

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



MFC
Facultad de Matemática
Física y Computación

Departamento de Física

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Huracanolitos en Baitiquirí (Guantánamo), movidos por el huracán Matthew: análisis del proceso físico. Aplicación en estudios de paleodeposiciones.

Autor: Beatriz Beltrán Fonseca

Tutores: MsC. Felipe Matos Pupo

MsC. Noel Pérez Díaz

Santa Clara, julio, 2019
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



MFC
Facultad de Matemática
Física y Computación

Academic Department

DIPLOMA THESIS

Title: Huracanoliths in Baitiquirí (Guantánamo), moved by Hurricane Matthew: analysis of the physical process. Application in paleodepositions studies.

Author: Beatriz Beltrán Fonseca

Thesis Director: MsC. Felipe Matos Pupo

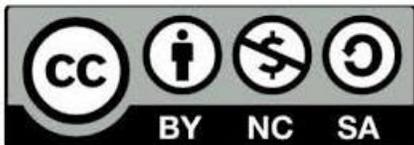
MsC. Noel Pérez Díaz

Santa Clara, July, 2019
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Dedicatoria

Este resultado va dedicado especialmente a mis padres y mi hermano, quienes han sido pilares indispensables en mi formación como futura profesional.

Agradecimiento

Agradezco a mi tutor Felipe Matos por toda la ayuda brindada en la realización de esta investigación; a Yuniel Acosta quien estuvo para mí en todo momento, a mi familia por el apoyo incondicional en todas las etapas; a mis amigos, compañeros y a aquellas personas que hicieron posible de una forma u otra el haber llegado a la meta.

Resumen

El Caribe es una de las regiones del planeta más afectadas por huracanes. Por ejemplo, en 2016 el huracán Matthew provocó pérdidas económicas millonarias, extendiendo sus afectaciones hasta E.E.U.U. En Cuba, Guantánamo fue la provincia más dañada por Matthew, aunque no ocurrieron muertes a nivel nacional en virtud de las medidas preventivas tomadas. También es conocido que la capacidad de la población para enfrentar estos tipos de situaciones depende de la percepción del riesgo por huracanes. Guantánamo es una zona con baja percepción, asociado en gran medida a la baja frecuencia de recibir impactos de eventos de oleaje extremo, considerando la base de datos existente para tsunamis (UNESCO 2014) y huracanes (SOMETCUBA, 2004). La identificación de huracanolitos transportados por el poderoso huracán Matthew, ha sido básico para: (1) analizar los huracanolitos movidos por el huracán Matthew a través de las ecuaciones de transporte de sedimentos, (2) examinar la eficacia del uso de las ecuaciones de transporte de sedimentos, (3) identificar la génesis de los boulders antiguos a través de las ecuaciones de transporte de sedimentos, utilizando como análogo lo bloques movidos por el huracán Matthew. Aunque es una primera aproximación, los resultados obtenidos pueden ser aplicados en las mejoras de los modelos de estos procesos, generados durante las incidencias de estos meteoros en zonas costeras. Fueron utilizadas las salidas del Modelo Numérico Océano-Atmósfera del Instituto de Meteorología, con olas de 6-9 metros en la costa sur de esta provincia; los datos de estaciones de Guantánamo; la evaluación de los huracanolitos ubicados en el área y las ecuaciones establecidas para su transporte (Nott, 2003, Engel and May, 2012).

Palabras claves: Huracanolitos, huracán Matthew, tsunamis, ecuaciones de transporte, percepción de riesgos, boulders antiguos.

Abstract

The Caribbean is one of the most regions of the planet affected by hurricanes. For example, in 2016, Hurricane Matthew caused millions of dollars in economic losses, extending its effects to E.E.U.U. In Cuba, Guantanamo was the province most damaged by Matthew, although there were no deaths at the national level due to the preventive measures taken. It is also known that the capacity of the population to face these types of situations depends on the perception of hurricane risk. Guantanamo is an area with low perception, associated to a large extent with the low frequency of receiving impacts from extreme wave events, considering the existing data base for tsunamis (UNESCO 2014) and hurricanes (SOMETCUBA, 2004). The identification of *huracanoliths* transported by the powerful Hurricane Matthew, has been basic to: (1) analyze the hurricanes moved by Hurricane Matthew through the sediment transport equations, (2) examine the efficiency of the use of transport equations of sediments, (3) identify the genesis of the ancient boulders through the sediment transport equations, using as analog the blocks moved by Hurricane Matthew. Although it is a first approximation, the obtained results can be applied in the improvements of the models of these processes, generated during the incidences of these meteors in coastal zones. The outputs of the Numeric Ocean-Atmosphere Model of the Institute of Meteorology were used, with waves of 6-9 meters on the south coast of this province; the data from Guantanamo stations; the evaluation of the hurricanes located in the area and the equations established for their transport (Nott, 2003, Engel and May, 2012).

Keywords: *huracanoliths, hurricane Matthew, tsunamis, transport equations, risk perception, ancient boulders.*

Contenido

Introducción	14
Capítulo I: Registro de eventos de oleaje extremo en Guantánamo	20
1.1 Boulders o huracanolitos?	20
1.2 Formación de un tsunami	23
1.3 Formación de un huracán.	24
1.4 Registro histórico de tsunamis y huracanes en la Región Oriental de Cuba. 26	
1.4.1 Registro de tsunamis	26
1.4.2 Registro de huracanes	31
1.5 Área de estudio	34
1.5.1 San Antonio del Sur	34
1.5.2 Tectónica.	35
1.5.3 Características geomorfológicas.	37
1.5.4 Clima.	39
Capítulo II: Mediciones de campo y ecuaciones de transporte	40
2.1 Paso del huracán Matthew por Guantánamo	40
2.1.1 Modelación del oleaje provocado por el huracán Matthew	42
2.2 Mediciones de campo	43
2.3 Tramos costeros	45
2.4 Ecuaciones de Nott	47
2.4.1 Ecuaciones de transporte de ola	47
2.4.2 Escenario de boulder sumergido	48
2.4.3 Escenario de boulder sub-aéreo	52
2.4.4 Escenario de boulder de unión limitada (JBB)	54
2.5 Ecuaciones de Engels y May	56

2.5.1	Arrastre, transporte y emplazamiento de boulders	56	
2.5.2	Primer escenario (JBB).....	57	
2.5.3	Segundo escenario (boulder sumergido)	59	
2.5.4	Tercer escenario (boulder sub-aéreo).....	61	
Capítulo III: Datos obtenidos y uso de las ecuaciones de transporte para los boulders identificados en los tramos costeros			63
3.1	Datos obtenidos	63	
3.2	Huracanolitos movidos por Matthew.....	67	
3.2.1	Resultados	74	
3.3	Análisis del uso de las ecuaciones propuestas por Nott y Engel-May	75	
3.4	Análisis de los boulders antiguos	77	
3.4.1	Análisis del megabloque #8.....	80	
Conclusiones.....			82
Recomendaciones.....			83
Referencias bibliográficas			84

Listado de Figuras

<i>Figura 1: Bloque arrancado (izquierda) de la terraza marina (altura mayor de 12 m). Movido una distancia de ~ 40 m, asociado al huracán Iván en 2004 (derecha). Fuente: Elaboración propia.</i>	21
<i>Figura 2: Huracanolitos y bloques en las costas de Cuba. 1- Huracanolitos sobre la costa a una altura de 2 metros y hasta 50 metros tierra adentro en Santiago de Cuba. 2- Huracanolitos en la costa sur de Guanahacabibes a 2 metros de altura y a más de 50 metros tierra adentro. 3- Huracanolito arrojado sobre la pista del aeropuerto de Baracoa. 4- Fragmentos arrancados por las olas del malecón habanero (huracanolitos antrópicos). 5- Esquema del proceso de desprendimiento de un bloque desde los frentes de terraza. 6- Bloques desplomados desde los frentes de terraza elevada en Guanahacabibes. Fuente: (Iturralde-Vinent, 2017)</i>	22
<i>Figura 3: Distribución espacial de las deposiciones de boulders en Cuba. Fuente: (Blanco-Quintero et al., 2010). Fueron agregadas las deposiciones de boulders encontradas en Guantánamo (Elaboración propia)</i>	22
<i>Figura 4. Flechas negras gruesas (sentido del movimiento de las placas); círculos negros (epicentros); líneas negras (sistemas de fallas principales: CF=Camú, CNF=Cauto-Nipe, HG=Honduras-Guatemala, NCF=Nortecubana, NHF=Norte de la Española, OF=Oriente, SF=Samaná; SEF=Septentrional, SWF=Swan, WPGEF=Walton-Platain Garden-Enriquillo); series de puntos negros (localización de las estructuras): BR=Elevado de Beata, HE=Escarpe de Hess; Pasajes: MP=Mona, WP=de los Vientos; Microplacas: GM=Gonave, HPRM=La Española-Puerto Rico; Fosas: MT=Mueertos, NT=Navassa, OT=Oriente, PRT=Puerto Rico; Otras estructuras: CB=Cuenca de Colombia, GR=Elevado de Gonave, GRS=Gonave). Fuente: (Cotilla, 2011)</i>	27
<i>Figura 5: Fuertes terremotos en el nordeste del Caribe (Circulo negro- epicentro; 1766 (7,5) - año, magnitud). Fuente: (Cotilla, 2011)</i>	27
<i>Figura 6: Ubicación espacial de los tsunamis ocurridos a escala global. Fuente: UNESCO (2014)</i>	30
<i>Figura 7: Trayectoria del huracán David a su paso por el territorio cubano (1979). Fuente: Software Eye of the Storm</i>	32
<i>Figura 8: Mapa de la costa sur de la provincia de Guantánamo, Cuba. Fuente: INSMET (2016)</i>	35

<i>Figura 9: Mapa tectónico del Caribe.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 10: Mapa de las regiones cársicas del Oriente de Cuba. Fuente: (Acevedo, 1967). Edición (Elaboración propia).</i>	<i>37</i>
<i>Figura 11: Trayectoria del huracán Matthew durante su paso por Cuba en octubre de 2016: entrada por Punta Caleta el día 4 y salida por Bahía de Mata el día 5. □ Zona de ubicación de huracanolitos de mayores dimensiones. Fuente: (Stewart, 2017).</i>	<i>41</i>
<i>Figura 12: Salida del Modelo Sistema de Predicción Numérica Océano-Atmósfera (izquierda), y datos de las estaciones de Guantánamo (derecha). Fuente: INSMET (Instituto de Meteorología).....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 13: Mapa que muestra los distintos tramos en los que fue dividida la costa sur de Guantánamo para su estudio. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 14: Tramos costeros en los que fue dividida la costa de Baitiquirí; 1: Primer tramo, 2: Segundo tramo, 3: Tercer tramo. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 15: División del cuarto tramo en tres sub-tramos. Identificación de los boulders tomados como muestra. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 16: Fuerzas que actúan en un bloque de unión conjunta, como se describe en la ecuación 38. Fuente: (Engel and May, 2012). Edición (Elaboración propia).</i>	<i>58</i>
<i>Figura 17: Relación entre la masa de los boulders y la posible distancia recorrida desde la línea de costa. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 18: Megaboulder número 8. Antiguo bloque depositado en la costa suroriental de Cuba con un peso de 104.6 toneladas. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 19: Bloque número 5, sacado por Matthew de la terraza inferior y transportado a una corta distancia tierra adentro. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 20: Huracanolito #1, sacado por el huracán Matthew de la terraza superior. Fuente: Proyecto de Paleotempestología en Cuba.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 21: Huracanolito #4, volteado por el huracán Matthew. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 22: La flecha indica el lugar de donde Matthew excavo un boulder. En un segundo momento es fragmentado en dos: el rectángulo indica la posición del huracanolito #6 y el hexágono marca el lugar hasta donde fue transportado el Huracanolito #7. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>70</i>

<i>Figura 23: Huracanolito #11, el volcado por el huracán Matthew. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 24: Huracanolito #12, el cual fue volteado por el oleaje asociado al huracán Matthew. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 25: Huracanolito #18, excavado de la terraza superior por el huracán Matthew. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 26: Comparación entre las alturas de ola obtenidas según las ecuaciones de Jonathan Nott [H_t] y Nott [H_s] y las obtenidas empleando las ecuaciones y el método propuesto (VDGPS) propuesto por Engel-May [Engel-May (H_t) y Engel-May (H_s)]. H_{t1} y H_{s1} representa la segunda fase en el proceso de transporte del boulder #7 según las ecuaciones propuestas por Nott. H_{t2} y H_{s2} son las alturas de ola en la segunda fase del transporte del boulder #7 empleando las ecuaciones propuestas por Engel-May. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 27: Comparación ilustrativa entre el huracanolito #5 (Imagen de arriba) y el Megaboulder #8 (imagen de abajo). Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>81</i>

Listado de tablas

<i>Tabla 1: Tsunamis en Cuba según las investigaciones de (Lander et al., 2002, Rubio, 1982). Fuente: (Cotilla, 2011).</i>	28
<i>Tabla 2: Descripción de los terremotos con tsunamis en Cuba. Fuente: (Cotilla, 2011).</i>	29
<i>Tabla 3: Huracanes con una categoría ≥ 3 que han afectado a Cuba. Fuente: SOMETCUBA. Los datos referentes a impactos socioeconómicos son del artículo: (Pielke et al., 2003). La información sobre la presencia o no de boulders: elaboración propia.</i>	33
<i>Tabla 4: En ella se recoge la posición geográfica de los boulders (Latitud, Longitud); D: la posible distancia a la línea de costa; A, B y C: ejes del boulder; M: masa del boulder.</i>	64
<i>Tabla 5: Relación de los boulders movidos por Matthew; Θ: ángulo de pre-transporte; A, B y C: ejes de un boulder.</i>	68
<i>Tabla 6: Escenarios en los cuales los boulders fueron transportados, tanto para los definidos por Nott como para los establecidos por Engel-May. Fuente: Elaboración propia.</i>	72
<i>Tabla 7: Relación de cada boulder con el volumen calculado empleando dos métodos: Nott (V_{abc}) y Engel-May (V_{DGPS}). Fuente: Elaboración propia.</i>	73
<i>Tabla 8: Altura mínima de las olas que pudieron transportar los huracanolitos asociados al huracán Matthew, utilizando las ecuaciones propuestas por Jonathan Nott. Fuente: Elaboración propia.</i>	74
<i>Tabla 9: Altura mínima de las olas que pudieron transportar los huracanolitos asociados al huracán Matthew, utilizando las ecuaciones propuestas por Engel-May, además de emplear los dos resultados del cálculo del volumen. Donde H_{T1} y H_{S1} son las alturas de ola obtenidas para tsunami y huracán respectivamente, aplicando V_{abc}; mientras que H_{T2} y H_{S2} son las alturas de ola obtenidas para tsunami y huracán respectivamente, aplicando V_{DGPS}. Fuente: Elaboración propia.</i>	75
<i>Tabla 10: Relación de los boulders identificados como antiguos. A, B y C: ejes del boulder; V_{DGPS}: volumen del boulder y M: masa del boulder. Fuente: Elaboración propia.</i>	78
<i>Tabla 11: Altura mínima necesaria de una ola, generada por el oleaje de una tormenta, capaz de realizar el transporte de un boulder.</i>	78

Tabla 12: Altura mínima necesaria de una ola, generada por el oleaje de una tormenta, capaz de realizar el transporte de un boulder en el peor de los escenarios ($\Theta = 5^\circ$). Fuente: Elaboración propia. 79

Introducción

Estudiar las consecuencias de eventos de alta energía poco recurrentes, contribuyen a comprender mejor las manifestaciones naturales que afectan al medio ambiente, al mismo tiempo, a mejorar la capacidad de respuestas ante sus impactos, disminuyendo los niveles de vulnerabilidad a los que estamos expuestos. No obstante, referido a los eventos de oleajes extremos, es importante insistir que se está incrementando el número de huracanes intensos en las diferentes cuencas oceánicas. De manera general, se están generando cambios en cuanto a frecuencia e intensidad de estos fenómenos meteorológicos (Klotzbach and Gray, 2006)

El estudio de los *boulders* movidos por huracanes en el presente, constituye una excelente vía para utilizar como análogos para conocer la magnitud de los huracanes en el pasado. Utilizando otros archivos geológicos (análisis de muestras sedimentológicas depositadas en lagunas costeras), se han identificado en Cuba nuevos registros de paleohuracanes (Peros et al., 2015) . El complemento de ambas técnicas proxies es básico para mejorar los resultados de este tipo de investigación.

Numerosos estudios se han realizado a diferentes escalas espaciales, con la finalidad de relacionar los bloques (*boulders*) depositados en zonas costeras con los eventos de oleaje de gran energía. La mayoría de estas investigaciones han estado centradas en los nexos de estas deposiciones con los tsunamis (Scheffers, 2002, Scheffers and Kelletat, 2003, Goto et al., 2007, Goto et al., 2010, Engel et al., 2010, Engel and May, 2012); aunque también se han relacionado con los huracanes (Goto et al., 2011, May et al., 2015, Engel et al., 2016).

El primer trabajo realizado en Cuba sobre esta temática fue desarrollado por (Jiménez, 1988) quien utiliza el término "*huracanolitos*", el cual es aplicado solamente en Cuba. Por *boulders*, en el presente trabajo, se entiende a los megabloques y bloques grandes (>1 m) dejados en la zona costera como resultado de las tormentas tropicales. En Cuba existe

mayor incertidumbre sobre la causa del movimiento de estos bloques y megabloques en el litoral costero (Matos, 2017), debido a las dimensiones significativas en algunos casos.

Por huracanolitos, en el presente trabajo, se entiende a los megabloques y bloques grandes (>1 m) dejados en la zona costera como resultado de las tormentas tropicales (Jiménez, 1988) . De forma general, en el trabajo serán utilizados indistintamente los términos boulders, bloques o huracanolitos, agregando el prefijo mega- cuando las dimensiones de estos superan las 70 t de masa.

El entorno o ambiente costero, previo al transporte de un bloque, junto con su forma, tamaño y densidad, determinan la altura de la ola requerida para su transporte. Diferentes fuerzas actúan sobre los boulders sub-aéreas con relación a los bloques sumergidos, cuando son golpeados por una ola. Los boulders derivados de bloques unidos a la terraza marina o plataforma costera (emergida), predominantemente experimentan una fuerza de elevación y requieren, además, de una ola de mayor altura para ser transportados, con relación a los boulders ubicados en otros entornos.

En estos escenarios los bloques son transportados, inicialmente a través de un pivote, sobre un lecho de rocas similares y, si son transportados tierra adentro, generalmente se mueven hacia arriba. Otro tipo de transporte de bloques costeros se presenta en forma de clúster o aglomerados de boulders, ya sea como un solo clúster o como varios clústeres paralelos a la costa, depositados en la plataforma costera.

La determinación del tipo y tamaño de la ola responsable de la deposición con estas características requiere una serie separada de ecuaciones hidrodinámicas para aquellos que se mueven a través de las playas. Más bien, han sido volcados y transportados generalmente a través de superficies costeras como plataformas rocosas.

Los campos y crestas de *boulders* habitualmente se caracterizan por una firma sedimentológica de cruces y alineación paralela a sub-paralela de la mayoría de los ejes *a* de los *boulders* con la orilla o perpendicular a la dirección de transporte. Es raro que tal firma ocurra en depósitos que hayan resultado de caídas de rocas y colapso del clima marino. El tamaño de los bloques en estos depósitos es generalmente mucho más grande (1 a 6 m de longitud en el eje *a* y un peso de hasta 200 toneladas) que los que forman playas, lo que sugiere que se depositaron por eventos de mayor magnitud (Nott, 2003).

Investigaciones hechas alrededor del Océano Pacífico han tenido como conclusión que son los tsunamis los mayormente responsables de la deposición de grandes *boulders* a pesar de que esta región es fuertemente azotada por los tifones. En este caso, la hipótesis es muy bien aceptada, pues la región se encuentra en la cuenca del Pacífico donde dos grandes placas limitan por subducción y tienen lugar hipocentros de gran magnitud.

Por otra parte, algunos estudios hechos en el Caribe han arrojado que los megabloques, al necesitar eventos de mayor magnitud para su transporte, han sido depositados por tsunami; a pesar de que esta región se encuentra sobre placas que limitan por fricción y que no son comunes los tsunamis, aun generándose variados epicentros. Algo muy distinto sucede con los ciclones tropicales, que afectan continuamente la región durante la temporada ciclónica, que se extiende desde el mes de junio hasta noviembre, generándose ciclones extemporáneos en algunos casos.

En el caso de Cuba persiste el razonamiento de que los depósitos de *boulders* de mayor magnitud son obra de los tsunamis, aun cuando el registro de este tipo de eventos no está claramente definido; sin embargo, se conocen los continuos azotes de huracanes al territorio nacional y el impacto de estos en las zonas costeras, corroborándose la presencia de estas deposiciones en determinados tramos costeros, asociados a huracanes conocidos.

Por solo citar un ejemplo, el huracán de Santa Cruz del Sur de 1932, causó un número de muertes superior a 3 000 personas y pérdidas económicas significativas, considerada además como la mayor catástrofe ocurrida en nuestro país causada por un fenómeno natural; es conocida la presencia de bloques en áreas por donde experimentó su trayectoria. Se tienen como referentes huracanes recientes como Mathew en 2016 e Irma en 2017, los cuales generaron olas con suficiente altura y fuerza, capaces de realizar grandes deposiciones de sedimentos, así como la acumulación de varios boulders con tamaño considerable, ya fuesen antrópicos o desprendidos de la plataforma marina.

Se conoce relativamente poco sobre la afectación de los ciclones en el pasado, así como del clima en general de aquellos tiempos. En Cuba existen varios resultados que incluyen sólidas informaciones cronológicas, de las que necesariamente se debe partir, entre las que resaltan: los huracanes que azotaron a Cuba desde el descubrimiento hasta 1870 del ingeniero (Fernández de Castro, 1871) basada fundamentalmente en la famosa obra de (Poey, 1862); así como las cronologías de (Millás, 1923) y de (Lanza, 1934). Gran importancia reviste las últimas obras publicadas acerca de este tema, tales como: (Limia et al., 2000); (Pérez et al., 2001); (Limia et al., 2003).

La identificación de estos depósitos de megabloques, y cuando sea posible la determinación de la edad de deposición, puede ayudar sustancialmente a dilucidar la magnitud y la frecuencia de las olas responsables y, por lo tanto, ayudar a derivar las evaluaciones de riesgo de los peligros costeros. Además, estos depósitos pueden usarse, si los boulders son lo suficientemente grandes, para determinar qué tipo de ola fue responsable, a saber, tsunami o tormenta.

En dos ocasiones se han elaborado escritos referentes a los huracanolitos ubicados en el sur de Cuba, haciendo énfasis a los existentes en Jardines de la Reina, en ambos casos como evidencias de las afectaciones de huracanes en las costas cubanas durante el pasado, extendiendo el análisis hasta la escala milenaria, pero en estas discusiones científicas

siempre han prevalecido tres interrogantes de interés: (1) en qué periodo fueron depositados estos bloques de tales dimensiones; (2) si los tsunamis generan olas de mayor energía, por qué no asociar los de mayores dimensiones a este tipo de fenómeno; (3) estrechamente relacionada con la segunda pregunta, puede un huracán mover bloques de las magnitudes observadas en Cuba.

Este trabajo, aunque de manera muy sintética, pretende brindar respuestas hoy más claras acerca de la tercera y última interrogante, en virtud de una situación ocurrida también en el sur de Cuba, exactamente en las costas guantanameras. Aquí se presenta un rango de ecuaciones y su derivación que se puede aplicar al entorno de pre-transporte y transporte respectivo de una roca. Este enfoque es necesario cuando se intenta reconstruir la frecuencia y la magnitud de los riesgos de las olas costeras pasadas y para diferenciar entre el tsunami y los sedimentos depositados por un huracán.

Estructura:

El trabajo consta de tres Capítulos cada uno debidamente epigrafiado.

PROBLEMA CIENTÍFICO

Se desconocen aún las causas de la mayoría de las grandes deposiciones de boulders en la costa sur de Guantánamo.

HIPÓTESIS

Es posible demostrar que la génesis de los megabloques encontrados en el sur de Guantánamo es consecuencia de fenómenos de oleaje extremo provocados por los huracanes.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la génesis de las deposiciones de boulders en la costa de Baitiquirí, Guantánamo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar los huracanolitos movidos por el huracán Matthew a través de las ecuaciones de transporte de sedimentos.
2. Examinar la eficacia del uso de las ecuaciones de transporte de sedimentos.
3. Identificar la génesis de los bloques antiguos a través de las ecuaciones de transporte de sedimentos, utilizando como análogo lo bloques movidos por el huracán Matthew.

Capítulo I: Registro de eventos de oleaje extremo en Guantánamo

En este capítulo se abordan los elementos fundamentales que se consideran en la formación de un huracán y un tsunami, se presentan los registros históricos de los eventos naturales que se han sucedido en la región oriental de Cuba, las principales nociones para definir a los huracanolitos y boulders; también se mencionan las características del área de estudio: el tramo costero de San Antonio del Sur en Guantánamo, Cuba.

1.1 Boulders o huracanolitos?

Enormes bloques de rocas coralinas y desechos sólidos, de más de 70 toneladas, expulsados al mar o acumulados en las costas pueden ser arrastrados decenas de metros tierra adentro por la fuerza del oleaje. Estos enormes bloques son comúnmente denominados por la comunidad científica por el término en inglés de boulder, que en su traducción al español significa bloque movido. Los mismos son asociados a eventos de oleaje extremo, pero la mayoría de las deposiciones de estos son relacionadas con los sedimentos generados por el azote de un tsunami a una región costera.

Estos se pueden encontrar en casi todos los tramos costeros con substrato rocoso de Cuba, representados como bloques de roca caliza, de variadas dimensiones y formas muy irregulares, localizados tanto sobre la superficie de la primera terraza (hasta 2 metros de altura), como sobre la superficie de la segunda terraza (hasta unos cinco a ocho metros de altura); a una distancia de la línea de costa que puede alcanzar los 30 y hasta los 80 metros excepcionalmente (Iturralde-Vinent, 2017). En algunos tramos costeros, con presencia de estos tipos de deposiciones, la terraza marina supera la altura mencionada (Figura 1).

El Dr. Antonio Núñez- Jiménez en 1959 acuñó el término de huracanolitos a este tipo de bloques; debido a la génesis de estos, puesto que estas rocas son generalmente proyectadas sobre las costas debido a huracanes, vientos del norte o del sur.

Capítulo I: Registro de eventos de oleaje extremo en Guantánamo

Los huracanólitos son bloques rocosos que pueden ser fragmentos de arrecifes coralinos arrancados de su substrato, o pedazos extraídos de las rocas calizas que forman las terrazas marinas (Figura 2). Asimismo, en las costas donde se han construido estructuras sólidas como malecones, muros de contención, carreteras, puentes, casas, etc., el oleaje puede fragmentar y arrancar pedazos de estas estructuras que se conviertan en “huracanólitos antrópicos” (Iturralde-Vinent, 2017).

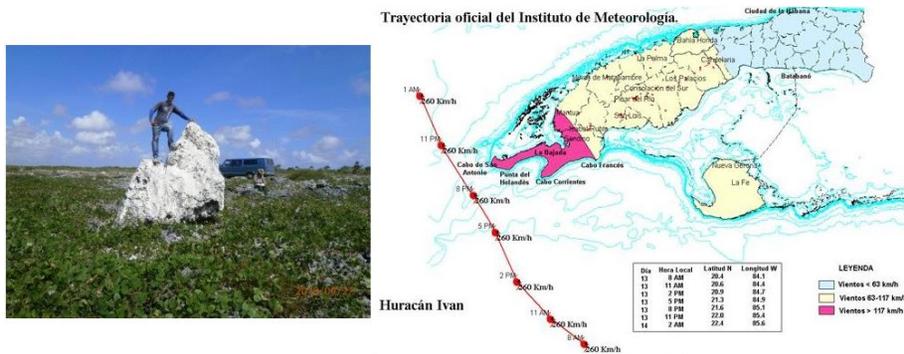


Figura 1: Bloque arrancado (izquierda) de la terraza marina (altura mayor de 12 m). Movido una distancia de ~ 40 m, asociado al huracán Iván en 2004 (derecha). **Fuente:** Elaboración propia.

Otro aspecto que significar de los huracanólitos en Cuba lo constituye la distribución geográfica y las dimensiones de estos (Figura 3), según los sitios de deposiciones. (Blanco-Quintero et al., 2010) señala: (1) existe un mayor número de bloques en la costa sur de Cuba, indicando la presencia de estos en costa norte solo en el tramo costero de Habana-Matanzas; (2) coincide que los de mayores dimensiones son los de la costa sur, pero sin mostrar representación espacial del fenómeno en las costas guantanameras.

Sin embargo, en nuevas investigaciones a través del proyecto “Paleotempestología en Cuba...”, se han identificado nuevos sitios con presencia de estas deposiciones, incluyendo uno ubicado en Bahía de Boma (costa norte de Guantánamo), como uno de los de mayores dimensiones de las costas cubanas (el eje mayor es de 10.9 m, extraído de una profundidad de más de 5 metros, asociado al impacto del huracán Matthew).

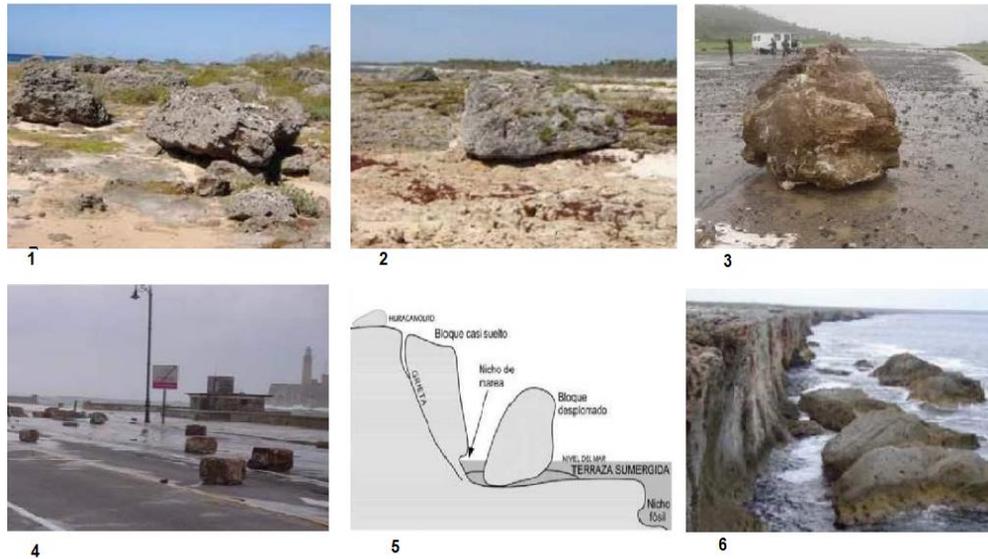


Figura 2: Huracanolitos y bloques en las costas de Cuba. **1-** Huracanolitos sobre la costa a una altura de 2 metros y hasta 50 metros tierra adentro en Santiago de Cuba. **2-** Huracanolitos en la costa sur de Guanahacabibes a 2 metros de altura y a más de 50 metros tierra adentro. **3-** Huracanolito arrojado sobre la pista del aeropuerto de Baracoa. **4-** Fragmentos arrancados por las olas del malecón habanero (huracanolitos antrópicos). **5-** Esquema del proceso de desprendimiento de un bloque desde los frentes de terraza. **6-** Bloques desplomados desde los frentes de terraza elevada en Guanahacabibes. **Fuente:** (Iturralde-Vinent, 2017)

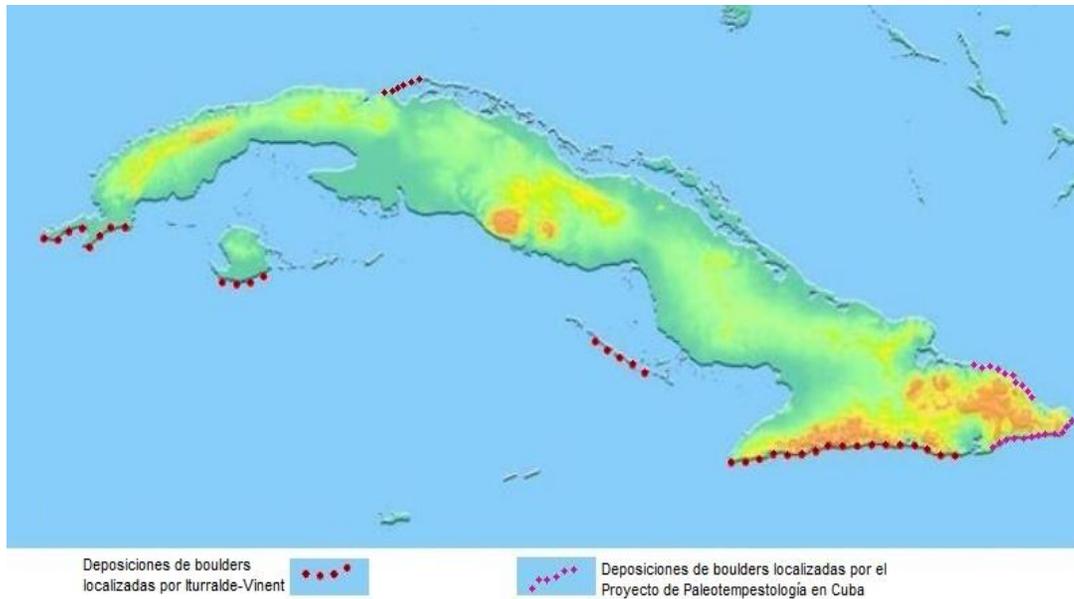


Figura 3: Distribución espacial de las deposiciones de boulders en Cuba. **Fuente:** (Blanco-Quintero et al., 2010). Fueron agregadas las deposiciones de boulders encontradas en Guantánamo (Elaboración propia)

Las dimensiones de los huracanolitos permiten estimar la altura mínima que se necesitó para moverlo, pues por regla debe haber sido más alta que el diámetro medio del bloque.

1.2 Formación de un tsunami

Tsunami (del japonés: tsu que significa puerto o bahía y nami que significa ola) o maremoto (del latín: mare que significa mar y motus que significa movimiento) pueden ser producidos por terremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra, meteoritos o explosiones submarinas.

Son fenómenos naturales derivados, principalmente, de una fuerte actividad sísmica. Ellos se vinculan con las fallas activas de tipo normal, inversa, vertical, y de subducción que provocan la deformación y el levantamiento diferencial de grandes bloques de la corteza. Involucran grupos de olas de gran energía y de tamaño variable que se producen cuando el fondo marino es movido abruptamente en sentido vertical desplazando una gran masa de agua fuera de su equilibrio normal; esta masa al tratar de recuperar su equilibrio genera olas.

La energía de un tsunami depende de su altura, de su longitud de onda y de la longitud del frente de ondas. La forma en que suministra esa energía a una zona determinada depende de la cantidad de picos que lleve el tren de ondas. Por lo general la altura de un tsunami disminuye al viajar grandes distancias, pero mantiene una velocidad determinada por la profundidad sobre la cual él se desplace.

En el caso de los tsunamis tectónicos, la altura en aguas profundas es habitualmente de 1m, pero la longitud de onda puede alcanzar algunos cientos de kilómetros. Esto permite que aun cuando su altura sea tan baja en el océano abierto, esta crezca bruscamente al disminuir la profundidad. Al disminuir la velocidad del frente del tsunami, este por necesidad crece en altura debido a la transformación de energía cinética en energía potencial, con lo cual puede arrasarse fácilmente a su paso tierra adentro.

No todos los terremotos bajo la superficie acuática generan tsunamis, solo aquellos de magnitud considerable con hipocentro en el punto de profundidad adecuado. Por ejemplo, un tsunami producido en un fondo oceánico con 5 km de profundidad puede provocar un desplazamiento vertical de unos centímetros; sin embargo, cuando es producido a una gran profundidad la velocidad y la energía transmitida serán enormes. A pesar de ello, la ola pasa de ser percibida pues queda camuflada entre las olas superficiales.

Los tsunamis se clasifican de forma similar que los terremotos, ya por intensidad o por magnitud. La región con mayor cantidad de tsunamis es la cuenca del Pacífico pues allí se encuentra la zona más activa del planeta: el cinturón de fuego. No está claramente definida la magnitud necesaria que debe tener un sismo para provocar un maremoto. Los elementos que pueden determinar la ocurrencia o no de un tsunami son:

- Magnitud del sismo originador.
- Profundidad del hipocentro.
- Morfología de las placas tectónicas involucradas.

Una forma de clasificar a los tsunamis es atendiendo a la distancia de la fuente. En este sentido hay tres tipos, todos ellos se manifiestan en el Caribe:

- 1) locales: a una distancia menor de 100 km.
- 2) regionales: a una distancia de 100-750 km.
- 3) lejanos o teletsunamis: a una distancia mayor a 750 km.

1.3 Formación de un huracán.

A nivel mundial, los picos de actividad ciclónica tienen lugar hacia finales del verano cuando la temperatura del agua es mayor. A escala global, mayo es el mes menos activo y el más activo es septiembre. En la región del atlántico la formación de ciclones varía ampliamente de un año a otro con una media de 10 por año. La mayoría de las tormentas atlánticas más intensas son huracanes que se forman en la costa occidental de África, cerca de las islas de Cabo Verde.

Generalmente, son los siguientes factores los que hacen posible la formación de los huracanes:

- Temperatura del agua: el océano debe tener una temperatura mínima de 26 °C hasta una profundidad de al menos 50 m involucrando en el proceso dos de las tres capas del océano: la superficie y la termoclina. (Mitrani et al., 2003), han encontrado una buena relación entre estructura térmica vertical de aguas cubanas y el desarrollo de los Ciclones Tropicales. Las aguas a esta temperatura provocan que la atmósfera sea lo suficientemente inestable como para sostener convección y procesos de tormentas eléctricas.
- Enfriamiento rápido con la altura: ello permite la expulsión de calor latente, fuente de energía de un ciclón tropical.
- Alta humedad, especialmente en la parte baja y media de la troposfera. Cuando hay mucha humedad en la atmósfera, las condiciones son más favorables para que se desarrollen perturbaciones.
- Baja cizalladura vertical. Cuando la cizalladura vertical es alta, la convección del ciclón o perturbación se rompe, deshaciendo el sistema.
- Distancia al Ecuador. Permite que la fuerza de Coriolis desvíe los vientos hacia el centro de bajas presiones, causando una circulación. La distancia aproximada es 500 km o 10 grados de latitud.
- Un sistema de perturbación atmosférica preexistente. El sistema debe tener algún tipo de circulación como centro de bajas presiones.

Estructuralmente un ciclón tropical es un gran sistema de nubes, vientos y tormentas en rotación. Su fuente primaria de energía es la expulsión del calor de condensación del vapor de agua que se condensa a grandes altitudes, siendo el calor aportado por el sol el que inicia el proceso de evaporación. Para poder seguir alimentándose del calor latente, el ciclón debe permanecer sobre aguas cálidas que proveen la humedad atmosférica necesaria.

La evaporación se acelera por los vientos fuertes y se reduce debido a la presión atmosférica en la tormenta, resultando un centro de alimentación positivo. Como consecuencia, cuando un ciclón pasa sobre tierra su fuerza disminuye rápidamente, impactando severamente las tierras costeras y los ecosistemas, así como los sedimentos en la costa. Estos impactos físicos pueden dejar un registro geológico que puede descifrarse por medio de las técnicas proxys, a través de las dataciones de las deposiciones.

1.4 Registro histórico de tsunamis y huracanes en la Región Oriental de Cuba.

1.4.1 Registro de tsunamis

De acuerdo con los registros históricos y debido a la estructura tectónica de la isla, en el Occidente-Centro del país es más frecuente el paso de un huracán que la ocurrencia de un tsunami; mientras que, en la Región Oriental, la probabilidad de recalada de un ciclón es menor, siendo más común los epicentros y el riesgo por la formación de un tsunami o fuerte oleaje debido a la proximidad de esta región a la zona de contacto de las placas (Figura 4).

Cuba ha sufrido el impacto de varios eventos sísmicos los cuales no han sido capaces de provocar tsunami debido al tipo de fallas sismoactivas; sin embargo, según (Cotilla, 2011), la bahía de Santiago de Cuba ha sido afectada al menos en una ocasión por un tsunami provocado por un sismo, uno generado en Portugal el 1/11/1755. (Cotilla, 2011) realiza una crítica científica a todos los resultados logrados antes de esta investigación.

Previo a la investigación de (Cotilla, 2011) y de acuerdo con las investigaciones hechas por (Rubio, 1982) y (Lander et al., 2002), se determinaron 8 tsunamis como se muestra en la Tabla 1. Según las investigaciones en los fondos documentales del Archivo de Indias en Sevilla, dos de los tsunamis que están asociados con los dos sismos más fuertes ocurridos en el entorno cercano a Santiago de Cuba (11/6/1766 y 20/8/1852) representados en la Figura 5, no contienen mención alguna a movimientos de masas de agua en la zona costera.

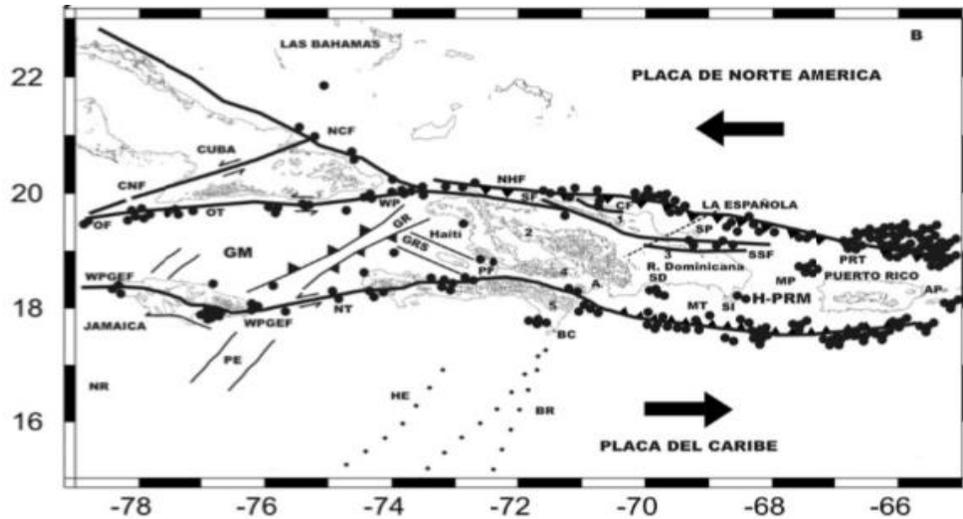


Figura 4. Flechas negras gruesas (sentido del movimiento de las placas); círculos negros (epicentros); líneas negras (sistemas de fallas principales: CF=Camú, CNF=Cauto-Nipe, HG=Honduras-Guatemala, NCF=Nortecubana, NHF=Norte de la Española, OF=Oriente, SF=Samaná; SEF=Septentrional, SWF=Swan, WPGEF=Walton-Platain Garden-Enriquillo); series de puntos negros (localización de las estructuras): BR=Elevado de Beata, HE=Escarpe de Hess; Pasajes: MP=Mona, WP=de los Vientos; Microplacas: GM=Gonave, HPRM=La Española-Puerto Rico; Fosas: MT=Mueertos, NT=Navassa, OT=Oriente, PRT=Puerto Rico; Otras estructuras: CB=Cuenca de Colombia, GR=Elevado de Gonave, GRS=Gonave). **Fuente:** (Cotilla, 2011)

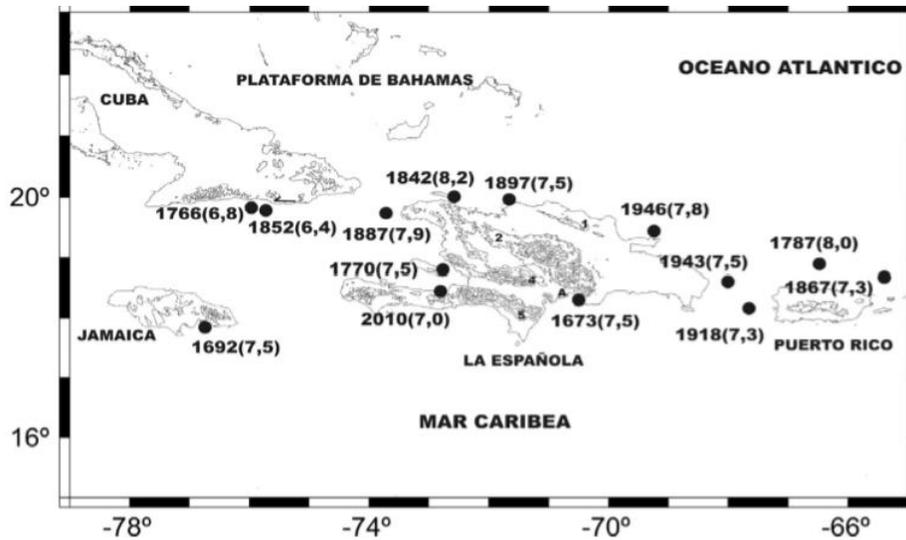


Figura 5: Fuertes terremotos en el nordeste del Caribe (Circulo negro- epicentro; 1766 (7,5) - año, magnitud). **Fuente:** (Cotilla, 2011)

Así mismo se tiene el tsunami asociado con el epicentro ocurrido el 3/2/1932 el cual no concuerda con las investigaciones hechas por Montelieu en 1933, quien investigó desde el primer momento sobre el terremoto y descartó conclusivamente el tsunami (Cotilla, 2011).

Tabla 1: Tsunamis en Cuba según las investigaciones de (Lander et al., 2002, Rubio, 1982). **Fuente:** (Cotilla, 2011)

No.	Fecha	Lugar
1	1 de noviembre de 1755	Santiago de Cuba
2	12 de junio de 1766	Santiago de Cuba
3	18 de diciembre de 1775	Santiago de Cuba
4	17 de julio de 1852	Santiago de Cuba
5	1 de octubre de 1931	Playa Panchita-Rancho Veloz
6	3 de febrero de 1932	Santiago de Cuba
7	4 de agosto de 1939	Cayo Francés
8	8 de agosto de 1946	Playas de Cuba Occidental

Con respecto al evento de 1946 que tuvo su epicentro en República Dominicana (Figura 5) se registraron afectaciones en las playas de Cuba Occidental las cuales se sitúan a unos 300 km al oeste de la región centro-norte que se encuentra en la parte suroeste del cambio de orientación de la estructura del archipiélago cubano y en la cual no se tienen registradas afectaciones por dicho tsunami. Este hecho se encuentra si sentido físicamente.

Se ha comprobado que los tsunamis locales ocurridos en Cuba, en particular los de la zona septentrional, no han influido en territorios aledaños ya que han sido de baja magnitud y muy localizados (Cotilla, 2011).

Existe una contradicción entre los tsunamis de 1867 y de 1918 que tuvieron como fuentes terremotos en Islas Vírgenes y Puerto Rico respectivamente y que se encuentran representados en la Figura 5 y la Tabla 2. El primero se hizo sentir en toda la región

Capítulo I: Registro de eventos de oleaje extremo en Guantánamo

oriental cubana, mientras que el segundo, aun estando más cerca, no produjo afectaciones en territorio cubano, a pesar de tener la misma magnitud. La descripción de la Tabla 2 recoge otras fuentes, donde originalmente fue tratado el fenómeno.

Tabla 2: Descripción de los terremotos con tsunamis en Cuba. **Fuente:** (Cotilla, 2011)

No.	Fecha	Descripción
1	1 de noviembre, 1755	Tembolor e inundaciones del mar (Santiago de Cuba) muy desastroso para Lisboa.
	1755	Terremoto y maremoto que inundó la ciudad (Santiago de Cuba). (Ferrer, 1876)
	1 de noviembre, 1755	Santiago de Cuba. Una ola produce daños a edificaciones de la bahía. (Rubio, 1982)
2	1 de junio, 1766	En el Archivo de Indias (documento 5-Cuba 1051) aparece: "...el movimiento de las ondas marinas no era mayores que 20 varas como es lo habitual aquí (Bahía de Santiago de Cuba) ..."
3	11 de febrero, 1775	No hay mención a tsunami.
4	17 de agosto, 1852	Santiago de Cuba. La bahía, afectada por fuerte oleaje que daña construcciones portuarias y embarcaciones surtas en el puerto. Debió ser producto de un sismo que afectó al buque de guerra de los Estados Unidos "Tropic" a 70 millas de Jamaica. (Rubio, 1982)
	20 de agosto, 1852	19.75 N 75.32 W, Ms=6.4, I(MSK)=8, h=30 km, no hubo tsunami en Santiago de Cuba.
5	18 de noviembre, 1867	Islas Vírgenes (St. Thomas) Olas sísmicas observadas en los puertos de la provincia de Oriente, Cuba. (Rubio, 1982)

Un hecho aún por explicar es el de las afectaciones por los tsunamis de Portugal (1755) y de Haití (1887) a la Bahía de Santiago de Cuba y que los mismos no afectaran la Bahía de Guantánamo, situada en la misma latitud y zona costera suroriental, con la misma orientación NE, con una entrada más favorable en cuanto a abertura al Mar Caribe, con un

fondo marino menos profundo y geográficamente más cercana a las fuentes tsunamogénicas.

El conocimiento por parte de la población sobre los tsunamis en el Caribe es con diferencia muy bajo en comparación con los ciclones y huracanes, debido a los límites por fricción que caracterizan a las placas Norteamericana y del Caribe, y que, a diferencia de otros límites de placas, no se liberan habitualmente grandes cantidades de energía de la corteza terrestre acumulada a consecuencia de actividades tectónicas que se originan en los bordes de dichas placas.

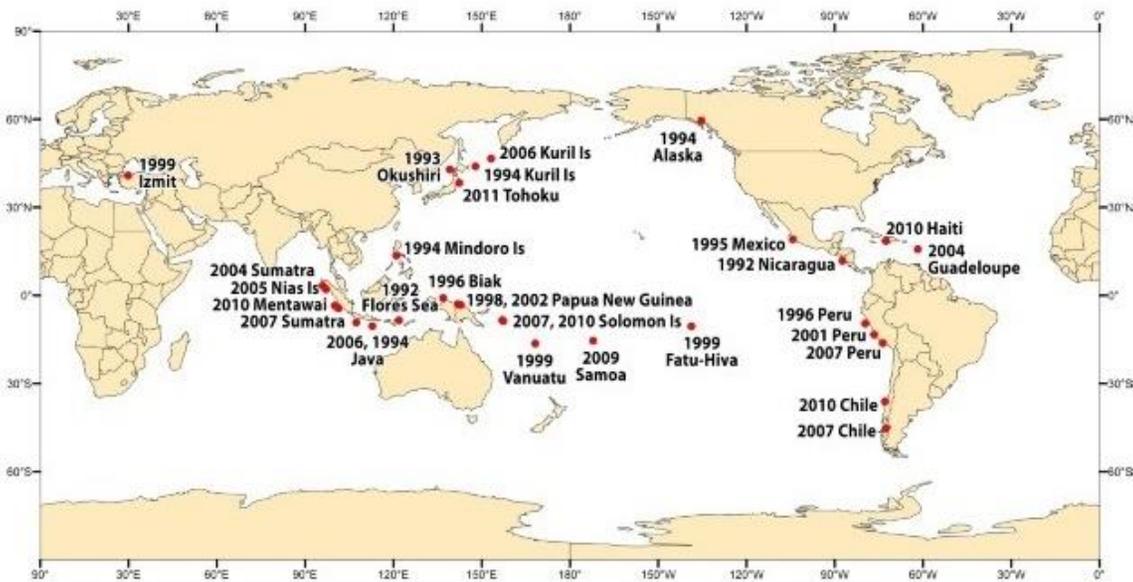


Figura 6: Ubicación espacial de los tsunamis ocurridos a escala global. Fuente: UNESCO (2014)

El Caribe, como bolsa marina en la zona tropical del atlántico es estacionalmente afectada por otros procesos meteorológicos activos como los frentes polares o “frentes fríos”, capaces de provocar penetraciones del mar en las costas bajas y marejadas muy importantes. Ello permite considerar, una vez constatados algunos errores en catálogos y

relaciones sobre tsunamis, sostener que los fenómenos meteorológicos mencionados pudieron ser confundidos como tsunamis (Cotilla, 2011).

Corroborando este resultado, según una actualización de la distribución espacial de tsunamis ocurridos a nivel global (UNESCO, 2014), manifiesta la no evidencia de este tipo de fenómeno en las costas cubanas (Figura 6), lo cual no significa que la probabilidad de ocurrencia sea nula. La importancia de esta línea de investigación radica en continuar buscando respuesta al comportamiento de los paleotsunamis en Cuba. Sin embargo, ocurre lo contrario con el comportamiento de los ciclones tropicales.

1.4.2 Registro de huracanes

Los ciclones y huracanes son eventos extremos de mayor frecuencia en el Caribe, dañinos fenómenos de desarrollo vertical, conocidos por todos los residentes en dicha región. Ellos son responsables de las muy elevadas pérdidas económicas, así como de las numerosas pérdidas humanas. Dichos organismos ocurren preferentemente en el intervalo temporal de septiembre - noviembre y provocan penetraciones del mar en las zonas costeras de los países que afectan.

Según varias fuentes (SOMETCUBA, 2004, Pielke et al., 2003) desde 1800, de los más de 110 huracanes que han azotado a Cuba en los últimos 219 años, solo 31 han pasado por Guantánamo (Tabla 3). Ello deja entrever que, en los últimos 56 años, toda una generación de la población guantanamera ha sentido el impacto de un huracán en ocho ocasiones, de los 27 que tocaron territorio nacional desde el paso por Cuba de la segunda mayor catástrofe natural: Flora en 1963 (Tabla 3).

De esos 27 huracanes que han pasado por Guantánamo solamente 4 (David, Ike, Matthew e Irma) han sido de categoría 4 y 5, potentes eventos capaces arrasar con todo a su paso. El huracán David (Figura 7) pudo ser responsable de algunas deposiciones encontradas en Bahía de Boma, en la costa norte de Guantánamo, aunque es necesaria la

modelación del proceso asociado al oleaje generado, por observarse una disminución de la intensidad por las cercanías de Baracoa.



Figura 7: Trayectoria del huracán David a su paso por el territorio cubano (1979). **Fuente:** Software Eye of the Storm

En la temporada ciclónica de 2016, el huracán Matthew experimenta una trayectoria por Guantánamo. Su fuerza provocó una gran deposición de sedimentos y el desprendimiento de grandes bloques de la terraza marina, evidencia de lo poderoso que puede llegar a ser un ciclón y su capacidad para trasladar o desprender pequeños y grandes boulders.

Las masas volumétricas de agua acompañadas de oleaje en Cuba pueden alcanzar hasta unos 7 metros de altura, y avanzan como una pared líquida, penetrando varios kilómetros tierra adentro, de acuerdo con la morfología costera. Estas masas de agua, cargadas de objetos sólidos (huracanolitos y otros elementos) tienen una enorme capacidad de carga y una fuerza destructiva descomunal, por eso pueden dejar “tierra arrasada” allí donde penetran (Iturralde-Vinent, 2017).

Capítulo I: Registro de eventos de oleaje extremo en Guantánamo

Tabla 3: Huracanes con una categoría ≥ 3 que han afectado a Cuba. **Fuente:** SOMETCUBA. Los datos referentes a impactos socioeconómicos son del artículo: (Pielke et al., 2003). La información sobre la presencia o no de boulders: elaboración propia.

No.	Nombre	Año	Día-Mes	Escala Saffir-Simpson	Provincias Afectadas	Muertes	Perdidas (Millones USD)	Presencia de boulders
1	La Tormenta de la Escarcha Salitrosa	1810	25-oct	3	PR, IJ			
2	Huracán de Trinidad	1812	14-oct	3	VC, SS			
3	Huracán de Cienfuegos y Trinidad	1825	30-sep	3	CF, VC, SS			
4	La Tormenta de San Francisco de Asís	1844	4-oct	4	PR, IJ, AT, MY, CH, MT, CF, VC			
5	La Tormenta de San Francisco de Borja	1846	10-oct	5	PR, IJ, AT, MY, CH, MT, CF			
6	El Huracán de San Marcos	1870	7-oct	3	IJ, AT, MY, CH, MT, CF			
7	El Huracán de Gran Cayman-La Habana	1876	17-oct	3	PR, IJ, AT, MY, CH, MT, CF			
8	El Huracán de Pinar del Río	1882	7-oct	4	PR, IJ			
9	Sin Nombre	1886	21-ago	3	VC, SS, CA, CM			
10	El Huracán de Faquineto	1888	3-sep	3	PR, IJ, AT, MY, CH, MT, CF, VC			
11	Sin Nombre	1906	16-oct	3	PR, IJ, AT, MY, CH, MT			
12	Sin Nombre	1909	10-oct	3	PR, IJ, AT, MY, CH	33	10	
13	El Huracán de los 5 Días	1910	14-oct	4	PR, IJ, AT, MY, CH, MT, CF	700	10	
14	El Huracán de 1915	1915	12-ago	3	PR, IJ, AT, MY, GR, SC			
15	El Huracán de Nueva Gerona	1917	25-sep	4	PR, IJ, AT, MY, MT, CF			
16	El Huracán de 1924	1924	19-oct	5	PR, IJ			
17	El Huracán de 1926	1926	19-oct	4	PR, IJ, AT, MY, CH, MT	600	100	
18	El Huracán de Santa Cruz del Sur	1932	9-nov	4	SS, CA, CM, LT	3050	40	Si
19	El Huracán de Sagua y Cárdenas	1933	31-ago	3	PR, AT, MY, CH, MT, VC, SS, CA	70	11	
20	El Huracán de Cienfuegos	1935	28-sep	3	LT, GR, HG, SC, GT	43	12	
21	El Huracán de 1944	1944	17-oct	4	PR, IJ, AT, MY, CH, MT, CF	318	100	
22	El Huracán de Matanzas	1948	20-sep	3	AT, MY, CH, MT	30	7	
23	Sin Nombre	1948	5-oct	3	PR, IJ, AT, MY, CH	13	6	
24	Fox	1952	24-oct	4	MT, CF, VC	40	10	
25	David	1979	3-sep	5	GT			
26	Michelle	2001	4-nov	4	MT, CF, VC, SS	5	1800	
27	Charley	2004	13-ago	3	PR, IJ, AT, MY, CH	4	1223	?
28	Ivan	2004	15-sep	5	PR	0	1200	Si
29	Dennis	2005	7-jul	4	AT, MY, CH, MT, CF, GR	16	1400	Si
30	Rita	2005	21-sep	4	MT			
31	Wilma	2005	19-oct	5	PR, IJ, AT, MY, CH			Si
32	Gustav	2008	30-ago	3	PR, IJ	0		
33	Ike	2008	7-sep	4	Todo el territorio nacional	0	9500	
34	Paloma	2008	7-nov	3	PR, IJ, AT, MY, CH, SS, CA, CM, LT			
35	Sandy	2012	25-oct	3	LT, GR, HG, SC, GT	11	2121	Si
36	Matthew	2016		5	GT	4	2580	Si
37	Irma	2017	8-sep	5	MY, CH, MT, CF, VC, SS, CA, CM, LT, GR, HG, GT			

Este tipo de sucesos, al paso de un huracán, es frecuente en tramos costeros de substrato rocoso, donde la presencia de huracanolitos es un excelente indicio de eventos de oleaje extremo. Según sea el tamaño del bloque, conforme a él será el peligro que representan, pues la fuerza del oleaje es proporcional a las dimensiones y peso de los huracanolitos. Su presencia junto a la fuerza del oleaje provoca que actúen como máquinas contra construcciones cercanas, tal es el caso de la incidencia de un bloque sobre una vivienda de Siboney, Santiago de Cuba, durante el paso por esta zona del huracán Sandy.

1.5 Área de estudio

1.5.1 San Antonio del Sur

La zona de Baitiquirí se encuentra en el municipio de San Antonio del Sur en la provincia de Guantánamo, Cuba. Limita al norte con Yateras, al sur con el Mar Caribe, al oeste con Caimanera y Manuel Tames y al este con Imías y Baracoa (Figura 8). El área de San Antonio del Sur, está situada en la zona suroriental de Cuba, a unos 55 km al este de la ciudad de Guantánamo, con coordenadas geográficas limítrofes de Latitud $19^{\circ}59'26.4''$ N, Longitud $74^{\circ}55'20.3''$ W y Latitud $20^{\circ}15'33.9''$ N, Longitud $74^{\circ}43'39.0''$ W. Esta región ha sido identificada como una provincia neotectónica activa del Este de Cuba (Nuñez, 2001)

La costa presenta la región semiárida más intensiva de Cuba (temperatura promedio anual de 28° C y precipitación anual de menos de 600 mm), mientras que, en el interior, alrededor de la ciudad de Puriales de Caujerí, predominan los bosques húmedos tropicales (temperatura promedio anual de 23° C y precipitación anual más de 2000 mm).

Tectónicamente, el área es la convergencia de tres sistemas principales, que parecen estar todavía activos. Las diferencias litológicas también son extraordinarias, ya que el área presenta varias capas alternas de rocas sedimentarias y la parte oriental está casi totalmente cubierta por rocas metamórficas, que pertenecen a un arco volcánico con muchos tipos de rocas (Castellanos, 2001).



Figura 8: Mapa de la costa sur de la provincia de Guantánamo, Cuba. **Fuente:** INSMET (2016)

1.5.2 Tectónica.

La geomorfología actual de San Antonio del Sur tiene muchas características diferentes y complejas condicionadas por: la zona interplaca del Caribe y América del Norte (Figura 9), las condiciones climáticas y las oscilaciones paleoclimáticas durante el período Cuaternario. Por lo general las formas terrestres actuales se crearon mediante una combinación de movimientos horizontales y verticales, siendo los más frecuentes los primeros hasta el Eoceno Medio, a partir de los cuales prevalecen los movimientos verticales principalmente con fallas de impacto. Estas formas de relieve presentan formas gravitacionales que han generado diferentes tipos de deslizamientos en el área de estudio.

Los rasgos peculiares que caracterizan el área encuentran su explicación genética como un producto de la influencia de la falla Oriente en la estructura geológica y la tectónica actual del área. Se hacen evidentes movimientos tectónicos activos desde el Oligoceno hasta el Reciente con sistemas de fallas principales de dirección NE-SW relacionados con la transurrencia sinistral (falla de desplazamiento de rumbo, si se desplaza hacia la izquierda, el movimiento relativo se describe como sinistral) a lo largo del límite entre ambas placas.

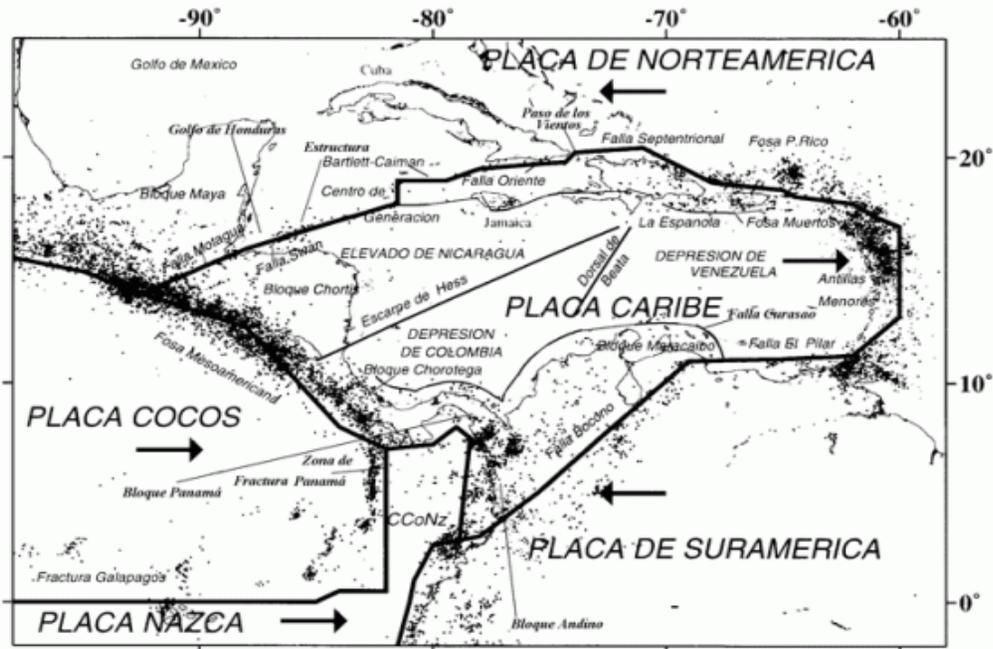


Figura 9: Mapa tectónico del Caribe.

A lo largo de la pendiente sur de la cordillera de Caimán se extiende la hoya (cuenca, concavidad u hondura grande formada en la tierra) relativamente estrecha, pero de gran profundidad con las denominadas fosas de Bartlett con una profundidad de 7050-7065 m y Oriente con 6976 m (Figura 9).

De tal manera, a lo largo de la costa sur del Oriente se extiende una terraza submarina muy estrecha, de origen abrasivo, que a veces resulta escalonada, y que ha sido labrada tanto en las rocas sedimentarias como en las metamórficas. Las clinofomas de la Formación Imías, desarrolladas en el la parte suroriental del área, sugieren la presencia de un talud muy inclinado y profundo surgido de la apertura de la falla Oriente en el Mioceno.

Después de la sedimentación de las calizas del Cuaternario, en el Pleistoceno tardío, la región fue levantada como puede verse en los varios niveles de terrazas a lo largo de la costa, que alcanzan alturas hasta 200m por encima del nivel del mar (Nuñez, 2001).

1.5.3 Características geomorfológicas.

Debido a las numerosas sumersiones y emersiones, más o menos extensas, que el territorio de la isla de Cuba y sus archipiélagos adyacentes han experimentado en el curso de su accidentada historia geológica, las rocas sedimentarias y, especialmente, las calizas, son muy abundantes. Esta circunstancia, así como las especiales características de su clima, han dado origen a la evolución de una notable morfología cársica (Acevedo, 1967).

La fuerte corrosión se debe a los ácidos carbónicos respiratorios de los vegetales y los microorganismos, que, por la respiración aumentada por la alta temperatura del agua, no son recogidos hasta la rizosfera o la superficie de la caliza y añaden que, gracias a las altas temperaturas constantes y a la existencia de una vegetación exuberante, el proceso cársico es muy intenso y activo.



Figura 10: Mapa de las regiones cársicas del Oriente de Cuba. Fuente: (Acevedo, 1967). Edición (Elaboración propia).

En estas superficies escalonadas, originadas por la erosión marina en distintos niveles que llegan a diez en Baitiquirí, al Este de Guantánamo, se encuentran interesantes fenómenos cársicos (Figura 10). La capa de suelo es insignificante o no existe, por lo que la topografía de dientes de perro se presenta en su forma más brutal y, a menudo, son zonas casi intransitables. De vez en cuando aparecen columnas, agujas o peñones aislados,

compuestos de rocas más resistentes que se han mantenido al retroceder la línea de la costa (Acevedo, 1967).

El agua escasea notablemente en estas regiones y los pocos ríos intermitentes que las atraviesan son ríos antecedentes, o sea, anteriores a la elevación de la región y, generalmente, han excavado profundas abras o cañones, encajonando sus cursos. En los farallones que las limitan (antiguos acantilados excavados por el oleaje) se encuentran abundantes grutas y cavernas de origen marino, en las cuales han comenzado a actuar las aguas aciduladas; las aguas han aprovechado líneas de debilidad tectónica, fracturas y diaclasas en las calizas que constituyen la región.

Las colinas costeras en el área de estudio son colinas aisladas paralelas a la costa. La longitud es variable, dependiendo de las bocas de los ríos, ya que las colinas costeras están cortadas por el sistema de drenaje. El ancho también es variable y está entre uno o dos kilómetros. En el área de estudio hay tres colinas costeras: entre El Naranjo y la bahía de Baitiquirí, entre la bahía de Baitiquirí y la bahía de Sabanalamar (Loma Los Aposentos) y entre la bahía de Sabanalamar y la ciudad de Macambo. Estas tres colinas están ubicadas paralelas a la costa y separadas por tres lineamientos diferentes (Castellanos, 2001).

Una característica destacada de las colinas costeras es su cima, que es casi horizontal y está cubierta por una capa más resistente. Es posible ver formas cárnicas locales debido a la disolución en la capa superior de las colinas costeras. Las colinas tienen diferentes alturas y perfiles. La cima de la colina de El Naranjo-Baitiquirí está a unos 190 metros.

Geológicamente, las colinas costeras están compuestas por cuatro formaciones geológicas principales, que desempeñan un papel importante en la forma actual de las colinas y en el proceso. La litología es diferente en el lado sur (costero) y en el lado norte. El lado norte está totalmente cubierto por la formación Maquey, que son principalmente rocas terrígenas y son susceptibles a deslizamientos de tierra. La vertiente costera, caracterizada por terrazas marinas, está compuesta por la formación maya, a excepción de las terrazas más bajas, que están compuestas por depósitos marinos recientes (Holoceno).

Estos depósitos marinos recientes actúan como "anillos" de las colinas costeras y son levantados entre 5 y 10 metros del nivel del mar actual.

La vegetación es rara, aunque existen algunas especies endémicas típicas de zonas semiáridas. El suelo también es escaso debido a la alta erosión, la pendiente y la falta de humedad. El sistema de drenaje está limitado a pocos canales debido a la proximidad al mar y al área relativamente pequeña de las colinas costeras.

La configuración tectónica y la capa superior de las colinas costeras generaron su aislamiento y forma lineal. Más tarde, en la última glaciación, los niveles erosivos fueron mucho más bajos que el nivel real del mar y la boca del río fue más diseccionada que ahora. Cuando el nivel del mar sube, estas áreas estaban ocupadas y, finalmente, los movimientos diferenciales ahora levantaron la tierra fuera del mar y generaron las bahías en forma de bolsa y las terrazas marinas.

1.5.4 Clima.

La temperatura superficial del agua durante el invierno es de 24-25° y en el verano de 30-32°. En enero predominan temperaturas medias de más de 20°. En los meses de verano, la temperatura del aire con frecuencia supera los 34°. Para las precipitaciones anuales resulta característico el mínimo en invierno y el máximo en el verano. La humedad relativa del aire es como promedio de un 85%.

Las regiones más pobres en cuanto a precipitaciones son las del sur y del suroeste que se encuentran cerradas al paso de los Alisios por las pendientes de las montañas. De tal forma el litoral sur se encuentra bajo la protección de los macizos montañosos de Baracoa.

La salinidad oceánica normal (de aproximadamente el 36%), la elevada transparencia del agua y la baja alcalinidad pH= 8.2, proporciona las condiciones favorables para el vertiginoso desarrollo en el litoral de la fauna y de la flora bentónica, fundamentalmente de organismos marinos reductores del calcio: corales, algas calcáreas, moluscos, foraminíferos, erizos de mar, etc. (Ionin et al.).

Capítulo II: Mediciones de campo y ecuaciones de transporte

En este capítulo se caracteriza el huracán Matthew a su paso por Guantánamo. Se definen y explican los métodos empleados para determinar las dimensiones de los huracanolitos escogidos como muestra y su ubicación geoespacial. Se abordan también las ecuaciones de (Nott, 2003, Engel and May, 2012), las cuales tienen como finalidad poder estimar la altura mínima de la ola, necesaria para transportar o desprender un boulder, generada por un huracán o un tsunami.

2.1 Paso del huracán Matthew por Guantánamo

En octubre del 2016, Guantánamo fue impactada por un huracán de gran intensidad, que generó la deposición de huracanolitos de grandes proporciones en algunas porciones costeras de esta provincia, aspecto que será abordado a continuación; pero antes resulta necesario comentar algunas características de este fenómeno.

El día 28 de septiembre de 2016, en el seno de la fuerte onda tropical que se hallaba próxima al grupo sur del Arco de las Antillas Menores, se desarrolló la Tormenta Tropical Matthew. Desde su formación, Matthew tuvo una rápida intensificación hasta convertirse en un intenso huracán en 48 horas y para el día 30 de septiembre alcanzaba la categoría 5 en la escala Saffir-Simpson, máxima categoría según establece esta clasificación.

Entre las 19:00 horas y 20:00 horas del 4 de octubre su centro penetró por Punta Caleta, costa sur de la provincia de Guantánamo con categoría 4, con vientos máximos sostenidos entre 220-230 km/h, y rachas superiores que alcanzaron los 245 km/h, reportado por la estación meteorológica de Punta de Maisí a la 21:56 horas de ese día. Los vientos máximos azotaron a los municipios de Maisí y Baracoa entre cinco y seis horas, debido al lento desplazamiento del huracán a razón de 6 km/h, recorriendo 27 kilómetros del territorio guantanamero, para salir al mar por la Bahía de Mata, al este y próximo a Baracoa por la costa norte el día 5 de octubre.

Durante la trayectoria de este meteoro (Figura 11) se generaron trenes de olas que se extendieron con mayor fuerza desde Maisí hasta la zona de Tortuguilla, en la costa sur de Guantánamo. En diciembre del mismo año se realizó un trabajo de prospección, evaluando algunos daños y tomando muestras y evidencias gráficas de los huracanitos transportados por este poderoso huracán.

Se puede observar en la Figura 11, como los vientos con fuerza de huracán llegan hasta la zona de estudio (Baitiquirí), donde se encuentra precisamente una de las áreas de mayores deposiciones y donde muchos de los boulders son de gran dimensión.

La mayor significación de este trabajo de campo radica en que este huracán de gran intensidad sirve de base para comparar huracanitos movidos por este meteoro con los ubicados en otras zonas costeras de Cuba, utilizando el primero como análogo con los huracanitos de mayores edades geológicas. Además, propicia la disminución de los riesgos asociados a eventos de olas de grandes energías, a partir de la contribución al incremento de la percepción del riesgo. Por ejemplo, desde 1851 (166 Temporadas Ciclónicas), el sur oriental no era impactado por un huracán de gran intensidad.

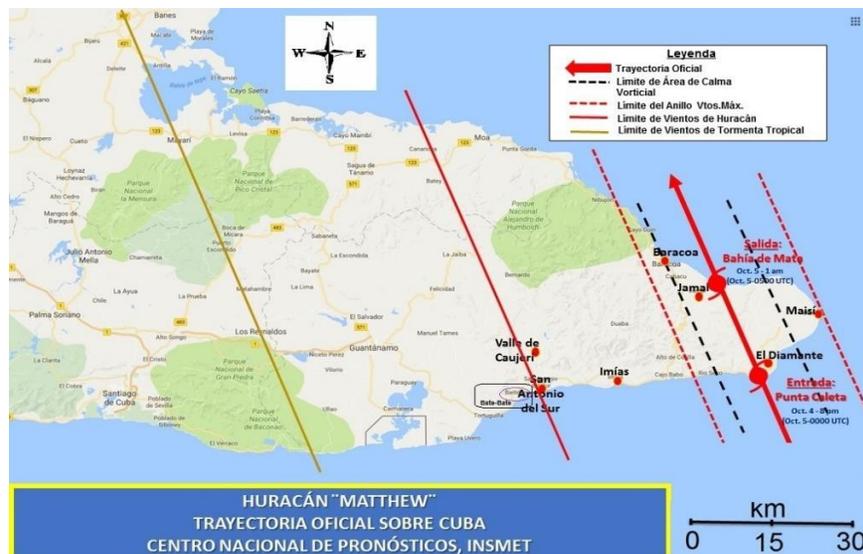


Figura 11: Trayectoria del huracán Matthew durante su paso por Cuba en octubre de 2016: entrada por Punta Caleta el día 4 y salida por Bahía de Mata el día 5. Zona de ubicación de huracanitos de mayores dimensiones. **Fuente:** (Stewart, 2017).

2.1.1 Modelación del oleaje provocado por el huracán Matthew

Primeramente, fueron consideradas las características de este poderoso huracán a su paso por Cuba, teniendo en cuenta los datos de las estaciones de Guantánamo, el comportamiento del campo de viento y presión al paso del sistema, dada la trayectoria experimentada. En segundo lugar, fueron utilizadas las salidas del Modelo Sistema de Predicción Numérica Océano-Atmósfera (Figura 12) (Pérez, Mitrani y Díaz, 2014). Este es un sistema que se encuentra operativo en el Centro de Física de la Atmósfera del Instituto de Meteorología, conformado por varios modelos de pronóstico numérico del estado de la atmósfera y el océano:

- El modelo atmosférico Weather Research Forecast (WRF).
- Los modelos de oleaje WaveWatchIII (WW3) y Simulation Waves Nearshore (SWAN).
- El modelo hidrodinámico Regional Oceanic Modeling System (ROMS).

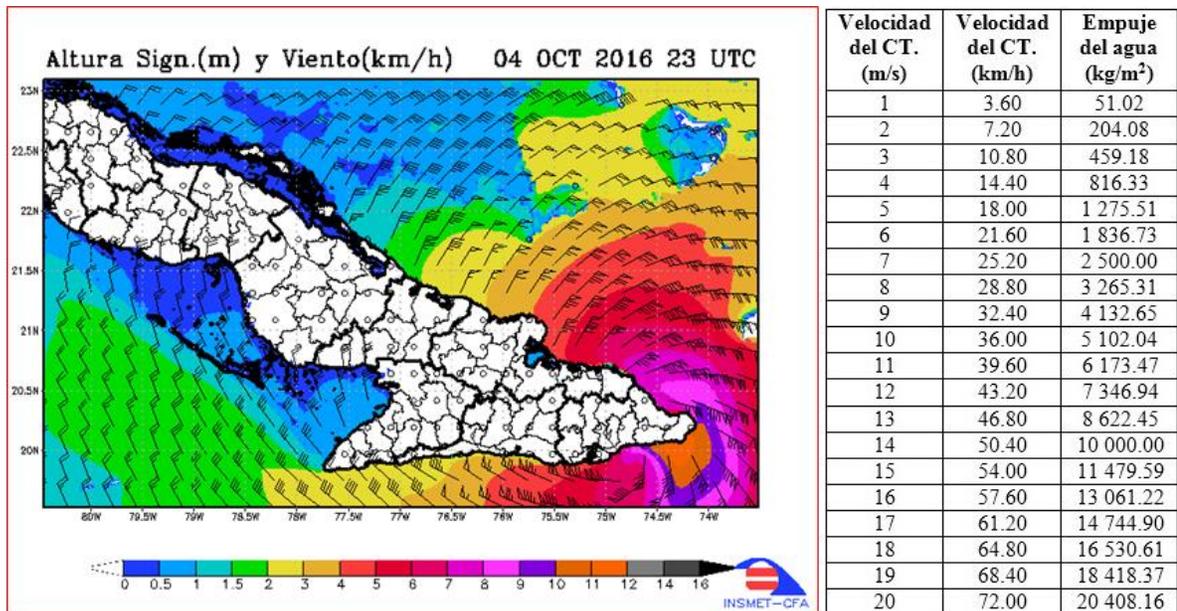


Figura 12: Salida del Modelo Sistema de Predicción Numérica Océano-Atmósfera (izquierda), y datos de las estaciones de Guantánamo (derecha). **Fuente:** INSMET (Instituto de Meteorología).

Fueron utilizadas las imágenes de dirección y altura de la ola correspondientes al periodo desde las 00UTC del martes 4 hasta las 00UTC del viernes 7 de octubre de 2016, durante el paso del huracán Matthew por la región oriental de Cuba, para un total de 61 imágenes. Las imágenes muestran la salida de estos modelos, mostrando la intensidad de los vientos y el empuje del agua. Es seleccionado el escenario que muestra la mayor altura de las olas en la zona de estudio, como el momento en que pudo generarse las mayores deposiciones (Figura 12).

2.2 Mediciones de campo

Los días comprendidos entre el 4 y el 11 de diciembre de 2016 fue desarrollado un trabajo de campo en las costas de Guantánamo, con la finalidad de ubicar y estudiar preliminarmente algunas deposiciones de boulders. Las mediciones fueron hechas por un Grupo de Investigación del Centro de Investigación de Ecosistemas Costeros (CIEC) en colaboración con el Centro de Aplicaciones Tecnológicas para el Desarrollo Sostenible (CATEDES)

Una segunda expedición fue hecha en junio de 2018 por el CIEC de conjunto con Max Engel y Dominick Brill de la Universidad de Cologne en Alemania. En todos los casos fueron considerados los siguientes aspectos:

- Dimensiones de los bloques y megabloques: altura máxima y longitudes de ejes máximos y mínimos, con énfasis en la longitud del eje máximo
- Masa.
- Distancia a la línea de costa.
- Orientaciones predominantes.
- Formas de los bloques o megabloques.
- Formas de las bases: plana, trapezoidal, forma de silla, etc.

- Georreferencia de los bloques.
- Georreferencia de los puntos de origen de los bloques (zonas fuentes, no todos).
- Relacionar el proceso de transportación con la energía del oleaje.

Además, se realizaron otras observaciones, tales como colonia de vegetación y recubrimiento de algún tipo de coral.

Se pretende utilizar las deposiciones de huracanolitos hechas por Matthew en zonas costeras como análogo para estimar el evento responsable de la deposición de los boulders antiguos y para estudiar la magnitud de eventos extremos del pasado.

A investigar:

- Bloques nuevos movidos por el huracán Matthew
- Bloques antiguos removidos por el huracán Matthew
- Bloques antiguos (para utilizar como análogos)

En un primer momento se tomó como método para el cálculo del volumen la fórmula tradicional de multiplicación de los tres ejes, método que sobreestima el volumen real de los boulders, pues la forma que estos tienen es muy irregular.

Un método que proporciona un dato más real del volumen del bloque es el utilizado por (Engel and May, 2012), donde los márgenes y vértices fueron medidos usando Leica SR 530 y un Topcon HiPer Pro differential global positioning system (DGPS), con el fin de calcular el volumen con mayor exactitud, rango de desviación(+/-2m). Además, las áreas laterales de cada boulder deben ser medidas y documentadas fotográficamente usando un software gráfico, siguiendo el procedimiento descrito por (Robinson et al., 2008) para compensar por la sobreestimación de cálculo de área, si simplemente dos axisas son multiplicadas.

2.3 Tramos costeros

Para el análisis de los huracanolitos en la costa sur de Guantánamo, la zona fue dividida en cuatro tramos como se indica en las Figura 13 y Figura 14. De estos cuatro tramos fue razón de estudio el último correspondiente al área de Bate-Bate, Baitiquirí debido a que en esta zona se encuentran numerosas deposiciones de boulders: donde destacan los que fueron arrancados de la terraza superior por Matthew, otros bloques antiguos y la presencia de megabloques; lo cual permitirá un mejor análisis del transporte de estos boulders. A su vez, el cuarto tramo fue subdividido en otros tres tramos como se muestra en la Figura 15.

En la Figura 15 se identifican los bloques escogidos para esta investigación, en total 18, entre los cuales están los que fueron sacados de la terraza superior por Matthew, otros boulders antiguos que fueron movidos nuevamente por Matthew y algunos bloques también antiguos que se encuentran en el área de estudio.

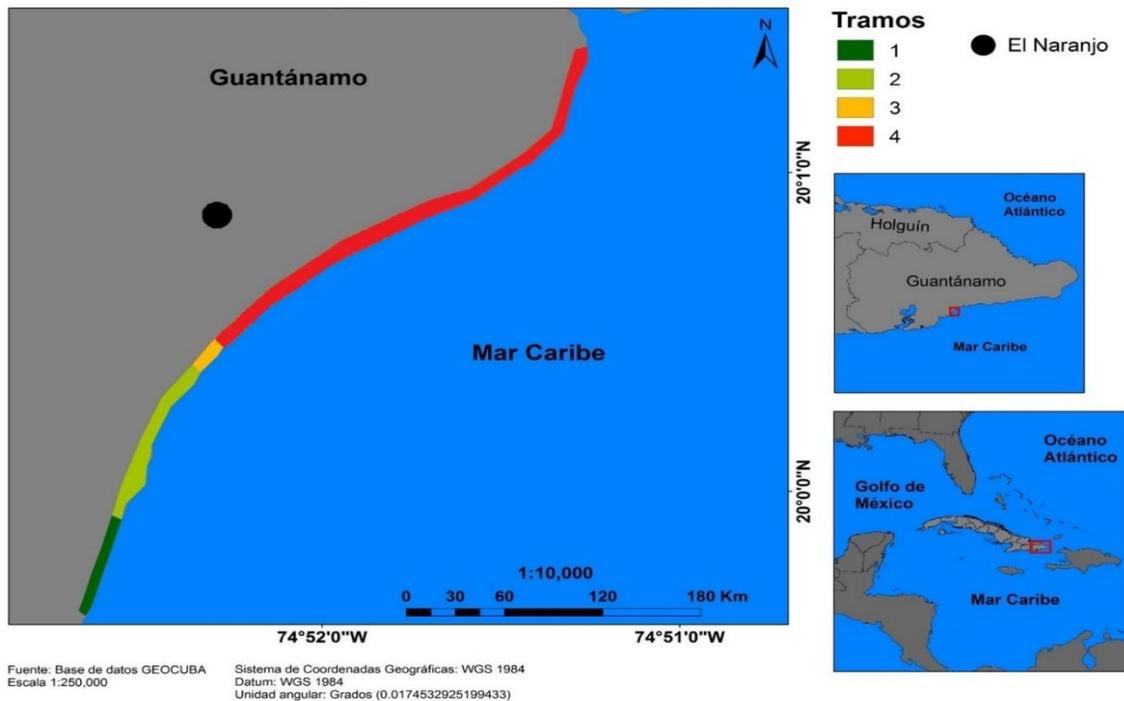


Figura 13: Mapa que muestra los distintos tramos en los que fue dividida la costa sur de Guantánamo para su estudio. **Fuente:** Elaboración propia.

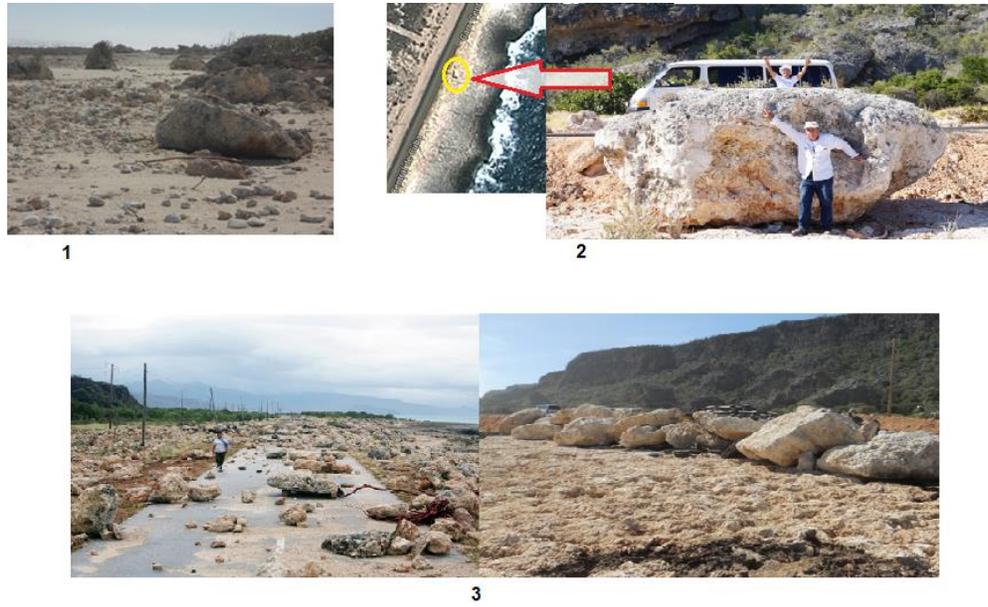


Figura 14: Tramos costeros en los que fue dividida la costa de Baitiquirí; 1: Primer tramo, 2: Segundo tramo, 3: Tercer tramo. **Fuente:** Elaboración propia.

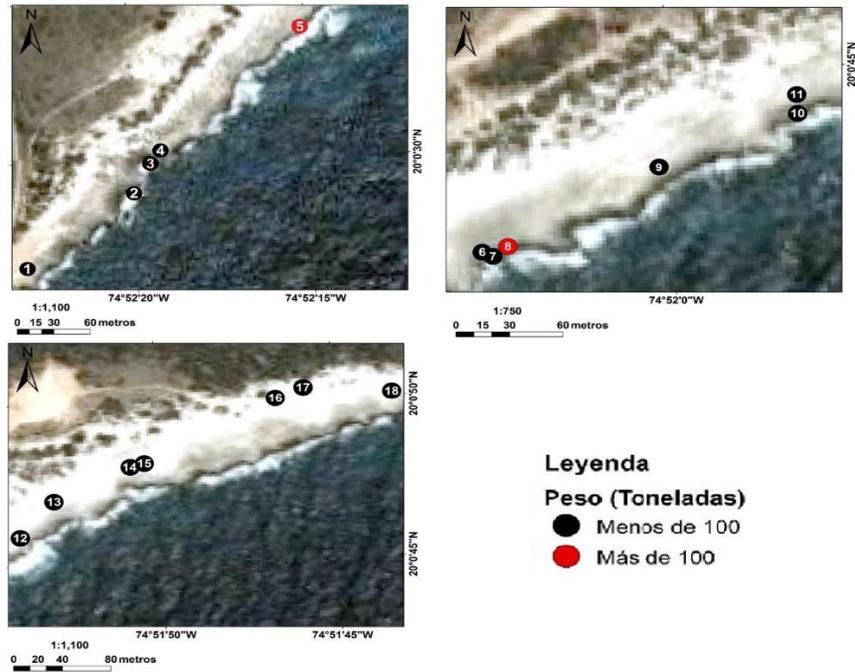


Figura 15: División del cuarto tramo en tres sub-tramos. Identificación de los boulders tomados como muestra. **Fuente:** Elaboración propia.

2.4 Ecuaciones de Nott

En 2003 Jonathan Nott desarrolló ecuaciones hidrodinámicas que relacionan las fuerzas requeridas para transportar rocas costeras en distintos escenarios con la altura de la ola y, por lo tanto, pueden determinar que evento extremo generó esa ola. Existen distintos tipos de escenarios probables para el transporte de rocas: cuando las rocas se encuentran sumergidas en aguas poco profundas y luego se depositan en la costa; cuando se ubican como elementos sub-aéreos en plataformas costeras y en la base de las rocas marinas; y donde existen boulders de unión limitada (JBB o joint bounded boulder) en las plataformas costeras.

En cada una de estas situaciones, se requieren diferentes fuerzas para iniciar el transporte y, como consecuencia, diferentes tipos de ecuaciones para describir la altura de las olas. La identificación de la ubicación o el origen probable del pre-transporte de una roca es importante para determinar qué ecuación es la más apropiada y el tipo de ola más probablemente responsable.

2.4.1 Ecuaciones de transporte de ola

Las diferentes fuerzas actuarán sobre una roca impactada por una ola dependiendo de la posición previa al transporte de esa roca. Por ejemplo, una roca sumergida por el agua experimentará las fuerzas de arrastre y elevación al ser impactada por una ola y resistirá el movimiento a través de la fuerza de restricción compensada por la flotabilidad.

Por otro lado, un JBB solo experimentará fuerza de sustentación cuando sea superada por una ola hasta que se incorpore a la corriente, después de lo cual experimentará fuerza de arrastre. Los boulders ubicados antes del transporte como bloques sub-aéreos, junto con la fuerza de arrastre y elevación, también experimentarán una inercia o fuerza de impulso además de la fuerza de restricción.

La fuerza de inercia se aplica en esta situación porque, a diferencia de la roca sumergida y el bloqueo de unión limitada, la roca sub-aérea no está soportada por agua o roca en el lado de sotavento del flujo. Como consecuencia, la roca experimenta una rápida

aceleración, aunque durante un breve tiempo (1-2 s), a medida que la ola impacta. Cada una de estas fuerzas se puede describir de la siguiente manera:

$$F_d \text{ (momento de fuerza de arraste)} = [0.5\rho_w C_d(ac)u^2] c/2 \quad (1)$$

$$F_l \text{ (momento de fuerza de elevación)} = [0.5\rho_w C_l(bc)u^2] b/2 \quad (2)$$

$$F_m \text{ (fuerza de inercia)} = \rho_w C_m(abc)\ddot{u} \quad (3)$$

$$F_r \text{ (momento de fuerza de restricción)} = (\rho_s - \rho_w)(abc) g^b/2 \quad (4)$$

donde:

ρ_w (densidad del agua) =1.02 g/ml, podría aumentar si se incorporan sedimentos como arena en el flujo.

ρ_s (densidad del boulder)

C_d (coeficiente de arrastre)

C_l (coeficiente de elevación)

C_m (coeficiente de masa)

g (constante gravitacional); \ddot{u} (aceleración instantánea); a, b y c (ejes del boulder)

El transporte de bloques se iniciará cuando, en el caso de un bloque sumergido:

$$F_d + F_l \geq F_r \quad (5)$$

y para una roca sub-aérea cuando:

$$F_d + F_l + F_m \geq F_r \quad (6)$$

y para un JBB cuando:

$$F_l \geq F_r \quad (7)$$

2.4.2 Escenario de boulder sumergido

Incorporando las ecuaciones 1, 2 y 4 en la ecuación 5 y resolviendo para H (altura de ola en la orilla y en caso de ola de tormenta en el punto de ruptura) se obtiene:

$$[0.5\rho_w C_d(ac)u^2] c/2 + [0.5\rho_w C_l(bc)u^2] b/2 \geq (\rho_s - \rho_w)(abc) g^b/2 \quad (8)$$

Multiplicando por 2 y sacando factor común:

$$0.5\rho_w u^2 [C_d ac^2 + C_l b^2 c] \geq (\rho_s - \rho_w) ab^2 cg \quad (9)$$

Transponiendo u^2 y simplificando da:

$$u^2 \geq \frac{(\rho_s - \rho_w)ab^2cg}{0.5\rho_w[C_dac^2 + C_lb^2c]} \quad (10)$$

$$u^2 \geq \frac{2(\rho_s - \rho_w)ag}{\rho_w \left[C_d \left(\frac{ac}{b^2} \right) + C_l \right]} \quad (11)$$

$$u^2 \geq \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} \frac{2ag}{C_d \left(\frac{ac}{b^2} \right) + C_l} \quad (12)$$

Como $u = \delta(gH)^{1/2}$, donde δ es el parámetro de tipo de onda, que difiere en función de la diferencia entre la velocidad y varios tipos de onda, y H es la altura de la onda, y, por lo tanto:

$$u^2 = \delta gH$$

Sustituyendo δgH por u^2 da:

$$\delta gH \geq \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} \frac{2ag}{C_d \left(\frac{ac}{b^2} \right) + C_l} \quad (13)$$

y resolviendo para H y simplificando da:

$$H \geq \frac{1/\delta [(\rho_s - \rho_w)/\rho_w]2a}{C_d \left(\frac{ac}{b^2} \right) + C_l} \quad (14)$$

La ecuación 14 se puede simplificar aún más para las olas de tsunamis y tormentas como:

$$H_t \geq \frac{0.25[(\rho_s - \rho_w)/\rho_w]2a}{C_d \left(\frac{ac}{b^2} \right) + C_l} \quad (15)$$

donde H_t es la altura del tsunami, $u = \delta(gH)^{1/2}$ y $\delta = 4$ y:

$$H_s \geq \frac{[(\rho_s - \rho_w)/\rho_w]2a}{C_d \left(\frac{ac}{b^2} \right) + C_l} \quad (16)$$

donde H_s es la altura de la onda de tormenta en el punto de ruptura, $u = (gH)^{1/2}$ y $\delta = 1$.

Inherente a la ecuación de la fuerza de arrastre es el supuesto de que la velocidad se refiere a la velocidad promediada en profundidad, mientras que la ecuación de la fuerza de elevación se refiere a la velocidad del lecho. Según (Baker, 1973), debido a la velocidad del lecho de turbulencia durante las inundaciones en los canales de corriente probablemente estaba cerca de la velocidad media; según (Costa, 1983), las dos velocidades eran similares, pero aumentó la velocidad de su lecho en un 20% para igualarla a la velocidad media. La naturaleza altamente turbulenta de una ola de tormenta y una de tsunami sugiere que la diferencia entre el lecho y la velocidad media en esta situación probablemente sea mínima (Nott, 2003).

La fuerza de elevación también es un componente relativamente menor de las ecuaciones centrales para las alturas de las olas, lo que supone que las dos velocidades (lecho y media) sean aproximadamente iguales. Nott, en línea con (Massel and Done, 1993), utilizó:

$$u = \frac{1}{2}(gH)^{1/2} \quad (17)$$

como la ecuación de velocidad promedio para una onda generada por viento oscilatorio roto (tormenta).

Esta ecuación es similar a la ecuación de (Fredsoe and Deigaard, 1994) para la velocidad orbital de onda máxima en el lecho cercano, sin embargo, como lo señalan estos autores, esta ecuación no se aplica a la zona de oleaje.

Debido a que el movimiento de los boulders tiene lugar en la zona de oleaje, o se supone que se inicia en el punto de inicio de la ruptura de las olas, y también debido a que es difícil derivar una velocidad de onda orbital promedio, Nott adopta un enfoque conservador y la velocidad/celeridad de onda para ondas orbitales ininterrumpidas es:

$$u = (gH)^{1/2} \quad (18)$$

Esta es probablemente una sobreestimación de la velocidad de una onda, ya que estas ondas disminuyen su velocidad considerablemente después de la ruptura. Por lo tanto, la ecuación 18 realmente se aplica cuando la ola comienza a romperse y se inicia el transporte de la roca. Una vez que se arrastra la roca, la velocidad de la onda se aproximará a la descrita en la ecuación 17.

En el desarrollo de la ecuación 14 se tuvo en cuenta el análisis de (Fukui et al., 1963) de la velocidad de perforación del tsunami. La ecuación de Fukui et al. para la perforación de un tsunami es:

$$u = \frac{\zeta[g(H + h)]^{1/2}}{2H(H - \eta\zeta)} \quad (19)$$

donde H es la altura de perforación, h es la profundidad del agua "inmóvil" delante de la perforación, $\zeta = H - h$, η es el factor de fricción. El factor de fricción η fue determinado empíricamente por Fukui et al. (fig. 7, p. 75). Este factor varía entre 0.82 y 1.02 al aumentar h/H. Usando esta ecuación η es una variable crítica para determinar la velocidad de perforación del tsunami y la relación entre η y u, donde $u = \delta(gH)^{1/2}$ viene dada por:

$$\delta = \frac{1}{[2(1 - \eta)]^{1/2}} \quad (20)$$

Nott sugiere que los valores más apropiados para η están entre: $\eta = 0.82$ cuando $h/H = 0$ y $\eta = 1.02$ cuando $h/H = 0.5$. Cuando los boulders se han transportado muy por encima del nivel del mar, y si un tsunami fue responsable, la ola habría transportado los boulders sobre tierra seca o donde $h = 0$ y, por lo tanto, $\frac{h}{H} > 0.5$ y $\eta > 1.02$.

Como se muestra en la ecuación 20 cuando $\eta > 1.02$ y $\delta > 2$ la velocidad del tsunami sería mayor que $u = 2(gH)^{1/2}$. Por lo tanto, se recomienda un valor conservador de $\eta > 0.875$ o donde $\delta = 2$, que es el mismo que el utilizado por Nott.

La ecuación 14 es particularmente sensible a los cambios en el valor del coeficiente de arrastre (C_d). (Noji, 1993) observó que el C_d varía sustancialmente con el tiempo (durante el

paso de la onda) y que disminuye a medida que el número de Froude se acercaba a 1. (Noji, 1993) determinó C_d para un objeto en forma de bloque (cubo), que tiene una forma similar a muchas rocas que han sido transportadas por las olas. En su experimento, el C_d varió entre aproximadamente 5 y 1.5 y alcanzó su valor más bajo cuando h/H estaba entre 1.2 y 2.

El coeficiente de resistencia al arrastre (C_d) ha recibido un valor de 2 en este estudio porque (Noji, 1993) encontraron que $C_d = 2$ cuando h/H era menos que 1.2, por lo tanto, este valor parece ser el más apropiado para los boulders transportados desde una posición sub-aérea y desde un entorno de aguas poco profundas donde la altura de la ola y la profundidad del agua son casi iguales.

2.4.3 Escenario de boulder sub-aéreo

La fuerza de inercia debe incorporarse en una ecuación para describir el impacto de una onda en una roca que no está sumergida ni apuntalada. La ecuación 6 que incorpora la fuerza de inercia se puede reorganizar y expresar como:

$$F_d + F_l \geq F_r - F_m \quad (21)$$

Incorporando las ecuaciones 1-4 en la ecuación 21 da:

$$[0.5\rho_w C_d (ac)u^2] c/2 + [0.5\rho_w C_l (bc)u^2] b/2 \geq (\rho_s - \rho_w)(abc) g^b/2 - 2\rho_w C_m (abc)\ddot{u}$$

Multiplicando por 2 y simplificando se obtiene:

$$0.5\rho_w u^2 [C_d ac^2 + C_l b^2 c] \geq (\rho_s - \rho_w) ab^2 c g - 2\rho_w C_m (abc)\ddot{u} \quad (22)$$

Despejando u^2 y simplificando da:

$$u^2 \geq \frac{2b^2 c [(\rho_s - \rho_w) a g - 2\rho_w C_m \ddot{u} a/b]}{\rho_w b^2 c [C_d (ac/b^2) + C_l]} \quad (23)$$

$$u^2 \geq \frac{2(\rho_s - \rho_w) a g}{\rho_w [C_d (ac/b^2) + C_l]} - \frac{4\rho_w C_m \ddot{u} a/b}{\rho_w [C_d (ac/b^2) + C_l]} \quad (24)$$

$$u^2 \geq \frac{2a g (\rho_s - \rho_w)/\rho_w - 4 C_m \ddot{u} a/b}{C_d (ac/b^2) + C_l} \quad (25)$$

Como $u = \delta(gH)^{1/2}$, $u^2 = \delta gH$, sustituyendo u^2 por δgH se obtiene:

$$\delta g H \geq \frac{2ag(\rho_s - \rho_w)/\rho_w - 4C_m \ddot{u}a/b}{C_d(ac/b^2) + C_l} \quad (26)$$

y resolviendo para H (altura de ola en la orilla y en caso de ola de tormenta en el punto de ruptura) se obtiene:

$$H \geq \frac{1/\delta [2a(\rho_s - \rho_w)/\rho_w - 4C_m \ddot{u}a/gb]}{C_d(ac/b^2) + C_l} \quad (27)$$

La ecuación 26 se puede simplificar aún más para tsunamis y olas de tormenta como:

$$H_t \geq \frac{0.25[2a(\rho_s - \rho_w)/\rho_w - 4C_m \ddot{u}a/gb]}{C_d(ac/b^2) + C_l} \quad (28)$$

donde H_t es la altura del tsunami, $u = 2(gH)^{1/2}$ y $\delta = 4$, y:

$$H_s \geq \frac{2a(\rho_s - \rho_w)/\rho_w - 4C_m \ddot{u}a/gb}{C_d(ac/b^2) + C_l} \quad (29)$$

donde H_s es la altura de la onda de tormenta en el punto de ruptura, $u = (gH)^{1/2}$ y $\delta = 1$.

Incorporando la fuerza de inercia, las ecuaciones 28 y 29 reconocen que la aceleración del flujo ocurre cuando una roca está de pie como una característica sub-aérea antes del impacto de una ola. La aceleración del flujo se produce cuando la onda golpea inicialmente la roca, después de lo cual la aceleración disminuye rápidamente hasta ser insignificante una vez que el frente de onda pasa y comienza el movimiento de la roca.

Según lo discutido por (Noji, 1993) el valor de la aceleración es difícil de determinar. La aceleración (\ddot{u}) es relativamente insignificante en la ecuación 27 porque las variaciones en este valor tienen poco efecto sobre la fuerza total aplicada a la roca y por lo tanto la altura de las olas en la orilla. (Noji, 1993) notó que, a pesar del cambio insignificante en la fuerza total que resulta de las variaciones en la aceleración, es importante incluir el término de aceleración en la ecuación de fuerza de inercia, de lo contrario el cálculo se vuelve inestable.

El coeficiente de masa (C_m) se determinó empíricamente por (Noji, 1993) y expresado por la ecuación:

$$C_m = 1.15 + 1.15 \tan h\pi \left[-2.0 - 2.5 \frac{h}{H} \right] \quad \text{para } h/H < 1.0 \quad (30)$$

C_m es una función de la profundidad relativa del agua (h/H) y aumenta dramáticamente cuando un objeto es impactado inicialmente por una onda (perforación), es decir, durante el primer segundo. Después de esto C_m disminuye rápidamente para acercarse a cero. Una vez que el objeto está completamente sumergido, el valor de C_m no hace ninguna diferencia respecto a la fuerza total porque la aceleración se vuelve insignificante. (Noji, 1993) utilizaron un valor de $C_m = 2$ que representa el tiempo en que la roca está completamente sumergida, pero observaron que el valor adoptado no debería hacer ninguna diferencia con respecto a la fuerza total porque para este momento la aceleración es insignificante.

Debido a que es altamente improbable que una ola de altura determinada aumente su fuerza o altura luego del primer segundo de impacto con una roca en la orilla, los valores más conservadores de $C_d=2$, $C_m=2$ y $\ddot{u} = 1 \text{ m/s}^2$ se recomiendan por Nott.

2.4.4 Escenario de boulder de unión limitada (JBB)

Para iniciar el movimiento de un JBB, la fuerza de elevación debe superar la fuerza de restricción, menos la flotabilidad, siempre que el bloque haya resistido completamente su sustrato. La ecuación 7 puede expresarse de la siguiente manera:

$$[0.5\rho_w C_l (bc)u^2] b/2 \geq (\rho_s - \rho_w)(abc) g b/2$$

Multiplicando por 2 y simplificando los términos queda:

$$0.5\rho_w C_l (b^2 c)u^2 \geq (\rho_s - \rho_w)(ab^2 c)g$$

$$0.5\rho_w C_l u^2 \geq (\rho_s - \rho_w)ag \quad (31)$$

Transponiendo u^2 y resolviendo para H queda:

$$u^2 \geq \frac{(\rho_s - \rho_w)ag}{0.5\rho_w C_l} \quad (32)$$

$$u^2 \geq \frac{2ag(\rho_s - \rho_w)/\rho_w}{C_l} \quad (33)$$

$$\delta gH \geq \frac{2ag(\rho_s - \rho_w)/\rho_w}{C_l} \quad (34)$$

$$H \geq \frac{1/\delta [2a(\rho_s - \rho_w)/\rho_w]}{C_l} \quad (35)$$

La ecuación 15 puede ser simplificada como:

$$H_t \geq \frac{0.25[2a(\rho_s - \rho_w)/\rho_w]}{C_l} \quad (36)$$

donde H_t es la altura del tsunami, $u = 2(gH)^{1/2}$, $\delta = 4$, y:

$$H_s \geq \frac{2a(\rho_s - \rho_w)/\rho_w}{C_l} \quad (37)$$

donde H_s es la altura de la onda de tormenta en el punto de ruptura, $u = (gH)^{1/2}$, $\delta = 1$.

La altura de una ola requerida únicamente para levantar un bloque lítico desde su posición unida en una plataforma en tierra es mucho mayor que la requerida para mover rocas que están sumergidas o sub-aéreas. Esto es porque los dos últimos experimentan fuerza de arrastre. En algunos entornos, es obvio que los boulders que forman el depósito deben provenir de límites conjuntos de bloques sobre plataformas.

Es probable que haya un componente de la fuerza de arrastre involucrado en el inicio del movimiento de las rocas desde esta posición debido a la turbulencia en la corriente que podría actuar contra el eje C si ha habido suficiente meteorización y separación del bloque de los estratos circundantes; por lo tanto, la ecuación 35 puede sobreestimar levemente la altura de la ola requerida para transportar rocas desde tal ajuste (Nott, 2003).

2.5 Ecuaciones de Engels y May

2.5.1 Arrastre, transporte y emplazamiento de boulders

Cuando las ondas de tormenta son generadas por ciclones tropicales, cerca de la costa, crecen en altura (H_b) debido a una disminución en la profundidad del agua (h_w). Las olas se rompen si H_b/h_b ($H_b = h_w$ en el punto de ruptura) alcanza valores de 0.71-0.78 en el caso de un ángulo sesgado semiacuático bajo y 0.78-1.03 en el caso de una inclinación empinada.

En el océano abierto, los tsunamis tienen una amplitud en el orden de los decímetros, pero crecen en altitud al alcanzar aguas someras (Switzer and Jones, 2008). Por definición, los tsunamis tienen olas largas ($L_o/h_w > 20$ en el océano abierto) con una longitud de onda (L_o) en el orden de cientos de kilómetros comparado con cientos de metros con respecto a las ondas de tormenta (Engel and May, 2012).

En un acantilado vertical, el rompimiento de las olas de tormenta induce inicialmente un corto pero intenso impulso de presión, antes de aplicar una larga y persistente onda de presión, ambas formas suman una presión dinámica que está positivamente correlacionada con la altura de la ola. En contraste, los tsunamis con periodos de duración de unos minutos por encima de una hora o más, generan flujos unidireccionales turbulentos a lo largo del perfil vertical entero de la perforación, provocando estrés en la plataforma que da al mar, durante varios minutos (Engel and May, 2012).

Desprender los boulders requiere la presencia de marcas iniciales. (Noormets et al., 2004) estima que fracturando tenga que ascender al 60% del llano posterior de la falla en caso de olas de tormenta y hasta un 70% en el caso de un tsunami hasta que un boulder sea desplazado del borde de la terraza.

La excavación ocurre durante un balance de momentos (Figura 16), cuando:

$$F_C l_C + F_L l_L = F_W l_W + F_G l_G + F_T l_T \quad (38)$$

F_C = fuerza aplicada por las olas en las fracturas.

F_L = fuerza de elevación de la ola.

F_W = fuerza de la ola aplicada en el borde de la terraza (incluyendo la fuerza de inercia)

F_G = peso del boulder sumergido.

F_T = fuerza de tensión de la parte anexa al boulder (Noormets et al., 2004).

Parámetro l indica el brazo de palanca de cada fuerza.

2.5.2 Primer escenario (JBB).

(Nott, 2003) sugiere una relación simplificada de la ecuación 38: si el momento de fuerzas de elevación excede el momento de fuerzas de restricción $M_L \geq M_R$, se moverán los bloques en el borde de la terraza. La definición inicial de F_L hecha por Nott fue modificada después que es determinada por el área superior de superficie de un boulder de unión limitada (JBB) (Pignatelli et al., 2009, Benner et al., 2010, Nandasena et al., 2011).

$$M_L = F_L \frac{b}{2} = 0.5\rho_w C_L A_p u^2 \frac{b}{2} \quad (39)$$

$$M_R = F_R \frac{b}{2} = (\rho_b - \rho_w) V g \frac{b}{2} \quad (40)$$

Las fuerzas de restricción F_R se igualan con la suma vectorial de F_G y F_T en la ecuación 38 y Figura 16. El parámetro A_p representa el área superior de los boulders, definido por el producto de ancho (axis-a) y profundidad (axis-b) de un boulder en su posición original en el borde de la terraza, multiplicado con un coeficiente de aspecto empírico $q=0.73$. Los parámetros restantes son:

ρ_w (densidad del agua de mar) = 1.02 g cm⁻³;

ρ_b (densidad del boulder)

u (velocidad del flujo de agua)

C_L (coeficiente de elevación) = 0.178

$$V = V_{DGPS} = DGPS - based\ boulder\ volume$$

$$g\ (\text{constante gravitacional}) = 9.81\ \text{m s}^{-2}$$

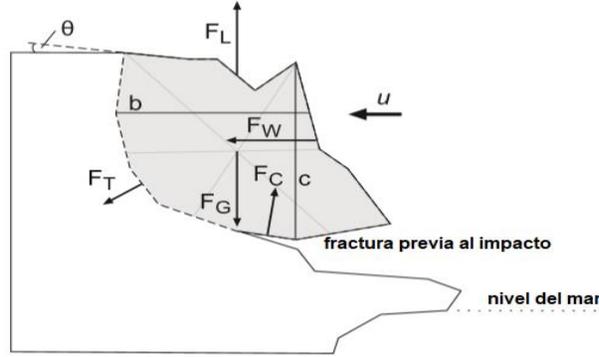


Figura 16: Fuerzas que actúan en un bloque de unión conjunta, como se describe en la ecuación 38. **Fuente:** (Engel and May, 2012). Edición (Elaboración propia).

Existen tres aspectos fundamentales:

1. Balancear las fuerzas en la dirección de elevación en caso de un JBB.
2. El coeficiente de fricción estática ($\mu=0.65$, (Benner et al., 2010)).
3. El ángulo de la inclinación del pre-transporte Θ , debe ser considerado.

Por lo tanto, un boulder es desplazado de una plataforma cuando:

$$F_L \geq F_R(\cos \theta + \mu \sin \theta) \quad (41)$$

Desarrollando los términos queda:

$$0.5\rho_w C_L A_p u^2 \geq (\rho_b - \rho_w) V g (\cos \theta + \mu \sin \theta) \quad (42)$$

Transponiendo u^2 :

$$u^2 = \frac{(\rho_b - \rho_w) 2 V g (\cos \theta + \mu \sin \theta)}{\rho_w C_L a b q} \quad (43)$$

La velocidad de flujo determina la capacidad de transporte de una ola y correlaciona positivamente con la altura de la ola (H) al litoral después de disminuir en profundidad:

$$u^2 = \delta g H \quad (44)$$

Resolviendo para H queda:

$$H = \frac{(\rho_b - \rho_w)V(\cos \theta + \mu \sin \theta)}{\delta 0.5 \rho_w C_L a b q} \quad (45)$$

De la ecuación siguiente se deriva la altura mínima de una ola provocada por un tsunami (H_T) o por una onda de tormenta (H_S), la cual es requerida para arrancar un bloque de unión conjunta particular:

$$H_T = \frac{(\rho_b - \rho_w)V(\cos \theta + \mu \sin \theta)}{2 \rho_w C_L a b q} \quad (46)$$

$$H_S = \frac{(\rho_b - \rho_w)V(\cos \theta + \mu \sin \theta)}{0.5 \rho_w C_L a b q} \quad (47)$$

2.5.3 Segundo escenario (boulder sumergido)

Implica la fase de arrastre y emplazamiento justo después de la dislocación de la roca y permite descartar tentativamente el transporte por onda de tormenta si los valores de tamaño del clasto, la posición hacia el interior y el período de ola son lo suficientemente altos.

El transporte de rocas desprendidas se produce en condiciones de flujo turbulento (tsunami), principalmente rodando/saltando, cambia a deslizamiento cuando la velocidad del flujo disminuye (Engel and May, 2012)

En la mayoría de los casos, el eje más largo de un boulder es perpendicular a la dirección de la onda. De lo contrario, la fuerza hidráulica se gasta para rotar el eje horizontalmente, lo que reduce la capacidad de transporte (Imamura et al., 2008)

Después de calculada la altura mínima de una ola requerida para separar los bloques de los bordes de la terraza marina, el boulder se integra al flujo (rodando/saltando) siempre que la suma de la fuerza de elevación (F_L) y la fuerza de arrastre (F_D) exceda la fuerza de resistencia (F_R):

$$F_L + F_D > F_R \quad (48)$$

$$F_D = 0.5C_D(acq)\rho_w u^2 \quad (49)$$

El coeficiente de arrastre (C_d) se estima en 1.95 (Engel and May, 2012)

a y c eje de un boulder;

q es el coeficiente del área del boulder=0.73;

ρ_w es la densidad del agua de mar=1.02 gcm⁻³;

u es la velocidad del flujo.

Para F_L y F_R ver las ecuaciones (39) y (40).

Sustituyendo y desarrollando en la ecuación 48, se tiene que:

$$\begin{aligned} 0.5\rho_w C_L A_p u^2 + 0.5C_D(acq)\rho_w u^2 &> (\rho_b - \rho_w)Vg \\ 0.5\rho_w u^2 aq(C_L b + C_D c) &> (\rho_b - \rho_w)Vg \end{aligned} \quad (50)$$

Trasponiendo u^2 y resolviendo para H queda:

$$u^2 > \frac{(\rho_b - \rho_w)Vg}{0.5\rho_w aq(C_L b + C_D c)} \quad (51)$$

$$H > \frac{(\rho_b - \rho_w)V}{0.5\delta\rho_w aq} \frac{1}{(C_L b + C_D c)} \quad (52)$$

H_S y H_T en la ubicación donde se deposita una roca, pueden deducirse mediante:

$$H_T \geq \frac{0.5(\rho_b - \rho_w)V}{\rho_w aq} \frac{1}{(C_D c + C_L b)} \quad (53)$$

$$H_S \geq \frac{2(\rho_b - \rho_w)V}{\rho_w aq} \frac{1}{(C_D c + C_L b)} \quad (54)$$

2.5.4 Tercer escenario (boulder sub-aéreo)

Durante la etapa final del transporte de un boulder, la velocidad de la corriente disminuye y el transporte probablemente se produce en modo deslizante (Imamura et al., 2008) por lo tanto, F_L no es elegible (Noormets et al., 2004). El transporte finaliza cuando:

$$F_D \leq F_\mu \quad (55)$$

F_μ representa la fuerza de fricción normal y se define por:

$$F_\mu = \mu V \rho_b g \quad (56)$$

donde se estimó que μ (coeficiente de fricción) = 0,65 (Benner et al., 2010).

La duración del arrastre en el flujo, ya sea durante un tsunami o una tormenta, así como la distancia de dislocación, se determinan por el esfuerzo crítico de corte por cizallamiento que se relaciona con la altura y la velocidad de una ola que sobresale en la plataforma de vuelo (Barbano et al., 2010).

Usando las ecuaciones (49), (55) y (56), transponiendo u^2 y resolviendo para H:

$$0.5C_D(acq)\rho_w u^2 \leq \mu V \rho_b g \quad (57)$$

$$u^2 \leq \frac{\mu V \rho_b g}{0.5C_D(acq)\rho_w} \quad (58)$$

$$H \leq \frac{\mu V \rho_b}{0.5\delta C_D(acq)\rho_w} \quad (59)$$

Se calculan las alturas mínimas de las olas para tormentas y tsunamis:

$$H_T \geq \frac{0.5\mu V \rho_b}{C_D(acq)\rho_w} \quad (60)$$

$$H_S \geq \frac{2\mu V \rho_b}{C_D(acq)\rho_w} \quad (61)$$

Engel y May consideran que la disminución en el interior de la altura de las olas se correlaciona con la distancia a la costa debido a la disipación de energía dentro de un régimen de flujo turbulento, establecen también una correlación fuertemente dependiente del período de onda (T):

$$H_i = \left[\sqrt{R - E} - \frac{5 \cdot X_i}{T \cdot \sqrt{g}} \right]^2 \quad (62)$$

donde H_i es la altura de onda a una cierta distancia de la costa X_i ; R representa la altura de la onda de rotura (H_T , H_S en las ecuaciones 46 y 47); E es la altura de la plataforma hacia el mar. H_i se convierte en cero en el punto de máxima inundación.

Capítulo III: Datos obtenidos y uso de las ecuaciones de transporte para los boulders identificados en los tramos costeros

En este capítulo se emplean los datos obtenidos de las mediciones de campo para el cálculo de la altura mínima de las olas de los huracanitos movidos por el huracán Matthew, haciendo uso de las ecuaciones propuestas por Nott y Engel- May. Los resultados obtenidos se utilizan para examinar la eficacia del uso de estas ecuaciones. Las conclusiones de este análisis se aplicarán a los boulders antiguos con el fin de determinar la génesis de los mismos.

3.1 Datos obtenidos

En la Tabla 4 se muestran los datos obtenidos: la relación de cada uno de estos boulders o huracanitos, su georreferenciación (latitud y longitud), observaciones de interés y la posible distancia recorrida desde la línea de costa, longitud de cada uno de los ejes, así como el peso de cada uno de los 18 boulders identificados en el área de estudio.

La gráfica mostrada por la Figura 17 resalta el hecho de que no existe relación entre el peso de los boulders y la posible distancia recorrida. Para algunos que han sido arrancados de la terraza superior por Matthew la relación masa & distancia no parece lógica o como se esperaba ver. Una causa de este hecho puede ser, en el caso de boulders antiguos, que estos hayan sido afectados, indistintamente por eventos anteriores a Matthew.

En la Figura 17 se aprecia que la mayoría de los bloques han sido transportados muy pocos metros tierra adentro. Además, se observa que dos de los boulders identificados pesan más de 100 toneladas, uno de ellos sacado por el huracán Matthew de la terraza superior, mostrado en la Figura 19 y el otro un megabloque antiguo, representado en la Figura 18.

Capítulo III: Datos obtenidos y uso de las ecuaciones de transporte para los boulders identificados en los tramos costeros

Tabla 4: En ella se recoge la posición geográfica de los boulders (Latitud, Longitud); D: la posible distancia a la línea de costa; A, B y C: ejes del boulder; M: masa del boulder.

No.	Latitud	Longitud	Observaciones	D (m)	A (m)	B (m)	C (m)	M (t)
1	20°0'26,0"	74°52'22,1"	Sacado del acantilado cerca de la línea de costa (JBB) por Matthew	0.9	4.70	2.40	1.40	41.1
2	20°0'29,0"	74°52'20,0"		1.0	5.00	2.90	1.40	52.8
3	20°0'29,9"	74°52'19,5"	Boulders nuevos pero anteriores a Matthew	4.3	3.60	2.30	0.76	16.4
4	20°0'30,3"	74°52'19,2"		6.5	4.84	2.50	0.74	23.3
5	20°0'34,0"	74°52'15,1"	Super boulder sacado por Matthew	4.6	7.10	3.60	1.52	101.0
6	20°0'41,3"	74°52'03,7"	Bloques fragmentados sacado por Matthew	1.0	2.70	1.30	0.75	6.8
7	20°0'41,2"	74°52'03,5"	Bloques fragmentados sacado por Matthew	13.4	2.80	1.60	1.20	14.0
8	20°0'41,4"	74°52'03,2"	Megaboulder antiguo	21.0	7.60	3.60	1.47	104.6
9	20°0'43,2"	74°52'00,4"	Bloques más grandes de un grupo de boulders	34.4	6.61	2.80	1.20	57.7
10	20°0'44,0"	74°51'57,5"		5.2	6.60	1.42	1.40	34.1
11	20°0'44,4"	74°51'57,5"	Bloque antiguo movido nuevamente por Matthew (con plantas)	21.5	3.65	2.30	2.28	49.8
12	20°0'45,9"	74°51'54,0"	Super boulder antiguo movido nuevamente por Matthew	9.5	3.90	3.65	1.37	50.7
13	20°0'47,0"	74°51'53,0"		21.5	3.06	1.83	1.30	18.9
14	20°0'48,0"	74°51'50,8"		17.2	5.00	1.87	2.06	42.0
15	20°0'48,1"	74°51'50,4"		25.8	4.10	2.98	1.04	33.0
16	20°0'50,0"	74°51'46,6"		51.6	3.65	3.14	1.17	34.9
17	20°0'50,3"	74°51'45,8"		51,6	4.94	3.39	1.28	55.7
18	20°0'50,1"	74°51'43,3"	Posible punto de salida: 20°00'50,1"N y 74°51'43,3" W. Sacado por Matthew	25.8	2.70	2.22	0.97	15.1

Se puede observar la huella dejada por el huracanolito número 5 al ser descolocado de la terraza superior (Figura 19), se ve claramente el patrón blanquecino dejado en la terraza al ser transportado el bloque, es así como se observa una huella reciente provocada por el proceso del transporte. Realizando detenidamente estas observaciones se puede identificar,

Capítulo III: Datos obtenidos y uso de las ecuaciones de transporte para los boulders identificados en los tramos costeros

en el caso de eventos recientes, cual es el escenario durante el cual tuvo lugar dicho proceso de transporte.

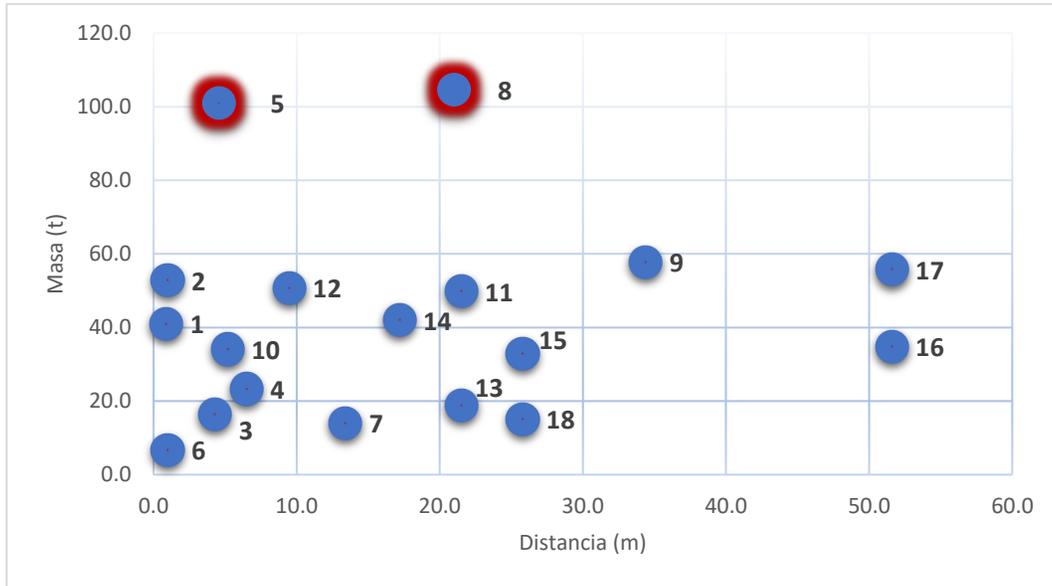


Figura 17: Relación entre la masa de los boulders y la posible distancia recorrida desde la línea de costa. **Fuente:** Elaboración propia.



Figura 18: Megaboulder número 8. Antiguo bloque depositado en la costa suroriental de Cuba con un peso de 104.6 toneladas. **Fuente:** Elaboración propia.

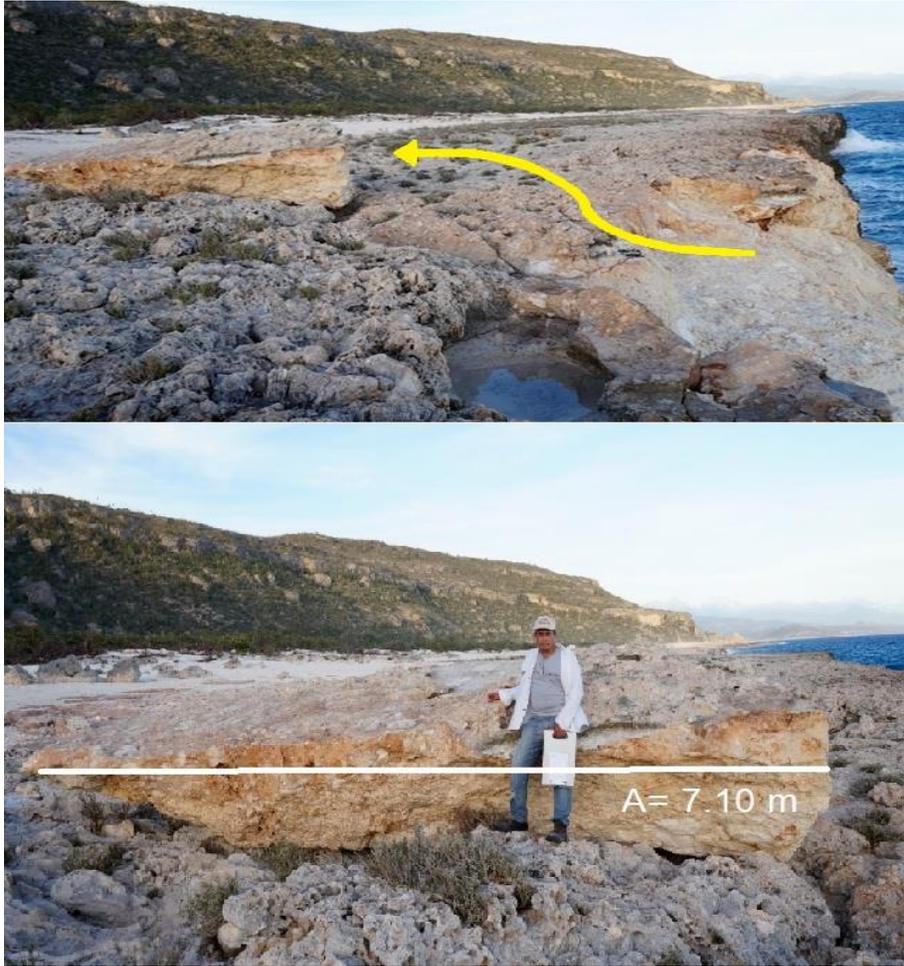


Figura 19: Bloque número 5, sacado por Matthew de la terraza inferior y transportado a una corta distancia tierra adentro. **Fuente:** Elaboración propia.

Un breve análisis de los bloques 11 y 12, que fueron depositados por un evento de oleaje extremo anterior al generado por el huracán Matthew. Estos huracanolitos fueron removido por las olas asociadas a Matthew, siendo volteados (Figura 23 y Figura 24). En este caso se debe tener en cuenta que, según observaciones biológicas, el bloque contiene insertado en su superficie algunas plantas, que considerando la dirección de crecimiento (tropismo) se concluye que el bloque fue volteado por el huracán Matthew.

Un **tropismo** (del griego τροπή *tropé* 'giro, vuelta, fuga, punto de retorno') es un fenómeno biológico que indica el crecimiento o cambio direccional de un organismo, normalmente una planta, como respuesta a un estímulo medioambiental.

Si el órgano se mueve en la misma dirección que el estímulo se denomina tropismo positivo (+), pero si lo hace inclinado (crecimiento con dirección horizontal o en ángulo) alejándose del estímulo es un tropismo negativo (Iturralde-Vinent). Ambas son respuestas realizadas para acercarse o alejarse del estímulo recibido.

En el caso que nos ocupa, se aplica el concepto del fototropismo. La luz es el factor necesario para llevar a cabo la fotosíntesis, por lo que la parte aérea del vegetal crece hacia el estímulo luminoso (fototropismo). Así, los tallos presentan fototropismo positivo y las raíces negativo, mientras que las hojas y ramas tienen plagiofototropismo. Está controlado por las auxinas, cuya síntesis se inhibe por la luz, de modo que la zona del tallo no iluminada de la planta crece más y obliga a la iluminada a curvarse hacia la luz. En las raíces al no haber prácticamente auxinas se inhibe el alargamiento de las células.

3.2 Huracanolitos movidos por Matthew

De los 18 bloques identificados en la zona de estudio, 9 fueron arrancados de la terraza superior o movidos nuevamente por el huracán Matthew Tabla 5. La tabla muestra en el caso de los huracanolitos arrancados de la terraza superior el ángulo de pre-transporte (Θ), además expone para cada uno de ellos las dimensiones de los tres ejes, siendo el A el eje principal.

Capítulo III: Datos obtenidos y uso de las ecuaciones de transporte para los boulders identificados en los tramos costeros

Tabla 5: Relación de los boulders movidos por Matthew; Θ : ángulo de pre-transporte; A, B y C: ejes de un boulder.

No.	Θ	Observaciones	A (m)	B (m)	C (m)
1	14	Sacado del acantilado cerca de la línea de costa por Matthew	4.70	2.40	1.40
3		Boulders movidos nuevamente por Matthew	3.60	2.30	0.76
4			4.84	2.50	0.74
5	5	Megaboulder sacado por Matthew	7.10	3.60	1.52
6	15	Boulder fragmentado, sacado por Matthew	2.70	1.30	0.75
7	15	Bloque fragmentado, sacado por Matthew	2.80	1.60	1.20
11		Bloque antiguo movido nuevamente por Matthew (con plantas)	3.65	2.30	2.28
12		Super boulder antiguo movido nuevamente por Matthew	3.90	3.65	1.37
18	30	Posible punto de salida: 20°00'50,1"N y 74°51'43,3" W. Sacado por Matthew	2.70	2.22	0.97

En las Figura 20, Figura 22 y Figura 25 se observa claramente como los bloques 1, 6, 7 y 18 fueron arrancados de la terraza superior dejando en su lugar de origen un patrón blanquecino, propio de este tipo de transporte; mientras que las Figura 21, Figura 23 y Figura 24 evidencian como los huracanitos 4, 11 y 12 fueron volteados.

Capítulo III: Datos obtenidos y uso de las ecuaciones de transporte para los boulders identificados en los tramos costeros



Figura 20: Huracanolito #1, sacado por el huracán Matthew de la terraza superior. **Fuente:** Proyecto de Paleotempestología en Cuba.



Figura 21: Huracanolito #4, volteado por el huracán Matthew. **Fuente:** Elaboración propia.



Figura 22: La flecha indica el lugar de donde Matthew excavo un boulder. En un segundo momento es fragmentado en dos: el rectángulo indica la posición del huracanolito #6 y el hexágono marca el lugar hasta donde fue transportado el Huracanolito #7. **Fuente:** Elaboración propia.

De los huracanolitos movidos por el huracán Matthew los enumerados con 1, 5, 6, 7 y 18 fueron arrancados de la plataforma superior y transportados integrados al flujo. En el caso de los bloques 6 y 7 estos fueron arrancados de la terraza en un primer momento como un solo boulder, el cual posteriormente fue fragmentado; quedándose cerca de la línea de costa el 6, mientras que el 7 era movido tierra adentro como se muestra en la Figura 22.



Figura 23: Huracanolito #11, el volcado por el huracán Matthew. **Fuente:** Elaboración propia.



Figura 24: Huracanolito #12, el cual fue volteado por el oleaje asociado al huracán Matthew. **Fuente:** Elaboración propia.



Figura 25: Huracanolito #18, excavado de la terraza superior por el huracán Matthew. **Fuente:** Elaboración propia.

La Tabla 6 muestra la relación de los huracanolitos movidos por el huracán Matthew con el escenario en el cual fueron transportados. Es imprescindible tener bien definido el escenario en el cual se enmarca el transporte realizado por el boulder para no cometer errores cuando se escojan las ecuaciones pertinentes para el cálculo de la altura mínima de la ola que pudo haber generado dicho movimiento.

Capítulo III: Datos obtenidos y uso de las ecuaciones de transporte para los boulders identificados en los tramos costeros

Para el bloque 7 después del análisis hecho se tuvo en cuenta que el mismo fue transportado en dos escenarios distintos. Es por ello que presenta dos momentos: primeramente, cuando es sacado de la terraza superior formado parte de un todo y posteriormente fragmentado y transportado.

Tabla 6: Escenarios en los cuales los boulders fueron transportados, tanto para los definidos por Nott como para los establecidos por Engel-May. **Fuente:** Elaboración propia.

Boulder No.	Escenario según Nott	Escenario según Engel-May
1	JBB	Primer escenario
3	Boulder sub-aéreo	Tercer escenario
4	Boulder sub-aéreo	Tercer escenario
5	JBB	Primer escenario
6	JBB	Primer escenario
7	JBB y Boulder sub-aéreo	Primer escenario y Tercer escenario
11	Boulder sub-aéreo	Tercer escenario
12	Boulder sub-aéreo	Tercer escenario
18	JBB	Primer escenario

Para realizar los cálculos necesarios es imprescindible analizar los métodos considerados por ambos autores para la determinación del volumen de un boulder. Como se había mencionado en el Capítulo II, Nott adopta una forma tradicional, multiplicando los tres ejes medidos como si los boulders tuviesen una forma regular.

Capítulo III: Datos obtenidos y uso de las ecuaciones de transporte para los boulders identificados en los tramos costeros

Por otra parte, Engel-May adoptan un método computacional utilizando las imágenes tomadas de cada bloque para medir sus vértices y márgenes con un Leica SR 530 y procesarlas con un Topcon HiPer Pro differential global positioning system (DGPS), el cual básicamente analiza las imágenes procesadas para formar una imagen tridimensional del boulder analizado y busca una forma geométrica que asemeje al objeto de estudio para poder calcular el volumen.

Los resultados del empleo de estos dos métodos son expuestos en la Tabla 7 donde se exhiben los volúmenes calculados para los huracanitos movidos por el huracán Matthew y se observan claras diferencias entre los dos resultados.

Tabla 7: Relación de cada boulder con el volumen calculado empleando dos métodos: Nott (V_{abc}) y Engel-May (V_{DGPS}). **Fuente:** Elaboración propia.

Boulder No.	V_{DGPS} (m³)	V_{abc} (m³)
1	7.80	15.79
3	3.40	6.29
4	4.20	8.95
5	19.10	38.85
6	1.40	2.63
7	2.10	5.38
11	9.00	19.14
12	9.20	19.50
18	2.35	5.81

3.2.1 Resultados

En la Tabla 8 se exponen los resultados alcanzados en el cálculo de la altura mínima de la ola necesaria para el transporte de los huracanolitos mediante el uso de las ecuaciones de Nott, mientras que en la Tabla 9 demuestran los resultados empleando las ecuaciones de Engel y May.

En la Tabla 8 y 9 se muestran las alturas de ola obtenidas, empleando las ecuaciones propuestas por Jonathan Nott y Engel-May respectivamente en el Capítulo II. En las dos tablas se puede apreciar que indistintamente de las ecuaciones empleadas, se tiene que para arrancar un boulder de la terraza a la que está unido se necesita una altura de ola mayor y por ende una fuerza mayor que la empleada para transportar un bloque que se encuentra en un escenario sub-aéreo.

Tabla 8: Altura mínima de las olas que pudieron transportar los huracanolitos asociados al huracán Matthew, utilizando las ecuaciones propuestas por Jonathan Nott. **Fuente:** Elaboración propia.

Boulder	V_{abc} (m ³)	M (t)	Boulder sub-aéreo		Boulder de unión conjunta	
			Ht	Hs	Ht	Hs
1	15.79	41.1			1.82	7.29
3	6.29	16.4	2.18	8.71		
4	8.95	23.3	2.69	10.74		
5	38.85	101.0			2.75	11.00
6	2.63	6.8			1.03	4.14
7	5.38	14.0	0.46	1.83	1.09	4.35
11	19.14	49.8	0.57	2.30		
12	19.50	50.7	1.08	4.31		
18	5.81	15.1			1.04	4.17

Capítulo III: Datos obtenidos y uso de las ecuaciones de transporte para los boulders identificados en los tramos costeros

Tabla 9: Altura mínima de las olas que pudieron transportar los huracanitos asociados al huracán Matthew, utilizando las ecuaciones propuestas por Engel-May, además de emplear los dos resultados del cálculo del volumen. Donde H_{T1} y H_{S1} son las alturas de ola obtenidas para tsunami y huracán respectivamente, aplicando V_{abc} ; mientras que H_{T2} y H_{S2} son las alturas de ola obtenidas para tsunami y huracán respectivamente, aplicando V_{DGPS} . **Fuente:** Elaboración propia.

No.	V_{abc} (m^3)	V_{DGPS} (m^3)	θ	Primer escenario (JBB)				Tercer escenario			
				H_{T1}	H_{T2}	H_{S1}	H_{S2}	H_{T1}	H_{T2}	H_{S1}	H_{S2}
1	15.79	7.80	5.0	2.84	1.40	11.36	5.61				
3	6.29	3.40						1.34	0.72	5.37	2.90
4	8.95	4.20						1.46	0.68	5.82	2.73
5	38.85	19.10	5.0	3.08	1.51	12.31	6.05				
6	2.63	1.40	15.0	1.49	0.79	5.96	3.17				
7	5.38	2.10	15.0	2.42	0.94	9.67	3.78	0.93	0.36	3.73	1.46
11	19.14	9.00						1.34	0.63	5.36	2.52
12	19.50	9.20						2.12	1.00	8.50	4.01
18	5.81	2.35	30.0	2.82	1.14	11.26	4.55				

En la Tabla 9 se evidencia que existen grandes diferencias en los resultados obtenidos mediante el empleo de V_{DGPS} , en comparación con las alturas de ola calculadas utilizando V_{abc} . Dejando claro que el cálculo del volumen del boulder mediante la forma tradicional (multiplicación de sus tres ejes) proporciona valores pocos realistas. Debido a esto se recomienda utilizar el método propuesto por (Engel and May, 2012), entre tanto no se halle un método más eficaz y que aporte datos más realistas.

3.3 Análisis del uso de las ecuaciones propuestas por Nott y Engel-May

En la Figura 26 se aprecia que las alturas de ola calculadas empleando las ecuaciones propuestas por Nott difieren no solo de lo obtenido según las ecuaciones de Engel-May; sino que, además, es incongruente con el máximo de altura de ola registrado por el huracán Matthew a su paso por Baitiquirí que fue de aproximadamente 9 m como mostrado en el Capítulo II por la salida del modelo: Sistema de Predicción Numérica Océano-Atmósfera.

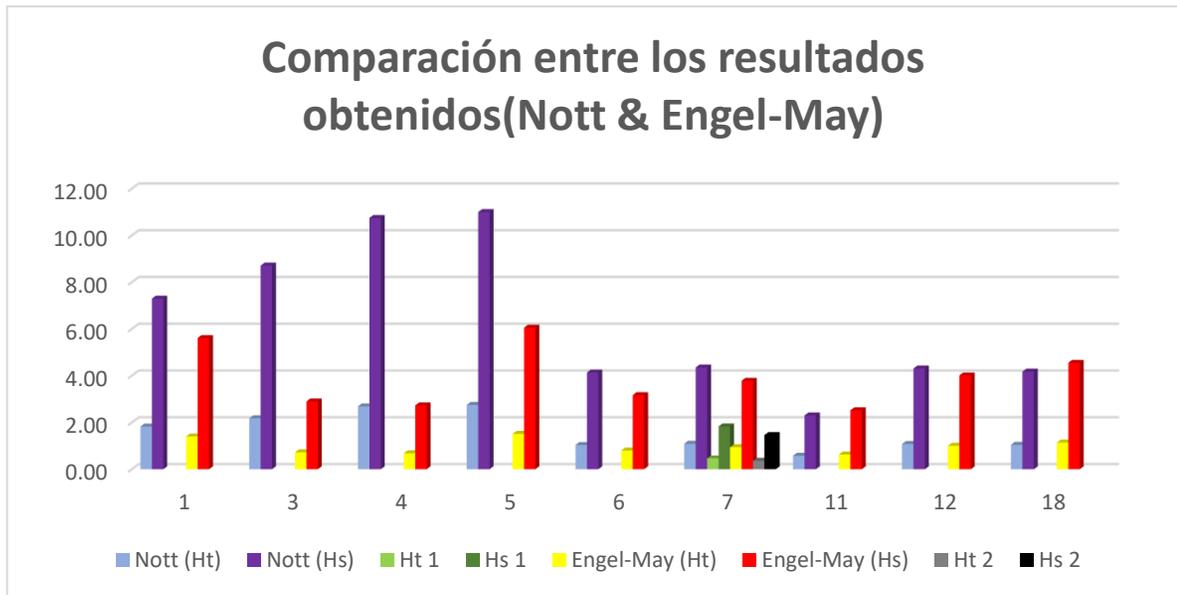


Figura 26: Comparación entre las alturas de ola obtenidas según las ecuaciones de Jonathan Nott [Nott (H_t) y Nott (H_s)] y las obtenidas empleando las ecuaciones y el método propuesto (V_{DGPS}) propuesto por Engel-May [Engel-May (H_t) y Engel-May (H_s)]. Ht1 y Hs1 representa la segunda fase en el proceso de transporte del boulder #7 según las ecuaciones propuestas por Nott. Ht2 y Hs2 son las alturas de ola en la segunda fase del transporte del boulder #7 empleando las ecuaciones propuestas por Engel-May. **Fuente:** Elaboración propia.

A pesar de que Nott en 2003 aportara un grupo de ecuaciones que hicieran posible realizar una estimación de la altura mínima de una ola, capaz de transportar una roca en los distintos escenarios que esta se pueda encontrar, el hecho de que utilice como vía de cálculo del volumen la forma tradicional de la multiplicación de los tres ejes, hace que dicha estimación no sea tan próxima a la realidad.

Cuando se está en presencia de bloques de unión conjunta, con más de 50 toneladas y son utilizadas los pares de ecuaciones que define Nott para este escenario se tienen como resultados alturas de olas que hasta para un tsunami son difíciles de alcanzar. Además, se deben tener en cuenta los valores tomados para los distintos coeficientes y realizar minuciosamente las mediciones de los ejes de cada boulder.

Es necesario detenerse cuidadosamente en el análisis de transporte de cada boulder cuando se realicen las mediciones de campo, pues en la mayoría de las ocasiones es difícil

definir el tipo de transporte realizado por bloques antiguos; se hace énfasis en este aspecto pues es imprescindible escoger el par de ecuaciones que se asemeje más al escenario encontrado y analizado.

Por otra parte, se tienen las ecuaciones desarrolladas por (Engel and May, 2012), que en su investigación presentan una nueva forma del cálculo del volumen mucho más realista, pues casi todos los boulders presentan una forma muy irregular y una muy variada composición litológica, ello permite una mejor estimación de la altura mínima de la ola capaz de realizar el transporte.

3.4 Análisis de los boulders antiguos

Como se demostró en el apartado anterior no es recomendable el uso de las ecuaciones que propone Jonathan Nott debido a las incongruencias con la realidad. Por ello se decide realizar el análisis del proceso de transporte que pudieron tener los boulders antiguos identificados en el área de estudio utilizando únicamente las ecuaciones descritas por Engel-May.

Las mediciones realizadas en Baitiquirí arrojaron los datos que se exponen en la Tabla 10, empleando el mismo análisis que se utilizó en los huracanolitos que fueron movidos por el huracán Matthew.

Para el cálculo de la altura mínima de la ola capaz de transportar los boulders escogidos, fueron tomados en cuenta los tres escenarios (Tabla 11 y Tabla 12); a pesar de que la terraza en la zona de estudio tiene una altura entre 3 y 7 m por encima del nivel del mar y muy pocos tramos de terraza sumergida, condiciones que reducen la probabilidad de que un boulder sea transportado en el escenario de boulder sumergido.

No obstante, la probabilidad está latente y es lógico que se realice también su análisis pues se desconoce el lugar de origen de estos boulders; además cabe señalar, que el estudio

Capítulo III: Datos obtenidos y uso de las ecuaciones de transporte para los boulders identificados en los tramos costeros

de todos los posibles escenarios ayuda a corroborar o no que un huracán pudo haber sido la causa del transporte de uno de estos bloques antiguos.

Tabla 10: Relación de los boulders identificados como antiguos. A, B y C: ejes del boulder; V_{DGPS} : volumen del boulder y M: masa del boulder. **Fuente:** Elaboración propia.

Boulder No.	A (m)	B (m)	C (m)	V_{DGPS} (m ³)	M (t)
2	5.00	2.90	1.40	10.50	52.8
8	7.60	3.60	1.47	22.15	104.6
9	6.61	2.80	1.20	11.90	57.7
10	6.60	1.42	1.40	6.70	34.1
13	3.06	1.83	1.30	3.60	18.9
14	5.00	1.87	2.06	9.10	42.0
15	4.10	2.98	1.04	6.20	33.0
16	3.65	3.14	1.17	7.70	34.9
17	4.94	3.39	1.28	11.10	55.7

Tabla 11: Altura mínima necesaria de una ola, generada por el oleaje de una tormenta, capaz de realizar el transporte de un boulder en el peor de los escenarios ($\Theta = 30^\circ$). **Fuente:** Elaboración propia.

Boulder	Θ	Primer escenario (JBB)	Segundo escenario	Tercer escenario
		Hs	Hs	Hs
2	30	8.43	2.75	3.49
8	30	9.42	3.53	4.62
9	30	7.47	2.69	3.49
10	30	8.31	1.44	1.69
13	30	7.46	1.74	2.10
14	30	8.32	1.30	1.72
15	30	5.89	2.50	3.38
16	30	7.83	3.16	4.20
17	30	7.70	3.07	4.08

Capítulo III: Datos obtenidos y uso de las ecuaciones de transporte para los boulders identificados en los tramos costeros

Para el caso del primer escenario (JBB), fue utilizado un ángulo para el pre-transporte $\Theta = 30^\circ$, pues este es el mayor ángulo que pudo vencer Matthew, un huracán categoría 5, al generar deposiciones en Baitiquirí. Con la utilización de este dato se quiso calcular la mayor altura mínima que podría generar un evento de oleaje extremo para arrancar estos boulders de la terraza en el más difícil de los escenarios (Tabla 11). También fueron realizados los cálculos para el mejor de los escenarios (Tabla 12) usando un ángulo de pre-transporte $\Theta = 5^\circ$.

Tabla 12: Altura mínima necesaria de una ola, generada por el oleaje de una tormenta, capaz de realizar el transporte de un boulder en el peor de los escenarios ($\Theta = 5^\circ$). **Fuente:** Elaboración propia.

Boulder	Θ	Primer escenario (JBB)	Segundo escenario	Tercer escenario
		Hs	Hs	Hs
2	5	5.87	2.75	3.49
8	5	6.56	3.53	4.62
9	5	5.20	2.69	3.49
10	5	5.79	1.44	1.69
13	5	5.19	1.74	2.10
14	5	5.79	1.30	1.72
15	5	4.10	2.50	3.38
16	5	5.45	3.16	4.20
17	5	5.36	3.07	4.08

En las Tabla 11 y Tabla 12 se puede apreciar que los mayores valores son dados para el primer escenario, donde se necesita una mayor fuerza para poder separar un boulder que este unido a la plataforma. Aun, cuando los cálculos en la Tabla 11 son realizados para el peor de los posibles entornos en un escenario de boulder limitado, analizados al paso del huracán Matthew, estos son valores posibles a alcanzar por el oleaje provocado por un huracán; pues como se muestra en la salida del modelo: Sistema de Predicción Numérica

Océano-Atmósfera, las mayores alturas de ola registradas se encuentran en la sección NE del sistema, hecho que parece coincidir en la mayoría de los ciclones estudiados.

Esta observación lleva a la conclusión de que un huracán anterior a Matthew cuya sección de mayor energía haya pasado por el lugar donde se encuentra la zona de estudio (Baitiquirí) pudo haber sido la causa de la deposición de los mayores boulders.

3.4.1 Análisis del megabloque #8.

Como es mostrado en la Figura 27 el megabloque #8 tiene una forma bastante regular en comparación con los demás boulders estudiados, lo cual genera dudas sobre el tipo de escenario en el cual pudo haber sido transportado. Este megabloque tiene una gran similitud (Figura 27) al huracanolito #5 en peso y longitud del eje mayor (A). Ello permite establecer una comparación entre ambos con el fin de determinar si un huracán pudo ser responsable o no de su transporte.

Para el huracanolito #5 se obtuvo una altura de ola mínima $H_s = 6.05$ m, valor muy similar al obtenido para el megabloque #8 $H_s = 6.56$ m calculado para vencer un ángulo de pre-transporte $\Theta = 5^\circ$ (entorno más fácil). Esta similitud en los resultados evidencia que el paso de un huracán por una zona determinada, donde los vientos con fuerza de huracán azoten dicha área, puede generar deposiciones de megabloques.

Considerando ahora el caso, para el megabloque #8, donde $H_s = 9.42$ con $\Theta = 30^\circ$, este resultado es un valor posible de alcanzar para un huracán categoría 4 ó 5 en la escala Saffir-Simpson. Esto se puede constatar por el análisis hecho en el apartado anterior.

Capítulo III: Datos obtenidos y uso de las ecuaciones de transporte para los boulders identificados en los tramos costeros



Figura 27: Comparación ilustrativa entre el huracanolito #5 (Imagen de arriba) y el Megaboulder #8 (imagen de abajo). **Fuente:** Elaboración propia.

Conclusiones

1. No existen evidencias sólidas sobre las incidencias de tsunamis en el oriente cubano; sin embargo, la frecuencia de huracanes es mayor. Aun cuando la zona de estudio ha experimentado pocos impactos de huracanes intensos, existen cuatro en la lista cronológica de afectación en Guantánamo (David, Ike, Matthew e Irma).
2. No es recomendable el uso de las ecuaciones propuestas por Nott por sus claras desventajas y los resultados pocos realistas. Los cálculos de las alturas de las olas para los dos tipos de eventos (tsunami y huracanes) y en distintos escenarios, muestran valores sobredimensionados. En el caso de las ecuaciones obtenidas por Engel y May, aplican un método más efectivo para el cálculo del volumen de los boulders, lo que conduce a la obtención de valores más cercanos a la realidad.
3. Puede ser el oleaje extremo provocado por los huracanes, el responsable de las deposiciones de boulders y megaboulders en Baitiquirí, Guantánamo.
4. La modelación de los procesos actuales de deposición de boulders constituye una vía recomendable para aplicar como análogos, en los casos de estudios de deposiciones geológicamente más antiguas.
5. El análisis de las deposiciones de boulders en zonas costeras en las que la frecuencia de huracanes es baja, propicia el incremento de la percepción de riesgos asociados a estos fenómenos meteorológicos.

Recomendaciones

- ▶ Aun cuando el método presentado por Engel y May arroja un resultado más satisfactorio, es necesario seguir trabajando en mejorar la forma del cálculo del volumen de un boulder, agregando otras variables que puedan ser definitorias en el resultado final, con el fin de determinar una altura de ola más próxima a la realidad.
- ▶ Se recomienda realizar dataciones de los boulder tomados como muestra; a pesar de que este tipo de análisis sea muy costoso y no se realice en el país; ya que este permitiría determinar cuando tuvo lugar la deposición de los bloques y relacionarla con un evento de oleaje extremo del que se tenga referencia.
- ▶ Actualmente las investigaciones sobre los boulders transitan por caminos diferentes a las relacionadas más directamente con la Paleotempestología. Urge la necesidad de estudiar los paleohuracanes aplicando mayor número de técnicas proxies, de manera que permita comparar resultados.

Referencias bibliográficas

- ACEVEDO, M. 1967. Clasificación general y descripción del carso cubano.
- BAKER 1973. Paleohidrology and sedimentology of Lake Missoula flooding in eastern Washington.
- BARBANO, M., PIRROTTA, C. & GERARDI, F. 2010. Large boulders along the south-eastern Ionian coast of Sicily: Storm or tsunami deposits? *Marine Geology*, 275, 15.
- BENNER, R., BROWNE, T., BRÜCKNER, H., KELLETAT, D. & SCHEFFERS, A. 2010. Boulder Transport by Waves: Progress in Physical Modelling *Zeitschrift für Geomorphologie* 54, 20.
- BERMUDEZ, P. 1961. Las formaciones geológicas de Cuba. La Habana: Ministerio de Industrias, Instituto Cubano de Recursos Minerales.
- BLANCO-QUINTERO, I. F., GARCÍA-CASCO, A., ROJAS-AGRAMONTE, Y., RODRÍGUEZ-VEGA, A., LÁZARO, C. & ITURRALDE-VINENT, M. A. 2010. Metamorphic evolution of subducted hot oceanic crust (La Corea Melange, Cuba). *American Journal of Science*, 310, 889-915.
- CASTELLANOS, E. 2001. Geomorphology and Geology of San Antonio del Sur, Guntánamo, Cuba: its contribution in producing landslides. In: WESTEN(2), C. V. (ed.). La Habana.
- COSTA, J. 1983. Paleohydraulic reconstruction of flash-flood peaks from boulder deposits in the Colorado Front Range *Geological Society of America Bulletin*, 94, 20.
- COTILLA, M. 2011. ¿Tsunamis en Cuba? . *Física de la Tierra* 23, 25.
- ENGEL, M., BRÜCKNER, H., WENNRICH, V., SCHEFFERS, A., KELLETAT, D., VÖTT, A., SCHÄBITZ, F., DAUT, G., WILLERSHÄUSER, T. & MAY, S. 2010. Coastal stratigraphies of eastern Bonaire (Netherlands Antilles): New insights into the palaeo-tsunami history of the southern Caribbean. *Sedimentary Geology*, 231, 17.
- ENGEL, M. & MAY, S. 2012. Bonaire's boulder fields revisited: evidence for Holocene tsunami impact on the Leeward Antilles. *Quaternary Science Reviews*, 54, 17.
- ENGEL, M., MAY, S., 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*, 18.
- FERNÁNDEZ DE CASTRO, M. 1871. Estudio sobre los huracanes ocurridos en la Isla de Cuba durante el mes de octubre de 1870. Madrid: Imprenta JM Lapuente.
- FERRER, M. R. 1876. Naturaleza y civilización de la grandiosa isla de Cuba. Madrid, España.
- FREDSOE, J. & DEIGAARD, R. 1994. Mechanics of Coastal Sediment Transport. . *Coastal Engineering*.
- FUKUI, Y., NAKAMURA, M., SHIRAIISHI, H. & SASAKI, Y. 1963. Hydraulic study on tsunami. *Coastal Engineering in Japan*, 6, 67-82.
- GOTO, K., CHAVANICH, S., IMAMURA, F., KUNTHASAP, P., MATSUI, T., MINOURA, K., SUGAWARA, D. & YANAGISAWA, H. 2007. Distribution, origin and transport process of boulders deposited by the 2004 Indian Ocean tsunami at Pakarang Cape, Thailand. *Sedimentary Geology*, 202, 16.
- GOTO, K., MIYAGI, K., KAWAMATA, H. & IMAMURA, F. 2010. Discrimination of boulders deposited by tsunamis and storm waves at Ishigaki Island, Japan. *Marine Geology*, 269, 11.

- 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, 12.
- IMAMURA, F., GOTO, K. & OHKUBO, S. 2008. A numerical model for the transport of a boulder by tsunami *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 113, 12.
- IONIN, A. S., PAVLIDIS, Y. A. & AVELLO, S. O. *Gelología de la plataforma marina cubana*.
- ITURRALDE-VINENT, M. 2017. Huracanolitos, eventos de oleaje extremo y protección de las obras costeras. *Revista Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*.
- JIMÉNEZ, A. N. 1988. La Habana, Cuba, Editorial Letras Cubanas.
- KLOTZBACH, P. & GRAY, W. 2006. Causes of the unusually destructive 2004 Atlantic Basin hurricane season. *American Meteorological Society*, 10.
- LANDER, J., WHITESIDE, L. & LOCKRIDGE, P. 2002. A brief history of tsunamis in the Caribbean Sea. *Science of Tsunami Hazards*, 20, 38.
- LANZA, M. G. 1934. *Ciclones que han pasado por la isla de Cuba: o tan cerca que hayan hecho sentir en ella sus efectos con alguna fuerza desde 1865 a 1933*, Cultural.
- LIMIA, M., PÉREZ, R. & VEGA, R. 2000. Climatología de los ciclones tropicales que han afectado a Cuba. *Los ciclones tropicales de Cuba, su variabilidad y su posible vinculación con los cambios globales*. Informe científico. Instituto de Meteorología. La Habana.
- LIMIA, M., VEGA, R. & PÉREZ, R. Climatología de los ciclones tropicales que han afectado a Cuba y sus provincias. Memorias del X Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología “La meteorología y el desarrollo sostenible”. La Habana, Cuba, 2003.
- MASSEL, S. & DONE, T. 1993. Effects of cyclone waves on massive coral assemblages on the Great Barrier Reef: meteorology, hydrodynamics and demography *Coral Reefs*, 12, 4.
- MATOS, F. 2017. Boulders in Cuba: Hurricanes or Tsunamis?.
- MAY, S., 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.
- MILLÁS, J. 1923. Huracanes que han afectado a Cuba desde 1494 al 1856. *Boletín del Observatorio Nacional, Secretaría de Agricultura, Comercio y Trabajo*, 19, 1871-1980.
- MITRANI, I., ALVAREZ, L. & BORRAJERO, I. 2003. Aplicación optimizada. *Revista Cubana de Meteorología*.
- NANDASENA, N., PARIS, R. & TANAKA, N. 2011. Reassessment of hydrodynamic equations: Minimum flow velocity to initiate boulder transport by high energy events (storms, tsunamis). *Marine Geology*, 281, 15.
- NOJI, M. Numerical simulation of movement of large rocks transported by tsunamis. Proceedings of IUGG/IOC International Tsunami Symposium, 1993, 1993. 189-197.
- NOORMETS, R., CROOK, K. & FELTON, A. 2004. Sedimentology of rocky shorelines: 3. Hydrodynamics of megaclast emplacement and transport on a shore platform, Oahu, Hawaii. *Sedimentary Geology*, 172, 25.
- NOTT, J. 2003. Waves, coastal boulder deposits and the importance of the pre-transport setting. *Earth and Planetary Science Letters*
- NUÑEZ, K. 2001. La influencia de la Falla Oriente en la estructura geológica del área de San Antonio del Sur, Cuba. La Habana.

- 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 [en línea]*, 7, 3-1.
- PEROS, M., 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*, 15.
- PIELKE, R., RUBIERA, J., LANDSEA, C., FERNANDEZ, M. & KLEIN, R. 2003. Hurricane Vulnerability in Latin America and The Caribbean: Normalized Damage and Loss Potentials. *Natural Hazard Reviews*, 15.
- PIGNATELLI, C., SANSÒ, P. & MASTRONUZZI, G. 2009. Evaluation of tsunami flooding using geomorphologic evidence. *Marine Geology*, 260, 13.
- POEY, A. 1862. *Table chronologique de quatre cents cyclones qui ont sévi dans les Indes Occidentales et dans l'Océan Atlantique Nord pendant un intervalle de 362 années (depuis 1493 jusqu'en 1855)*, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- ROBINSON, E., KHAN, S., ROWE, D. & COTON, R. Size of boulders moved and emplaced by recent hurricanes, Jamaica. Abstract volume of the 2nd International Tsunami Field Symposium, Ostuni (Italy) and Ionian Islands (Greece), 2008. 22-28.
- RUBIO, M. 1982. Ocurrencia de tsunamis en el Caribe. *Revista investigaciones sismológicas en Cuba*, 2, 170-180.
- SCHEFFERS, A. 2002. Paleotsunamis evidences from boulders deposits on Aruba, Curazao and Bonaire. *Science of Tsunami Hazards*, 20, 12.
- SCHEFFERS, A. & KELLETAT, D. 2003. Sedimentologic and geomorphologic tsunami imprints worldwide—a review. *Earth-Science Reviews*, 63, 10.
- SOMETCUBA. 2004. *Lista cronológica de todos los huracanes que han afectado a Cuba desde 1799 hasta el 2003*. [Online]. 2019].
- STEWART, S. 2017. Hurricane Mathew.
- SWITZER, A. & JONES, B. 2008. Large-scale washover sedimentation in a freshwater lagoon from the southeast Australian coast: sea-level change, tsunami or exceptionally large storm? . *The Holocene* 20.