

Tempestita del Holoceno Medio en la isla San José, Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica

Middle Holocene tempestite from San José island, Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica

Teresita Aguilar^{1*}, Percy Denyer^{1,2} y Sandra Arredondo³

¹Universidad de Costa Rica, Centro de Investigación en Ciencias Geológicas (CICG), San José, Costa Rica

²Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología (ECG), San José, Costa Rica

³Tecnoambiente Centroamericano S.A., San José, Costa Rica

*Autora de contacto: anatere.aguilar@gmail.com

(Recibido: 10/10/2019; aceptado: 15/01/2020)

RESUMEN: Las acumulaciones de conchas en zonas costeras son comunes y se pueden generar por fenómenos como tormentas (huracanes), tsunamis o actividad antrópica. Los depósitos de conchas, arenas y clastos de la isla San José se interpretan como originados por tormentas que ocurrieron hace 4360 ± 30 BP (antes del presente). Esta edad corresponde con la última parte de la subépoca Northgrippiano (Holoceno Medio). Constituyen depósitos de tempestitas, donde la especie dominante es *Pinctada mazatlánica* (75%), cuyas valvas se encuentran desarticuladas, con los bordes fragmentados y apiladas de forma preferencial con la concavidad hacia arriba. Además, se encuentran conchas completas y fragmentos de otros bivalvos como *Megapitaria* sp., *Cardita* sp., *Trachycardium* sp., *Anadara* sp. y *Spondylus* sp., así como fragmentos de gasterópodos retrabajados (partes de la espira y la columella), con costras y perforaciones de briozoos y esponjas, poliquetos, serpúlidos y algunos balanídeos, que constituyeron sustratos duros secundarios. Entre ellos *Mallea* sp., *Conus* sp., *Strombus* sp., *Strombus gracilior*, *Strombus granulatus*, *Siphonaria* sp., *Fissurella* sp., *Murex* sp., casi todos de gran tamaño (entre 10 y 20 cm). Estos depósitos se pueden correlacionar con eventos climáticos en el hemisferio Norte, que produjeron un incremento en la actividad de tormentas y con aridez en las regiones tropicales y cambios en la circulación atmosférica. Desde un punto de vista hidrodinámico el depósito presenta varios eventos tempestíticos, donde la altura del oleaje calculada para el mayor evento es de 7,6 m, por lo que se interpreta producida por una tormenta ciclónica clase 5.

Palabras clave: Acumulación de conchas, tormentas, hidrodinámica, paleoclima, áreas costeras.

ABSTRACT: Shell beds on coastal zones are common and can be generated by phenomena such as storms (hurricanes), tsunamis or anthropic activity. The shell, sandstone and clasts were deposited at the San José Island, and they are interpreted as originated by storms occurring 4360 ± 30 BP (before present). This age corresponds with the last part of the Northgrippian (Middle Holocene). They constitute tempestite deposits, where *Pinctada mazatlánica* is the dominant species (75%), with disarticulated valves and broken borders, and which are closely packed, predominantly concave-up. There are also completed and fragmented shells of other bivalves genera such as *Megapitaria* sp., *Cardita* sp., *Trachycardium* sp., *Anadara* sp. and *Spondylus* sp.; as well as reworked gastropod fragments (parts of the columella and the spiral), encrusted and perforated by bryozoans, sponges, polychaetes, serpulids, and some barnacles, which constituted secondary hard substrates. Among them *Mallea* sp., *Conus* sp., *Strombus* sp., *Strombus gracilior*, *Strombus granulatus*, *Siphonaria* sp., *Fissurella* sp., *Murex* sp. with all of great sizes (between 10 and 20 cm). These deposits can be correlated with climatic events in the Northern hemisphere, which produced an increase in storm activity and aridity in tropical regions as well as changes in global atmospheric circulation. From a hydrodynamic point of view, this deposit corresponds to several tempestite events, with maximum height-waves of 7.6 m that corresponds to category 5 cyclonic storm.

Keywords: Shell beds, storms, Holocene, hydrodynamic, paleoclimate, coastal areas.



INTRODUCCIÓN

La isla San José está localizada en el NW de Costa Rica, en el océano Pacífico; es parte de las islas Murciélago (Fig. 1), que conforman prácticamente el único archipiélago del país, específicamente se ubica en el extremo occidental de la península de Santa Elena. Este archipiélago está constituido por 5 islas principales y por lo menos 10 islotes, con una orientación preponderante E-W, separadas 5 km de tierra firme. La isla San José tiene un área de 1,5 km² y una altura máxima de 140 m. Esta zona pertenece al Área de Conservación Guanacaste, que en su conjunto fue declarada como Patrimonio de la Humanidad en el año 1999.

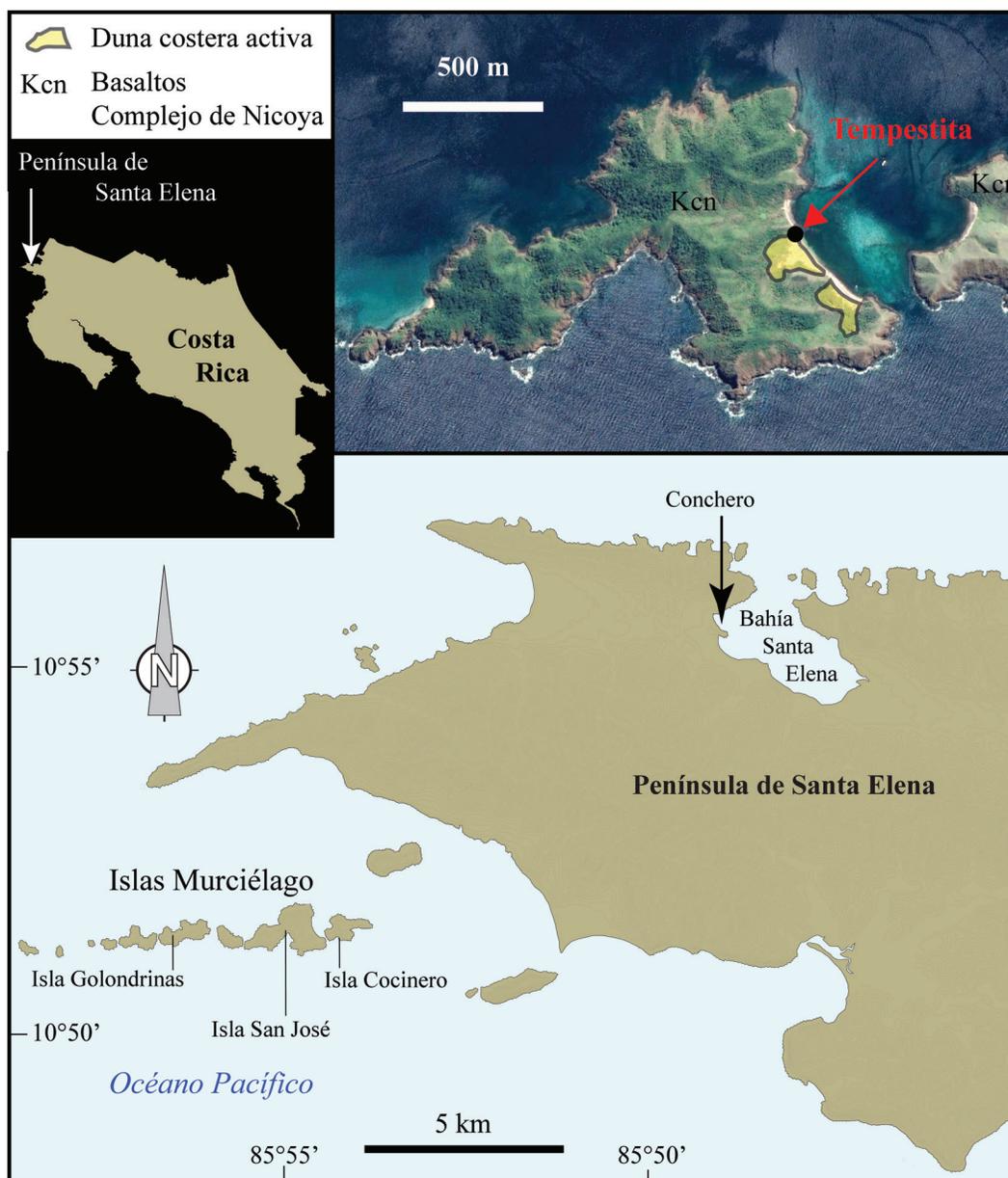


Fig. 1: Mapa de ubicación de la Isla San José, Archipiélago Islas Murciélago y contexto geológico geográfico. Imagen de *Google Earth* 2019.

Además, la península de Santa Elena goza de un estatus de interés público, según decreto publicado en el 2011 (N° 36574-MINAET), en el que, como una razón para esta declaratoria, se especifica que: “la geodiversidad, entendida como la diversidad geológica y geomorfológica, es un factor esencial que condiciona la diversidad biológica, cultural y del paisaje”. Es un lugar de una belleza escénica excepcional y que, además, dentro de sus “tierras”, se puede escudriñar una parte antigua de la historia geológica del sur de América Central, fundamental para entender la evolución geológica regional. Esta región es parte del patrimonio geológico del país.

Desde un punto de vista geológico, las islas Murciélagos están constituidas por basaltos del Complejo de Nicoya (Madrigal, Gazel y Denyer, 2019) (Figs. 1 y 2A). Contiene estructuras de disyunción columnar y lavas en almohadilla muy bien desarrolladas, que evidencian un basculamiento hacia el N franco, con un ángulo que varía entre 70° y 90°. Esta característica estructural es la que produce la alineación E-W del archipiélago. La edad de estas rocas, según las dataciones radiométricas de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ publicadas, específicamente en la isla Golondrina (Fig. 1), es de $113,43 \pm 3,48$ Ma (Madrigal et al., 2015; Madrigal, Gazel, Flores, Bizimis y Jicha, 2016), y en la isla Cocinero (Fig. 1) con una edad de $109,0 \pm 2$ Ma (Hauff, Hoernle, Van Den Bogaard, Alvarado y Garbe-Schönberg, 2000). Sobre los basaltos se encuentra un grupo de dunas fósiles (Denyer, Cortés y Cárdenes, 2006), con una edad convencional (Beta Analytic 86182) de 14300 años BP (antes del presente). Actualmente también puede verificarse la existencia de dunas activas en la isla San José (Fig. 1), lo que indica que la actividad de los vientos alisios ha sido persistente en el Pleistoceno terminal hasta el presente (Fig. 2 A, B).

La estructura fisiográfica del NW de Costa Rica y S de Nicaragua está constituida por el final de la Cordillera Volcánica de Guanacaste, seguida hacia el N por tierras bajas, esto causa que las aguas cálidas de la superficie sean removidas por los vientos alisios, que vienen del NE hacia el SW, lo que produce la surgencia (*upwelling*) de aguas frías y puede provocar que la temperatura del agua alcance valores tan bajos para la región como 14°C (Cortés, 2017).

Desde un punto de vista climático actual, la isla San José pertenece a la región Pacífico Norte, que comprende la provincia de Guanacaste y zonas aledañas, específicamente es un clima tropical con estación seca. Esta región se enmarca dentro de la subregión Central del Pacífico Norte (PN2), que comprende el golfo de Nicoya, planicie guanacasteca, golfo de Papagayo, La Cruz y península de Santa Elena; que corresponde con una zona caracterizada por períodos secos prolongados (Solano-Quintero y Villalobos-Flores, 2001). Según Araya-Villalobos y Sanabria-Valverde (2010) e Instituto Meteorológico Nacional (2019), la región de estación meteorológica de Santa Rosa presenta una precipitación anual alrededor de 1500 mm, con un promedio anual de 9 días de lluvia, datos obtenidos para el período de 1970 a 2005. El tipo de vegetación de la región se define como bosque tropical seco.

Con respecto a las características del viento se puede decir que en los meses de la estación seca (diciembre a abril), el viento se acelera en el Caribe, lo que se proyecta por el paso de bajo nivel topográfico al norte de Costa Rica y se genera un chorro de viento en todo el Pacífico Norte de Costa Rica, lo cual produce modificaciones sustanciales en las condiciones de oleaje (Lizano, 2007).

El viento promedio tiene una dirección hacia el S52°W, con una velocidad promedio de 5,2 m/seg y un máximo de 145,03 m/seg. El oleaje es alrededor de 1,46 m y el máximo de 3,28 m. Las mareas, medidas en el golfo de Santa Elena y bahía Culebra tienen un rango de 228 cm, con una marea con valores de unos 135 cm (Lizano, 2006).

La dirección general de las corrientes en la costa pacífica de Costa Rica es de SE a NW (Kessler, 2006), cerca de la costa la formación de remolinos provoca corrientes en dirección opuesta, mientras que los flujos de superficie fluyen al NW (Cortés, 2016), un fenómeno importante que afecta principalmente el NW de Costa Rica.

En áreas costeras marinas, lacustres o fluviales, se encuentran depósitos de conchas que pueden tener diferentes orígenes. Los más comunes son los debidos a eventos ciclónicos como las tormentas y huracanes (los depósitos de tempestitas se relacionan con estos), a eventos sísmicos como los tsunamis (tsunamitas) y a la actividad antrópica, como los depósitos tipo conchero arqueológico. Los depósitos formados por tormentas se conocen como tempestitas o tormentitas, las cuales probablemente se forman durante caídas del nivel del mar y se preservan mejor durante los niveles de mar más bajos (*lowest sea level stand*). Seilacher (1982), indica que en sedimentos marinos someros (plataforma somera-litoral), las tormentas son los eventos más comunes, lo mismo sucede en el registro sedimentario, donde las tormentas son los eventos más frecuentes, por lo que los cataloga como catástrofes que son lo suficientemente comunes para aparecer en cualquier sección estratigráfica, pero en términos de la duración de una vida humana y su experiencia todavía son llamados “eventos raros”.

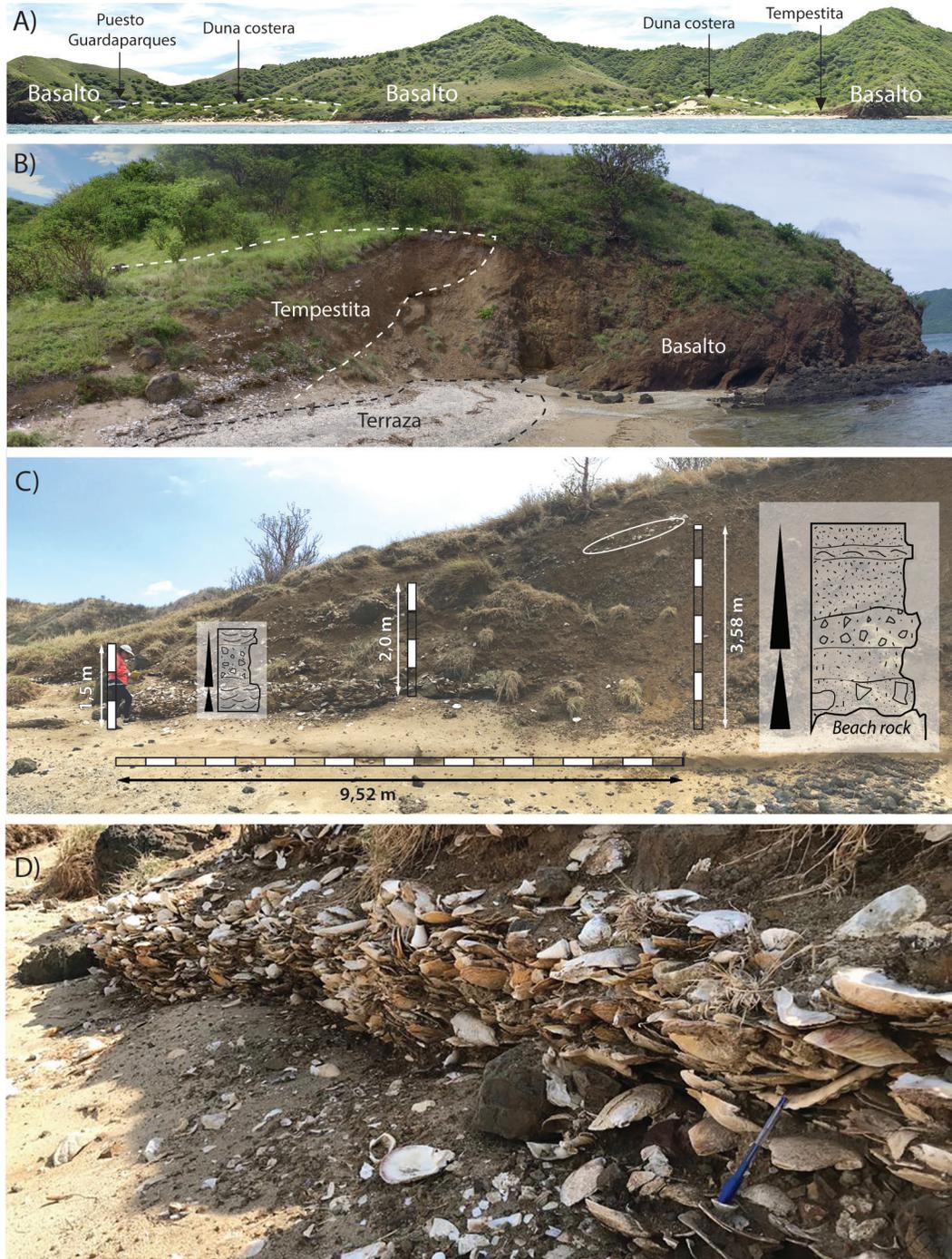


Fig. 2: **A)** Vista panorámica que muestra el entorno geológico-geomorfológico de la isla San José. **B)** Fotografía oblicua desde dron, que muestra la posición de la tempestita en la isla San José. Fotografía de F. Chavarría. **C)** Forma y dimensiones del depósito, con columnas litológicas esquemáticas. **D)** Acumulación de conchas, principalmente *P. mazatlánica*, desarticuladas, cercanamente empaquetadas y con la concavidad hacia arriba, sobre la terraza.

Según Pielke Jr., Rubiera y Landsea, (2003) no existe comunidad costera al norte de la latitud 10° N que sea inmune al efecto de huracanes, mientras que las porciones al S de los 10° N tienen una probabilidad menor o igual al 1% de ser azotadas por un huracán al año. Las zonas costeras también se pueden ver afectadas por tsunamis, pero los tsunamis son menos frecuentes que las tormentas, ocurriendo aproximadamente uno cada diez años en el océano Pacífico, donde son más comunes por las características tectónicas (Morton, Gelfenbaum y Jaffe, 2007). Estos mismos autores definen las diferencias hidrodinámicas y sedimentológicas entre tsunamis y tormentas por los espesores de los depósitos, los generados por tormentas son más gruesos, mientras que los formados por tsunamis son más finos y extendidos. Además, los depósitos generados por tormentas presentan laminación de sedimentos gruesos y finos debidos a la alta frecuencia del oleaje y abundantes conchas dispuestas en forma laminar; por el contrario, los tsunamis presentan depósitos con granulometrías más finas, con pocas o ninguna estructura sedimentaria.

En el extremo N de la playa de la isla San José (coordenadas geográficas $10^{\circ}51'26''$ N $85^{\circ}54'45''$ W), se encuentra un depósito inconsolidado, lenticular de unos 10 m de extensión y una altura entre 1,5 y 4 m.

Con este trabajo se pretende demostrar que este depósito sedimentario (Fig. 2 A, B) fue originado como un depósito de tormenta, ocurrido durante el Holoceno, además de aportar la descripción, estructura e hidrodinámica del material acumulado, con el objetivo de realizar una aproximación de la altura del oleaje que generó el depósito y de esta forma tener una idea de la energía de la tormenta que lo originó, y su posible relación con eventos mundiales.

ASPECTOS TEÓRICOS: TIPOS DE DEPÓSITOS

Se considera que existen varias posibilidades en que pueden haberse formado los depósitos de isla San José, estas serían de origen antrópico (conchero), tormentas (tempestita) o tsunamis (tsunamita).

Con respecto a los depósitos antrópicos, se puede decir que, a lo largo de la historia de la humanidad, muchas comunidades se han asentado en áreas costeras y mucha gente las visita (Bird, 2008), aprovechando sus recursos y acumulando sus desechos en forma de basureros o concheros, que también han modificado la morfología costera (Hammond, Zubimendi y Zilio, 2013). Estos son depósitos compuestos principalmente por conchas, pero que generalmente contienen una gran diversidad de materiales, conformando de forma conjunta un basurero. Hay que destacar la gran capacidad de conservación del material que ofrecen estos depósitos, debido a la descomposición del carbonato cálcico, que produce un efecto aislante frente a la acidez del suelo (Blog de Estudios Arqueomalacológicos, 2008).

Según Hammond et al., 2013, los concheros son parte constitutiva del paisaje, el cual ha sido intensamente modificado por las actividades sociales y naturales. Estos procesos son particularmente significativos, en el caso de los concheros, ya que están conformados principalmente por el desecho del consumo de moluscos, los cuales poseen una alta tasa de depositación y gran resistencia a procesos postdeposicionales, tanto a nivel de conjunto como de las valvas como partículas sedimentarias, así como una buena visibilidad (Claassen, 1998).

En resumen, los concheros son depósitos desordenados que se caracterizan por la presencia de una alta densidad de valvas de moluscos, además de restos óseos, artefactos líticos, carbones y proporciones variables de matriz sedimentaria. (Hammond et al., 2013), indican que los concheros presentan una gran variabilidad en cuanto a su morfología, localización, tamaño y funcionalidad (Álvarez, Godino, Balbo y Madella, 2011), muchas veces forman montículos.

Las áreas costeras también han sido afectadas tanto por tsunamis, como por tormentas. Los tsunamis son olas de grandes proporciones causadas por terremotos, erupciones volcánicas o deslizamientos, mientras que las tormentas se forman por perturbaciones atmosféricas, que pueden causar oleaje anómalo de grandes dimensiones.

Si se compara la incidencia de tsunamis con la de tormentas en la región centroamericana, se puede indicar, según Fernández (2002), que desde 1539 han ocurrido 49 tsunamis, 37 en el Pacífico y 12 en el Caribe. Además, que el mayor potencial tsunamigénico en la costa pacífica es el segmento que se extiende desde Guatemala hasta Nicaragua, así como la parte central de Costa Rica. Mientras en el período 1901-1971, 125 ciclones tropicales impactaron de manera indirecta a Costa Rica (Alvarado y Alfaro, 2003). Además, desde 1900 a la fecha han ocurrido más de 50 huracanes destructivos en la región entre los que destacan eventos extremos como Janet, Hattie, Fifi y Mitch en 1955, 1961, 1974 y 1998 respectivamente (Pielke Jr. et al., 2003). La temporada de huracanes del 2017 en el Atlántico, terminó con cuatro huracanes superiores al promedio, entre los cuales Harvey, Irma y María fueron particularmente destructivos para la infraestructura costera en Estados Unidos y Puerto Rico (Johnson, Ledesma-Vázquez y Guardado-France, 2018).

En el registro geológico se pueden reconocer ciertos intervalos de tiempo que han experimentado un calentamiento global igual o superior que el actual. Por ejemplo, Johnson et al. (2018) indican que durante el “*Pliocene Warm Period*”, hace 5-3 Ma se dieron condiciones de un fenómeno “El Niño”, que afectó fuertemente las condiciones climáticas en latitudes bajas, tanto en el océano Pacífico como en el Atlántico, con temperaturas globales más altas de forma permanente, lo cual tuvo como consecuencia la incidencia de tormentas más intensas y más lluvias.

Para la interpretación del afloramiento de la isla San José, se analizaron diversos trabajos con el fin de encontrar los criterios para diferenciar entre depósitos asociados a tormentas (tempestitas), depósitos asociados a tsunamis (tsunamitas) y concheros de origen arqueológico (Fig. 1). A continuación, se hace una síntesis de las diferencias entre los depósitos antes mencionados.

Tempestitas y tsunamitas

Morton et al. (2007), presentan una comparación entre las características físicas de tsunamis y tormentas, considerando la composición de los sedimentos, la textura, los tipos de gradación, la organización de la estratificación, el espesor, la geometría y la conformación del paisaje. Estos autores indican que la diferenciación es consistente a pesar de los pocos datos analizados y que lo ideal sería hacer complementariamente análisis paleontológicos y químicos que permitieran una diferenciación inequívoca. Señalan como características de los depósitos arenosos asociados a tsunamis, que son generalmente menores a 25 cm de espesor, se extienden cientos de metros hacia el continente y rellenan la topografía preexistente. Generalmente consisten de una única capa homogénea o pocas capas delgadas, con frecuencia con clastos de lodo o láminas de lodo intercaladas. Estos depósitos son el resultado de pocas olas de alta velocidad y período largo, con profundidades mayores a los 10 m, las cuales pueden viajar largas distancias en poco tiempo y son generadas por terremotos, deslizamientos submarinos, erupciones volcánicas o impactos de meteoritos. El transporte de sedimentos es principalmente por suspensión y distribuyen la carga en regiones amplias.

Por otro lado, Morton et al. (2007) mencionan que los depósitos arenosos asociados a tormentas tienen un espesor mayor a los 30 cm, generalmente no se extienden mucho desde la playa (unos 300 m) y tienden a rellenar la topografía preexistente. Típicamente se componen de muchas láminas planas subhorizontales, organizadas en conjuntos de láminas, que pueden presentar gradación normal o inversa, no contienen clastos ni láminas internas de lodo. La inundación debida a una tormenta generalmente es gradual y prolongada, consiste de muchas olas que erosionan las playas y las dunas, a una profundidad menor a los 3 m, por lo que el transporte de sedimentos principal es como carga de fondo por tracción y la carga es depositada en una zona relativamente cercana a la playa. Se producen por coincidencia entre procesos atmosféricos y oceánicos, donde los eventos ciclónicos y las bajas presiones barométricas se combinan para levantar el nivel de las aguas y generar olas destructivas. Estas diferencias entre los depósitos debidos a tsunamis o a tormentas se relacionan con las diferencias en las condiciones hidrodinámicas y los procesos de selección de sedimentos durante el transporte (Morton et al., 2007).

Los eventos de alta energía, como tormentas/ huracanes y tsunamis también pueden dar origen a capas de conchas, tanto por las mareas como por los flujos de resaca (Puga y Aguirre, 2017). Estos autores indican que para distinguir entre los depósitos de tempestitas bioclásticas y tsunamitas hay que considerar las siguientes características:

1. Las tsunamitas están caracterizadas por una mezcla de organismos dispersos en el depósito, mientras las tempestitas incluyen organismos muy cercanamente espaciados.
2. La fragmentación es más alta en las tempestitas que en las tsunamitas.
3. Los fragmentos de concha están predominantemente redondeados en las tempestitas y son preferencialmente angulares en las tsunamitas.
4. Los restos esqueléticos se orientan en forma horizontal o subhorizontal (menos de 30° con respecto a la estratificación) en tempestitas, mientras que en las tsunamitas son oblicuas (entre 30° y 60°) y perpendiculares (mayores a 60°).
5. Las conchas cóncavas tienden a estar apiladas con la concavidad hacia arriba en las tempestitas y arregladas caóticamente en las tsunamitas.
6. Formación de costras y perforaciones tienden a ser más abundantes en las tempestitas.

Los estudios tafonómicos detallados también pueden ayudar a distinguir entre los depósitos de conchas debidos a tormentas fuertes o a tsunamis (Donato *et al.*, 2008). Estos autores resaltan tres características tafonómicas específicas de los depósitos tsunamigénicos:

1. Poco espesor y mayor extensión lateral de los depósitos de conchas.
2. Presencia de bivalvos con valvas articuladas, pero alóctonos (no en posición vital).
3. Muchos fragmentos de conchas angulares.

Tormentas recientes

Con respecto a las condiciones durante los huracanes, la Administración Nacional del Océano y Atmósfera del Servicio Nacional del Clima de USA (NOAA, 2005), reporta datos históricos de alturas máximas de oleaje en el área marina, dentro de la trayectoria del huracán Katrina en promedio, de 13,7 metros. Este evento, ocurrido en agosto del 2005, fue categorizado como clase 5 dentro de la escala Saffir-Simpson (NOAA, 2005), Omar Lizano (2011), corrió el modelo SWAM para obtener la comparación del oleaje de dos tormentas Felix del 2007 y Greta de 1978, encontrando alturas significativas de 3 y 7 m respectivamente.

Generalmente las tormentas clasificadas como huracanes y en el rango de escala entre 4 y 5, presentan una energía suficiente para producir oleaje de altura significativa que al acercarse a la costa tiene la capacidad de levantar el material ubicado en la plataforma de abrasión y depositarlo tierra adentro, con un alcance que puede superar las dunas costeras más externas de la playa.

Nordstrom y Jackson (1995) reportan alturas significativas de olas del orden de los 6,1 a 9,1 metros en la zona de New Jersey en una tormenta ocurrida en marzo de 1962, con velocidades del viento de hasta 25,9 m/s.

MÉTODOS

La isla San José es de difícil acceso, por lo que, para llegar al sitio se hicieron dos giras de 3 días, en los años 2017 y 2019 para realizar este trabajo; con el fin de tomar muestras, analizar y medir un depósito constituido por capas de conchas, gravas, clastos centimétricos y decimétricos y arenas que presentan una organización definida y estructuras sedimentarias. Se observaron las diferentes capas y se procedió a medir los espesores y levantar una columna general (Fig. 2 C). Se realizaron observaciones en el campo sobre la composición, granulometría y estructuras de los sedimentos y se tomaron algunas muestras representativas de los restos faunísticos con el fin de hacer un reconocimiento taxonómico de las especies dominantes y buscar características que aporten evidencias para entender las condiciones tafonómicas del depósito. Se hicieron observaciones en el terreno y por medio de fotografías, sobre articulación, abrasión, disolución, fragmentación, bioerosión, incrustación, selección, empaquetamiento, orientación y polaridad de los bioclastos (Fürsich y Oschmann, 1993; Varela, Richiano y Poiré, 2011).

Se tomaron muestras de conchas de *Pinctada mazatlánica* y se enviaron a fechar por medio de una datación de radiocarbono al laboratorio *BETA Analytic Radiocarbon Dating*, con el fin de determinar su edad. La edad de radiocarbono convencional se calibró usando el programa *Calib Rev 7.0.4*, con base en Stuiver y Reimer (1993).

Para conocer la altura del oleaje y la energía de la tormenta que le dio origen, se hicieron estudios hidrodinámicos del material acumulado.

Para calcular la altura de las olas de tormenta, se utilizó la fórmula de Nott (2003), mejorada por Benner *et al.* (2010) y Pignatelli, Sansò y Mastronuzzi (2009). Esta fórmula fue utilizada por Johnson *et al.* (2018). En esta fórmula se considera la forma, el tamaño y la densidad, de los clastos del depósito que se analiza. Para cantos rodados articulados, se aplica:

$$H_s \geq [2c (\rho_s - \rho_w / \rho_w)] / CL$$

Dónde: c = eje de clastos (se considera el clasto basáltico de mayor tamaño medido en el afloramiento ya que es el que requiere la mayor energía de arrastre y levantamiento) 0,45 m, ρ_s = densidad de clasto (densidad de basaltos del Complejo de

Nicoya fracturado y con minerales secundarios, G. Soto [comunicación personal, 2019]), 2,5 gr/cm³, ρ_w = densidad del agua, CL= coeficiente de ascenso, que típicamente tiene un valor de 0,178

Además de la forma, el tamaño y la densidad de los clastos, el entorno previo al transporte de estos depósitos costeros es un factor que incide en la altura de las olas requerida para movilizarlos hasta el sector de depositación.

Se realizó un sobrevuelo con un dron, con base en el cual se hizo un modelo fotogramétrico para el cálculo de volumen del depósito. Este modelaje fue muy hipotético, pues no se tienen datos de la morfología previa al depósito.

DESCRIPCIÓN DEL DEPÓSITO SEDIMENTARIO DE ISLA SAN JOSÉ

El depósito de isla San José está semiconsolidado, de forma lenticular, con unos 10 m de extensión y una altura entre 1,5 y 4 m (Fig. 2C). El depósito inicia con una base erosiva y una capa de conchas de unos 50 cm de espesor, en posición subhorizontal (aproximadamente 3°), que yacen en forma discontinua sobre la terraza o berma de playa en la parte izquierda del depósito. Las conchas son mayormente bivalvos de la especie *Pinctada mazatlánica* (75%) (Fig. 2 B), cuyas valvas se encuentran desarticuladas, con los bordes fragmentados y apiladas principalmente con la concavidad hacia arriba, en contacto unas con otras o en una escasa matriz arenosa (Fig. 2D). La mayoría conservan por lo menos parte de la capa interna de nácar, muchas presentan restos del color, están bastante completas y tienen un tamaño muy uniforme (alrededor de 10 cm de diámetro). Además, se encuentran fragmentos y conchas completas de otros bivalvos como *Megapitaria* sp., *Cardita* sp., *Trachycardium* sp., *Anadara* sp., *Spondylus* sp. y fragmentos de gasterópodos retrabajados (partes de la espira y la columella) y con costras y perforaciones de briozoos, esponjas, poliuetos, serpúlidos y algunos balanídeos, que indican que estuvieron expuestos en la playa como sustratos duros secundarios, antes de ser incorporados al depósito. Entre ellos *Mallea* sp., *Conus* sp., *Strombus* sp., *Strombus gracilior*, *Strombus granulatus*, *Siphonaria* sp. *Fissurella* sp., *Murex* sp., casi todos de gran tamaño (entre 10 y 20 cm).

Sobre la capa con conchas se presenta un lente de arena de unos 40 cm de espesor con niveles centimétricos de conchas y clastos a veces muy grandes, con aproximadamente 10° de inclinación y con estratificación cruzada de bajo ángulo en las arenas (Fig. 3A).

Al lado derecho del afloramiento que se muestra en la figura 2 C y D, las capas tienen una inclinación mayor, cercana a los 20°. En la parte inferior se puede observar, en la base, una roca de playa (*beach rock*), sobreyacida por unos 2 m de clastos angulares de basaltos, en una matriz arenosa (brecha), organizados en estratos decimétricos, intercalados con arenas medias con clastos, seguido por un lente de arenas, de aproximadamente 1 m de espesor con un nivel de conchas centimétrico intercalado, culminando con una arena fina en la parte superior (Fig. 3 C, D). Se pueden reconocer al menos dos eventos de gradación positiva, la tendencia principal es que se hacen más finos hacia arriba y hacia el continente (*upwardfinning/ landward-finning*). El depósito cubrió y rellenó la topografía preexistente formando una especie de terraza (*overwash terrace*) (Figs. 2 A, B, C).

Datos tafonómicos:

La capa de conchas está conformada casi totalmente por moluscos, especialmente bivalvos (90%), de ellos la especie dominante (75%) es *P. mazatlánica*. Además, se encuentran conchas de *Megapitaria* sp., *Cardita* sp., *Trachycardium* sp., *Anadara* sp. *Spondylus* sp. y los gasterópodos *Mallea* sp., *Conus* sp., *Strombus* sp., *Strombus gracilior*, *Strombus granulatus*, *Siphonaria* sp. *Fissurella* sp., *Murex* sp., principalmente.

A continuación, se resumen las características tafonómicas del depósito:

- 1) Los bivalvos se encuentran con las valvas desarticuladas (99%), principalmente en la parte inferior izquierda del afloramiento (capa de conchas).
- 2) La especie *P. mazatlánica* constituye alrededor de un 80% de los moluscos y conserva restos iridiscentes de la capa interna de nácar y partes de la coloración original. (Fig. 3B).
- 3) La mayoría de las conchas de *P. mazatlánica* se encuentran desarticuladas y se disponen con la concavidad hacia arriba y presentan los bordes quebrados (Fig. 2D, 4A).
- 4) Se encuentran cercanamente empaquetadas casi en contacto valva con valva, con muy poca matriz arenosa. El tamaño de las conchas es uniforme y muestran evidencias de selección por transporte (Fig. 2D).
- 5) Las conchas de los otros bivalvos se presentan dispersas en el afloramiento, en diferentes posiciones, muchas veces con la concavidad hacia abajo.

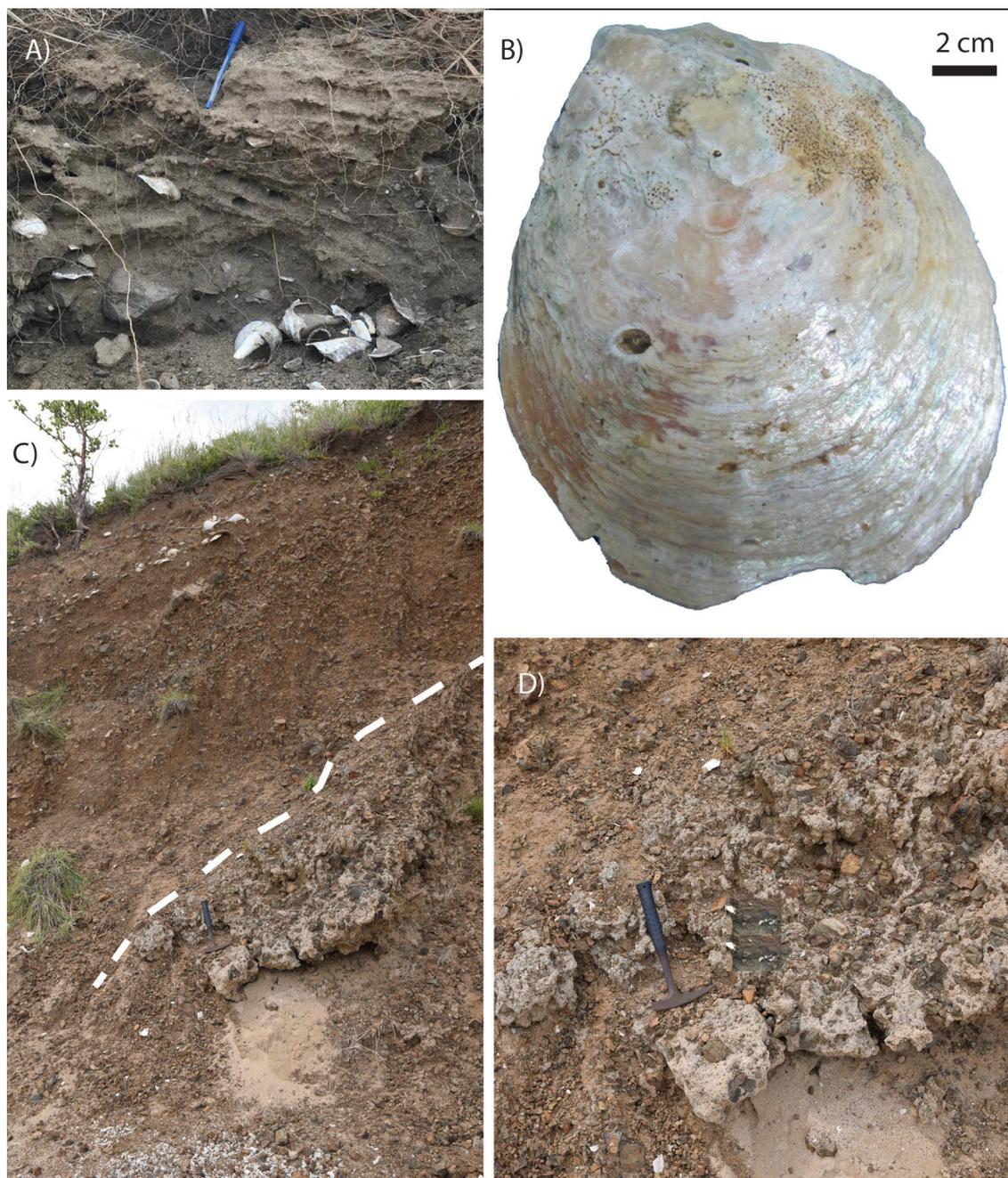


Fig. 3: **A)** Estratificación cruzada de bajo ángulo en lentes de arena. **B)** Valva de *P. mazatlánica* donde se puede observar los restos de la coloración, la capa de nacar y algunas perforaciones. **C)** Depósitos clásticos y las capas de concha sobre la roca de playa con un contacto irregular, en el lado derecho del afloramiento. La línea blanca punteada corresponde con el techo de la roca de playa. **D)** Detalle de la roca de playa (beach rock) en la base de la tempestita (lado derecho del afloramiento).



Fig. 4: **A)** Lado izquierdo del afloramiento donde se puede observar el nivel principal de acumulación de conchas y otros niveles de menor espesor (*Shell beds*). **B)** Nivel clástico mostrando varios eventos de gradación, positiva en el lado derecho del afloramiento. Se puede observar que los clastos son de gran tamaño y muy angulares.

6) Los gasterópodos en general y algunos bivalvos se encuentran fragmentados, redondeados y desgastados, predominan partes de la espira y la columella, muchas veces presentan perforaciones posiblemente de esponjas y poliquetos e incrustaciones de briozoos, serpúlidos y balanídeos. (Fig. 3B).

Los depósitos de la isla San José presentan un arreglo por tamaño, tanto de las conchas como de los clastos, lo cual indica que estuvieron sometidos a un mecanismo de transporte de alta energía que favoreció el ordenamiento de los materiales de tamaño y forma similar y en el caso de los sedimentos arenosos, la formación de estructuras sedimentarias como laminaciones, principalmente cruzadas y gradación. (Fig. 3A).

Consideraciones hidrodinámicas:

Físicamente, este depósito presenta una forma de cuña hacia el sur, con una extensión aproximada 9,52 m y una altura máxima de unos 3,58 m en el extremo norte del afloramiento frente a la playa. Se hizo un cálculo aproximado que dio un volumen de 345 m³.

Dentro de los materiales que componen el depósito, se identifican las conchas de bivalvos y gasterópodos con niveles más concentrados de estos materiales a diferentes alturas y en forma de niveles intercalados con arenas y clastos decimétricos de rocas del Complejo de Nicoya, que presentan diferentes granulometrías, la base del depósito es irregular y semi-consolidado.

Para adoptar un modelo hidrodinámico, se estimó la densidad de los diferentes componentes que conforman el depósito con el fin de calcular aproximadamente, la energía necesaria para mover los diferentes clastos del fondo arenoso somero de la costa hasta la posición en la que se encuentran actualmente. Además, se consideró que para el período de tiempo de deposición, el nivel del mar se ubicaba unos 3 a 4 m por debajo del nivel actual (Lighty, Macintyre y Stuckernrath, 1982; Toscano y Macintyre, 2003). Se utilizó la fórmula de Nott (2003) mejorada por Benner et al. (2010) y Pignatelli et al. (2009). Con base en el análisis realizado, se determinó que el arrastre de las partículas tuvo energía suficiente para alcanzar alturas entre 6 y 7 m sobrepasando el sector de *overwash* o parte trasera de la berma de playa o dunas frontales, de forma tal que las conchas obtuvieron la disposición cóncava hacia arriba y se depositaron desarticuladas sobre la base rocosa. Adicionalmente, se ubican otros niveles con características diferentes, por ejemplo, con disposición cóncavas hacia abajo y gradaciones positivas y negativas en capas sobrepuestas sobre la mayor acumulación de conchas, que muestran otros eventos de tormentas en la parte superior del depósito.

DISCUSIÓN

En la península de Santa Elena, y en el área de Conservación Guanacaste en general, existen una gran cantidad de depósitos (concheros), constituidos esencialmente por restos de conchas (moluscos, cangrejos), huesos, fragmentos de recipientes cerámicos y herramientas de piedra (Herrera, 2008). Para el depósito de la isla San José se descarta que tenga un origen como conchero, principalmente porque se puede observar un ordenamiento específico de los materiales que lo componen,

Además, estos concheros tienen una temporalidad entre 300 a.C. y 1350 d.C. (Herrera, 2008), edad que difiere de la datación de una concha del depósito de isla San José. Por otro lado, Herrera (2008) hace la siguiente referencia a la isla San José:

En la isla San José visitamos un supuesto conchero que está frente a la playa y es notable en una pared que se eleva hacia una loma. Hay un estrato cargado de conchas, la mayoría de ellas, *Pinctada mazatlanica*, *Spondylus princeps*, *Strombus galeatus*, ostiones y otras especies de tallas menores en menor densidad. En una visita anterior de parte del arqueólogo Sergio Chávez, se asignó un origen precolombino a la acumulación de conchas observadas. Sin embargo, no existe tal registro en la base de datos del Museo Nacional de Costa Rica. Durante la visita no se observaron restos de materiales arqueológicos asociados de cerámica, piedra o arqueofauna (restos óseos de animales). La escasez de agua en la isla y la ausencia de otros vestigios asociados no permiten corroborar que esta acumulación de conchas sea de origen precolombino. Ni siquiera parece ser de origen humano relacionado con la supuesta explotación de perlas. De ser así se habrían observado otros restos relacionados (p. 26).

Este depósito se interpreta como una tempestita, o sea un depósito asociado a uno o varios eventos de alta energía, particularmente tormentas y no como una tsunamita o un conchero de origen arqueológico, debido a las siguientes características que presenta.

- 1) Espesor de las capas de entre 0,5 cm a 3 m.
- 2) Capas de poca extensión hacia el continente (restringidas a la zona costera) y rellenan la topografía preexistente.
- 3) Son intercalaciones de capas de conchas, clastos y arenas con laminaciones paralela e inclinada de bajo ángulo (HCS).
- 4) Son varios niveles de conchas o clastos de diferente espesor, presentan gradación, intercaladas con capas de arenas medias a gruesas con laminaciones paralelas e inclinadas.

- 5) No contienen ni clastos ni láminas internas de lodo.
- 6) Las conchas en los niveles bioclásticos se encuentran bien empaquetadas y organizadas (cercanamente espaciadas, no dispersas en el depósito).
- 7) El depósito presenta muchos fragmentos de conchas principalmente gasterópodos, los cuales muestran indicios de retrabajo (redondeamiento) y de exposición subaérea, como son perforaciones y epizoos.
- 8) Los restos de conchas se orientan en forma horizontal o subhorizontal (menos de 30° con respecto a la estratificación).
- 9) Las conchas cóncavas tienden a estar apiladas, en su mayoría con la concavidad hacia arriba.
- 10) Las conchas de los bivalvos tienen un tamaño similar, lo que indica que estuvieron sometidas a un mecanismo de transporte y selección antes del depósito.
- 11) No se encuentran fragmentos de cerámica ni restos líticos, que permitan asociarlo a concheros arqueológicos.

Además, como la inundación debida a una tormenta, generalmente es gradual y prolongada y consiste de muchas olas que erosionan las playas y las dunas, a una profundidad menor a los 3 m, esto causa que el transporte de sedimentos principal sea como carga de fondo por tracción y la carga es depositada en una zona relativamente cercana a la playa. Se producen por coincidencia entre procesos atmosféricos y oceánicos, donde los eventos ciclónicos y las bajas presiones barométricas se combinan para levantar el nivel de las aguas y generar olas destructivas (Morton et al., 2007). Estos depósitos ocurren cuando vientos muy fuertes provenientes del mar levantan las aguas costeras a niveles excepcionalmente altos, durante unas horas o incluso días, haciéndose más evidentes cuando coinciden con mareas más altas. Generan cambios muy rápidos en las áreas costeras en periodos de tiempo muy cortos. La erosión costera puede ser muy severa, principalmente si las áreas costeras están conformadas por sedimentos inconsolidados (Bird, 2008).

Las tormentas costeras movilizan y transportan grandes cantidades de material en la plataforma continental, produciendo depósitos característicos, los cuales pocas veces se conservan completos, debido al retrabajo por depósitos de tormentas sucesivas (Wiberg, 2000). Las capas de tormentas de mayor espesor son depositadas por olas y corrientes más fuertes.

En el caso de la isla San José, los vientos asociados a las tormentas generaron el oleaje necesario para provocar la remoción y transporte de los clastos y restos esqueléticos que se acumulaban en la plataforma externa (*shore face*), especialmente al pie del acantilado constituido por basaltos en almohadillas, al lado derecho del depósito, en conjunto con fragmentos de conchas. Al lado izquierdo se acumularon principalmente moluscos de una comunidad de *P. mazatlánica* que vivía o estaban acumulados en las cercanías. *P. mazatlánica* habita fondos arenosos o rocosos, en aguas someras entre 9 y 20 m de profundidad (Keen, 1971), por lo que las conchas no sufrieron un transporte muy prolongado y eso hizo que se conserven casi completas y con restos de color y de nacar, a pesar de ser tan inestable.

Se obtuvo la edad del depósito por medio de una datación de radiocarbono de una concha de *P. mazatlánica*. Dicha datación se realizó en el laboratorio especializado *BETA Analytic Radiocarbon Dating* (muestra Beta-500865). La datación arrojó una edad convencional de 4360 ± 30 BP (antes del presente), con un rango de 95% de probabilidad entre 4355 y 4028 años BP con la calibración realizada (Fig. 5). Esta edad corresponde con el Holoceno Medio, la última parte de la subépoca *Northgrippiano* (8326 a 4200 años) (ISQS, 2019).

Muchos de los trabajos realizados sobre eventos climáticos para el Holoceno, particularmente el Holoceno Medio al Tardío (Jong, Björck, Björkman y Clemmensen, 2006; Pouzet et al., 2018), principalmente para Norteamérica y Europa (Pouzet et al., 2018; Wanner, Solomina, Grosjean, Ritz y Jetel 2011) mencionan diferentes incrementos en la actividad de tormentas, generalmente relacionados con el inicio de los periodos de enfriamiento del Holoceno, tanto en la costa Atlántica como la Pacífica de Europa.

Un fuerte incremento en la ocurrencia de tormentas se dio en 4800, 4200, 2800, 2200, 1500, 1100 y 400-50 años BP en Suecia. Algunos de estos eventos coinciden con otras tormentas documentadas en la península Escandinava y en la región del Atlántico Norte, indicando el predominio de vientos fríos y huracanados durante esos periodos (Jong et al., 2006). Además, estos autores mencionan que estos periodos de incremento en la actividad de tormentas se correlacionan con fases de enfriamiento bien conocidas en la región del Atlántico Norte, sugiriendo una conexión con las fluctuaciones en los patrones de circulación atmosférica a gran escala.

Wanner et al. (2011) indican que estos enfriamientos estuvieron relacionados a una aridez en las regiones tropicales y a cambios en la circulación atmosférica. Además, una destacable ondulación a escala de milenios del llamado *Grand Solar Minima*, que se dio antes de 5 Ka y después de los 3 Ka BP. El evento de temperatura más notable es el de 4,2 Ka, debido a

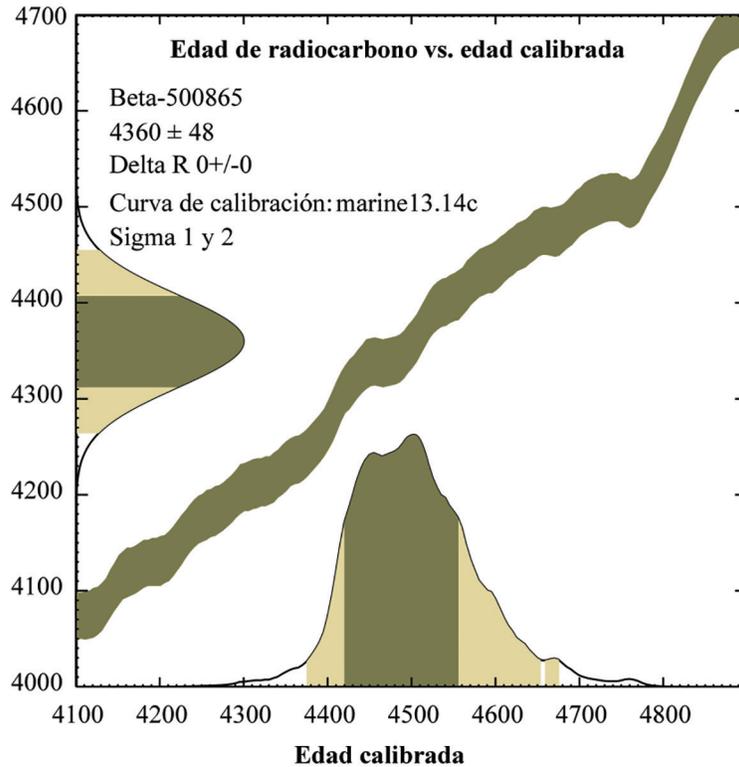


Fig. 5: Edad de Carbono 14 convencional versus la edad calibrada con el programa Calib Rev 7.0.4, con base en Stuiver y Reimer (1993).

que se puede relacionar con una sequía dramática y el colapso cultural en Asia y una sequía en Norte América (Wanner et al., 2011). En Costa Rica, estos eventos se pueden correlacionar con plataformas de coral relativamente bien desarrolladas en la isla Uvita del mar Caribe, que tiene una edad de 4310 ± 30 BP (muestra Beta-357627), según datos no publicados.

Utilizando la fórmula de Nott (2003), mejorada por Benner et al., 2010 y Pignatelli, et al. (2009) se estima que la altura del oleaje para la depositación del evento de tempestad más energético en el depósito de la isla San José es de 7,6 m, valor que califica dentro del rango de tormentas más fuertes, clasificadas categoría 5 según la escala Saffir-Simpson para Huracanes.

La Administración Nacional del Océano y Atmósfera del Servicio Nacional del Clima de USA (NOAA, 2005), reporta datos históricos de alturas máximas de oleaje en el área marina, dentro de la trayectoria del huracán Katrina en promedio, de 13,7 metros. Este evento, ocurrido en agosto del 2005, fue categorizado como clase 5 dentro de la escala Saffir-Simpson (NOAA, 2005, Omar Lizano (2011), corrió el modelo SWAM para obtener la comparación del oleaje de dos tormentas Felix del 2007 y Greta de 1978, encontrando alturas singificativas de 3 y 7 m respectivamente.

Generalmente las tormentas clasificadas como huracanes y en el rango de escala entre 4 y 5, presentan una energía suficiente para producir oleaje de altura significativa que al acercarse a la costa tiene la capacidad de levantar el material ubicado en la plataforma de abrasión y depositarlo tierra adentro, con un alcance que puede superar las dunas costeras más externas de la playa.

Nordstrom y Jackson (1995) reportan alturas significativas de olas del orden de los 6,1 a 9,1 metros en la zona de New Jersey en una tormenta ocurrida en marzo de 1962, con velocidades del viento de hasta 25,9 m/s.

Otvos (2011), define que la detección y documentación de los registros de huracanes en depósitos costeros generan instrumentos para intentar reconstruir la historia climática del Holoceno medio y tardío. El análisis puede ser complejo debido a los cambios en el nivel del mar, posiciones de la costa, formación y extinción de valles preexistentes y el impacto de los procesos de transgresión y regresión en estuarios y procesos de desbordamiento por tormentas.

CONCLUSIONES

Las tormentas fuertes y otros eventos ciclónicos afectan las áreas costeras, modificando las condiciones geológicas y ecológicas, por lo que constituyen un registro estratigráfico valioso para reconstruir condiciones climáticas y obtener edades precisas.

Los depósitos de conchas en áreas costeras pueden tener diferentes orígenes, eventos ciclónicos como las tormentas y huracanes que originan tempestitas, eventos sísmicos como los tsunamis dan lugar a tsunamitas y la actividad antrópica, como los concheros arqueológicos.

El depósito de la isla San José, se interpreta como una tempestita, o sea un depósito asociado a uno o varios eventos de alta energía, particularmente tormentas y no como una tsunamita o un conchero de origen arqueológico, debido a que presenta características que evidencian un transporte y depositación por un evento ciclónico, como son el espesor de las capas de entre 0,5 cm a 3 m, poca extensión hacia el continente (restringidas a la zona costera) y rellenan la topografía preexistente, estructuras sedimentarias como laminaciones paralela e inclinada de bajo ángulo (HCS), gradación, no contienen ni clastos ni láminas internas de lodo, empaquetamiento de las conchas, disposición de las conchas, fragmentación, articulación, selección, evidencias de transporte y de exposición subaérea. Además, no se encuentran fragmentos de cerámica ni restos líticos, que permitan asociarlo a concheros arqueológicos.

Depósitos como el estudiado constituyen evidencias importantes (registros de eventos que ocurrieron hace miles de años) para el estudio y comprensión de algunos eventos climáticos, principalmente tormentas fuertes con el fin de tratar de establecer periodos de recurrencia de estos eventos en el área de estudio y poder relacionarlos con otros eventos en el país y en el mundo.

Desde un punto de vista hidrodinámico, el depósito presenta varios eventos tempestíficos, donde la altura del oleaje calculada para el clasto basáltico de mayor tamaño es de 7,6 m, que actualmente se ubica a una altura aproximada de unos 3 m y que en el momento de depositación debe haber sido alrededor de 7 m, debido a que el nivel del mar se ubicaba unos 3 a 4 m por debajo del nivel actual. Con estos datos, el tipo de evento climático que generó el depósito en la isla San José califica como una tormenta categoría 5, según la escala definida para huracanes, y coincide con los valores medidos en eventos ciclónicos recientes, como Greta en 1978, Katrina en 2005 y Félix en el 2007.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto 830-B0-242 de la Vicerrectoría de Investigación del Centro de Investigación en Ciencias Geológicas (CICG) de la Universidad de Costa Rica. El Área de Conservación Guanacaste apoyó la investigación, especialmente en las personas de Alejandro Masis, Roger Blanco y María Marta Chavarría, quien también ayudó con la recolección de muestras y la documentación de fotografías, así como Felipe Chavarría, quien hizo fotografías y videos utilizando un *dron*. Omar Lizano, Eric Alfaro y Jorge Cortés prestaron valiosa ayuda con la bibliografía. Juan E. Vargas hizo el cálculo volumétrico del depósito. Las observaciones y correcciones de Guaria Cárdenes fueron sumamente útiles.

REFERENCIAS

- Alvarado, L. y Alfaro, E. (2003). Frecuencia de los ciclones tropicales que afectaron a Costa Rica durante el siglo XX. *Tópicos Meteorológico y Oceanográficos*, 10(1), 1-11.
- Álvarez, M., Godino, I. B., Balbo, A. y Madella, M. (2011). Shell middens as archives of past environments, human dispersal and specialized resource management. *Quaternary International*, 239, 1-7.
- Araya-Villalobos, M. C. y Sanabria-Valverde, N. (2010). *Climatología de Periodos quincenales secos, húmedos y de transición en las regiones climáticas del norte y Pacífico Norte, Costa Rica* (Tesis de licenciatura inédita). Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

- Benner, R., Browne, T., Brückner, H., Kelletat, D. and Scheffers, A. (2010): *Boulder Transport by Waves: Progress in Physical Modelling*. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 54(3):127-146. DOI: <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2010/0054S3-0022>
- Bird, E. C. F. (2008). *Coastal geomorphology: an introduction* (2nd ed.). Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- Blog de Estudios Arqueomalacológicos (2008). *¿Qué es un conchero?*. Recuperado de <http://arqueomalacologia.blogspot.com/2008/11/qu-es-un-conchero.html>
- Claassen, C. (1998). *Shells*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Cortés, J. (2016). *The Pacific coastal and marine ecosystems*. En M. Kappelle (Ed.), *Costa Rican Ecosystems* (pp. 97-138). Chicago: University of Chicago Press.
- Denyer, P., Cortés, J. y Cárdenes, G. (2006) Hallazgo de dunas fósiles de final del Pleistoceno en las islas Murciélago, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 33, 23-35.
- Donato, S. V., Reinhardt, E. G., Boyce, J. I., Rothaus, R. y Vosmer, T. (2008). Identifying tsunami deposits using bivalve shell taphonomy. *Geology*, 36, 199-202.
- Fernández, M. (2002). Daños, efectos y amenaza de tsunamis en América Central. *Revista Geológica de América Central*, 26, 71-83.
- Fürsich F. T. y Oschmann W. (1993). Shell beds as tools in basin analysis: the Jurassic of Kachchh. Western India. *Journal of the Geological Society*, 150(1), 169-185. doi: 10.1144/gsjgs.150.1.0169
- Gazel, E., Denyer, P. y Baumgartner, P. O. (2006). Magmatic and geotectonic significance of Santa Elena Peninsula, Costa Rica. *Geologica Acta*, 4, 193-202.
- Hammond, H., Zubimendi M. A. y Zilio L. (2013). Composición de concheros y uso del espacio: aproximaciones al paisaje arqueológico costero en Punta Medanos. *Anuario de Arqueología, Rosario*, 5, 67-84.
- Hauff, F., Hoernle, K., Van Den Bogaard, P., Alvarado, G. y Garbe-Schönberg, D. (2000). Age and geochemistry of basaltic complexes in western Costa Rica: Contributions to the geotectonic evolution of Central America. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 1(1) 1009. doi: 10.1029/1999GC000020
- Herrera, A. (2008). *Reconocimiento arqueológico de los Sectores Junquillal, Murciélago y Santa Elena. Parque Nacional Santa Rosa. Área de Conservación Guanacaste: Informe de viaje ACG*. Recuperado de <http://copa.acguanacaste.ac.cr:8080/handle/11606/344>
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN) (2019). *Atlas climatológico*. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/en/atlas-climatologico>
- Johnson, M. E., Ledesma-Vázquez, J. y Guardado, R. (2018). Coastal Geomorphology of a Holocene Hurricane Deposit on a Pleistocene Marine Terrace from Isla Carmen (Baja California Sur, Mexico). *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(4), 108. doi: 10.3390/jmse6040108
- Jong, R. D., Björck, S., Björkman, L. y Clemmensen, L. B. (2006). Storminess variation during the last 6500 years as reconstructed from an ombrotrophic peat bog in Halland, southwest Sweden. *Journal of Quaternary Science*, 21, 905-919. doi: 10.1002/jqs.1011

- Subcomission on Quaternary Stratigraphy (ISQS). (2019) *Major divisions*. Recuperado de <http://quaternary.stratigraphy.org/major-divisions/>
- Keen, M. (1971). *Sea shells of tropical west América*. Redwood, California: Stanford. University Press.
- Kessler, W. S. 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: a review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4), 181-217. doi: 10.1016/j.pocean.2006.03.009
- Lighty, R. G., Macintyre, I. G. y Stuckernrath, R. (1982). Acropora Palmata Reef Framework: A reliable indicator of sea level in the western Atlantic for the Past 10,000 years. *Coral Reefs*, 1(2), 125-130. doi: 10.1007/BF00301694
- Lizano, O. (2006). Algunas características de las mareas en la costa pacífica y caribe de centroamérica. *Ciencia y Tecnología*, 24(1), 51-64
- Lizano, O. (2007). Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica. *Ciencia y Tecnología*, 25(1-2) 43-56.
- Lizano, O. (2011) Simulación de la altura máxima de ola en huracanes con trayectorias similares en el mar Caribe y su relación con los impactos costeros generados. *Boletín Científico CIOH*, 29, 46-59.
- Lizano, O. y Alfaro, E. J. (2014). Dinámica atmosférica y oceánica en algunos sitios del Área de Conservación Guanacaste (ACG), Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 62(4), 17-31. doi: 10.15517/rbt.v62i4.20018
- Madrigal, P., Gazel, E., Flores, K. E., Bizimis, M. y Jicha, B. (2016). Record of massive upwellings from the Pacific large low shear velocity province. *Nature Communications*, 7, 13309. doi: 10.1038/ncomms13309
- Madrigal, P., Gazel, E., Denyer, P., Smith, I., Jicha, B., Flores, K.E., Coleman, D. y Snow, J. (2015): A melt-focusing zone in the lithospheric mantle preserved in the Santa Elena Ophiolite, Costa Rica. *Lithos*, 230, 189-205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.04.015>
- Madrigal, P., Gazel, E. y Denyer, P. (2019). Petrogénesis ígnea. En P. Denyer (Ed.), *Perspectiva geológica del noroeste de Costa Rica: Historia, evolución y cartografía* (pp. 9-42). San José. Editorial UCR.
- Morton, R. A., Gelfenbaum, G. y Jaffe, B. E. (2007). Physical criteria for distinguishing sandy tsunami and storm deposits using modern examples. *Sedimentary Geology*, 200(3): 184-207.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2005). *Reports from the National Data Buoy Center's Stations in the Gulf of Mexico During the Passage of Hurricane Katrina*. Recuperado de <https://www.ndbc.noaa.gov/hurricanes/2005/katrina/>
- Nordstrom, K. F. y Jackson, N. L. (1995). Temporal scales of landscape change following storms on a human-altered coast, New Jersey, USA. *Journal of Coastal Conservation*, 1: 51-62. doi: 10.1007/BF02835562
- Nott, J. F. (2003). Intensity of prehistoric tropical cyclones. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 108(D7), 4212. doi: 10.1029/2002JD002726
- Otvos, E. G. (2011). Hurricane signatures and landforms-toward improved interpretations and global storm climate chronology. *Sedimentary Geology*, 239(1):10-22. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2011.04.014.
- Pielke Jr, R. A., Rubiera, J., Landsea, C., Fernández, M. L., y Klein, R. (2003). Hurricane vulnerability in Latin America and the Caribbean: Normalized damage and loss potentials. *Natural Hazards Review*, 4(3), 101-114.

- Pignatelli, C., Sansò y Mastronuzzi, G. (2009). Evaluation of tsunami flooding using geomorphologic evidence. *Marine Geology*, 260(1-4), 6-18. doi: 10.1016/j.margeo.2009.01.002
- Pouzet P., Maanan, M., Piotrowska, N., Baltzer, A., Stephan, P. y Robin M. (2018). Chronology of Holocene storm events along the European Atlantic coast: New data from the Island of Yeu, France. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 42(4): 431-450. doi: 10.1177/0309133318776500
- Puga, A. y Aguirre, J. (2017). Contrasting storm versus tsunami-related shell beds in Shallow-water ramps. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 471(1), 1-14. doi: 10.1016/j.palaeo.2017.01.033
- Stuiver, M. y Reimer, P. J. (1993). Extended ¹⁴C data base and revised calib 3.0 ¹⁴C age calibration program. *Radiocarbon*, 35(1), 215-230.
- Solano-Quintero, J. y Villalolos-Flores, R. (2001). Aspectos fisiográficos aplicados a un bosquejo de regionalización Geográfica Climática de Costa Rica. *Temas Meteorológicos y Oceanográficos*, 8(1), 26-39.
- Seilacher, A. (1982). *General remarks about event deposits*. En A. Seilacher y G. Einsele (Eds.), *Cyclic and event stratification* (pp. 161-174). Berlin: Springer.
- Toscano, M. A. y Macintyre, I. G. (2003). Corrected western Atlantic sea-level curve for the last 11,000 years based on calibrated ¹⁴C dates from *Acropora palmata* framework and intertidal mangrove peat. *Coral Reefs*, 22, 257-270. doi: 10.1007/s00338-003-0315-4
- Varela, A, Richiano S. y Poiré D. (2011). Tsunami vs. storm origin for shell bed deposits in a lagoon environment: an example from the Upper Cretaceous of Southern Patagonia, Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*. 18(1), 63-85.
- Wanner, H. Solomina, O. Grosjean, M., Ritz, S. y Jetel, M. (2011). Structure and origin of Holocene cold events. *Quaternary Science Reviews*, 30(21-22), 3109-3123. doi: 10.1016/j.quascirev.2011.07.010
- Wiberg, P. (2000). A Perfect Storm: formation and potential for preservation of storm beds on the continental shelf. *Oceanography*, 13(3), 93-99.