The Nature Conservancy

CAMBIOS EN LA LÍNEA DE COSTA DE CABO DEL ESTE, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO

Análisis de las posibles causas de los cambios en la línea de costa en Cabo del Este de 1973 a 2018.

2020

Fernando Secaira, Carlos Peynador, Eliana Rosas, Laura Vallín, Raúl Silvestre, Carolina Rosales, 2020.
Estudio realizado por LORAX Consultores bajo la dirección de The Nature Conservancy.

The Nature Conservancy

CAMBIOS EN LA LÍNEA DE COSTA DE CABO DEL ESTE, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO

Análisis de las posibles causas de los cambios en la línea de costa en Cabo del Este de 1973 a 2018.

2020

Fernando Secaira, Carlos Peynador, Eliana Rosas, Laura Vallín, Raúl Silvestre, Carolina Rosales, 2020.
Estudio realizado por LORAX Consultores bajo la dirección de The Nature Conservancy.

CAMBIOS EN LA LÍNEA DE COSTA DE CABO DEL ESTE, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO

AUTORES

Fernando Secaira Fajardo- Líder de la Iniciativa de Resiliencia Costera, The Nature Conservancy
Dr. Carlos Peynador Sánchez - Coordinador, Lorax
M.C. Eliana Rosas Verdugo - Editor y analista, Lorax
M.C. Laura V. Vallín Aínza - Editor y analista; Lorax
M.C. Raúl Silvestre Morales - Analista, Lorax
Carolina Rosales - Asistente Técnico, The Nature Conservancy

DISEÑO EDITORIAL
Karla Paola Vazquez Mendoza

CITA
Secaira, F., Peynador, C., E. Rosas, L. Vallín, R. Silvestre & Rosales C. (2020). Cambios en la Línea de Costa de Cabo del Este, Baja California Sur, México. The Nature Conservancy (TNC); Lorax Consultores, S.A. de C.V.

ESTE DOCUMENTO ES PARTE DE LA INICIATIVA DE RESILIENCIA COSTERA PARA MÉXICO, THE NATURE CONSERVANCY.
Líder de la Iniciativa en México: Fernando Secaira
Especialista en Restauración: Calina Zepeda
Asistente Técnico: Carolina Rosales
Dirección Global: Mark Way

Estudio realizado por LORAX Consultores bajo la dirección de The Nature Conservancy.

CONTENIDO

1 **Hacia una comprensión de los factores que cambian la línea de costa en Cabo del Este** 1

2 **Cabo del Este** 2

3 **Metodología** 5

3.1 Determinación de los cambios en la línea de costa de Cabo del Este 8

3.2 Aporte sedimentario 10

3.3 Climatología del oleaje 12

3.4 Caracterización de las mareas y cambios en el nivel medio del mar 13

3.5 Eventos extremos 14

3.6 Localidades y construcciones en la costa 14

4 **Resultados** 15

4.1 Cambios en la línea de costa 16

4.2 Superficies de erosión y acreción de la costa 21

4.3 Aporte sedimentario 24

4.4 Climatología del oleaje 30

4.5 Nivel del mar 33

4.6 Eventos extremos 34

4.7 Localidades y construcciones en la línea de costa 38

5 **Factores que determinaron los cambios en la línea de costa de cabo del este** 46

6 **Referencias** 48

1 HACIA UNA COMPRENSIÓN DE LOS FACTORES QUE CAMBIAN LA LÍNEA DE COSTA EN CABO DEL ESTE

1 HACIA UNA COMPRENSIÓN DE LOS FACTORES QUE CAMBIAN LA LÍNEA DE COSTA EN CABO DEL ESTE

Las costas son dinámicas y cambian constantemente, erosionándose o ampliándose, debido a la interacción de los procesos costeros con la morfología de la costa y los sistemas naturales (Hamylton, 2017). Estos procesos naturales han sido alterados por dos categorías de factores: 1) Alteraciones humanas directas sobre la costa, como construcciones en dunas y en el mar y el retiro de la vegetación 2) Cambios provocados por el calentamiento global, como aumento del nivel mar, lluvias y sequías y tormentas más intensas.

Cabo del Este, en Baja California Sur, es una región relativamente prístina, donde existen pocas comunidades y obras turísticas. La costa ha experimentados procesos de erosión y acreción de playas provocados por procesos naturales y, en algunos sitios, por intervenciones antrópicas. El gobierno y el sector privado tienen planeado construir diversos proyectos inmobiliarios y turísticos en la región; sin embargo, muchos no consideran la dinámica costera mencionada y los procesos de erosión y acreción presentes. Es necesario comprender la dinámica costera para orientar los proyectos, su tipología, su ubicación y el manejo de su entorno, de forma que consideren el impacto de la erosión y acreción que ineludiblemente ocurrirá en la costa.

El objetivo de este estudio es evaluar la contribución de los distintos factores naturales y de las alteraciones antrópicas en los cambios de línea de costa de Cabo del Este para poder orientar las acciones de manejo y los futuros proyectos inmobiliarios y turísticos planeados para la región.

El primer paso fue determinar los cambios en la línea de costa ocurridos entre 1973 y 2018 con el apoyo de imágenes satelitales y fotografías aéreas de alta resolución. Posteriormente, se analizaron los cambios ocurridos en cada factor natural y antrópico. Finalmente, se analizó en forma cualitativa la contribución de cada uno de ellos en los cambios observados en la línea de costa.

2 CABO DEL ESTE

2 CABO DEL ESTE

Cabo del Este está ubicado en el municipio de Cabo San Lucas en Baja California Sur; la línea de costa tiene una extensión de 118 km e inicia en el norte en la localidad de Buenavista - cerca a la frontera entre los municipios de La Paz y Los Cabos- y finaliza en el extremo oriental de la ciudad de San José del Cabo (ver Figura 1).

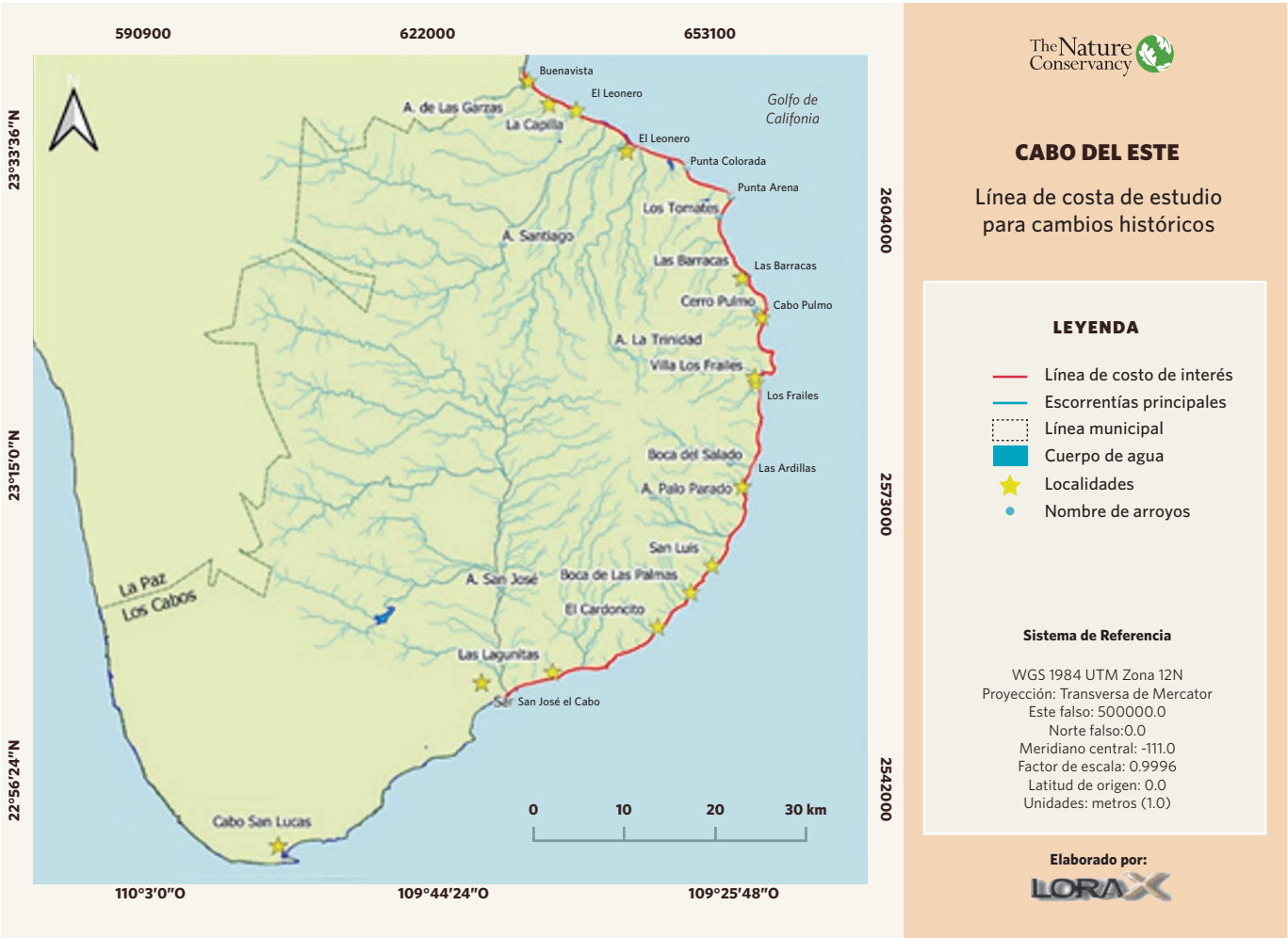


Figura 1. Ubicación de Cabo del Este. La línea de costa roja comprende la zona de estudio.

La costa de Cabo del Este está conformada por islas de barrera largas y extensas de playas bajas, planicies de inundación, campos de dunas y salitrales con relieve bajo. Posee una configuración irregular, con entrantes y salientes que forman bahías de bolsillo contenidas entre cantiles rocosos de diferentes tamaños (Rodríguez-Revelo *et al.*, 2014). La mitad de la línea de costa corresponde a costas rocosas, mientras que la otra porción está compuesta por playas arenosas y playas de cantos rodados (Rodríguez-Revelo *et al.*, 2014). La mayor parte del sedimento que forma las playas provienen de los cerros y piedemonte que descienden a través de escurrimientos hidrológicos y forman abanicos deltaicos de sedimentos gruesos con baja madurez textural.

Las dunas más desarrolladas se encuentran en Cabo Pulmo y forman una saliente arenosa con dunas frontales y transgresivas que se alimentan del sedimento proveniente de escurrimientos cercanos. Las dunas cercanas a los poblados costeros han sido degradadas por edificios y campos de golf construidos sobre la duna costera y el dragado de marinas. A pesar de ello, la mayor parte de las playas de Cabo del Este se encuentran en buen estado de conservación.

© Ana Pozas

3 METODOLOGÍA

3 METODOLOGÍA

Primero se analizaron los cambios en la línea de costa ocurridos entre los años de 1973 y 2018. Posteriormente se analizaron los factores naturales y antrópicos que podrían incidir en dichos cambios. Hay múltiples factores que pueden modificar la línea costera según la localidad y de acuerdo al período de análisis (ver Tabla 1). En Cabo del Este seleccionamos cinco factores presentes y con temporalidad adecuada para el período de 40 años de estudio (ver Figura 2):

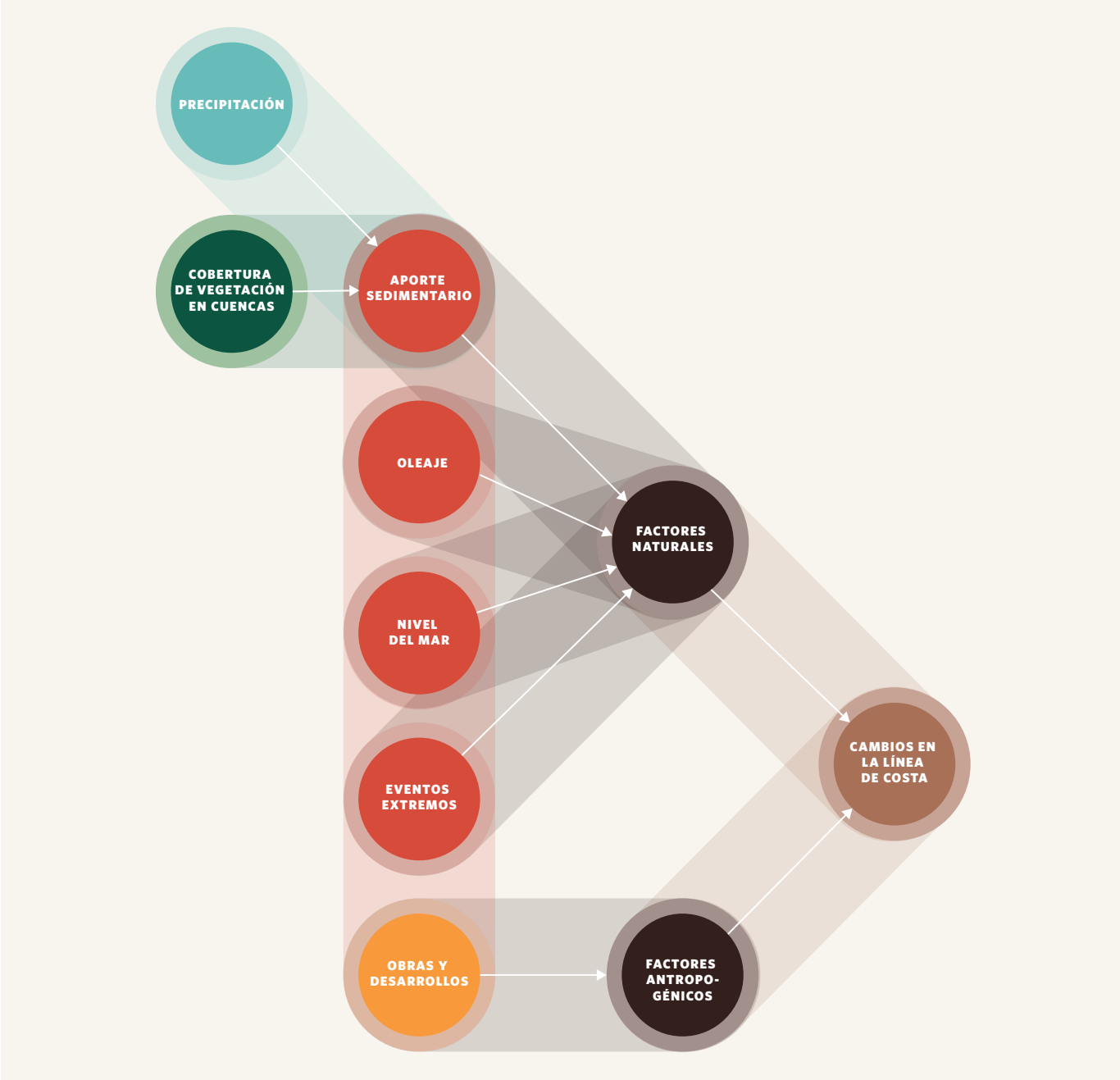


Figura 2. Factores que inciden en los cambios en la línea de costa.

■ **Tabla I.** Factores naturales que pueden modificar la línea de costa.

FACTOR	EFECTO			ESCALA TEMPORAL DE ACTUACIÓN							
	EROSIÓN	NINGUNO	ACRECIÓN	SE	HR	D	M	A	DE	SI	MI
Aporte sedimentario	●		●						●	●	●
Aumento del nivel del mar	●									●	●
Variabilidad del nivel del mar	●		●				●	●			
Mareas meteorológicas	●				●	●					
Oleaje de alta energía	●				●	●	●				
Oleaje de periodos cortos	●				●	●	●				
Olas de pendiente pequeña			●		●	●	●				
Corrientes a lo largo de la costa	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●
Corrientes de retorno	●				●	●					
Flujos de retorno	●				●	●					
Presencia de bocas y bocanas	●							●	●	●	
Inundaciones	●		●		●	●					
Efectos producidos por el viento	●				●	●	●	●	●	●	
Subsidencia costera	●								●		
Compactación costera	●		●		●						
Procesos tectónicos										●	●

SE: Segundos, **HR:** Horas, **D:** Días, **M:** Meses, **A:** Años, **De:** Decenios, **SI:** Siglos, **MI:** Milenios
Fuente: Adaptado de The Heinz Center (2000).

3.1 DETERMINACIÓN DE LOS CAMBIOS EN LA LÍNEA DE COSTA DE CABO DEL ESTE

Para determinar los cambios históricos de la línea de costa se utilizaron imágenes aéreas y satelitales de alta resolución (ver Tabla II). Se determinó el cambio que hubo entre cada set de datos, comparando la línea de costa de 1973 con la información posterior mas cercana, y así sucesivamente hasta 2018, en 6 períodos distintos (ver Tabla III). Las imágenes disponibles no abarcan toda la zona de estudio en todos los años por lo que existen vacíos en los resultados. Sin embargo, esto no afecta la interpretación de los resultados.

Tabla II. Tipo y fecha de imágenes utilizadas en el análisis de cambio de línea de costa.

TIPOS	FUENTE	FECHA	LONGITUD DE LÍNEA DE COSTA (KM) CUBIERTA POR LA IMAGEN
Fotografía aérea	INEGI	01-jul-73	106.172
Imagen satelital	Digital Globe	19-jun-03	38.336
Imagen satelital	Digital Globe	12-dic-05	69.695
Imagen satelital	Digital Globe	13-ago-09	114.39
Imagen satelital	Digital Globe	04-may-13	123.445
Imagen satelital	Digital Globe	14-dic-16	130.279
Imagen satelital	Digital Globe	27-mar-18	129.053

Tabla III. Periodos de análisis

	PERÍODOS DE ANÁLISIS
1	1973-2018
2	1973-2005
3	2005-2009
4	2009-2013
5	2013-2016
6	2016-2018

MÉTODO PARA DETERMINAR LOS CAMBIOS EN LA LÍNEA DE COSTA:

Para determinar los cambios en la línea de costa, se siguieron los siguientes pasos:

1. Se utilizó la pleamar máxima como línea de costa.

2. Se trazó la línea de costa de 1973 usando 10 fotografías aéreas adquiridas en INEGI. Luego se trazaron las líneas de costa para cada unos de las seis series de datos disponibles de los años 2003, 2005, 2009, 2013, 2016 y 2018.

3. Las líneas de costa fueron trazadas a escala 1:3000 utilizando los programas ArcGIS y Google Earth y analizadas mediante el uso de la extensión Digital Shoreline Analysis System (DSAS) del U.S. Geological Survey (USGS) para ArcGIS.

4. El cambio fue determinando como la distancia entre la línea de costa más antigua y a línea de costa más reciente. Se trazaron transectos cada 50 metros perpendiculares a la línea de costa de 1973 para medir la distancia entre líneas de costa de dos períodos distintos. El cambio puede ser positivo (acreción) si aumentó del año inicial hacia el final; y negativo (erosión) si retrocedió la línea de costa.

5. Para visualizar el cambio en la línea de costa se elaboraron gráficas; el eje Y tiene valores de -200 a + 400 metros y el eje X tiene 118 kilómetros. Las gráficas incluyen puntos de referencia que indican sitios de erosión y acreción sobresalientes en el periodo 1973-2018 (ver Figura 3).

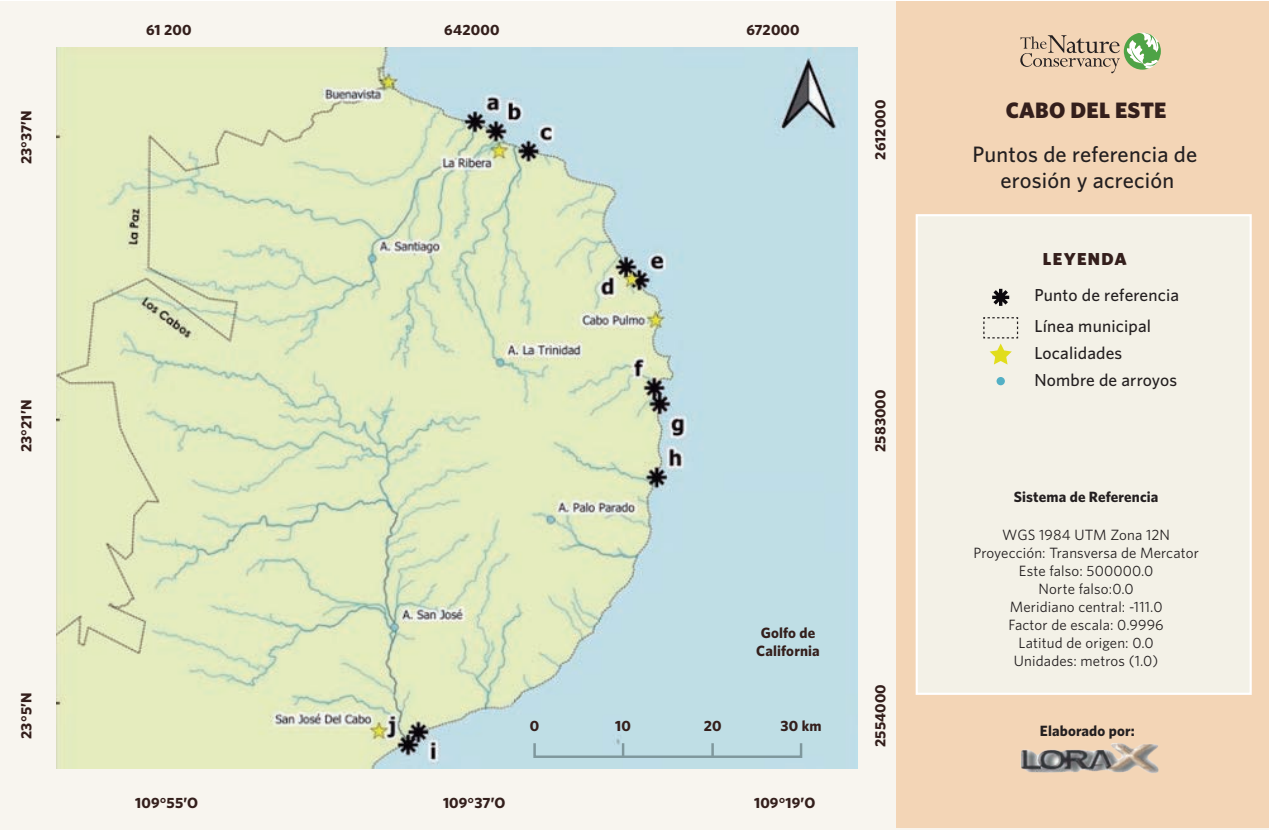


Figura 3. Localización de los puntos de referencia en la línea de costa con marcada acreción o erosión durante el periodo 1973 a 2018.

A continuación, se describe la metodología para analizar cada factor que puede intervenir en el cambio de la línea de costa.

3.2 APORTE SEDIMENTARIO

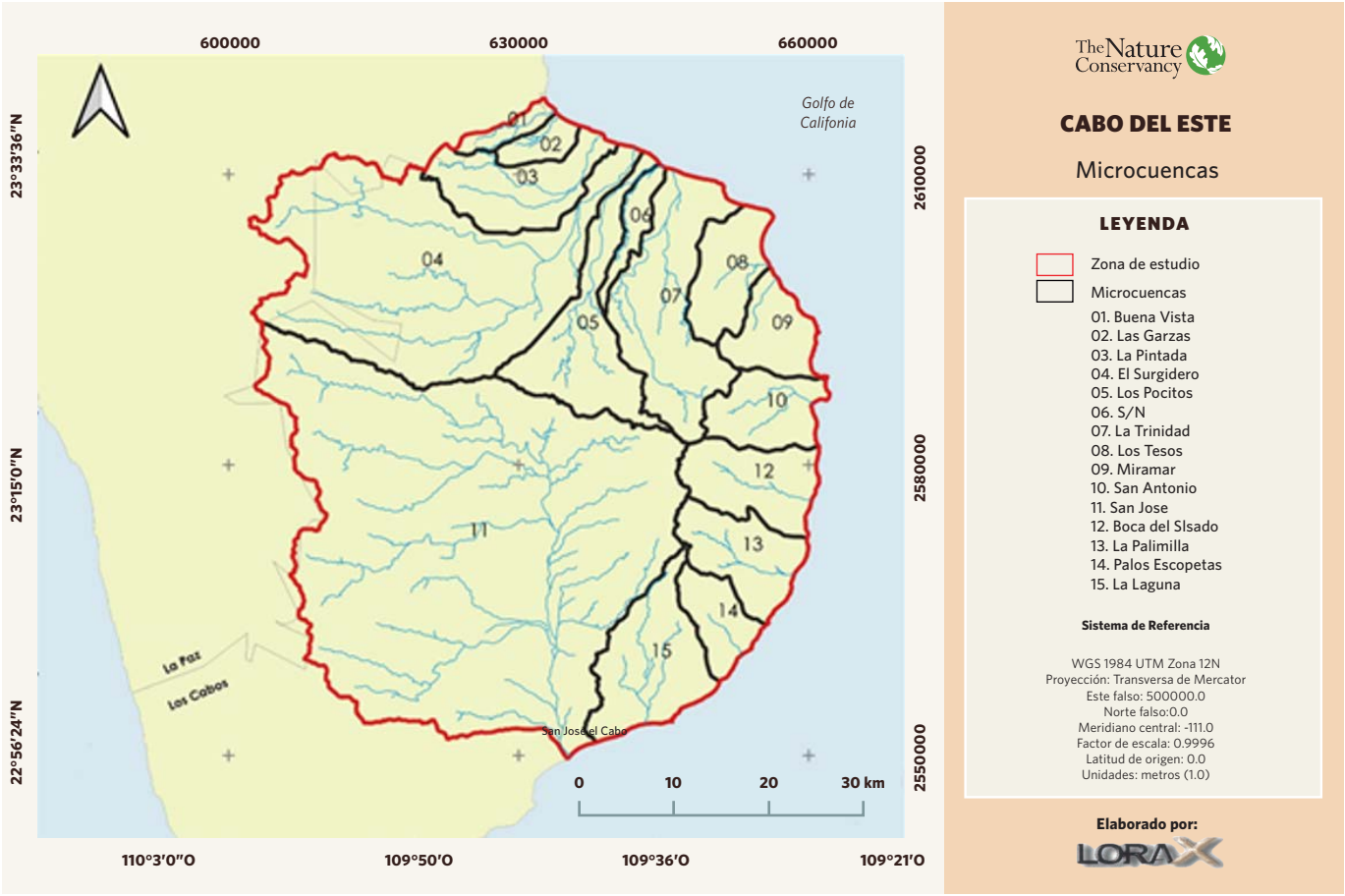
Los sedimentos en las cuencas hidrológicas son transportados por medio de escorrentías superficiales temporales. El sedimento se va desgastando a lo largo de su trayecto y puede llegar a la costa en forma de arena para alimentar las playas. En las últimas décadas se ha observado una disminución de transporte de sedimento en el 50% de los ríos del mundo (Wang *et al.*, 2015).

Los factores que determinan el aporte sedimentario en un cuenca son: 1) cobertura de vegetación (Wang *et al.*, 2015), dado que reduce el impacto de las gotas de lluvia y sus raíces aglutinan las partículas del suelo; 2) la precipitación anual (Langbein & Schumm, 1958), que se convierte en escorrentías y transporta el sedimento; 3) las lluvias intensas (Leopold, 1951), eventos cortos e intensos que provocan mayor erosión del suelo y mayor transporte; 4) el tipo de suelo, ya que unos son más susceptibles que otros a la transportación; y 5) la pendiente del terreno, la cual determina la velocidad y fuerza de las escorrentías.

MÉTODO PARA DETERMINAR EL APORTE SEDIMENTARIO AL SISTEMA LITORAL POR CUENCA

Para determinar el aporte de sedimento por las escorrentías que drenan en la costa de Cabo del Este se utilizó la metodología propuesta por Pou-Alberú y Pozos-Salazar (1992), quienes usan la ecuación de Langbein y Schumm (1958). La ecuación relaciona la precipitación, la pendiente del terreno, el tipo de suelo, el efecto erosivo de la lluvia y la acción protectora de la vegetación. Los datos e insumos para el análisis fueron:

1. **Cuencas hidrográficas.** Se seleccionaron las escorrentías de la red hidrográfica de INEGI (2010) que drenan directamente en la línea de costa de Cabo del Este. La región se dividió en 15 microcuencas (ver Figura 4).



■ **Figura 4.** Microcuencas dentro de las cuencas de estudio.

2 **Textura del suelo.** Se utilizó el conjunto de datos edafológicos de INEGI (2008). La guía de Edafología de INEGI clasifica la textura en:

- **Gruesa:** suelos arenosos con más de 65% de arena, con poca capacidad de retención de agua y nutrientes para las plantas.
- **Media:** comúnmente llamados francos, equilibrados generalmente en el contenido de arena, arcilla y limo.
- **Fina:** suelos arcillosos con más de 35% de arcilla, poco drenaje, escasa porosidad, generalmente duros al secarse, se inundan fácilmente y son poco favorables al laboreo.

3 **Tipo de cobertura.** Se determinó a partir de imágenes LANDSAT del 2018. La cobertura dominante son pastizales (88.27%), seguido por bosque en la parte alta de las montañas (matorrales) (8.02%). El resto (3.61%) es ocupado por cultivos. Toda la zona de estudio tiene suelo con textura gruesa (ver Figura 5).

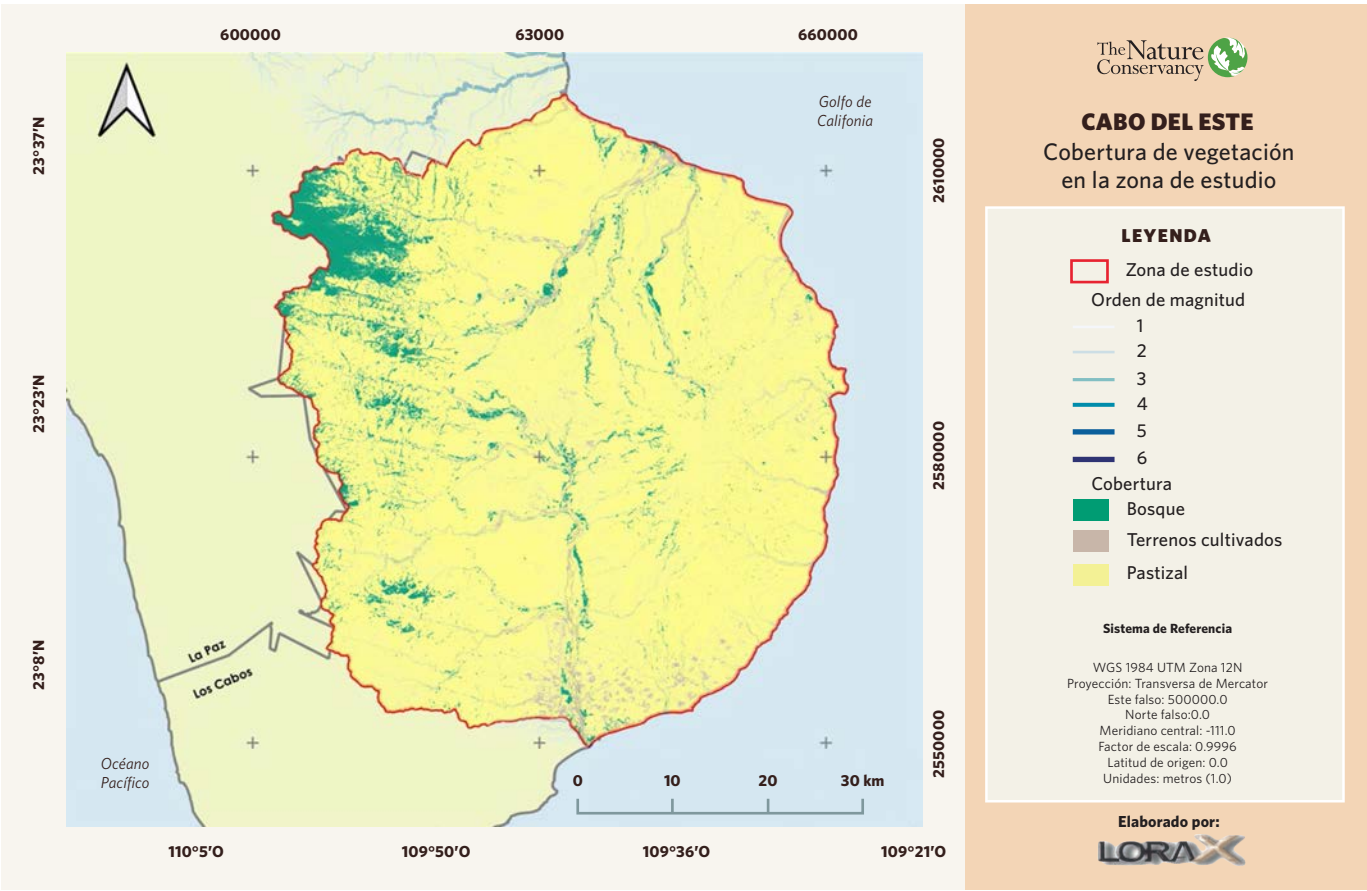


Figura 5. Cobertura de vegetación en la zona de estudio.

4 **Pendiente del terreno.** La pendiente de cada celda (formato raster) de la cuenca es determinada con base en un modelo de elevación digital.

5 **Coeficiente de escurrimiento.** El coeficiente de escurrimiento (Lored, 2005) se asigna con base en tres variables: el tipo de vegetación (bosque o pastizal), la textura del suelo y la pendiente.

6 **Precipitación en cada cuenca.** Se utilizaron los registros de precipitación de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (2018) ubicadas en la zona de estudio. Los datos de las estaciones fueron analizados estadísticamente para obtener valores anuales por estación. Luego se generó un ráster con valores de precipitación mediante interpolación de datos. Finalmente, se calculó la precipitación anual media para cada microcuenca multiplicando el área de la cuenca (km²) por la precipitación (mm).

7 **Precipitación efectiva.** Se refiere a la cantidad de precipitación requerida para producir escurrimiento (Langbein & Schumm, 1958). Para calcular la precipitación efectiva "P", se multiplicó la precipitación anual media de las cuencas por el coeficiente de escurrimiento, utilizando la siguiente ecuación:

$$P = P_m C$$

Donde:

P= Precipitación efectiva (mm).

$\mathbf{P_m}$= Precipitación anual media de la cuenca (para los años que hay información disponible).

C= Coeficiente de escurrimiento.

8 **Estimación de los sedimentos transportados.** Como se indicó inicialmente, se estimó el aporte sedimentario de las escorrentías para cada microcuenca, utilizando la ecuación de Langbein y Schumm (1958):

$$S = aP^m \frac{1}{1+bP^n}$$

Donde:

S= Carga anual de sedimentos en T/km².

P= Precipitación efectiva en mm.

m y n= Exponentes.

a y b= Coeficientes.

3.3 CLIMATOLOGÍA DEL OLEAJE

El viento incide sobre la superficie del agua en mar abierto y aplica un forzamiento que genera el oleaje oceánico (Trujillo & Turman, 2005). Conforme la ola se acerca a la línea de costa comienza a ser modificada por el fondo y llega a desestabilizarse y romperse (Trujillo & Turman, 2016). La energía potencial que la ola transporta se libera sobre la costa y pone en suspensión el sedimento. El oleaje genera corrientes que transportan el sedimento a lo largo de la costa o hacia afuera, dependiendo de la dirección del oleaje. Es un factor determinante en la dinámica de los procesos litorales y es uno de los principales fenómenos físicos que afecta a la morfología costera (Garrison, 2006). Para realizar una caracterización de largo plazo, conocida como climatología del oleaje, se utilizan los siguientes parámetros estadísticos de las olas: altura significante, período pico y dirección promedio en el período pico.

MÉTODO PARA DETERMINAR LA CLIMATOLOGÍA DEL OLEAJE

Se utilizaron datos de oleaje oceánico de la NOAA del período de 2008 a 2017 del nodo ubicado a 50 km frente a Cabo del Este. Se obtuvo el comportamiento del oleaje de un año típico promediando los valores para los 365 días de todos los años del 2008 al 2017 (diez años es el período mínimo recomendado). Estos datos se muestran mediante la roseta de oleaje para Cabo del Este y gráficas que muestra la altura de ola significante en el transcurso de un año promedio del periodo analizado. Después se calculó la profundidad a la cual el oleaje comienza a ser afectado por la batimetría. Esta profundidad corresponde a la frontera entre aguas profundas y aguas someras.

3.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS MAREAS Y CAMBIOS EN EL NIVEL MEDIO DEL MAR

El nivel de las mareas y del nivel medio del mar influye en las corrientes litorales, el oleaje y las mareas de tormenta, las cuales modifican la línea de costa (Trujillo & Thurman, 2016). El nivel medio de mar a escala global está aumentando debido al cambio climático y puede ser causante de erosión. Para detectar el cambio en una región específica, debe caracterizarse el régimen de mareas local y determinar el nivel medio del mar a lo largo de décadas.

MÉTODO PARA CARACTERIZAR LAS MAREAS Y DETERMINAR CAMBIOS EN EL NIVEL MEDIO DEL MAR

1. Modelación de las mareas. Para caracterizar el régimen de mareas en todo el período se modelaron las mareas astronómicas para todos los años entre 1970-2018. Se utilizó el software MAR V1.0 del CICESE utilizando registros históricos de la estación de Cabo San Lucas, B.C.S. del Servicio Mareográfico Nacional de la UNAM, el cual se encuentra a 30 km de la costa de estudio (Ray, 1999). Se utilizaron los datos de la altura del nivel del mar sobre la bajamar mínima inferior (BMI) cada 60 minutos, durante febrero (invierno) y agosto (verano) de 1975 a 2000.

2. Verificación de los resultados de la modelación de las mareas. Los resultados de las predicciones de marea se compararon con los registros de la estación mareográfica de los años 1975, 1980, 1985, 1990, 1995 y 2000, corroborando la calidad de las predicciones.

3. Determinación del nivel medio del mar y su tendencia. Basado en los resultados de las predicciones de mareas astronómicas verificadas con los registros de la estación meteorológica, se realizó un análisis estadístico descriptivo para caracterizar el comportamiento de las mareas y los cambios en el nivel del mar.

3.5 EVENTOS EXTREMOS

Los ciclones tropicales generan oleaje de alta energía y producen transporte masivo de sedimentos, tanto a lo largo de la costa como de la costa a aguas profundas. Como resultado causan erosión severa y acreción a gran escala (Trujillo & Turman, 2005). Baja California Sur está muy expuesto a los ciclones tropicales del Pacífico mexicano.

Las lluvias intensas y períodos de sequía prolongados también son eventos extremos relevantes pues modifican sustancialmente el aporte sedimentario incidiendo en los procesos de erosión y acreción en la costa.

MÉTODO PARA IDENTIFICAR Y CARACTERIZAR LOS EVENTOS EXTREMOS.

La identificación de eventos extremos requiere la caracterización de las condiciones climáticas normales de la zona de estudio para identificar las anomalías en los datos de precipitación y oleaje extremo, los cuales indican la ocurrencia de los fenómenos de sequías, lluvias intensas y huracanes.

Previamente se determinó la precipitación anual en la región de Cabo del Este (sección 3.2). En dicho análisis se identificaron los períodos de sequía prolongados y los días con lluvias intensas. Estos fenómenos pueden ocurrir en cuencas específicas o bien abarcan varias cuencas.

Posteriormente se caracterizó la climatología del oleaje (sección 3.3) en la cual se calcularon los promedios de los parámetros estadísticos para las temporadas de invierno y verano, y de todo el año, con base en registros de diez años.

Finalmente se determinó si los eventos de lluvias y oleaje extremos fueron provocados por ciclones tropicales. Para ello se identificaron los ciclones tropicales que pasaron a menos de 100 km a la redonda de la zona de estudio entre los años 1970 a 2017 y se caracterizó el oleaje de cada ciclón seleccionado. El inventario de ciclones tropicales se obtuvo de la base de datos "International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) v3" del Centro Nacional de Información Ambiental de la NOAA (2017).

3.6 LOCALIDADES Y CONSTRUCCIONES EN LA COSTA.

Las actividades humanas ejercen una fuerte presión sobre los ambientes costeros (Sorensen *et al.*, 1992). La construcción de infraestructura básica, hoteles, condominios, campos de golf y marinas es la mayor amenaza antropogénica para las dunas costeras en Baja California Sur *(*Rodríguez-Revelo *et al., 2014)* ya que está planeada la expansión del corredor turístico Los Cabos-San José del Cabo hacia la costa del municipio de La Paz, impactando Cabo del Este.

MÉTODO PARA IDENTIFICAR LAS CONSTRUCCIONES EN LA LÍNEA DE COSTA Y SU IMPACTO.

Primero se identificaron los sitios con desarrollos turísticos, localidades y obras costeras ubicados en la proximidad de la línea de costa en la imagen satelital de Digital Globe más reciente (2018) disponible en Google Earth, con apoyo de la carta topográfica de INEGI. Posteriormente se comparó la línea de costa de 2018 en cada sitio con las obtenidas para los años de 1973, 2003, 2005, 2009, 2013 y 2016.

Los tipos de desarrollo identificados en la línea de costa fueron clasificados en cuatro categorías: (1) desarrollos turísticos, (2) obras costeras, (3) localidades costeras y (4) otros. La categoría "otros" son aquellas construcciones menores, que no califican dentro de las otras categorías.

4 CARACTERIZACION DE LOS FACTORES NATURALES Y ANTRÓPICOS DETERMINANTES PARA LA LINEA DE COSTA

4 CARACTERIZACION DE LOS FACTORES NATURALES Y ANTRÓPICOS DETERMINANTES PARA LA LINEA DE COSTA

Los resultados del análisis fueron:

4.1 CAMBIOS EN LA LÍNEA DE COSTA

El cambio entre las líneas de costa de seis períodos distintos se presenta en las Figuras 6 a 11 (ver períodos en el recuadro). Las figuras indican:

- El cambio en el ancho de playa está expresado en metros y representado en el eje Y. Los valores negativos indican erosión y los positivos indican acreción. El eje varía de 500 metros: + 300m a -200m.
- Los transectos generados cada 50 metros a lo largo de la línea de costa de Cabo del Este están representados en el eje X. Este eje tiene 167 km de largo por lo que está representado a una escala distinta.
- Sitios de referencia (a – j) seleccionados por presentar cambios significativos en la línea de costa y estar asociados con infraestructura (ver Tabla IV).
- Zonas con erosión o acreción predominante en cada período, indicadas con corchetes.
- Hay secciones sin datos pues las imágenes satelitales no cubrieron toda la zona de estudio.

PERÍODOS DE ANÁLISIS	
1	1973-2018
2	1973-2005
3	2005-2009
4	2009-2013
5	2013-2016
6	2016-2018

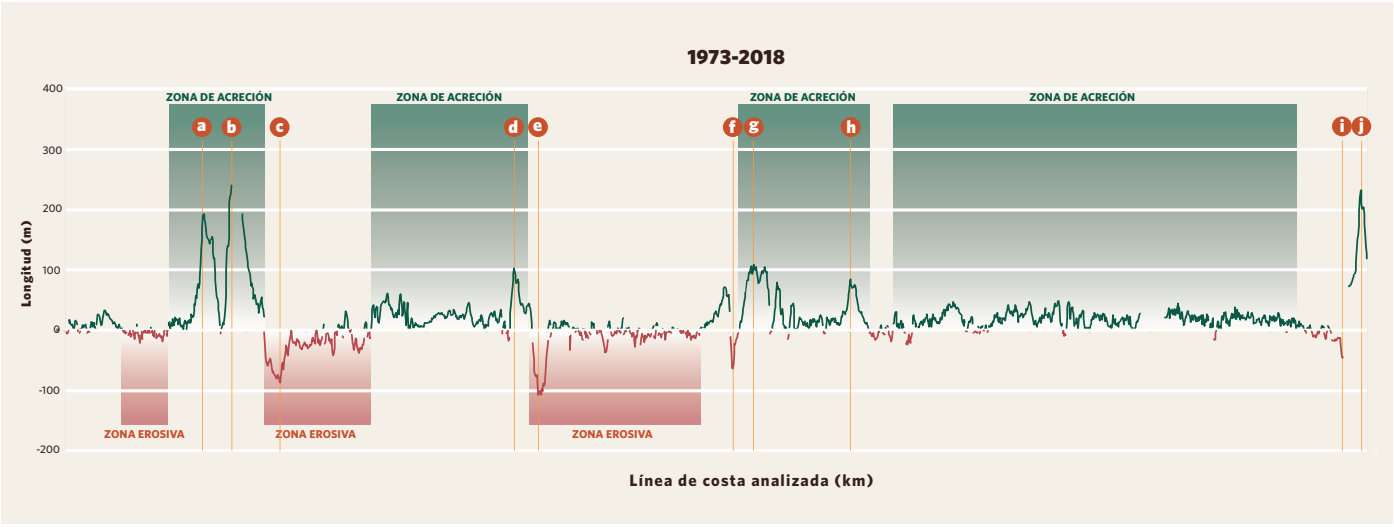


Figura 6. Zonas de erosión (rojo) y acreción (verde) para el periodo 1973-2018 (longitud analizada: 104.64 km).

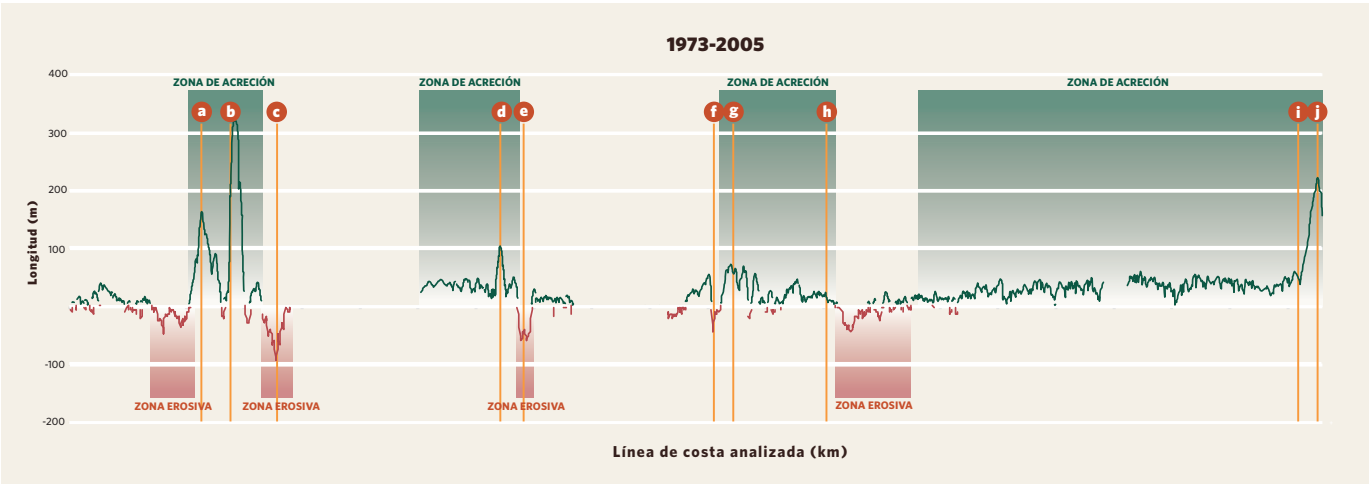


Figura 7. Zonas de erosión (rojo) y acreción (verde) para el periodo 1973-2005 (longitud analizada: 86.97 km).

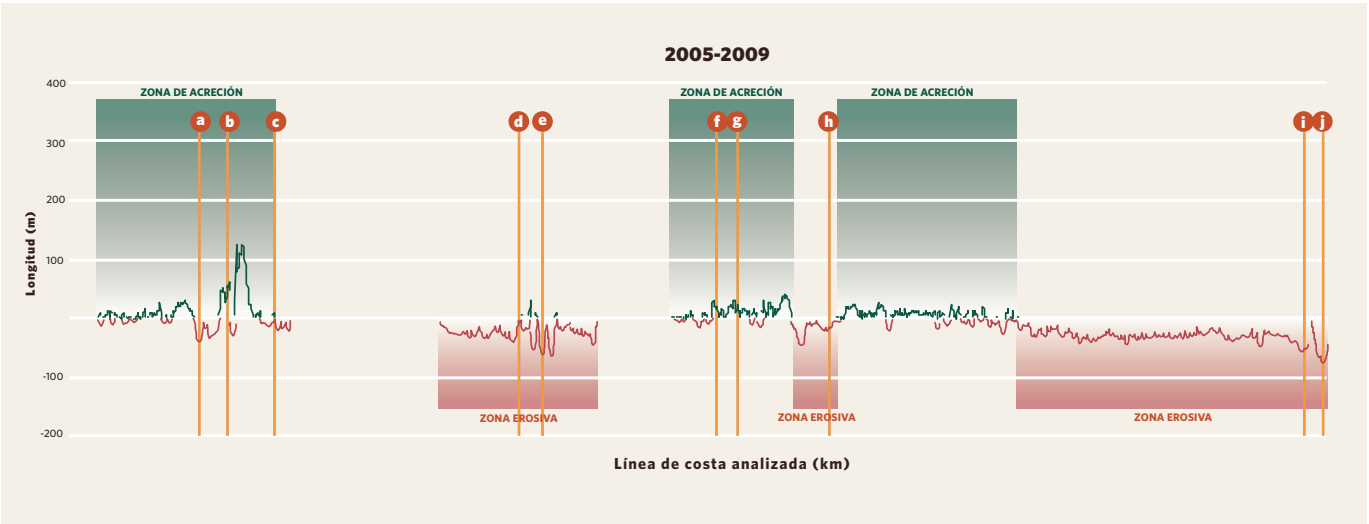


Figura 8. Zonas de erosión (rojo) y acreción (verde) para el periodo 2005-2009 (longitud analizada: 88.52 km).

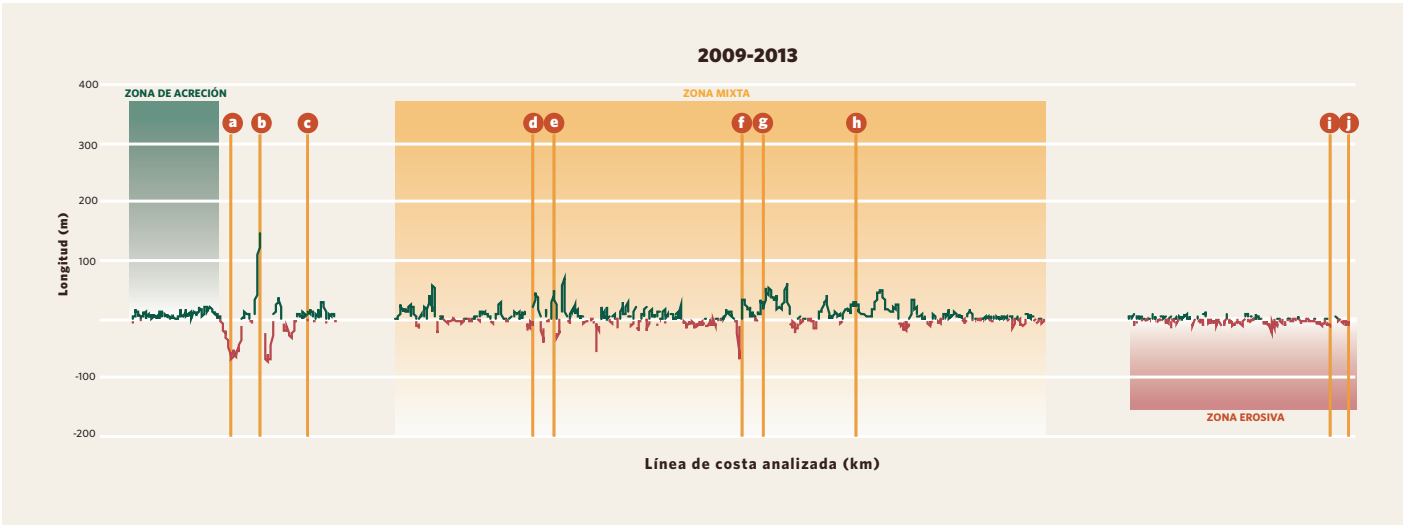


Figura 9. Zonas de erosión (rojo) y acreción (verde) para el periodo 2009-2013 (longitud analizada: 93.53 km).

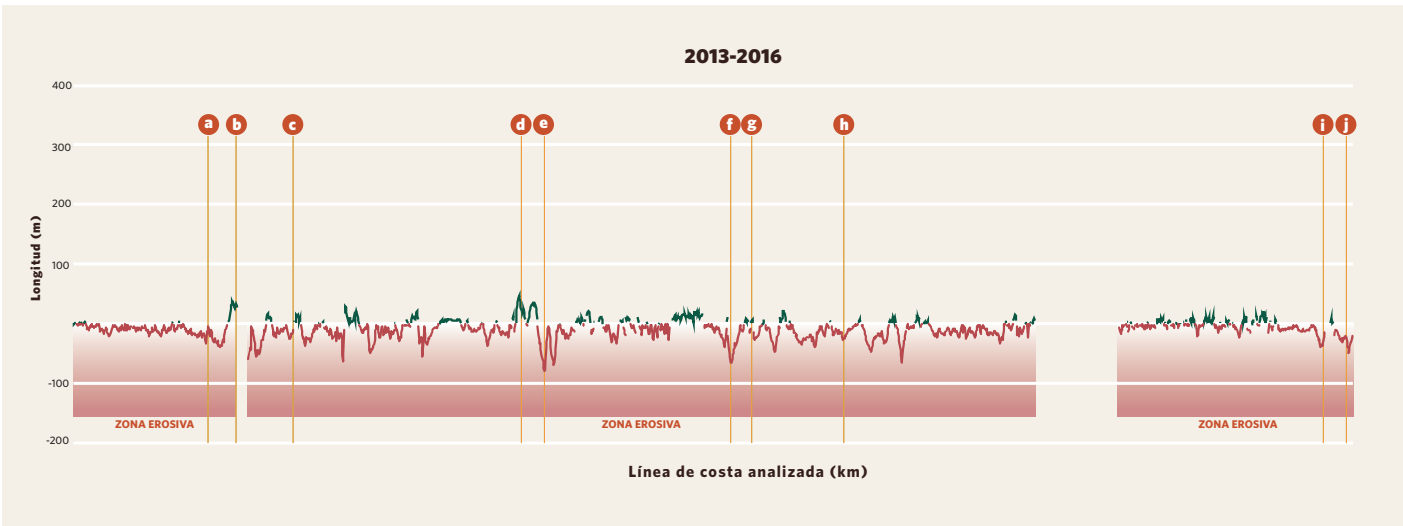


Figura 10. Zonas de erosión (rojo) y acreción (verde) para el periodo 2013-2016 (longitud analizada: 99.98 km).

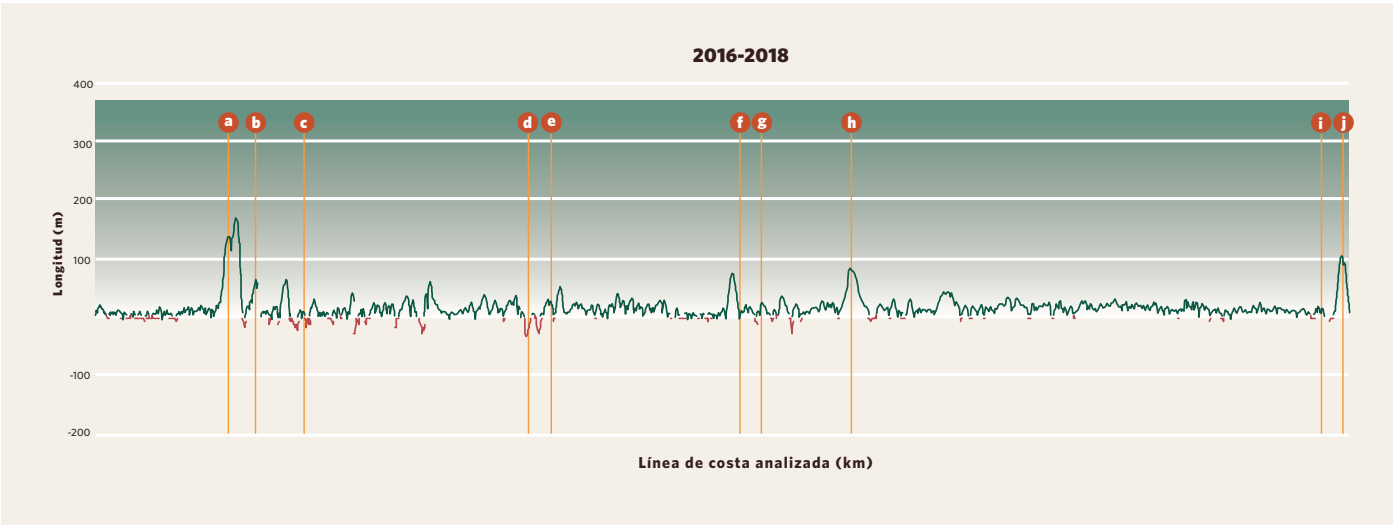


Figura 11. Zonas de erosión (rojo) y acreción (verde) para el periodo 2016-2018 (longitud analizada: 107.26 km).

Tabla IV. Punto relevantes con erosión y acreción significativas de la línea de costa durante el periodo 1973-2018 y sus cambios por periodos especificos.

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA GEOGRÁFICA CERCANA	PERIODO 1973-2018	PERIODO 1973-2005	PERIODO 2005-2009	PERIODO 2009-2013	PERIODO 2013-2016	PERIODO 2016-2018
a	Desembocadura de arroyo El Surgidero	170.23	149.99	-34.67	-56.17	-11.75	122.84
b	Norte de la marina del desarrollo Costa Palmas	239.29	20.66	28.15	122.44	28.11	40.73
c	Playa Colorada	-86.27	-92.30	7.47	7.00	-15.48	6.54
d	Las Tachuelas, Estancia del Mar	102.19	102.22	-1.10	-3.44	28.35	-20.84
e	Las Barracas	-106.82	-48.85	-49.34	49.32	-77.87	18.53

TENDENCIA ACRECIÓN EROSIÓN

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA GEOGRÁFICA CERCANA	PERIODO 1973-2018	PERIODO 1973-2005	PERIODO 2005-2009	PERIODO 2009-2013	PERIODO 2013-2016	PERIODO 2016-2018
f	Los Frailes	-63.55	-45.56	17.35	14.12	-65.48	1.42
g	Antares	108.79	55.37	17.71	25.73	0.68	-1.96
h	Desembocadura de arroyo Boca del Salado	84.45	19.58	-13.00	29.49	-26.43	76.45
i	La Playa (al Este de la marina)	-46.03	39.79	-46.20	-9.43	-29.56	3.95
j	José Desembocadura de arroyo San	231.65	219.53	-58.68	-5.80	-22.08	100.35

TENDENCIA ACRECIÓN EROSIÓN

4.2 EROSIÓN Y ACRECIÓN DE LA LÍNEA COSTA

El 72% de la costa (75.64 km) experimentó acreción neta y el 28% (29km) experimentó erosión neta entre 1973 y 2018 (ver Figura 13). La superficie de la costa varió casi 2,5 millones de m^2 en dicho periodo, de los cuales 479,768 m^2 (19.8%) fue terreno perdido por erosión y 1,946,600 m^2 (80.2 %) fue acreción o terreno ganado (ver Figura 12).

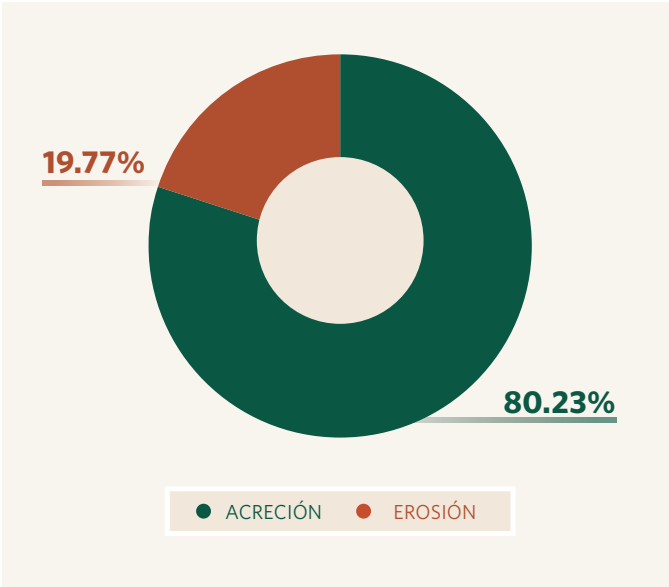


Figura 12. Porcentajes de superficie de acreción y erosión de 1973 a 2018.

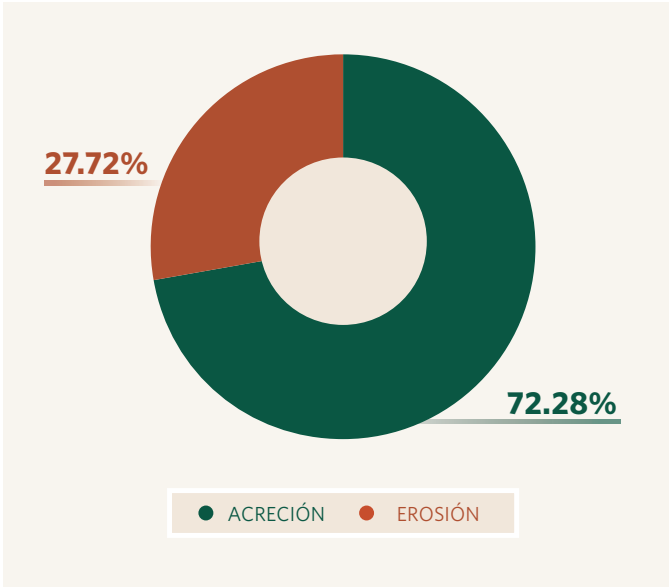


Figura 13. Porcentajes de longitud de playa con acreción y erosión de 1973-2018.

La costa se dividió en cinco segmentos de igual longitud y se calculó la superficie de erosión y acreción para cada uno (ver Tabla V). Esto permite confirmar que la acreción fue mayor a la erosión en toda la costa (ver Figura 14).

Tabla V. Superficies de erosión y acreción de la costa en los segmentos de costa definidos.

SEGMENTOS	ACRECIÓN (M^2)	EROSIÓN (M^2)	BALANCE (M^2)	TASA DE DEPOSICIÓN (M^2/AÑO)
1	542,700.91	194,458.55	348,242.36	7,738.72
2	377,891.03	147,969.21	229,921.83	5,109.37
3	382,614.10	76,508.89	306,105.22	6,802.34
4	401,906.39	27,437.50	374,468.88	8,321.53
5	241,487.03	33,394.13	208,092.91	4,624.29
Total	1,946,599.46	479,768.27	1,466,831.19	32,596.25

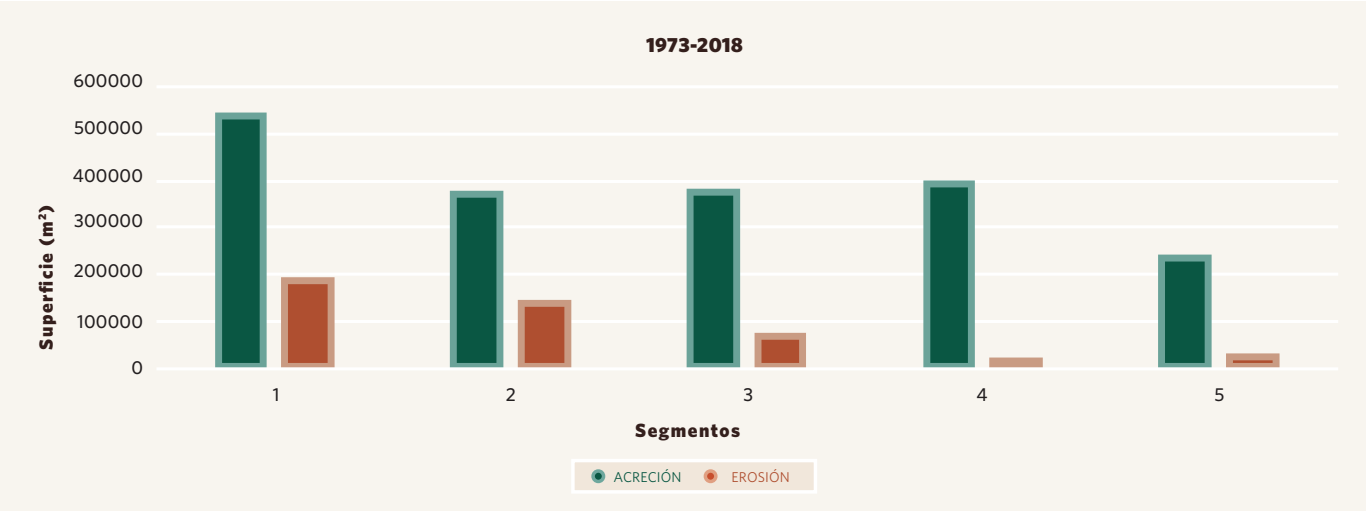


Figura 14. Superficie de erosión y acreción por segmentos de la línea de costa.

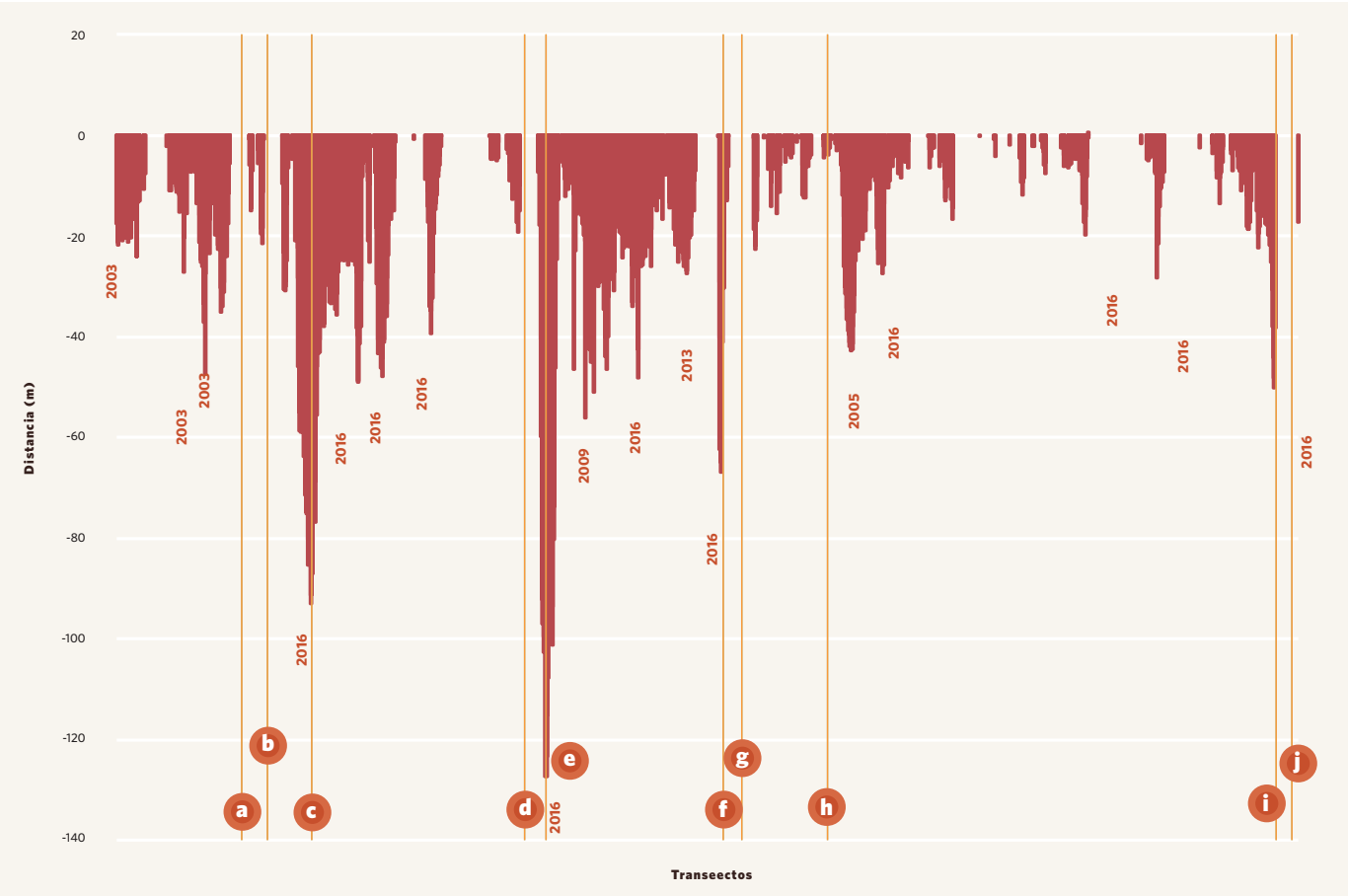


Figura 15. Distancias de erosión máxima en la costa de Cabo del Este de 1973 a 2018.

Acreción ha sido el fenómeno dominante en toda la costa. Sin embargo, toda la costa experimento erosión tambien. El análisis muestra que ocurrió acreción y erosión en periodos alternos en toda la costa durante los 45 años, evidenciado la variabilidad de la línea de costa y el riesgo que tienen las estructuras construidas en la zona costera (ver Figura 15). La mayor parte de la costa sufrió erosión menor a 40 metros, pero hubo sitios que perdieron mucho más, como Las Barracas con 130 metros, Playa Colorada con 103 metros y Los Frailes con 80 metros.

PERIODO	PROCESOS DE ACRECIÓN Y EROSIÓN EN LA COSTA Y POR SITIOS.
1973 - 2018	El 72% de la costa experimentó acreción entre 1973 y 2018 en Cabo del Este y en su mayor parte creció entre 0 y 50 metros. Hubo dos sitios con infraestructura que tuvieron más de 200 metros de acreción (b: Marina Costa Palma y j: arroyo San José) y tres entre a 100 y 200 metros (a: Arroyo el Surgidero, d: Las Tachuelas y g: Antares). Hay tres zonas con marcada erosión, cubriendo el 25 % de la costa. Los sitios con mayor erosión fueron entre c: Playa Colorada, e: Las Barracas, f: Los Frailes e i: la Marina, perdiendo entre 63 y 107 metros; todos tienen infraestructura en o cercano al sitio.
1973-2005	Periodo marcado por acreción. Resaltan los puntos a) El Surgidero, b) Marina Costa Palmas y j) arroyo San José con acreción de 150, 300 y 220 metros respectivamente. Los puntos c) Playa Colorada, e) Las Barracas y f) los Frailes, presentaron erosión severa (de 46 a 92 m).
2005-2009	Periodo dominado por erosión, revirtiendo parcialmente el proceso de acreción del periodo anterior, con excepción de la b) Marina Costa Palma, donde la acreción continuó en forma marcada (+100 m). La erosión en e) Las Barracas continuó (49 m), mientras que el proceso se revirtió y hubo una pequeña acreción en f) Los Frailes (7 m) y c) Playa Coloradas (17 m).
2009-2013	Periodo con balance entre zonas de erosión y acreción no excediendo 40 metros, pero hay sitios con erosión mayor a 50 metros. Resalta la desembocadura del arroyo El Surgidero, la cual perdió 56 metros en 2009-2013. Esta zona creció 150 metros entre 1973-2005 y perdió 35 metros en 2005-2009, por lo que aún presenta una acreción neta dentro del período de análisis.
2013-2016	Casi toda la línea de costa sufrió erosión, indicando un fenómeno de amplia escala que afectó toda la zona. Solamente pequeñas playas, localizadas y esparcidas a lo largo de la costa, tuvieron ligera acreción. Estas playas podrían ser zonas protegidas entre peñascos rocosos. La erosión en los sitios de seleccionados varió entre 11 y 79 metros. Solo hubo un sitio con acreción localizado al lado de una escollera en Marina Costa Palmas.
2016-2018	Prácticamente toda la costa mostró tendencia de recuperación luego de la erosión del periodo anterior. Resalta la desembocadura del arroyo El Surgidero con 122 metros de acreción, muy por encima del resto de la costa.

4.3 APORTE SEDIMENTARIO

Cabo del Este recibe el aporte sedimentario directo de 15 microcuencas y cuencas (ver Figura 16). Las cuencas San José (42%) y El Surgidero (18%) ocupan el 60% de la zona y aportan el 80% del sedimento (cuencas 04 y 11 en Figura 17). Por lo tanto influyen decisivamente en la condición de la costa.

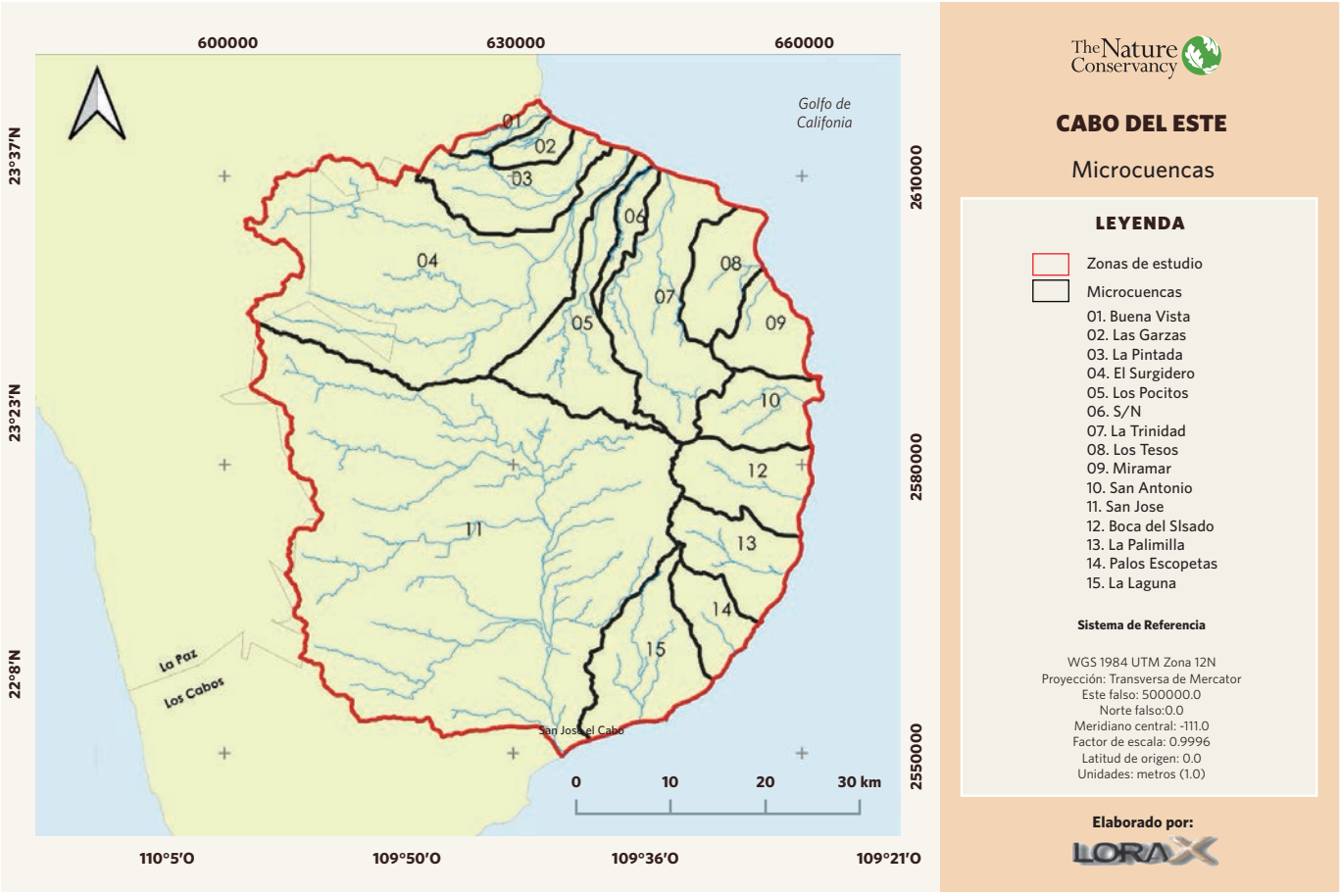


Figura 16. Cuencas y microcuencas que drenan en la costa de Cabo del Este.

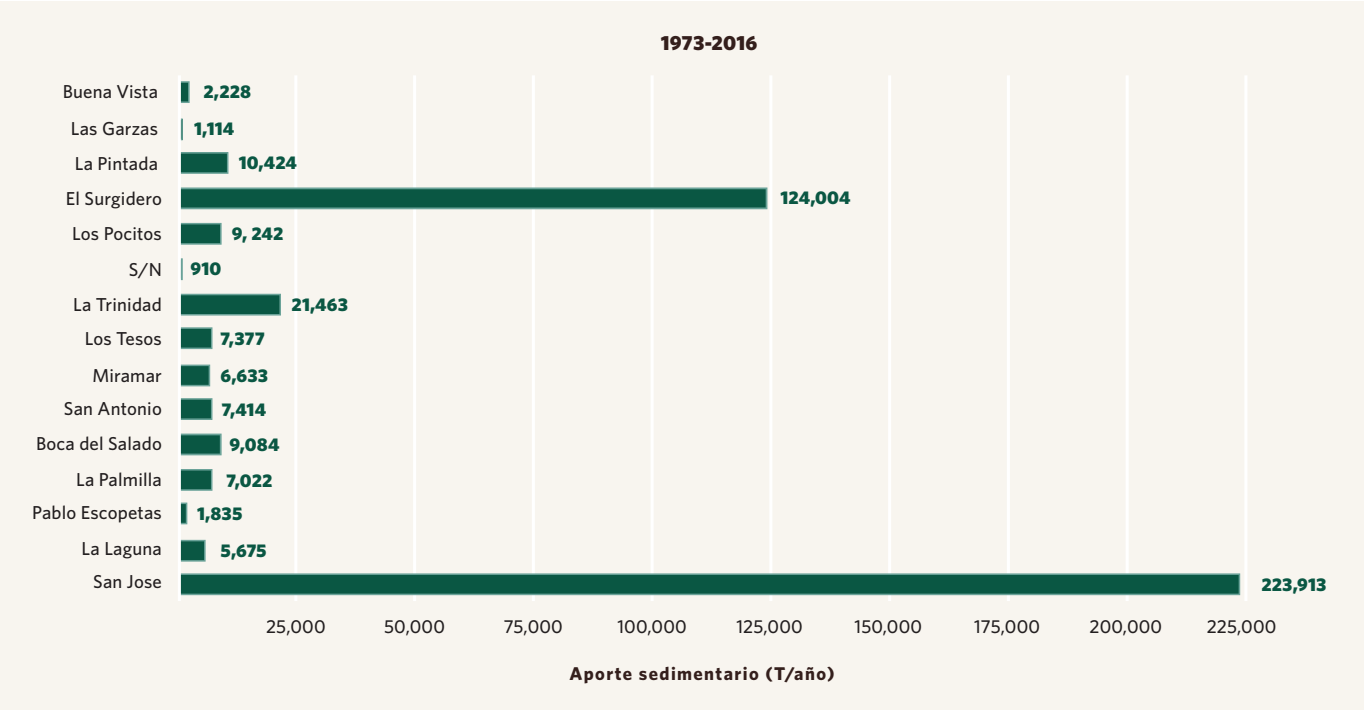


Figura 17. Aportes sedimentarios por cuenca durante el período 1973-2016.

Los aportes sedimentarios varían considerablemente cada año en respuesta a la alta variación en precipitación que hay en la zona, condición natural en zonas desérticas. Estas variaciones pueden afectar la dinámica costera pues las playas dependen de los aportes sedimentarios de las cuencas. La precipitación tuvo una alta variabilidad a lo largo de los 45 años, alternando años y períodos de sequía con años y períodos lluviosos. La precipitación en periodos de sequía fue entre 90 y 126 mm por año en 1988 y 2010, y en períodos lluviosos fue de 710 y 648 mm en 1998 y 2001 (ver Figura 18) lo cual indica una variación de hasta 700% u 8 veces.

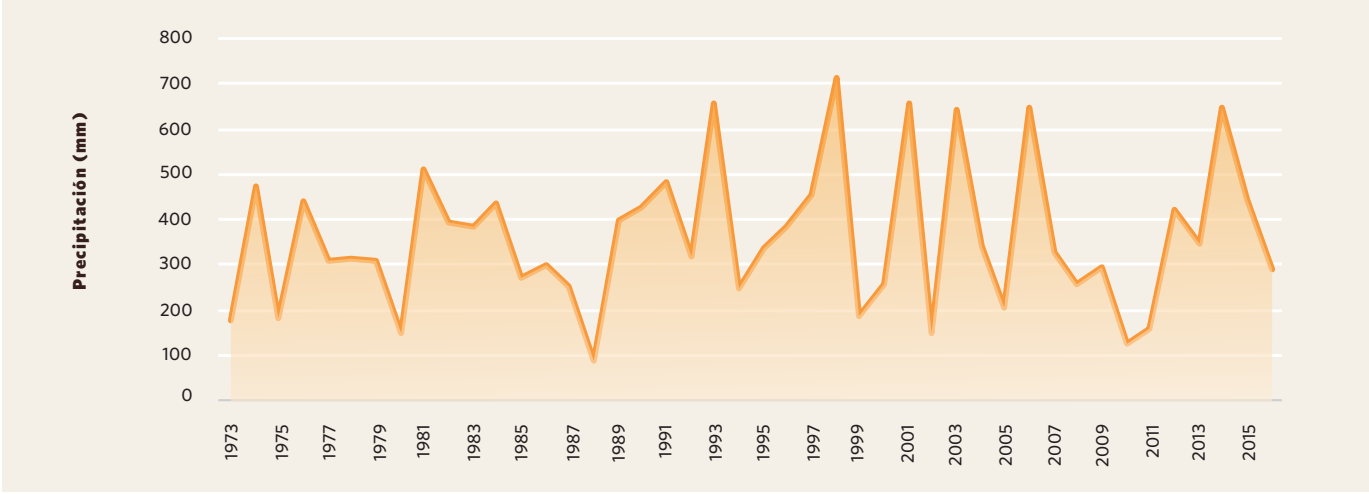


Figura 18. Precipitación anual del periodo 1973-2016.

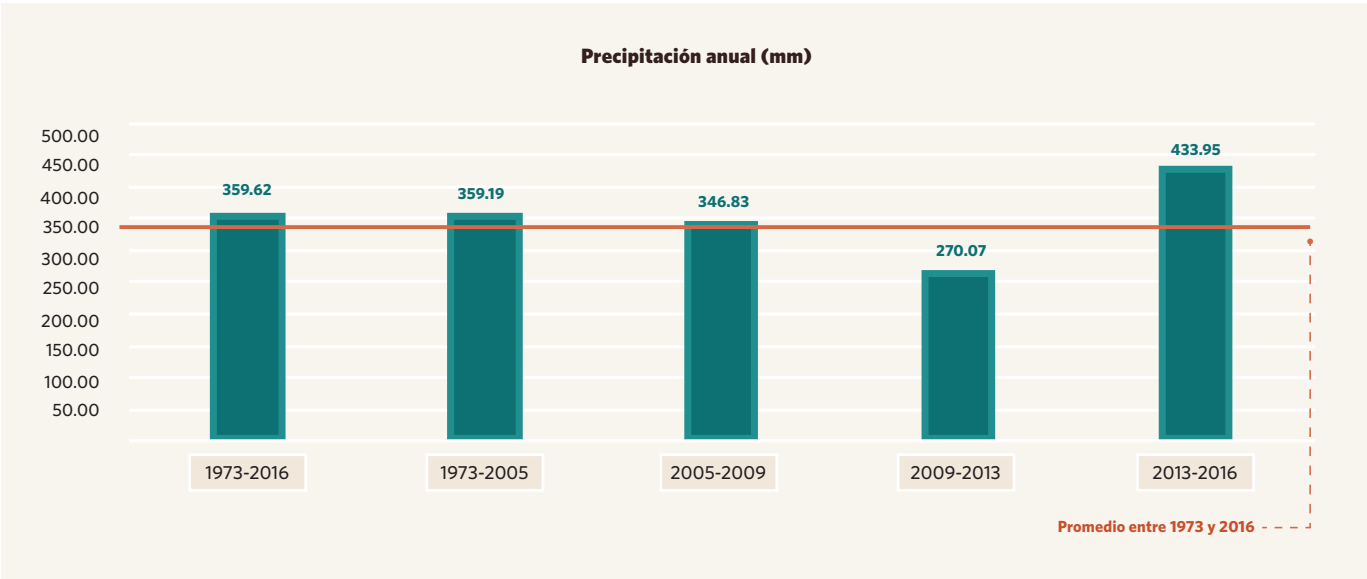


Figura 19. Promedio de precipitación anual de todas las cuencas durante por periodos estudiados (barras) y promedio de preciptacion de 1973 a 2016 (línea).

Para comparar los efectos de los aportes sedimentarios sobre los cambios en las líneas de costa, se calculó la precipitación y el aporte sedimentario por períodos de análisis. Este cálculo (ver Figura 19) permite ver más allá de la variabilidad anual e identificar períodos de sequía y alta precipitación. Puede observarse que los años 2009-2013 tuvieron 25% menos precipitación que el promedio de los 44 años del todo período del estudio. El período siguiente, 2013-206, tuvo una precipitación 20% mayor al promedio y 40% mayor al período anterior. Como resultado el aporte sedimentario (561,457 toneladas) del periodo con mayor precipitación (2013-2016) es tres veces más que el aporte (188,377 toneladas) durante el período de sequía (2009-2013) (ver Figura 20).

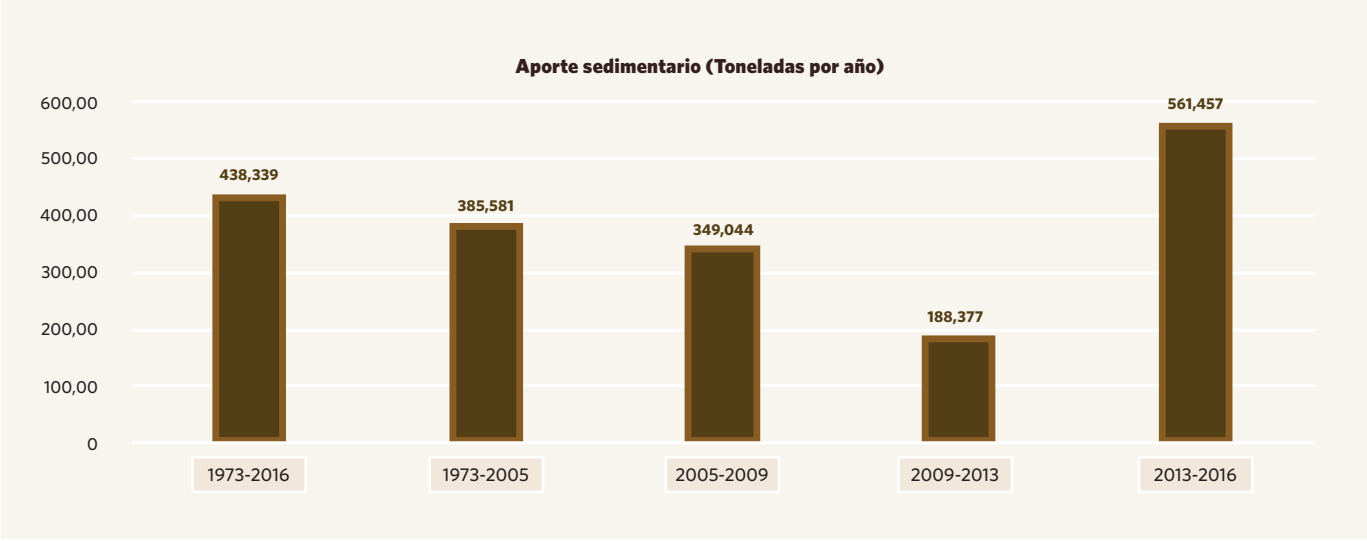


Figura 20. Promedio del aporte sedimentario anual de todas las cuencas durante los periodos estudiados.

Tabla VI. Aporte sedimentario (T/año) de cada microcuenca por periodo. Sobresalen las cuencas El Surgidero y San José cubren el 60% de área y el 79% de los aportes sedimentarios.

NOMBRE	ÁREA (KM^2)	APORTE				
		1973-2016	1973-2005	2005-2009	2009-2013	2013-2016
Buena Vista	21	2,228	1,223	1,685	623	1,650
Las Garzas	27	1,114	635	845	337	874
La Pintada	116	10,424	7,483	10,096	3,718	10,066
El Surgidero	553	124,004	100,265	129,047	47,900	131,616
Los Pocitos	152	9,242	10,252	10,581	4,087	13,322
S/N	31	910	873	844	404	1,113
La Trinidad	206	21,463	18,329	18,012	8,610	24,657
Los Tesos	82	7,377	6,244	5,852	3,119	8,216
Miramar	70	6,633	5,237	5,076	2,912	7,211
San Antonio	82	7,414	5,549	6,292	3,479	8,907
Boca del Salado	103	9,084	7,401	7,900	4,533	13,069
La Palmilla	97	7,022	8,784	6,446	4,243	15,806
Palos Escopetas	57	1,835	2,952	1,407	1,136	5,613
La Laguna	141	5,676	8,897	2,717	2,957	17,467
San José	1,261	223,913	201,457	142,244	100,319	301,870
Aporte total por año durante el período indicado	2,999	438,339	385,581	349,044	188,377	561,457
Aporte de El Surgidero (%)	18%	28%	26%	37%	25%	23%
Aporte de San José (%)	42%	51%	52%	41%	53%	54%

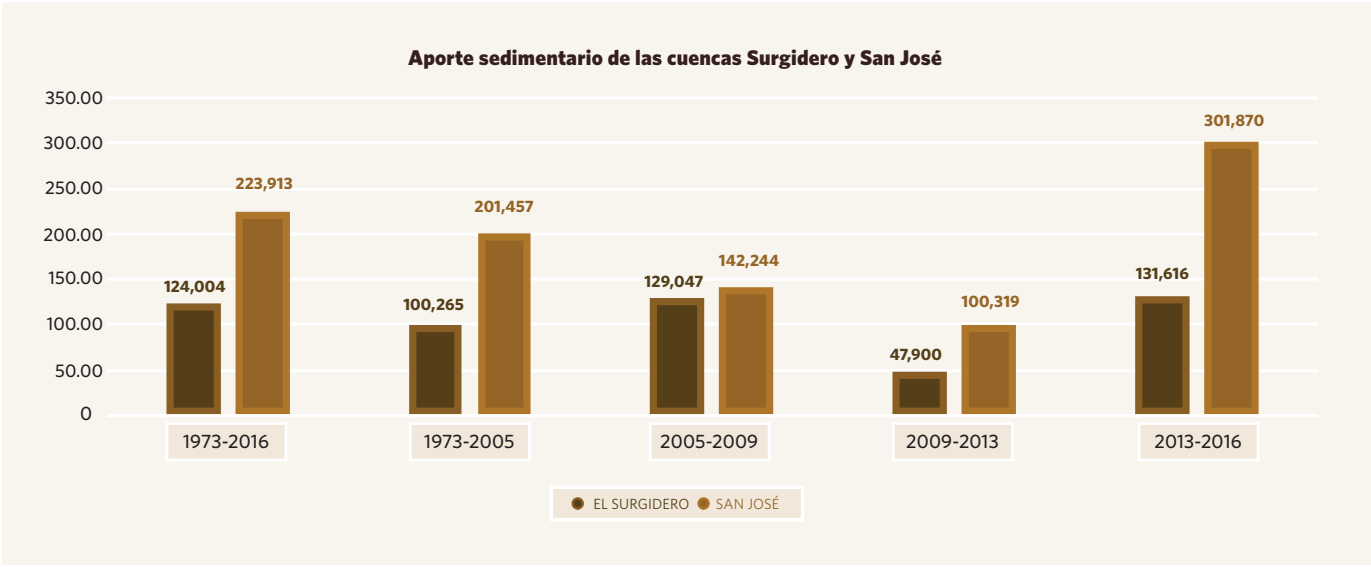


Figura 21. Promedio del aporte sedimentario anual en los periodos estudiados en las cuencas de El Surgidero y San José.

A continuación se comparan los aportes sedimentarios en cada período con los cambios en la línea de costa ocurridos en el mismo periodo y se plantea la posible relación entre ambas series de datos.

CONCLUSIONES POR PERIODO

PERIODO	SITUACIÓN DEL APORTE SEDIMENTARIO	SITUACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA	CONCLUSIÓN
1973-2005	El promedio de los aportes anuales durante este período se considera de referencia dado que barca 33 años.	El 70% de la zona costa presenta acreción. Resaltan dos sitios (Marina Costa Palma y San José) con más de 200 metros de aumento de línea de costa.	El aporte sedimentario puede tener mayor influencia en las desembocaduras de los arroyos. Ambos sitios con acreción relevante están cercanos a los arroyos de El Surgidero y San José.
2005-2009	El aporte sedimentario presenta una disminución del 10% respecto al periodo anterior. El aporte de sedimento del arroyo San José tuvo una disminución del 30% con respecto al período anterior. El Surgidero tuvo una disminución del 20%.	Periodo con erosión en casi toda la costa particularmente en la zona sur.	La disminución de la aportación sedimentaria pudo incidir en la erosión en la zona sur, en especial en el arroyo San José.

PERIODO	SITUACIÓN DEL APORTE SEDIMENTARIO	SITUACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA	CONCLUSIÓN
2009-2013	Continuó la disminución significativa del aporte sedimentario. El aporte del arroyo San José disminuyó 50% respecto a 1973-2005.	Hay sitios con erosión y sitios con acreción dispersos y intercalados en casi todo lo largo de la costa, con excepción de la zona sur donde predomina la erosión. La mayor parte de las variaciones son menores a 50 m, pero sí hay varios sitios con erosión y acreción mayor a los 50 m. Resalta la erosión en la desembocadura del arroyo San José, donde ha predominado la acreción en períodos previos.	No está clara la relación entre la drástica reducción del aporte sedimentario y la ocurrencia de sitios con erosión y acreción en toda la costa. Sin embargo, la erosión en la desembocadura del arroyo San José puede deberse a la reducción del aporte sedimentario ya indicado.
2013-2016	El aporte sedimentario aumentó considerablemente, triplicando la aportación del período previo. El aporte fue 50% mayor al promedio del periodo de referencia (1973-2005).	Periodo con erosión generalizada en toda la costa, indicando un fenómeno de gran escala.	A pesar del aporte masivo de sedimentos, la región experimentó erosión generalizada. El fenómeno de gran escala pudo ser el oleaje causado por el Huracán Odile. El aporte sedimentario no compensó la pérdida de sedimentos.
2016-2018	No hay datos de precipitación y aporte sedimentario.	Periodo con acreción, recuperando parcialmente la erosión del periodo anterior. Resalta El Surgidero, con 122 m de acreción, muy por encima del resto de la costa.	No hay datos de aporte sedimentario para el período, pero es probable que la acreción fue alimentada por el aporte sedimentario de las cuencas y por los depósitos en el mar cercanos a la costa depositados allí por los huracanes. También es probable que la acreción en la desembocadura de El Surgidero sea debido al aporte sedimentario.

4.4 CLIMATOLOGÍA DEL OLEAJE

La roseta de oleaje (ver Figura 22) muestra la dirección del oleaje y la altura significante (Hs). Los vientos con dirección al Sur-Suroeste tienen una frecuencia anual del 50% y Hs entre 0.8 y 1 m. El oleaje del sur tiene una frecuencia anual de casi 30% y Hs entre 0.8 y 1 m.

Tabla VII. Valores promedio de los parámetros estadísticos del oleaje en verano, invierno y todo el año.

PROMEDIO	HS (M)	TP (S)	DP (°)
Verano	1.13	14.01	192.19
Invierno	1.07	12.17	223.27
Anual	1.07	13.09	207.67

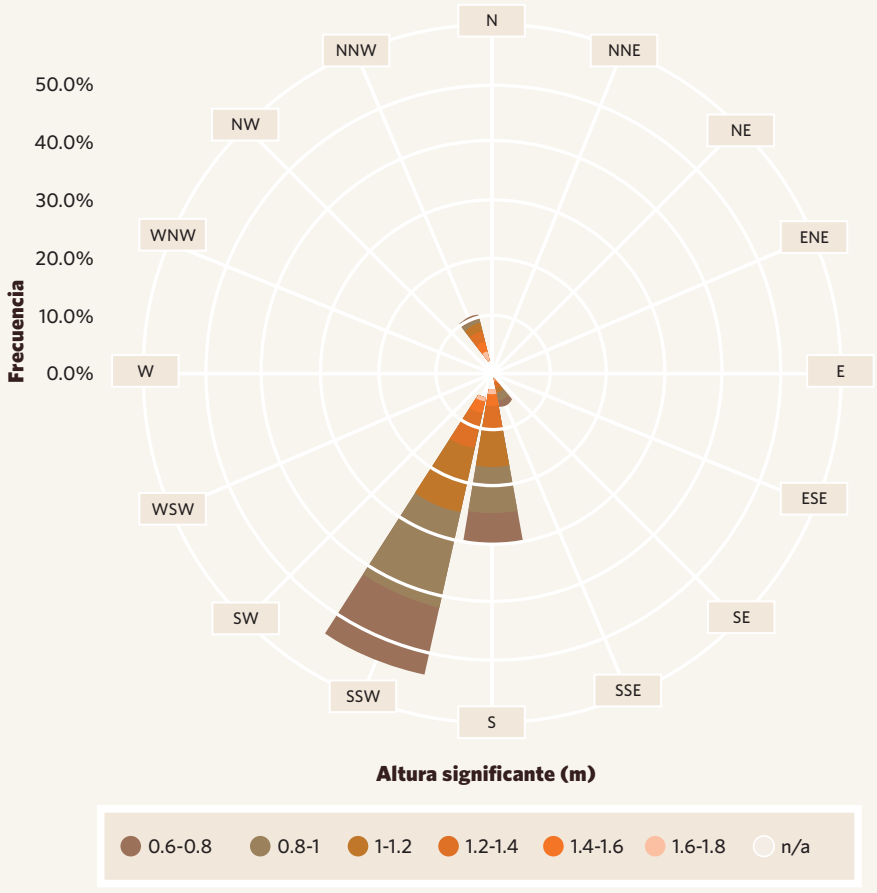
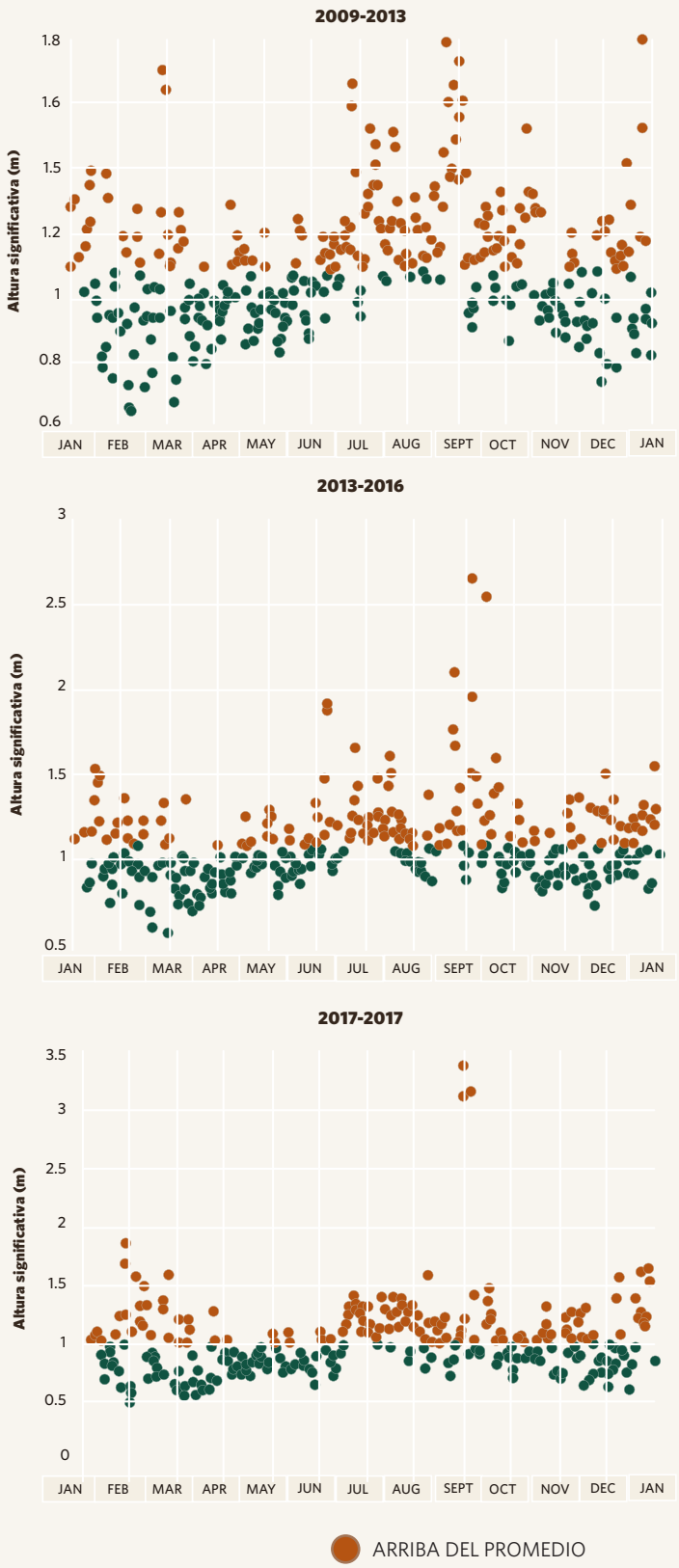


Figura 22. Roseta de oleaje para Cabo del Este.

Debido a la dirección con la que incide el oleaje registrada en la serie de datos analizados y en la bibliografía consultada para la costa de Cabo del Este, se espera que el transporte litoral de sedimento tenga una dirección anual predominantemente hacia el norte. Sin embargo no hay certeza debido a que el nodo se encuentra lejano a la misma y la dirección que incide en el litoral está influido por la batimetría.

Los datos de oleaje corresponden al período de 2008 al 2018 (ver metodología) los cuales fueron analizados por los periodos siguientes: 2009-2013, 2013-2016 y 2016-2018.



Máxima Hs es 1.8 m con picos en julio y septiembre, superior al 1.07 Hs promedio.

Máxima Hs es 2.7 con pico en septiembre, muy por encima al 1.07 Hs promedio. Coincide con el impacto del huracán Odile.

Máxima Hs es 3.4 m en septiembre muy por encima del 1.07 Hs promedio.

Figura 23. Valores de altura de ola significante (Hs) del oleaje en Cabo del Este en un año típico dentro del período indicado.

PERIODO	SITUACIÓN DEL OLEAJE	SITUACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA	CONCLUSIÓN
1973-2005	No hay datos.	El 70% de la zona costa presenta acreción. Resaltan dos sitios (Marina Costa Palma y San José) con más de 200 metros de aumento de línea de costa.	
2005-2009	No hay datos.	Periodo con erosión en casi toda la costa particularmente en la zona sur.	
2009-2013	Periodo con condiciones normales. Altura del oleaje máximo (Hs) fue de 1.8m	Hay tanto sitios con erosión como con acreción en casi todo lo largo de la costa, con excepción de la zona sur donde predomina la erosión. Resalta la erosión en la desembocadura del arroyo San José, donde ha predominado la acreción en períodos previos.	La energía del oleaje parece coincidir con las condiciones de estabilidad en la línea de costa.
2013-2016	Altura del oleaje máximo (Hs) fue de 2.7m. El oleaje causado por el huracán Odile fue de 13 m.	Periodo con erosión generalizada en toda la costa.	La mayor energía de oleaje indicada por el Hs pico generó mucho mayor transporte de sedimento a otros años, resultando en la erosión generalizada de toda la costa.
2016-2018	Altura del oleaje máximo (Hs) fue de 3.4 m.	Periodo con acreción en casi toda la zona.	A pesar de contar con energía del oleaje superior al promedio, la costa experimentó acreción, indicando un retorno natural a su condición previa al impacto del huracán.

4.5 NIVEL DEL MAR

Las mareas y el nivel medio del mar fueron modeladas para el período 1970 a 2019 ya se no se cuenta con registros completos. Los resultados de la modelación fueron corroborados con los registros históricos existentes de las estaciones mareográficas. Los resultados de la modelación de mareas y del nivel medio del mar indica que hay alta variabilidad interanual en las mareas y que no hay variación del nivel medio del mar durante el período analizado (ver Figura 24). Esto sugiere que la variación del nivel del mar que se observa es causada principalmente por procesos regionales relacionados a las mareas y no por el cambio climático.

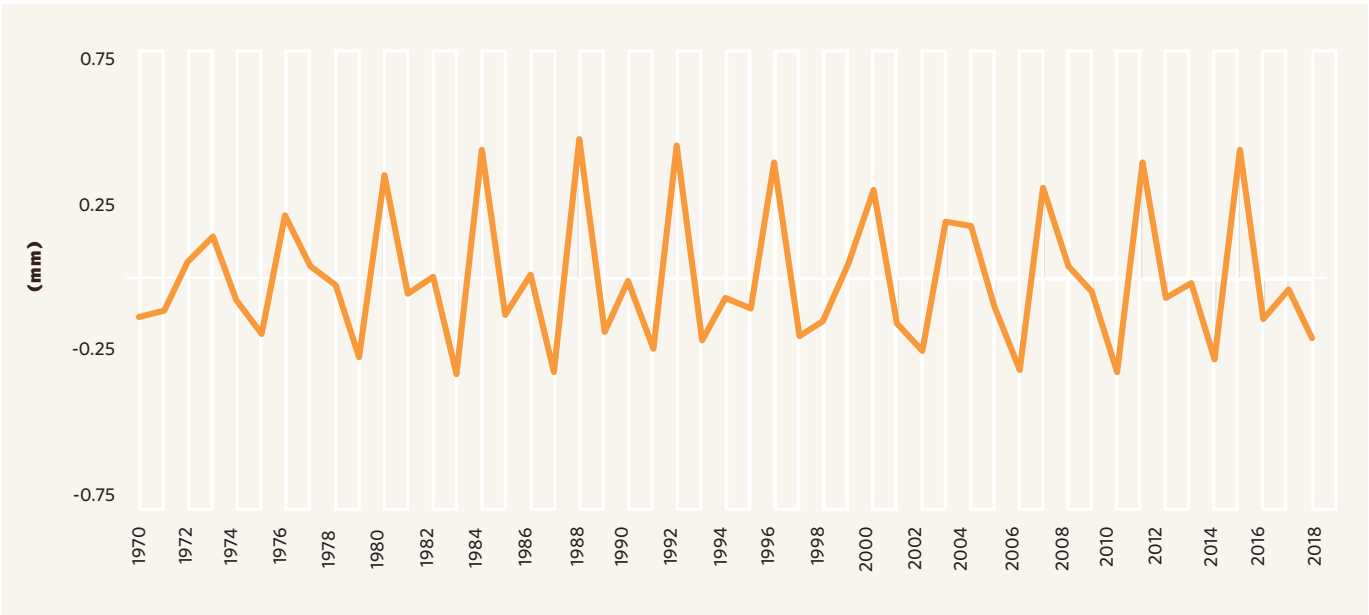


Figura 24. Modelación del nivel medio del mar en el periodo 1970-2018. La línea punteada indica la tendencia del nivel medio del mar.

4.6 EVENTOS EXTREMOS

Se identificaron los huracanes cuya trayectoria pasó dentro de un radio de 100 km de distancia de 1970 a 2016 (ver Figura 25). En este periodo de 47 años, hubo dos años con mucha actividad, 1993 y 2013, en los cuales ocurrieron cuatro huracanes. Luego hubo un año con tres huracanes, 10 años con 2 huracanes, 19 años con 1 huracán y 15 sin huracán. El promedio de huracanes por año durante el periodo analizado es uno. Podemos catalogar 34 años como poco activos (0 o 1 huracán) y 13 años como activos (2-4 huracanes).

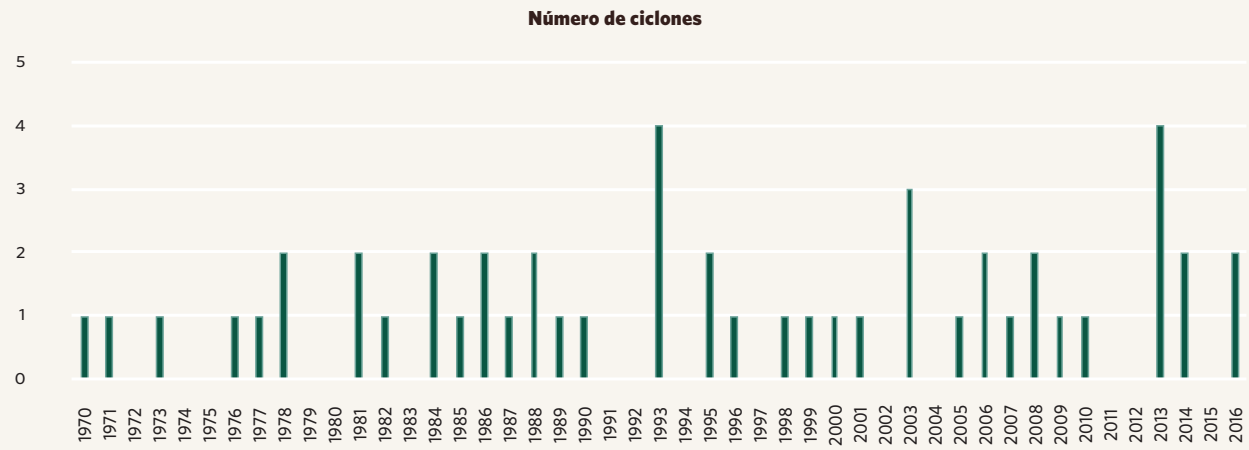
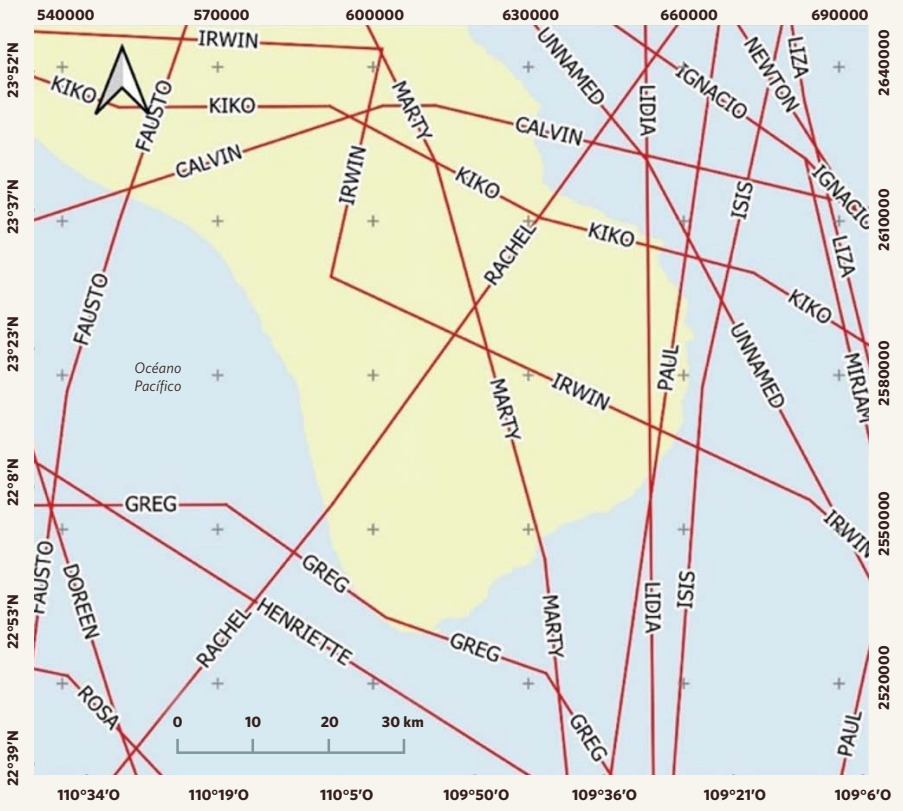


Figura 25. Frecuencia de ciclones tropicales en el periodo de 1970 a 2016.

Tabla VIII. Huracanes en la zona por periodos de análisis.

PERIODO	DEPRESIÓN TROPICAL	CATEGORÍA AL MOMENTO DE TOCAR TIERRA				TORMENTA TROPICAL	TOTAL
		I	II	III	IV		
1973-2005	11	10	4	1	1	6	33
2005-2009	2	1	1			3	7
2009-2013	1					5	6
2013-2016	1	1		1		5	8



The Nature Conservancy

CABO DEL ESTE

Trayectorias de huracanes del periodo 1973-2005

LEYENDA

Trayectorias

Sistema de Referencia

WGS 1984 UTM Zona 12N
Proyección: Transversa de Mercator
Este falso: 500000.0
Norte falso:0.0
Meridiano central: -111.0
Factor de escala: 0.9996
Latitud de origen: 0.0
Unidades: metros (1.0)

Elaborado por:

LORAX

Figura 26. Trayectorias de ciclones tropicales en el periodo de 1973 a 2005.

The Nature Conservancy

CABO DEL ESTE

Trayectorias de huracanes del periodo 2005-2009

LEYENDA

Trayectorias

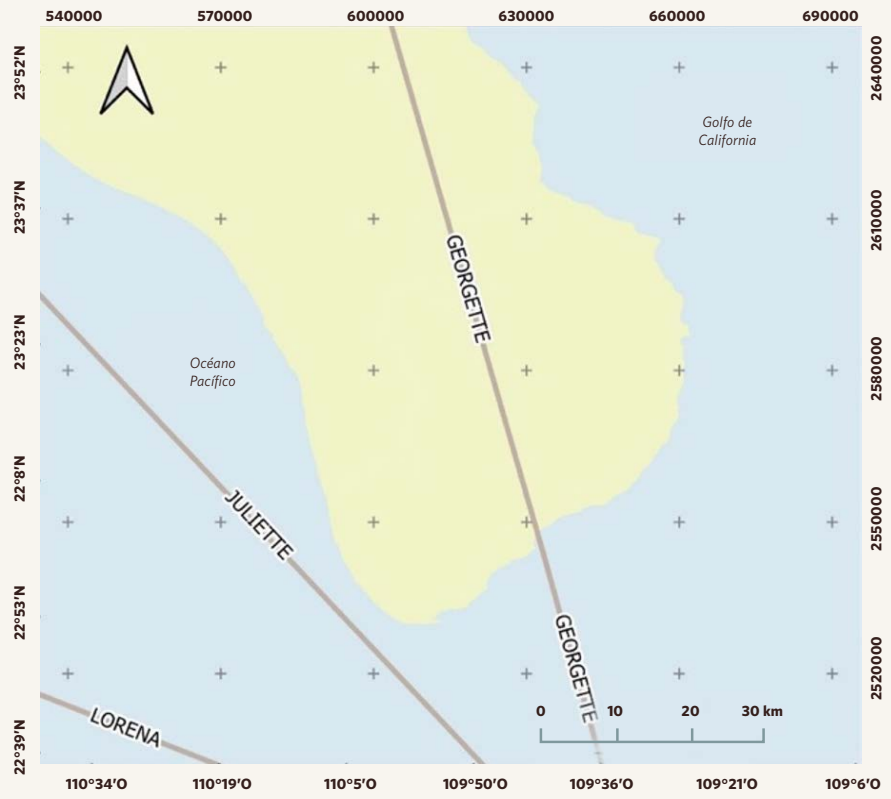
Sistema de Referencia

WGS 1984 UTM Zona 12N
Proyección: Transversa de Mercator
Este falso: 500000.0
Norte falso:0.0
Meridiano central: -111.0
Factor de escala: 0.9996
Latitud de origen: 0.0
Unidades: metros (1.0)

Elaborado por:

LORAX

Figura 27. Trayectorias de ciclones tropicales en el periodo de 2005 a 2009



The Nature Conservancy

CABO DEL ESTE

Trayectorias de huracanes del periodo 2009-2013

LEYENDA

Trayectorias

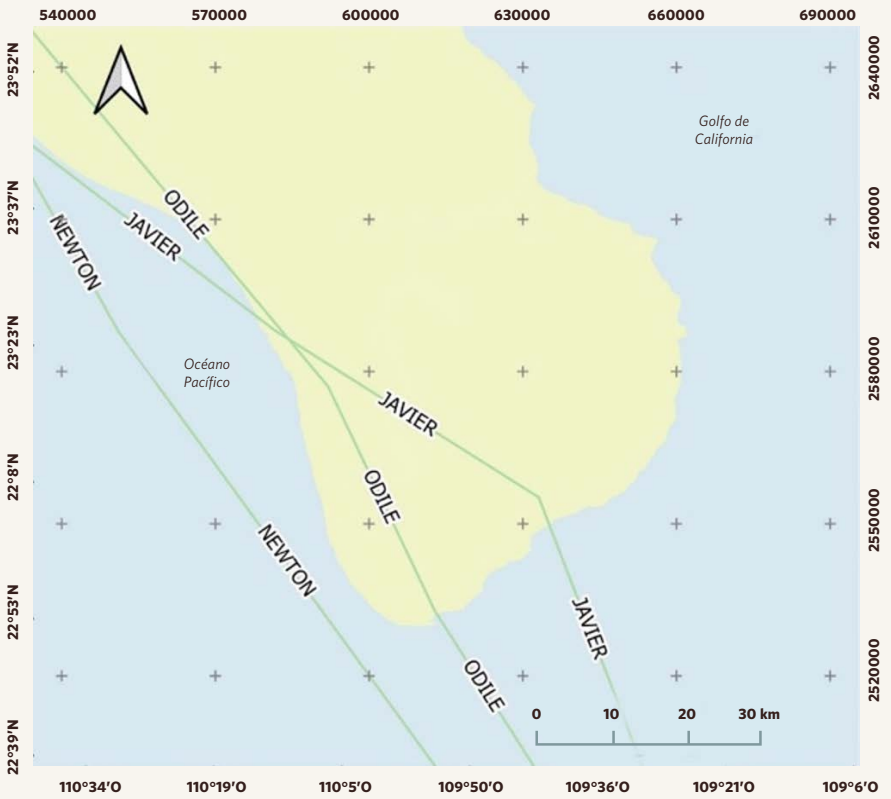
Sistema de Referencia

WGS 1984 UTM Zona 12N
Proyección: Transversa de Mercator
Este falso: 500000.0
Norte falso:0.0
Meridiano central: -111.0
Factor de escala: 0.9996
Latitud de origen: 0.0
Unidades: metros (1.0)

Elaborado por:

LORAX

■ **Figura 28.** Trayectorias de ciclones tropicales en el periodo de 2009 a 2013.



The Nature Conservancy

CABO DEL ESTE

Trayectorias de huracanes del periodo 2013-2016

LEYENDA

Trayectorias

Sistema de Referencia

WGS 1984 UTM Zona 12N
Proyección: Transversa de Mercator
Este falso: 500000.0
Norte falso:0.0
Meridiano central: -111.0
Factor de escala: 0.9996
Latitud de origen: 0.0
Unidades: metros (1.0)

Elaborado por:

LORAX

■ **Figura 29.** Trayectorias de ciclones tropicales en el periodo de 2013 a 2016.

El oleaje producido por huracanes tiene un impacto decisivo en el transporte del sedimento a lo largo de la costa. Todos los ciclones tropicales con trayectoria a 100 km a la redonda de Cabo del Este generaron oleaje con altura significante mayor al promedio de verano (ver Figura 30).

Toda la línea de costa sufrió erosión del 2013 al 2016. Durante este período impactó el huracán Odile, que produjo olas que alcanzaron los 12 m (2014) y el huracán Newton (2016), que produjo olas mayores a los 8 m.

Durante los períodos 2005-2009 y 2009-2013, hubo procesos de acreción y erosión en distintos puntos a lo largo de la costa sin ninguna tendencia marcada. Siete huracanes tuvieron efecto en la costa durante estos años y produjeron oleajes máximos entre 2.2 y 3.5 m, por lo que su impacto en la costa fue mucho menor que el causado por Odile y Newton.

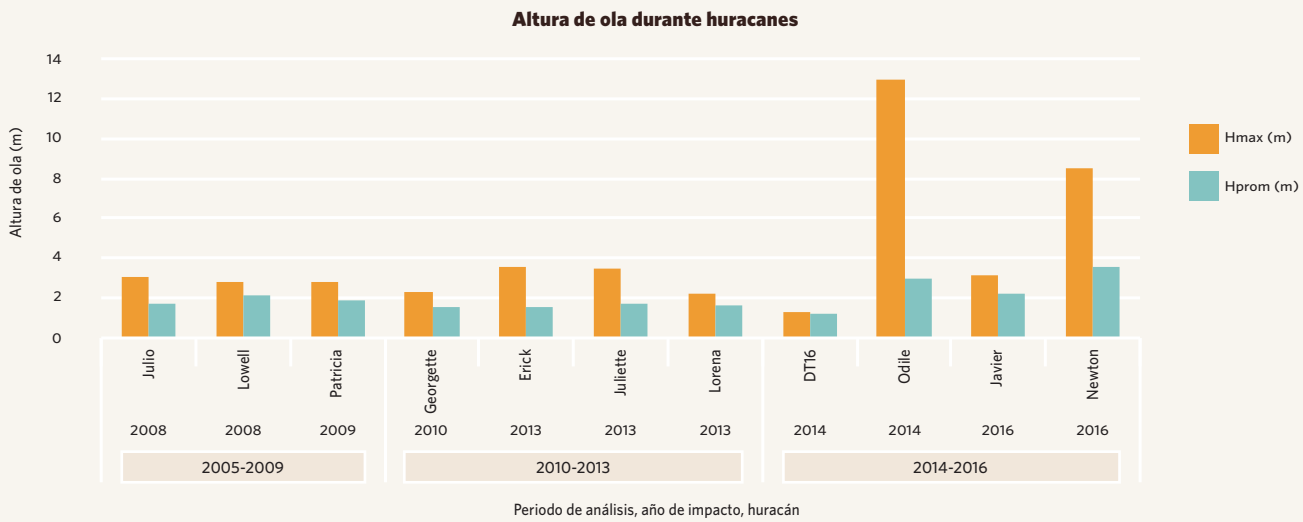


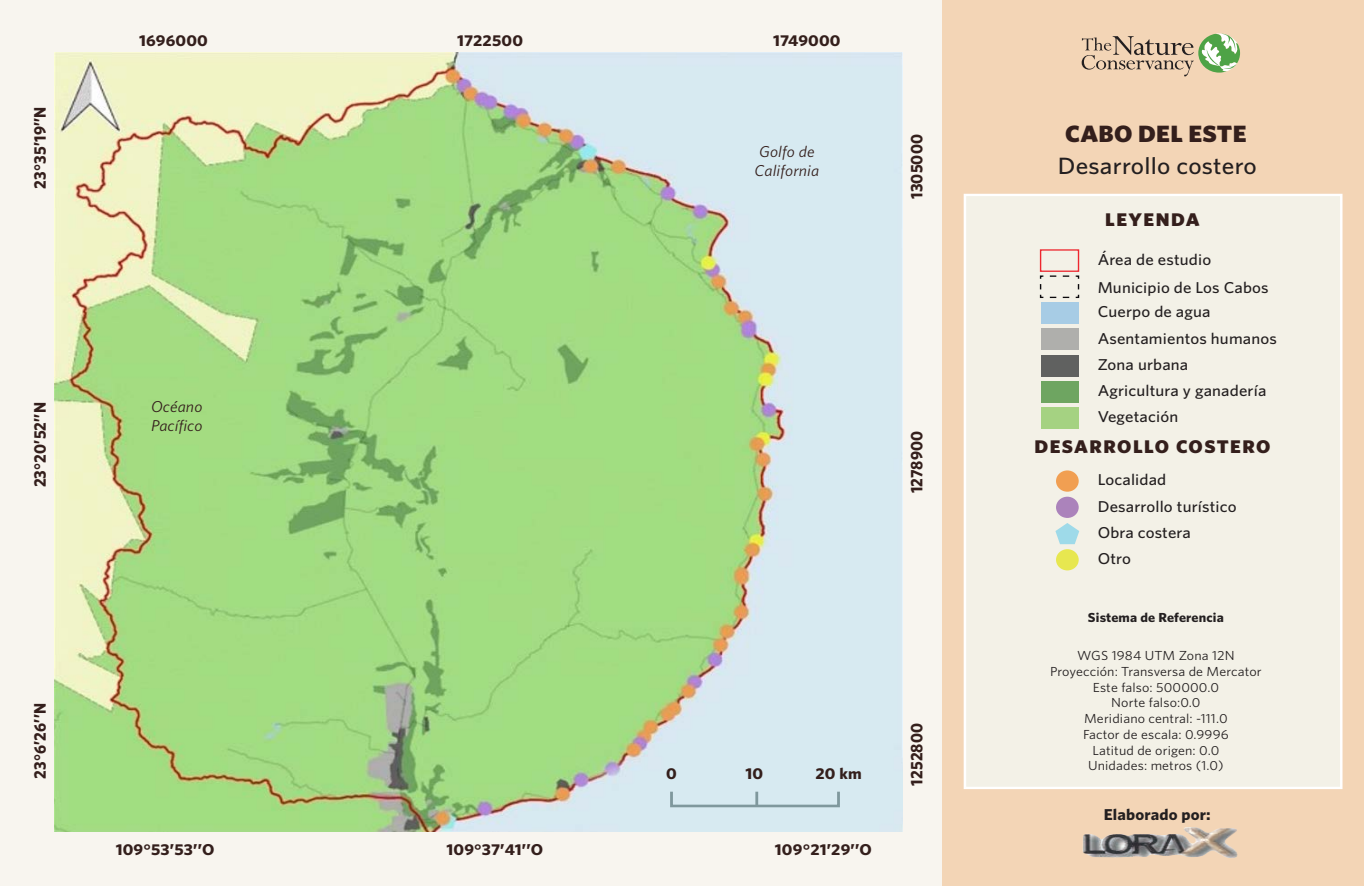
Figura 30. Altura del oleaje generado por ciclones tropicales que han ocurrido en un radio de 100 km de Cabo del Este entre 2008 y 2016.

Tabla IX. Parámetros estadísticos del oleaje durante los ciclones tropicales con trayectoria a 100 km de Cabo del Este. Hprom, Tprom y Dprom son los promedios, Hmax y Tmax son los máximos, y Dmin es el mínimo de cada evento (WAVEWATCH III).

PERIODO	AÑO	NOMBRE	FECHAS DE DATOS	HPROM (M)	HMAX (M)	TPROM (S)	TMAX (S)	DPROM (°)	DMIN (°)
2005-2009	2008	Julio	23-27 ago.	1.69	3.08	9.07	10.91	165.57	146.8
	2008	Lowell	8-13 sep.	2.10	2.82	11.42	16.11	188.81	164.0
	2009	Patricia	12-15 oct.	1.87	2.84	10.27	19.33	164.00	149.8
2010-2013	2010	Georgette	16-23 sep.	1.52	2.28	13.55	17.37	195.99	150.3
	2013	Erick	5-15 jul.	1.57	3.54	15.09	21.88	186.56	144.7
	2013	Juliette	28 ago. - 3 sep.	1.68	3.46	12.73	17.51	186.05	144.6
	2013	Lorena	6-7 sep.	1.64	2.21	10.84	16.51	171.72	142.5
2014-2016	2014	DT 16	10-12 sep.	1.22	1.28	14.82	15.71	204.92	200.2
	2014	Odile	13-18 sep.	2.95	12.98	13.19	18.85	171.35	149.3
	2016	Javier	8-10 ago.	2.17	3.14	8.17	9.69	164.02	145.0
	2016	Newton	6-8 sep.	3.56	8.50	11.82	18.31	167.24	145.2

4.7 LOCALIDADES Y CONSTRUCCIONES EN LA LÍNEA DE COSTA

Se identificaron un total de 53 localidades y construcciones en Cabo del Este, de los cuales 29 fueron catalogados como localidades (comunidades humanas), 17 como desarrollos turísticos, 2 como obras costeras y 5 en la categoría de otro (ver Figura 31).



■ **Figura 31.** Desarrollos antropogénicos en la línea de costa.

La ubicación de las localidades y construcciones identificadas fueron sobrepuestas en las gráficas de erosión y acreción del periodo de 1973-2018 con el fin de determinar si existe relación entre esas construcciones con los cambios en la línea de costa.

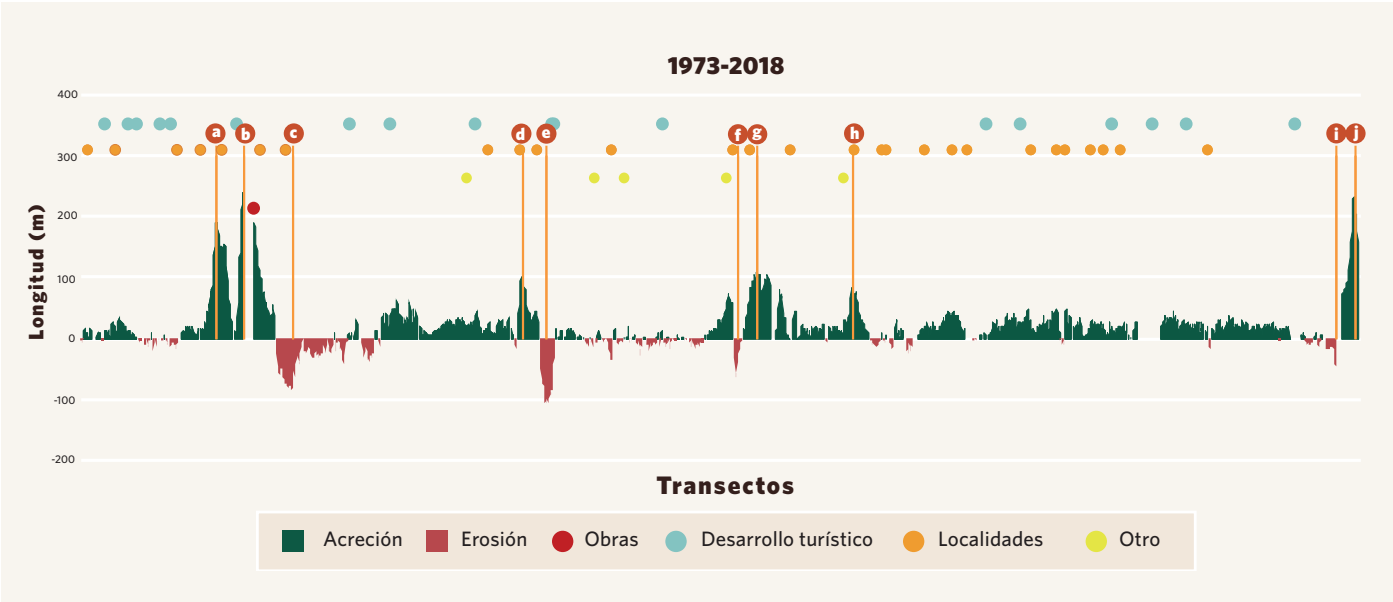


Figura 32. Erosión y acreción de la línea de costa en el periodo 1973-2018, donde se ubican las construcciones identificadas.

Los puntos de referencia son los sitios que mostraron mayor acreción y erosión en toda la costa. Todos están relacionados con localidades y construcciones. Solamente los sitios en las desembocaduras de los arroyos San José y El Surgidero no están necesariamente relacionados con construcciones. La Tabla X muestra la erosión y acreción experimentada en cada punto por cada período.

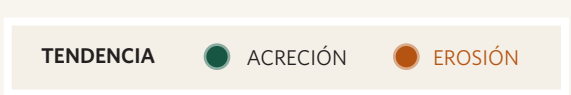
Tabla X. Erosión y acreción de la línea de costa por punto de referencia en el periodo 1973-2018.

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA GEOGRÁFICA CERCANA	PERIODO 1973-2018	PERIODO 1973-2005	PERIODO 2005-2009	PERIODO 2009-2013	PERIODO 2013-2016	PERIODO 2016-2018
a	Desembocadura de arroyo El Surgidero	170.23	149.99	-34.67	-56.17	-11.75	122.84
b	Norte de la marina del desarrollo Costa Palmas	239.29	20.66	28.15	122.44	28.11	40.73
c	Playa Colorada	-86.27	-92.30	7.47	7.00	-15.48	6.54
d	Las Tachuelas, Estancia del Mar	102.19	102.22	-1.10	-3.44	28.35	-20.84
e	Las Barracas	-106.82	-48.85	-49.34	49.32	-77.87	18.53

TENDENCIA ACRECIÓN EROSIÓN

CAMBIOS EN LA LÍNEA DE COSTA DE CABO DEL ESTE, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO

PUNTO DE REFERENCIA	REFERENCIA GEOGRÁFICA CERCANA	PERIODO 1973-2018	PERIODO 1973-2005	PERIODO 2005-2009	PERIODO 2009-2013	PERIODO 2013-2016	PERIODO 2016-2018
f	Los Frailes	-63.55	-45.56	17.35	14.12	-65.48	1.42
g	Antares	108.79	55.37	17.71	25.73	0.68	-1.96
h	Desembocadura de arroyo Boca del Salado	84.45	19.58	-13.00	29.49	-26.43	76.45
i	La Playa (al Este de la marina)	-46.03	39.79	-46.20	-9.43	-29.56	3.95
j	José Desembocadura de arroyo San	231.65	219.53	-58.68	-5.80	-22.08	100.35



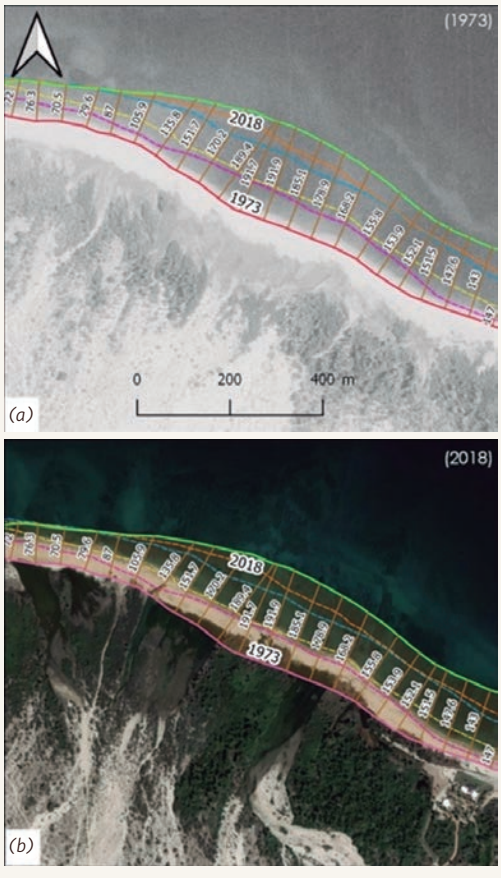
Se puede observar lo siguiente:

1. Las desembocaduras de los arroyos El Surgidero y San José tuvieron mayor acreción atribuida al aporte sedimentario de las cuencas.

2. No se observó una relación significativa entre los cambios en la línea de costa y los desarrollos turísticos y localidades.

3. Marina Costa Palma experimentó la mayor acreción en toda la costa y tuvo acreción en todos los períodos debido al espigón. La menor acreción ocurrió en 2013-2016 y se deduce que fue debido al impacto de los huracanes Odile y Newton.

4. La Marina La Playa, presenta erosión en la parte oeste (j) mientras que presenta acreción en el este (h). Este punto corresponde también a la desembocadura del arroyo San José, por lo que presenta valores de acreción elevados en los periodos 1973-2018 y 1973-2005.



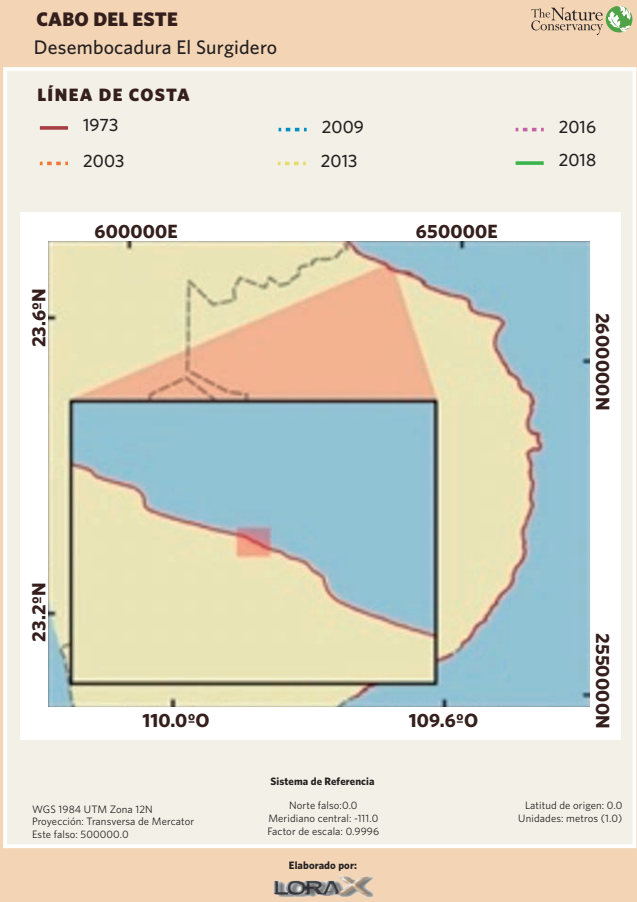


Figura 33. Acercamiento al punto de referencia a, Desembocadura de arroyo El Surgidero.

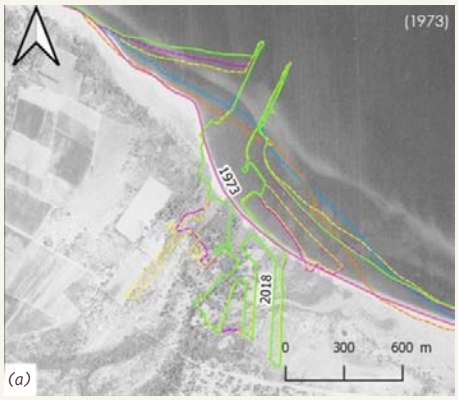


Figura 34. Acercamiento al punto de referencia b, Norte de la marina del desarrollo Costa Palmas.

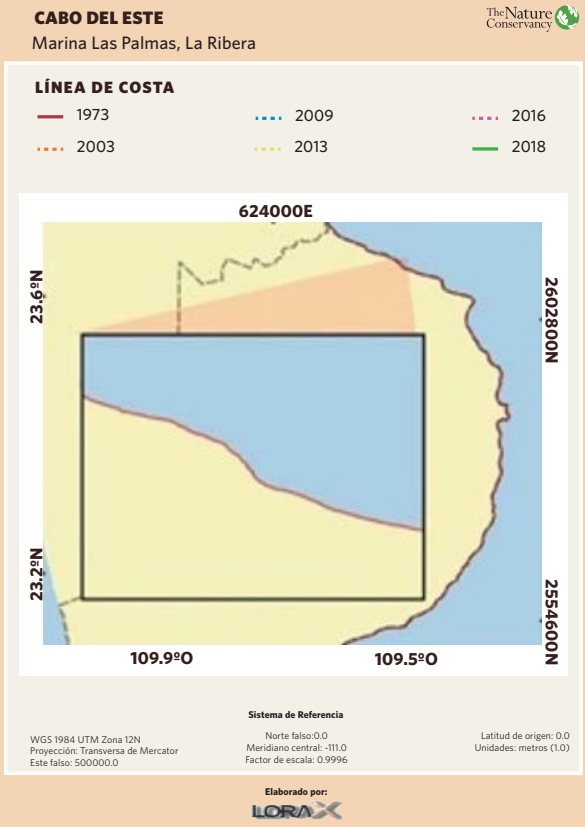
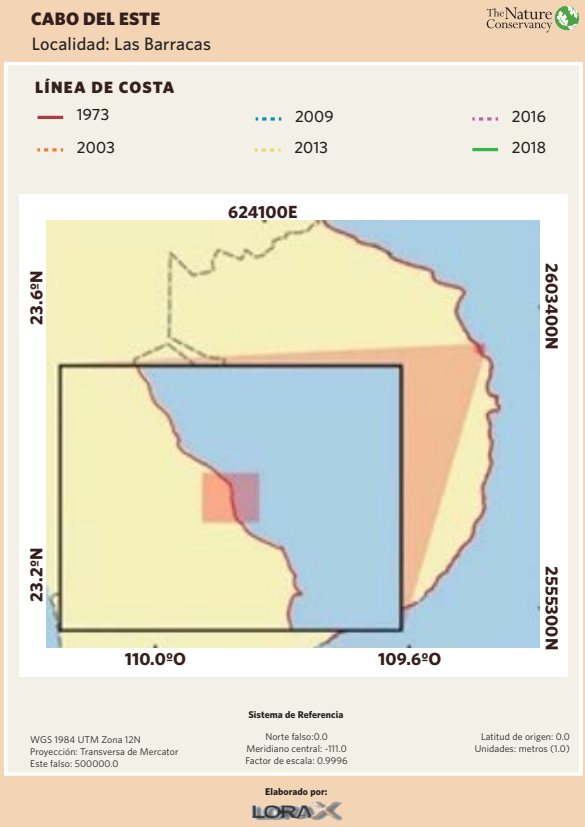


Figura 35. Acercamiento al punto de referencia e, Localidad Las Barracas.



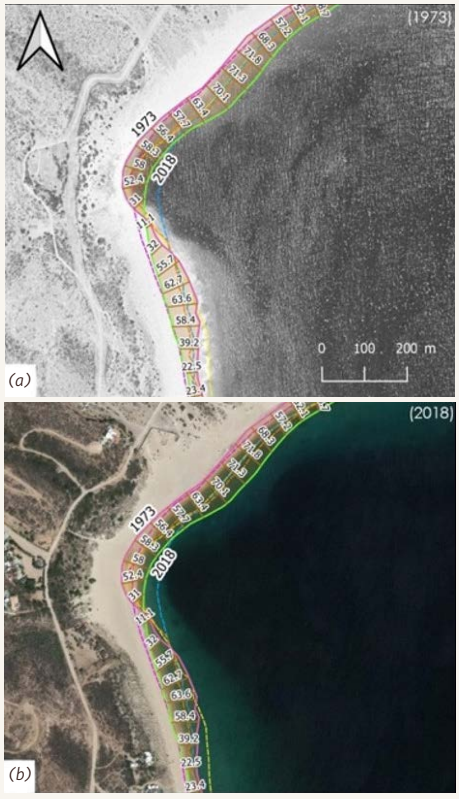


Figura 36. Acercamiento al punto de referencia f, Localidad Los Frailes.

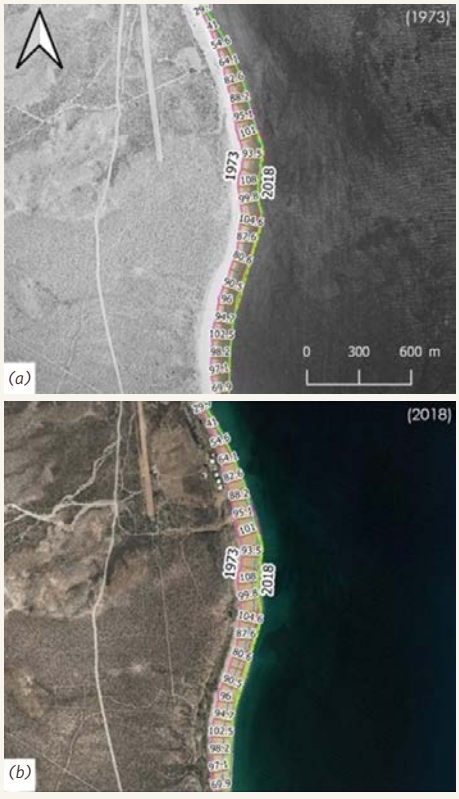
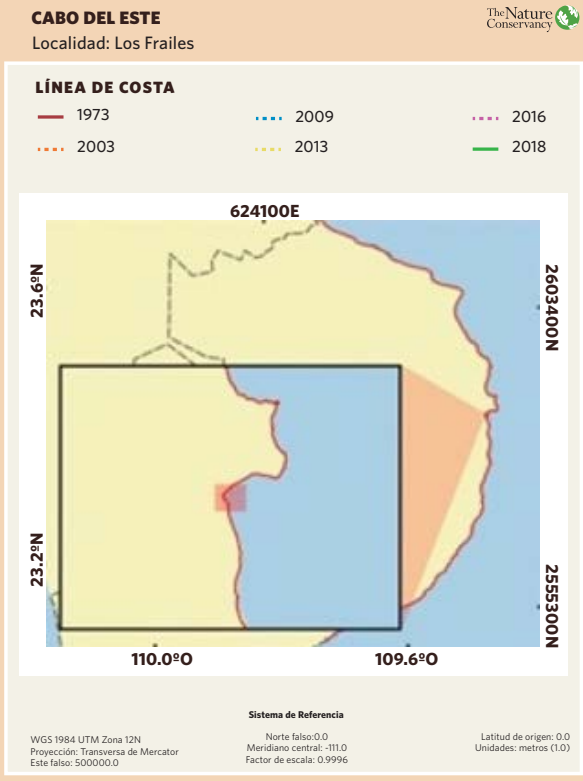
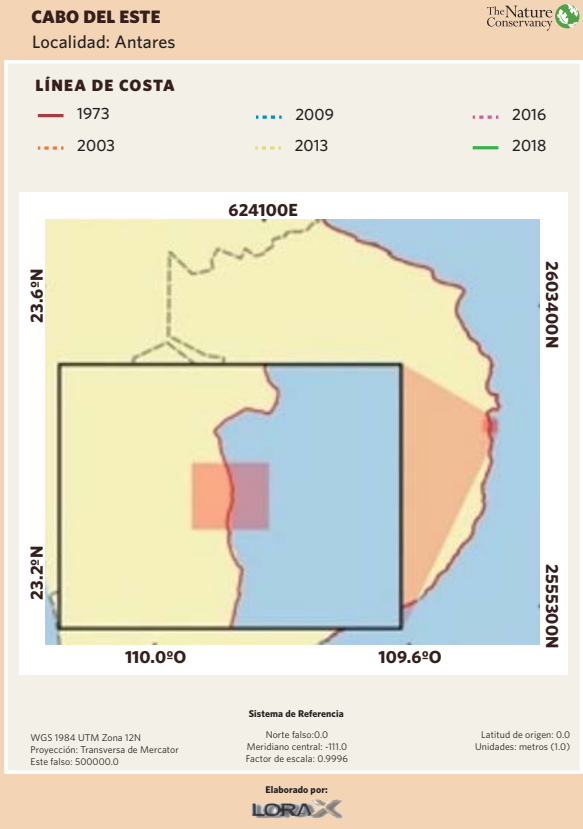


Figura 37. Acercamiento al punto de referencia g, Localidad Antares.





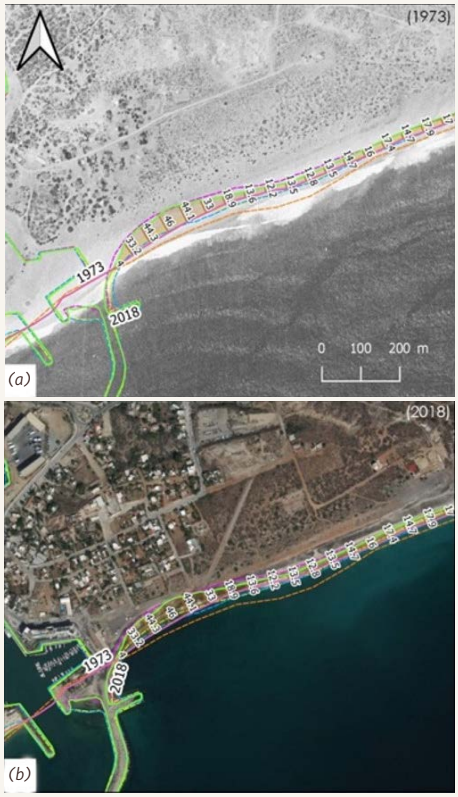


Figura 38. Acercamiento al punto de referencia i, Localidad de La Playa.

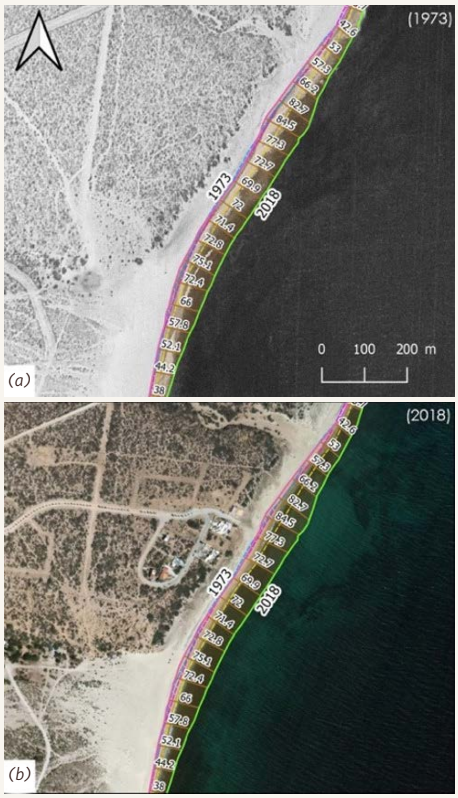
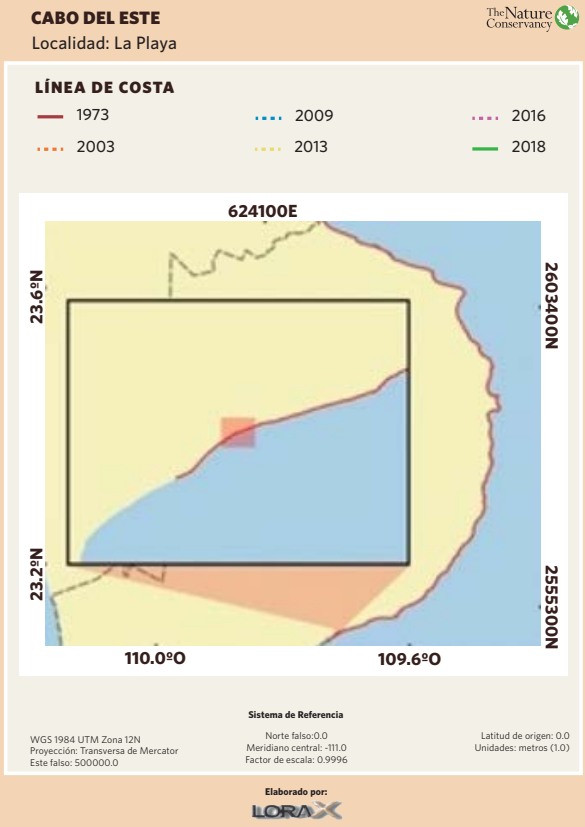
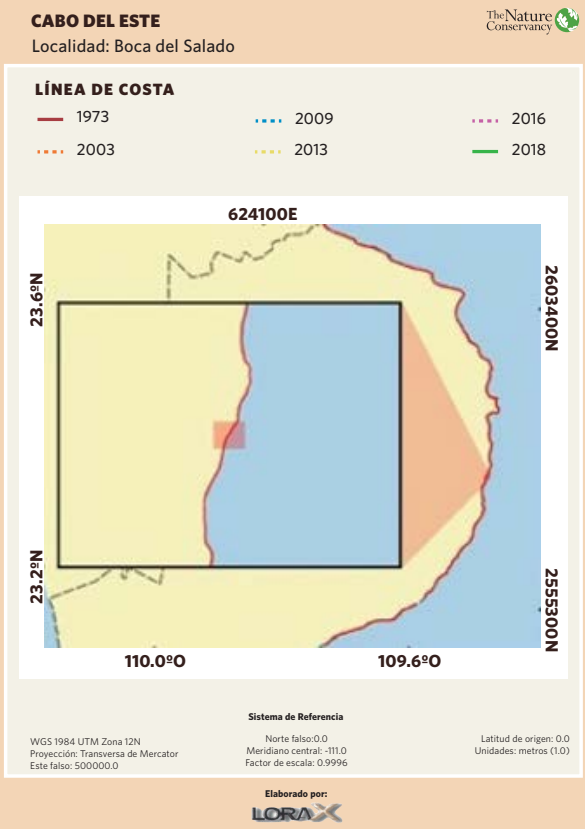
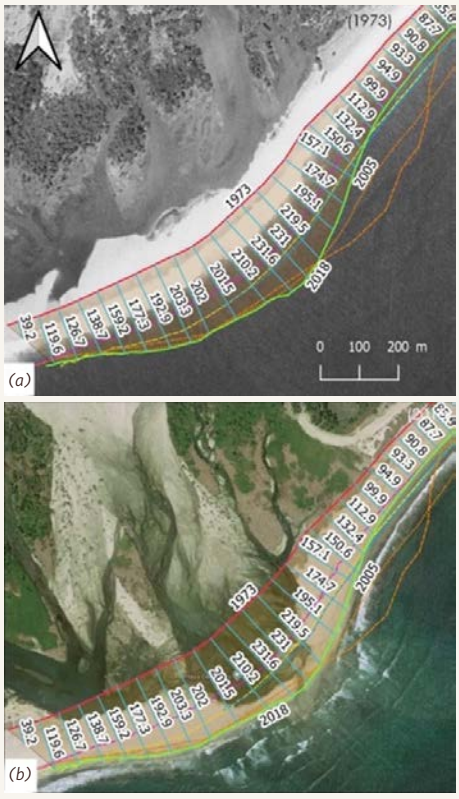
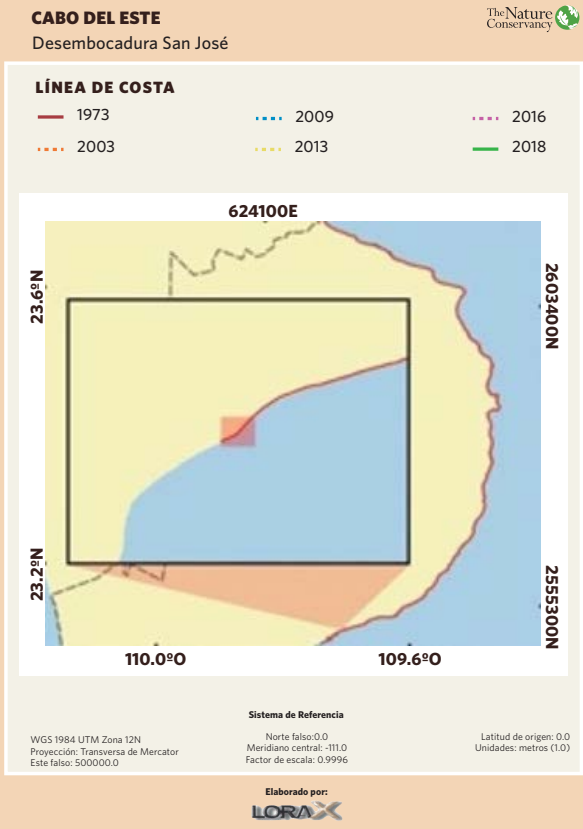


Figura 39. Acercamiento al punto de referencia h, desembocadura de arroyo Boca del Salado









■ **Figura 40.** Acercamiento al punto de referencia j, desembocadura de arroyo San José y Oeste de la marina.

5 FACTORES QUE DETERMINARON LOS CAMBIOS EN LA LÍNEA DE COSTA DE CABO DEL ESTE

5 FACTORES QUE DETERMINARON LOS CAMBIOS EN LA LÍNEA DE COSTA DE CABO DEL ESTE

Con base en el análisis presentado podemos concluir lo siguiente:

- La línea de costa de Cabo del Este presenta acreción neta en casi toda la costa de 1973 a 2019.
- Los aportes sedimentarios varían sustancialmente a lo largo del periodo de estudio. La disminucón de los aportes sedimentarios en 2005-2013 pudo incidir en los procesos de erosión de dichos períodos.
- Toda la línea de costa sufrió erosión del 2013 al 2016 causado por los huracanes Odile y Newton. La energía del oleaje tuvo un impacto más significativo que el aumento en el aporte sedimentario debido a la alta precipitación provocada por los huracanes.
- No existente una tendencia al aumento el nivel del mar sino únicamente los cambios interanuales en mareas. Por lo tanto, la erosión no está relacionada a cambios en el nivel del mar.
- Los cambios en la línea de costa se asocian predominantemente con factores naturales. Solamente en los sitios con obras costeras como marinas, las mismas tienen impactos significativos en el transporte y el proceso de acumulación de sedimentos en la línea de costa cercana a la obra, propiciando la acumulación de sedimentos por un lado y la erosión por el otro.

A continuación se presenta un consolidado de los valores de los factores determinantes en los cambios en la línea de costa por periodo de estudio.

Tabla XI. Valores clave de los factores determinantes de cambios en la línea de costa de Cabo del Este.

FACTOR	UNIDAD	1973-2018	1973-2005	2005-2009	2009-2013	2013-2016	2016-2018
Cambios en la línea de costa	Cambio dominante	●	●	● ●	● ●	●	●
	Acreción máxima (m)	232	326	126	146	47	161
	Erosión máxima (m)	108	92	67	71	78	34
Precipitación	Mínima anual (mm)	90	90	206	128	291	nd
	Máxima anual (mm)	711	711	645	420	649	nd
	Promedio anual (mm)	360	360	347	270	434	nd
Aporte sedimentario	Promedio anual en toneladas / año	438,339	385,581	349,044	188,377	561,457	nd
Nivel del mar m	Cambio en m	0	0	0	0	0	0
Oleaje condiciones normales	Hs máximo m	nd	nd	nd	1.8	2.7	3.4
Oleaje de huracanes	Hs máximo m	nd	nd	3.08	3.54	12.98	nd
Numero de ciclones	A 100 km de la costa	20	16	2	0	2	1

● ACRECIÓN ● EROSIÓN

6 REFERENCIAS

GARRISON, T. (2006) ESSENTIALS OF OCEANOGRAPHY. THOMSON BROOKS COLE. 4TA. EDICIÓN. 368 PP.

HAMYLTON, S. M. (2017) SPATIAL ANALYSIS OF COASTAL ENVIRONMENTS. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. UNITED KINGDOM. 290 PP.

INEGI (2010). RED HIDROGRÁFICA. ESCALA 1:50 000. EDICIÓN 2.0. CONSULTADO EN OCTUBRE DE 2018: HTTP://ANTARES.INEGI.ORG.MX/ANALISIS/RED_HIDRO/SIATL/#

LANGBEIN, W.B. & SCHUMM, S.A. (1958) YIELD OF SEDIMENT IN RELATION TO MEAN ANNUAL PRECIPITATION. TRANSACTIONS, AMERICAN GEOPHYSICAL UNION. 39(6), P. 1076-1084

LATORRE, C. & PENILLA., L. (1988) INFLUENCIA DE LOS CICLONES EN LA PARTICIPACIÓN DE BAJA CALIFORNIA SUR. ATMÓSFERA. 1, 99-112.

LEOPOLD, L.B. (1951) RAINFALL FREQUENCY: AN ASPECT OF CLIMATIC VARIATION. TRANSACTIONS, AMERICAN GEOPHYSICAL UNION. 32(3), P. 347-357.

LORED, O. C. (2005) PRÁCTICASPARA LA CONSERVACIÓNDEL SUELO Y AGUA EN ZONAS ÁRIDASY SEMIÁRIDAS. INIFAP-CIRNE-CAMPO EXP. SAN LUIS. LIBRO TÉCNICONO.1. SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. MÉXICO. 187 PP.

NOAA (2017) NCDC INTERNATIONAL BEST TRACK ARCHIVE FOR CLIMATE STEWARDSHIP (IBTRACS) PROJECT, VERSION 3. GIS DATA ACCESS. CONSULTADO EN SEPTEMBER DE 2018: HTTPS://WWW.NCDC.NOAA.GOV/IBTRACS/INDEX.PHP?NAME=GIS-NEW

POU-ALBERÚ, S. & POZOS-SALAZAR, G. (1992) CANTIDAD DE SEDIMENTO DRENADO HACIA LA COSTA DEL PACÍFICO NORTE EN EL NOROESTE DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO. CIENCIAS MARINAS,. 18 (3), P. 125-141

RAY, R. D. (1999) A GLOBAL OCEAN TIDE MODEL FROM TOPEX/POSEIDON ALTIMETRY: GOT99.2. NASA, GODDARD SPACE FLIGHT CENTER, GREENBELT, MARYLAND.

RODRÍGUEZ-REVELO, N., ESPEJEL, I., JIMÉNEZ-OROCIO, O., MARTÍNEZ, M.L., MATA, D.I. & MONROY, R. (2014) BAJA CALIFORNIA SUR. DIAGNÓSTICO GENERAL DE LAS DUNAS COSTERAS DE MÉXICO. COMISIÓN NACIONAL FORESTAL. 159-168 PP.

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL (2018) INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA POR ESTADO: BAJA CALIFORNIA SUR. CONSULTADO EN OCTUBRE DE 2018: HTTP://SMN.CNA.GOB.MX/ES/INFORMACION-CLIMATOLOGICA-VER-ESTADO?ESTADO=BCS

SORENSEN, J., MCCREARY, S. T., & BRANDANI, A. (1992) COSTAS: ARREGLOS INSTITUCIONALES PARA MANEJAR AMBIENTES Y RECURSOS COSTEROS. CENTRO DE RECURSOS COSTEROS. UNIVERSIDAD DE RHODE ISLAND. 185 PP.

TORRES, C. 1991. TRANSPORTE LITORAL EN UNA ZONA DE LA BAHÍA DE TODOS SANTOS, B.C., MÉXICO DURANTE ABRIL, AGOSTO Y OCTUBRE DE 1985. CIENCIAS MARINAS. 17 (3) P. 59-71.

THE HEINZ CENTER. (2000) EVALUATION OF EROSION HAZARDS. 1RA ED. THE H. JOHN HEINZ III CENTER FOR SCIENCE, ECONOMICS AND THE ENVIRONMENT. EUA. 205 PP.

TRUJILLO, A. P. & THURMAN, H. V. (2016) ESSENTIALS OF OCEANOGRAPHY. PEARSON EDUCATION, INC. 12VA. EDICIÓN. 597 PP.

TRUJILLO, A. P. &. THURMAN, H. V. (2005) ESSENTIALS OF OCEANOGRAPHY. PEARSON PRENTICE HALL. 8VA. EDICIÓN. 496 PP.

WANG, S., FU, B. , PIAO, S. , LÜ, Y., CIAIS, P., FENGY, X. & WANG. (2015) REDUCED SEDIMENT TRANSPORT IN THE YELLOW RIVER. NATURE GEOSCIENCE, 5 PP.

CONSERVING THE LANDS AND WATERS ON WHICH ALL LIFE DEPENDS.

©2020. The Nature Conservancy.

www.tncmx.org
www.nature.org
www.coastalresilience.org

The Nature Conservancy