



Universidad Autónoma
de Baja California



Facultad de Ciencias Marinas

“Estudio de la variabilidad morfológica de la playa de
Ensenada ante eventos de tormentas del 2012 al 2016”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADO EN OCEANOLOGÍA

PRESENTA

Brianda Berenice Soto Aguilar

Ensenada, Baja California, Febrero 2017

“Estudio de la variabilidad morfológica de la playa de
Ensenada ante eventos de tormentas del 2012 al 2016”

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADO EN OCEANOLOGÍA

PRESENTA

Brianda Berenice Soto Aguilar

Aprobada por:

Dra. Amaia Ruiz de Alegría Arzaburu
Director de tesis

Dr. Hector García Nava
Sinodal

Dr. Rafael Hernández Walls
Sinodal

Dedicatoria

A mi familia:

Les agradezco a mis padres: C.D. Dora Hermila Aguilar Leyva y C.D. Juan Francisco Soto Morales, por su dedicación y esfuerzo para brindarme el apoyo necesario para culminar mi carrera universitaria. Gracias por no rendirse en este camino tan largo.

A mis hermanos: Lic. Doriella Soto Aguilar e Ing. Luis Mario Soto Aguilar, gracias por su apoyo moral y paciencia a su pequeña hermana, así como el amor y la felicidad que le dan a mi vida al hacer crecer nuestra familia cada día más.

Los amo a cada uno de una forma increíble.

Agradecimientos

A cada uno de los docentes de la Facultad de Ciencias Marinas que dedican su vida a formar nuevos profesionistas, estoy enormemente agradecida de haber tenido la oportunidad de tomar clase con cada uno de ustedes en este camino a mi vida profesional.

A mi directora de tesis Dra. Amaia Ruíz de Alegría así como a los sinodales Dr. Rafael Walls y Dr. Héctor García, por su paciencia y apoyo para poder realizar esto.

A mis compañeros y amigos, gracias por ser parte de esta aventura y permitirme estar en la suya, será un orgullo para mi poder llamarlos colegas.

A mis amigas: les agradezco por ser una pieza fundamental de mi vida, ya que a pesar de la distancia nuestra amistad sigue creciendo y su apoyo incondicional como siempre lo fue.

Al grupo de procesos costeros del IIO por su esfuerzo en cada campaña topo-batimétrica, ya que sin su esfuerzo este trabajo no sería posible.

A la institución donde orgullosamente fui parte de sus filas, donde aprendí que la dedicación y constancia siempre traerán consigo buenas recompensas, Pentathlon Deportivo Militarizado Universitario, así como al

3er. Comandante de Infantería Manuel Campos Beltrán, se que desde donde se encuentre estaría feliz de este nuevo logro y tomándose un café en mi honor.

COMO MUJER MEXICANA SE RAZONABLE, ESTABLECE TUS METAS EN LA VIDA Y EN EL CAMINO PARA LLEGAR A ELLAS.

(Precepto #5, Mensaje al Pentathlon Femenino)

Resumen

La zona costera comprende una franja con alta tasa poblacional a nivel mundial, y esta zona es muy vulnerable al impacto de eventos extremos como son las tormentas. Por el impacto de tormentas, la parte superior de la playa se puede erosionar, ocasionando una pérdida de protección ante la llegada de nuevos eventos extremos. Este trabajo tiene como objetivo determinar el impacto de las tormentas presentes en los inviernos de 2012 a 2016 en la playa de Ensenada. Para ello, se identificaron quince tormentas durante los cuatro inviernos, de las cuales diez se presentaron en el 2015-2016. Las tormentas se clasificaron en ocho eventos (E1-E8), y se calcularon los Modelos de Elevación Digital (MEDs) con el fin de determinar el cambio morfológico de la playa antes y después de cada evento de tormenta. La pérdida o ganancia de sedimento en la playa por evento se cuantificó a través de un cálculo volumétrico. Como resultado se obtuvo que el evento con mayor impacto (E7), tuvo una duración de 146 horas, iniciando el 12 de diciembre de 2015, causando pérdidas volumétricas de $\sim 170,000 m^3$, muy por encima del promedio de los eventos ($\sim 60,000 m^3$). Este evento de tormenta incluyó una secuencia de cuatro tormentas que ocurrieron en combinación con la pleamar en mareas vivas. El resto de eventos de tormentas estudiadas desde el 2012, no causaron erosión significativa en el perfil de playa. Se concluye que a pesar de la pérdida de arena durante las tormentas, la playa recupera el sedimento erosionado durante las condiciones de baja energía de oleaje.

Índice

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	ii
Resumen	iv
1. Introducción	1
Antecedentes	4
Justificación	4
Área de estudio	5
Objetivos	6
Particulares:.....	6
Metodología.....	7
Resultados.....	11
Características hidrodinámicas de las tormentas	11
Variabilidad del perfil de playa por las tormentas.....	14
Morfodinámica inducida por tormentas	16
Discusión	24
Conclusiones	27
Limitaciones	28
Bibliografía	28

1. Introducción

La zona costera se encuentra en la interfase de los tres sistemas naturales más grandes de la tierra: océano, continente y atmósfera, lo cual lo hace un sistema altamente dinámico. Las interacciones de estos tres sistemas definen las características geomorfológicas de la zona costera (Davidson-Arnott, 2010).

Una playa arenosa puede ser definida como la acumulación de sedimentos no consolidados (arena, grava y guijarros) que se extienden desde la profundidad de cierre hasta algún cambio fisiográfico tal como un campo de dunas o el punto donde se establece la vegetación permanente (Hernández, 2003). Cada playa presenta características morfológicas distintas que pueden ser descritas por el tamaño medio de grano, la composición de la arena, elevación y ancho de la berma, la pendiente y existencia o ausencia de barras sumergidas entre otras (Coastal Engineering Research Center, 1984). A su vez, estas características morfológicas son controladas por distintos forzamientos como el oleaje, las corrientes y el viento, que gobiernan los cambios topo-batimétricos en ellas (Vidal *et al.*, 1995).

Las playas se pueden dividir, en función del área cubierta por las mareas, en tres secciones: supramareal, por encima del efecto de las mareas, intermareal, sujeta a la acción de las mareas, y submareal, por debajo de la acción de las mareas. Las secciones de playa intermareal y supramareal generalmente son las utilizadas por los usuarios en tierra, mientras que el acceso a las playas submareales la suelen tener los bañistas, navegantes y surfistas. Muchas playas presentan dunas en la sección supramareal, y las características morfológicas de las dunas estarán definidas tanto por la energía eólica como la del oleaje (Silva *et al.*, 2016).

La playa cambia continuamente ajustando su perfil debido a un balance entre el embate del oleaje y la disipación de la energía que llega a ella. Este ajuste es una respuesta dinámica natural de la playa. Sin embargo, la playa presenta diferentes respuestas en función de la escala temporal. Así se

define, por un lado, la variabilidad morfológica estacional, y por otro, los cambios morfológicos asociados a las condiciones de tormenta (Coastal Engineering Research Center, 1984).

El cambio cíclico o estacional es controlado principalmente por la energía del oleaje, el cual presenta una alta intensidad en épocas de invierno y baja intensidad en verano (Wright y Short, 1984). Así, las playas pueden presentar dos condiciones topográficas estacionales: la de invierno, que generalmente representa signos de erosión por la acción de las tormentas, y la de verano, que representa una playa reconstruida y con signos de acreción durante el periodo de calma por el transporte de sedimento hacia la cara de la playa (Aubrey, 1979). Las escalas de tiempo de formación de un perfil característico de cada estación son diferentes, el perfil de invierno puede generarse en el orden de horas dependiendo de la intensidad de la tormenta, mientras que el de verano puede llegar a tardar meses en formarse e incluso verse interrumpido por la presencia de una tormenta (Wright y Short, 1984; Sánchez-Arcilla et al., 1994).

Una tormenta se puede definir como un centro de baja presión rodeado por un sistema de alta presión causado por la coexistencia de dos o más masas de aire con distintas temperaturas, estos fenómenos estarán asociados a inestabilidades que se reflejarán como vientos, lluvias, entre otros. Éstas no son frecuentes a lo largo de todo el año, se presentan principalmente en invierno, y los vientos presentes en ellas generan olas altas y peraltadas que pueden pasar por encima de las barras submareales sin romper, recorriendo la zona de rompiente hacia la cara de la playa. Por ello, los efectos morfológicos de las tormentas pueden ser devastadores en términos de erosión de la costa (Coastal Engineering Research Center, 1984).

La magnitud de la respuesta morfológica de la playa para cada tormenta es difícil de anticipar. Esta respuesta dependerá de las características de la tormenta como su intensidad, duración y trayectoria, de las características del oleaje que induce como la altura de ola significativa (H_s), el periodo del pico espectral (T_p), la dirección predominante del oleaje (Dir-O), así como de

otras condiciones del sitio como el nivel del mar, mareas, magnitud de las mareas residuales (marea de tormenta) (Masselink, 2016), cantidad de energía infragravitatoria y condiciones morfológicas preexistentes (Coco et al., 2014).

El impacto morfológico generado por las tormentas también tendrá que ver con el hecho de ser una tormenta individual o una secuencia de tormentas, ya que las tormentas individuales tienden a tener menor impacto ya que generarán modificaciones de pocos metros³ en la línea de costa en cuestión de horas, mientras que una secuencia de tormentas puede generar cambios morfológicos acumulados que serán de gran impacto sobre la morfología costera (Senechal et al., 2015).

Varios estudios que determinan el impacto de tormentas en playas han demostrado que el volumen de la playa se puede restablecer parcialmente de la erosión inducida por el evento, y que la recuperación inicial puede ser extremadamente rápida. Por otro lado, la recuperación completa de la playa después de grandes tormentas también puede durar varios años, especialmente si se produjo erosión en la zona de las dunas (Coco et al., 2014).

A veces la playa puede ser sorprendentemente resistente durante una tormenta y la pendiente de la zona intermareal puede permanecer casi constante antes y después de los eventos extremos; esto debido a que presenta un estado de equilibrio dinámico. Existen pruebas de campo que sugieren que esto es particularmente el caso de playas con pendientes suaves denominadas disipativas (Aagaard et al., 2005). La presencia del equilibrio dinámico hace que en ocasiones sea difícil distinguir que los cambios morfológicos de la playa sean el resultado de las tormentas u ocurran como parte de la evolución gradual de la playa en respuesta a variaciones estacionales (Bird, 2008).

Para poder analizar las variaciones morfológicas de la playa, generalmente se realiza la cuantificación de algunos parámetros como la pendiente del perfil y volumen de la playa (Zetina *et al.*, 2008). Sin embargo, es necesario llevar a cabo mediciones mensuales o bimensuales para poder

capturar tanto la variabilidad morfológica estacional como la inducida por eventos de tormentas.

Antecedentes

Las playas de la Bahía de Todos Santos (BTS) han sufrido cambios morfológicos importantes en las últimas décadas. Los primeros esfuerzos en entender las variaciones estacionales de la playa en BTS los realizó Lizárraga-Arciniega (1976) quien observó erosión de playa durante el invierno, y acreción en verano. Más tarde, Pérez-Higuera y Chee-Barragan (1984) estudiaron los patrones de transporte de sedimento en BTS utilizando parámetros texturales de sedimentos de la parte supramareal y submareal de las playas, sin embargo, el patrón de circulación a lo largo de la costa no quedó definido adecuadamente. Los últimos estudios de transporte sedimentario los realizaron Cruz-Colín y Cupul-Magaña (1997), quienes determinaron, a grandes rasgos, el balance sedimentario de BTS en base a estimaciones de aporte y pérdidas a lo largo de varias celdas litorales. Más recientemente, Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, (2015) definieron que las tormentas que se presentan en la BTS ocurren principalmente en el periodo entre octubre y abril, con condiciones mínimas de $H_s \geq 1.75m$ y con una duración mínima de 12 horas presentando $H_s \geq 1m$. Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, (2016) concluyeron que las playas de Ensenada presentan una variabilidad morfológica estacional muy marcada.

Justificación

Las tormentas son la causa principal de la generación de cambios morfológicos drásticos en playas. Debido a que el transporte de sedimento neto se dirige hacia el mar, el impacto de tormentas suele implicar eventos de erosión muy importantes en la playa intermareal y supramareal (sección semi-seca). Se espera que la intensidad y frecuencia de eventos de tormenta aumente en los próximos años junto con la proyección acelerada del aumento relativo del nivel medio del mar (Forbes *et al.*, 2004), por tanto,

es necesario evaluar la erosión que generan las tormentas en las playas, y determinar la capacidad de recuperación de las mismas bajo diferentes tipos y secuencias de tormentas.

En México, la Península de Baja California es una de las regiones del país con mayor porcentaje actual de crecimiento poblacional costero, lo que implica una mayor vulnerabilidad poblacional a efectos de pérdida de metros lineales de costa. En particular, la costa de Bahía de Todos Santos, en la que se incluye Ensenada, se ha visto sujeta a graves problemas de erosión inducidos por el hombre, que se evidencian con la desaparición de playas; Playitas, a principios de los años 1980, y Estero Beach, a finales de los años 1990. Debido a esto es importante conocer la estabilidad de la playa de Ensenada ante eventos extremos de oleaje.

Este trabajo determina los cambios morfológicos de la playa y su variabilidad volumétrica en respuesta al oleaje de tormenta ocurrido en los inviernos del 2012 hasta el 2016.

Área de estudio

Las costas de Baja California, en donde se localiza la BTS, cuenta con vientos clasificados como brisas, que se caracterizan por ser viento de mar a tierra en el día e inverso por la noche, este fenómeno es más intenso durante invierno (Álvarez-Sánchez, 1997).

Ensenada está localizada al Noroeste de México, cuenta con oleaje dominante del noroeste en época invernal, con olas más energéticas que en verano, en donde el oleaje proviene del suroeste, con olas de menor altura y frecuencia (Ortiz-Figueroa, 2009).

Las playas arenosas de Ensenada (figura 1) están formadas de arenas medias y presentan un régimen mesomareal de hasta 2.2 m. Las mareas son semidiurnas, siendo el rango de mareas muertas y vivas de 0.5 y 2.2 m, respectivamente. El oleaje incidente en la playa se caracteriza por un H_s promedio anual de 1 m y con un periodo asociado de 11 s. La playa cuenta con paredes marinas como obras de protección costeras, ubicadas

en la sección norte. Al sur existe un campo de dunas que alcanza elevaciones máximas de 10 m y una pequeña laguna.

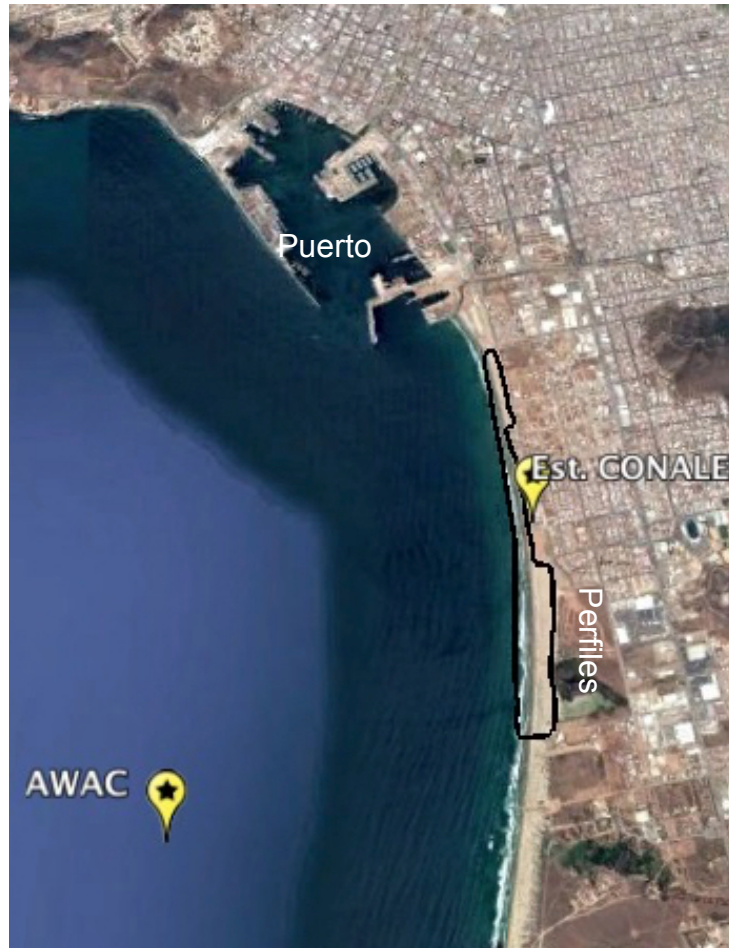


Figura 1.- Vista aérea de la Playa de Ensenada, Baja California. Se muestra el área de levantamientos topográficos, la ubicación del perfilador acústico (AWAC) y la estación meteorológica CONALEP.

Objetivos

General: Determinar de manera cuantitativa los cambios morfológicos asociados a eventos de tormentas en la Playa de Ensenada durante los inviernos de 2012 al 2016.

Particulares:

- Definir las olas de tormentas que inciden en Playa de Ensenada

durante el periodo de estudio utilizando mediciones de oleaje.

- Cuantificar los cambios morfológicos de la playa de Ensenada para cada periodo de tormenta identificado.
- Asociar las características físicas de las olas de tormenta con los cambios morfológicos generados en la playa.

Metodología

Mediciones hidrodinámicas y meteorológicas

Con el fin de caracterizar los forzamientos durante las tormentas ocurridas en la playa de estudio en los periodos de invierno de noviembre 2012 a febrero 2016, se obtuvieron mediciones hidrodinámicas y meteorológicas (tabla I).

Las mediciones de viento fueron colectadas por una estación meteorológica Vaisala ubicada en el CONALEP de Playa de Ensenada y por una estación Aanderaa ubicada en la azotea del edificio del Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO). Para este estudio, se colectaron datos de la estación IIO cada 10 minutos desde noviembre de 2012 hasta septiembre de 2014. De la estación del CONALEP se obtuvieron mediciones cada 10 minutos desde marzo de 2014 a febrero de 2016.

Los datos del nivel de marea se obtuvieron a través del modelo de predicción de mareas del CICESE (<http://oceanografia.cicese.mx/predmar>) para la estación Ensenada. Con el modelo se calcularon valores horarios del nivel de la marea referidos al nivel de bajamar media inferior (NBMI).

Para caracterizar el oleaje en el área de estudio se obtuvieron, por un lado, mediciones desde octubre 2013 a febrero 2016, y por otro, datos numéricos desde noviembre 2012 a septiembre de 2013. Las mediciones fueron obtenidas cada hora con un perfilador acústico de corrientes (ADCP por sus siglas en inglés) modelo AWAC (marca Nortek) instalado a 20 m de profundidad en la sección sur del área de estudio. Con este instrumento se obtuvo una serie de tiempo de alturas de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección del oleaje (Dir-O). Los datos numéricos se obtuvieron realizando propagaciones del oleaje con el modelo numérico, Simulating

WAVes Nearshore (SWAN). El SWAN es un modelo espectral de oleaje que puede simular el crecimiento, la disipación y la propagación del oleaje tanto en aguas oceánicas como en zonas costeras.

Para definir oleaje de tormenta se utilizaron los percentiles 99 y 95 de las alturas de ola significantes (H_s) medidas desde octubre 2013 a febrero 2016, representando el 1% y 5% de H_s , respectivamente. Así, se definen las tormentas como los eventos con $H_s \geq 3$ m y que se mantuvieron al menos 12 h con $H_s \geq 2.3$ m.

Tabla I.- Serie de tiempo de los datos de oleaje, mareas y viento disponibles para realizar este estudio y la estación de donde se obtuvieron.

2012	2013	2014	2015	2016
Nov. Dic.	Ene. Feb. Mar. Abr. May. Jun. Jul. Ago. Sep. Oct. Nov. Dic.	Ene. Feb. Mar. Abr. May. Jun. Jul. Ago. Sep. Oct. Nov. Dic.	Ene. Feb. Mar. Abr. May. Jun. Jul. Ago. Sep. Oct. Nov. Dic.	Ene. Feb.
Viento IIO		Viento IIO/CONALEP	Viento CONALEP	
Oleaje SWAN	Oleaje AWAC			
Mareas CICESE				

Mediciones morfológicas

Con el fin de determinar las diferencias topográficas antes y después de las tormentas identificadas, este trabajo cuenta con mediciones topográficas bimensuales o mensuales realizadas desde noviembre 2012 a febrero 2016. Las mediciones abarcan una longitud de 3 km de playa a lo largo de la playa de Ensenada. Se tomaron datos cada segundo a través de

61 transectos espaciados cada 50 m durante la bajamar de las mareas vivas, utilizando un GPS diferencial marca Leica GS14 montado sobre un bastón de aluminio con ruedas.

Los perfiles topográficos fueron interpolados para obtener modelos de elevación digital (MED). Antes de obtener los MED's se definió una misma malla para todos los muestreos realizados, y se recortaron las topografías por encima de la elevación de 5.5 m para seleccionar solamente la playa activa. Los perfiles fueron interpolados linealmente eliminando los datos interpolados fuera de la zona de interés.

Las diferencias morfológicas de la playa fueron obtenidas restando los MED's de antes y después de cada tormenta, es decir, se restó la topografía posterior a la tormenta con la topografía previa a la tormenta, resultando en un Δz . Los valores de $\Delta z > 0$ indicaron ganancia de sedimento o acreción y los valores $\Delta z < 0$ erosión.

A partir de los perfiles de playa se calcularon volúmenes de sedimento, integrando cada perfil topográfico individualmente, para obtener su área, y multiplicando después dicha área por una distancia longitudinal representativa. Con el fin de cuantificar los cambios volumétricos inducidos por las diferentes tormentas se realizan diferencias volumétricas de la playa subaérea cubierta por los datos topográficos.

Por último, se relacionaron los cambios morfológicos y las variaciones volumétricas con las condiciones de oleaje, marea y viento para cada tormenta individual o secuencia de tormentas de estudio.

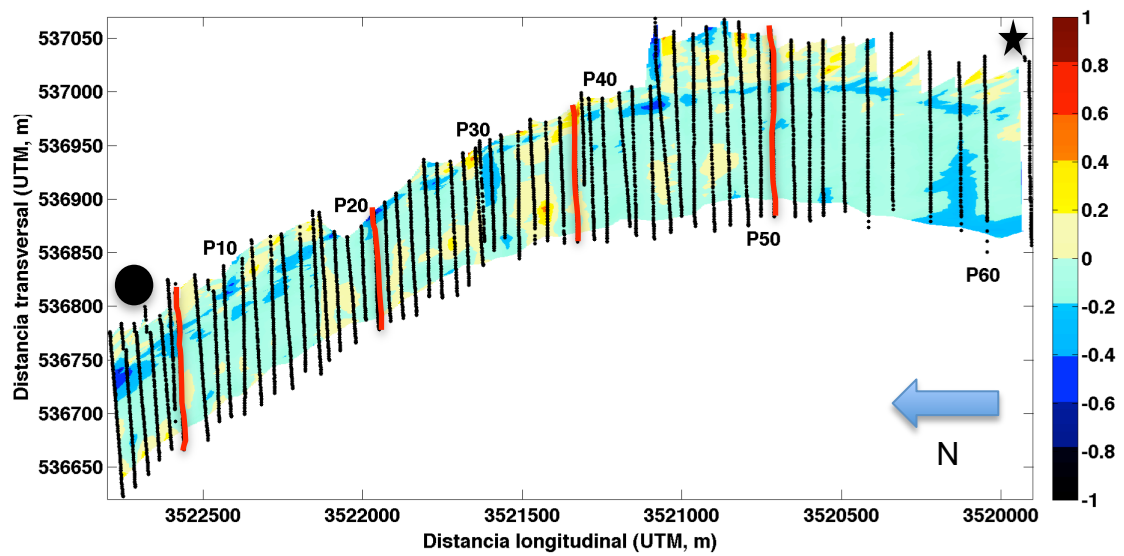


Figura 2.- Ejemplo de un MED (valores negativos, en azules, indican erosión y valores positivos, en rojo, indican acreción) obtenido de la interpolación de 61 perfiles topográficos (perfiles negros). Las líneas en rojo representan los perfiles 7, 22, 37 y 52 utilizados para caracterizar los cambios morfológicos antes y después del olaje de las tormentas. El círculo negro indica el extremo norte de Playa Hermosa y la estrella el edificio Pacifica al sur.

Resultados

Características hidrodinámicas de las tormentas

Durante el periodo de estudio de noviembre 2012 a febrero 2016, se identificaron 15 eventos de olas de tormenta, que ocurrieron entre los meses de octubre a abril; este periodo se considera invierno. Las figuras 3 y 4 muestran las series de tiempo de altura de ola significativa (H_s) para los cuatro inviernos analizados, marcando en rojo los periodos con oleaje de tormenta. Se identificaron tres eventos de oleaje de tormenta en el invierno 2012-2013, uno en el 2013-2014, otro en el 2014-2015 y diez en el invierno 2015-2016 (hasta febrero).

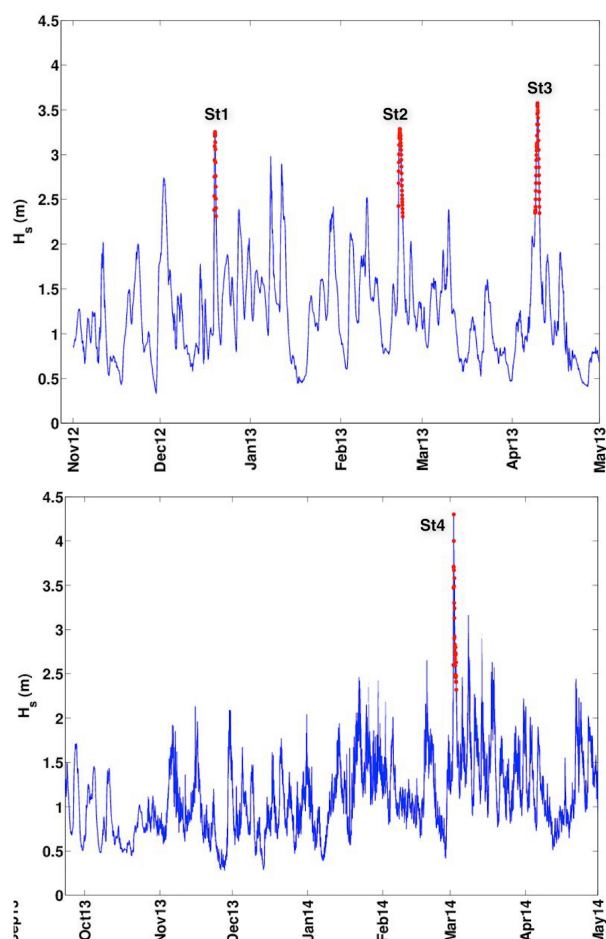


Figura 3.- Altura de ola significativa (H_s) durante los inviernos 2012–2013 y 2013-2014, los círculos rojos representan los eventos de olas de tormenta identificadas.

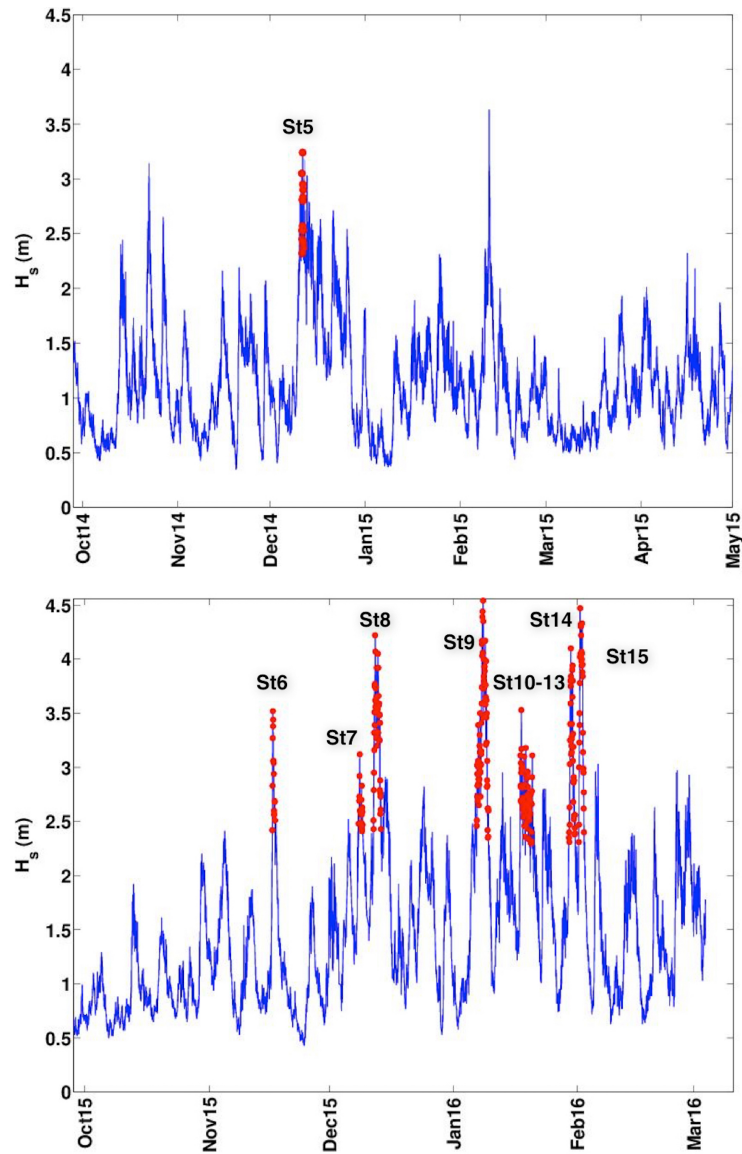


Figura 4.- Altura de ola significativa (H_s) durante los inviernos de 2014–2015 y 2015-2016, los círculos rojos representan los eventos de oleaje de tormenta identificados.

La tabla II muestra las condiciones hidrodinámicas de cada evento de oleaje de tormenta, así como el número de evento al que perteneció. El evento de oleaje de tormenta 3 (St #3) queda excluida de este trabajo por no contar con mediciones topográficas. El evento E7, caracterizado por una secuencia de 4 oleajes de tormenta, sobresale del resto debido a su larga duración (146 h en total), y a que presenta alturas de ola máximas muy altas (> 4 m) junto a la St #15 (E8), y además, esas alturas de ola ocurren durante la pleamar de mareas vivas con 1.8 m de nivel de marea.

Tabla II.- Condiciones hidrodinámicas de las tormentas. De izquierda a derecha en columnas se muestra: el número de evento al que pertenece el oleaje de tormenta, el número de oleaje de tormenta, las fechas de inicio y final de la tormenta, su duración y las condiciones del oleaje y viento (altura de ola significativa máxima y promedio, periodo promedio, intensidad del viento promedio y máximo, dirección de oleaje y nivel de marea respecto al nivel de bajamar media inferior (NBMI)).

Evento (E)	St #	inicio	Final	Dur (hr)	Hs max (m)	Hs prom (m)	T prom(s)	Uprom (m/s)	Umax (m/s)	Dir-O prom (°)	Nivel de marea min y máx durante tormenta (m)	
1	1	19/12/12	20/12/12	17	3.3	2.8	*	2.8	10.3	256	0.3	1.1
2	2	20/02/13	22/02/13	17	3.3	2.9	*	2.4	9.3	260	0.0	1.5
NA	3	08/04/13	10/04/13	17	3.6	3.0	*	2.2	8.7	260	-0.1	1.6
3	4	02/03/14	03/03/14	30	4.3	3.0	13	1.6	6.5	263	-0.1	1.6
4	5	11/12/14	12/12/14	30	3.2	2.7	15	1.8	4.9	265	0.7	1.3
5	6	16/11/15	17/11/15	17	3.5	2.9	11	4.3	12.0	274	0.1	1.5
6	7	08/12/15	09/12/15	17	3.1	2.6	15	0.9	3.1	268	0.0	1.6
7	8	12/12/15	13/12/15	46	4.2	3.4	15	2.4	12.3	268	-0.2	1.8
	9	06/01/16	09/01/16	71	4.5	3.3	15	3.6	18.0	266	-0.2	1.8
	10	17/01/16	18/01/16	15	3.5	2.9	18	2.4	7.1	269	0.3	0.9
	11	18/01/16	18/01/16	14	3.1	2.7	16	1.5	5.9	268	0.2	1.6
8	12	19/01/16	20/01/16	26	3.2	2.7	15	1.5	6.6	267	0.0	1.7
	13	20/01/16	20/01/16	12	3.1	2.6	15	0.8	2.1	267	0.5	1.8
	14	29/01/16	31/01/16	38	4.1	3.1	16	1.8	6.7	268	0.3	1.2
	15	01/02/16	02/02/16	30	4.5	3.5	11	6.3	24.5	268	0.5	1.3

Variabilidad del perfil de playa por las tormentas

Con el fin de entender el cambio morfológico inducido por cada uno de los eventos de olaje de tormenta o conjunto de olaje de tormenta, se dividió la playa de estudio en cuatro secciones, y se eligió un perfil representativo para cada una de las secciones. Así se eligieron los perfiles P7, P22, P37 y P52 (figura 2) y se analizaron los cambios de los perfiles antes y después de cada evento (E1 a E8, tabla II) (figura 5 y 6).

Estos resultados muestran que los eventos E1 y E2 no inducen un cambio morfológico notable a diferencia de los eventos del E3 al E8, en donde la variabilidad morfológica es más notoria y donde se observó que, en condiciones generales, existe una tendencia de erosión en los perfiles ubicados al sur del área de estudio.

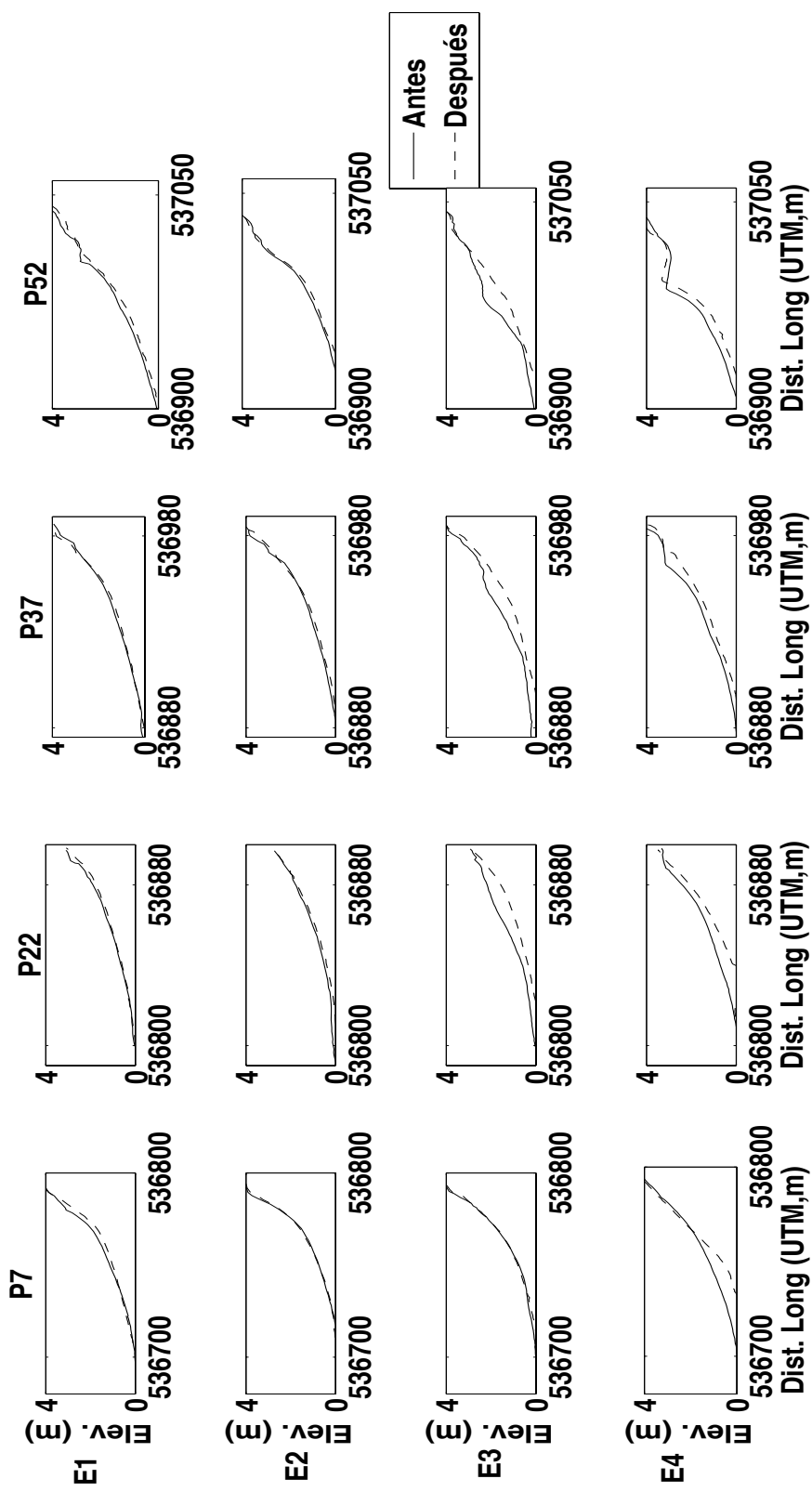


Figura 5.- Cambios morfológicos de los perfiles de playa P7, P22, P37 y P52 para los eventos E1, E2, E3 y E4 (tabla II), siendo los perfiles en línea continua antes de la tormenta y con segmentada después de los eventos de olaje de tormenta.

Morfodinámica inducida por tormentas

Para caracterizar las tormentas y entender los cambios morfológicos generados a lo largo de toda la playa por los diferentes eventos (E1 a E8), se calcularon las diferencias de los MEDs, se obtuvieron las diferencias volumétricas (ΔV) para cada perfil (P1 a P61), y además, se graficaron las condiciones de oleaje incidente y nivel de mareas (figuras 7, 8, 9 y 10). De esta forma se relacionan las características del oleaje con los cambios morfológicos inducidos por las tormentas, para así obtener la caracterización y poder generar un criterio de predicción de los efectos que tendrán las tormentas en el área de estudio.

La figura 7 muestra los eventos E1 y E2, conformados por una tormenta individual. El E1 fue un evento poco erosivo a lo largo de la playa con alternancias de acreción y erosión en los perfiles, lo cual se puede comprobar en la variabilidad de volúmenes. Además se muestra que la parte más afectada por la tormenta fue la sección sur (Pacífica), y las condiciones del oleaje en el pico de la tormenta fueron alturas de ola máximas (H_{smax}) de 3.3m, combinadas con niveles de marea bajos de hasta 1.1m. El E2 también fue un evento poco erosivo, con alternancia entre la erosión y acumulación a lo largo de sus perfiles, siendo la sección sur (Pacífica) la que obtuvo una acreción notable. Esta tormenta contó con H_{smax} de hasta 3.3m y un nivel de mareas de hasta 1.5m.

La figura 8 presenta los resultados de los eventos E3 y E4, que al igual que los E1 y E2, son tormentas individuales. El E3 fue un evento erosivo que se aprecia en el DEM en tonalidades azules, y también se confirma en la variabilidad volumétrica y se aprecia una tendencia de aumentar la erosión hacia el sur. Este evento duró 30 horas y tuvo una H_{smax} de hasta 4.3 m y un nivel de marea de hasta 1.6 m. El evento E4 fue altamente erosivo a lo largo de toda la playa, y su área más afectada fue el sur, con H_{smax} de hasta 3.2 m y niveles de marea máximos de 1.3 m.

La figura 9 muestra los resultados para los eventos E5 y E6, ambos conformados por una sola tormenta. El E5 es un evento erosivo a lo largo de

toda la playa, pero a diferencia de los otros eventos, este muestra una tendencia de erosión en la sección norte del área de estudio (Figura 9a). Durante el evento la H_{smax} fue de hasta 3.5m y el nivel de marea máximo de hasta de 1.5 m. El E6 muestra condiciones muy similares al E5, presentando también erosión a lo largo de la playa, y siendo la zona más erosionada la del sur. A diferencia del E5, las condiciones de oleaje en E6 fueron H_{smax} de hasta 3.1 m y nivel de marea de hasta 1.6 m.

La figura 10 presenta los resultados para los eventos E7 y E8, que a diferencia de los eventos anteriores, éstos muestran los cambios morfológicos inducidos por secuencias de tormentas. El evento E7 está compuesto por las tormentas St8 y St9, y es el evento que presenta mayor erosión como lo muestran las diferencias de los MEDs. Las diferencias volumétricas de E7 muestran mayor erosión en la sección sur de la playa, y las condiciones de oleaje fueron las más energéticas de todos los eventos de este estudio, con H_{smax} de hasta 4.5 m y nivel de marea de hasta 1.8 m. El evento E8 está compuesto por las tormentas St12, St13, St14 y St15 y el cambio morfológico asociado fue de acreción como se observa en las diferencias de los MEDs y en las diferencias volumétricas. Se observa una alternancia de erosión y acreción a lo largo de la playa, y este evento se caracterizó por tener condiciones de oleaje de H_{smax} de hasta 4.5 m y un nivel de marea de 1.8 m. Por tanto, el E8 presenta los mismos valores máximos de oleaje y mareas que el E7, pero a diferencia del E7, en el E8 el H_{smax} de 4.5 m no coincidió con el nivel de mareas máximo de 1.8 m, es decir estos valores se presentaron en tormentas diferentes dentro del E8.

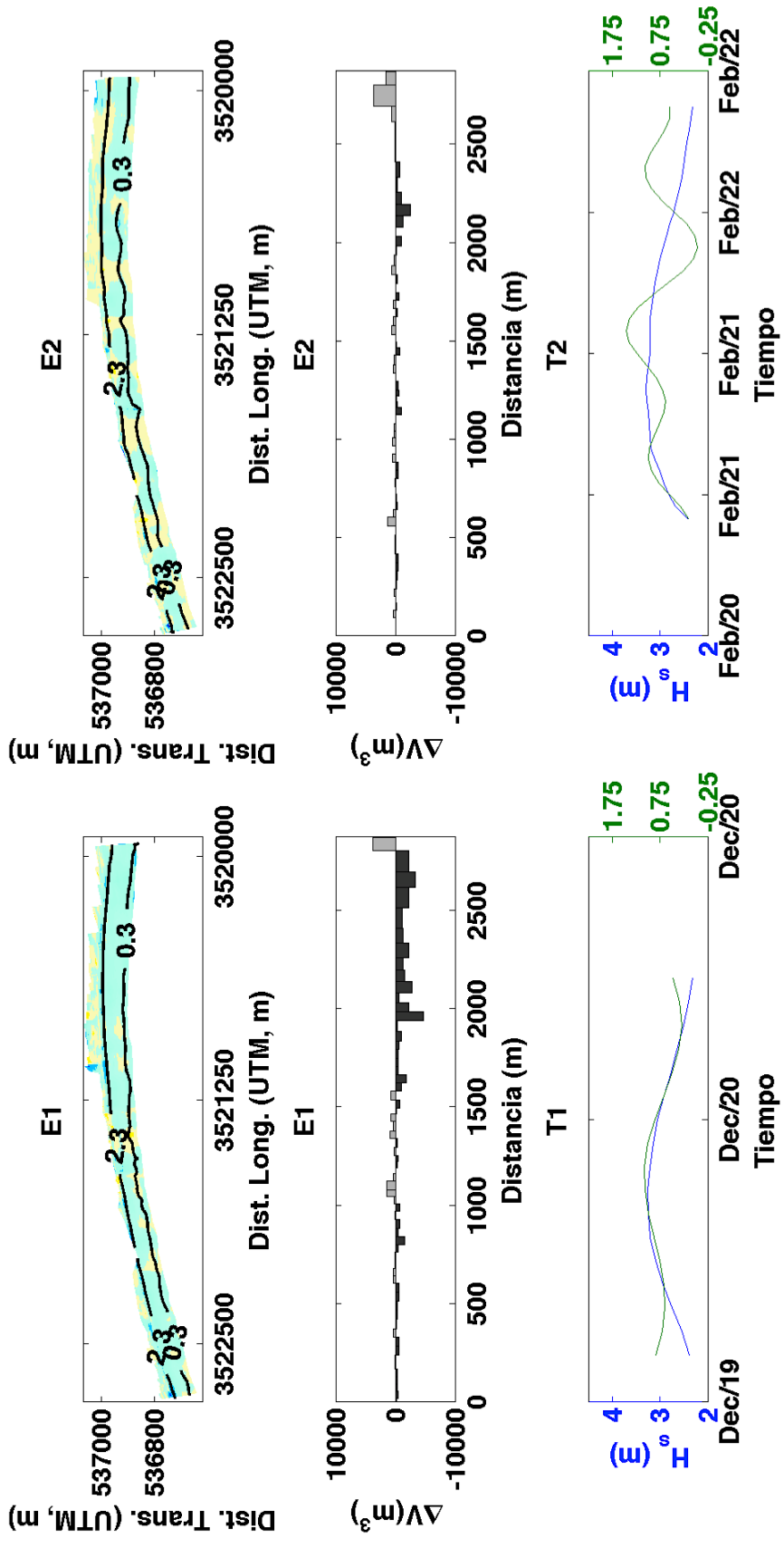


Figura 6.- Cambios morfológicos por diferencias de MEDs (paneles superiores), diferencias volumétricas de norte a sur (paneles medios) y altura de ola significante y nivel de mareas (paneles inferiores) para los eventos E1 y E2 (izquierda y derecha).

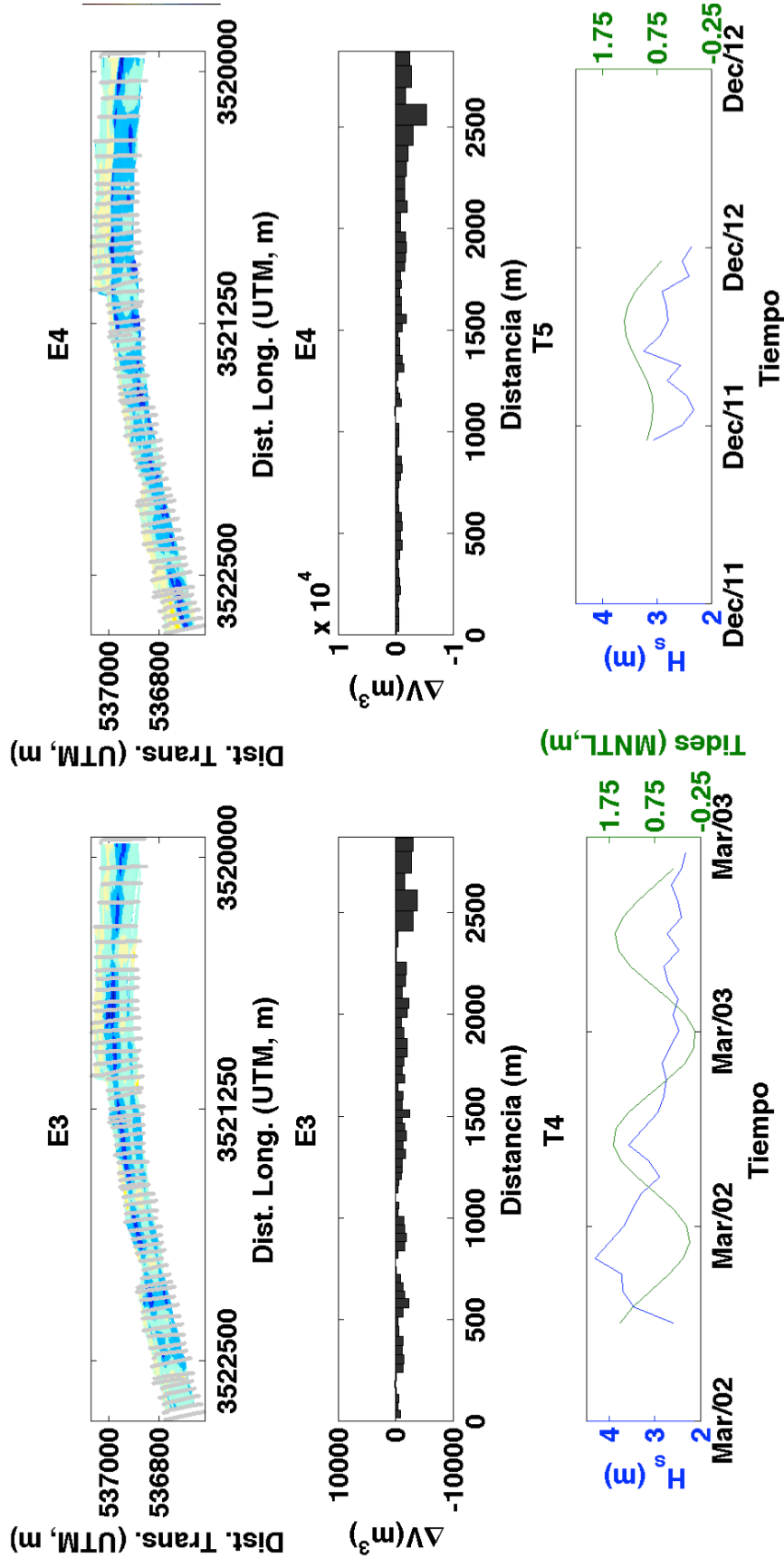


Figura 7.- Cambios morfológicos por diferencias de MEDs (paneles superiores), diferencias volumétricas de norte a sur (paneles medios) y altura de ola significativa y nivel de mareas (paneles inferiores) para los eventos E5 y E6 (izquierda y derecha).

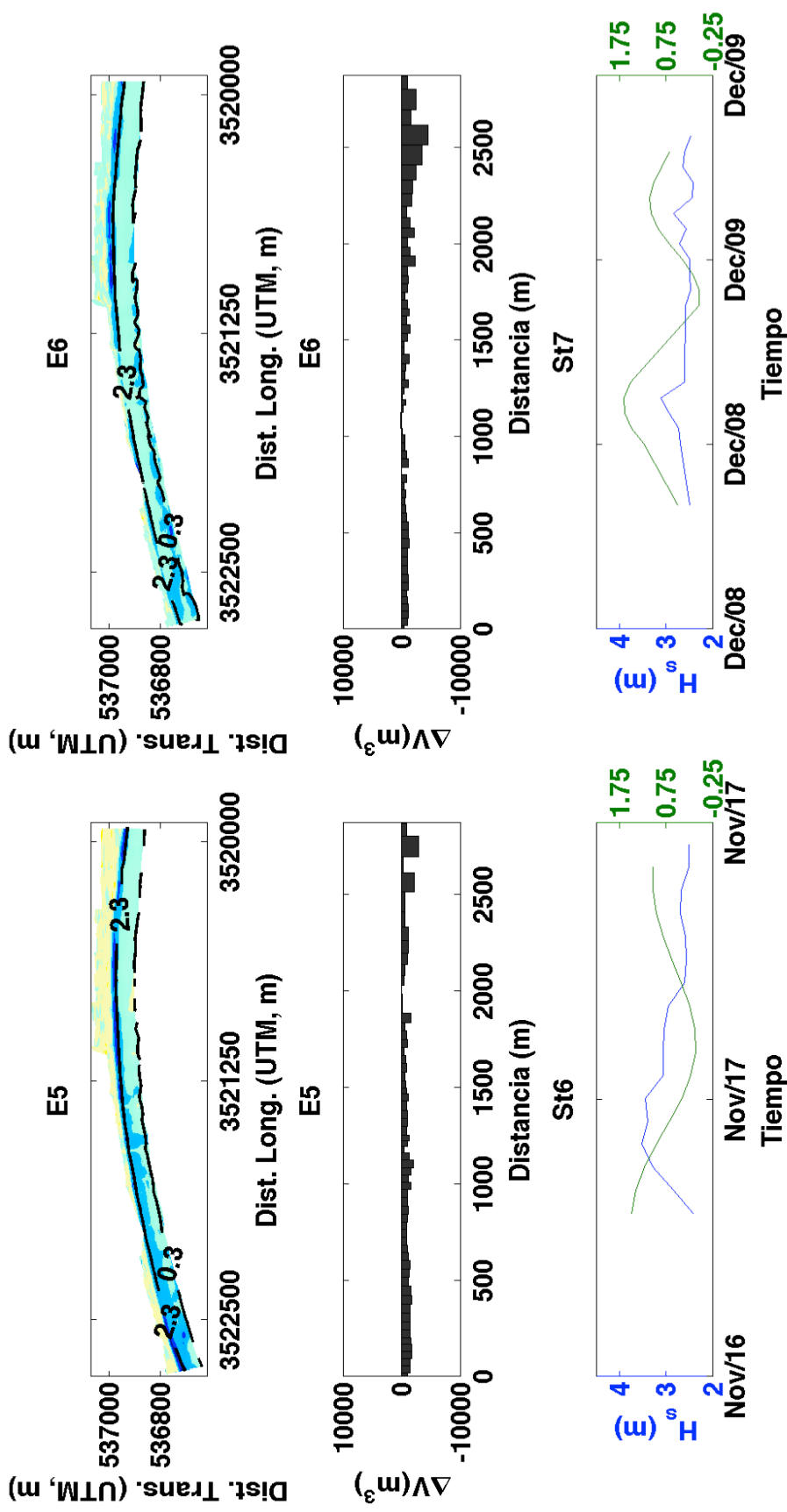


Figura 8.- Cambios morfológicos por diferencias de MEDs (paneles superiores), diferencias volumétricas de norte a sur (paneles medios) y altura de ola significativa y nivel de mareas (paneles inferiores) para los eventos E5 y E6 (izquierda y derecha).

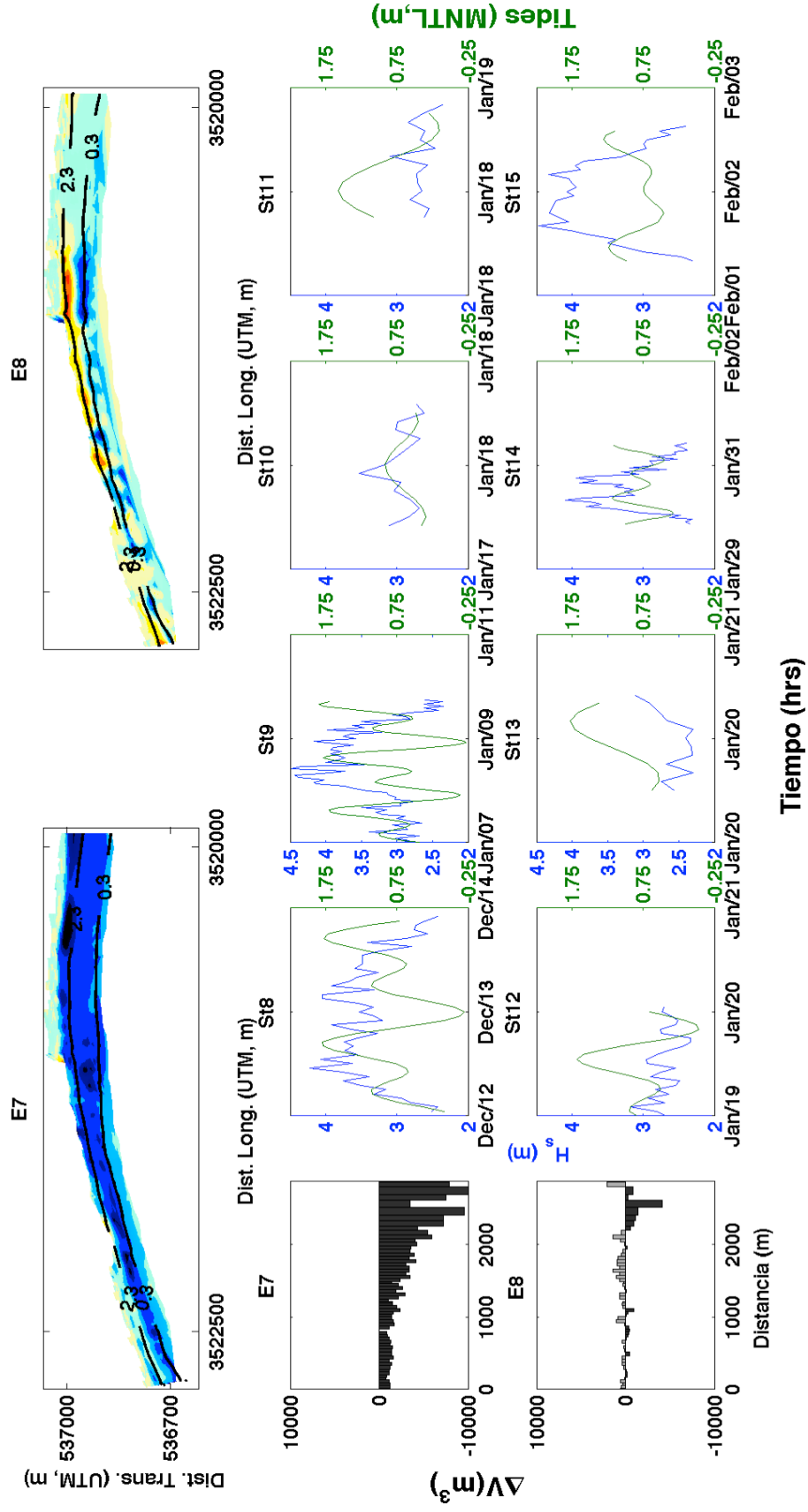


Figura 9.- Cambios morfológicos por diferencias de MEDs (paneles superiores), diferencias volumétricas de norte a sur y alturas de ola significativa y nivel de mareas (paneles medios) y altura de ola significativa y nivel de mareas (paneles inferiores) para los eventos E7 y E8

Con el objetivo de identificar las características hidrodinámicas de cada evento de tormenta en asociación al cambio morfológico generado en la playa, la tabla III muestra las condiciones específicas de oleaje, viento, mareas y el cambio volumétrico presentado en toda la playa. En la tabla se ordenan las columnas de la siguiente manera: Evento (E1 a E8), inicio y final de los eventos de tormenta, fechas de las mediciones topográficas, duración del evento, altura de ola significativa máxima (Hs max), promedio del periodo del pico espectral durante la tormenta (T prom), promedio de la dirección del oleaje durante la tormenta (Dir-O prom), nivel de marea en el máximo de la tormenta (NBMI) y cambio volumétrico de toda la playa (ΔV).

La tormenta con mayor duración fue la St9, con 71 horas, y seguida por la St8 con 46 horas, y ambas tormentas junto con St10 y St11 conforman el evento E7, que tuvo una duración total de 146 horas. Este evento fue el más erosivo de todos, y generó un cambio volumétrico (ΔV) de $-169,034 m^3$, casi tres veces mayor que el promedio que generaron los eventos anteriores de cerca de $\Delta V = -60,000 m^3$, con esto se observa claramente una respuesta morfológica acumulada por esta secuencia. A diferencia de el resto de eventos, el E8 no generó erosión, sino que favoreció la recuperación de la playa con un balance volumétrico positivo de $\Delta V = 8,111 m^3$ (tabla III).

Con el fin de analizar el efecto morfológico de las tormentas, se analizaron las condiciones hidrodinámicas promedio por evento y se compararon con el cambio volumétrico asociado (figura 11). Estos resultados reafirman que el evento E7 fue el que contó con las intensidades de viento (U_{max}) máximos y el que generó los cambios volumétricos mayores, asociados al evento 7. Las tormentas St4, St5, St6 y St7 generaron cambios volumétricos relevantes, y se caracterizaron por tener mayor duración durante oleaje intenso acoplados a niveles de marea altos.

Tabla III.- Evento (E1 a E8), inicio y final de los eventos de tormenta, fechas de las mediciones topográficas, duración del evento, altura de ola significativa máxima (Hs max), periodo pico promedio durante la tormenta (T prom), dirección del oleaje promedio durante la tormenta (Dir-O prom), nivel de marea en el pico de la tormenta (NBMI) y cambio volumétrico de toda la playa (ΔV).

Evento (E)	# tormenta (St)	inicio	Final	Topografía inicial	Topografía final	Duración (hrs)	Hs max (m)	Dir-O prom (º)	Nivel de marea en el pico de tormenta (m)	ΔV (m ³)
1	1	19-Dic-2012	20-Dic-2012	11-Dic-12	26-Dic-12	17	3.3	256	0.3	-31,819
2	2	20-Feb-2013	22-Feb-2013	07-Feb-13	21-Feb-13	17	3.3	260	0.0	-5,402
NA	3	08-Abr-2013	10-Abr-2013	No hay datos						
3	4	02-Mar-2014	03-Mar-2014	24-Feb-14	03-Mar-14	30	4.3	263	-0.1	-76,775
4	5	11-Dic-2014	12-Dic-2014	04Dic14	18Dic14	30	3.2	265	0.7	-65,485
5	6	16-Nov-2015	17-Nov-2015	26-Oct-15	25-Nov-15	17	3.5	274	0.1	-66,868
6	7	08-Dic-2015	09-Dic-2015	25-Nov-15	09-Dic-15	17	3.1	268	0.0	-67,947
7	8	12-Dic-2015	13-Dic-2015	09-Dic-15	19-Ene-16	46	4.2	268	-0.2	-169,034
	9	06-Ene-2016	09-Ene-2016			71	4.5	266	-0.2	
	10	17-Ene-2016	18-Ene-2016			15	3.5	269	0.3	
	11	18-Ene-2016	18-Ene-2016			14	3.1	268	0.2	
8	12	19-Ene-2016	20-Ene-2016	19-Ene-16	05-Feb-16	26	3.2	267	0.0	8,111
	13	20-Ene-2016	20-Ene-2016			12	3.1	267	0.5	
	14	29-Ene-2016	31-Ene-2016			38	4.1	268	0.3	
	15	01-Ene-2016	02-Feb-2016			30	4.5	268	0.5	

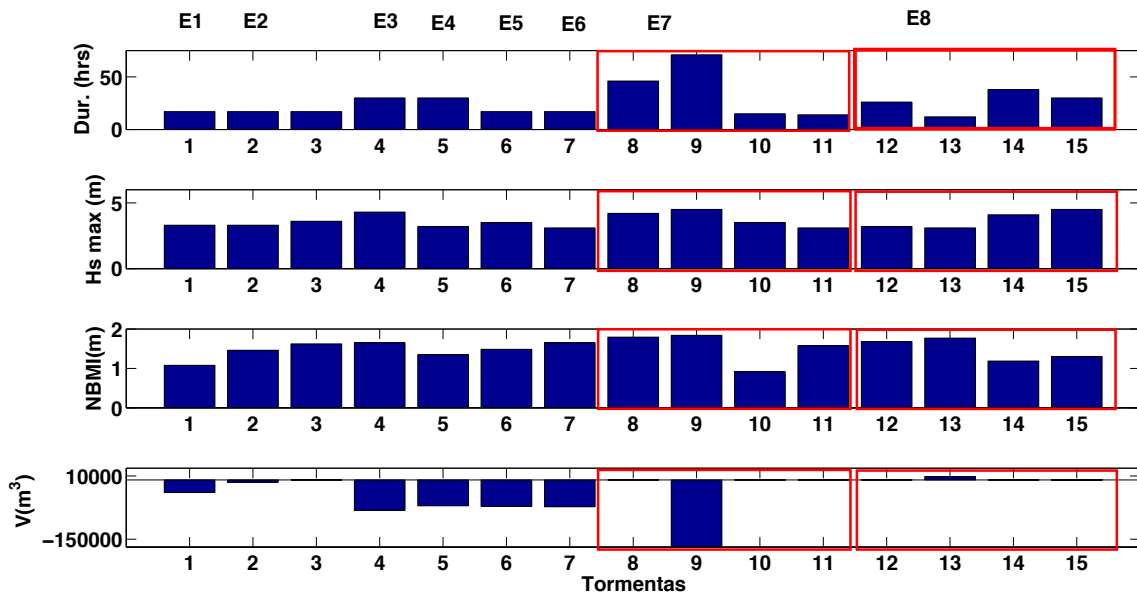


Figura 10.- Duración de las tormentas (panel superior) y condiciones de oleaje para cada tormenta: altura del ola significativa máxima (H_{smax}), nivel de bajamar media inferior (NBMI) y las diferencias volumétricas que presentaron. En rojo se presentan las tormentas estudiadas en conjunto (como evento).

Discusión

Condiciones hidrodinámicas de las tormentas

La playa responde a cada tormenta de manera distinta, y esto coincide con Coco *et al.*, (2014) quienes mencionan que es difícil anticipar el efecto morfológico que generan las tormentas en la playa debido a que son muchos los factores físicos involucrados en este cambio.

Según Dissanayake y Karunarathna (2015), el parámetro hidrodinámico más importante que influirá en la respuesta morfológica de la playa será la altura del oleaje, y de forma secundaria, la dirección y periodo pico del oleaje, y la duración de la tormenta y nivel de marea asociado. Los resultados de este estudio muestran que los factores hidrodinámicos dominantes en la playa Ensenada serán la altura del oleaje acoplada a un nivel de marea alto y la duración de la tormenta, además de las condiciones morfológicas existentes

(pendiente de la playa). Las pequeñas variaciones en la dirección del oleaje parecen afectar la zona en la que se vaya a dar mayor o menor erosión, y se observa que la sección el sur se erosiona más si el oleaje incidente presenta direcciones mayores a 270°.

Condición morfológica previa a la tormenta

En este estudio se han analizado eventos que cuentan con condiciones de oleaje similares, pero que no causan el mismo cambio morfológico en la playa. Por ejemplo, el evento E7 fue más erosivo que el E8, ambos caracterizados por tener duración y condiciones de oleaje muy similares. De hecho, el E8 fue un evento que presentó ligera acreción a lo largo de la playa. La diferencia principal entre ambos eventos fue la morfología del perfil de playa, dado que por el impacto de E7, las condiciones previas al E8 mostraban un perfil significativamente erosionado. Estos resultados indican la relevancia de la pendiente de la playa (morfología del perfil) previo al evento de tormenta, dado que tendrá gran influencia en la variabilidad morfodinámica de la playa.

El E8 presenta el único caso de acreción de todos los eventos estudiados, lo cual se le atribuye a que la playa alcanzó su perfil de equilibrio dinámico, por tanto, la playa se ajusta a estas condiciones de oleaje y este deja de erosionar, aunado a que la playa estuvo expuesta a una gran erosión del E7 por lo que la playa no cuenta con más material para perder, esto concuerda con lo descrito por Dean (2005). Además, Delgado-González *et al.*, (2005) mencionan en su trabajo que la variabilidad morfológica de la costa dependerá de la disponibilidad de sedimento de la zona.

Coco *et al.* (2014) mencionan que el hecho de ser una tormenta o una serie de tormentas puede mostrar diferencias morfológicas importantes. Ellos muestran que una serie de tormentas no genera necesariamente un cambio morfológico acumulado en la playa. Los resultados de este estudio demuestran que las tormentas individuales pueden generar cambios morfológicos muy diferentes a secuencias de tormentas, dado que las tormentas incluidas dentro de una secuencia pueden contrarrestar o amplificar su impacto en el cambio

morfológico total; el E7 por ejemplo nos muestra una respuesta morfológica acumulada que se traduce en erosión mientras que el E8 es muy diferente al cambio ocasionado por el resto de eventos..

Un invierno anómalo

Dentro de nuestro periodo de estudio, observamos un aumento significativo en el número de olas de tormenta presentes en el último invierno 2015-2016, que asociamos a la ocurrencia de un año Niño. Además, durante este último invierno se midieron olas de tormenta más energéticas, con H_{smax} promedio mayores a 4 m. Esto va de acuerdo con lo mencionado por Doria *et al.*, (2016), quienes indican que el oleaje se verá afectado por los años Niño, siendo más energético, también Marichal-González (2001), concluye que estas condiciones aplican para la región de Rosarito, Baja California un región cercana al área de estudio.

Recuperación morfológica después de las tormentas

Este estudio se ha centrado en determinar los cambios morfológicos generados por tormentas en la playa de Ensenada, sin embargo, es importante mencionar que después del impacto de las tormentas de los primeros tres inviernos (2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015) la playa mostró una recuperación del volumen de arena perdido durante las condiciones de baja energía en verano. Estos resultados se observan en la figura 12, donde se muestra la pérdida del volumen de arena de la playa semi-seca (intermareal y supramareal) en invierno pero ganancias en verano y de la misma cantidad. Además, es importante puntualizar que en este trabajo solo se consideró la parte semi-seca de la playa. Estudios complementarios han demostrado que la mayor parte del volumen de arena que se pierde de la playa semi-seca en invierno se deposita en la parte submareal de la playa por lo que el volumen total de la playa permanece prácticamente constante.

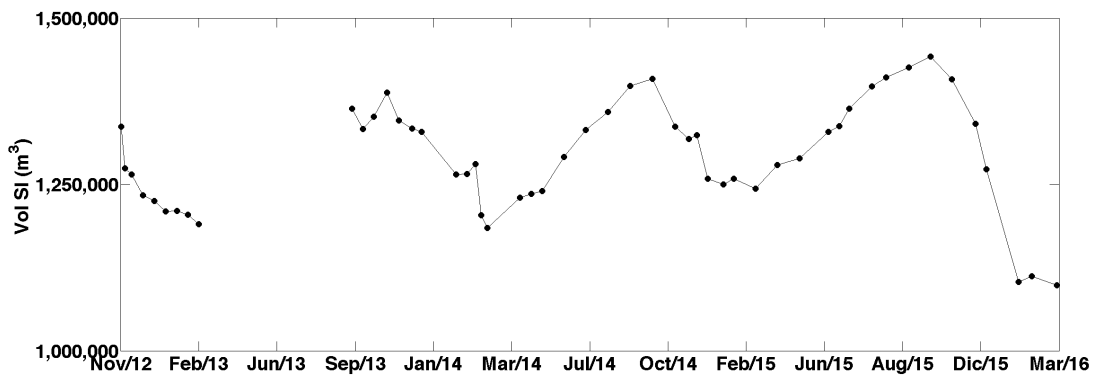


Figura 11.- Serie de tiempo del volumen de la playa semi-seca desde noviembre 2012 a febrero 2016.

Conclusiones

El invierno 2015-2016 fue el más intenso del periodo de estudio, lo que podría atribuirse a la presencia de un año “Niño”. El impacto del oleaje de tormenta durante este invierno generó pérdidas de sedimento importantes a lo largo de la playa. Sin embargo, no todas las olas de tormenta generaron los mismos cambios morfológicos, como se observa con el evento E8, en el que la playa presenta una acumulación de sedimento. A pesar del impacto de las tormentas, la playa presenta capacidades de regenerarse después de los primeros tres inviernos.

Cuatro de seis eventos son compuestas por oleaje de tormentas individuales ocurridos en los inviernos de 2013-2014 y 2014-2015 presentan características hidrodinámicas similares e inducen cambios volumétricos muy parecidos. Durante eventos de secuencias de oleaje de tormentas, sin embargo, los cambios volumétricos son muy diferentes, probablemente debido a la interacción de las diferentes tormentas individuales. Las tormentas en la playa de Ensenada parecen generar cambios importantes cuando la playa contiene bastante arena (antes de llegar a un equilibrio dinámico) y cuando las alturas máximas de oleaje de tormenta coinciden con los rangos de marea altos y con

una duración mínima de un día.

Limitaciones

Para el periodo de estudio no se analizaron datos batimétricos por lo que las conclusiones de este estudio se refieren solamente a los cambios morfológicos de la playa semi-seca (intermareal y supramareal). Por ello, el término erosión, se refiere a la pérdida de sedimento en esa área específica.

Por otro lado, los datos de topografía se realizan bimensual o mensualmente, por lo que no ha sido posible analizar individualmente los efectos de cada una de las tormentas, sobre todo aquellas que están muy cerca en tiempo. Esto último debe de ser tomado en cuenta para la interpretación de datos, ya que algunas diferencias morfológicas de la playa incluyen los cambios ocasionados por varias tormentas, mientras que en otros se interpretan los cambios generados por una sola tormenta.

Bibliografía

Aagaard, T., Kroon, A., Andersen, S., Sørensen, R. M., Quartel, S., & Vinther, N. (2005). Intertidal beach change during storm conditions; Egmond, The Netherlands. *Marine Geology*, 218(1-4), 65–80.

Álvarez Sánchez, L. G. (1997). Vientos en la Bahía Todos Santos, Baja California. *Ciencias Marinas*, 4, 81–89.

Aubrey, David G., (1979). Seasonal Patterns of Onshore/Offshore Sediment Movement, *Journal of Geophysical Research*, 84, 6247-6354.

Bird, E. (2008). *Coastal Geomorphology An Introduction* (Second, Vol. 1). <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Coastal Engineering Research Center. (1984). *Shore protection manual* (Fourth edition ed., Vol. 1). Washington.

Coco, G., Senechal, N., Rejas, A., Bryan, K. R., Capo, S., Parisot, J. P., MacMahan, J. H. M. (2014). Beach response to a sequence of extreme storms. *Geomorphology*, 204, 493–501.

Cruz-Colín, M. E., & Cupul-Magaña, L. A. (1997). Erosión y aporte sedimentario de los cantiles marinos de la bahía de todos Santos , Baja California , en el periodo de 1970 a 1991. *Ciencias Marinas*, 23(3), 303–315.

Cupul-Magaña, L. A., & TellezDuarte, M. A. (1997). Space-time variations in macrobenthic fauna of a sandy beach, related to changes in the beach profile and sediment grain size, at El Pelicano Beach, Baja California. *Ciencias Marinas*, 23(4), 419–434.

Davidson-Arnott, R. (2010). *An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.

Dean, R.G. (2005). Dynamic equilibrium on beaches. *Encyclopedia of Coastal Science*. Springer, Netherlands, pp. 400.

Delgado-González, O., Galindo-Bect, L. A., Lizárraga-Arciniega, R., A. Martínez-Díaz-de-León, L., Fermán-Almada, J. L., Sánchez-Arcilla, A., Cruz-Varela, A. (2005). Cambios en la posición de la línea de playa de la boca del Estero de Punta Banda , Baja California, durante 1972 – 2003. *Ciencias Marinas*, 31, 707–717.

Dissanayake, P., & Karunarathna, H. (2015). Effect of storm surge duration on dune erosion.

Doria, A., Guza, R.T., O'Reilly, C., & Yates, M.L., (2016). Observations and modeling of San Diego Beaches during El Niño. *Continental Shelf Research*, 124, 153-164.

Forbes, D.L., Parkes, G.S., Manson, G.K., Ketch, L.A., 2004. Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. *Mar. Geol.* 210, 169–204.

Hernández, G. (2003). Criterios para evaluar la aptitud recreativa de las playas en México: una propuesta metodológica. *Gaceta Ecológica*, 68, 55–68.

Lizárraga-Arciniega, R. (1976). Variaciones estacionales de la playa en la Bahía de Todos Santos, Baja California. *Ciencias Marinas*, 3(1): 30–50.

Marichal-González, A. E. (2001). Análisis estadístico del oleaje medido frente a las costas de Rosarito, B.C., de 1994 a 1998 (tesis de licenciatura). Universidad Autónoma de Baja California

Masselink, G., Scott, T., Poate, T., Russell, P., Davidson, M., & Conley, D. (2016). The extreme 2013/2014 winter storms: Hydrodynamic forcing and coastal response along the southwest coast of England. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(3), 378–391. <http://doi.org/10.1002/esp.3836>

Mendoza, E. T., Jiménez, J. A., & Mateo, J. (2011). A coastal storms intensity scale for the Catalan sea (NW Mediterranean). *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(9), 2453–2462.

Ortiz Figueroa, M. (2009). Agitación por oleaje en el puerto de Ensenada, Baja California, México: medidas de atenuación. *Geos*, 29(2), 240–249.

Pérez-Higuera, R. y Chee-Barragán, A. (1984). Transporte de sedimentos en la Bahía de Todos Santos, BC. *Ciencias Marinas*, 10(3): 31–52.

Ruiz de Alegría-Arzaburu, A., Arreola-Cortez, M. A., García-Nava, H., Hernandez-Walls, R., & Mejía-Trejo, A. (2016). The Effects of Beach Morphology Variations on the Profile of Nearshore Currents on a Gently Sloping Mesotidal Beach. *Journal of Coastal Research*, 457-461.

Ruiz de Alegría-Arzaburu, A., García-Nava, H., Gil-Silva, E., Desplan-Salina, G. (2015). A morphodynamic comparison of walled and non-walled beach sections, ensenada beach, Mexico. *The Proceedings of the Coastal Sediments*.

Sánchez-Arcilla, A., Jiménez, J. A. (1994). Ingeniería de playas (I): Conceptos de morfología costera. *Ingeniería del Agua*, 1, 97.

Senechal, N., Coco, G., Castelle, B., & Marieu, V. (2015). Storm impact on the seasonal shoreline dynamics of a meso- to macrotidal open sandy beach (Biscarrosse, France). *Geomorphology*, 228, 448–461.

Silva, R., Martínez, M. L., Odériz, I., Mendoza, E., & Feagin, R. A. (2016). Response of vegetated dune–beach systems to storm conditions. *Coastal Engineering*, 109, 53–62. doi:10.1016/j.coastaleng.2015.12.007

Vidal, C., Losada, M. A., Medina, R., Losada I. (1995). Modelos de morfodinámica de playas. Ingeniería del Agua , 2, 55-74.

Wright, L.D., Short, A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. Marine Geology 56.

Zetina, M. C. E.; Sánchez, P. I.; Osorio, R. H.; Mariño, T. I.; Castillo Ch., R. J.; Cauich T., J. C. Análisis de modelos de perfil de playa en equilibrio aplicados a una playa de Yucatán, México Ingeniería, vol. 12, núm. 3, septiembre-diciembre, 2008, pp. 15-31 Universidad Autónoma de Yucatán Mérida, México.