizado el componente granulométrico clasificado como arena ($\geq 64 \mu\text{m}$), siguiendo las directrices de la taxonomía y la terminología. Para estimar el contenido de materia orgánica, se midió el LOI de cada muestra, midiendo después del secado en horno a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 12 h y la ignición en un horno de mufla a $550 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 4 h (Heiri et al., 2001). La medición de la masa de las muestras en cada fase del proceso se realizó con la balanza analítica Mettler AE 160, con índice de error de 0,0001 g.

El análisis del tamaño de los granos y proceso de ignición se realizó en el Laboratorio de Investigaciones de Cambios Climático y Ambiental (*Climate and Environmental Change Research Laboratory*, en inglés). A través de este procedimiento, para todo el perfil estratigráfico de ambos núcleos se obtuvo el comportamiento del contenido de agua, materia orgánica, minerales y tamaño de granos $\geq 64 \mu\text{m}$. Los datos fueron graficados con C2 Program (versión 1.7).

2.4.6.3. Análisis de elementos geoquímicos.

Los elementos geoquímicos se utilizan ampliamente para detectar la paleosedimentación, siendo la Fluorescencia de Rayos X la técnica analítica aplicada. En este estudio, se analizaron siete elementos (Sr, Zr, Br, Ca, Si, Ti y Ca). Los procesos de muestreo, conservación y pretratamiento siguieron métodos estándar. Este análisis se realizó en el Departamento de Geografía y Ciencias de la Tierra, de la Universidad de McMaster, Canadá (*Department of Geography and Earth Sciences, McMaster University, Canada*). Pequeñas porciones de ambos núcleos (partes superior e inferior del perfil) no fueron consideradas en los análisis, debido a la poca presencia de sedimentos

en estas profundidades, insuficientes para este tipo de técnica analítica. CL01 fue analizado entre las profundidades 1,0839 y 43,0339 cm; CL02 fue analizado entre las profundidades 1,6622 y 30,8622 cm.

2.4.6.4. Análisis estadístico.

Se aplicó el análisis de componentes principales (ACP) a los parámetros fisicoquímicos, resultados obtenidos a través de la medición de elementos geoquímicos (siete), tamaño de grano y proceso de pérdida por ignición. Usando el análisis de componentes principales se aplicó para cada núcleo sedimentológico (CL01 y CL02). La aplicación del ACP permitió identificar cuales parámetros tienen mayor peso en el proceso de sedimentación, correspondiente a cada núcleo (PCA01 y PCA02, respectivamente). El resultado de ambos análisis permitió identificar diferencias entre los núcleos, a pesar de la cercanía entre ambos; también contribuyó a definir las similitudes. El Programa Statistica (versión 10.1) fue usado en estos análisis.

2.5. Huracanolitos en Cuba. Materiales y métodos para su investigación.

2.5.1. Área de estudio: Cuba en el contexto del Caribe.

La investigación fue dividida en dos etapas. En un primer momento se consideraron los trabajos que trataron el comportamiento de las acumulaciones de huracanolitos, ya fuera de forma general (en ambas costas de Cuba – norte y sur) o en sectores costeros específicos. En una segunda fase se desarrollaron trabajos de campo, estos con dos finalidades: rectificar los resultados obtenidos por otros autores e incorporar nuevos sectores con la presencia de *boulders*. La investigación fue realizada en ambas costas (área de estudio, Fig.2.7).



Figura 2.7. Área de estudio para estudio de huracanolitos en Cuba. *Elaboración propia.*

La República de Cuba es un archipiélago constituido por la isla mayor de las Antillas (Cuba), la Isla de la Juventud y más de 1600 cayos, islotes e islas. Cuba está ubicada en el Mar Caribe, al oeste del Atlántico Norte. Al norte se encuentra el Estrecho de la Florida y el Canal Viejo de Bahamas; al este, el Paso de los Vientos; al sur, el Estrecho de Colón y el Mar Caribe; al oeste, el Canal de Yucatán. La superficie de Cuba es de 110 922 km², incluyendo las aguas territoriales y los restantes cayos e islotes. La isla de Cuba e Isla de la Juventud son las de mayor extensión superficial, la primera con 105 007 km², la segunda con 2 200 km² (Furrazola & Núñez, 1997).

La isla de Cuba (la mayor del archipiélago) se extiende desde el Cabo de San Antonio (Pinar del Río) hasta Punta de Quemado (Guantánamo), con una longitud de 1250 km; además, las porciones más estrecha y más ancha, se localizan en el occidente y zona oriental de Cuba, con valores respectivos de 31 y 191 km. Cuba cuenta con 5746 km de costa y 28,5 km de fronteras en la base naval de EUA, en la Bahía de Guantánamo. Del total de línea de costa, la longitud que corresponde a la costa norte es de 3 209 km, mientras que la costa sur tiene una longitud de 2 537 km (Planos et al., 2013).

2.5.2. Consideración de los principales antecedentes de la investigación.

Dos resultados científicos (Iturralde-Vinent, 2017; Magaz & Portela, 2017), constituyen los principales antecedentes que tratan los huracanitos en Cuba desde el punto de vista espacial. Rodríguez & Acosta (2017) también consideran los sectores costeros con bloques; aunque sin obtener un mapa con la distribución espacial de estas acumulaciones. Estos autores hacen referencia a los resultados obtenidos por Núñez-Jiménez (1982). Se tuvieron en cuenta estos cuatro resultados, para comparar con los obtenidos en el presente trabajo.

2.5.3. Trabajos de campo. Métodos aplicados.

Se desarrollaron 15 trabajos de campo entre 2017 y 2020, realizando mediciones y observaciones directas en los sitios de estudio, siendo esta la principal vía aplicada para identificar/rectificar sectores costeros con presencia de bloques. Estas expediciones se realizaron con financiamiento de un proyecto sobre Paleotempestología (Código: P104LH001-049).

Previamente al 2017 se realizaron tres expediciones científicas (para un total de 18 trabajos de campo, Tabla 2.1), dos en el Archipiélago Jardines de la Reina (AJR), Ciego de Ávila, y una en Guantánamo.

Tabla 2.1. Expediciones científicas realizadas para el estudio de huracanólitos en Cuba.

Año	Mes	Sitio de estudio
2016	Abril	Jardines de la Reina
2016	Octubre	Jardines de la Reina
2016	Diciembre	Guantánamo
2017	Abril	Cayos al Norte de Camagüey
2017	Agosto	Jardines de la Reina
2017	Octubre	Cayos Guillermo, Coco y Paredón Grande
2018	Junio	Guantánamo
2018	Agosto/25 a Septiembre/03	Jardines de la Reina
2018	Septiembre	Pinar del Rio
2018	Noviembre	Matanzas (ambas costas)
2018	Diciembre	Tunas - Península El Ramón (Antillas)
2019	Junio	Cayos de Villa Clara y Santi Spíritus
2019	Julio/08-13	La Habana
2019	Julio/16-24	Artemisa y Mayabeque (costa norte)
2019	Agosto	Cayo Paredón Pelado
2020	Enero	Guantánamo
2020	Marzo	Granma-Santiago de Cuba
2020	Octubre/17-19	Isla de la Juventud

Para los sitios que no pudieron visitarse se aplicaron otros métodos para evaluar la presencia y características de estas acumulaciones: el uso de informaciones suministradas por especialistas ambientales y la aplicación de técnicas de análisis visual de imágenes satelitales de Bing Maps, metodología similar a la aplicada para estudiar, los huracanólitos de Guantánamo (Engel et al., 2019) y los bloques de Trinidad (León Brito, 2021). Los resultados obtenidos por análisis de técnicas satelitales, fueron validados a través de resultados de sitios visitados. Además, se realizaron vuelos de drones, obteniendo imágenes aéreas de mejor resolución en dos sitios: AJR (abril/2016) e Isla de la Juventud (octubre/2020).

Tres sitios fueron evaluados por medio de la información suministrada por especialistas ambientales de los respectivos territorios: Sur de Cienfuegos y Sancti Spíritus, cayería norte de Matanzas y zona costera de Holguín, esta última extendida entre la Bahía de Nipe y límites políticos entre las provincias Holguín y Guantánamo.

Las técnicas de análisis de imágenes satelitales fueron aplicadas en cuatro sitios: costa sur de Artemisa y Mayabeque, Península de Zapata (Matanzas), costa sur de Camagüey y el área correspondiente a la Base Naval de Guantánamo.

El análisis visual de las imágenes satelitales, así como el estudio de los bloques por sectores costeros, y finalmente, la elaboración de los mapas correspondientes y medición de la longitud de

costa con huracanolitos, fueron realizadas mediante el uso de las herramientas de análisis espacial del SIG Q-GIS v.3.16.

En este acápite se aplicó el análisis de la Densidad de Kernel (Marshall & Hazelton, 2010), para estimar las áreas de trayectorias más probables de huracanes intensos, para el caso de la cuenca del Atlántico.

2.5.4. Ecuaciones hidrodinámicas para estudiar movimiento de huracanolitos.

En el capítulo dedicado a los antecedentes de la investigación, fueron referidas las ecuaciones hidrodinámicas que explican el transporte y movimiento de los bloques, desde sus formas iniciales (Nott, 2003) hasta las obtenidas por Engel & May (2012). Estas ecuaciones fueron aplicadas en el presente trabajo.

Cayo Paredón Pelado está relativamente cercano a Cayo Coco; además, en el primero se localizan dos bloques, que por sus dimensiones son de interés científico para utilizar en estudio de paleohuracanes. Por estas condiciones, en el caso de los bloques localizados en Cayo Paredón Pelado, fueron aplicadas las formulaciones matemáticas (Ecuaciones 1-6), consideradas para los tres escenarios y para ambos tipos de ondas: Tsunamis (τ) y Huracanes (H).

Ecuaciones (1 y 2) para el primer escenario (*boulders* de unión limitada) y según el tipo de fenómeno, como causa de las acumulaciones: Tsunami (H_T) o Huracán (H_H).

$$H_T = \frac{(\rho_b - \rho_w)V(\cos \theta + \mu \sin \theta)}{2\rho_w C_L abq} \quad (1)$$

$$H_H = \frac{(\rho_b - \rho_w)V(\cos \theta + \mu \sin \theta)}{0.5\rho_w C_L abq} \quad (2)$$

Ecuaciones (3 y 4) para el segundo escenario (*boulders* sumergidos), según el fenómeno: Tsunami (H_T) o Huracán (H_H).

$$H_T \geq \frac{0.5(\rho_b - \rho_w)V}{\rho_w aq} \frac{1}{(C_D c + C_L b)} \quad (3)$$

$$H_H \geq \frac{2(\rho_b - \rho_w)V}{\rho_w aq} \frac{1}{(C_D c + C_L b)} \quad (4)$$

Ecuaciones (5 y 6) para el tercer escenario (*boulders* subareales), según Tsunami (H_T) o Huracán (H_H).

$$H_T \geq \frac{0.5\mu V \rho_b}{C_D (acq) \rho_w} \quad (5)$$

$$H_H \geq \frac{2\mu V \rho_b}{C_D(acq)\rho_w} \quad (6)$$

A continuación, se describen los coeficientes y parámetros que intervienen en dichas ecuaciones (Tabla 2.2), definiendo los valores asumidos. En el caso de los coeficientes, se adicionan las referencias donde se tratan los valores que se asumen en el trabajo.

Tabla 2.2. Descripción de los parámetros de las ecuaciones (1-6).

Parámetros	Descripción	Valor	Referencia(s)
C_D	Coficiente de arrastre	1,95	Noormets et al. (2004); Paris et al. (2010)
C_L	Coficiente de suspensión	0,178	Nott (2003); Pignatelli et al. (2009); Switzer & Burston (2010); Nandasena et al. (2011)
q	Coficiente del área del <i>boulder</i>	0,73	Robinson et al. (2008)
μ	Coficiente de fricción estática	0,65	Benner et al. (2010)
ρ_w	Densidad del agua de mar	1,02 g/cm ³	
ρ_b	Densidad del bloque		
θ	Ángulo de inclinación del pre-transporte ajustado		
a, b, c	Dimensiones de los bloques (a: eje mayor; b: eje medio; c: altura)		
V	Volumen de los bloques		

2.6. Conclusiones parciales.

- Se explica el proceso de obtención del plano de inundación en zonas costeras de Ciego de Ávila, asociado a un huracán de máxima intensidad (Irma 2017).
- El plano de inundación costera generado por el huracán Irma en Ciego de Ávila, se comparó con las inundaciones costeras generadas bajo otros escenarios, definidos previamente para ambas costas de la provincia y para tres categorías de huracanes (1, 3 y 5).
- Se expone el procedimiento para el cálculo de los impactos socioeconómicos de los ciclones tropicales en el sector agropecuario, realizándose dicho cálculo a escala nacional; pero con énfasis en el territorio avileño.
- Se explica el procedimiento para el logro de nuevos registros de huracanes del pasado, usando diferentes técnicas de proxy data, con énfasis en los obtenidos a través de muestras de sedimentos de lagunas costeras. Se visualizan los huracanolitos acumulados en zonas costeras de Cuba, por sus potencialidades para este tipo de investigación (paleohuracanes).

3. HURACAN IRMA EN CIEGO DE AVILA: INUNDACIONES COSTERAS E IMPACTOS SOCIALES

3.1. Distribución espacial de las inundaciones costeras.

En la costa sur los mayores efectos estuvieron determinados por la surgencia, impactando mayormente a Júcaro (Venezuela). En el sector costero de Baraguá las principales afectaciones fueron sobre los manglares. Las inundaciones ocurridas en la costa norte fueron generadas por la combinación de tres causas: surgencia; oleaje, con olas que oscilaron entre siete y ocho metros; empuje de las aguas hacia el límite costero por los efectos de los fuertes vientos. Los asentamientos más afectados en la costa norte fueron Punta Alegre y Máximo Gómez, ubicados en el consejo popular de Punta Alegre (Chambas).

En la costa norte, el agua alcanzó límite de inundación hasta la cota de dos metros. En este litoral se tomó el mayor número de puntos de referencias, a partir del nivel del agua alcanzado en algunas viviendas. En Punta Alegre el nivel del agua alcanzó 0,9 m con respecto al piso de una vivienda (Foto 3.1, a). En Júcaro estas mediciones fueron de 1-1,30 m (Fotos 3.1, b y c).



Foto 3.1. Límite máximo de inundación, de acuerdo al nivel del agua alcanzado en casas de tres asentamientos costeros: Punta Alegre (a); Júcaro (b y c). *Fotos: Felipe Matos.*

El área de inundaciones en la costa norte fue superior al área de la costa sur, con valores respectivos de 644,6 y 103,0 km² (Fig. 3.1). Los mayores impactos sociales en la costa norte fueron en Punta Alegre; no obstante, desde el punto de vista espacial, las mayores inundaciones ocurrieron en los consejos populares de Turiguanó (municipio Morón), así como Bolivia y La Loma (municipio Bolivia) (Tabla 3.1). En la costa sur, Júcaro fue el consejo popular con mayor área de inundación y el poblado de mayores impactos asociados a Irma.

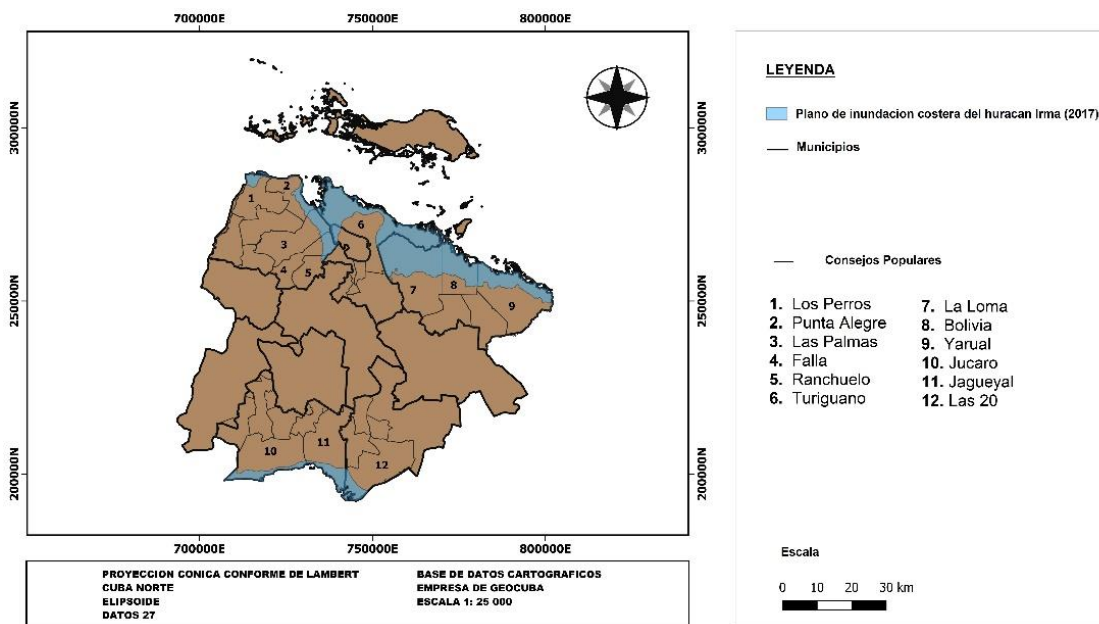


Figura 3.1. Plano de inundación costera por el huracán Irma, en ambas costas de Ciego de Ávila. *Elaboración propia.*

Tabla 3.1. Inundación costera (área), asociada al huracán Irma, en varios Consejos Populares (CP) de Ciego de Ávila. *Elaboración propia.*

Municipio	CP	Área (km ²)	Plano de inundación del Irma (km ²)	Plano de inundación del Irma (%)
Chambas	Los Perros	124.40	15.60	12.5
Chambas	Punta Alegre	86.06	21.00	24.4
Chambas	Las Palmas	155.60	50.10	32.2
Chambas	Falla	94.81	20.80	21.9
Chambas	Ranchuelo	62.42	1.70	2.7
Morón	Turiguanó	295.90	204.90	69.2
Bolivia	La Loma	306.60	164.70	53.7
Bolivia	Bolivia	124.30	78.60	63.2
Bolivia	Yarual	251.70	87.20	34.6
Venezuela	Júcaro	208.70	38.00	18.2
Venezuela	Jagüeyal	204.60	36.00	17.6
Baraguá	Las 20	201.80	29.00	14.4

Las mayores afectaciones ocurrieron por fuertes vientos y las inundaciones costeras. Los acumulados de precipitación aportados por el huracán Irma no influyeron en las inundaciones por intensas lluvias, ya que ocurrieron bajo condiciones de un estrés hídrico. Cuba transitaba por un largo proceso de sequía (2014 – 2017) (Barcia-Sardiñas et al., 2019).

En el caso de los otros dos fenómenos acompañantes del huracán (vientos fuertes e inundaciones costeras), las incidencias de los fuertes vientos cubrieron una mayor escala espacial (toda la provincia); sin embargo, las inundaciones costeras, fueron muy severas y alcanzaron áreas nunca inundadas desde que se tienen registros (Córdova et al. 2018a).

3.2. Inundaciones costeras asociadas al huracán Irma. Comparación con otros escenarios de peligro.

La comparación del plano de inundación costera asociado al huracán Irma, con las áreas de inundaciones correspondientes a los Estudios de PVR (Moreno-Suárez et al., 2011), en la costa sur se realizó para huracanes de categorías 1 (Fig. 3.2), considerando que el primer caso mostró un valor inferior al segundo, aun tratándose de un huracán intenso. De los consejos populares inundados en la costa sur, solo en Baraguá el área de inundación asociada a Irma superó la modelación realizada.

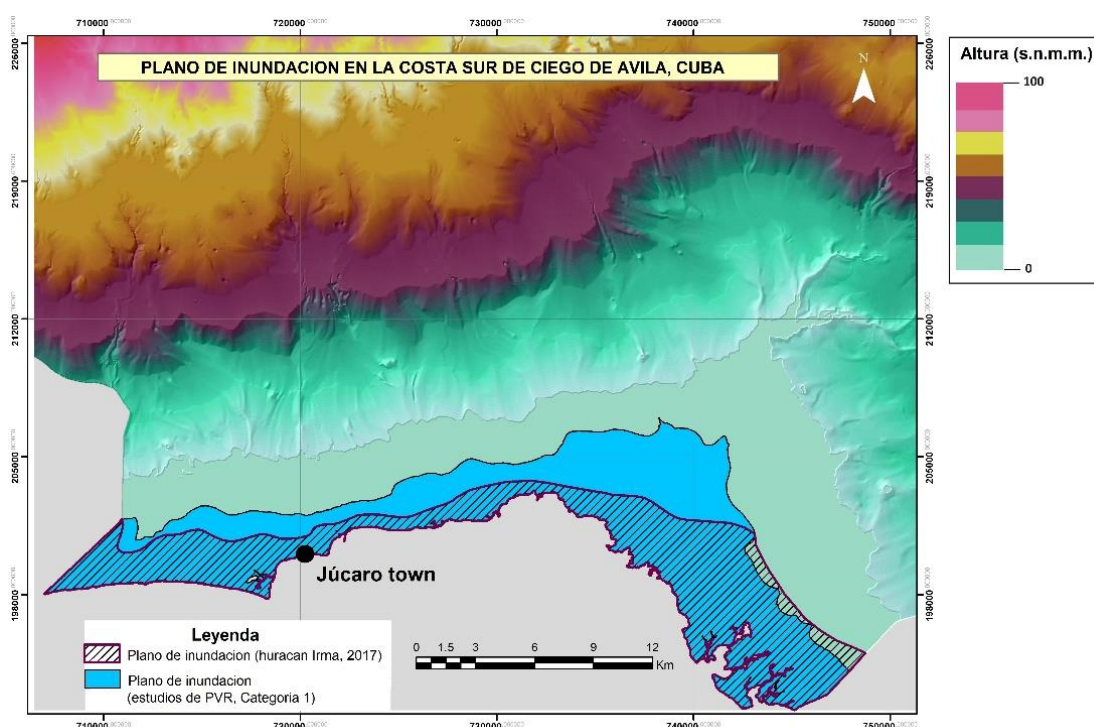


Figure 3.2. Plano de inundación en la costa sur: asociado al huracán Irma (2017) y a los Estudios de PVR de huracanes categoría 1. *Elaboración propia.*

La comparación del plano de inundación costera asociado a Irma, con las áreas de inundaciones correspondientes a la modelación realizada (Moreno-Suárez et al., 2011), para el caso de la costa norte se realizó para dos escenarios, correspondientes a huracanes de categorías 3 y 5 (Fig. 3.3).

El primer caso (huracanes de categoría 3) para visualizar las diferencias de ambos resultados, aun siendo generados por huracanes de categorías diferentes; el segundo caso (huracanes de categoría 5), para comparar resultados de huracanes de categorías similares.

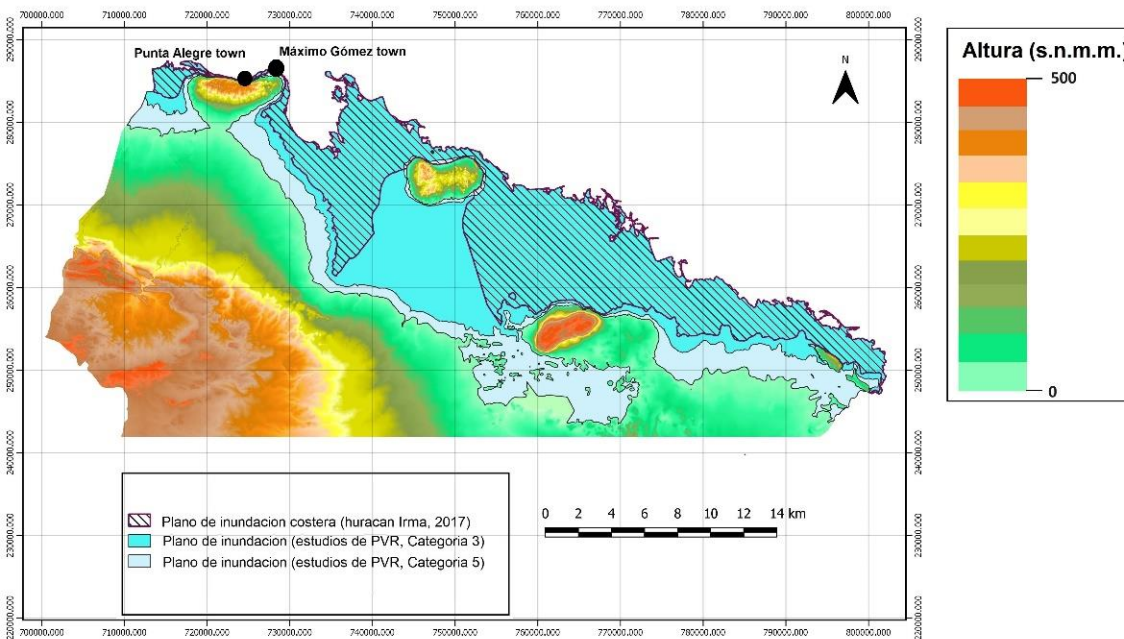


Figura 3.3. Plano de inundación en la costa sur: asociado al huracán Irma (2017) y a los Estudios de PVR de huracanes de dos categorías (3 y 5). *Elaboración propia.*

En los diferentes tramos costeros analizados de la costa norte debe considerarse que, en alguna porción de estos, los niveles del agua no hayan alcanzado la cota de los dos metros, dependiendo el grado de inundación de las barreras naturales existentes. Por ejemplo, antes del huracán Irma el este de Bolivia estaba favorecida por un área de manglares con buen estado de salud, barrera que pudo mitigar la energía del oleaje, llegando el agua a límites inferiores a los representados en el mapa; no obstante, la modelación (Moreno-Suárez et al., 2011) representa áreas muy superiores a lo ocurrido durante las afectaciones de Irma.

En Turiguanó se estima la ocurrencia de olas con altura igual o inferior a tres metros, considerando las aguas someras de las bahías de Los Perros y Buena Vista; no obstante, pequeños bloques del fondo marino fueron movidos hasta la periferia de una laguna costera que separa el Parque Eólico Demostrativo de Turiguanó (PEDT) de las aguas de la Bahía de Los Perros.

En el caso de Punta Alegre, se estima que las olas no superaron los cuatro metros. Para esta afirmación se han considerado un mayor número de barreras naturales: los cayos ubicados al norte

de este asentamiento; una laguna costera; y un área de manglares que rodea dicha laguna. Aun así, un gran número de embarcaciones pesqueras fueron trasladadas a aproximadamente 100 m de la línea de costa, y el plano de inundación cubrió toda la laguna.

En los estudios de PVR se observaron inundaciones en 22 consejos populares. Sin embargo, en ocho de estos consejos populares no hubo inundaciones provocadas por la incidencia del huracán Irma (El Asiento, municipio Chambas; Este, Oeste, Patria y Vaquerito, del municipio Morón; Georgina, municipio Primero de Enero; Peonía, Ciro Redondo; Baraguá). Todos estos consejos populares se localizan en la costa norte, excepto Baraguá.

Las áreas de inundaciones generadas por el huracán Irma fueron muy inferiores a los resultados de los estudios de PVR (para huracanes de categoría 5), diferencia que se acentúa para los municipios Bolivia y Morón, con diferencias más significativas en este último (Moreno-Suárez et al., 2011). En estos últimos casos, se recomienda ajustar los resultados, considerando que la sobreestimación de las áreas de afectación por un evento extremo también implica mayores gastos económicos, en el proceso de enfrentamiento al desastre asociado. Para la modelación de las inundaciones correspondientes a los huracanes de categoría 3, Morón resalta como el municipio con las mayores diferencias, entre lo observado durante el huracán Irma y los resultados de PVR (Moreno-Suárez et al., 2011) (Tabla 3.2). Esta tabla recoge también estas diferencias para los municipios del sur (Venezuela y Baraguá)

Tabla 3.2. Comparación entre el plano de inundación del huracán Irma y el plano de inundación de los Estudios de PVR, asociados a tres escenarios de peligro (huracanes de categorías 1, 3 y 5). *Elaboración propia.*

Municipio	Área (km ²)	Plano de inundación PVR (Categorías de huracanes)			Plano de inundación del Irma (km ²)
		H1 (km ²)	H3 (km ²)	H5 (km ²)	
NORTH COST					
Chambas	772,43		122,94	208,30	109,20
Morón	587,30		377,64	442,50	204,90
Bolivia	892,30		390,77	561,90	330,50
Primero de Enero	512,72		0,00	0,20	0,00
Ciro Redondo	581,15		0,36	0,70	0,00
SOUTH COST					
Venezuela	699,74	130,29			74,00
Baraguá	781,70	24,06			29,00

A pesar de estas diferencias, debe resaltarse que en los dos asentamientos donde fue mayor la incidencia de las inundaciones costeras (Punta Alegre y Júcaro), aunque los límites de estas inundaciones fueron inferiores a los resultados de los estudios de PVR, el fenómeno superó lo esperado por los pobladores, según observaciones históricas. Esta situación está estrechamente relacionada con la percepción del riesgo, variable más difícil de mejorar en el proceso de enfrentamiento a los desastres.

Los resultados mostraron diferencias entre el plano de inundación relacionado con el huracán Irma y la modelación realizada para otros escenarios de peligro. Estas diferencias conducen a la necesidad de hacer también ajustes a escala nacional. A partir de los estudios de PVR, se calculó la suma de las áreas de inundación debidas a las surgencias relacionadas con la actividad ciclónica, para tres categorías de huracanes (1, 3 y 5), y las áreas fueron estimadas en 8196,2; 12997,8 y 17737,6 km², respectivamente (Planos & Gutiérrez, 2020). En estos cálculos obtenidos, para cada una de las regiones del país (occidente, centro y oriente), se identificaron los municipios con los mayores porcentajes de área inundada referidos a huracanes (Ciénaga de Zapata, Matanzas; Morón, Ciego de Ávila; Nuevitás, Camagüey). En Morón, para cada una de estas categorías de huracanes (1, 3 y 5), estos porcentajes tienen valores respectivos de 58, 65 y 76% (AMA, 2019). Sin embargo, este estudio mostró que para el huracán Irma (categoría 5), este porcentaje en Morón fue de 35 %, valor que es incluso inferior al porcentaje correspondiente a huracanes de categoría 1 (Moreno-Suárez et al., 2011).

De manera general, en los cálculos para huracanes de categoría 5 en la costa norte, la modelación del área de inundaciones correspondientes a los estudios de PVR fue sobreestimada en casi el doble (1213,6 km²), al compararse con los resultados del huracán Irma (644,6 km²). Estas diferencias se observaron también al comparar el huracán Irma con la modelación realizada para huracanes de categoría 3, siendo en este caso 1,4 veces inferior el primero al segundo.

En la costa sur ocurrió algo similar, con una sobreestimación de las áreas inundadas durante la modelación de los estudios de PVR, incluso para huracanes de mínima categoría (1, según la escala de Saffir-Simpson), en este caso mostrando 1,5 veces el área inundada por el huracán Irma. No obstante, en la costa sur debe considerarse que la comparación se está realizando con un huracán de esa magnitud que transitó por la costa norte, aun así, los pobladores de estos consejos populares manifestaron no tener una experiencia similar. Ello nos conduce también a replantear el

caso de las inundaciones para esta zona costera; pero para huracanes de máxima categoría, con trayectoria de sur a norte, perpendicular a ese sector costero y que el punto de impacto del centro del sistema se ubique al oeste del poblado de Júcaro. Bajo estas últimas condiciones, puede generarse una situación similar a la ocurrida en Santa Cruz del Sur (Camagüey), asociada al huracán de 1932

En los estudios de PVR, las modelaciones se realizaron sin considerar las barreras naturales (arrecifes coralinos, manglares, dunas y lagunas costeras) que propician la mitigación de la energía del oleaje. Por esta razón, los límites de las inundaciones fueron sobredimensionados.

Las investigaciones muestran el valor protector de estos ecosistemas. Adger et al. (2005) tratan este tema, mostrando los nexos entre la calidad de los ecosistemas costeros y la resiliencia a los desastres.

Imbert (2018) plantea que la vegetación de manglares ofrece importantes servicios a las comunidades, incluyendo alimentos, madera y protección de la línea de costa. En el caso de esta última función (protectora), este autor concluyó que la protección difiere de acuerdo al tipo de manglar, afirmando que el mangle rojo (*Rhizophora mangle*) es significativamente menos resistente al impacto de huracanes que el mangle negro (*Avicennia germinans*). Este mismo autor, refiriendo a otros autores (Zhang et al., 2012; Liu et al., 2013) plantea que los manglares son muy eficientes en la atenuación de los impactos (ecológicos y sociales) de huracanes. En Cuba, los manglares también han sido tratado, desde los puntos de vista ecosistémico y de protección ante los eventos extremos (Menéndez & Guzmán, 2006).

Desde la visión de los ecosistemas costeros como barreras de protección ante los efectos de eventos extremos, urge la necesidad de establecer planes de manejo adecuados para su protección y conservación, máxime si se observa un incremento de frecuencia de huracanes más intensos (Knutson et al., 2010), especialmente en el Atlántico Norte (Elsner et al., 2008).

3.3. Efectos socioeconómicos en Venezuela y Chambas.

En los municipios de Venezuela y Chambas se concentraron las mayores afectaciones socioeconómicas en la provincia de CA, en el asentamiento costero de Júcaro en el primer caso, y en Punta Alegre en el caso de Chambas.

El 18,2 % del área de total de Júcaro (208,7 km²) fue cubierta por las inundaciones asociadas al huracán Irma; sin embargo, casi la totalidad de las viviendas fueron inundadas. Aun así, en la

cuantificación de los daños a las viviendas se contemplaron también los efectos del viento (Tabla 3.3); asimismo, fueron identificadas las afectaciones habitacionales en Punta Alegre. También fueron identificadas otras afectaciones sociales.

Tabla 3.3. Resumen de los impactos sociales en los asentamientos costeros de Júcaro (Venezuela) y Punta Alegre (Chambas). *Elaboración propia.*

Datos de afectaciones	Júcaro	Punta Alegre
Área (km ²)	208,70	86,06
Plano de inundación costera/lrma (km ²)	38,00	21,00
Total del número de casas	781	2017
Casas totalmente afectadas	97	200
Casas parcialmente afectadas	33	75
Techos de casas afectadas (total)	5	25
Techos de casas afectadas (parcial)	89	82
Total de casas afectadas	224	382
Total de casas afectadas (%)	28,7	18,9
Total de población (ONEI, 2012)	2696	6724
Población afectada	623	1272
Población afectada (%)	23,1	18,9
Número de afectados/Área territorial	3	15
Número de afectados/Área inundada	16	60

A partir de la metodología establecida para el desarrollo de la investigación, se logró calcular que, en el poblado de Júcaro el agua penetró aproximadamente entre 600 y 700 m de la línea de costa. De manera general, el límite de la inundación en la costa sur alcanzó la cota de 0,88 m (Fig. 3.4a). Otra de las peculiaridades de la costa sur, fue el arrastre desde mar adentro de una gran cantidad del paso marino *Thalassia testudinum* (Fig. 3.4b).

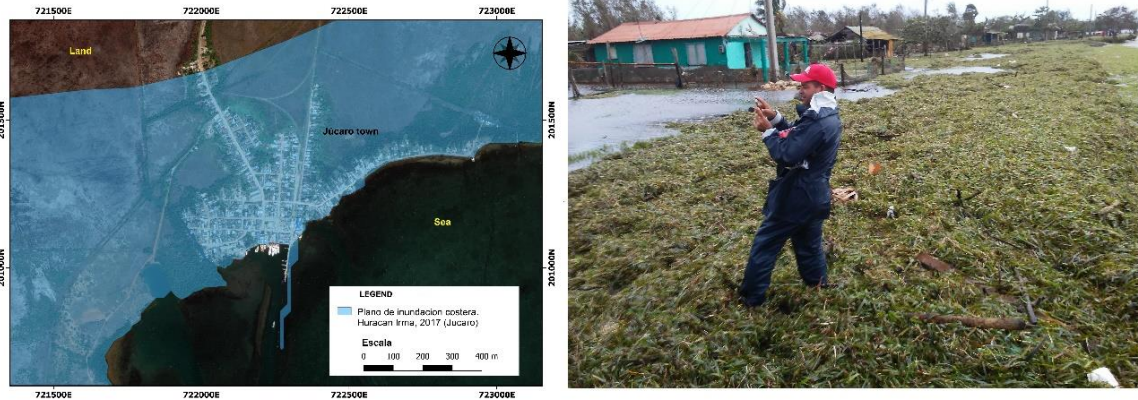


Figura 3.4. Plano de inundación en el asentamiento costero de Júcaro, asociado con el huracán Irma durante sus impactos sobre el municipio de Venezuela (a); invasión de *Talassia testudinum* en el sector costero de El Palmarito, asociada con la surgencia y las olas generadas por el huracán Irma (b). *Elaboración propia.*

En Punta Alegre la cota máxima de inundación fue de 2,0 m y el límite del agua penetró tierra adentro hasta 100 m, aunque fue más variable espacialmente este límite de inundación (Fig. 3.5), al compararse con el proceso ocurrido en la costa sur. Otro hecho notable fue la diferencia de los impactos en ambos asentamientos del consejo popular de Punta Alegre (Máximo Gómez y Punta Alegre). En el primer caso, los vientos generaron los mayores impactos, ocurriendo derribos de árboles de gran porte (ANEXO II, Foto 3.2), aunque el exceso de humedad en el suelo debido a la inundación costera y las intensas precipitaciones, contribuye en este tipo de impactos.

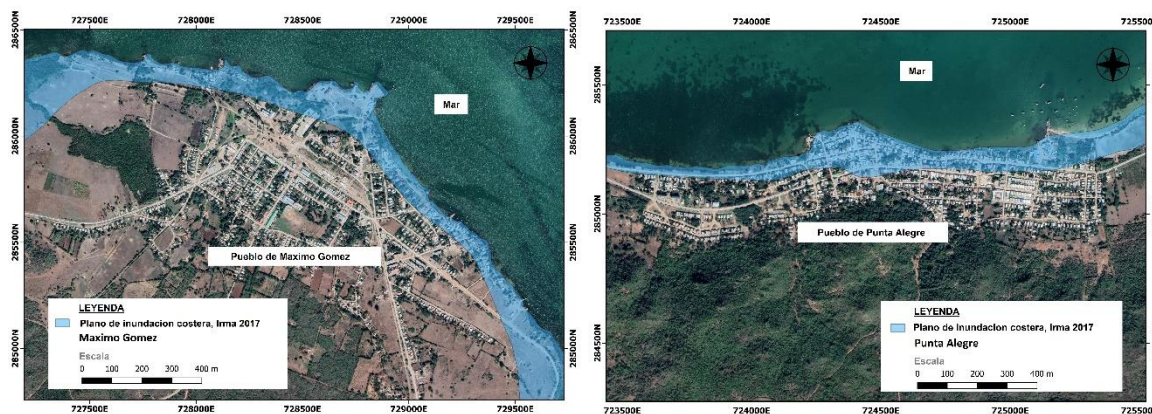


Figura 3.5. Plano de inundación asociado al huracán Irma, durante el impacto en el municipio Chambas, provincia de Ciego de Ávila: Punta Alegre (a) y Máximo Gómez (b). *Elaboración propia.*

En Punta Alegre las inundaciones costeras fueron más acentuadas. Muchas embarcaciones pesqueras (pequeñas y medianas), fueron trasladadas tierra adentro (Foto 3.3). Entre las áreas de

ubicación de las embarcaciones y el mar existen dos barreras naturales: área de manglares y una laguna costera, elementos que contribuyen a relacionar con la magnitud del fenómeno en este tramo costero. También en este caso, la *Thalassia testudinum* removida por el oleaje, sirvió de base para realizar cálculos de los límites de las inundaciones (Foto 3.4).



Foto 3.3. Embarcaciones de pesca, movidas hacia tierra en Punta Alegre, debido a la energía de las olas generadas por el huracán Irma. Fotos: UMA Ciego de Ávila.



Foto 3.4. Línea de *Thalassia testudinum* movida por el huracán Irma en el sector costero de Punta Alegre, usada como referencia para calcular los límites de la inundación costera.

Las inundaciones costeras en Punta Alegre, asociadas al huracán Irma, también tuvieron incidencia negativa en el sitio arqueológico Los Buchillones, un sitio de gran importancia en el contexto caribeño (Fig. 3.6). El sitio arqueológico fue cubierto completamente por la inundación, aunque los límites del alcance máximo del agua tierra adentro fue variable en diferentes sectores. En la porción oeste de la laguna fue inferior el límite de inundación. La porción centro-este de la laguna recibió

los mayores impactos, con límites máximos del agua que oscilaron entre 100 y 200 metros. El recuadro azul de la figura 3.6, representa el área de mayor concentración de embarcaciones pesqueras, trasladadas por el fuerte oleaje de Irma (ver Foto 3.3), y se estima que la energía del oleaje fue mayor por este sector de la laguna.

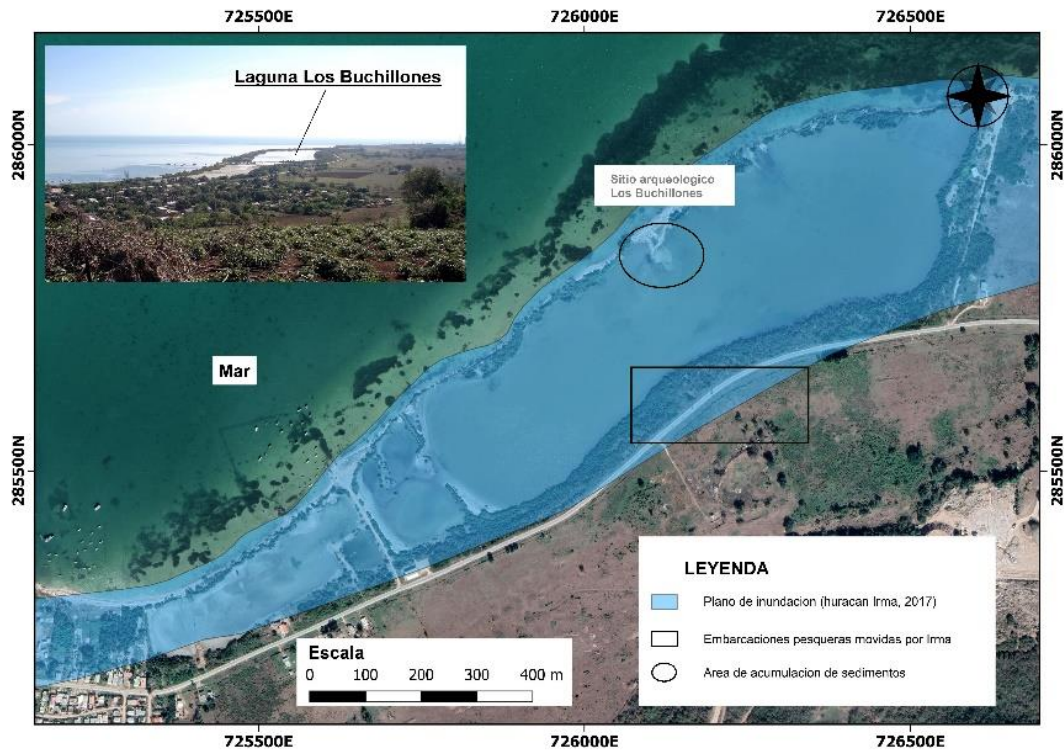


Figura 3.6. Plano de inundación en Laguna Los Buchillones, asociado al huracán Irma (2017).

Legenda: Embarcaciones pesqueras movidas por el huracán Irma (ver Foto 3.3).

En el sector que se estima máxima energía del oleaje, también se observa un área que evidencia mayor acumulación de sedimentos, recibida durante el proceso físico del oleaje sobre la laguna, lo cual es muy útil para la toma de núcleos sedimentológicos para estudios de paleohuracanes, además de poder evidenciar la deposición sedimentológica relacionada con este intenso huracán. Constituye este uno de los archivos geológicos utilizados como proxy data en las investigaciones paleotempestológicas.

La Paleotempestología como ciencia relativamente reciente, ha permitido la reconstrucción de huracanes del pasado a través de estas técnicas. Estudiar esta acumulación sedimentológica (ver Fig. 3.6) propicia profundizar en la relación entre paleohuracanes y el desarrollo de la vida aborígen en el sitio. Además, Cuba es una de las áreas geográficas con vacíos de resultados sobre este tipo de investigaciones (Oliva et al., 2017). Estos autores, en una revisión realizada sobre estudios

paleotempestológicos en el Atlántico Norte, analizando 59 artículos científicos obtenidos en el periodo 1993–2016, identificaron un solo resultado en Cuba (Peros et al., 2015). A partir de 1851, Irma ha sido el único huracán de categoría 5 con incidencia en CA; pero planteamos la hipótesis de no ser el único de este tipo en la historia.

3.4. Conclusiones parciales.

- Las inundaciones asociadas al huracán Irma en ambas costas de CA, fueron fuertes. Los testimonios recogidos durante el trabajo de campo, evidencian que las inundaciones costeras generadas han ocurrido por primera vez en esta provincia a causa de un ciclón tropical. El área de inundaciones en la costa norte fue superior al área de la costa sur; el mayor plano de inundación ocurrió en Turiguanó (Morón), seguido por Bolivia y La Loma (Bolivia).
- En las incidencias sociales se contempló la cuantificación de daños definidos por la sumatoria de los tres fenómenos presentes durante los impactos de Irma (inundaciones costeras, inundaciones por intensas lluvias y afectaciones por fuertes vientos). Se corroboró que Júcaro y Punta Alegre son los asentamientos costeros son los de mayor vulnerabilidad en Ciego de Ávila, ante los efectos del cambio climático y la incidencia de inundaciones costeras.
- Las áreas de afectaciones correspondientes a los estudios de PVR asociados a inundaciones costeras fueron superiores con relación a las inundaciones generadas por el huracán Irma (presente estudio) en ambas costas de CA. Estos resultados deben ser considerados en las actualizaciones de los estudios de PVR (a escala provincial y nacional).

4. PALEOHURACANES EN CUBA POR TÉCNICAS DE MULTIPROXIS

4.1. Paleohuracanes a través de sedimentos de una laguna costera.

El huracán Irma tuvo afectaciones en otras islas del Caribe (Barbuda, San Martín, Islas Vírgenes de Estados Unidos, Islas Vírgenes Británicas, Puerto Rico, Islas Turcas y Caicos, Bahamas). Durante la vida de este organismo ciclónico, la presión más baja correspondió al día 6 de septiembre, a las 0600 UTC, con un valor de 914,0 hPa, en las proximidades de Barbuda. La presión atmosférica más baja en Cuba fue registrada en la estación meteorológica 78339, con un registro de 933,1 hPa, ocurrida a las 0520 UTC del 9 de septiembre, momento de mayor cercanía del ojo del sistema a la estación (Cangialosi et al., 2018). O sea, las mayores afectaciones en Cayo Coco ocurrieron desde la noche del día 8 hasta la tarde del 9 de septiembre, siendo más pronunciadas en la madrugada del día 9 (Fig. 4.1). En la estación meteorológica de Cayo Coco (78339), la velocidad máxima del viento en periodos de 10 minutos alcanzó valores de 185 km/h, con rachas máximas de 194 km/h (NNE-NE).

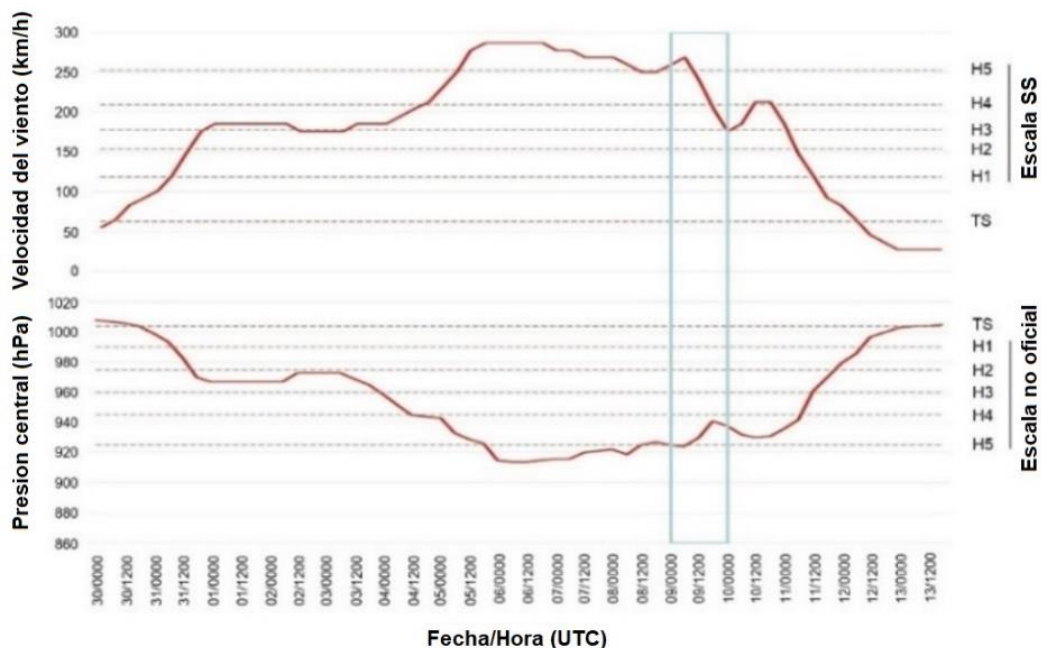


Figure 4.1. Presión central y velocidad del viento del huracán Irma, desde el 30 de Agosto (0000 UTC) al 13 de septiembre (1200 UTC) (el recuadro con línea azul marca el tiempo de los principales impactos en Cayo Coco). Adaptado de Cangialosi et al. (2018).

4.1.1. Inundaciones costeras en Cayo Coco.

Cayo Coco pertenece geográficamente a Morón. En este municipio costero, la máxima penetración del agua asociada al huracán Irma osciló entre 15 y 20 km; aunque esta situación ocurrió en zonas despobladas. El área de inundación de Irma en este municipio (excluyendo los cayos) fue de 204,90 km², lo que representa casi el 35% de afectación. En Cayo Coco la cota máxima de inundación fue de 2,65 m, generando un área de inundación de 61,56 km² (incluida la inundación por intensas lluvias) lo que representa el 17% del área total (Fig. 4.2), plano de inundación que cubrió completamente la zona donde se localiza Laguna Larga (Fig. 4.3).

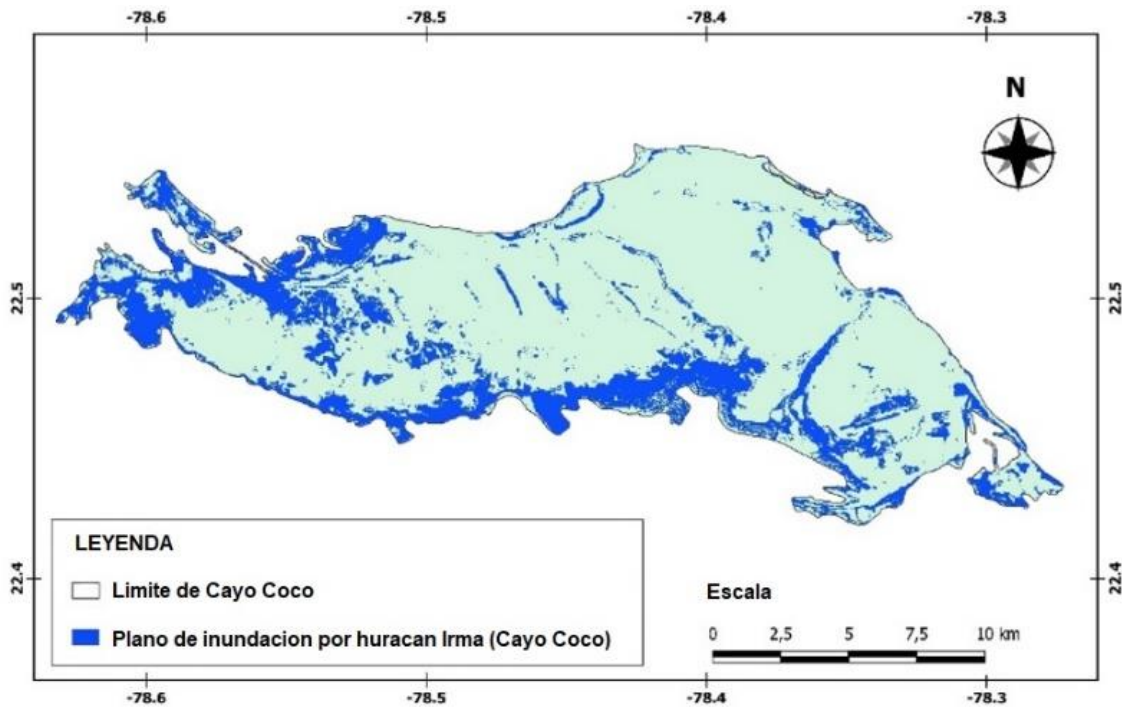


Figura 4.2. Plano de inundación asociado al huracán Irma (incluida la inundación por intensas lluvias hacia el interior) en Cayo Coco, Ciego de Ávila. *Elaboración propia.*

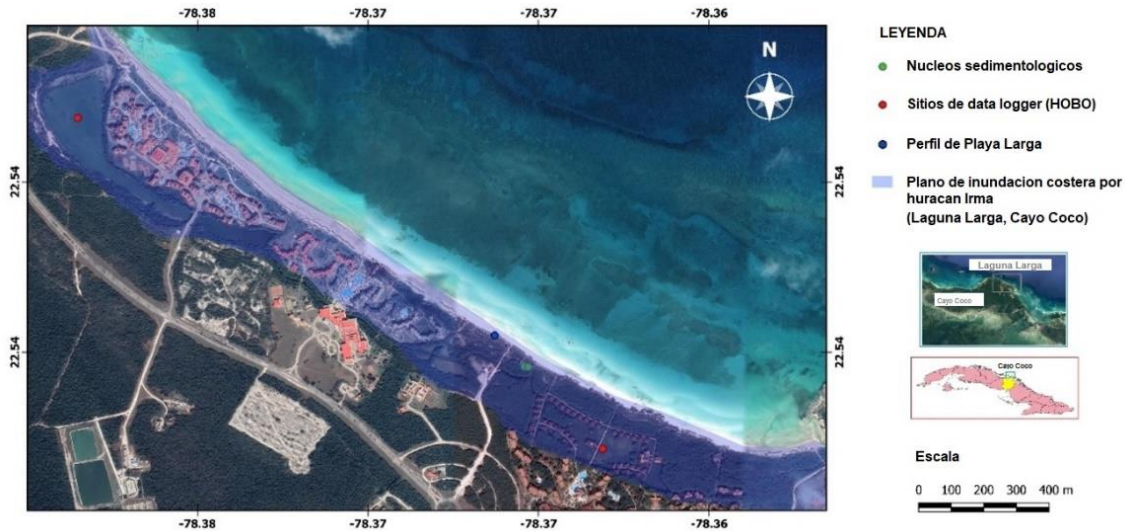


Figura 4.3. Plano de inundación asociado al huracán Irma, durante el impacto en Laguna Larga, Cayo Coco (Ciego de Ávila). *Elaboración propia.*

Se observan mayores zonas inundadas por los efectos de las inundaciones costeras, con parches hacia el interior del cayo, estos determinados por los acumulados de precipitación que este evento generó. La estación 78339 registró un acumulado de precipitación de 339,8 mm. Este acumulado constituye un nuevo record de máxima precipitación en 24 horas para esta estación; el record anterior correspondía a un Frente Frío Fuerte, que el 23 de diciembre de 2000 generó 321,0 mm.

En el plano de inundación costera en el área de Laguna Larga (ver Fig. 4.3) se observa la incidencia de la inundación en las instalaciones hoteleras cercanas, de oeste a este: hoteles Blau Colonial, Tryp y Meliá. En esta zona, el agua penetró tierra adentro entre 100 y 200 m; en la porción sur de Cayo Coco las incidencias fueron más significativas, con alcance del agua hasta los 2,5 km. El plano de inundación en Laguna Larga fue propicio para evaluar el nivel del agua alcanzado en el interior de la laguna, evaluar el cambio en el perfil de Playa Larga, y tomar dos núcleos sedimentológicos en la laguna, con la finalidad de estudiar la deposición de sedimentos asociados al huracán Irma, extendiendo el análisis a otros paleoeventos.

4.1.2. Registros del nivel del mar en la laguna.

Los sensores permitieron registrar el nivel del agua cada 2 min, mediciones útiles para calcular el volumen de agua ($77,14 \text{ m}^3$) que inundó la laguna tras el paso del huracán Irma, multiplicando la superficie de la laguna por la variación del nivel del agua (valor máximo medio de 1,15 m).

Se registró el brusco incremento del nivel del agua (Fig. 4.4) en ambas porciones de la laguna (occidental y oriental), que alcanzó valores máximos de 1,059 y 1,242 m, con respecto al nivel medio del mar. El nivel del agua superó la duna que limita a Playa Larga de Laguna Larga, contribuyendo a la inundación de la laguna, y al transporte de sedimentos desde la duna hacia esta debido a la energía del oleaje.

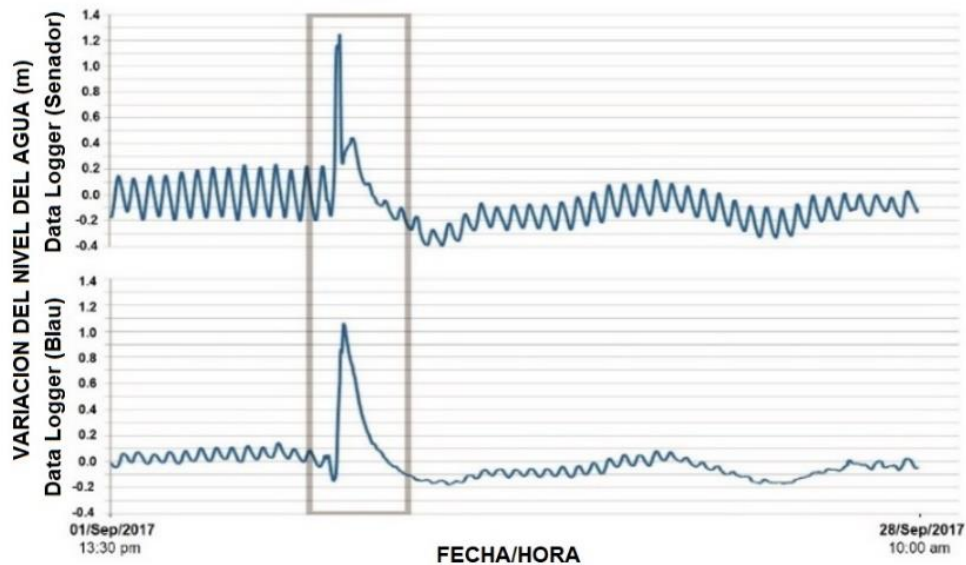


Figura 4.4. Variación del nivel del agua (m) en el interior de Laguna Larga, medida a través de los Data logger HOB0 ubicados en las proximidades de los hoteles Senador y Blau. El rectángulo gris representa la variación del nivel del agua entre los días 8 y 9 de septiembre. *Elaboración propia.*

Estas condiciones de incremento del nivel del mar se mantuvieron desde las 20:30 horas del día 8 hasta las 15:00 horas del día 10, con un total de 43,5 horas; alcanzando un nivel normal del agua a partir de este último horario en ambas porciones de la laguna. La altura de la onda generada por el huracán Irma, muestra valores ligeramente diferentes en ambas porciones de Laguna Larga.

También existe un ligero desfase temporal del inicio y duración de ambas ondas, registradas en los equipos registradores, aspecto que debe estar relacionado con el inicio de la inundación en ambos puntos, vistos como proceso físico, relacionado además con la afectación paulatina del huracán en las diferentes zonas geográficas, en su trayectoria de este a oeste. Estas diferencias entre ambas ondas, respecto a la altura y la distribución temporal, debe estar relacionada además, con la marea astronómica y la altura de la ola asociada al sistema con la cual impactó en cada punto.

4.1.3. Perfil de Playa Larga.

Se utilizó el perfil número 9 (LP-09), de Playa Larga, ubicado sobre la duna a una altura de 1,23 m y una distancia de 145,0 m respecto a CL01. Las distancias de los núcleos sedimentológicos (CL01 y CL02) a la línea de costa de ubicación de LP-09, fue de 10,0 y 17,5 m, respectivamente. La evaluación del cambio de perfil en esta porción de Playa Larga, asociado al antes y después del impacto del huracán Irma (Fig. 4.5), evidencia que la energía del oleaje provocó una pérdida de la estructura morfológica de la duna, con la hipótesis que la arena concentrada en los niveles más altos de la duna fue transportada hacia la laguna.

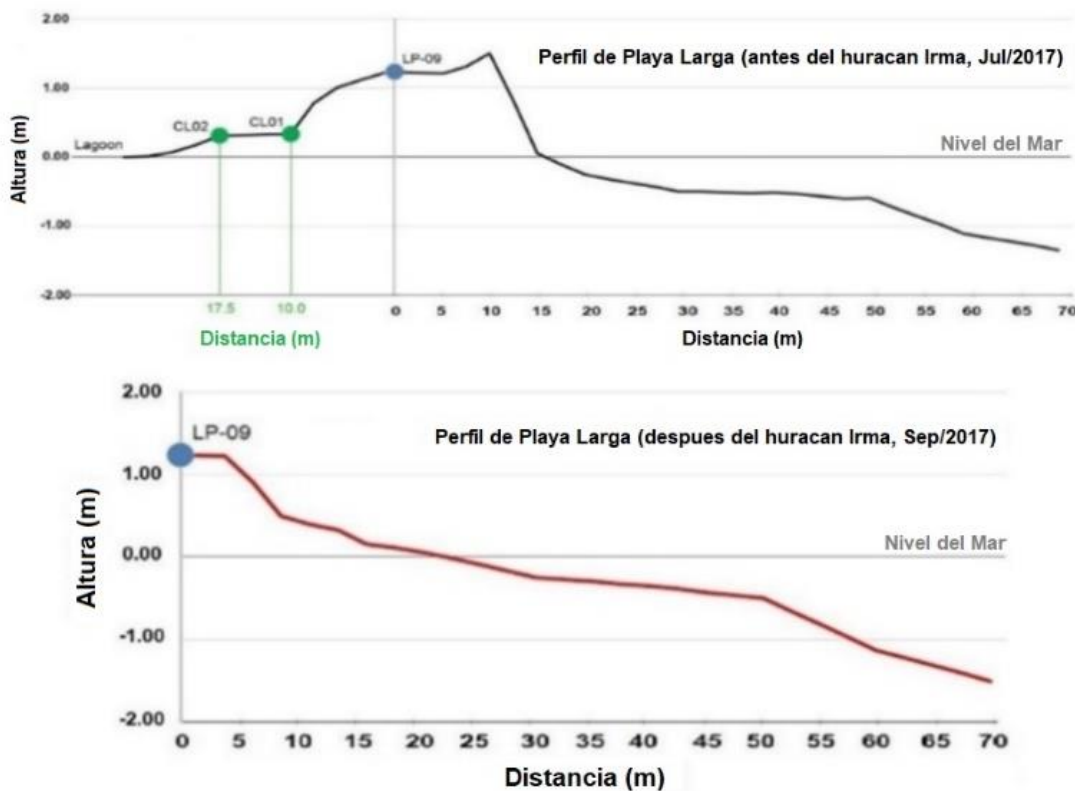


Figura 4.5. Variaciones morfológicas asociadas al impacto del huracán Irma en Cayo Coco: Perfil de la sección transversal desde Laguna Larga hacia el mar, incluyendo la ubicación de los núcleos sedimentológicos (CL01 y CL02) y el perfil de Playa Larga, con el punto de control (LP-09) sobre la duna (a, antes del huracán Irma); perfil de Playa Larga con la ubicación del punto de control (LP-09) sobre la duna (b, después del huracán Irma). *Elaboración propia.*

El huracán Irma generó una gran erosión costera. Los diferentes perfiles construidos en Playa Larga, aunque existen diferencias entre estos, como aspecto común se evidencian ocho

consecuencias fundamentales asociadas a la energía de las olas de este intenso huracán: (1) Disminución de la altura de la playa; (2) migración del perfil de playa hacia tierra; (3) pérdida de arenas de la duna y el frente de playa; (4) afectación y/o pérdida de las comunidades vegetales de la duna costera, sobre todo las pertenecientes a las partes frontal y posterior de la duna; (5) modificación y/o destrucción morfológica de las dunas costeras; (6) formación de escarpes en las dunas y retroceso de otros escarpes ya existentes; (7) disminución de la superficie de dunas; (8) desplazamiento de arenas hacia la parte posterior de la duna.

Todos estos factores, fundamentalmente el último, tienen estrecha relación con la deposición de sedimentos hacia la laguna bajo los efectos de oleaje de gran energía. Además, Playa Larga al igual que las restantes playas de Jardines del Rey, se ubica en la parte norte de Cayo Coco, con una plataforma insular relativamente estrecha, vulnerable también debido a la falta de barreras naturales capaces de reducir la energía de los eventos meteorológicos extremos, por lo que se encuentra expuesta a la incidencia de oleajes altamente energéticos.

4.1.4. Perfiles litológicos de los núcleos de sedimentos.

Los núcleos sedimentológicos se tomaron a distancias relativamente cercanas (Fig. 4.6), por lo que las características son similares; aunque también se observan diferencias. Una de estas diferencias es que CL02 contiene una capa adicional (Zona 4), no observada en CL01. De esta manera se definieron tres zonas comunes a ambos núcleos, con características litológicas similares.

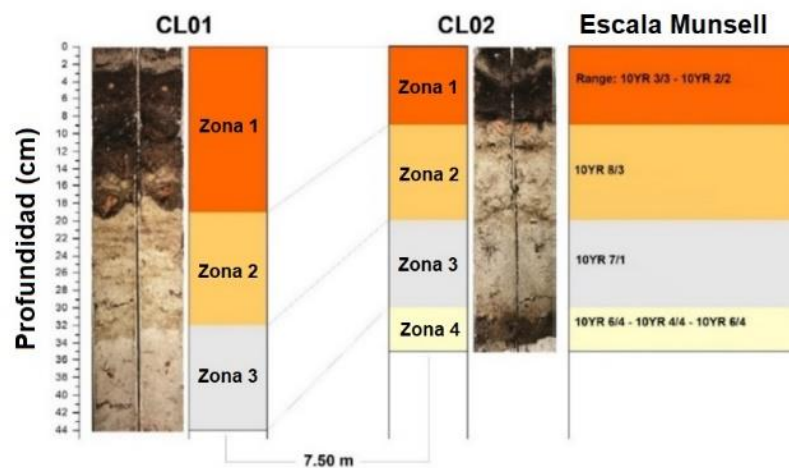


Figura 4.6. Litología de los núcleos de Laguna Larga, Cayo Coco. *Elaboración propia.*

La zona 1 es una capa sedimentológica con un rango de valores cromáticos, que van desde el marrón oscuro (Munsell 10YR 3/3) hasta el marrón muy oscuro (Munsell 10YR 2/2). Esta capa tiene

alto contenido orgánico y presencia de diferentes laminaciones. La de mayor significación es un estrato de gran contenido de granos gruesos en la parte superior del perfil, preliminarmente asociado al huracán Irma; esta capa de arena siliciclástica se refina hacia arriba. La acumulación de sedimentos asociados al huracán Irma se localizó en diferentes profundidades en ambos núcleos (1-3 cm en CL01 y 2-3 cm en CL02). En CL01 también fue visible otra deposición de sedimentos en la profundidad 6,0-7,0 cm. En diferentes laminaciones de esta zona se observaron fragmentos de ramas; aunque los mayores se localizaron en las profundidades límites con la siguiente zona (2). En CL01, esta zona se localiza entre la profundidad cero (superficie) hasta los 19 cm, mientras que en CL02 se localiza en la profundidad 0,0-9,0 cm.

Los límites de las zonas 1 y 2 presentan en ambos núcleos un cambio abrupto de coloración, variando la zona 2 a un color marrón muy claro (Munsell 10YR 8/3). En esta zona dominan los sedimentos ricos en carbonatos. En CL02 se observaron laminaciones intercaladas con capas de granos más gruesos, mientras que en CL01 se observó aumento de los granos gruesos con el incremento de la profundidad. La zona 2 se localizó en CL01 en la profundidad 19,0-32,0 cm, mientras que en CL02 fue entre los 9,0 y 20,0 cm.

La zona 3, aunque también con predominio de sedimentos carbonatados, presentó características litológicas que difieren de la zona 2, con una coloración gris claro (Munsell YR 7/1). En esta zona, se observaron mayores diferencias en la litología de ambos núcleos. En CL01 se observó una disminución de los granos gruesos hacia los estratos de mayor profundidad, mientras que en CL02, a partir de los 28 cm aproximadamente ocurre una disminución de los granos gruesos, acompañado por decrecimiento de los carbonatos e incremento de la materia orgánica. Las profundidades de esta zona en CL01 y CL02 fueron 32,0-44,0 cm y 20,0-30,0 cm, respectivamente.

La zona 4, identificada solamente en el núcleo 2, presentó una coloración de marrón amarillento oscuro (Munsell 10YR 4/4) encerrado por dos capas marrón amarillento claro (Munsell 10YR 6/4). En esta zona se visualizó que con la profundidad aumentaron los carbonatos y granos gruesos, mientras disminuyó la materia orgánica; aunque a partir de los 33 cm ocurrió un proceso inverso. Esta zona se localizó entre 30 y 35 cm de profundidad.

Muy próximo a la mitad del perfil de CL01 se observó la posible presencia de un paleo-evento. También se localizó un posible paleo-evento en CL02, pero a mayor profundidad. Otra de las características generales es que en ambos núcleos se encontraron pequeñas conchas y

fragmentos de conchas, con dos en cada muestra. En CL01 se encontraron estas conchas en las profundidades 28-29 y 39-40 cm, mientras que en CL02 se localizaron en 26-27 y 29-30 cm. Las conchas de CL01 correspondientes a menor y mayor profundidad, tuvieron una masa de 0,0232 y 0,0290 g, respectivamente; en CL02, las masas de las conchas localizadas en las profundidades medias 26,5 y 29,5 cm, fueron de 0,0130 y 0,0601 g, respectivamente.

Preliminarmente, las conchas localizadas en las primeras profundidades de ambos núcleos se consideraron estar relacionadas con un mismo evento de oleaje extremo, que generó esta acumulación sedimentológica. En el caso de los paleo-eventos, se consideró que el identificado visiblemente en el CL01 (16-17 cm) debe observarse en CL02 a través de otros análisis; no obstante, se planteó como hipótesis inicial que el paleo-evento localizado en la profundidad 33-34 cm de CL02 es característica solamente de este núcleo.

4.1.5. Resultados de datación.

Según el modelo rPlum, la relación Edad-Profundidad evidenció similitudes entre ambos núcleos, igualmente con procesos similares de calibración de las edades radiocarbónicas (Fig. 4.7). Pese a la descripción litológica, CL01 contiene sedimentos más antiguos que CL02 (Tabla 4.1).

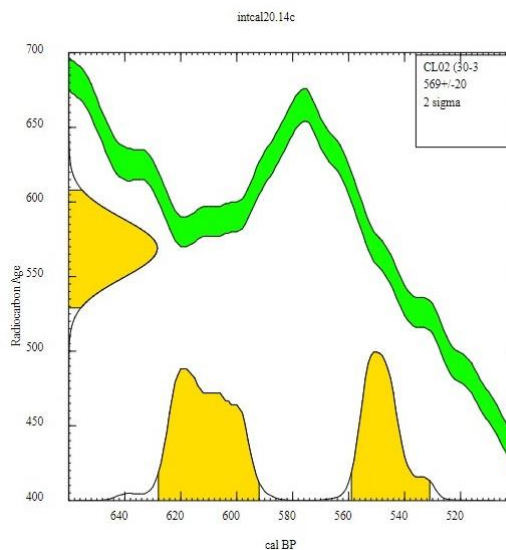


Figura 4.7. Curvas de calibración de las edades de las muestras sedimentológicas de CL02, para el estrato sedimentario localizado en la profundidad 30-31 cm.

Tabla 4.1. Edades radiocarbónica correspondientes a las capas sedimentológicas.

Código DirectAMS	Muestra (ID)	Tipo de muestra	Edad radiocarbónica	
			AP	1σ error

D-AMS 047362	CL0138-40	Sedimento	888	21
	CL01 39-40	Sedimento	844	20
Media ponderada			865	14
D-AMS 047304	CL02 20-21	Carbón vegetal	506	25
D-AMS 047305	CL02 30-31	Carbón vegetal	569	20

De esta manera, se definieron las edades máximas de los núcleos CL01 y CL02, con valores de acuerdo a curvas de calibración y al error (2σ): 731-784 y 531-629 años Antes del Presente (años AP), respectivamente, lo que representa aproximadamente 800 años de información. Así mismo se identificaron las edades preliminares según la datación con ^{210}Pb (Fig. 4.8), sumándose las profundidades donde se visualizan cambios antrópicos en ambos núcleos (entre 1992 y 1997), marcados por el inicio del desarrollo turístico en la cayería. Se observa un error en CL01, con una datación reciente aproximadamente en la mitad del perfil, relacionado con la raíz de un mangle.

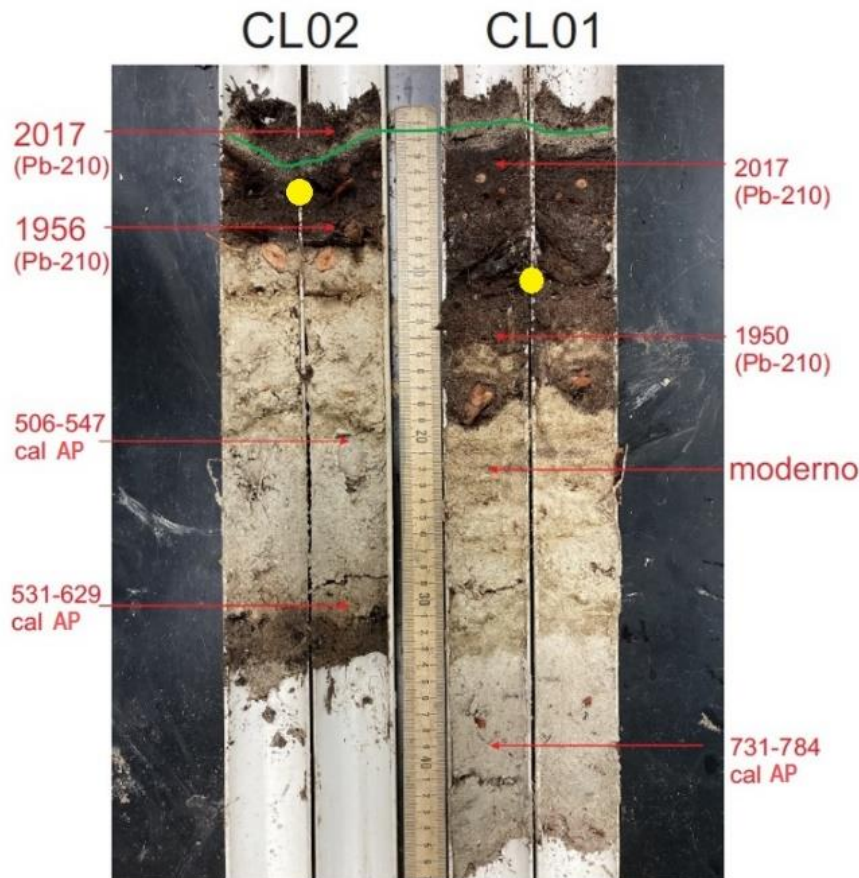


Figura 4.8. Datación (con ^{210}Pb y ^{14}C) de los núcleos CL01 y CL02. Los círculos amarillos indican puntos de cambios por influencia antrópica (1992-1997). *Elaboración propia.*

4.1.6. Análisis de componentes principales (ACP).

El análisis de componentes principales (combinaciones lineales de los predictores originales), visto como la mejor técnica estadística para explicar la mayor parte de la variabilidad del conjunto de datos correspondientes a cada núcleo, con menos variables que el conjunto de datos original, reflejó como resultado la identificación de aquellas variables que mejor explican el comportamiento del perfil sedimentológico.

Las variables consideradas de los perfiles sedimentológicos estuvieron relacionadas con el análisis del tamaño de granos con dimensiones mayores o iguales a 63 μm y el proceso de pérdida por ignición, que este último contempla el contenido de agua en el núcleo, la presencia de materia orgánica (MO) y el contenido de minerales. Estas cuatro variables fueron identificadas como las suplementarias.

Las variables activas o principales fueron las derivadas de los resultados de la aplicación de la técnica de Fluorescencia de Rayos X (XRF por sus siglas en inglés). En la aplicación de XRF se analizaron 49 elementos químicos; no obstante, en la presente investigación se consideraron solamente siete elementos Br, Ca, Cl, Si, Sr, Ti y Zr. Ello suma un total de 11 variables contempladas en el ACP: siete activas y cuatro complementarias (Fig. 4.9).

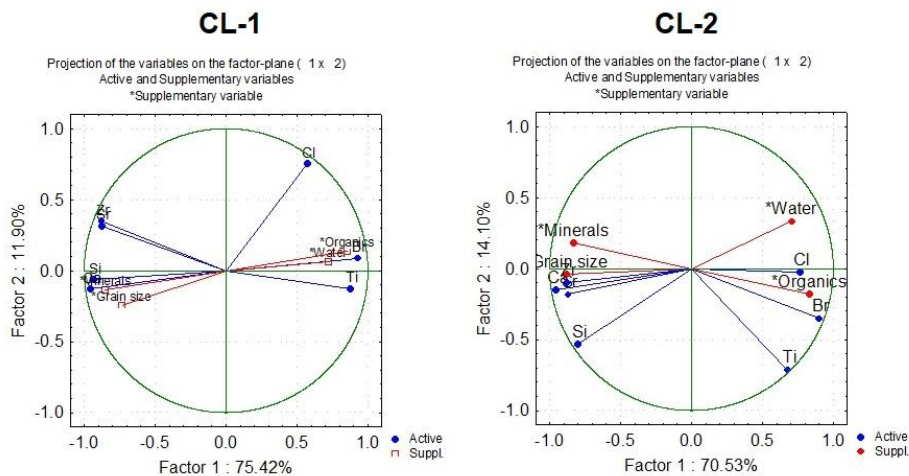


Figure 4.9. Análisis de los Componentes Principales, aplicado a las muestras de sedimentos de Laguna Larga. *Elaboración propia.*

Como resultado común de ambos análisis se obtuvo que el Ca constituye el elemento químico que mejor explica el perfil sedimentológico de ambas muestras; pero a partir de esta variable, el orden de las restantes cambia según el peso que tienen en cada núcleo. En CL01 luego del Ca, el peso

de las restantes variables es como sigue: Si, Br, Zr, Ti, Sr, MO y Minerales; sin embargo, en el CL02 el Si tiene menor peso. En este segundo núcleo, el orden de las restantes variables luego del Ca es el siguiente: Br, tamaño de grano $\geq 63 \mu\text{m}$, Zr, Sr, MO y contenido de minerales.

De manera general, del análisis de XRF se definió que el Ca, Br, Zr y Sr son los elementos químicos que mejor explican el proceso sedimentológico de ambos núcleos, mientras que el tamaño de granos es la variable más útil en el caso de las suplementarias. No obstante, el contenido de minerales se aplicó para delimitar el rango de profundidades de los eventos de oleaje extremo identificados en el registro sedimentario.

4.1.7. Tamaño de grano y LOI.

Los resultados del LOI coinciden con la descripción visual de la litología, con comportamientos similares entre los núcleos, pero también se observaron ligeras diferencias a pesar de la relativa cercanía entre ambos (Fig. 4.10). El LOI de CL01 reveló altos porcentajes de minerales en todo el núcleo; pero esta característica estuvo centrada en un estrato muy cercano a la superficie, relacionado con la acumulación de sedimentos asociados al huracana Irma. Luego disminuye sus valores para nuevamente incrementarse a partir de los 19 cm aproximadamente. En el caso de CL02, el LOI mostró un comportamiento similar, con altos porcentajes de minerales en una capa sedimentológica muy cercana a la superficie, para luego disminuir e iniciar nuevos incrementos a partir de 9 cm aproximadamente; pero presentó un decrecimiento en la profundidad media de 31,5 cm. Por esta técnica proxi se distinguen posibles paleoeventos en las profundidades señaladas.

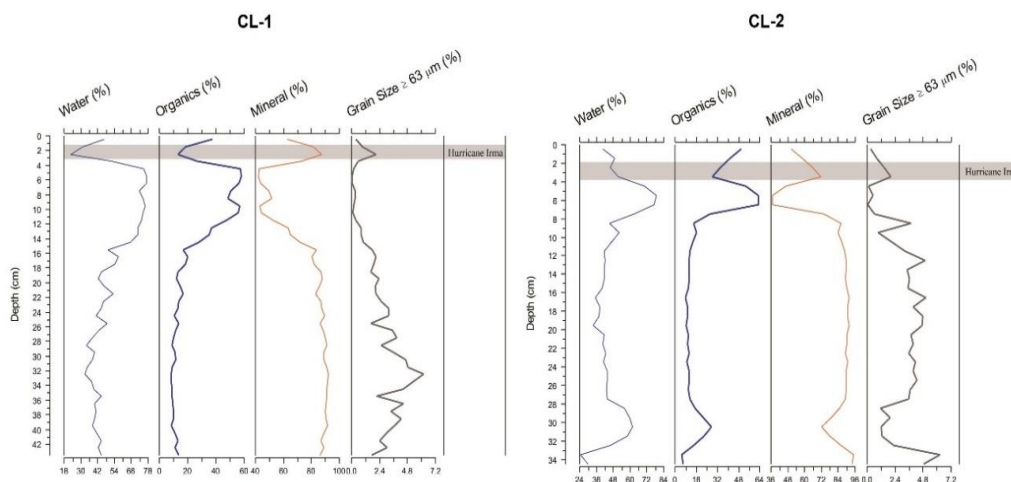


Figura 4.10. Comportamiento en los núcleos (CL01 y CL02) del contenido de agua, materia orgánica, minerales y tamaño de granos iguales o superiores a $63 \mu\text{m}$. *Elaboración propia.*

El mayor porcentaje de minerales de CL01 se encuentra de 32 a 40 cm, mientras que los mínimos valores se concentraron en el rango de profundidades entre 5 a 15 cm (~16,6% del peso seco del núcleo). En el caso de CL02, el mayor porcentaje de minerales se encontró en el rango 34-35 cm; los porcentajes mínimos se localizaron en el rango 5-7 cm, representando ~4,3% el peso seco del núcleo.

El contenido de la materia orgánica (MO) mostró un comportamiento contrario a los minerales. En CL01 la MO aumenta a partir de 5 cm, para experimentar nuevos decrecimientos en los 15 cm de profundidad. En CL02 existe un pico máximo entre 5 y 7 cm, y sigue la tendencia inversa a la de los minerales para alcanzar un máximo secundario en la profundidad 30-32 cm. Estos comportamientos inversos manifiestan que a medida que los carbonatos disminuyen, estos son reemplazados por altos porcentajes de MO. Para CL01, el contenido general de la MO osciló entre 8,2 y 58,0%, con un contenido medio del 22,1%, mientras que en CL02 el valor medio fue de 19,6%, con oscilaciones entre 5,1 y 62,9%.

El análisis granulométrico ($\geq 63\mu\text{m}$) reveló una gran variación según la profundidad, con un contenido medio general en los núcleos CL01 y CL02 de 2,27% y 2,86%, respectivamente. La distribución del tamaño de grano en el perfil sedimentológico, muestra un alto contenido en las profundidades 32-33 cm en CL01 y en el caso de CL02, se observaron varias profundidades con valores de interés desde el punto de vista sedimentológico (11-12, 15-16, 18-19 y 33-34 cm), todos estos estratos con alta probabilidad de depositarse en flujos de alta energía. Así mismo, en las primeras capas de ambos núcleos es muy visible una importante acumulación de granos de mayores dimensiones. Así lo corrobora este último caso, que corresponde a los efectos de oleaje intenso asociado al huracán Irma, situación reflejada en ambos núcleos.

Los mínimos valores de granos con estas dimensiones ($\geq 63\mu\text{m}$), en CL01 se concentraron en el rango de profundidades entre 4 y 16 cm (~6,7% del peso seco del núcleo), mientras que en CL02 se localizaron en las profundidades 1-2 y 5-8 cm, representando respectivamente ~1,20 y ~1,37% el peso seco del núcleo.

4.1.8. Elementos geoquímicos.

Se analizaron los elementos químicos Br, Ca, Cl, Si, Sr, Ti y Zr, para cada uno de los núcleos (Fig. 4.11), con énfasis en los que mejor explican los correspondientes procesos sedimentológicos (Ca, Br, Zr y Sr). Según las tendencias verticales, este análisis se dividió en dos grupos: el grupo 1 que

contempló las variables que mejor explican el proceso físico y un segundo grupo, que incluyó los restantes elementos químicos (Cl, Si y Ti), evaluaciones realizadas en ambos núcleos. A través de esta técnica de proxy data, también se identifican posibles paleoeventos de oleaje extremo.

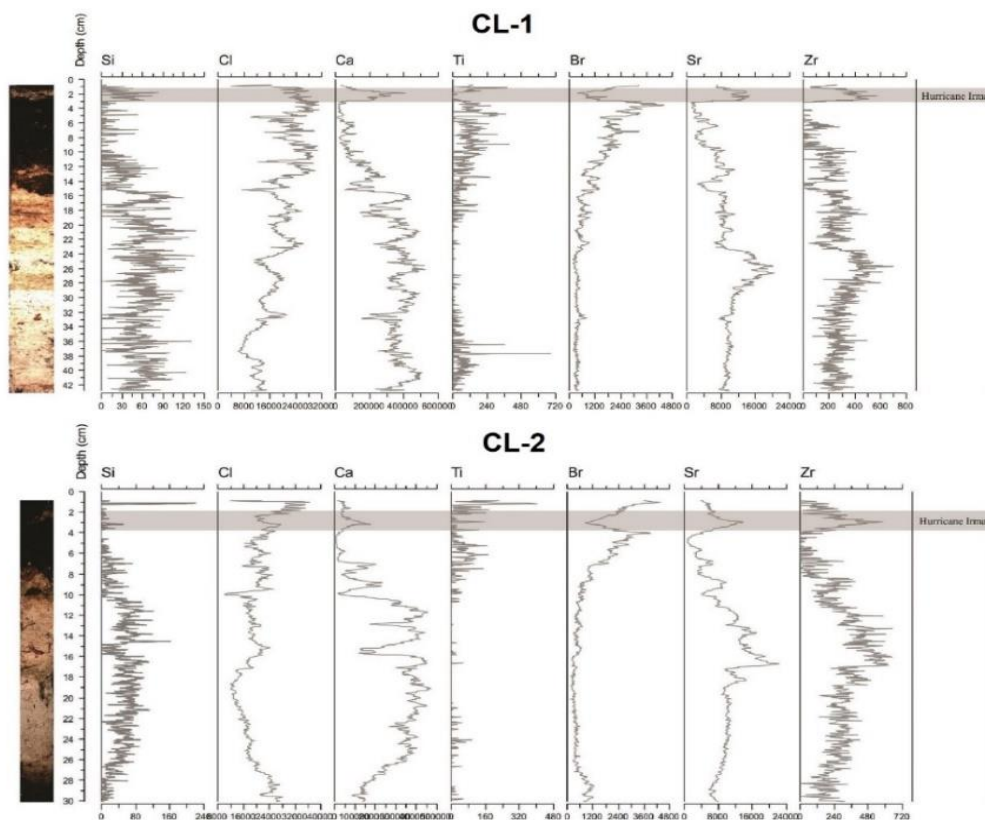


Figure 4.11. Comportamiento del contenido de elementos químicos con la profundidad. *Elaboración propia.*

El Ca muestra picos máximos de interés en profundidades próximas a superficie, comportamiento similar en ambos núcleos. También se observó un pico máximo en la profundidad 39-42 en CL01. Ambos núcleos presentaron picos máximos en profundidades medias estimadas en: 12-13, 15-16, 20-21, 25-26, 29-30 cm (CL01); 7- 9, 11-12, 13-14, 16-17, 18-19 cm (CL02).

En el caso de Br, las semejanzas y diferencias más acentuadas entre CL01 y CL02, es que ambos evidencian las acumulaciones asociadas al huracán Irma, el primero en profundidad 1-3 cm y el segundo en 2-4 cm. A mayores profundidades aparece el reflejo de un paleoevento en CL01 y CL02, a profundidades respectivas de 32-33 y 29-30 cm.

El elemento Zr, con una elevada variabilidad, mostró como resultados de mayor interés la presencia de un posible paleoevento en profundidades intermedias en ambos núcleos. Este evento se visualizó en ~25.5 y ~15-17 cm, en CL01 y CL02, respectivamente.

La distribución de Sr con la profundidad también mostró la presencia del huracán Irma en los primeros niveles de profundidad, 1,5-3,0 cm en CL01 y 2,5-3,5 cm en CL02. En CL01 se observaron dos paleoeventos en las profundidades 25-26 y 27-29 cm, mientras que en CL02 estos paleoeventos se observaron en las profundidades 26-27 y 29-30 cm. En ambos núcleos fueron observadas otras posibles acumulaciones. En CL01 estas deposiciones se visualizaron en las profundidades 6-7, 12-13, ~18,5 y ~20,5 cm, mientras que en CL02 se observaron en 7-9, 12-14, ~16,5 y ~18,5 cm.

Los elementos Si y Ti mostraron una gran variabilidad, sin valores de interés de Ti para el caso del núcleo CL02. En CL01, el Si presentó valores más elevados en el estrato que contiene la deposición asociada al huracán Irma, así como a partir de los 16 cm de profundidad. En CL02, este elemento concentró los valores en la porción intermedia del núcleo, entre 10 y 28 cm.

Con el Cl se evidenció un comportamiento similar a otros casos, con la observación del huracán Irma en las primeras profundidades y un paleoevento al final del perfil sedimentológico. Este elemento mostró otras profundidades de interés. En CL01 resaltaron las profundidades 6-7, 9-11, ~18,5, 22-23, ~27,5 y 32-33 cm. Las profundidades con valores de interés en CL02 fueron ~6-10, 15-16 y ~18,5 cm.

4.1.9. Eventos y paleoeventos identificados en los perfiles sedimentológicos.

Según la trayectoria de los huracanes intensos (categorías 3, 4 y 5) con influencia en Cayo Coco, con la finalidad de relacionar con algunos de los paleorecords, se identificaron solo tres huracanes con estas características: huracán de Faquinetto en septiembre de 1888; huracán de Santa Cruz del Sur, en noviembre de 1932; y el huracán Irma, en septiembre de 2017, estos sistemas con incidencias en la cayería norte como huracanes de categorías 3, 4 y 5, respectivamente.

Discutir la identificación de los paleoeventos, con el peso de las variables tratadas en cada núcleo. Elaborar un gráfico con el registro de los paleoeventos, según profundidad y edad de dichos paleoeventos en los núcleos, incluyendo las variables de mayor peso en los correspondientes perfiles (Figs. 4.12 y 4.13).

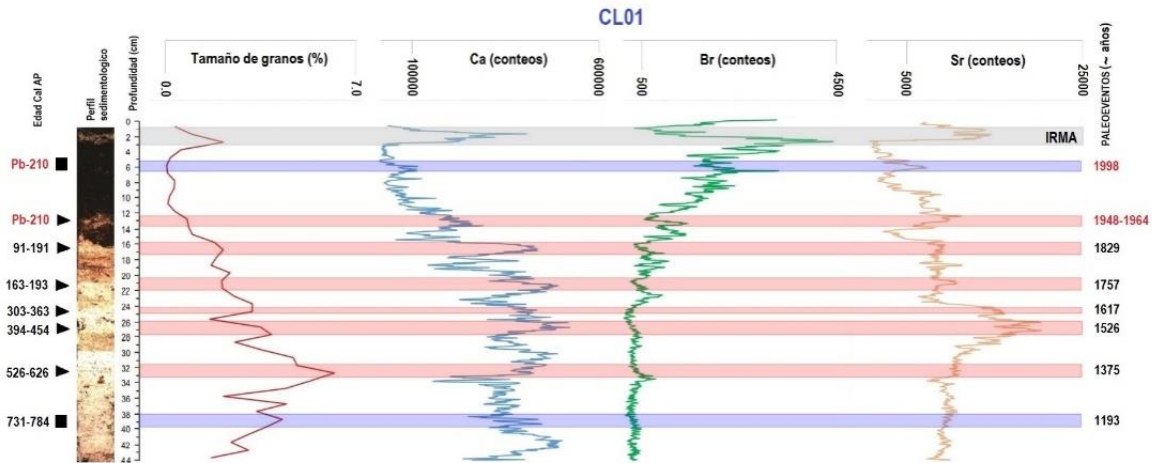


Figura 4.12. Registro del huracán Irma y paleoeventos de oleaje extremo en el perfil sedimentológico de CL01. *Elaboración propia.*

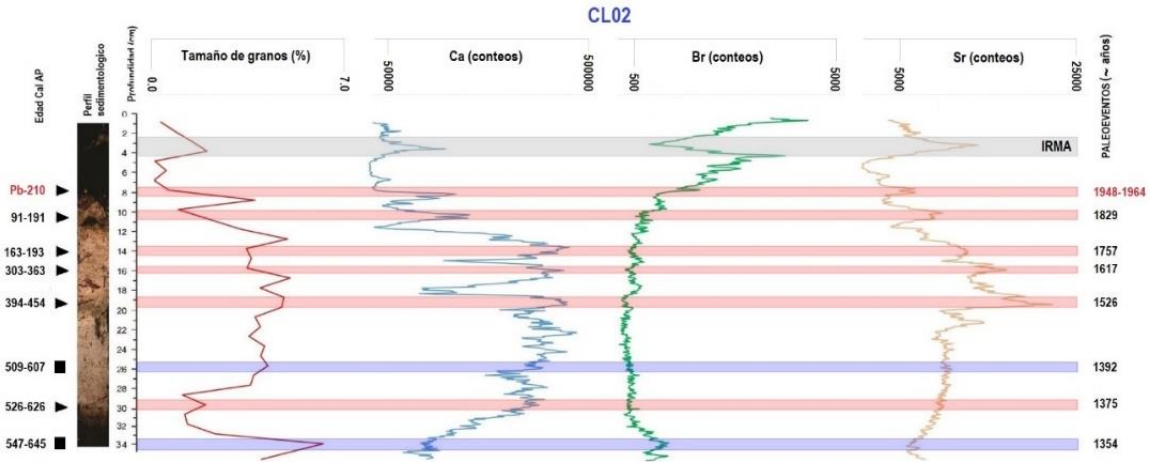


Figura 4.13. Registro del huracán Irma y paleoeventos de oleaje extremo en el perfil sedimentológico de CL02. *Elaboración propia.*

Se visualiza en ambos perfiles, la presencia de acumulación que se estima sea el huracán de 1963 (Flora). Este sistema salió por la costa norte de Cuba con categoría 4; sin embargo, el huracán de Santa Cruz del Sur (1932) también salió por la costa norte de Cuba, con igual categoría y con trayectoria más cercana al área estudio, y no se registró la acumulación de sedimentos asociada a este sistema. Nuestra hipótesis es que el huracán Flora aún más distante, tuvo un movimiento más lento.

Tampoco se observa el registro del huracán de Faquinetto (1988) en las muestras sedimentológicas. Este huracán pasó por la costa norte de Cayo Coco, pero lo hizo como huracán de categoría 3.

El evento de ~1757, con error de edad que define un rango de tiempo entre 1727 y 1787, aparece registrado en ambos perfiles. El único evento de oleaje extremo identificado en este periodo es el tsunami de Lisboa (1755). Esto debe corroborarse con otras técnicas de proxy data, porque de verificarse este fenómeno sería el primer registro oficial de un tsunami en Cuba. En la presente investigación, preliminarmente se presenta como hipótesis la presencia en las profundidades 20-22 cm y 13-15 cm, en los núcleos CL01 y CL02, respectivamente.

Existen dos eventos de oleaje extremo registrados solamente en CL01: huracán Georges (1998) y el paleoevento ocurrido aproximadamente en 1193. Así mismo, el CL02 recoge dos paleoeventos registrados solo en este núcleo: ~1354 y ~1392. Debe evaluarse particularmente la incidencia del huracán Georges en Cayo Coco, ya que aunque paso por esta zona con categoría 2, lo hizo también transitando por la Bahía de Los Perros, situación que pudo generar olas significativas al norte de la cayería.

En ambos núcleos es común un pico máximo absoluto en la distribución de Sr, que indica un evento de oleaje extremo más intenso que el huracán Irma. Este paleoevento (~1526) está reflejado a diferentes profundidades en los perfiles sedimentológicos. En CL01 se observa en la capa 26-28 cm, mientras que en CL02 se observa en el estrato 19-20 cm. Nuestra hipótesis es que esta acumulación sedimentológica corresponde a un huracán de máxima categoría, pero con vientos superiores a los registrados por el huracán Irma.

En el caso de este registro en CL01, en esta capa sedimentológica (26-28 cm, paleoevento ~1526) se detectó la presencia de un gasterópodo de una masa de 0,0232 g (ANEXO II, Foto. 4.1a). En este núcleo fue identificado otro gasterópodo de masa 0,0290 g, correspondiente al paleoevento de ~1193 (ANEXO II, Foto. 4.1b). En dos paleoeventos de CL02 también se identificaron gasterópodos en las deposiciones correspondientes a ~1392 (ANEXO II, Foto. 4.1c) y ~1375 (ANEXO II, Foto. 4.1d), de masas 0,0130 y 0,0601 g, respectivamente.

Otros trabajos han realizado el estudio de acumulaciones sedimentológicas de huracanes conocidos, análisis en el cual identifican también paleoeventos, o en algunos de los casos, comparan las deposiciones de sedimentos generadas por eventos diferentes (Liu et al., 2011;

Williams & Liu, 2019; Yao et al., 2019). En estas investigaciones se analizaron los perfiles sedimentarios en costas de EUA, asociados a los huracanes Gustav y Ike, ambos de la temporada ciclónica de 2008, y el huracán Harvey (2017).

Peros et al. (2015) señalan dos periodos de mayor actividad ciclónica en el pasado del sur de oriente de Cuba (de 1800 a 2600 años Antes del Presente, de 250 a 500 años Antes del Presente). Comparando los resultados de esta investigación con los obtenidos por estos autores, coinciden dos paleoventos identificados (~1617 y ~1526) con este periodo de hiperactividad ciclónica, siendo este segundo el más intenso identificado en los núcleos de Cayo Coco.

4.1.10. Inundaciones costeras asociadas al huracán Irma. Implicaciones a la Paleotempestología.

Se realizó una ampliación de la onda que determinó el incremento del nivel del mar en las porciones occidental y oriental de Laguna Larga, y se registró mayor altura del nivel del agua en el Senador (Fig. 4.14), con un comportamiento diferente de esa onda en el tiempo.

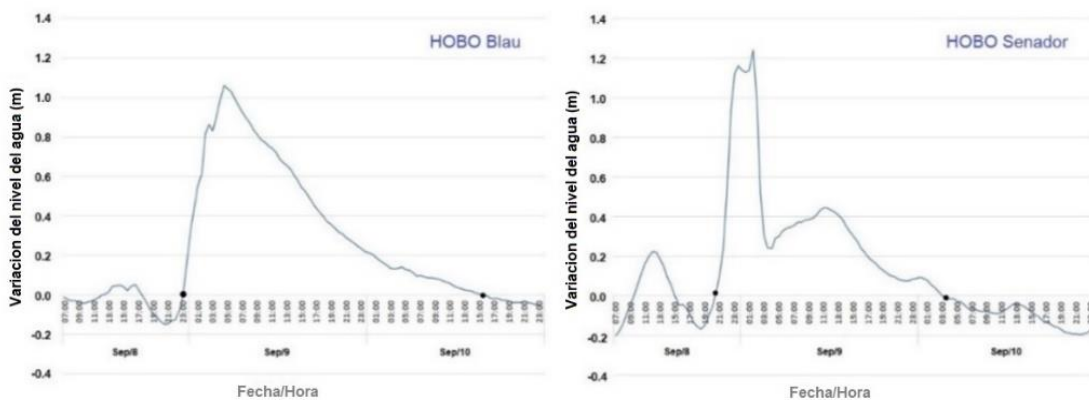


Figura 4.14. Ampliación de la onda asociada a la variación del nivel del agua (m) en el interior de Laguna Larga, medida a través de los Data logger HOBO (Blau y Senador), desde el día 8 (07:00) hasta el 10 de septiembre (23:00) de 2017, durante el paso del huracán Irma por Cayo Coco. *Elaboración propia.*

Se observó que el tiempo de exposición de la onda difiere de un punto a otro, siendo más extenso en la porción occidental de la laguna, el periodo que abarca el inicio del incremento del nivel del agua hasta el momento de recuperar su estado normal, siendo de aproximadamente 40 horas en el Blau y 30 horas en el Senador. Este último está más cercano de la zona de mejor intercambio de agua entre el mar y el interior de la laguna, siendo esta la posible causa de un mayor tiempo de agua acumulada en la porción occidental.

También se observó un desfasaje temporal de ambas ondas, iniciando primeramente en el Senador, lo cual se relaciona con la trayectoria del sistema de este a oeste, que condujo a una primera incidencia en esta porción de la laguna.

La diferencia de altura de ambas ondas está relacionada con otro proceso, además de la altura de la ola que incidió en el Blau y el Senador, debe tenerse en cuenta la marea y el momento del impacto de las olas llegadas a ambos puntos. En el momento de registro del mayor nivel del agua en el Senador, la marea superaba los 0,4 m de altura, mientras que el máximo que se observó en el Blau, ocurrió con una altura de marea inferior a 0,1 m (Fig. 4.15).

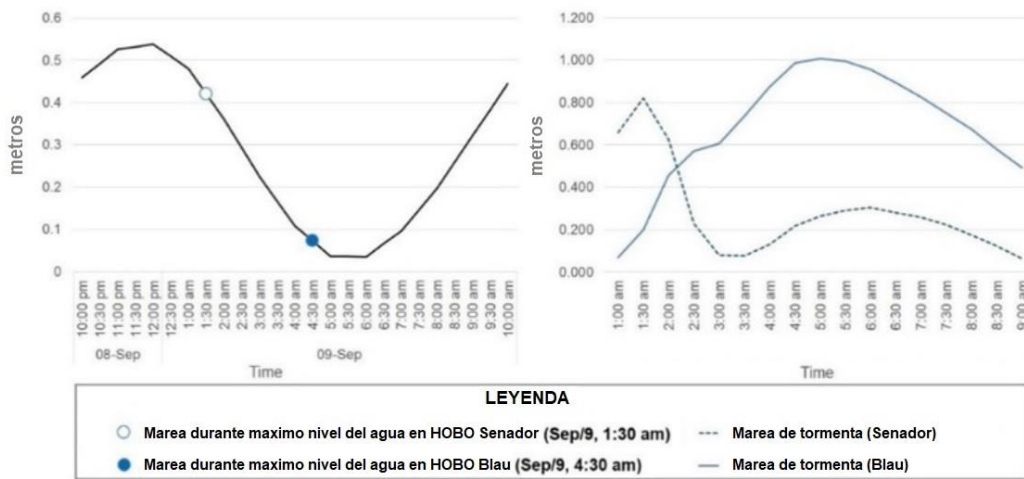


Figura 4.15. Comportamiento de la marea en Cayo Coco durante el 8 y 9 de Septiembre de 2017 (a). Distribución temporal de la marea de tormenta en las estaciones HOBO (b, Blau y Senador). *Elaboración propia.*

Comparando con otras islas del Caribe, en la isla de Barbuda, donde Irma tocó tierra como huracán de categoría 5, se produjeron importantes marejadas. Un mareógrafo de la isla, mantenido por el Servicio Meteorológico de Antigua y Barbuda, registró un nivel máximo de agua de 2,40 m de altura media superior, lo que sugiere que se produjo una inundación de al menos 2,43 m sobre el nivel del suelo en algunas partes de la isla. Además, en Puerto Rico los niveles máximos de inundación sobre el nivel del suelo, oscilaron entre 0,30 y 0,61 m, con mayores valores en la costa norte de esta isla.

El INSMET informó que Irma produjo importantes inundaciones costeras a lo largo de la costa norte de Cuba debido a la marejada y a las grandes olas. En la provincia de Ciego de Ávila, el mar subió

entre 3 y 3,5 m y penetró hacia el interior a más de 800 m de la costa. La altura de las olas en Cayo Coco se estimó entre 5 y 6 m.

En la provincia de Camagüey, el agua alcanzó una altura de 2 m y se adentró 200 m desde la costa en Cayo Romano, donde Irma tocó tierra como huracán de categoría 5. Allí se observaron olas de más de 8 m de altura. En Puerto Piloto, el mar se retiró mar adentro de 10 a 12 m debido a los vientos del sur en el lado oriental de la circulación de Irma. El mar se elevó hasta 3 m en Caibarién, en la provincia de Villa Clara, y la marea penetró aproximadamente 2 km tierra adentro en Isabela de Sagua. En partes de la provincia de La Habana se produjeron inundaciones sin precedentes, que en algunos casos superaron las inundaciones costeras producidas por la Tormenta del Siglo (marzo de 1993) y el huracán Wilma (octubre de 2005). El nivel de las aguas alcanzó los 2,25 m en algunos lugares.

Estas variables deben ser consideradas en las investigaciones paleotempestológicas. En primer lugar, debe analizarse previamente el o los puntos a seleccionar para la toma de muestras sedimentológicas, a partir de las características del sistema y la forma de impacto en la zona a estudiar. También debe ser útil considerar los cambios de marea en los sitios de estudios; aunque en el caso particular de Cuba los cambios de mareas no son significativos.

Resulta de mucho interés el análisis de perfiles de playas en este tipo de investigaciones, fundamentalmente perfiles próximos a los puntos de muestreo, con el fin de relacionar la deposición sedimentológica con los cambios experimentados en la duna que protege la laguna. En nuestro caso de estudio, la duna que separa Playa Larga y Laguna Larga, perdió 1.20 m de altura debido al impacto del huracán Irma (Fig. 4.16).

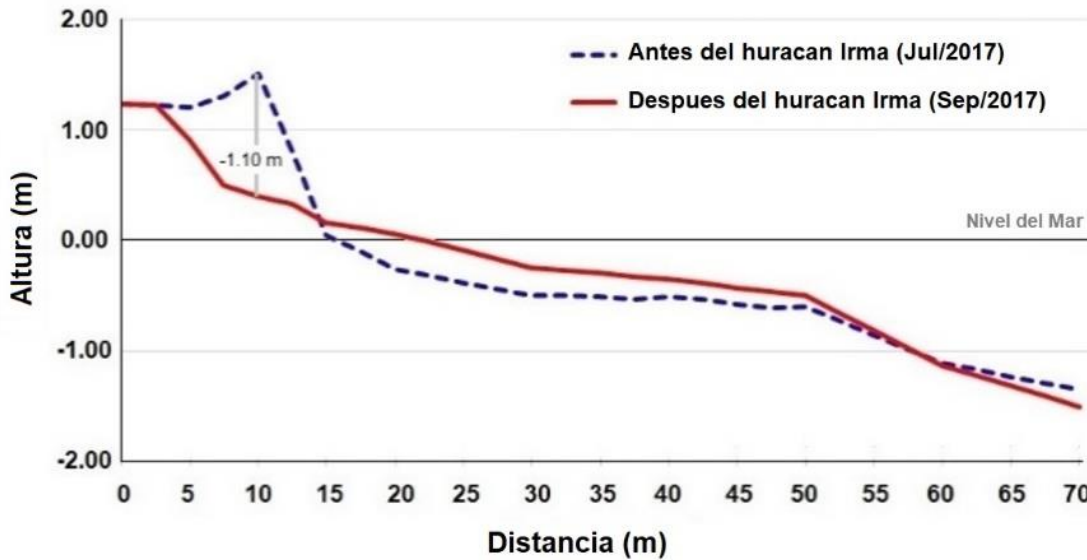


Figura 4.16. Perfil de Playa Larga antes/después del impacto del huracán Irma (2017). *Elaboración propia.*

El huracán Irma generó variaciones importantes en el perfil de Playa Larga, depositando arena del fondo marino a partir de 1 m de profundidad aproximadamente y realizando nuevas deposiciones a partir de los 55 m del punto de control del perfil, cubriendo esta deposición hasta 14 metros del punto del perfil. Sin embargo, a partir de este último punto y hasta los 2.5 m aproximadamente lo que ocurrió fue pérdida de arena, desde la parte superior de la duna. Se recomienda realizar comparaciones de la granulometría de Playa Larga, con el contenido de arena reflejado en los núcleos sedimentológicos.

4.2. Huracanolitos en Cuba: una vía para estudiar paleohuracanes.

4.2.1. Distribución espacial de huracanolitos en Cuba.

Se actualizó la distribución espacial de los huracanolitos en Cuba. En la cartografía, los sectores costeros fueron definidos considerando fundamentalmente la similitud de las características de las acumulaciones, según las dimensiones y densidad de los bloques. De esta manera, fueron identificados cinco y cuatro sectores en las costas norte y sur, respectivamente.

Al mismo tiempo, cada sector fue dividido en subsectores costeros (más de veinte en ambas costas), definiéndose los límites geográficos de estos (ANEXO III, Fig. 4.17), tanto para la costa norte como para la costa sur. Se realizó un compendio de los sectores costeros, identificando los extremos oeste y este de cada sector, así como las provincias de ubicación y las longitudes de líneas de costa con bloques (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Sectores costeros con huracanólitos en ambas costas (norte y sur) de Cuba.

Sector	Desde	Hasta	Prov.	Long (km)
COSTA NORTE				
1N	Punta Pescadores	Punta de Morlas	ART- MTZ	206,6
2N	Punta Cayo Blanco	Cayo Boca China	MTZ-VCL	205,4
3N	Punta del Asta	Cayo Paredón Grande	VCL-CMG	30,5
4N	Punta Central	Cabo Lucrecia	CMG-HLG	162,1
5N	Punta Barlovento	Ensenada Los Azules	GTM	63,7
COSTA SUR				
1S	Punta Caleta	Punta del Este	PRI-IJV	308,2
2S	Playa Girón	Punta Cabeza Churrosa	MTZ-CMG	171,6
3S	Mafo	Playa Caletoncito	GRM-SCU	86,3
4S	Playa Tortuguilla	Punta de Quemado	GTM	74,1

Leyenda: Prov.: Provincia; Long.: Longitud de línea de costa con huracanólitos, expresada en kilómetros; ART: Artemisa; MTZ: Matanzas; VCL: Villa Clara; CMG: Camagüey; HLG: Holguín; GTM: Guantánamo; PRI: Pinar del Río; IJV: Isla de la Juventud; GRM: Granma; SCU: Santiago de Cuba.

El nuevo mapa de distribución espacial de huracanólitos, permitió calcular que las costas norte y sur (incluyendo los cayos) tienen valores respectivos de 668,3 y 640,3 km con bloques. Ello hace un total de 1308,5 km de línea de costa con presencia de bloques.

Del total de línea de costa con estas acumulaciones, se definieron cuánto corresponde a la isla de Cuba y cuánto a las costas de los cayos. Igualmente se identificaron aquellos subsectores costeros con mayores longitudes con su presencia.

En la costa norte, 236 km corresponden a sectores costeros de los cayos, mientras que en la isla de Cuba, la línea de costa con huracanólitos suma una total de 432,3 km de longitud; este último valor representa el 13% de la longitud de esta costa. Referido a las acumulaciones de los cayos, la porción oeste del Archipiélago Sabana-Camagüey (ASC), concentra mayor número de *boulders*; aunque el extremo más oriental del ASC contiene bloques de mayores dimensiones. Resalta el subsector costero extendido entre Punta Cayo Blanco (Matanzas) y Cayo Bahía de Cádiz (Villa Clara), con 74,6 km de línea de costa con huracanólitos.

En la costa sur, 180,7 km corresponden a sectores costeros de los cayos. En la isla de Cuba, el total de línea de costa con huracanólitos es de 459,6 km de longitud (18%). Respecto a las acumulaciones de los cayos del sur, el mayor número de huracanólitos se concentra en los cayos del Archipiélago de Los Canarreos; aunque los bloques de estos cayos son relativamente inferiores a los del AJR (en dimensiones y densidad). En la costa sur de la isla de Cuba, el subsector costero extendido entre Playa Girón (Matanzas) y Playa Fajardo (Sancti Spíritus), representa la línea de

costa más extensa con presencia de huracanolitos (116,8 km), seguido por la Isla de la Juventud, con un total de 69 km de longitud con bloques.

En el sur del oriente de Cuba se identificó un sitio desconocido en cuanto a presencia de bloques (base naval de Guantánamo), a pesar de haberse aplicado técnicas de análisis de imágenes satelitales. En otros sitios de este sector no se observaron huracanolitos, asociado a diferentes causas: talud insular que coincide con la línea de costa y bloques provenientes del talud emergido. La fuente generadora de estos últimos casos no son eventos de oleaje extremo.

4.2.2. Distribución espacial de huracanolitos. Comparación con otros resultados

Núñez-Jiménez (1982) es uno de los trabajos más citados en investigaciones sobre huracanolitos en Cuba, según un estudio bibliométrico (Aguirre et al., 2021). Núñez-Jiménez (1982) describió por primera vez los lugares donde fueron observadas estas formas costeras, mencionando tres sitios que fueron también recogidos por Rodríguez & Acosta (2017) en un estudio sobre los huracanolitos de la zona de Trinidad (Sancti Spíritus).

Estos autores (Núñez-Jiménez, 1982; Rodríguez & Acosta, 2017), mencionan los tramos costeros con acumulaciones de bloques; pero sin visualizar resultados a través de un mapa. Iturralde-Vinent es el autor que mostró por primera vez un mapa esquemático con la distribución de huracanolitos en las costas cubanas (Iturralde-Vinent, 2009), adicionando dos nuevos tramos de costa con huracanolitos.

Iturralde-Vinent (2010) realizó una actualización de la distribución espacial de *boulders* en Cuba; en el nuevo mapa, además de las localidades identificadas con anterioridad, aumenta la longitud de línea costera con bloques en la costa norte y adiciona nuevas localidades en la costa sur. De esta manera, Iturralde-Vinent (2010) identificó en la nueva versión de mapa, ocho sectores costeros con presencia de huracanolitos.

Magaz & Portela (2017) identificaron la presencia de bloques en ocho sectores costeros (Fig. 4.18a), mientras que Iturralde-Vinent (2017) identificó 10 sectores costeros con huracanolitos (Fig. 4.18b). A través del presente estudio se obtuvo un mapa actualizado de la distribución espacial de huracanolitos (Fig. 4.18c), que fue comparado con los resultados obtenidos previamente por Iturralde-Vinent (2017) y Magaz & Portela (2017).

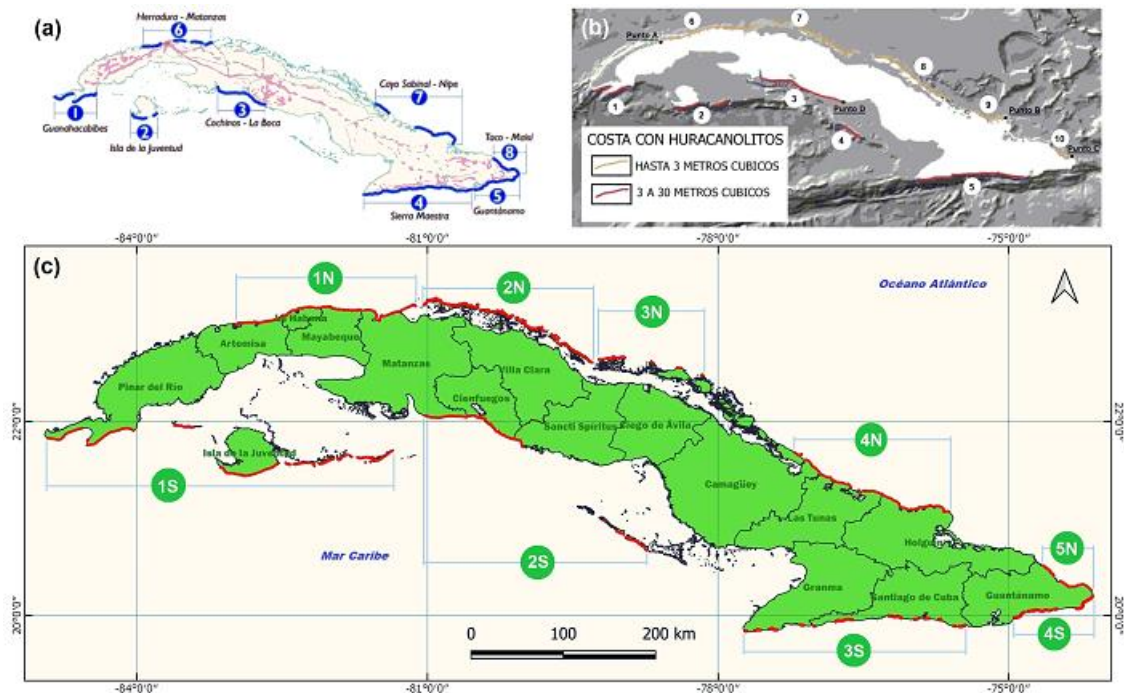


Figura 4.18. Distribución espacial de *boulders* en Cuba: (a) Tramos costeros donde son más comunes los huracanólitos (Magaz & Portela, 2017); (b) Mapa esquemático de las costas rocosas con huracanólitos, indicando el volumen máximo promedio (adaptado de Iturralde-Vinent, 2017); (c) Nueva distribución espacial para Cuba (presente estudio). *Elaboración propia.*

Pese a las diferencias generales entre los tres resultados, tres de los nuevos sectores identificados coinciden total o parcialmente con los obtenidos por Iturralde-Vinent (2017) y Magaz & Portela (2017), por lo que permite realizar comparaciones, en unos casos de manera general, y en otros, comparaciones por sectores costeros específicos.

Los principales aportes del presente trabajo radican en los siguientes aspectos:

- Agrupamiento de sectores costeros, como es el caso de Pinar del Río e Isla de la Juventud, así como el sur de Matanzas-Sancti Spiritus y el AJR, que para ello se tuvo en cuenta la similitud de las características de estos tramos costeros, teniendo en cuenta la densidad y dimensiones de los bloques de estas zonas.
- Mejor definición de los *boulders* localizados en el ASC.
- Una distribución no continua de los huracanólitos del suroriente cubano, característica verificada a través de los trabajos de campo (ver ANEXO III, Fig. 4.17, sector costero 3S).

- Incorporación de nuevos sitios con bloques, como los cayos de Pinar del Río, localizados en esta provincia y el municipio Isla de la Juventud.

Se realizó la comparación de las longitudes de costas con *boulders*, las correspondientes al nuevo mapa con las distribuciones espaciales obtenidas previamente (Iturralde-Vinent, 2017; Magaz & Portela, 2017), visualizándose las diferencias entre los tres resultados (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Longitud de costa con presencia de huracanolitos, incluida la isla de Cuba y los cayos. Comparación del nuevo mapa con los principales antecedentes.

ZONA GEOGRAFICA	Magaz & Portela (2017)	Iturralde-Vinent (2017)	Presente trabajo
isla de Cuba (costa norte)	348,2	460,9	432,3
cayos (costa norte)	35,8	242,4	236,0
Total (Costa Norte)	384,0	703,3	668,3
isla de Cuba (costa sur)	678,9	669,1	459,6
cayos (costa sur)	0,0	157,0	180,7
Total (Costa Sur)	678,9	826,1	640,3

En el caso de los huracanolitos en los cayos, Magaz & Portela (2017) muestran longitudes inferiores al presente trabajo, mientras que Iturralde-Vinent (2017) obtuvo valores superiores en la costa norte. En cuanto a las distribuciones de los bloques en la isla de Cuba, las mayores diferencias se observan en la costa sur, ya que en ambos resultados las acumulaciones del sur del oriente cubano son presentadas de forma continua, lo que genera valores sobredimensionados respecto a la nueva distribución.

4.2.3. Ecuaciones de Engel y May (2016). Aplicación en bloques del norte de Ciego de Ávila.

Aplicar las ecuaciones hidrodinámicas establecidas para el movimiento y transporte de estos bloques, ayuda a validar dichas ecuaciones, a partir del conocimiento del sistema que generó el proceso, por tanto, se valida la altura de la ola. Este análisis contribuye a mejorar los métodos de análogos, muy útiles para investigar las acumulaciones antiguas.

Así por ejemplo, estas ecuaciones han sido aplicadas en dos bloques ubicados en la cayería norte de Ciego de Ávila. Irma es considerado el primer huracán de categoría 5 que impacta en el área de estudio, a partir de datos desde 1851. Sin embargo, Cayo Paredón Pelado es uno de los sitios de Cuba con huracanolitos (Fig. 4.19); además, uno de los tres sitios de la costa norte con presencia de bloques de mayores dimensiones (Fig. 4.20).



Figura 4.19. Coastal boulders en Cayo Paredón Pelado.



Figura 4.20. Evidencia gráfica de las dimensiones de dos bloques depositados en Cayo Paredón Pelado.
Foto: Felipe Matos.

Considerando la relativa cercanía entre Cayo Paredón Pelado y Cayo Coco, y que el huracán Irma dada su trayectoria, generó los mayores impactos en toda la costa norte de Ciego de Ávila, se plantea la hipótesis de que estos bloques fueron movidos por olas de mayores dimensiones que las asociadas al huracán Irma (entre 8 y 9 metros en esta área). Dicha hipótesis está basada en los resultados de las ecuaciones matemáticas que definen el transporte de estas acumulaciones en zonas costeras, aplicadas a estos dos bloques, el número uno con volumen $14,50 \text{ m}^3$ ($5,00 \times 2,90 \times 1,00$) y el dos con volumen de $20,26 \text{ m}^3$ ($5,70 \times 3,95 \times 0,90$).

Rodríguez & Acosta (2017), teniendo en cuenta otros antecedentes, plantean que un estudio de las unidades litoestratigráficas de Cuba refiere en el Cuaternario, solamente la densidad a la Formación Canimar, de edad comprendida entre el Plioceno Superior y el Pleistoceno Inferior, con valores que oscilan entre $2,50$ y $2,65 \text{ g/cm}^3$. En nuestro trabajo se asumió un valor medio de dicho rango, lo que equivale a $2,58 \text{ g/cm}^3$. En el caso de θ , en el trabajo se asignó el valor de 10° . De esta manera se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 4.4), con el cálculo correspondiente a los tres posibles escenarios, obteniéndose que para olas generadas por huracanes (H_H), los valores mínimos de las ondas pudieron haber sido alcanzados por un huracán con trayectoria por el área de estudio. El

oleaje generado pudo tener la energía para mover ambos bloques, con masas respectivas de 37,4 y 52,3 toneladas, a partir de sus respectivos volúmenes y la densidad considerada.

Tabla 4.4. Altura de olas asociadas con el transporte de los bloques depositados en Cayo Paredón Pelado. Cálculos correspondientes a tres escenarios.

<i>Boulders</i>	<i>Altura de ola</i>	<i>Escenario 1</i>	<i>Escenario 2</i>	<i>Escenario 3</i>
1	$H_T(m)$	2.8	1.2	1.7
	$H_H(m)$	11.3	4.9	6.7
2	$H_T(m)$	2.5	1.5	2.3
	$H_H(m)$	10.2	6.1	9.1

Por las evaluaciones realizadas durante el trabajo de campo, se concluyó que el proceso costero ocurrió bajo condiciones de escenario de tipo 1, o sea, que la onda que impactó en el área arrancó estos bloques del borde exterior de la plataforma emergida. Por lo que se infiere que los bloques fueron arrancados y movidos por un huracán con olas entre 10 y 12 m de altura; con valores de 2 a 3 unidades superiores a las olas asociadas al huracán Irma, que en los límites de aguas profundas al norte de Ciego de Ávila, las alturas oscilaron entre 8 y 9 m.

Aunque no se cuenta con la datación de estas deposiciones, los cálculos contribuyen a identificar otro posible huracán intenso con impacto en el norte de esta provincia, que según las características descritas correspondió a un huracán de categoría 5, aunque de mayor intensidad que el huracán Irma. La hipótesis infiere un huracán de gran intensidad antes de 1851. En este caso, se estima sumar en la estadística de huracanes de categoría 5 con influencia en el área de estudio, al sistema asociado al transporte de ambos bloques.

4.2.4. Huracanolitos vs eventos de oleaje extremo.

En el presente estudio se ha demostrado que el 100 % de las costas cubanas presentan altas probabilidades de haberse convertido en medios sedimentarios de huracanolitos, atendiendo a la gran cantidad de impactos de huracanes intensos a lo largo de la historia, así como las más diversas y extendidas fuentes de aportes de ellos. No obstante, la distribución de los medios sedimentarios de huracanolitos en Cubano es homogénea, concentrándose en sectores costeros específicos. También se ha demostrado, una alta correlación espacial entre los factores geomorfológicos y la distribución de los sectores costeros con presencia de huracanolitos en Cuba. Estos resultados, conducen a la conclusión de que el proceso de sedimentación de huracanolitos, está regido por la actuación sinérgica de los tres grupos de factores naturales analizados. Pueden

ausentarse del proceso, ciertos factores dentro de cada grupo, por ejemplo, que un territorio sea afectado por tsunamis y no por huracanes o viceversa, que no haya presencia de arrecifes de coral, o que no haya presencia de un saliente costero pronunciado; pero nunca, ausencia total de un grupo de factores, o que los tres presenten características desfavorables en el proceso, en cualquiera de estos casos, no será posible que sean depositados huracanolitos en la costa.

A pesar del actuar sinérgico entre los tres grupos de factores, han sido los geomorfológicos, los que han determinado la diferenciación en la distribución espacial de los medios sedimentarios de huracanolitos en Cuba. No obstante, para que ocurra el transporte de estos bloques es obligatoria la presencia del evento o paleoevento de oleaje extremo (tsunamis o huracanes), como fuentes generadoras de esa energía, con capacidad de generar estos procesos costeros. Se hace necesario tratar la incidencia de ambos fenómenos en Cuba.

4.2.4.1. Tsunamis en Cuba.

En Cuba, el posible impacto de tsunamis en el pasado constituye un tema muy polémico. La gran cantidad de huracanolitos en las costas cubanas, de grandes dimensiones, conduce a pensar en paleotsunamis como causantes de sus deposiciones. A pesar de no haber pruebas que lo demuestren, el territorio no está exento de posibles impactos de estos fenómenos de génesis geológica, al haberse registrado varios de severas afectaciones en países del Caribe cercanos a Cuba.

Según Fernández & Daños (2002), en el sistema de fallas Polochic-Motagua y el Cinturón Deformado del Norte de Panamá, se han producido los temblores que han originado tsunamis en el Caribe. Señala además, un total de 12 tsunamis desde 1539 hasta el 2000. Iturralde Vinent (2011) hacen referencia a otros siete casos de tsunamis en el área: Haití, 1842; Venezuela, 1853; Islas Vírgenes, 1867; Panamá, 1882; Jamaica, 1906; Puerto Rico, 1918 y República Dominicana, 1946.

Otros autores hacen referencia a tsunamis notables en el Caribe y el Atlántico: Lisboa, Portugal, noviembre de 1755; Grand Banks, Newfoundland, Este de Canadá, noviembre de 1929; Haití, enero de 2010.

Según el mapa de las costas cubanas con amenaza de tsunami de Iturralde Vinent (2011), muchas de estas costas coinciden con la presencia de huracanolitos en ellas. A pesar de estos peligros, el hecho de no existir un registro confiable de impactos de tsunamis en Cuba, descarta a estos fenómenos como el origen del proceso de sedimentación de huracanolitos, para el desarrollo de la

presente investigación. Además, en la presente investigación también se evidencia la gran carga de energía que posee un huracán, con las potencialidades suficientes para poder mover bloques de grandes dimensiones (ANEXO IV, Foto 4.2).

4.2.4.2. Huracanes en Cuba.

Debido a la situación geográfica del archipiélago cubano, los ciclones tropicales representan un peligro hidrometeorológico en sus zonas costeras. Cada año, durante la temporada ciclónica, estos fenómenos meteorológicos provocan cambios en el relieve litoral. Los huracanes de gran intensidad, con categorías 3, 4 y 5, son los de mayor probabilidad de depositar huracanitos al impactar las zonas costeras, debido a la mayor intensidad y altura del oleaje, marea de tormenta y surgencia que generan.

Diversos estudios en Cuba muestran la cronología de ciclones tropicales que han afectado todo el territorio nacional (Pérez et al., 2001; Pérez, 2013). Estos estudios se basan en la cercanía de las trayectorias de los ciclones o que pasaron a una distancia determinada del territorio, según el criterio de los autores. Son considerado además, los puntos de entrada y salida en tierra, daños en la vegetación, y relatos de vivencias de personas, ya que muchos de ellos ocurrieron en épocas pasadas donde no se contaba con las tecnologías para el seguimiento de esos fenómenos.

Sin embargo, en muchos de estos casos resulta difícil determinar la porción del territorio afectada por el paso de determinado ciclón, o el sector costero impactado, lo que constituye un tema considerado también en la presente investigación.

Para este caso, se trabajó con el radio de vientos máximos (RVM) de estos sistemas, ya que es donde se genera una mayor altura del oleaje y marea de tormenta. Esta zona de la estructura de un ciclón tropical, es la que concentra la mayor energía.

Una primera incertidumbre es que solo se cuenta con las trayectorias de los huracanes de esta data (desde 1851), y en las costas cubanas también existen bloques antiguos, por lo que la relación huracanes-bloques estará limitada en el tiempo, hasta tanto no se potencien las investigaciones referidas a las dataciones de estas acumulaciones.

Un segundo inconveniente es que los datos de RVM de los ciclones también son limitados, ya que este campo está registrado a partir de 2004 en la base de datos de ciclones tropicales. Por ello, fueron promediados los RVM conocidos, en los cuatro cuadrantes de estas categorías de huracanes, para toda la cuenca del Atlántico. Se asumió ese valor promedio para los huracanes de cada una de

estas tres categorías anteriores al 2004 (Tabla 4.5); en los restantes casos se utilizó el valor real correspondiente a cada organismo ciclónico, según la base de datos Hurdat 2.

Tabla 4.5. Promedio del Radio de Viento Máximo de los huracanes intensos en la cuenca del Atlántico (2004 – 2018), según los cuadrantes.

Categorías de huracanes	Promedio del RVM por cuadrantes (km)				
	NE	SE	SO	NO	Los cuatro cuadrantes
3	80,62	69,12	55,52	69,67	68,73
4	89,85	73,65	56,54	77,73	74,44
5	94,77	81,02	56,72	84,64	79,29
3, 4, 5	86,39	72,54	56,11	75,01	72,51

Leyenda: NE: Noreste; SE: Sureste; SO: Suroeste; NO: Noroeste. **Fuente:** Base de datos Hurdat 2.

Independientemente de la categoría de un huracán, el RVM puede variar, es decir, puede haber huracanes de gran intensidad con un RVM menor que uno de menor categoría. Sin embargo, al promediar los RVM de los huracanes intensos, ocurridos entre el 2004 y el 2018, se aprecia un aumento del RVM a medida que incrementa la categoría del huracán. Esto demuestra, que a pesar de excepciones, esta regla se cumple en la mayoría de los casos (ver Tabla 4.5).

Tomando en cuenta estos valores, se crearon *buffers* de RVM de los huracanes de categorías 3, 4 y 5 en el Atlántico, y correspondientes al mencionado periodo (1851 – 2018). De esta manera, se pudo identificar con mayor exactitud los que influyeron en las costas cubanas, impactando con determinada intensidad, según también la distancia a la costa.

En ocasiones algunos sistemas de este tipo, aun con trayectorias muy distantes de la costa cubana, generan inundaciones importantes. Un buen ejemplo de este caso, fue el huracán Joaquín en 2015, sistema al que no se le prestó mucha atención por su lejanía; sin embargo, se tienen evidencias de olas superiores a tres metros de altura que impactaron la costa norte de Cayo Coco (ANEXO IV, Foto 4.3).

Según estudios de modelaciones de olas asociadas a huracanes, realizados por Salazar-Vallejo (2002), el oleaje de un huracán comienza a sentirse en la costa a una distancia de 150 km del ojo y a los 50 km es que causa el mayor impacto; esta es una distancia bastante generalizada que no toma en cuenta, entre otras cosas, la categoría del fenómeno. El criterio asumido en la presente investigación, según Tabla 4.5, es más preciso que el aplicado por Salazar-Vallejo (2002).

De esta manera se pudieron determinar los huracanes de gran intensidad que han impactado en el territorio nacional, entre 1851 y 2018 (Fig.4.21, Tabla 4.6). En la información tabulada sobre los huracanes intensos, se identifican aquellos sistemas que generaron deposiciones de bloques,

como los bloques de la costa de Pinar del Río, que fueron movidos por el huracán Iván en 2004. Así mismo se han identificado bloques en Cienfuegos (huracán Dennis, 2005); Santiago de Cuba (huracán Sandy, 2012); Guantánamo (huracán Matthew, 2016); Matanzas (huracán Irma, 2017).

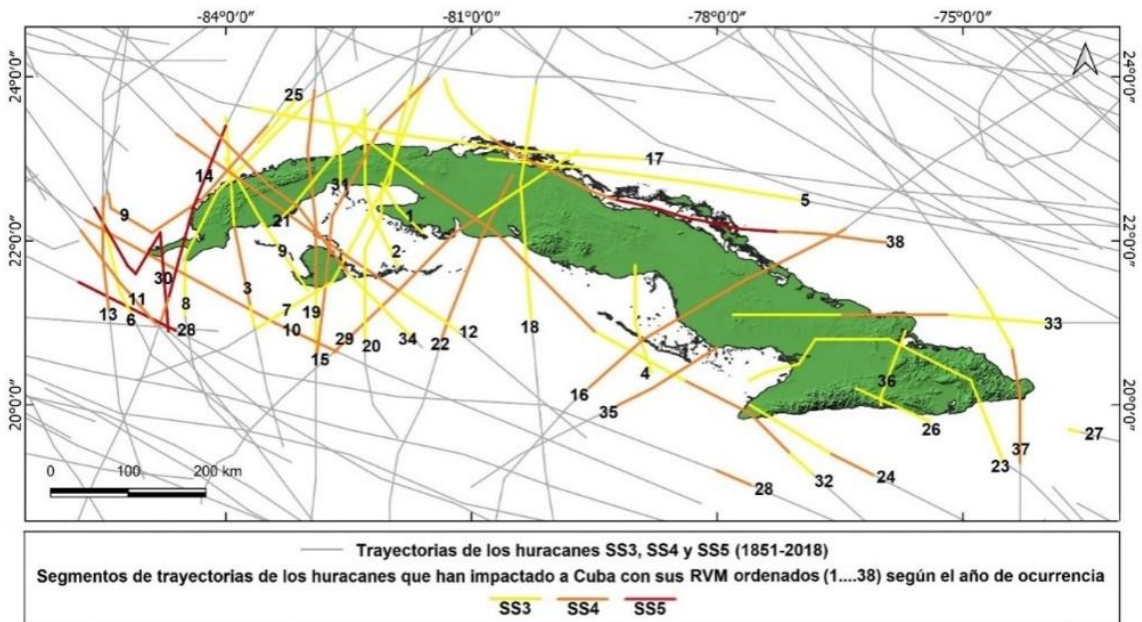


Figura 4.21. Segmento de trayectorias de huracanes de máximas categorías (3, 4 y 5), que han impactado a Cuba con sus RVM. Periodo: 1851 – 2018. Tomado de León, 2022.

Tabla 4.6. Cronología de huracanes de máximas categorías (3, 4 y 5), que han impactado a Cuba con sus RVM, incluidos los que generaron huracanólitos. Periodo: 1851 y 2018. *Elaboración propia.*

No.	Nombre	Año	Mes	Día(s)	Categoría/Afectación	Boulders
1	Huracán de San Marcos	1870	10	7	3	
2	Huracán de Gran Caimán - La Habana	1876	10	19	3	
3	Huracán de Pinar del Río	1882	10	8-9	4	
4	Sin nombre	1886	8	21-22	3	
5	Huracán de Faquinetto*	1888	9	4	3	
6	Sin nombre	1896	9	28	3	
7	Sin nombre	1906	10	17-18	3	
8	Sin nombre	1909	10	10	3	
9	Huracán de los Cinco Días	1910	10	14-16	4	
10	Huracán de 1915	1915	8	14	4	
11	Sin nombre	1915	9	27	4	
12	Huracán de Nueva Gerona	1917	9	25-26	4	
13	Sin nombre	1921	10	23	4	
14	Huracán de 1924	1924	10	19	5	
15	Huracán de 1926	1926	10	20	4	
16	Huracán de Santa Cruz del Sur*	1932	11	9	4	X
17	Huracán de Sagua y Cárdenas	1933	9	1-2	3	
18	Huracán de Cienfuegos	1935	9	28	3	
19	Huracán de 1944	1944	10	17-18	4	
20	Huracán de Matanzas	1948	9	20-21	3	
21	Sin nombre	1948	10	5	3	
22	Fox	1952	10	24	4	
23	Flora	1963	10	4-6	3	
24	Cleo	1964	8	25	4	
25	Isbell	1964	10	14	3	
26	Inez	1966	9	30	3	
27	David	1979	9	1	3	
28	Allen	1980	8	6-7	5	
29	Michelle	2001	11	4-5	4	
30	Ivan	2004	9	13-14	5	X
31	Charley	2004	8	13	3	
32	Dennis	2005	7	7-9	4	X
33	Ike	2008	9	7-8	4	
34	Gustav	2008	8	30-31	4	
35	Paloma	2008	11	8	4	
36	Sandy	2012	10	25	3	X
37	Matthew	2016	10	4-5	4	X
38	Irma *	2017	9	8-10	5	X

Leyenda: * Huracanes intensos con afectaciones en Cayo Coco (leer **acápite 4.1.9**).

4.3. Huracanes del pasado. Relación con índices climáticos (globales-regionales).

El paleoregistro de eventos extremos de este tipo puede ayudar a encontrar respuestas sobre el comportamiento de la población aborigen ante tales fenómenos (Cooper, 2012), además de contribuir a evaluar la vulnerabilidad en la escala temporal, con énfasis en los espacios costeros. Por

ejemplo, las vulnerabilidades de las comunidades Maya han sido estudiadas en diferentes investigaciones, como es el caso de las vulnerabilidades a los procesos de sequía y huracanes durante el Periodo Clásico Terminal, con énfasis en la sequía de gran magnitud definida en este periodo (Dunning et al., 2012; Douglas et al., 2016; Evans et al., 2018; Hunter et al., 2019).

Además, la actividad ciclónica en el Atlántico tiene estrecha relación con otros fenómenos climáticos, como son los cambios de la temperatura de la superficie del mar (SST, por siglas en inglés) y la Zona Intertropical de Convergencia (ITCZ, por siglas en inglés).

Durante el evento 8.2 ma analizado a escala global (Matero et al., 2017), y detectado en el Cenote Jennifer (Peros et al., 2017) como evidencia de su extensión hasta el trópico, ocurrió el deshielo de los Lagos pro-glaciales Agassiz y Ojibway (LAO) a través de la Bahía de Hudson, generando una inyección de agua fría hacia el Atlántico Norte (Rohling & Pälike, 2005). Se cree que el catastrófico drenaje de LAO afectó la Circulación Meridional de Retorno del Atlántico Norte (AMOC, por sus siglas en inglés), generándose un descenso en la temperatura de la atmósfera de 2 °C en solo unas décadas (Rohling & Pälike, 2005).

Los datos obtenidos por Peros et al. (2017) sugieren que el evento ocurrió entre ~8120 y 8275 años calibrados AP y se caracterizó por una sequía en la región del Caribe, relacionado con otros resultados (Cheng et al., 2009). Estos últimos autores detectaron condiciones más húmedas en Cueva Padre (Brasil), y condiciones más secas en sitios del Caribe y América Central, lo cual se corresponden con la salida de los modelos que indican una disminución de las precipitaciones en la parte norte del Atlántico tropical, e incremento de esta variable en la porción sur del Atlántico tropical, ello como respuesta a la entrada abrupta de agua proveniente del deshielo en el Atlántico Norte (Morrill et al., 2013). Durante el evento, un desplazamiento hacia el sur del Anticiclón del Atlántico Norte habría traído consigo una ITCZ ubicada más hacia el sur, lo que habría aumentado la intensidad de los Vientos Alisios en el Atlántico nortropical, manteniendo un clima más seco (Wiersma & Renssen, 2006).

La importancia de este último tema radica en las posibles conexiones de dichas anomalías con el comportamiento de la actividad ciclónica en la cuenca del Atlántico durante este tiempo geológico. Se infiere que la disminución significativa de la temperatura de las aguas haya generado decrecimiento importante de los procesos de ciclogénesis, situación que debe ser analizada con mayor profundidad, aunque existen resultados que relacionan la SST con la frecuencia e intensidad

de la actividad de huracanes (Donnelly & Woodruff, 2007; McCloskey & Keller, 2009). En este contexto, tiene una gran importancia la relación de la actividad ciclónica con la termohalina (Mitrani, 2001).

Los resultados sobre los paleohuracanes, conectados además con índices climáticos, regionales y/o globales, son básicos para identificar la variabilidad de los patrones de circulación atmosférica en el pasado, por tanto, para detectar patrones de cambios de la actividad ciclónica en el Atlántico Norte en diferentes épocas geológicas. Algunas investigaciones defienden la hipótesis sobre como el cambio climático global afecta los patrones de huracanes en el Caribe (Frappier et al., 2007; McCloskey et al., 2013).

Los datos paleotempestológicos en el Caribe, combinados con la variabilidad del clima en el Atlántico Norte, sugieren que la frecuencia e intensidad de los huracanes fluctuaron entre el Holoceno Medio y el Holoceno Tardío (Cooper & Peros, 2010), por lo que se infiere que las comunidades del Caribe, desde los aborígenes hasta la actualidad, siempre han estado expuestas a riesgos por huracanes, a pesar de las diferencias de comportamiento de estos sistemas, tanto espacial como temporalmente. Existe una gran variabilidad temporal de estos sistemas en la cuenca del Atlántico, con las incidencias particulares en sectores costeros específicos de Cuba; pero también es conocido que no todas las islas del Caribe tienen la misma probabilidad de afectación de huracanes intensos (Fig. 4.22); tal es así que Cuba manifiesta diferentes frecuencias de huracanes por provincias (Pérez et al., 2001), y nuestra hipótesis es que en el pasado también hubo diferencias espaciales, aun siendo un patrón diferente al mostrado en la figura 4.22.

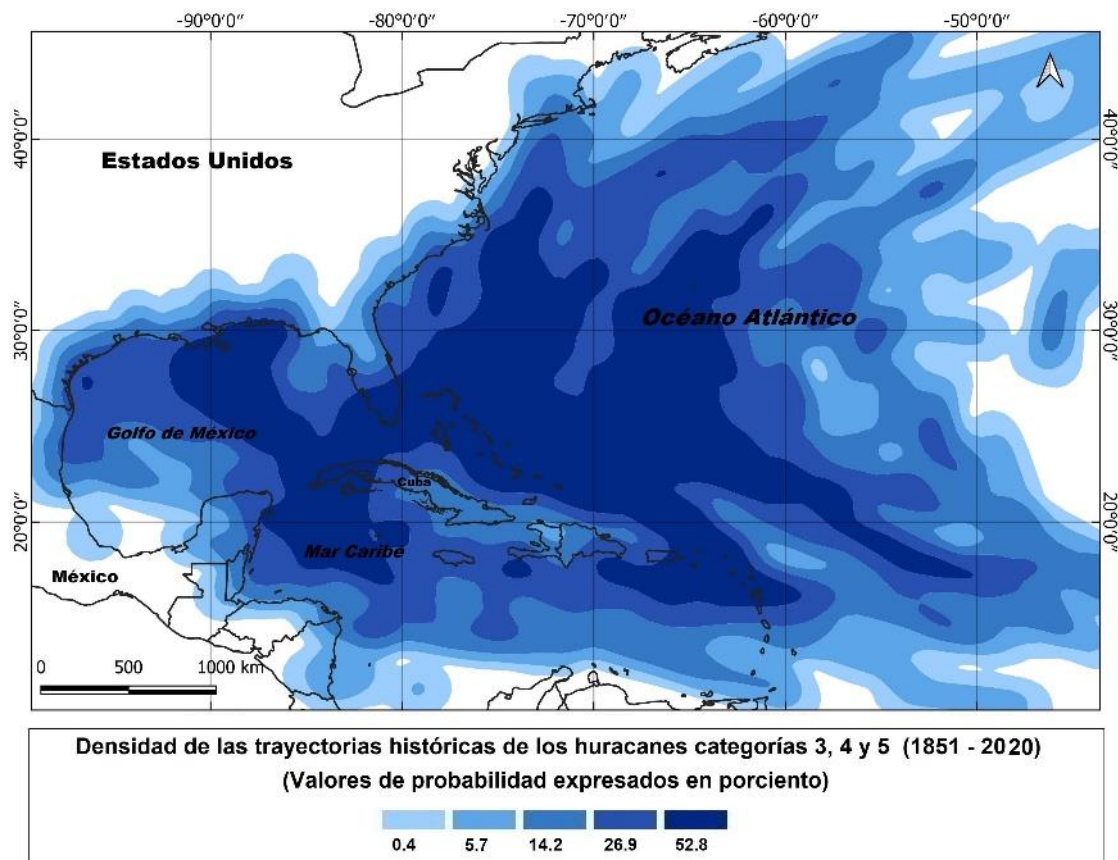


Figure 4.22. Densidad de Kernel de trayectoria de huracanes para la cuenca del Caribe, Golfo de México y Océano Atlántico (Categorías 3, 4 and 5). Periodo: 1851-2020.

De manera general, las mayores probabilidades de incidencia de huracanes intensos se concentran en Sur de los Estados Unidos, Cuba, Bahamas, Caimán Grande, Puerto Rico y porción norte de las Antillas Menores. Particularmente Cuba muestra la mayor frecuencia de huracanes intensos en la porción Oeste, superando el 50 %. Desde la porción este de las provincias de Villa Clara y Cienfuegos hasta el oriente cubano, área en la que se incluye Ciego de Ávila, se observan las probabilidades más bajas de afectaciones por estas categorías de huracanes. El resto del territorio cubano tiene una densidad de huracanes de estas categorías, con valores de 26.9 %. Pero, ¿cuál fue la posible incidencia de estos fenómenos en sectores costeros específicos de Cuba?. Sobre esta interrogante deben seguir centradas las acciones en esta línea de investigación, pues se debe conocer aún más del clima del pasado.

4.4. Conclusiones parciales.

- Los perfiles locales de la playa también cambiaron, ya que algunas zonas de las dunas sufrieron erosión de arena, mientras que otras zonas de la playa experimentaron deposición.

- Las capas de arena prominentes en dos núcleos de Laguna Larga son probablemente atribuibles al huracán Irma, y datan de 2017 (+/- errores) según los datos de Pb-210.
- Las características sedimentarias y geoquímicas del depósito del huracán Irma, incluyen un elevado tamaño de grano y abundancia de Ca, Sr y Zr, así como bajos niveles de Br y Ti. El bajo Br es sorprendente dada la inundación marina que se produjo. Es posible que esto refleje un alto aporte de agua dulce procedente de las precipitaciones (acumulados en 24 horas que fueron superiores a 300 mm).
- En general, las fechas preliminares de C-14 indican que los testigos representan más de 800 años de deposición de sedimentos, por lo que los núcleos contienen información referida a paleoeventos de oleaje extremo hasta esa fecha, con la identificación de pleohuracanes con impacto en esta zona antes de 1851.
- Se identificaron ocho paleoeventos (antes de 1951) de oleaje extremo con fecha anterior al huracán Irma (2017). Según los análisis de los huracanolitos ubicados en Paredón Pelado, se estima que la cayería norte de Ciego de Ávila fue impactada antes por un huracán categoría 5, incluso con intensidad superior al huracán Irma.

5. CICLONES TROPICALES RECIENTES. IMPACTOS SOCIALES Y EN EL SECTOR AGROPECUARIO

5.1. Ciclones tropicales con incidencias en Ciego de Ávila (1851-2021).

Previo al análisis de los impactos de los ciclones tropicales en Cuba y como caso particular, en Ciego de Ávila, tratando tanto los impactos sociales como los económicos, con énfasis en el sector agropecuario, se hace necesario tener primeramente una valoración general de las incidencias de estos fenómenos en el territorio avileño.

A partir de la distribución por años del número de ciclones tropicales formados en la cuenca del Atlántico, tratando en una curva todos los organismos con nombre (tormentas tropicales y huracanes) y los huracanes muy intensos (Categorías 4 y 5) en otra curva, en ambos casos son señalados los sistemas con afectaciones a Ciego de Ávila. De forma general, aunque no existe una tendencia estadísticamente significativa, es muy visible el incremento de estos fenómenos en los últimos años (Fig. 5.1).

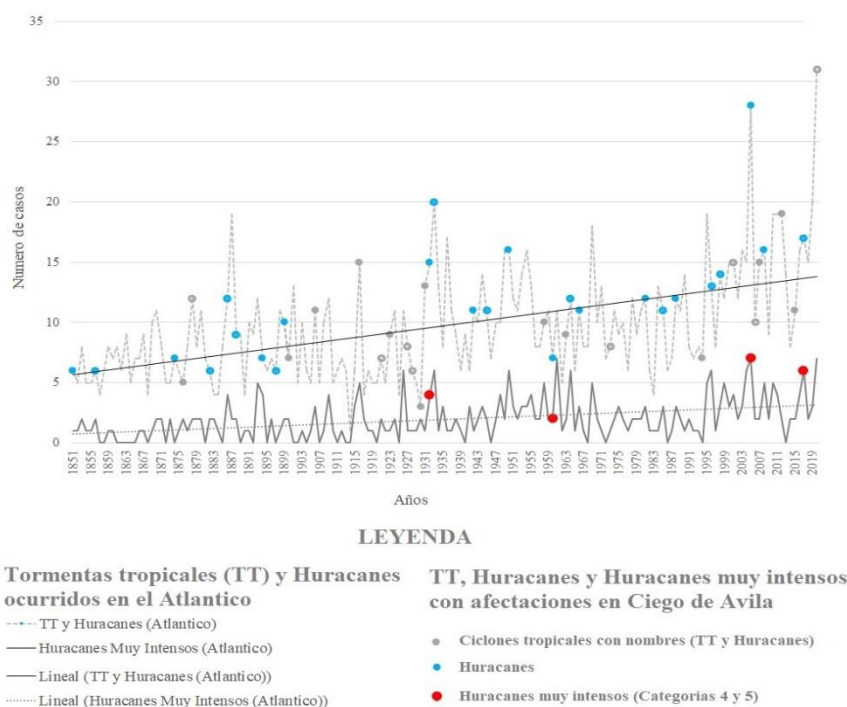


Figura 5.1. Organismos ciclónicos con nombre (tormentas tropicales y huracanes) y huracanes muy intensos (categorías 4 y 5) ocurridos en el Atlántico (1851-2021): afectaciones de estos sistemas en Ciego de Ávila. *Elaboración propia.*

En la historia de los ciclones tropicales con incidencias directas en el territorio avileño (desde 1851), aparece una reducida lista de huracanes de Categoría 4: huracán de Santa Cruz del Sur, con mayores afectaciones a la provincia el 9 de noviembre de 1932; el huracán Donna, con afectaciones en septiembre de 1960; y el huracán Dennis, que impactó en julio de 2005. Se adiciona el huracán Irma, como el único huracán con máxima categoría de afectación en Ciego de Ávila.

Se realizó una actualización de la cronología de los sistemas ciclónicos con incidencias en Ciego de Ávila. De la cronología de los huracanes fue eliminado uno de categoría mínima, generado en noviembre de 1912, ya que se corroboró que no generó impacto en la provincia; sin embargo, se incorporaron otros ciclones tropicales, por ejemplo: Flora (1963), Gordon (1994), Michelle (2001), Ernesto (2006), Noel (2007), Paloma (2008), Paula (2010) e Isaac (2012). Para la adición de nuevos ciclones tropicales a la cronología se tuvieron en cuenta informaciones meteorológicas, y en algunos casos, fueron considerados artículos científicos; por ejemplo, para determinar la influencia del huracán Paloma sobre el territorio avileño, se consideró el resultado de Guimarães et al. (2013).

De esta manera, se identificaron para el periodo de estudio (1851-2021, 171 temporadas ciclónicas) un total de 58 ciclones tropicales con incidencia sobre la provincia (Tabla 5.1). Entre los resultados de mayor relevancia: existe una mayor incidencia de organismos ciclónicos de categorías inferiores, siendo septiembre y octubre los meses de mayor frecuencia, los que suman casi el 60% del total de las afectaciones; la provincia no ha tenido afectación de ningún ciclón tropical en junio, mientras que en el mes de julio, el único huracán que ha impactado el territorio es el huracán Dennis (2005), y lo hizo con incidencia directa en el subarchipiélago Jardines de la Reina (sur de la provincia).

Tabla 5.1. Resumen por meses de los ciclones tropicales que han afectado a Ciego de Ávila. Periodo: 1851-2021.

MESES	DT	TT	H1	H2	H3	H4	H5	Total/Meses
May	1	0	0	0	0	0	0	1
Jun	0	0	0	0	0	0	0	0
Jul	0	0	0	0	0	1	0	1
Ago	4	4	3	1	0	0	0	12
Sep	1	5	6	0	2	1	1	16
Oct	5	6	5	0	1	0	0	17
Nov	0	6	2	1	0	1	0	11
Total	11	21	16	2	3	3	1	58

Leyenda: DT: Depresión Tropical; TT: Tormenta Tropical; H: Huracán (los números corresponden a las categorías de huracanes, en las escalas respectivas de 1 hasta 5).

5.2. Ciclones tropicales en Cuba. Impactos socioeconómicos en el periodo 2005-2017.

Para este análisis se seleccionó un periodo de gran actividad ciclónica (2005-2017), periodo en el cual Cuba ha recibido importantes impactos de huracanes, incluidos huracanes muy intensos.

Existen datos referidos al valor de la suma de daños y pérdidas económicas, relacionadas directa o indirectamente con eventos naturales extremos y desastres de diferentes tipos (tormentas, inundaciones, temperaturas extremas, sequías e incendios), información que está disponible en el Centro para la Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres, perteneciente a la Universidad Católica de Lovaina, siendo esta una Base de Datos Internacional de Desastres (EM-DAT). A partir de esta base de datos se extrajo información de los daños y pérdidas de los años afectados por los principales huracanes en Cuba, correspondiente al periodo 2005-2017 (Tabla 5.2).

Tabla 5.2. Daños y pérdidas en Cuba, asociadas a afectaciones por huracanes. Periodo: 2005-2017).

Año	Costo económico (en Miles de \$)	Número de personas afectadas	Número de pérdidas humanas
2005	2100000	2600000	20
2008	3572000	519464	7
2012	-	211101	14
2016	2600000	190000	0
2017	540000	10000000	10

Fuente de datos: EM-DAT.

Estos años tienen sus particularidades. Por ejemplo, en el 2005 se suman las afectaciones socioeconómicas de tres huracanes (Dennis, Rita y Wilma), con incidencias en los meses

respectivos de julio, septiembre y octubre. En el 2008 suman cuatro sistemas, siendo una como tormenta tropical (Fay) y tres huracanes (Gustav, Ike y Paloma). El caso del huracán Irma, aunque tuvo las mayores afectaciones en la costa norte de Cuba, en la Base de datos EM-DAT se contempla que casi toda la población cubana tuvo afectaciones, directa o indirectamente.

El número de pérdidas humanas no posee relación estrecha con la intensidad de fenómeno, sino con otras variables sociales que intervienen en el cálculo de los riesgos, como es la preparación ciudadana para enfrentar desastres, resaltando la percepción de riesgos meteorológicos. La única pérdida humana ocurrida en Ciego de Ávila por causa del huracán Irma, de los 10 que tuvo el país, este caso fue por negligencia. Lamentable también el número de muertes asociados al huracán Sandy en Santiago de Cuba, aun siendo un huracán de menor intensidad (Categoría 3) al Irma; de los 14 fallecidos en Cuba, 11 fueron de esta provincia, lo que evidencia la baja percepción de riesgo por huracanes de esta población.

5.2.1. Impactos sociales en Cuba asociados a tormentas tropicales y huracanes (2005-2017).

Otro de los indicadores que se evalúan durante el impacto de ciclones tropicales, es referido al número de viviendas afectadas, indicador evaluado por el número de estas con derrumbe total, y viviendas con derrumbe parcial por causa de afectaciones en los techos.

Para este análisis se tuvieron en cuenta 12 organismos ciclónicos (Tabla 5.3) con incidencias en Cuba en este periodo (2005-2017). Se exceptuaron de este análisis dos depresiones tropicales (Chris y Paula), de las respectivas temporadas ciclónicas 2006 y 2010; excluidas también dos tormentas tropicales (Isaac en 2012 y Joaquín en 2015). Estos sistemas no fueron incluidos en el análisis, ya que no se encontró información en la web de ONEI, sobre sus impactos sociales y económicos.

Tabla 5.3. Organismos ciclónicos considerados en el estudio de los impactos socioeconómicos en Cuba. Período: 2005-2017.

Año	Mes de Afectación	Ciclón Tropical	Max. Categoría de Afectación/Cuba	Max. Categoría de Afectación/CA
2005	Jul	Dennis	H4	H4
2005	Sep	Rita	TT	-
2005	Oct	Wilma	TT	-
2006	Sep	Ernesto	TT	TT
2007	Oct	Noel	TT	TT
2008	Ago	Fay	TT	TT
2008	Sep	Gustav	H4	-
2008	Sep	Ike	H4	H1
2008	Nov	Paloma	H4	H1
2012	Nov	Sandy	H3	-
2016	Oct	Matthew	H4	-
2017	Sep	Irma	H5	H5

Además de los impactos sociales mencionados más arriba (ver Tabla 5.2), relacionados con los fallecidos por años asociados a ciclones tropicales, el número de viviendas afectadas es también significativo (Fig. 5.2).

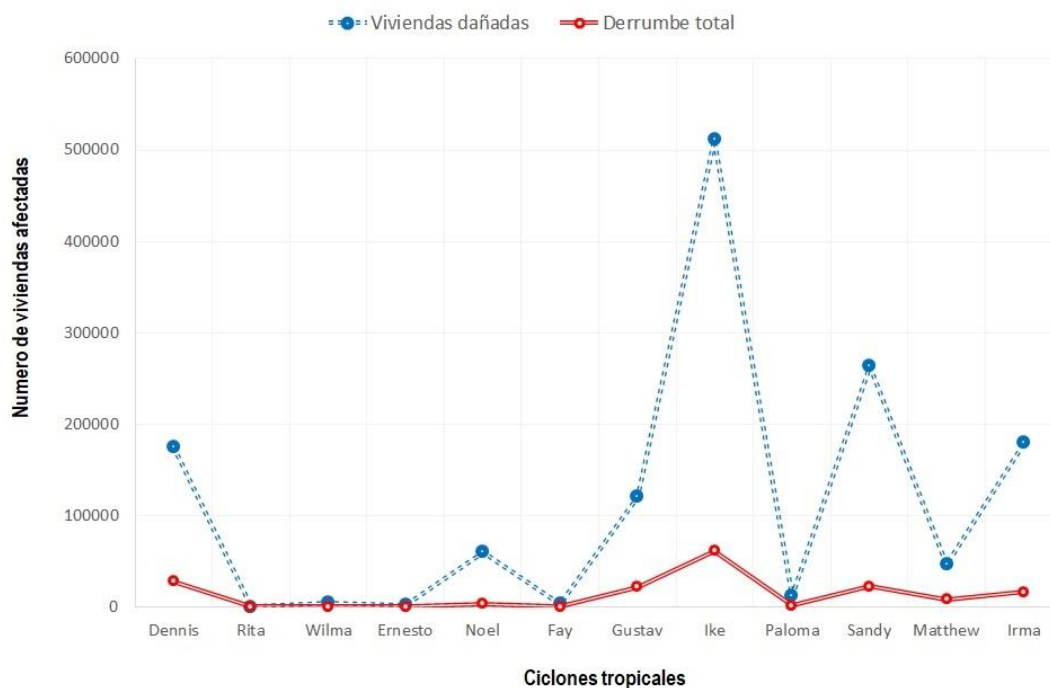


Figura 5.2. Afectaciones a viviendas en Cuba, asociadas a organismos ciclónicos (2005-2017). *Elaboración propia.*

Resalta en este caso que el huracán Ike (2008) generó mayores daños en el fondo habitacional, al compararse con los impactos asociados al huracán Irma (2017), impactando este segundo sistema a Cuba con máxima categoría de huracán. Estas diferencias son discutidas más adelante, al obtenerse algo similar con los impactos económicos.

5.2.2. Impactos económicos de ciclones tropicales a escala nacional (2005-2017).

Se realizó un compendio de todos los impactos asociados a los ciclones tropicales de 13 temporadas ciclónicas (2005-2017), incluyendo el costo en las reposiciones de viviendas, las afectaciones en todo tipo de instalaciones estatales, los impactos económicos generados por los bienes y servicios dejados de ejecutar, los impactos muy particulares en el sector agropecuario, así como los gastos generados a través de medidas preventivas y otras afectaciones generales (Fig. 5.3).

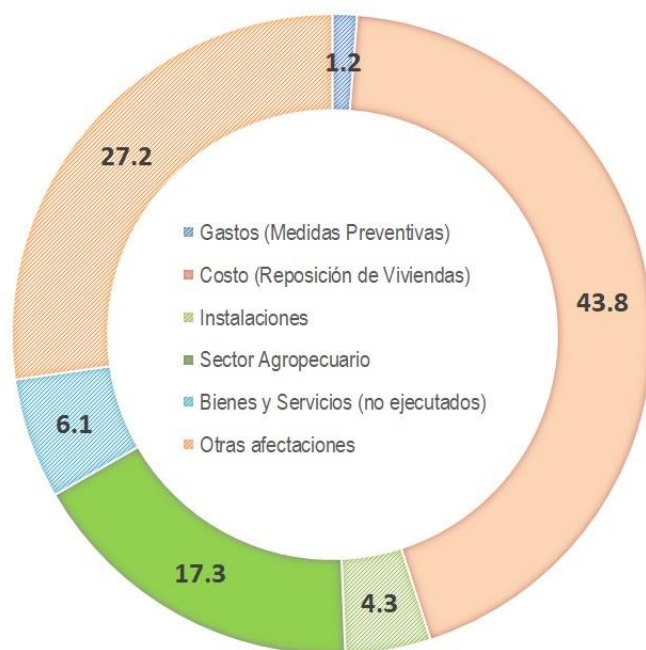


Figura 5.3. Impactos económicos (%) en Cuba asociados a organismos ciclónicos (2005-2017). *Elaboración propia.*

La distribución evidencia que solo las incidencias en las viviendas superan las afectaciones en el sector agropecuario, ya que en otras afectaciones se incluyen los restantes sectores de la economía cubana. El valor de 17% es comparable con lo planteado por la FAO: los daños y pérdidas del sector agrícola, representan aproximadamente el 16% del total de daños a escala mundial (FAO, 2018).

Este resultado indica reflexionar sobre el nivel de atención a brindar a este sector económico, primero porque evidencia el alto grado de vulnerabilidad ante eventos extremos de este tipo; segundo, por ser uno de los sectores de mayor prioridad económica, por su relación con una de las principales exigencias del país: la Seguridad Alimentaria.

5.2.3. Impactos en el sector agropecuario en Cuba durante el periodo 2005-2017.

Así como se observan impactos diferentes en la esfera social, determinado por las características propias de cada ciclón tropical, igualmente los impactos en el sector agropecuario manifiesta diferencias entre un sistema y otro (Fig. 5.4).

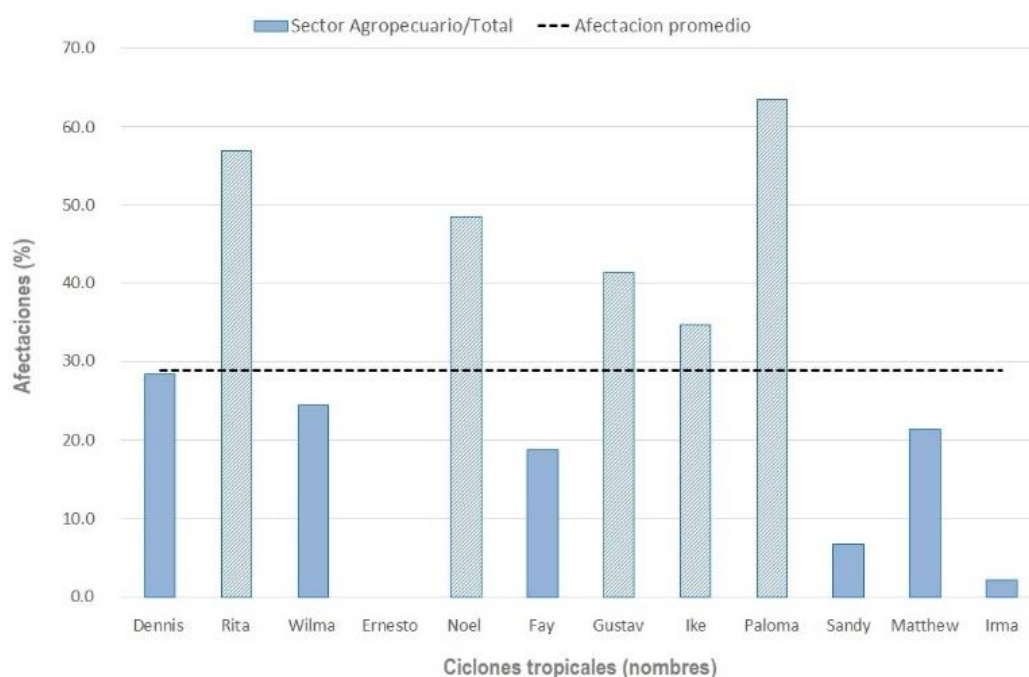


Figura 5.4. Impactos de organismos ciclónicos en el sector agropecuario, expresados en porcentaje (%) respecto al total de afectaciones económicas generadas. Periodo 2005-2017. *Elaboración propia.*

De todas las afectaciones económicas ocasionadas por los ciclones tropicales, las afectaciones al sector agropecuario promedio más de la cuarta parte de dichos impactos (28.9 %); aunque este comportamiento difiere entre organismos ciclónicos.

Tomando como ejemplo los tres últimos casos (Sandy, Matthew e Irma), con sus incidencias fundamentales respectivamente en Santiago de Cuba, Guantánamo y costa norte de Cuba, se observó que Sandy (huracán de categoría 3) y Matthew (huracán de categoría 4) ocasionaron mayores impactos en el sector agropecuario que el Irma (huracán de categoría 5).

Cinco organismos ciclónicos superan el porciento de afectación al sector agropecuario, con respecto al total de daños económicos: Rita y Noel, que tuvieron incidencias como tormentas tropicales, y los huracanes Gustav, Ike y Paloma, todos con incidencias el mismo año (2008) en Cuba. Los impactos de Rita y Noel a este sector económico, superaron las afectaciones asociadas a los huracanes Ike y Gustav, aun siendo sistemas más débiles los dos primeros.

5.3. Impactos de huracanes en el sector agropecuario de Ciego de Ávila. Estudio de casos.

Dos huracanes de diferentes categorías (Ike en 2008 e Irma en 2017), fueron tomados para establecer comparaciones de las afectaciones socioeconómicas, con énfasis al sector agropecuario.

5.3.1. Incidencia del huracán Ike (2008) en Ciego de Ávila. Evaluación de impactos.

Afectaciones a 11 500 viviendas fueron reportadas en la provincia a causa del impacto del huracán Ike (temporada ciclónica de 2008). Entre esos daños se puede mencionar el derrumbe total o parcial, humedecimiento de las paredes y daños a los sistemas sanitarios, daños a las pinturas, deterioro con caída de resanes y repellos, caídas de muros y paredes exteriores no estructurales, deformación de puertas, ventanas y elementos del mobiliario y pérdidas de estética de las viviendas (Fig. 5.5).

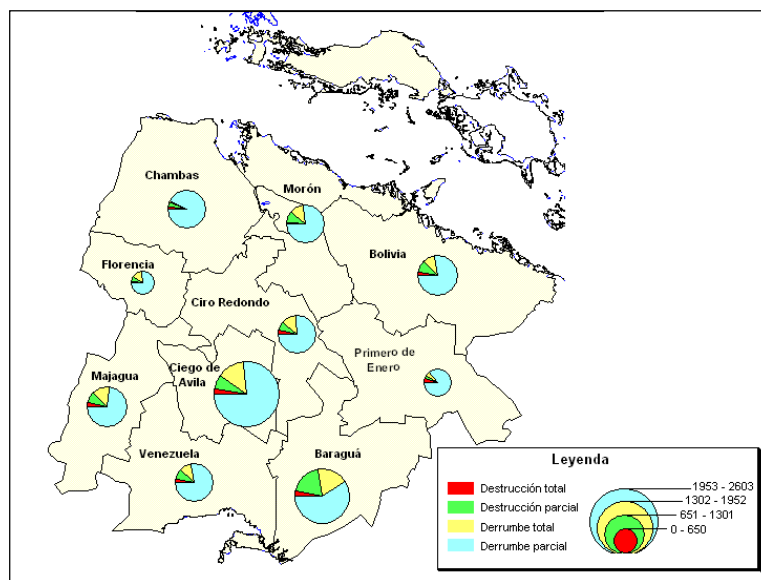


Figura 5.5. Afectaciones a viviendas del territorio avileño por destrucción y derrumbes de techos, asociadas al huracán Ike (2008). **Fuente:** UMA (2008).

Esta distribución espacial manifiesta que las mayores afectaciones estuvieron centradas en los municipios Ciego de Ávila y Baraguá, con 2 530 y 1 850 viviendas afectadas, respectivamente.

Relacionado con este huracán, que afectó a Ciego de Ávila como huracán de categoría 1, el sector estatal tuvo un total de afectaciones en la infraestructura de 1 124, de ellas 58 con destrucciones totales y 1 066 destrucciones parciales. Los sectores más afectados en la provincia fueron, en primer lugar la agricultura, seguido por Salud y Educación. También se observaron impactos en instituciones sociales, viales (pedraplén de Cayo Coco), sistema eléctrico (103 circuitos) y la actividad silvícola, siendo el sector agrícola el más afectado con 579 destrucciones, de las cuales 35 fueron totales (Fig. 5.6).

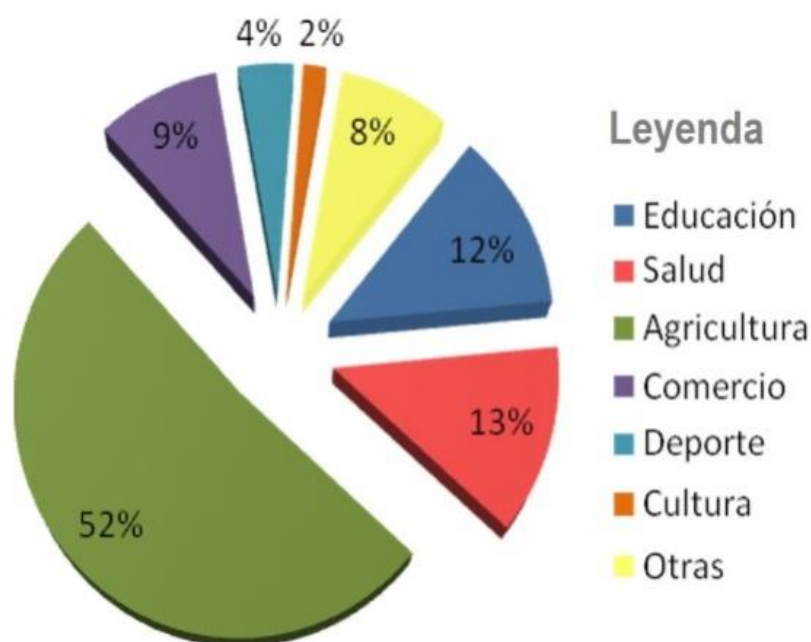


Figura 5.6. Afectaciones en sectores estatales de Ciego de Ávila, asociadas al huracán Ike (2008).

5.3.2. Huracán Irma (2017) en Ciego de Ávila y sus impactos asociados.

Realizando un análisis de los impactos de este poderoso huracán en la esfera social, la primera observación debe ser en cuanto al número de fallecidos. La provincia de Ciego de Ávila tuvo uno de los 10 fallecidos en el país a causa del huracán Irma.

Por otra parte, los análisis también muestran como resultado que casi 30 000 viviendas sufrieron daños en Ciego de Ávila (Tabla 5.4). Esta información tabulada manifiesta que las mayores

afectaciones ocurrieron en los municipios Morón y Chambas, con 6 087 y 5 528 viviendas afectadas, respectivamente.

Tabla 5.4. Afectación al fondo habitacional de la provincia, asociada al huracán Irma (2017).

MUNICIPIOS	Viviendas					
	Total de Afectaciones	Afectaciones de Tipología 1	DESTRUCCIONES		DERRUMBE DE TECHOS	
			Total	Parcial	Total	Parcial
Chambas	5528	267	1569	835	898	2226
Morón	6087	139	353	334	1330	4070
Bolivia	2483	58	675	387	356	1065
Primero Enero	3568	0	244	1520	284	1520
Ciro Redondo	2022	21	174	153	328	1367
Florencia	1399	24	62	61	206	1070
Majagua	1446	29	31	734	75	606
Ciego de Ávila	4052	193	378	499	545	2630
Venezuela	1009	23	330	86	161	432
Baraguá	2294	24	132	221	187	1754
Total	29888	778	3948	4830	4370	16740

En cuanto a las afectaciones al sector estatal, la evaluación de los impactos señala en este caso la Agricultura como el sector menos dañado, en comparación con las afectaciones en otros sectores del Estado. El impacto en el sector agrícola asociado a este intenso huracán fue de 13.1 % (Fig. 5.7). Esta situación tiene relación con la trayectoria del huracán Irma, que fue por la costa norte de Cuba, por lo que los principales impactos estuvieron centrados en otro sector económico importante (Turismo). No obstante, el sector agropecuario se incluye entre los dos sectores con los mayores impactos recibidos.

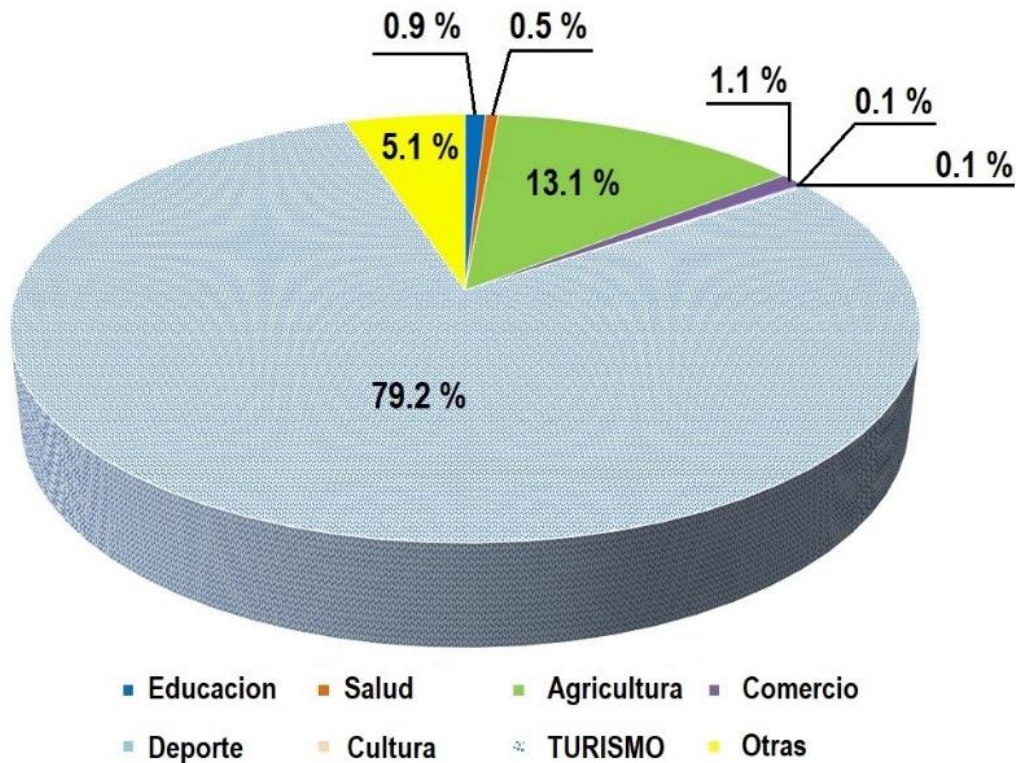


Figura 5.7. Afectaciones en sectores estatales de Ciego de Ávila, asociado al huracán Irma (2017).
Elaboración propia.

Se tienen evidencias de las afectaciones en la cayería norte de Ciego de Ávila, con 6274 turistas tuvieron que ser evacuados del Destino Turístico Jardines del Rey (DTJR), como medida de protección de los visitantes. Las afectaciones ambientales son un fiel reflejo de la magnitud del sistema a su paso por la cayería norte de Ciego de Ávila, con muertes de flamencos y peces. Estos últimos, debido al efecto de las fuertes marejadas, que sacaron muchos peces de su medio natural (ANEXO V, Foto 5.1). También se tiene evidencia gráfica de impactos fuertes en áreas de manglares y dunas (Foto 5.2), con los consiguientes impactos en las playas del DTJR.



Foto 5.2. Porción de manglar arrancado y desplazado cientos de metros (a, Este de Cayo Coco) y escarpes en duna de Playa Larga (b, Cayo Coco), debido a impactos del huracán Irma (2017). **Fuente:** UMA (2017).

Los impactos de este intenso huracán, también fueron evaluados en otras áreas de la cuenca del Caribe y Atlántico, mostrando igualmente impactos significativos. Rey et al. (2019) estudiaron los cambios costeros, las inundaciones y los daños asociados al huracán Irma en las islas de Saint Martin y Saint Barthelemy, que impactó ambas islas de las Antillas Menores el 6 de septiembre de 2017, igualmente como categoría 5.

El huracán Irma también ha sido estudiado en la isla Saint Martin, pero enfocado hacia la importancia de los manglares como barreras naturales, además de manifestarse la importancia de su conservación. Walcker et al. (2019) obtuvieron lecciones de este evento extremo, y afirmaron en su investigación que este huracán ha sido el más potente que azota el norte del Caribe en los últimos 100 años. Walcker et al. (2019) plantearon que aproximadamente el 80% de la superficie de manglares fue dañada por el Irma, y manifestaron diferentes ritmos de recuperación de estos bosques, siendo más acelerada la recuperación en aquellos sitios donde no existía degradación de este ecosistema por acciones antrópicas. Estos, como otros autores, defienden la hipótesis de preservar los manglares, con la finalidad de garantizar sus servicios ecosistémicos, incluidos las relaciones con sus funciones de barreras naturales ante el impacto de eventos meteorológicos extremos.

Los daños del huracán Irma también fueron evaluados en dos cayos de La Florida. Tomiczek et al. (2020) evaluaron los daños físicos en costas naturales y artificiales en Key West y Big Pine Key, un mes después del impacto del sistema. Estos autores estudiaron las relaciones entre la magnitud del peligro, el tipo de costa y los daños detectados, obteniendo entre los resultados que las zonas afectadas con velocidades del viento superiores a 177 km/h sufrieron los daños más graves.

Además, reafirmando los resultados de Walcker et al. (2019), Tomiczek et al. (2020) plantearon que las franjas costeras con presencia de manglares proporcionaron beneficios de protección a las infraestructuras cercanas a las costas, lo que evidencia este servicio ecosistémico de estos bosques.

5.3.3. Impactos de huracanes en el Sector Agropecuario: Ike vs Irma.

Se observan diferencias de los niveles de impactos de ambos huracanes (Ike 2008 e Irma 2017), al comparar las afectaciones en todos los sectores. Particularmente en los casos analizados, aplicada la comparación al sector agropecuario, se obtuvo que el Ike con incidencia en Ciego de Ávila como huracán de categoría 1, generó mayores impactos en la agricultura (52 %) que el Irma (13 %), que lo hizo con la máxima categoría de huracán. No obstante, en otras zonas del país el huracán Ike impactó con categoría 4.

Al comparar las afectaciones socioeconómicas de estos huracanes, pero a escala nacional (Fig. 5.8, a y b), se repite el mismo resultado aunque los porcentos de incidencias en los diferentes sectores cambian, al considerar impactos para toda Cuba. En ello influyó la trayectoria experimentada por ambos sistemas por el archipiélago cubano, con afectaciones a territorios diferentes (Fig. 5.8, c y d). La costa norte de Cuba fue la más impactada por el huracán Irma, por lo que el sector del turismo recibió las mayores afectaciones por este sistema, mientras que el huracán Ike impactó más hacia el interior del territorio cubano, con los consecuentes impactos en el sector agropecuario.

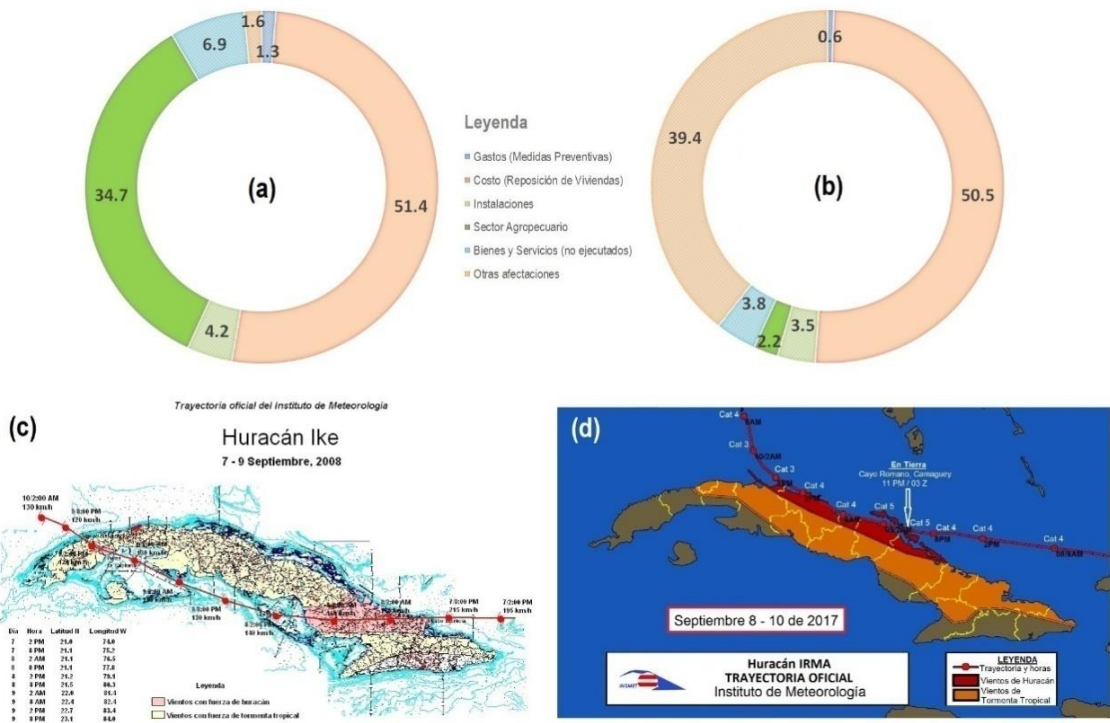


Figura 5.8. Impactos socioeconómicos en Cuba (expresados en %), asociados al huracán Ike en 2008 (a) y al huracán Irma en 2017 (b). Trayectoria de ambos huracanes: Ike (c) e Irma (d). *Elaboración propia.*

Estas diferencias de los impactos, tanto sociales como económicos, tienen estrecha relación con las características de los organismos ciclónicos, tales como: categoría del sistema (presión central y vientos máximos); velocidad de traslación por la zona afectada; radio de los vientos máximos; ubicación de la zona impactada respecto a la trayectoria del meteoro; tiempo transitando sobre la plataforma insular cubana. Estos elementos deben ser considerados en las evaluaciones de los impactos y los estudios de riesgos de la agricultura y el desarrollo pecuario del país.

5.4. Huracanes vs Agricultura. Discusión.

Existen otros ejemplos en Cuba que evidencian impactos de los huracanes en la agricultura, desde la diseminación de plagas por los vientos huracanados hasta daños en la infraestructura de instalaciones del sector: (1) diseminación por toda Cuba del *Paracoccus marginatus*, asociado al huracán Georges en 1998; (2) diseminación de *Peronospora hyoscyami* en Pinar del Río, asociado al huracán Mitch en 1998; (3) 800000 aves quedaron a la intemperie, por daños de los techos de las naves de crianza, asociado al huracán Charley en 2004 (FAO, 2008).

También existen otros ejemplos de impactos de huracanes en otros países del área. El huracán Dorian (2019) en Bahamas generó pérdidas de \$529,6 Millones y \$13,6 Millones, en el Turismo y Pesca-Agricultura, respectivamente (CELAC, 2019).

Según la CEPAL (2021), Honduras es otro de los países del área que es altamente vulnerable. Este informe destaca los desastres generados por los huracanes Fifi en 1974 y Mitch en 1998, que causaron 8000 y 14000 muertes, respectivamente. Además, durante el 2020 este país fue impactado por la tormenta tropical Eta y el huracán Iota, ocasionando una pérdida total de \$52099 Millones, monto respecto al cual la pérdida en la agricultura fue de 18 y 27%, respectivamente.

De acuerdo a un análisis realizado por Elsner et al. (2008), el incremento de las temperaturas de la superficie del mar en respuesta al calentamiento global, juega un rol significativo en el incremento de la frecuencia e intensidad de huracanes, lo que posibilita un incremento del potencial destructivo de estos sistemas (Emanuel, 2005; Landsea et al., 2006), visto a través del aumento de la Energía Ciclónica Acumulada (*Accumulated Cyclone Energy – ACE*, en inglés), índice que tiene relación directa con la sumatoria del cuadrado de la velocidad máxima sostenida de los ciclones tropicales, de cada temporada ciclónica.

Otros autores han corroborado estos resultados. Webster et al. (2005) concluyeron que se observa una tendencia en los últimos años a huracanes más frecuentes y destructivos. Lo peor es que esta situación parece ser más crítica en escenarios futuros; Bender et al. (2010) obtuvieron que la frecuencia de huracanes muy intensos (categorías 4 y 5), casi se duplicará a escala mundial para finales del siglo XXI, por lo que los impactos serán mayores.

Son muy claras las evidencias que el cambio climático está afectando la productividad agrícola, con trabajos que demuestran esta hipótesis a escalas regional y global (Wu et al., 2015; Liang et al., 2017; Ortiz-Bobea et al., 2021; Liang, 2022), más relacionado con el incremento de la frecuencia de los desastres naturales (Panwar & Sen, 2019; Trinh et al., 2021), y la capacidad adaptativa frente a sus efectos negativos (Doni et al., 2020). Además, las naciones en desarrollo son más vulnerables a los desastres naturales debido a la baja diversificación y dependencia de la agricultura (Noy, 2009).

5.5. Conclusiones parciales.

- Los impactos en Cuba asociados a huracanes son mayores en la esfera social, tema en el cual el Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil ha trabajado más, dada la importancia prestada a

evitar pérdidas de vidas humanas y otras afectaciones sociales, como es el impacto en el fondo habitacional.

- De los impactos en el sector estatal, el agropecuario ocupa un lugar importante en cuanto a los niveles de afectación. En un estudio correspondiente a 13 temporadas ciclónicas (2005-2017), se observó que el promedio del porcentaje de afectación de los ciclones tropicales al sector agropecuario fue de aproximadamente el 30%.
- Para igual periodo de estudio (2005-2017) se concluyó que los impactos de los organismos ciclónicos al sector agropecuario no son dependientes de la intensidad del sistema que afecte, sino de varias características de ciclón tropical, como son trayectoria y velocidad de traslación.

CONCLUSIONES GENERALES

1. El territorio avileño no había vivido las inundaciones costeras asociadas a un huracán de categoría 5, según la escala Saffir-Simpson. Ha sido una experiencia única, obtener el plano de inundaciones costeras generadas por el huracán Irma, constituyendo una herramienta de gran utilidad para rectificar los estudios de PVR, fundamentalmente porque los resultados de estos últimos fueron sobre dimensionados, lo cual incrementa los gastos dedicados a los Planes de Prevención de Desastres.
2. Con el plano de inundaciones costeras asociadas al huracán Irma, se corroboró que Punta Alegre (Chambas) y Júcaro (Venezuela), son los asentamientos costeros más vulnerables a este tipo de fenómeno extremo, y en general, a los efectos negativos del cambio climático.
3. Los archivos geológicos, tales como los perfiles sedimentológicos de lagunas costeras y las acumulaciones de huracanólitos en las costas, constituyen excelente técnicas de proxy data para la reconstrucción de huracanes del pasado.
4. A través de muestras sedimentológicas de una laguna costera de Ciego de Ávila, se detectaron acumulaciones de sedimentos asociadas a huracanes recientes, lo cual contribuye a validar el método de los análogos. Por otra parte, también se contribuyó a la obtención de nuevos registros de paleohuracanes, con fechas anteriores a 1851, con la potencialidad de su posible inclusión en la base de datos regional de la NOAA.
5. La distribución espacial de huracanólitos en Cuba es otra fuente importante, básica para el estudio de eventos de oleaje extremo del pasado, incluidos también los tsunamis. Por medio del estudio de dos bloques ubicados en Cayo Paredón Pelado se obtuvo que la zona norte de Ciego de Ávila fue impactada por un huracán de máxima categoría, aunque de intensidad superior a Irma. En el perfil sedimentológico de la laguna costera estudiada, igualmente se observa el reflejo de un evento muy intenso.
6. El sector agropecuario es uno de los sectores estatales que recibe los mayores impactos económicos por huracanes, con un promedio de afectación del 30% del total de afectación económica asociada a eventos de este tipo. Aun así, los niveles de impactos varían entre un sistema y otro, dependiendo en gran medida de diferentes características del ciclón tropical. Los estudios de cada caso deben trasladar nuevas y diferentes experiencias.

RECOMENDACIONES Y PROYECCIONES DE INVESTIGACION

- Cuba constituye un excelente "laboratorio natural", con presencia en zonas costeras de lagunas de interés para las investigaciones sobre paleohuracanes. Se debe continuar investigando sobre el pasado de estos poderosos "ventiladores" naturales, antes de continuar señalando al calentamiento global y al acelerado proceso de efecto invernadero causado por el hombre, como elementos propiciadores del incremento de frecuencia e intensidad de tales fenómenos prehistóricos. Hoy existe conocimiento pleno de que también estuvieron presentes en momentos en que el desarrollo era tan incipiente que aún no había emisiones extra de anhídrido carbónico masivo a la atmósfera, y las acciones de influencia antrópica eran pequeñas comparadas con las actuales.
- En Punta Alegre, el plano de inundación del huracán Irma cubrió completamente el sitio arqueológico Los Buchillones. Se recomienda estudiar muestras sedimentológicas de la laguna de Los Buchillones, con el objetivo de corroborar la deposición sedimentológica relacionada con este intenso huracán, al mismo tiempo, investigar sobre el comportamiento de la actividad de paleohuracanes en esta zona, contribuyendo a profundizar en la relación entre huracanes del pasado y el desarrollo de la vida aborigen en el sitio arqueológico.
- El desarrollo agropecuario es uno de los sectores económicos priorizados del país, al mismo tiempo, son considerables los impactos que recibe por organismos ciclónicos. Sin embargo, existen pocas investigaciones dedicadas a esta temática en Cuba y el Caribe en general. Se recomienda que deben proyectarse nuevos trabajos en esta línea de investigación, fundamentalmente si se considera la tendencia actual al incremento de huracanes intensos en los últimos años, con los consecuentes impactos en el territorio cubano.

ANEXO I

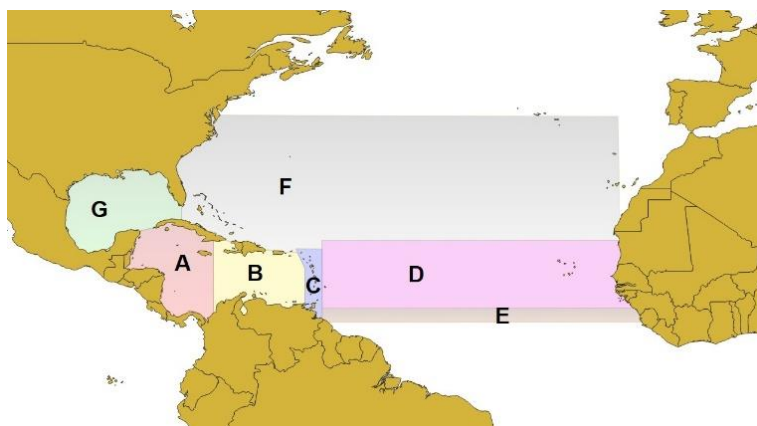


Figura 1.1. Zonas de origen de los ciclones tropicales que afectan a Ciego de Ávila (a) (adaptada de Córdoba et al., 2007).

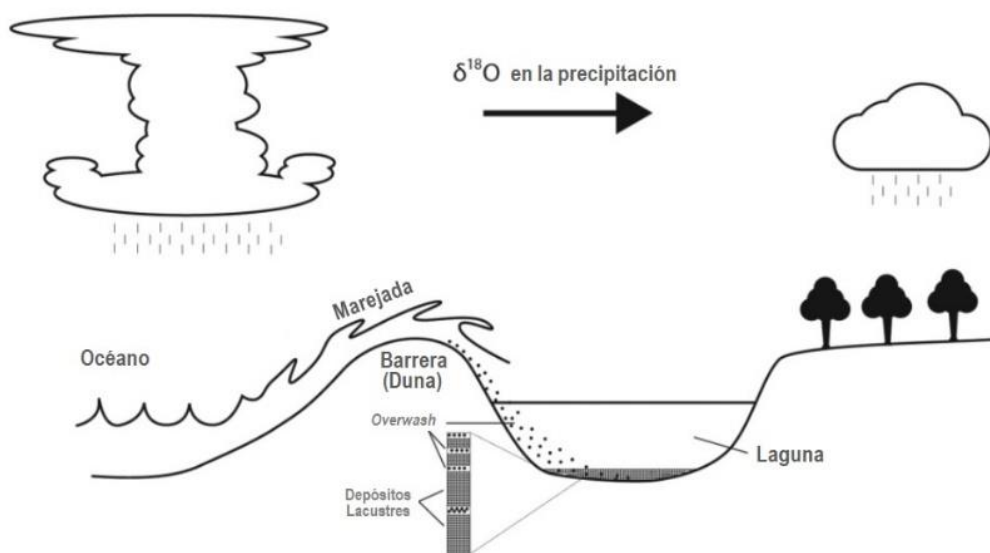


Figura 1.2. Efectos del avance hacia tierra de un CT: ola de la tormenta que supera una barrera natural y genera sobrelavado en un ecosistema de agua dulce. Nubes que trasladan $\delta^{18}\text{O}$, desde la tormenta hacia la isla. Adaptado de Oliva et al. (2017).

ANEXO II



Foto 3.2. Caída de árboles en Máximo Gómez, asociado al huracán Irma.



Foto 4.1. Gasterópodos detectados en los paleoeventos ~1526 (a) y ~1193 (b) del núcleo CL01, y en los paleoeventos ~1392 (c) y ~1375 (d) del núcleo CL02.

ANEXO III

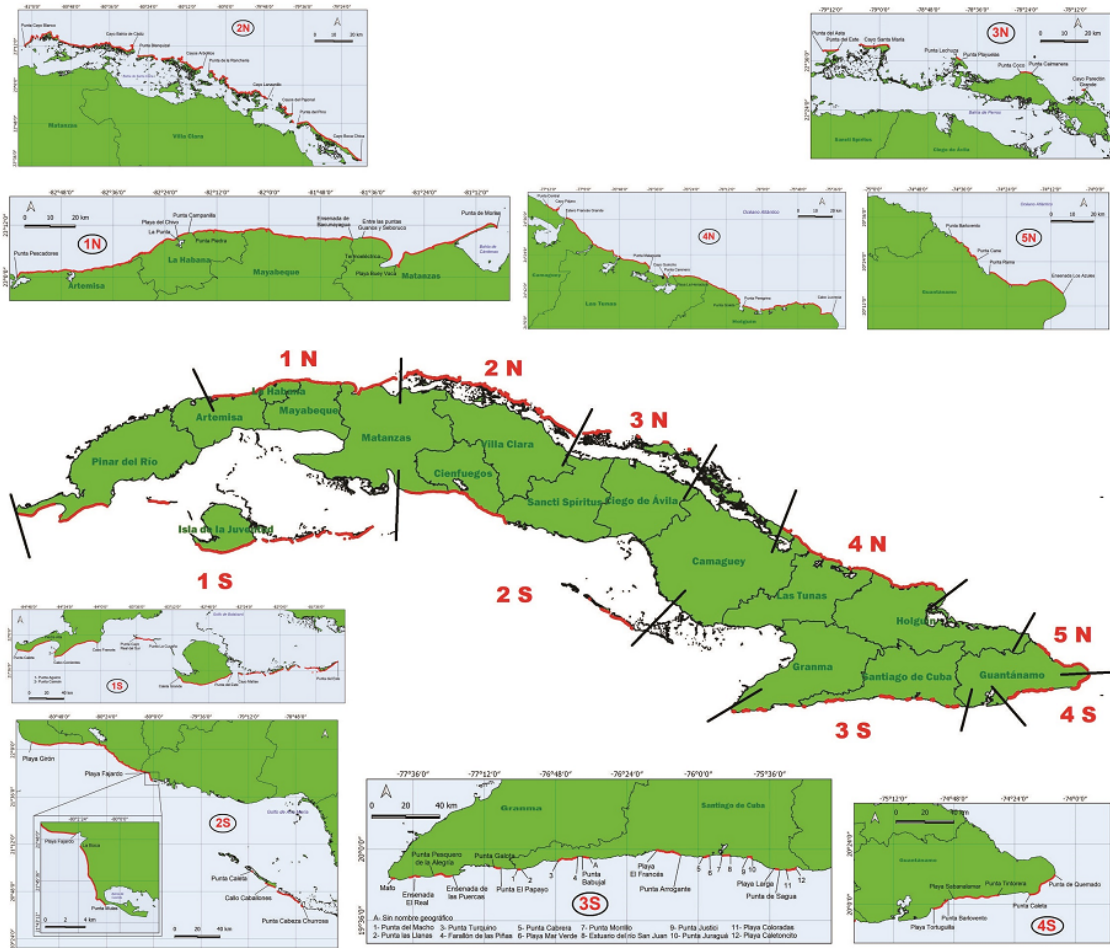


Figura 4.17. Distribución espacial (por sectores y subsectores costeros) de los huracanolitos en Cuba.

ANEXO IV



Foto 4.2. Bloque de longitud de 10,9 m, transportado por el huracán Matthew (2016) en la costa norte de la provincia Guantánamo.



Foto 4.3. Evidencia de olas superiores a tres metros de altura que impactaron la costa norte de Cayo Coco, asociada al huracán Joaquín (2015), con trayectoria muy distante de Cuba (con recurva en el sur de Bahamas).

ANEXO V



Foto 5.1. Muerte de flamencos (a) y peces (b), debido a impactos del huracán Irma (temporada ciclónica de 2017).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Adger, W.N.; Hughes, T.P.; Folke, C.; Carpenter, S.R. & Rockstrom, J. (2005). Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science* 309. 1036-1039.
- Adomat, F. & Gischler, E. (2016). Assessing the suitability of Holocene environments along the central Belize coast, Central America, for the reconstruction of hurricane records. *International Journal of Earth Sciences*: 1–27.
- Aguirre, G.M.; Matos, F. & Sánchez, A. (2021). Estudio bibliométrico sobre la producción científica de huracanolitos en la costa de Cuba. *Avances*, 23(1), 40–60.
- AMA (2019). Escenarios de peligro y vulnerabilidad de la zona costera cubana, asociados al ascenso del nivel medio del mar para los años 2050 y 2100. *Agencia de Medio Ambiente*. Resumen anual de los resultados del MacroProyecto.
- Anderson, W.T.; Bernasconi, S.M.; McKenzie, J.A.; Saurer, M. & Schweingruber, F. (2002). Model evaluation for reconstructing the oxygen isotopic composition in precipitation from tree ring cellulose over the last century. *Chemical Geology* 182(2): 121–137.
- Atwater, B.F.; Fuentes, Z.; Halley, R.B.; Ten Brink, U.S.; Tuttle, M.P. (2014). Effects of 2010 Hurricane Earl amidst geologic evidence for greater overwash at Anegada, British Virgin Islands. *Advances in Geosciences*. 38, 21–30.
- Atwater, B.F.; Ten Brink, U.S.; Cescon, A.L.; Feuillet, N.; Fuentes, Z.; Halley, R.B.; Nuñez, C.; Reinhardt, E.G.; Roger, J.H.; Sawai, Y.; Spiske, M.; Tuttle, M. P.; Wei, Y.; Weil-Accardo, J. (2017). Extreme waves in the British Virgin Islands during the last centuries before 1500 CE. *Geosphere*, 13 (2): 1–68.
- Ball, D.F. (1964). Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils. *Journal of Soil Science* 15(1): 84–92.
- Ballester, M.; González, C. & Pérez, R. (2010). Variabilidad de la actividad ciclónica en la región del Atlántico Norte y su pronóstico. La Habana: *Editorial Academia*, 170 p, ISBN: 978-959-270-175-5.
- Ballester, M. & Rubiera, J. (2005). Temporada ciclónica de 2005 en el Atlántico Norte. *INSMET, CITMA*.
- Barcia-Sardiñas, S.; Fontes-Leandro, M.; Ramírez-González, M. & Viera-González, E. Y. (2019). La sequía meteorológica 2014-2017, características e impactos en la provincia Cienfuegos. *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 25, No. sp, 319–333.

- Bender, M.A.; Knutson, T.R.; Tuleya, R.E.; Sirutis, J.J.; Vecchi, G.A.; Garner, S.T. & Held, I.M. (2010). Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic hurricanes. *Science*, 327 (5964), 454-458.
- Benner, R.; Browne, T.; Brückner, H.; Kelletat, D. & Scheffers, A. (2010). Boulder transport by waves: progress in physical modelling. *Z Geomorphol Supp* 54:127–146.
- Blaauw, M. (2010). Methods and code for 'classical' age-modelling of radiocarbon sequences, *Quat. Geochronol.* 5, 512–518.
- Boldt, K.V.; Lane, P.; Woodruff, J.D. & Donnelly, J.P. (2010). Calibrating a sedimentary record of overwash from Southeastern New England using modeled historic hurricane surges. *Marine Geology* 275(1–4): 127–139.
- Boss, S.K. & Neumann, A.C. (1993). Impacts of hurricane-Andrew on carbonate platform environments, northern Great-Bahama-Bank. *Geology* 21, 897-900.
- Bouwer, L.M. (2011). Have disaster losses increased due to anthropogenic climate change?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92 (1), 39-46.
- Brandon, C.M.; Woodruff, J.D.; Donnelly, J.P. & Sullivan, R.M. (2014). How unique was Hurricane Sandy? Sedimentary reconstructions of extreme flooding from New York Harbor. *Scientific Reports* 4: 7366.
- Brandon, C.M.; Woodruff, J.D.; Lane, D.P. et al. (2013). Tropical cyclone wind speed constraints from resultant storm surge deposition: a 2500 year reconstruction of hurricane activity from St. Marks, FL. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 14(8): 2993–3008.
- Brill, D. & Tamura, T. (2021). Optically stimulated luminescence dating of tsunami and storm deposits. In: Engel, M.; Pilarczyk, J.; May, S. M.; Brill, D. & Garrett, E. (Edits). *Geological records of tsunamis and other extreme waves*. Elsevier.
- Brown, A.L.; Reinhardt, E.G.; van Hengstum, P.J. & Pilarczyk, J. (2014). A coastal Yucatan sinkhole records intense hurricane events. *Journal of Coastal Research* 294: 418–428.
- Buckley, M.L.; Wei, Y., Jaffe, B.E. & Watt, S.G. (2012). Inverse modeling of velocities and inferred cause of overwash that emplaced inland fields of boulders at Anegada, British Virgin Islands. *Natural Hazards* 63: 133–149.
- Casals, R. (2002). Cronología de las inundaciones costeras ocurridas en el sur de la provincia La Habana. *Revista Cubana de Meteorología*, 9(1), 90–95.

- Casals, R., Pérez, P., Menéndez, L. (2016). Análisis de las inundaciones costeras ocurridas en áreas protegidas de Cuba en el período 1981-2010. *Revista Cubana de Meteorología*, 22(2): 199-215.
- Casals-Taylor, R.; Hernández-Orozco, N.; Pérez-Ororio, P.J.; Ernesto-Ortega, F.; Pérez-Parrado, R.; Menéndez-Fernández-Cueto, L. & Mosqueda-Borges, N. (2019). Inundaciones costeras provocadas por el huracán Irma en el malecón habanero los días 9 y 10 de septiembre 2017. *Revista Cubana de Meteorología*, 25(2), may – ago, 244-255.
- Cangialosi, J.P.; Latto, A.S. & Berg, R. (2018). Hurricane Irma Report, National Hurricane Center. *National Oceanic and Atmospheric Administration*. <http://www.nhc.noaa.gov/AL112017.pdf>. (Last accessed: March 4, 2020).
- CELAC (2019). Assessment of the Effects and Impacts of Hurricane Dorian in the Bahamas.
- Centella, A.; Llanes, J.; Paz, L.; López, C. & Limia, M. (2001). *Primera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. República de Cuba. 166 p.
- CEPAL (2021). Evaluación de los efectos e impactos de la tormenta tropical Eta y el huracán Iota en Honduras. *Nota Técnica Nro. 2168*.
- Cheng, H.; Cheng, H.; Fleitmann, D.; Edwards, R.L.; Wang, X.; Cruz, F.W.; Auler, A.S.; Mangini, A.; Wang, Y.; Kong, X.; Burns, S.J.; Matter, A. (2009). Timing and structure of the 8.2 kyr B.P. Event inferred from $\delta^{18}\text{O}$ records of stalagmites from China, Oman, and Brazil, *Geology* 37(11), 1007–1010.
- Collins, E.S.; Scott, D.B. & Gayes, P.T. (1999). Hurricane records on the South Carolina coast: can they be detected in the sediment record? *Quaternary International* 56(1): 15–26.
- Cooper, J. (2012). Fail to prepare, than prepare to fail: rethinking threat, vulnerability, and mitigation in Precolumbian Caribbean. In, *Surviving Sudden Environmental Change: Answers from Archaeology*, J. Cooper & P. Sheets, eds. Boulder: University of Colorado Press. 91-115.
- Cooper, J. & Peros, M.C. (2010). The Archaeology of Climate Change in the Caribbean. *Journal of Archaeological Science* 37(6): 1226–1232.
- Córdova, O.L.; García, M. & López, A. (2018a). Cronología de las inundaciones costeras en la provincia de Ciego de Ávila. Período 1960-2017. *Revista Cubana de Meteorología*, 24(2), 136–145.
- Córdova, O.L.; García, M.; Machado, A. & Borrego, R. (2018b). Huracanes que afectaron a Ciego de Ávila y sus periodos de retorno. Periodo 1851 a 2017. *Revista Cubana de Meteorología*, 24 (3), 245–255.

- Córdova, O.L.; Valdés, A. & Mursulí, A. (2007). Climatología de los ciclones tropicales en la provincia de Ciego de Ávila (Cuba) en el período 1851-2005. *Revista del Aficionado a la Meteorología (RAM)*. Nro. 2. Octubre. Madrid, España. <http://www.meteored.com/ram/?p=86#more-86> (Last accessed: November 30, 2017).
- Cuven, S.; Francus, P. & Lamoureux, S.F. (2010). Estimation of grain size variability with micro X-ray fluorescence in laminated lacustrine sediments, Cape Bounty, Canadian High Arctic. *Journal of Paleolimnology* 44(3): 803–817.
- Das, O.; Wang, Y.; Donoghue, J.; Xu, X.; Coor, J.; Elsner, J. & Xu, Y. (2013). Reconstruction of paleostorms and paleoenvironment using geochemical proxies archived in the sediments of two coastal lakes in northwest Florida. *Quaternary Science Reviews* 68: 142–153.
- Denommee, K.C.; Bentley, S.J. & Droxler, A.W. (2014). Climatic controls on hurricane patterns: a 1200-y nearannual record from Lighthouse Reef, Belize. *Scientific Reports* 4: 3876.
- Doni, F.; Gasperini, A. & Soares, J.T. (2020). SDG13-Climate action: Combatting climate change and its impacts. *Emerald Group Publishing*. Bingley, 21-30.
- Donnelly, J.P.; Bryant, S.S.; Butler, J.; Dowling, J.; Fan, L.; Hausmann, N.; Newby, P.; Shuman, B.; Stern, B.; Westover, K. & Webb, T. (2001a). A 700 yr sedimentary record of intense hurricane landfalls in southern New England. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 113, 714–727.
- Donnelly, J.P.; Butler, J.; Roll, S.; Wengren, M. & Webb, T. (2004). A backbarrier overwash record of intense storms from Brigantine, New Jersey. *Marine Geology* 210(1–4): 107–121.
- Donnelly, J.P.; Hawkes, A.D.; Lane, P.; MacDonald, D.; Shuman, B.N.; Toomey, M.R.; Van Hengstum, P.J. & Woodruff, J.D. (2015). Climate forcing of unprecedented intense-hurricane activity in the last 2000 years. *Earth's Future* 3(2): 49–65.
- Donnelly, J.P.; Roll, S.; Wengren, M.; Butler, J.; Lederer, R. & Webb, T. (2001b). Sedimentary evidence of intense hurricane strikes from New Jersey. *Geology*, 29, 615–618.
- Donnelly, J.P. & Webb, T. (2004). Backbarrier sedimentary records of intense hurricane landfalls in the northeastern United States. In: *Hurricanes and Typhoons: Past, Present, and Future* (eds. Murnane, R.J. & Liu, K.B.), 58–95, Columbia University Press.
- Donnelly, J.P. & Woodruff, J.D. (2007). Intense hurricane activity over the past 5,000 years controlled by El Niño and the West African monsoon. *Nature* 447(7143): 465–468.

- Douglas, P.M.J.; Demarest, A.A.; Brenner, M.; Canuto, M.A. (2016). Impacts of Climate Change on the Collapse of Lowland Maya Civilization. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 44: 613–645.
- Dunning, N.P.; Beach, T.; Luzzadder-Beach, S. (2012). Kax and Kol: collapse and resilience in Lowland Maya civilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109: 3652–3657.
- Elsner, J.B.; Kossin, J.P. & Jagger, T.H. (2008). The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature*, 455, 92-95.
- Emanuel, K. (2005). Increasing Destructiveness of Tropical Cyclones over the past 30 Years. *Nature*, 436, 686-688.
- Emanuel, K.; Sundararajan, R. & Williams, J. (2008). Hurricanes and global warming: results from downscaling IPCC AR4 simulations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 89 (3), 347-367.
- Engel, M.; Bolten, A.; Brückner, H.; Daut, G.; Kelletat, D.; Schäbitz, F.; Scheffers, A.M.; Scheffers, S. R.; Vött, A., Wille, M. & Willershäuser, T. (2009). Reading the chapter of extreme wave events in nearshore geo-bio-archives of Bonaire (Netherlands Antilles) – initial results from Lagun and Boka Bartol. *Marburg. Geogr. Schr.* 145, 157–178.
- Engel, M.; Brill, D.; Matos, F. & Hernández, Z. (2019). Massive boulders shifted along the coast of Guantánamo, Cuba, during Hurricane Matthew. En: *Convención Internacional Geografía de Mares y Costas*. Colonia, Alemania, 9-11 de mayo de 2019. 5p.
- Engel, M.; Brückner, H.; Fürstenberg, S.; Frenzel, P.; Konopczak, A.M.; Scheffers, A.M.; Kelletat, D.; May, S.M.; Schäbitz, F. & Daut, G. (2013). A prehistoric tsunami induced long-lasting ecosystem changes on a semi-arid tropical island – the case of Boka Bartol (Bonaire, Leeward Antilles). *Naturwissenschaften* 100, 51–67.
- Engel, M.; Brückner, H.; Wennrich, V.; Scheffers, A.M.; Kelletat, D.; Vött, A.; Schäbitz, F.; Daut, G.; Willershäuser, T.; May, S.M. (2010). Coastal stratigraphies of eastern Bonaire (Netherlands Antilles): new insights into the palaeo-tsunami history of the southern Caribbean. *Sediment. Geol.* 231, 14–30.
- Engel, M.; May, S.M. (2012). Bonaire's boulder fields revisited evidence for Holocene tsunami impact on the Leeward Antilles. *Quat. Sci. Rev.* 54, 126–141.
- Engel, M.; May, S.M.; Brill, D.; Cuadra, C.; Lagmay, A.; Santiago, J.; Suarez, J.K.; Hoffmeister, D. & Brückner, H. (2016). Boulders shifted during Supertyphoon Haiyan (7–9 Nov 2013) –

Observations from Eastern Samar (Philippines). *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 18, EGU2016-15390.

Evans, N.P.; Bauska, T.K.; Gázquez-Sánchez, F.; Brenner, M.; Curtis, J.H. & Hodell, D.A. (2018). Quantification of drought during the collapse of the classic Maya civilization. *Science* 361 (6401): 498–501.

FAO (2008). Buenas prácticas para la reducción del riesgo de desastres en la Agricultura Cubana. *Informe Técnico, Naciones Unidas*.

FAO (2017). The impact of disasters on agriculture. Addressing the information gap. FAO, *Naciones Unidas*.

FAO (2018). Guía para la estimación de daños y pérdidas por eventos climáticos extremos en el sector Agropecuario. *OPYPA-MEGAP*, Uruguay.

Fernández, M. & Daños, A. (2002). Efectos y amenaza de tsunamis en América Central. *Revista Geológica de América Central* 26, 71-83.

Feyerabend, P.K. (1975). *Tratado contra el método*. Tecnos.

Ford, D. & Williams, P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester, UK: *John Wiley and Sons*, Ltd.

Frappier, A. (2008). A stepwise screening system to select storm-sensitive stalagmites: Taking a targeted approach to speleothem sampling methodology. *Quaternary International* 187(1): 25–39.

Frappier, A.B.; Sahagian, D.; Carpenter, S.J.; Gonzalez S.A & Frappier, B.R. (2007). Stalagmite stable isotope record of recent tropical cyclone events. *Geology* 35(2): 111–114.

Frohlich, C.; Hornbach, M.J. & Taylor, F.W. (2011). Megablocks. In: Hopley D (ed) *Encyclopedia of modern coral reefs: structure, form and process*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 679–683.

Furrazola, G.F. & Núñez, K.E. (1997). Estudios sobre geología de Cuba / compilación. Centro Nacional de Información Geológica. Editado por: Centro Nacional de Información Geológica (CNDIG), *Instituto de Geología y Paleontología*, 509-527.

García, O.; Ballester, M. & Rubiera, J. (1998). Temporada ciclónica de 1998 en el Atlántico Norte. *INSMET, CITMA*.

Ghaleb, B. (2009). Overview of the methods for the measurement and interpretation of short-lived radioisotopes and their limits. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science* 5: 012007.

- González-De Zayas, R.; Merino-Ibarra, M.; Lestayo-González, J.A.; Chaviano-Fernández, Y.; Alatorre-Mendieta, M.A.; Matos-Pupo, F. & Castillo-Sandoval, F.S. (2021). Biogeochemical responses of highly polluted tropical coastal lagoon after the passage of a strong hurricane (Hurricane Irma). *Journal of Water and Climate Change* 13 (2), 1089–1105.
- González-De Zayas, R.; Merino-Ibarra, M.; Soto-Jiménez, M.F. & Castillo-Sandoval, F.S. (2013). Biochemical responses to nutrient inputs in a Cuban coastal lagoon: runoff, anthropogenic, and groundwater sources. *Environ. Monit. Assess.* 185, 10101–10114.
- González-De Zayas, R.; Merino-Ibarra, M.; Valdespino-Castillo, P.M.; Olivera, Y. & Castillo-Sandoval, S.F. (2018). Coexisting ecosystem states in a tropical coastal lagoon under progressive eutrophication in the northern Cuban keys. *Sci. Mar.* 82 (3), 139–146.
- González-Ramírez, C.M.; González-Jardines, P. & Hernández-Capote, J.F. (2017). Evaluación de la afectación del huracán Irma, utilizando la modelación numérica en las provincias de Artemisa y Mayabeque. *Revista Cubana de Meteorología*, 23(3): 363-377.
- Goto, K.; Chagué-Goff, C.; Goff, J. & Jaffe, B. (2012). The future of tsunami research following the 2011 Tohoku-oki event. *Sedimentary Geology* 282, 1-13.
- Goto, K.; Chavanich, S.A.; Imamura, F.; Kunthasap, P.; Matsui, T.; Minoura, K.; Sugawara, D. & Yanagisawa, H. (2007). Distribution, origin and transport process of boulders transported by the 2004 Indian Ocean tsunami at Pakarang Cape, Thailand. *Sediment. Geol.* 202(4), 821-837.
- Goto, K.; Kawana, T. & Imamura, F. (2010a). Historical and geological evidence of boulders deposited by tsunamis, southern Ryukyu Islands, Japan. *Earth-Science Rev.* 102, 77–99.
- Goto, K.; Miyagi, K.; Kawamata, H. & Imamura, F. (2010b). Discrimination of boulders deposited by tsunamis and storm waves at Ishigaki Island, Japan. *Marine Geology* 269, 34–45.
- Goto, K.; Miyagi, K.; Kawana, T.; Takahashi, J. & Imamura, F. (2011). Emplacement and movement of boulders by known storm waves — Field evidence from the Okinawa Islands, Japan. *Marine Geology* 283, 66-78.
- Goto, K.; Okada, K. & Imamura, F. (2009). Characteristics and hydrodynamics of boulders transported by storm waves at Kudaka Island, Japan. *Marine Geology* 262, 14–24.
- Goto, K.; Okada, K. & Imamura, F. (2010c). Numerical analysis of boulder transport by the 2004 Indian Ocean tsunami at Pakarang Cape, Thailand. *Mar. Geol.* 268, 97-105.

- Gregory, B.R.B.; Peros, M.C.; Reinhardt, E.G. & Donnelly, J.P. (2015). Middle–late Holocene Caribbean aridity inferred from foraminifera and elemental data in sediment cores from two Cuban lagoons. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 426, 229-241.
- Guimaraes, M.; Zúñiga, A.; Pina, F. & Matos, F. (2013). Efectos del Huracán Paloma sobre los pastos marinos del archipiélago Jardines de la Reina, Cuba. *Rev. Biol. Trop.*, 61 (3), 1425-1432.
- Gupta, B. (1999). Modern Foraminifera. Dordrecht: *Kluwer Academic Publishers*.
- Hansom, J.D. & Hall, A.M. (2009). Magnitude and frequency of extra-tropical North Atlantic cyclones: a chronology from cliff-top storm deposits. *Quaternary International* 195(1–2): 42–52.
- Hawkes, A.D. & Horton, B.P. (2012). Sedimentary record of storm deposits from Hurricane Ike, Galveston and San Luis Islands, Texas. *Geomorphology* 171–172: 180–189.
- Hearty, P.J. (1997). Boulder Deposits from Large Waves during the Last Interglaciation on North Eleuthera Island, Bahamas. *Quaternary Research* 48, 326–338.
- Heiri, O.; Lotter, A.F. & Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology* 25(1): 101–110.
- Hidalgo, A. (2016). Metodología para el estudio climático de las inundaciones costeras en Cuba. *Tesis de Maestría*. INSTEC, La Habana, 73 p.
- Hidalgo, A.; Hernández, N. & Perigó, E. (2019). Períodos de retorno para las inundaciones costeras y los eventos extremos de viento y oleaje en la costa nororiental de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 25(2), 191–202.
- Hidalgo, A.; Mitrani, I. & Pérez, G. (2017). Nueva clasificación de las inundaciones costeras en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 23(2), 209–216.
- Hidalgo, A.; Mitrani, I.; Ramírez, W.; Pérez, Y.; Córdova, O.L. & Machado, A. (2020). Metodología para el estudio climático de las inundaciones costeras en Cuba. Aplicación en la costa norte de la región central y oriental. *Revista Cubana de Meteorología*, 26(2): 1-15.
- Hippensteel, S.P.; Eastin, M.D. & Garcia, W.J. (2013). The geological legacy of Hurricane Irene: Implications for the fidelity of the paleo-storm record. *GSA Today* 23(12): 4–10.
- Hippensteel, S.P. & Garcia, W.J. (2014). Micropaleontological evidence of prehistoric hurricane strikes from southeastern North Carolina. *Journal of Coastal Research* 298: 1157–1172.

- Hippensteel, S.P. & Martin, M.E. (1999). Foraminifera as an indicator of overwash deposits, Barrier Island sediment supply, and Barrier Island evolution: Folly Island, South Carolina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 149: 115–125.
- Horton, B.P.; Rossi, V. & Hawkes, A.D. (2009). The sedimentary record of the 2005 hurricane season from the Mississippi and Alabama coastlines. *Quaternary International* 195(1–2): 15–30.
- Hunter, S.C.; Allen, D.M. & Kohfeld, K.E. (2019). Spatial and temporal variability of Terminal Classic Period droughts from multiple proxy records on the Yucatan Peninsula, Mexico, *Clim. Past Discuss.* <https://www.doi.org/10.5194/cp-2019-68>.
- Imbert, D. (2018). Hurricane disturbance and forest dynamics in east Caribbean mangroves. *Ecosphere*, 9(7), e02231.
- IPCC AR5 (2013). Intergovernmental panel on climate change climate change fifth assessment report (AR5). *Cambridge University Press*, Cambridge.
- IPCC (2014). Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. In: Field, C.V.; Barros, V.R.; Jon Dokken, D.; Mach, K.J.; Mastrandrea, M.D.; Bilir, T.E.; Chatterjee, M.; Ebi, K.L.; Otsuki Estrada, Y.; Genova, R.C.; Girma, B.; Kissel, E.S.; Levy, A.N.; Maccracken, S.; Mastrandrea P.R. & White, L.L. (Eds.). *Ginebra, Suiza*.
- Iturralde-Vinent, M.A. (Editor) (2009). Geología de Cuba para todos. *Editorial Científico-Técnica*, Instituto del Libro, La Habana. 150 p. (Primera edición).
- Iturralde-Vinent, M.A. (Editor) (2010). Geología de Cuba para todos. *Editorial Científico-Técnica*, Instituto del Libro, La Habana. 150 p. (Segunda edición).
- Iturralde-Vinent, M.A. (2011). Peligros de origen geológico en Cuba. En: Compendio de Geología de Cuba y del Caribe. Segunda Edición (publicado Diciembre 2012). *Editorial CITMATEL*, ISBN: 9-789592-572863.
- Iturralde-Vinent, M.A. (2017). Huracanolitos, eventos de oleaje extremo y protección de las obras costeras. <https://www.redciencia.cu/geobiblio/inicio.html> Consulta: 18/03/2021.
- Kalantari, Z.; Ferreira, C.S.S.; Koutsouris, A.J.; Ahlmer, A.K.; Cerda, A. & Destouni, G. (2019). Assessing flood probability for transportation infrastructure based on catchment characteristics, sediment connectivity and remotely sensed soil moisture. *Science of the Total Environment* 661, 393–406.
- Kelletat, D.; Scheffers, A. & Scheffers, S. (2004). Holocene tsunami deposits on the Bahaman Islands of Long Island and Eleuthera. *Zeitschrift fur Geomorphologie*. 48(4).

- Kennedy, A.B.; Mori, N.; Zhang, Y.; Yasuda, T.; Chen, S.E.; Tajima, Y.; Pecor, W. & Toride, K. (2016). Observations and Modeling of Coastal Boulder Transport and Loading during Super Typhoon Haiyan. *Coastal Engineering Journal*. 58(1), 25p.
- Kiage, L.M.; Deocampo, D.; McCloskey, T.A.; Bianchette, T. & Hursey, M. (2011). A 1900-year paleohurricane record from Wassaw Island, Georgia, USA. *Journal of Quaternary Science* 26(7): 714–722.
- Kilbourne, K.H.; Moyer, R.P.; Quinn, T.M. & Grottooli, A.G. (2011). Testing coral-based tropical cyclone reconstructions: an example from Puerto Rico. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 307(1–4): 90–97.
- Kindler, P. & Strasser, A. (2002). Palaeoclimatic significance of co-occurring wind and water induced sedimentary structures in last interglacial coastal deposits from Bermuda and the Bahamas. *Sedimentary Geology* 147, 437–443.
- Knutson, T.R.; McBride, J.L.; Chan, J.; Emanuel, K.; Holland, G.; Landsea, C.; Held, I.; Kossin, J.P.; Srivastava, A.K. & Sugi, M. (2010). Tropical cyclones and climate change. *Nature Geoscience*, 3 (3), 157-163.
- Kolodny, Y.; Calvo, R. & Rosenfeld, D. (2009). 'Too low' $\delta^{18}\text{O}$ of paleo-meteoric, low latitude, water; do paleo-tropical cyclones explain it? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 280(3–4): 387–395.
- Kuhn, T.S. (2005). La estructura de las revoluciones científicas. *Fondo de Cultura Económica de España*.
- Kylander, M.A.; Lind, E.M.; Wastegard, S. & Löwemark, L. (2011). Recommendations for using XRF core scanning as a tool in tephrochronology. *The Holocene* 22(3): 371–375.
- Lambert, W.J.; Aharon, P. & Rodríguez, A.B. (2008). Catastrophic hurricane history revealed by organic geochemical proxies in coastal lake sediments: a case study of Lake Shelby, Alabama (USA). *Journal of Paleolimnology* 39(1): 117–131.
- Landsea, C.W.; Franklin, J. & Beven, J. (2014). The revised Atlantic hurricane database (HURDAT2). April 2014. *The National Hurricane Center (NHC)*, Miami, Florida, USA.
- Landsea, C.W.; Harper, B.A.; Hoarau, K. & Knaff, J.A. (2006). Can we detect trends in extreme tropical cyclones?. *Science*, 313, 452-454.

- Lane, P.; Donnelly, J.P.; Woodruff, J.D. & Hawkes, A.D. (2011). A decadal-resolved paleohurricane record archived in the late Holocene sediments of a Florida sinkhole. *Marine Geology* 287(1–4): 14–30.
- Lawrence, J.R. & Gedzelman, S.D. (1996). Low stable isotope ratios of tropical cyclone rains. *Geophysical Research Letters* 23(5): 527–530.
- Lawrence, J.R.; Hyeong, K.; Maddocks, R.F. & Lee, K.S. (2008). Passage of Tropical Storm Allison (2001) over southeast Texas recorded in $\delta^{18}\text{O}$ values of Ostracoda. *Quaternary Research* 70(2): 339–342.
- León Brito, A. (2021). Huracanolitos en Cuba: Condiciones naturales que favorecen su sedimentación. *Tesis de Grado de Geografía*. Universidad de La Habana.
- Li, Z.H.; Labbe, N.; Driese, S.G. Grissino-Mayer, H.D. (2011). Micro-scale analysis of tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ on α -cellulose spline reveals high-resolution intra-annual climate variability and tropical cyclone activity. *Chemical Geology* 284(1–2): 138–147.
- Liang, X.Z. (2022). Extreme rainfall slows the global economy. *Nature* 601, 193–194.
- Liang, X.Z.; Wu, Y.; Chambers, R.G.; Schmoldt, D.L.; Gao, W.; Liu, C.; Liu, Y.A.; Sun, C. & Kennedy, J.A. (2017). Determining climate effects on US Total agricultural productivity. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, E2285–E2292.
- Limia, M.; Vega, R. & Pérez, R. (2003). Climatología de los ciclones tropicales que han afectado a Cuba y sus provincias. In: *Memorias del X Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología "La meteorología y el desarrollo sostenible"*, Ciudad de La Habana, 3–7 Marzo.
- Liu, H.; Zhang, H.; Li, Y. & Xie, L. (2013). Numerical study of the sensitivity of mangroves in reducing storm surge and flooding to hurricane characteristics in southern Florida. *Continental Shelf Research*, 64, 51–65.
- Liu, K.B. (2004). Paleotempestology: Principles, Methods, and Examples from Gulf Coast Lake Sediments. In: *Hurricanes and Typhoons: Past, Present, and Future*, Murnane, R. J. & Liu, K.B. (eds.), Columbia University Press, 13–57.
- Liu, K.B. (2013). Paleotempestology. In: Elias SA (ed.) *The Encyclopedia of Quaternary Science*. Amsterdam: Elsevier, 209–221.
- Liu, K.B. & Fearn, M. L. (1993). Lake-Sediment record of late Holocene Hurricane activities from Coastal Alabama. *Geology* 21, 793–796.

- Liu, K.B. & Fearn, M.L. (2000). Reconstruction of prehistoric landfall frequencies of catastrophic hurricanes in NW Florida from lake sediment records. *Quaternary Research* 54, 238–245.
- Liu, K.B.; Li, C.; Blanchette, T.A.; McCloskey, T.A.; Yao, Q. & Weeks, E. (2011). Storm Deposition in a Coastal Backbarrier Lake in Louisiana Caused by Hurricanes Gustav and Ike. *Journal of Coastal Research* (64)1866-1870.
- Liu, K.B.; Lu, H. & Shen, C. (2008). A 1200-year proxy record of hurricanes and fires from the Gulf of Mexico coast: testing the hypothesis of hurricane–fire interactions. *Quaternary Research* 69(1): 29–41.
- Löwemark, L.; Chen, H.F.; Yang, T.N.; Kylander, M.; Yu, E.F.; Hsu, Y.W.; Lee, T.Q.; Song, S.R. & Jarvis, S. (2011). Normalizing XRF-scanner data: a cautionary note on the interpretation of high-resolution records from organic-rich lakes. *Journal of Asian Earth Sciences* 40: 1250–1256.
- Magaz, A.R. & Portela, A.H. (2017). Huracanolitos: las huellas de tormentas colosales en las costas de Cuba. *Cuba Geográfica*. (2) 5: 1–10.
- Malaizé, B.; Bertran, P.; Carbonel, P.; Bonnissent, D.; Charlier, K.; Galop, D.; Imbert, D.; Serrand, N.; Stouvenot, C. & Pujol, C. (2011). Hurricanes and climate in the Caribbean during the past 3700 years. *The Holocene* 21(6): 911–924.
- Malmquist, D.L. (1997). Oxygen isotopes in cave stalagmites as a proxy record of past tropical cyclone activity. *American Meteorological Society Conference on Hurricanes* 9(3): 393–394.
- Marshall, J.C. & Hazelton, M.L. (2010). Boundary Kernels for Adaptive Density Estimators on Regions with Irregular Boundaries. *Journal of Multivariate Analysis* 101, 949-963.
- Martín-Vide (2003). El tiempo y el clima. *Editorial Rubes*.
- Matero, I.S.O.; Gregoire, L.J.; Ivanovic, R.F.; Tindall, J.C. & Haywood, A.M. (2017). The 8.2 ka cooling event caused by Laurentide ice saddle collapse. *Earth and Planetary Science Letters*, 473, 205–214.
- Matos, F. (2010). Paleohuracanes en Cuba y el Caribe: dos técnicas proxies de interés. *Informe Científico-Técnico*, CIEC. 8 p.
- Matos, F. (2017). Boulders in Cuba: Hurricane sor Tsunamis?. DOI: [10.13140/RG.2.2.17717.88809](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17717.88809)
- Matos, F.; Pérez, O.E. & Valero, A. (2022). Hurricane Related Coastal Flooding in the Province of Ciego de Avila, Cuba: Hazard, Vulnerability and Risk Study. *Chapter 9* In: Cárdenas, R., Mochalov, V., Parra, O., Martin, O. (Eds.). *Modeling Natural Environments. Proceedings of the 3rd International Conference on Bio Geo Sciences*. Springer.

- Mattheus, C.R. & Fowler, J.K. (2015). Paleotempestite distribution across an isolated carbonate platform, San Salvador Island, Bahamas. *Journal of Coastal Research* 314: 842–858.
- May, S.M.; Engel, M.; Brill, D.; Cuadra, C.; Lagmay, A.; Santiago, J.; Suarez, J. K.; Reyes, M. & Brückner, H. (2015). Block and boulder transport in Eastern Samar (Philippines) during Supertyphoon Haiyan. *Earth Surface Dynamics*, 3, 34.
- McCloskey, T.A.; Bianchette, T.A. & Liu, K.B. (2013). Track Patterns of Landfalling and Coastal Tropical Cyclones in the Atlantic Basin, Their Relationship with the North Atlantic Oscillation (NAO), and the Potential Effect of Global Warming. *American Journal of Climate Change*, 2:12-22.
- McCloskey, T.A. & Keller, G. (2009). 5000 year sedimentary record of hurricane strikes on the central coast of Belize. *Quaternary International* 195(1–2): 53–68.
- McCloskey, T.A. & Liu, K. (2012). A sedimentary-based history of hurricane strikes on the southern Caribbean coast of Nicaragua. *Quaternary Research* 78(3): 454–464.
- McCloskey, T.A. & Liu, K. (2013). A 7000 year record of paleohurricane activity from a coastal wetland in Belize. *The Holocene* 23(2): 278–291.
- McDermott, F. (2004). Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. *Quaternary Science Reviews* 23(7–8): 901–918.
- Mendelsohn, R.; Emanuel, K.; Chonabayashi, S. & Bakkensen, L. (2012). The impact of climate change on global tropical cyclone damage. *Nature Climate Change*, 2, 205-209.
- Menéndez, L. & Guzmán, J.M. (2006). Ecosistema de manglar en el Archipiélago Cubano. *Ed. Academia*, La Habana.
- Miller, D.L.; Mora, C.I.; Grissino-Mayer, H.D.; Mock, C.; Uhle, M. & Sharp, Z. (2006). Tree-ring isotope records of tropical cyclone activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103(39): 14294–14297.
- Mitrani, I. (2001). Caracterización general de la capa activa oceánica en los mares cercanos a Cuba y su posible enlace con el desarrollo de los ciclones tropicales. *Rev. Invest. Mar.* 22(2):8–91.
- Mitrani, I. (2006). Las inundaciones costeras en Cuba y su repercusión social. *Bioética*/Septiembre-Diciembre.
- Mitrani I.; Díaz, L.; Pérez, P. & González, J. (1994). Características hidrometeorológicas generales de la zona costera correspondiente al Malecón Habanero. Informe de Resultado Científico, *Biblioteca INSMET*, 38 p.

- Mitrani, I.; Fontova, M.; Díaz, L. & González, J. (1984). Determinación del régimen de ola y viento en la costa norte de La Habana. IV Exposición Forjadores del Futuro, *Centro de Información y Divulgación de las BTJ*. Código D.5625.Mit.D, 15 p.
- Mitrani, I.; García, E.; Hidalgo, A.; Hernández, I.; Salas, I.; Pérez, R.; Díaz, O.O.; Vichot, A.; Pérez, A.; Cangas, R.; Álvarez, L., Pérez, O.E., Rodríguez, J.A., Rodríguez, C.M., Pérez, A.L., Morales, A., Viamontes, J. & Pérez, J. (2017). Inundaciones costeras en Cuba y sus tendencias climáticas. La Habana: *CITMATEL*, 192 p, ISBN: 978-59-237-730-1.
- Moreno-Suárez, O.; Rodríguez-Ríos, Y.; Matos-Pupo, F.; López-Mayea, A.; González-Abreu, R.; Rodríguez-Cueto, Y.; González-Ramírez, I.; Rodríguez-Zayas, M.; Hernández-Hernández, S.; Vidal-Olivera, V. & Sorí-Gómez, R. (2011). Estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgos de desastres de inundaciones por penetraciones del mar, inundaciones por intensas lluvias y afectaciones por fuertes vientos en la provincia Ciego de Ávila. *CITMA Ciego de Ávila*. 118 p.
- Morrill, C.; LeGrande, A.N.; Renssen, H.; Bakker, P. & Otto-Bliesner, B.L. (2013). Model sensitivity to North Atlantic freshwater forcing at 8.2 ka, *Clim. Past*, 9, 955–968.
- Murray, J.W. (2006). Ecology and Applications of Benthic Foraminifera. New York: *Cambridge University Press*.
- Myroie, J.E. (2008). Late Quaternary sea-level position: Evidence from Bahamian carbonate deposition and dissolution cycles. *Quaternary International*. 183, 61–75.
- Naquin, J.D.; Liu, K.; McCloskey, T.A. & Biachette, T.A. (2014). Storm deposition induced by hurricanes in a rapidly subsiding coastal zone. *Journal of Coastal Research* 70: 308–313.
- Nandasena, N.A.K.; Paris, R. & Tanaka, N. (2011). Reassessment of hydrodynamic equations: Minimum flow velocity to initiate boulder transport by high energy events (storms, tsunamis). *Mar Geol* 281:71–84.
- Needham, H.F.; Keim, B.D. & Sathiaraj, D. (2015). A review of tropical cyclone-generated storm surges: Global data sources, observations, and impacts. *Reviews of Geophysics* 53(2), 545–591.
- Neumayer, E. & Barthel, F. (2011). Normalizing economic loss from natural disasters: A global analysis. *Global Environmental Change*, 21 (1), 13-24.
- Nikitina, D.L.; Kemp, A.C.; Horton, B.P.; Vane, C.H.; Van de Plassche, O. & Engelhart, S.E. (2014). Storm erosion during the past 2000 years along the north shore of Delaware Bay, USA. *Geomorphology* 208: 160–172.

- Noormets, R.; Crook, K.A.W. & Felton, E.A. (2004). Sedimentology of rocky shorelines: 3. Hydrodynamics of megaclast emplacement and transport on a shore platform, Oahu, Hawaii. *Sediment Geol* 172:41–65.
- Nordhaus, W.D. (2010). The economics of hurricanes and implications of global warming. *Clim. Change Econ.* 1, 1–24.
- Nott, J. (2003). Waves, coastal boulder deposits and the importance of the pre-transport setting. *Earth Planet Sci Lett* 210(1–2):269–276.
- Nott, J. & Bryant, E. (2003). Extreme marine inundations (tsunamis?) of coastal Western Australia. *J Geol* 111(6):691–706.
- Noy, I. (2009). The macroeconomic consequences of disasters. *J. Dev. Econ.* 88, 221–231.
- Núñez-Jiménez, A. (1959). Geografía de Cuba. *Editorial Lex*, La Habana. 545 p.
- Núñez Jiménez, A. (1982). Cuba, La Naturaleza y el Hombre: Bojeo. *Letras Cubanas*, La Habana. 702 p.
- Núñez Jover, J. (2004). La ciencia y la tecnología como procesos sociales, En: *Tecnología y Sociedad (Colectivos de autores)*. 43-62.
- Oliva, F.; Peros, M. & Viau, A. (2017). A review of the spatial distribution of and analytical techniques used in paleotempestological studies in the western North Atlantic Basin. *Progress in Physical Geography* 41: 171–190.
- Oliva, F.; Viau, A.; Peros, M. & Bpuchard, M. (2018). Paleotempestology database for the western North Atlantic basin. *The Holocene* 41: 1–8.
- Ortega, F. (1983). Una hipótesis sobre el clima de Cuba durante la glaciación de Wisconsin. *Cien. Tierra y Esp.* (7) 57-68.
- Ortiz-Bobea, A.; Ault, T.R.; Carrillo, C.M.; Chambers, R.G. & Lobell, D.B. (2021). Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nat. Clim. Chang.* 11, 306–312.
- Pajón, J.M.; Hernández, I.; Ortega, F. & Macle, J. (2001). Periods of Wet Climate in Cuba: Evaluation of Expression in Karst of Sierra de San Carlos. In: Markgraf, V. (Ed.). *Interhemispheric Climate Linkages*. Chapter 13, 217-226.
- Panwar, V. & Sen, S. (2019). Economic impact of natural disasters: An empirical re-examination. *Margin J. Appl. Econ. Res.* 13, 109–139.

- Paris, R.; Fournier, J.; Poizot, E.; Etienne, S.; Morin, J.; Lavigne, F. & Wassmer, P. (2010). Boulder and fine sediment transport and deposition by the 2004 tsunami in Lhok Nga (western Banda Aceh, Sumatra, Indonesia): a coupled offshore- onshore model. *Mar Geol* 268:43–54.
- Peñalver, L.; Cabrera, M.; Trujillo, H.; Fundora, M.; Morales, H.; Pérez Lazo, J.; Sánchez, M. & Pedroso, I. (1999). Cambios climáticos en Cuba Centro- Oriental durante el Cuaternario sobre bases geológicas (Inédito). *Archivo IGP*. La Habana.
- Pérez, R. (2013). Cronología de los Huracanes de Cuba. Instituto de Meteorología, *Agencia de Medio Ambiente*, Ministerio de Ciencias, Tecnología y Medio Ambiente. La Habana, Cuba. 7 p.
- Pérez, R.; Vega, R. & Limia, M. (2001). Los huracanes más intensos y desastrosos de Cuba en los últimos dos siglos. *Boletín de la Sociedad Meteorológica de Cuba*, 7 (2): 3–10.
- Pérez-Osorio, P.J.; Casals, R.; del Sol, A. & Díaz, L. (2001). Análisis de los fenómenos meteorológicos que provocaron penetraciones del mar en el malecón habanero. *Revista Cubana de Meteorología*, 8(1), 50–58.
- Peros, M.C. (2000). Coastal environments and Taino occupation at Los Buchillones, Cuba. *Master of Science Thesis*, York University.
- Peros, M.C. (2005). Middle to Late Holocene Environment Change and Archaeology on the North Coast of Central Cuba. *PhD Thesis*, University of Toronto.
- Peros, M.C.; Collins, S.; Agosta G'Meiner; Reinhardt, E. & Matos, F. (2017). Multistage 8.2kyr event revealed through high-resolution XRF core scanning of Cuban sinkhole sediments. *Geophys. Res. Lett.* 44 (14), 7374–7381.
- Peros, M.C.; Graham, E. & Davis, A.M. (2007a). Stratigraphic Investigations at Los Buchillones, a Coastal Taino Site in North-Central Cuba. *Geoarchaeology*. 21(5): 403–428.
- Peros, M.C.; Gregory, B.; Matos, F.; Reinhardt, E. & Desloges, J. (2015). Late-Holocene record of lagoon evolution, climate change, and hurricane activity from southeastern Cuba. *The Holocene*. 25:1483–1497.
- Peros, M.C.; Reinhardt, E.G. & Davis, A.M. (2007b). A 6000 cal yr record of ecological and hydrological changes from Laguna de la Leche, north coastal Cuba. *Quaternary Research* 67: 69–82.
- Peros, M.C.; Reinhardt, E.G.; Schwarcz, H.P. & Davis, A.M. (2007c). High-resolution paleosalinity reconstruction from Laguna de la Leche, north coastal Cuba, using Sr, O, and C isotopes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 245(3–4): 535–550.

- Pielke, R.; Gratz, J.; Landsea, C.; Collins, D.; Saunders, M. & Musulin, R. (2008). Normalized Hurricane Damage in the United States: 1900-2005. *Natural Hazards Review*, 9, 29-42.
- Pignatelli, C.; Sansò, P. & Mastronuzzi, G. (2009). Evaluation of tsunami flooding using geomorphologic evidence. *Mar Geol* 260(1-4): 6-18.
- Pignatelli, C.; Scheffers, A.; Scheffers, S. & Mastronuzzi, G. (2010). Assessment of extreme wave flooding from geomorphologic evidence in Bonaire (Netherlands Antilles). *Zeitschrift fur Geomorphologie*. (54): 219-245.
- Planos, E.O. & Gutiérrez, T. (Editores) (2020). *Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. 403 p.
- Planos, E.O.; Vega, R. & Guevara, A. (2013). Impacto del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba. Instituto de Meteorología, *Agencia de Medio Ambiente*, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. La Habana, Cuba, 430 p.
- Popper, K.R. (1995). *La lógica de la investigación científica*. Círculo de Lectores.
- Portela, M. (1998). Elaboración de un método sinóptico-estadístico para el pronóstico de la ocurrencia de inundaciones costeras en Cuba. *Proyecto Cuba/94/003. Instituto de Meteorología - PNUD*. 46-63.
- R Development Core Team (2014). R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [Available at <http://www.R-project.org>.]
- Reese, C.A.; Strange T.P.; Lynch, W.D. & Liu, K.B. (2008). Geologic evidence of Hurricane Katrina recovered from the Pearl River Marsh, MS/LA. *Journal of Coastal Research* 24(6): 1601-1607.
- Regueira, V.A. & Barcia, S. (2019). Cronología de inundaciones costeras por penetración del mar, en la provincia Cienfuegos. *Revista Cubana de Meteorología*, 25(sp), 278-290.
- Reimer, P.J.; Baillie, M.G.L.; Bard, E. et al. (2009). IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 51: 1111-1150.
- Rey, T.; Leone, F.; Candela, T.; Belmadani, A.; Palany, P.; Krien, Y.; Cécé, R.; Gherardi, M.; Péroche, M. & Zahibo, N. (2019). Coastal Processes and Influence on Damage to Urban Structures during Hurricane Irma (St-Martin & St-Barthélemy, French West Indies). *J. Mar. Sci. Eng.* 7, 215.
- Robinson, E.; Khan, S.; Rowe, D.A. & Coutou, R. (2008). Size of boulders moved and emplaced by recent hurricanes, Jamaica. In: Mastronuzzi, G., Pignatelli, P., Sansó, P., Milella, M. & Selleri, G.

- (Eds.). Abstract Volume of the *2nd International Tsunami Field Symposium*, Ostuni (Italy) and Ionian Islands (Greece), 22e28 September 2008. *GI2S Coast Research Publication* 6, 135–138.
- Rodríguez, A. & Acosta, E. (2017). Megabloques en Trinidad: Generalidades de su morfometría. *Serie Oceanológica No. 16*. 7p.
- Rodríguez, A.; Acosta, E. & Rojas-Consuegra, R. (2016). Depósitos de oleaje extremo en Trinidad, Cuba: huracanolitos. *Boletín de la Sociedad Cubana de Geología*, Notas científicas, 16 (2): 14–166.
- Rohling, E.J. & Pälike, H. (2005). Centennial-scale climate cooling with a sudden cold event around 8,200 years ago. *Nature*, 434, 975–979.
- Rojas-Consuegra, R. & Isaac-Mengana, J. (2007). Depósitos detríticos gruesos producidos por el huracán Wilma, sobre la costa este de Ciudad de La Habana. En: *II Convención sobre Ciencias de La Tierra. GEOCIENCIA'2007*. Centro Nacional de Información Geológica, IGP. La Habana. CD ROM. 2007. GEO8-013: 1-12. ISBN 978-959-7117-16-2.
- Sabatier, P.; Dezileau, L.; Colin, C.; Briquieu, L.; Bouchette, F.; Martinez, P.; Siani, G.; Raynal, O. & Grafenstein, U.V. (2012). 7000 years of paleostorm activity in the NW Mediterranean Sea in response to Holocene climate events. *Quaternary Research* 77(1): 1–11.
- Salazar-Vallejo, S. (2002). Huracanes y biodiversidad costera tropical. *Rev Biol Tropical* 50(2), 415–428.
- Salmón-Cuspinera, Y. (2020). Impactos y riesgos de los eventos climáticos extremos en el sector agrícola de la provincia Santiago de Cuba, Cuba. *Ciencia en su PC* (1) 99-112.
- Scheffers, A.M. (2002). Paleo-tsunamis in the Caribbean: Field evidences and dating from Aruba, Curacao and Bonaire. *Essener Geographische Arbeiten* 33, 181 p.
- Scheffers, A.M. (2004). Tsunamis imprints on the Leeward Netherlands Antilles (Aruba, Curacao, Bonaire) and their relation to other coastal problems. *Quaternary International* 120, 163-172.
- Scheffers, A.M. (2005). Coastal response to extreme wave events e hurricanes and tsunamis on Bonaire. *Essener Geographische Arbeiten* 37.
- Scheffers, A.M. & Kelletat, D. (2003). Sedimentologic and geomorphologic tsunami imprints worldwide—A review. *Earth Sci Rev* 63:83–92.
- Scheffers, A.M. & Kelletat, D. (2006). New evidence and datings of Holocene paleotsunami events in the Caribbean (Barbados, St. Martin and Anguilla). In: Mercado-Irizarry, A. & Liu, P. (Eds.), *Caribbean Tsunami Hazard*. World Scientific, Singapore, 178-202.

- Scheffers, A.M. & Scheffers, S.R. (2006). Documentation of Hurricane Ivan on the coastline of Bonaire. *J. Coastal Res.* 22, 1437–1450.
- Scheffers, A.M.; Scheffers, S.R. & Kelletat, D. (2005). Paleo-tsunami relics on the southern and central Antillean Island Arc. *J. Coastal Res.* 21, 263–273.
- Scott, D.B.; Collins, E.S.; Gayes, P.T. & Wright, E. (2003). Records of prehistoric hurricanes on the South Carolina coast based on micropaleontological and sedimentological evidence, with comparison to other Atlantic Coast records. *Geological Society of America Bulletin* 115(9): 1027–1039.
- Simpson, R.H. (1974). The hurricane disaster potential scale. *Weatherwise*. USA 27, pp. 169–186.
- Speer, J.H. (2010). Fundamentals of Tree Ring Research. Tucson, A.Z. *The University of Arizona Press*.
- Spiske, M.; Böröcz, Z. & Bahlburg, H. (2008). The role of porosity in discriminating between tsunami and hurricane emplacement of boulders - A case study from the Lesser Antilles, southern Caribbean. *Earth and Planetary Science Letters*. (268): 384–396.
- Spiske, M. & Halley, R.B. (2014). A coral-rubble ridge as evidence for hurricane overwash, Anegada (British Virgin Islands). *Advances in Geosciences*38: 9–20.
- Strobl, E. (2011). The economic growth impact of hurricanes: Evidence from US coastal counties. *Review of Economics and Statistics*, 93 (2), 575-589.
- Stuiver, M. & Reimer, P.J. (1993). Extended 14C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*35: 215–230.
- Switzer, A.D. & Burston, J.M. (2010). Competing mechanisms for boulder deposition on the southeast Australian coast. *Geomorphology* 114(1–2): 42–54.
- Tan, L.; Yao, W.; Chen, F. & Li, L. (2020). Economic Loss Assessment of Tropical Cyclones Based on Bibliometric Data Analysis. *Tropical Conservation Science* (13), 1-16.
- Tomiczek, T.; O'Donnell, K.; Furman, K.; Webbmartin, B.; Scyphers, S. (2020). Rapid Damage Assessments of Shorelines and Structures in the Florida Keys after Hurricane Irma. *Nat. Hazards Rev.*, 21(1): 05019006.
- Toomey, M.R.; Curry, W.B.; Donnelly, J.P. & Van Hengstum P.J. (2013). Reconstructing 7000 years of North Atlantic hurricane variability using deep sea sediment cores from the western Great Bahama Bank. *Paleoceanography and Paleoclimatology* 28(1): 31–41.

- Toya, H. & Skidmore, M. (2007). Economic Development and the Impact of Natural Disasters. *Economics Letters*, 94, 20-25.
- Trinh, T.A.; Feeny, S. & Posso, A. (2021). The impact of natural disasters and climate change on agriculture: Findings from Vietnam. In: *Economic effects of natural disasters theoretical foundations, methods, and tools*: 261-280.
- UMA (2008). Evaluación de los impactos ambientales provocados por el paso de los huracanes Gustav y Ike en la provincia de Ciego de Ávila. *CITMA Ciego de Ávila*. 38 p.
- UMA (2017). Informe de Evaluación del Impacto Ambiental de Desastre provocado por Irma (Huracán de Gran Intensidad) en la provincia Ciego de Ávila. Unidad de Medio Ambiente, *CITMA Ciego de Ávila*. 33 p.
- Van Hengstum, P.J.; Donnelly, J.P.; Toomey, M.R.; Albury, N.A.; Lane, P.; Kakuk, B. (2014). Heightened hurricane activity on the Little Bahama Bank from 1350 to 1650 AD. *Continental Shelf Research* 86: 103–115.
- Vázquez-Moreno, L.L. (2021). Resiliencia de sistemas de producción agropecuaria expuestos al huracán Irma en Cuba. *Pastos y Forrajes* (44) 1-15.
- Walcker, R.; Laplanche, C.; Herteman, M.; Lambs, L.; Fromard, F. (2019). Damages caused by hurricane Irma in the human-degraded mangroves of Saint Martin (Caribbean). *Scientific Reports*, 9:18971.
- Webster, P.; Holland, G.; Curry, J. & Chang, H. (2005). Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. *Science*, 309, 1844-1846.
- Weindorf, D.C.; Bakr, N. & Zhu, Y. (2014). Advances in portable X-ray fluorescence (PXRF) for environmental, pedological, and agronomic applications. *Advances in Agronomy* 128: 1–45.
- Wiersma, A.P. & Renssen, H. (2006). Model–data comparison for the 8.2 ka BP event: Confirmation of a forcing mechanism by catastrophic drainage of Laurentide Lakes, *Quat. Sci. Rev.*, 25, 63–88.
- Williams, H.F.L. (2009). Stratigraphy, sedimentology, and microfossil content of Hurricane Rita storm surge deposits in southwest Louisiana. *Journal of Coastal Research* 254: 1041–1051.
- Williams, H.F.L. (2010). Storm surge deposition by Hurricane Ike on the McFaddin National Wildlife Refuge, Texas: implications for paleotempestology studies. *The Journal of Foraminiferal Research* 40(3): 210–219.
- Williams, H.F.L. (2013). 600-year sedimentary archive of hurricane strikes in a prograding beach ridge plain, southwestern Louisiana. *Marine Geology* 336: 170–183.

- Williams, H. & Liu, K.B. (2019). Contrasting Hurricane Ike washover sedimentation and Hurricane Harvey flood sedimentation in a Southeastern Texas coastal marsh. *Marine Geology* 417(1):106011.
- Woodruff, J.D.; Donnelly, J.P.; Mohrig, D. & Geyer, W.R. (2008). Reconstructing relative flooding intensities responsible for hurricane-induced deposits from Laguna Playa Grande, Vieques, Puerto Rico. *Geology* 36(5): 391–394.
- Woodruff, J.D.; Donnelly, J.P. & Okusu, A. (2009). Exploring typhoon variability over the mid-to-late Holocene: evidence of extreme coastal flooding from Kamikoshiki, Japan. *Quaternary Science Reviews* 28(17– 18): 1774–1785.
- Wu, Y.; Liang, X.Z. & Gao, W. (2015). Climate change impacts on the U.S. agricultural economy. *Proc. SPIE 9610, remote sensing and modeling of ecosystems for sustainability XII*, 96100J.
- Yao, Q.; Liu, K.B.; Williams, H.; Joshi, S.; Bianchette, T.A. & Ryu, J. (2019). Hurricane Harvey Storm in the San Bernard National Wildlife Refuge, Texas: Fluvial versus Storm Surge Deposition. *Stuaries and Coasts*. <https://www.doi.org/10.1007/s12237-019-00639-6>
- Yu, S.Y.; Shen, J. & Colman, S.M. (2007). Modeling the radiocarbon reservoir effect in lacustrine systems. *Radiocarbon* 49(3): 1241–1254.
- Zhang, K.; Liu, H.; Li, Y.; Xu, H.; Shen, J.; Rhome, J. & Smith, T.J. (2012). The role of mangroves in attenuating storm surges. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 102–103:11–23.