

Estabilidad de la línea de costa frente al calentamiento global: análisis de sectores costeros en Tacna y Piura, Perú

Carlos Tavares Corrêa*
Gustavo Rondón**

Abstract

Geographic information system (GIS) is a powerful tool to analyzing historical shoreline changes from several cartographic sources. The present study analyzed changes along two coastal areas in the department of Piura (Sector Chira river mouth-Colan beach) and the department of Tacna (Sector Boca del Rio, Los Palos beach) in Peru, by using Digital Shoreline Analysis System (DSAS), an extension of ArcGIS. The results show that in Tacna, shoreline tends to the stability or accretion in the period 1955-2004 with rates of 0.2 to 1.0 meters/year. Moreover, in Piura, the sector nearest to Chira river mouth shoreline tends to accretion with rates between 1.5 to 1.7 m/year. On the other hand, closest to Colan beach the shoreline trends are erosion with rates between -2 m/year to -4.1 m/year. The different behavior of two extreme coastal regions reinforces the local nature of the causes of beach erosion in the country. While El Niño has a very important role in the shoreline stability in the northern Peruvian coastline, the recent tectonic activity may be an important factor to explain the accretion of the coastline in southern Peruvian coastline.

Key words: *GIS, shoreline changes, erosion, accretion, Digital Shoreline Analysis System (DSAS).*

Resumen

Mediante el empleo de material cartográfico y Sistema de Información Geográfica (SIG), se analizó la variación de la línea de costa en dos sectores ubicados en el

* Centro de Investigación en Geografía Aplicada (CIGA), Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universidad 1801, San Miguel, Lima, Perú, correo electrónico: ctavare@puccp.pe

** Correo electrónico: gustal34@gmail.com

departamento de Piura (sector río Chira-Colán) y en el departamento de Tacna (sector Boca del Río-Los Palos). El sector de Tacna presentó tendencia a la estabilidad o el avance de la línea de costa en el periodo analizado (1955-2004) con tasas del orden de 0.2 a 1.0 metros/año. Por otra parte, el sector río Chira-Colán presentó elevadas tasas de avance de la línea de costa, en Colán (1.5 metros/año) y desembocadura del río Chira (1.7 metros/año). Ya el tramo al sur entre el río Chira y Colán, la tendencia de la línea de costa fue netamente erosiva con retrocesos del orden de -2 metros/año hasta -4.1 metros/año. El comportamiento distinto de dos regiones costeras extremas del país refuerzan el carácter local de las causas de la erosión de playas en el país. Mientras que el fenómeno de El Niño tiene un papel muy importante en la estabilidad de la línea de costa en el norte del país, la actividad tectónica reciente puede ser un factor de gran importancia para explicar el avance de la línea de costa en el sur del país.

Palabras clave: *SIG, línea de costa, avance, retroceso, erosión, DSAS.*

Introducción

En la costa peruana, la erosión de playas ocurre, principalmente en sectores costeros directamente afectados por actividades humanas que alteran el equilibrio natural de las playas, como es el caso del impacto de la construcción del puerto de Salaverry en las playas de Las Delicias (León y Tavares Corrêa, 2004; Tavares Corrêa, 2010), Buenos Aires y Huanchaco (Tavares Corrêa, 2010); de la apropiación indebida y la erosión de las playas en Villa (Tavares Corrêa, 2010; Grández, 2010) o en la Esmeralda de Colán (Rondón, 2011); y de la construcción de espigones y la reducción de playas arenosas en la Costa Verde (Leceta, 2009). En estos casos, no se puede atribuir a un fenómeno de carácter global a la erosión de playas, principalmente debido a que en otros sectores costeros no alterados, como el litoral al norte del puerto de Chicama, en La Libertad (Tavares Corrêa y Drenkham, 2010) o parcialmente alterados, como el litoral al sur de Chorrillos, en Lima (Grández, 2010), presentan playas en condiciones relativamente estables. Sin embargo, los datos de marea del puerto del Callao indican que el nivel del mar se elevó en 50mm entre 1942 y 2001 (Quispe Arce, 2002). Este aumento corresponde a una tasa de elevación del nivel del mar del orden de 0.83mm al año. Si bien ésta es una tasa muy inferior al promedio de elevación del nivel del mar a escala global para el periodo entre 1993 y 2009, estimada en $2.8 \pm 0.8\text{mm/año}$ a partir de datos *in situ* (Church y White, 2011), la combinación con otros eventos de orden meteorológico tales como los fuertes oleajes de invierno y, principalmente, el fenómeno de El Niño, provocan una sobre elevación del nivel del mar de hasta 0.4m en la costa norte del país, como ocurrió durante el verano de 1998 (Senamhi, 2004).

Durante el presente siglo, el nivel del mar seguirá en aumento y, probablemente superará a las tasas ya registradas en la primera década del siglo XXI, que a escala

global superan a los 3 milímetros anuales (Church y White, 2006 y 2011). A largo plazo, esta tendencia provocará una aceleración de los procesos erosivos en los sectores costeros ocupados por las actividades humanas, lo que provocará pérdidas económicas aún no debidamente evaluadas. Sin embargo, se sostiene la hipótesis que los efectos de la elevación del nivel del mar a escala global no se hacen notar en la costa peruana dado que los casos de erosión de playas no ocurren de forma generalizada, sino localmente, en sectores costeros alterados por la ocupación humana. En este sentido, el objetivo del presente estudio es evaluar el grado de estabilidad que presenta la línea de costa en sectores alterados y no alterados por las actividades humanas.

Área de estudio

Con este propósito, se analizaron dos sectores costeros ubicados en los departamentos de Tacna y Piura. El sector comprendido entre el balneario de Boca del Río Sama ($18^{\circ} 09' 27''$ S y $70^{\circ} 40' 41''$ W) y Los Palos ($18^{\circ} 13' 58''$ S y $70^{\circ} 31' 57''$ W), en el departamento de Tacna, tiene una extensión de 17km, aproximadamente, y se ubica al sur de la desembocadura del río Sama. Se trata de un sector no alterado significativamente por las actividades humanas y con baja densidad poblacional a pesar de la presencia de dos balnearios importantes de la región, que son los balnearios de Boca del Río y Llostay (véase Figura 1).

Por otra parte, el sector ubicado entre el Puerto de Paita ($04^{\circ} 54' 18''$ S y $81^{\circ} 08' 57''$ W) y la desembocadura río Chira ($05^{\circ} 04' 27''$ S y $81^{\circ} 03' 19''$ W), se extiende a lo largo de 34 kilómetros de línea de costa donde se localizan la ciudad de Paita y el balneario de Colán. El presente estudio se concentra en analizar el tramo comprendido entre el balneario de Colán y la desembocadura del río Chira (véase Figura 2). Una descripción completa de toda la línea de costa de la bahía de Paita se encuentra en el trabajo de Rondón (2011).

Metodología

Se analizó la estabilidad de la línea de costa para los sectores seleccionados según la metodología descrita por Leceta (2009), Grández (2010), Rondón (2011) y Tavares Corrêa y Drenkham (2010). El análisis se basó fundamentalmente en la aplicación de la extensión Digital Shoreline Analyzis System (DSAS), desarrollada por Thieler *et al.* (2005). El DSAS es una extensión diseñada para el software ArcGIS ArcInfo 9.2 de ESRI, y consiste en la determinación de la distancia más corta entre las líneas de costa a partir de una línea de referencia común y medida regularmente a cada 100 metros. Se utilizaron los siguientes parámetros estadísticos: el Coeficiente de cambio final (EPR), que representa la tasa de variación neta anual (en metros/año); y el movimiento neto de la costa (NSM), que representa la variación

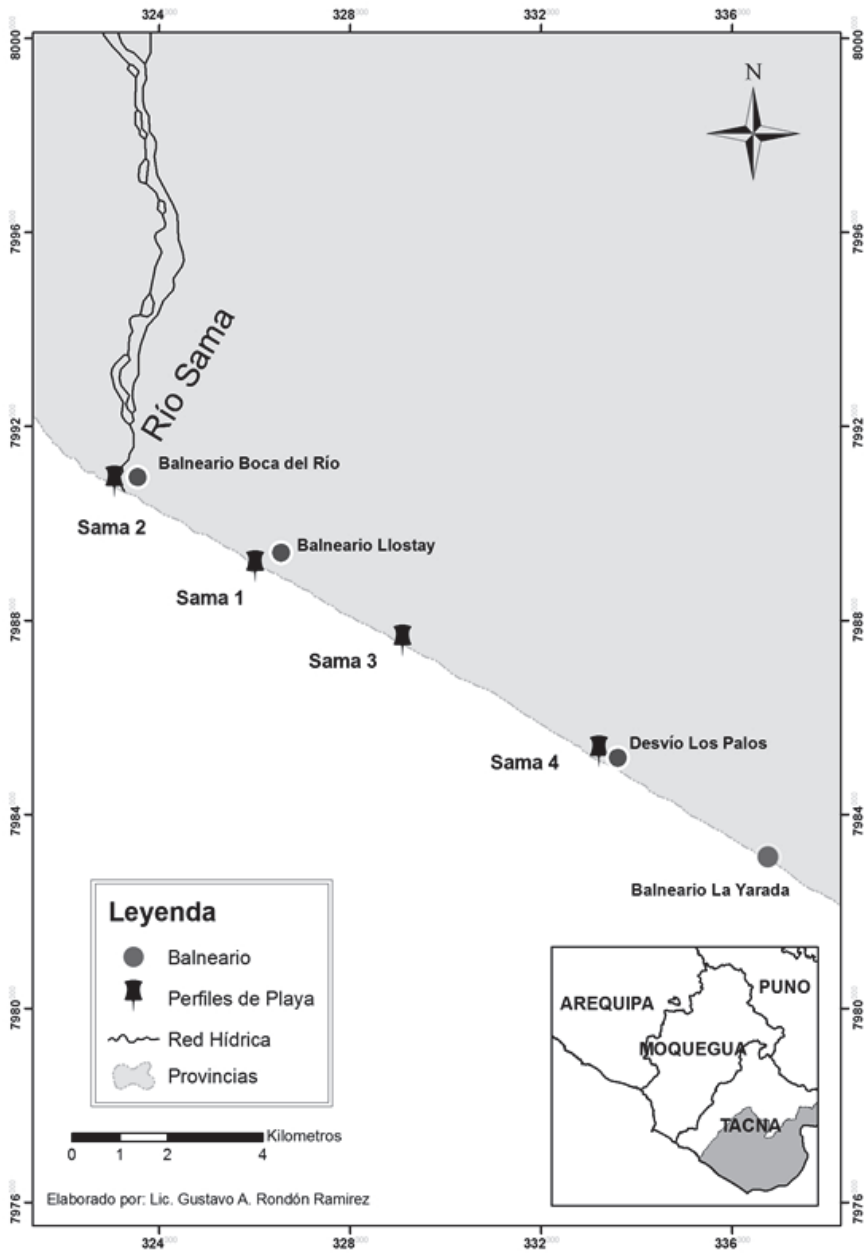


Figura 1. Ubicación del sector entre el balneario de Boca del Río (Sama 2) y Los Palos (Sama 4) y de los perfiles de playa que caracterizan este sector. El mapa está definido según la proyección UTM, Datum WGS 84, zona 19.

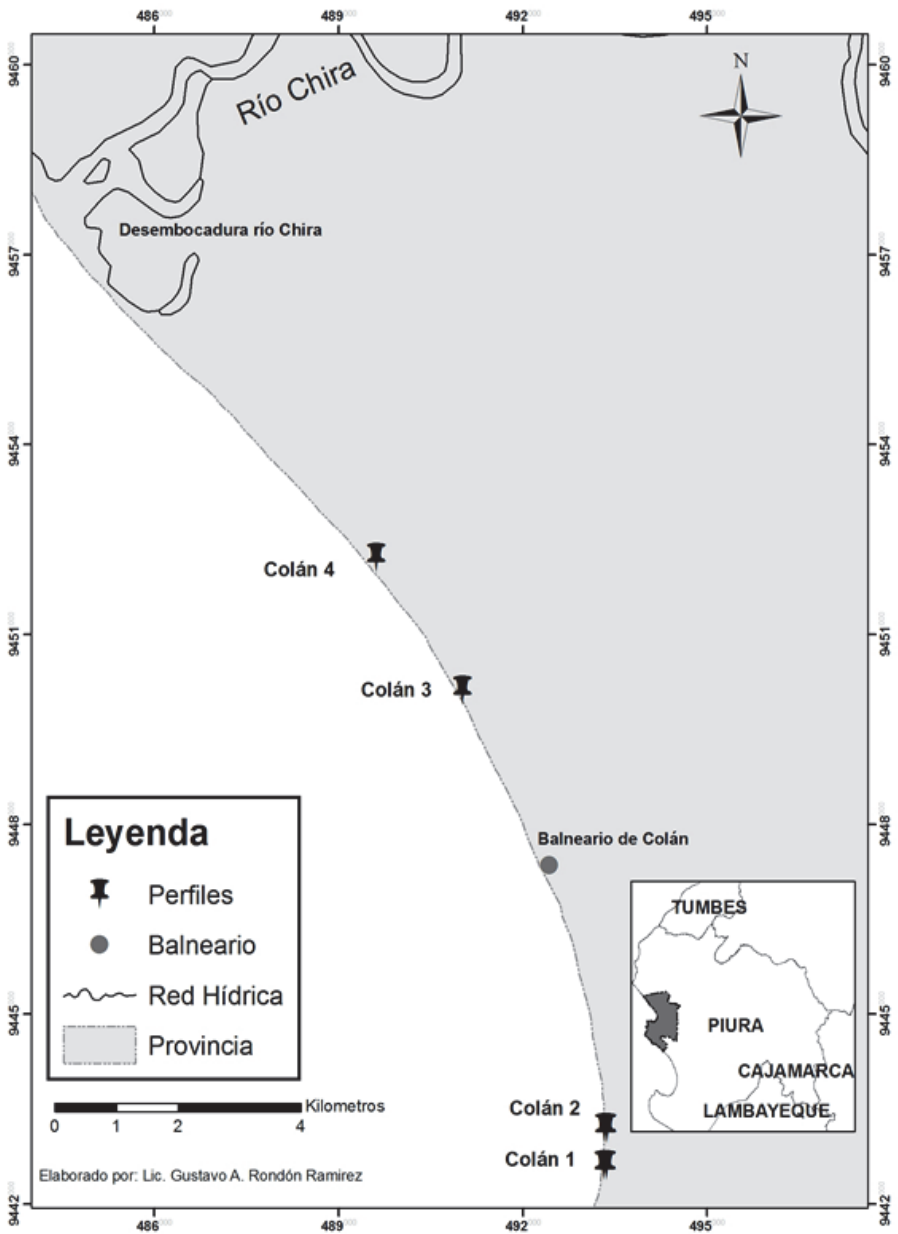


Figura 2. Ubicación del sector entre el balneario de Colán (Colán 1) y la desembocadura del río Chira (Colán 4) y de los perfiles de playa que caracterizan este sector (Colán 1, 2, 3 y 4). El mapa está definido según la proyección UTM, Datum WGS 84, zona 17.

total en metros de la línea de costa durante el periodo analizado. En ambos índices, los valores positivos representan periodos de acumulación y los negativos representan periodos de erosión de la línea de costa.

La línea de costa fue trazada según criterios previamente discutidos en León y Tavares Corrêa (2006). Ésta corresponde a la distancia media entre la línea que representa la marca visible de la pleamar y la línea de litoral de la foto o imagen. Con este criterio, se pretende reducir el error de interpretación que se puede incurrir al comparar dos líneas de costa de años distintos que se encuentran separadas por unos pocos metros. Dada las limitaciones para definir el nivel medio del mar en las fotos o imágenes se optó por trabajar con un error de variación estimado a partir de la pendiente de la playa y de la amplitud máxima de marea. Se determinó la pendiente a partir del levantamiento del perfil de playa según la técnica de Emery (1962), mientras que la máxima amplitud de marea se obtuvo a partir de los datos proporcionados por la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN) de la Marina de Guerra del Perú. Según este criterio, la distancia horizontal entre la pleamar y la bajamar (Figura 3) será mucho más grande en una playa suavemente inclinada que en otra fuertemente inclinada. Al comparar dos líneas de costa de años diferentes, la distancia que separa a ambas solo corresponde a un retroceso o avance neto de la línea de costa durante el periodo analizado, si la distancia entre ellas es superior a la distancia horizontal de la amplitud máxima de marea. De lo contrario, la variación medida correspondería a momentos dentro del ciclo de marea y no un cambio neto de la línea de costa.

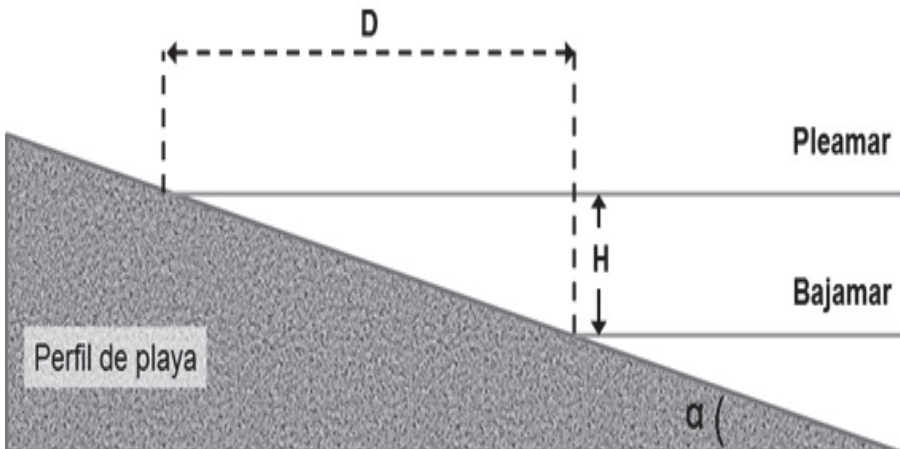


Figura 3. La variación horizontal entre la pleamar y la bajamar (D) depende de la pendiente de la playa (α) y de la amplitud máxima de marea (H).

Resultados

Perfiles de playa

En las Figuras 4 y 5 se presentan los perfiles de playa levantados, respectivamente en los sectores costeros de Sama y Colón. En las Tablas 1 y 2 se presentan el error estimado a partir de los perfiles levantados en cada localidad. Las pendientes de los perfiles de Colón son más pronunciadas (2.95°) que las de los perfiles de Sama (2.5°). Estas pendientes, combinadas con la amplitud máxima de marea de cada localidad permitieron determinar que el margen de error estimado para Colón es superior ($\pm 21.5m$) al error estimado para Sama ($\pm 16.2m$), principalmente, debido a la mayor amplitud máxima de marea en la costa norte del país.

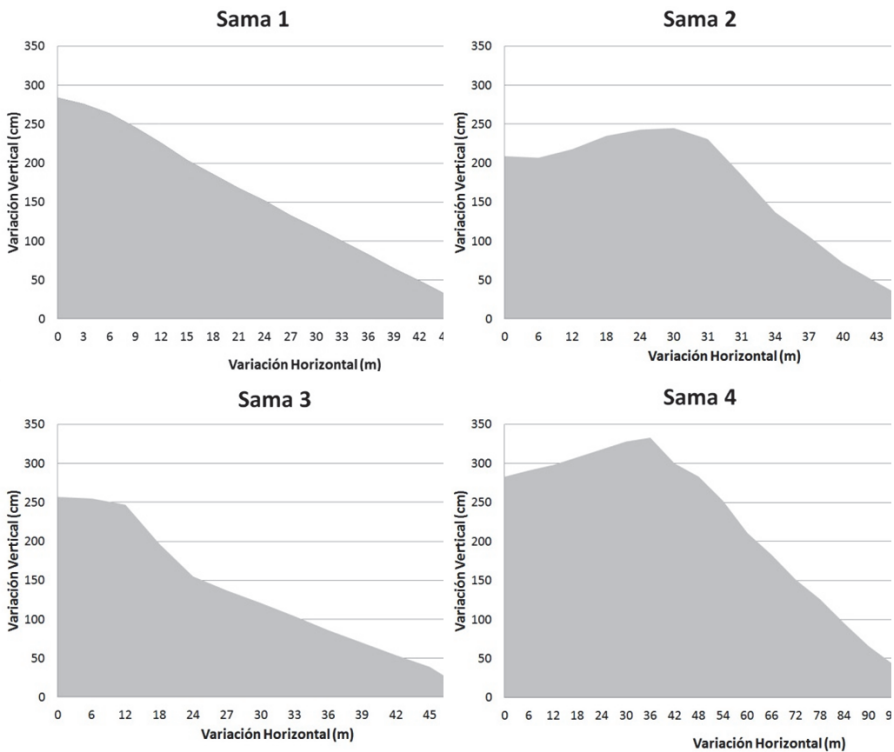


Figura 4. Perfiles de playa levantados en las estaciones Sama 1, 2, 3 y 4 identificados en la Figura 1.

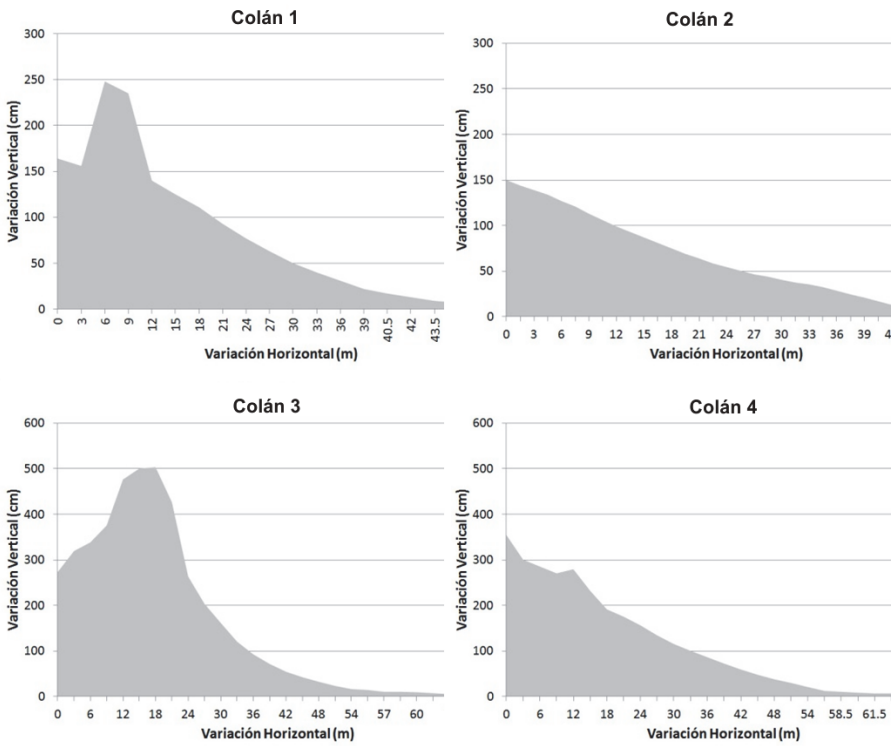


Figura 5. Perfiles de playa levantados en las estaciones Colán 1, 2, 3 y 4 identificados en la Figura 2.

Tabla 1
Error estimado para los perfiles del sector Boca del Río-Los Palos

| Perfil | Pendiente (Grados) | Amplitud Máxima de Marea (metros) | Variación Horizontal de la marea (metros) | Margen de Error Estimado (metros) |
|-------------------|---------------------------|--|--|--|
| Llostay | 2.3 | 1.36 | 33.8 | ±16.6 |
| Boca del río Sama | 2.2 | 1.36 | 35.9 | ±17.9 |
| Sur de Llostay | 3.4 | 1.36 | 22.6 | ±11.3 |
| Desvio Los Palos | 2.1 | 1.36 | 38 | ±19.0 |

Tabla 2
Error estimado para los perfiles de Colán

| Perfil | Pendiente (Grados) | Amplitud Máxima de Marea (metros) | Variación Horizontal de la marea (metros) | Margen de Error Estimado (metros) |
|----------------------|--------------------|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| Colán Norte (P3 y 4) | 2.7 | 2.2 | 47.1 | ±23.6 |
| Colán Sur (P1 y 2) | 3.2 | 2.2 | 38.7 | ±19.4 |

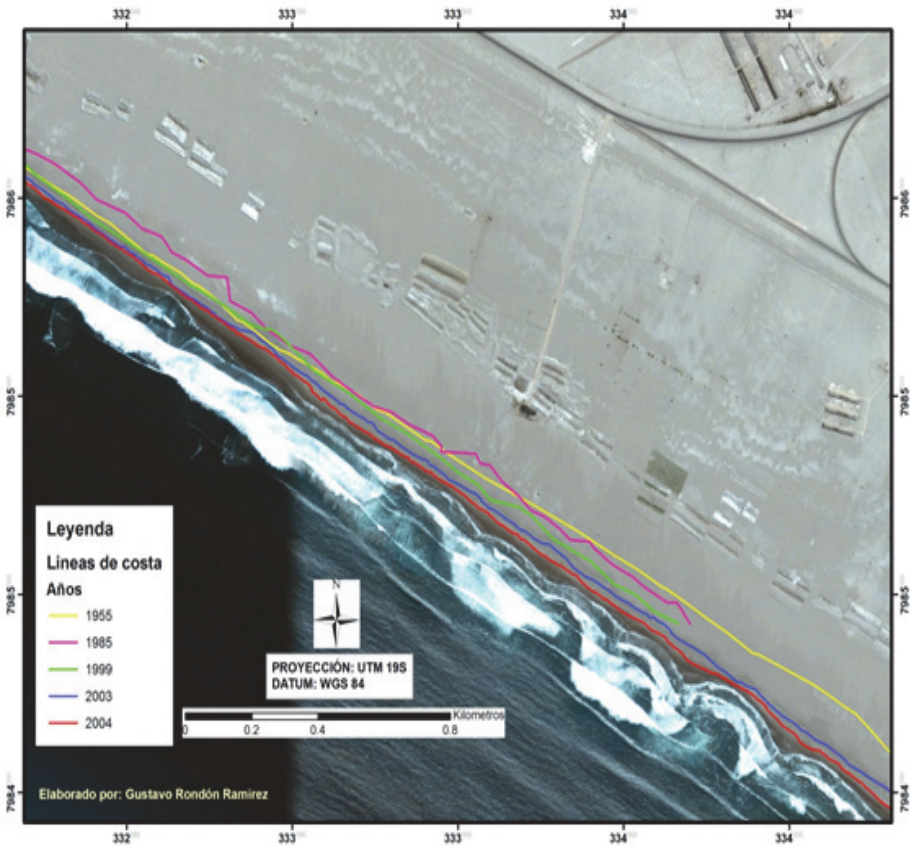


Figura 6. Variación de la línea de costa para el sector Llostay, Los Palos para los años 1955, 1985, 1999, 2003 y 2004.

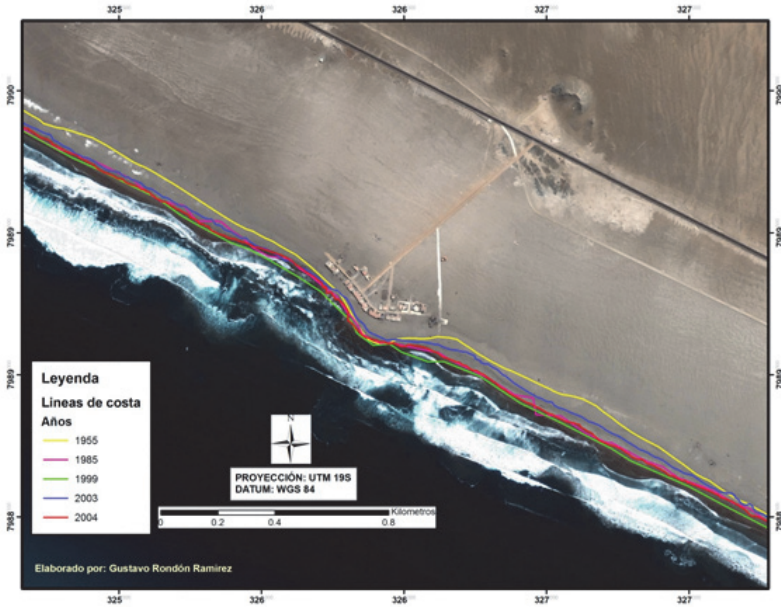


Figura 7. Variación de la línea de costa para el sector balneario Llostay para los años 1955, 1985, 1999, 2003 y 2004.

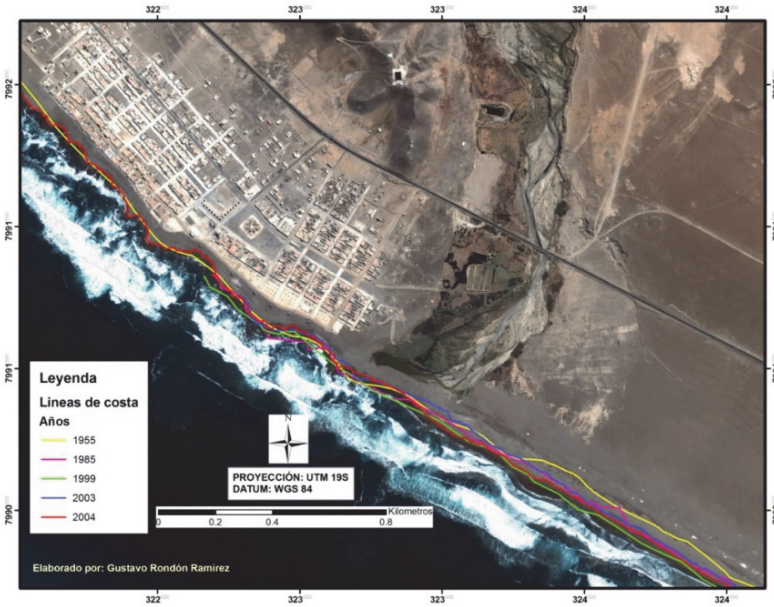


Figura 8. Variación de la línea de costa para el sector balneario Boca del Río, desembocadura del río Sama para los años 1955, 1985, 1999, 2003 y 2004.

Variación de la línea de costa: sector Boca del Río-Los Palos

En la Figura 6 se representa la variación de la línea de costa de Sama, frente al desvío a la ciudad de Tacna, en el sector conocido como Los Palos (Sama 4 en la Figura 1). La línea de color amarillo (1955) es la línea de costa más antigua y la de color rojo (2004) la más reciente; entre ambas se cuantificó un distanciamiento de aproximadamente 116 metros. Dado que el error promedio estimado para este sector es de ± 16.2 metros se considera que la línea de costa ha avanzado hacia el mar de forma apreciable. Además, se puede notar que las líneas de costa que representan los años intermedios (1985, 1999 y 2003) siguen la misma tendencia secuencial de progradación hacia el mar.

Por otra parte, la Figura 7 muestra la variación de la línea de costa en el balneario de Llostay. Este balneario se ubica frente a unas peñas, que claramente son identificadas porque es donde las líneas de costa presentan una mayor estabilidad. Dado el comportamiento presentado por las líneas de costa de los años 1985, 1999, 2003 y 2004, este sector costero tiene una gran estabilidad pues su variación está dentro del margen de error estimado (± 16.2 metros); sin embargo, se puede apreciar que, con relación a la línea de costa del año 1955, hay un tramo cuya tendencia es de avance con una variación aproximada de 60 metros. Este comportamiento concuerda con la tendencia observada más al sur, de un avance de la línea de costa en el lapso de 50 años. Cabe mencionar que el balneario de Llostay no tiene estructuras costeras que puedan condicionar la variación de la línea de costa y que su ocupación es reciente, a partir de la década de los ochenta.

La Figura 8 corresponde al extremo norte del sector de línea de costa estudiado. Se trata de la desembocadura del río Sama y el balneario de Boca del Río. En esta zona la línea de costa presenta la mayor estabilidad en toda el área de estudio. Las variaciones son casi nulas durante los diferentes periodos, todas dentro de los márgenes de error estimados (± 16.2 metros). Al igual que en el balneario de Llostay, en el balneario de Boca del Río no existen estructuras costeras que puedan influir en la variación de la línea de costa y la desembocadura del río Sama no parece tener una mayor influencia en su costa adyacente. Sin embargo, cabe mencionar que es a partir de la desembocadura que la línea de costa presenta una tendencia de avance que se hace evidente más al sur, entre los años de 1955 y 2004.

Variación de la línea de costa: sector río Chira-Colán

La Figura 9 corresponde al sector de la Esmeralda de Colán. Lo primero que se puede señalar es que el impacto del evento El Niño es un factor que se distingue claramente en el norte del país. Luego del evento de 1997-1998, se puede observar que la línea de costa del año 1999 ha avanzado hacia el mar más que en cualquier otro año analizado. Se trata de un sector costero cuya línea de costa es muy dinámi-

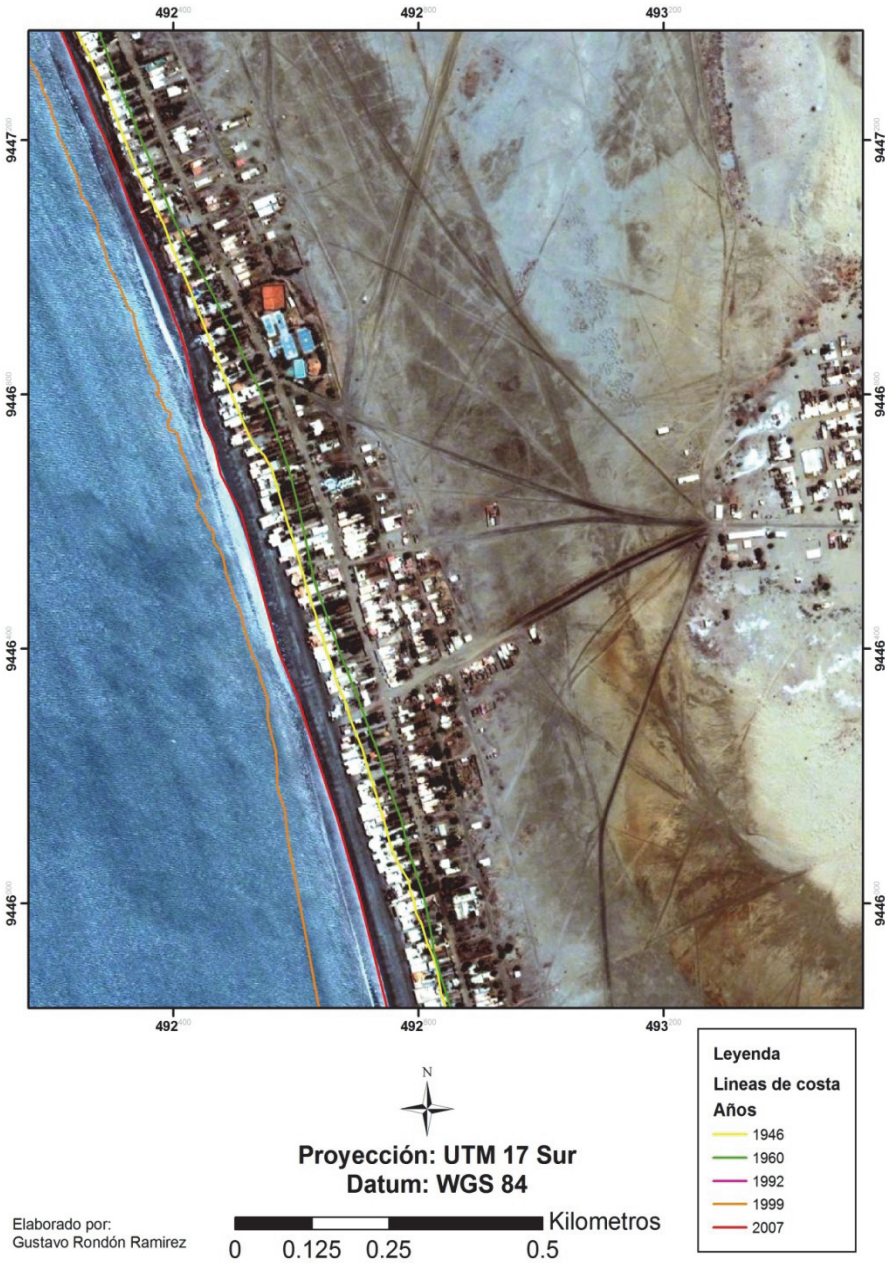


Figura 9. Variación de la línea de costa para el sector de Colán en los años 1946, 1960, 1999 y 2003-2007.

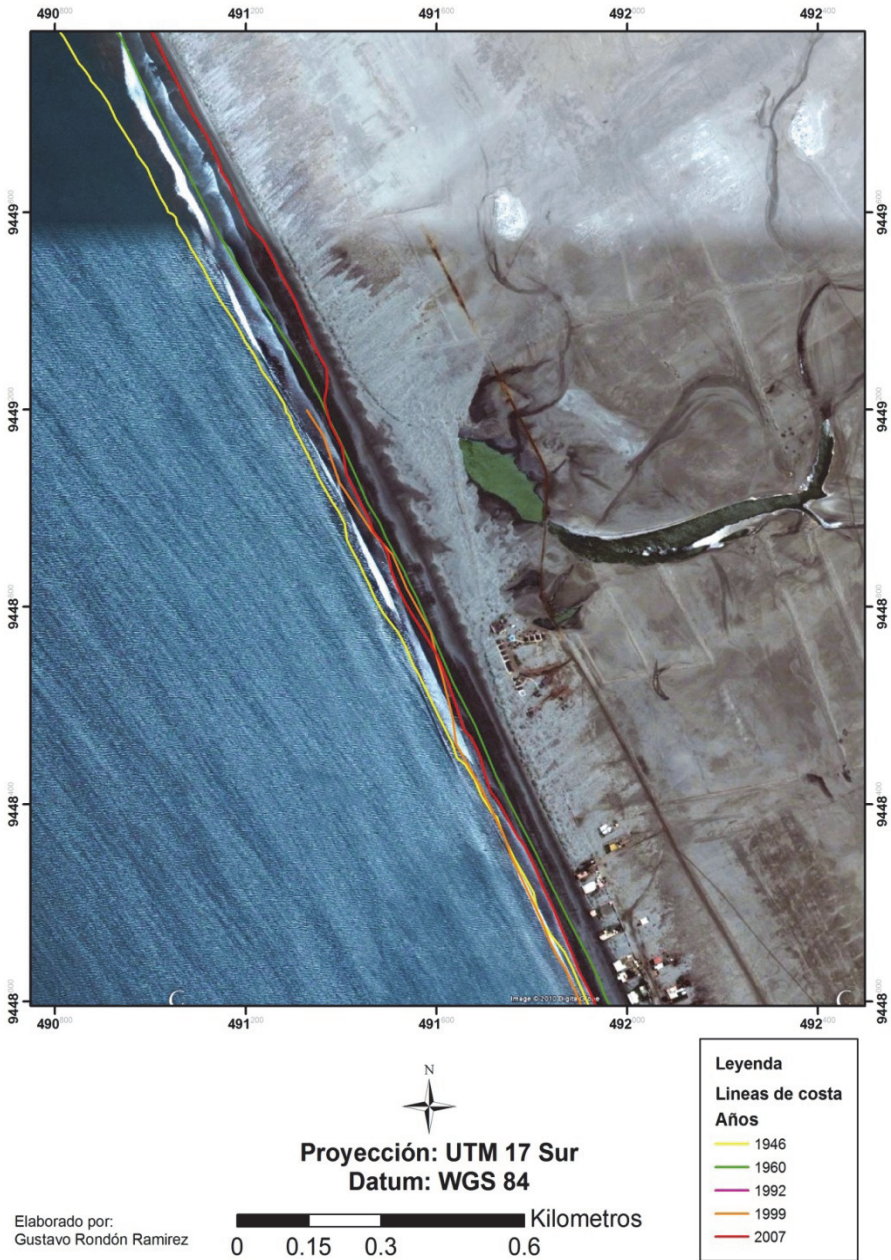


Figura 10. Variación de la línea de costa para el sector sur de la desembocadura del río Chira en los años 1946, 1960, 1999 y 2007. En esta figura, se puede notar el extraordinario retroceso de la línea de costa de 1946 a 2007.

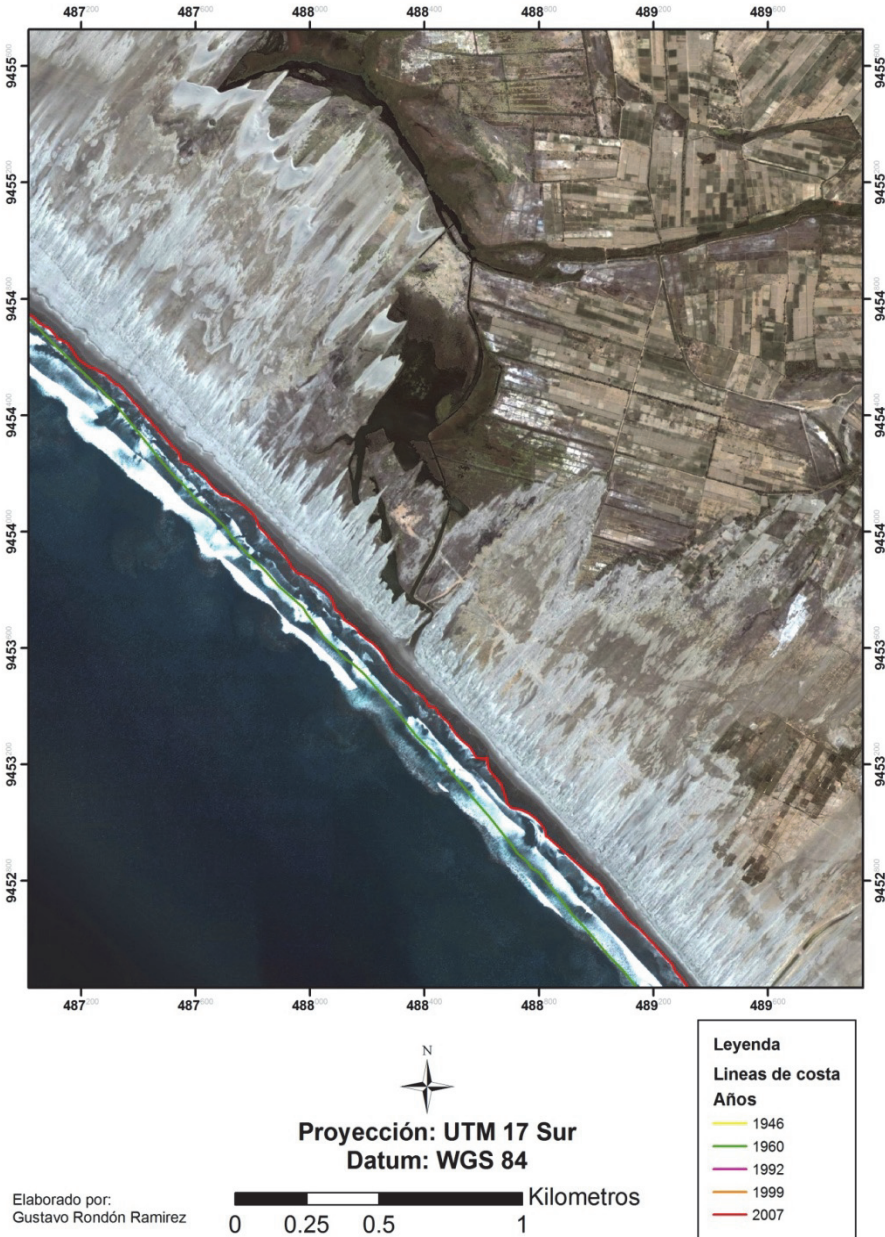


Figura 11. Variación de la línea de costa para el sector sur de la desembocadura del río Chira en los años 1946, 1960, 1999 y 2007. En esta figura, el retroceso es casi paralelo entre 1960 y 2007.

ca debido a la presencia del evento El Niño. Entre los años 1946 y 1960 la línea de costa retrocedió, lo que caracterizó un momento erosivo. Entre 1960 y 1999, el proceso es al revés, caracterizado por un periodo deposicional. Finalmente, entre 1999 y 2004-2007 la línea de costa presenta nueva tendencia erosiva con el retroceso de la línea de costa. La línea de costa actual representa un punto intermedio entre las mencionadas anteriormente. Cabe señalar que la primera línea de casas observadas en el mapa, son en realidad la segunda línea de casas, pues las primeras fueron destruidas en el evento El Niño 1982-1983 y 1997-1998. Con este dato y observando las líneas de costa históricas se puede señalar que en un primer momento el nivel del mar aumenta y genera erosión para luego transformarse en un proceso sedimentario.

En las Figuras 10 y 11 se muestran los sectores al sur de la desembocadura del río Chira. En este sector se observa el predominio de la erosión o del retroceso de la línea de costa en un sector no ocupado por la actividad humana. En la Figura 10, se puede observar que desde el año 1946 el retroceso de la línea de costa ha sido gradual hasta alcanzar a varios cientos de metros. El mismo fenómeno se ve en la Figura 11 donde, entre el año 1960 y la línea de costa actual también se ha dado un fuerte retroceso. Estos procesos también podrían ser relacionados con los caudales excepcionales del río Chira durante eventos El Niño y que puede ser el principal responsable por este fuerte proceso erosivo.

Análisis DSAS: sector Boca del Río-Los Palos

En la Figura 12, que representa el movimiento neto de la línea de costa en el sector Sama entre 1955 y 2003-2007, se observa el predominio de valores positivos en 90.6% del sector analizado. Cuando se toma en cuenta un error de ± 16.2 metros, se obtiene que el 71.1% de la línea de costa ha avanzado, el 27.8% se ha mantenido estable y solamente el 1.1% de la línea de costa ha sufrido un retroceso por erosión durante los 52 años analizados. El promedio general acusa un avance de la línea de costa del orden de 53 metros y un valor máximo de 151 metros.

Para realizar un análisis más detallado se han delimitado tres sectores: balneario Boca del Río-desembocadura del río Sama; balneario de Llostay y el sector conocido como el desvío a Los Palos. En la primera el movimiento neto de la línea de costa promedio es de 11.46 metros, en la segunda el promedio es de 52.15 metros y en la tercera de 57.85 metros. Destaca en este análisis la zona del desvío a Los Palos, pues se puede ver claramente que el proceso de sedimentación se incrementa de norte a sur.

La tasa anual de variación, representada en la Figura 13, muestra la línea de costa que avanza en dirección hacia el mar con un valor promedio para todo el sector del orden de 0.98 metros/año. La tasa máxima de erosión identificada fue de -0.47 metros/año y corresponde a la desembocadura del río Sama que se está cerrada durante gran parte del año y erosiona la playa con el aumento del caudal del río durante los meses de verano. Por otra parte, la tasa máxima de acumulación fue del orden de 3.1 metros/año, coincide con el sector Los Palos. A partir de un análisis más detallado y según los mismos tres sectores antes mencionados, se tiene que en Boca del Río Sama la tasa de cambio final promedio es de 0.24 metros/año, en la zona de Llostay el promedio es de 1.06 metros/año y en la zona del desvío a Los Palos es de 1.22 metros/año. En todos estos sectores, la línea de costa ha experimentado un avance en dirección hacia el mar.

Análisis DSAS: sector río Chira-Colán

En la Figura 14, que representa el movimiento neto de la línea de costa en el sector desembocadura del río Chira y balneario de Colán (1946-2007), se observa un cierto equilibrio entre avance y retroceso de la línea de costa. El predominio de valores positivos, que representa el avance, aparecen en el 40.2% del sector analizado, mientras que los valores negativos, equivalentes al retroceso (erosión) de la línea de costa superan a los anteriores con un 54.9% del sector. Prácticamente, todos los valores de variación de la línea de costa encontrados superan el margen de error, estimado en ± 21.5 metros. La excepción fue un sector equivalente al 4.9% de la línea de costa que fue considerada como estable. Corresponde a un estrecho sector de alrededor de 400 metros, ubicado en la transición del sector erosivo de la desembocadura del río Chira y el deposicional del balneario de Colán. El promedio general de avance de la línea de costa es de 85.3 metros con un valor máximo de 124.6 metros, mientras que promedio del sector erosivo es de -108.3 metros y el valor máximo de -256.7 metros.

Por otra parte, la tasa anual de variación (Figura 15), muestra que la línea de costa avanza con tasas más elevadas en la desembocadura del río Chira, con 1.7 metros/año en promedio y máximo de 2.6 metros/año, que en Colán, con 1.5 metros/año y 2.1 metros/año, respectivamente. Ya el sector erosivo al sur del río Chira presentó promedios de -2 metros/año y valores máximos de -4.1 metros/año, constituyéndose en el sector de mayor variación de la línea de costa analizado.

Discusión y conclusiones

Tavares Corrêa y Drenkhan (2010) plantean que la erosión de playas en el Perú responde a causas de carácter local y no de carácter global. El carácter global de la erosión de playas (Zhang, Douglas y Leatherman, 2004; Bird, 1985) se debe a la elevación del nivel del mar en respuesta al calentamiento global (Bindoff *et al.*, 2007). En este sentido, es de esperarse que la erosión predomine en toda la línea de costa del país.

El inventario que se viene realizando en playas de diferentes regiones de la costa peruana, que en parte es el propósito de este estudio, busca identificar sectores costeros que sufren erosión y las causas de este proceso. En los sectores ya identificados, la erosión tiene una causa local y está presente en donde los procesos naturales fueron alterados por la ocupación humana, como en el caso de la erosión de las playas de Trujillo debido a la construcción del puerto de Salaverry (León y Tavares Corrêa, 2005), o de las playas de la bahía de Miraflores debido a la construcción de molones e infraestructura vial (Leceta, 2009; Tavares Corrêa, 2010), debido a la presencia de urbanizaciones muy próximas al mar en la parte norte de La Chira-Lurín (Grandez, 2010) y Paita (Rondón, 2011). Por otra parte, en sectores no ocupados o ligeramente alterados por actividades humanas, como en el sector Chicama-Puémape (Tavares Corrêa y Drenkhan, 2010) o en la parte centro-sur del sector La Chira-Lurín (Grandez, 2010), no se identificó erosión de la línea de costa, sino tendencias a la estabilidad o el avance de misma en dirección al mar.

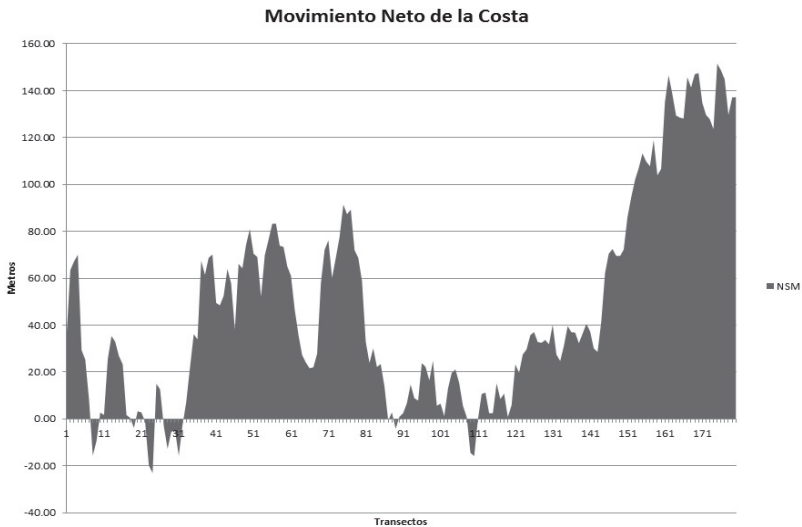


Figura 12. Variación de la línea de costa entre Boca del río Sama y Los Palos, Tacna (1961-2006).



Figura 13. Tasa anual de variación de la línea de costa entre Boca del Río Sama y Los Palos, Tacna (1961-2006).

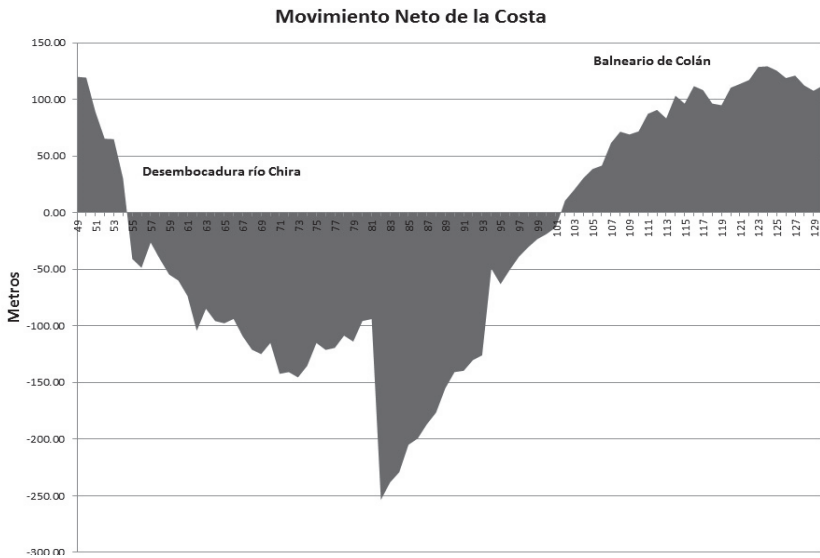


Figura 14. Variación neta de la línea de costa entre la desembocadura del río Chira y el balneario de Colán (1946-2007).

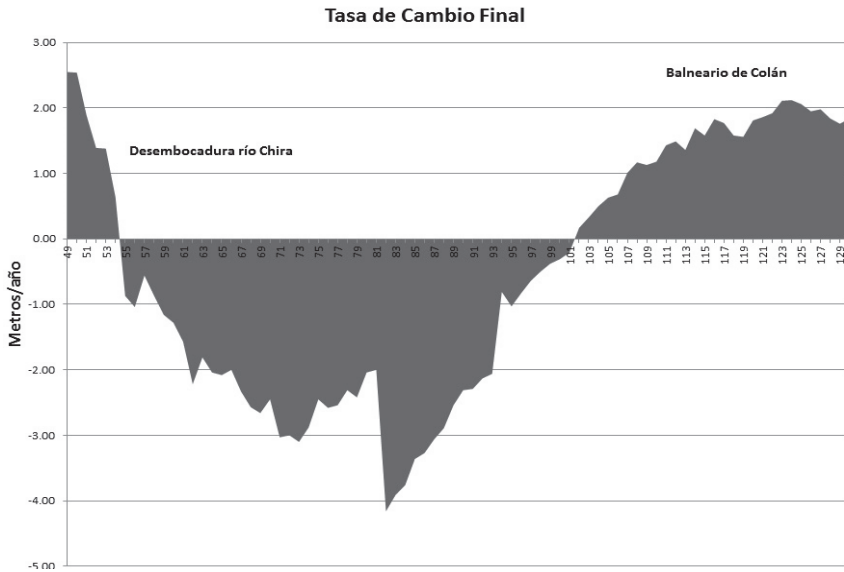


Figura 15. Tasa anual de variación de la línea de costa entre la desembocadura del río Chira y el balneario de Colán (1946-2007).

Además del impacto de las actividades humanas en la estabilidad de la línea de costa, con las dos localidades analizadas en este estudio se introducen dos nuevas variables que aún no habían sido consideradas para la costa peruana, debido a su carácter más complejo. En el caso del sector río Chira-Colán, en Piura, el fenómeno de El Niño tiene un papel muy importante en la estabilidad de la línea de costa debido a que es un fenómeno de carácter cíclico con periodos no muy regulares y que actúa en diferentes grados de magnitud. Su presencia en la costa peruana tiene incidencia en dos factores importantes: el primero es la sobre elevación del nivel del mar entre 15 y 40cm y la erosión de playas (Senamhi, 2009); y el segundo es el gran arrastre de sedimentos por los ríos hacia el mar debido a las lluvias intensas causadas por este fenómeno, hecho que fue documentado en la playa de Máncora por Woodman y Mabres (1993). A pesar de que ambos factores actúan en sentido contrario, pues uno causa erosión y el otro, la sedimentación en las playas, Rondón (2011) plantea que el principal impacto del fenómeno de El Niño en la costa es la sedimentación.

Se puede observar en las Figuras 10 y 11 un gran avance de la línea de costa del año 1999 con respecto a los años anteriores. Esto se debió a una sedimentación extraordinaria, principalmente en la zona sur de la desembocadura del río Chira a raíz del fenómeno de El Niño 1997-1998 (Rondón, 2011). Sin embargo, durante el fenómeno de El Niño de 1983 el balneario de Colán ha sufrido una fuerte erosión

con la consecuente destrucción de casas (Woodman y Mabres, 1993). El impacto del fenómeno de El Niño en la línea de costa no es igual en todos los sectores costeros afectados. Más bien responde de acuerdo con la combinación entre los factores mencionados y el grado de ocupación de la línea de costa.

Finalmente, el sector Boca del Río-Los Palos en la costa de Tacna no presenta fuerte presión de ocupación en el litoral como se puede observar en las Figuras 6, 7 y 8. La tendencia de este sector costero es de estabilidad en la parte norte y de avance de la línea de costa hacia el mar en la parte sur. Este avance de la línea de costa, del orden de 116 metros en el extremo sur, se da de manera progresiva desde 1955 hasta 2004. Lo que llama la atención es la ausencia de otras fuentes de sedimentos que podrían causar tasas de sedimentación relativamente elevadas, del orden 1.2 metros/año. Dado que la costa peruana se ubica en un margen continental tectónicamente activo, el levantamiento de la corteza debido a la subducción de placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana puede tener un papel importante en la estabilidad de la línea de costa. De acuerdo con Saillard *et al.* (2011) las tasas de levantamiento de la corteza en la costa de Arequipa durante el Pleistoceno fueron de 0.4 a 0.9 metros/1000 años, lo que equivale a 0.4-0.9 milímetros al año. Actualmente, esta tasa anual equivaldría a la cuarta parte de lo que representa la elevación del nivel del mar a escala global ($2.8 \pm 0.8\text{mm/año}$ según Church y White, 2011) y se acercaría a la tasa estimada por Quispe Arce (2002), para el puerto del Callao, alrededor de 0.85mm/año.

Agradecimientos

Se agradece al Vicerrectorado de Investigación de la Pontificia Universidad Católica del Perú por el apoyo financiero (Proyecto DGI-0034/2010).

Bibliografía

- Bird, E.C.F., *Coastline Changes: a global review*, Wiley & Sons, New York, 1985, 219 pp.
- Bindoff, N.L.; J., Willebrand; V., Artale; A., Cazenave; J., Gregory; S., Gulev; K., Hanawa; C., Le Quéré; S., Levitus; Y., Nojiri; C.K., Shum; L.D., Talley y A., Unnikrishnan, "Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level", *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S.; D., Qin; M., Manning; Z., Chen; M., Marquis; K.B., Averyt; M., Tignor and H.L., Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007, 996 pp.
- Church, J.A. y White, N.J., "Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century", *Surveys in Geophysics*, vol. 32, no. 4-5, pp. 585-602, 2011.

- Church, J.A. y White, N.J., “A 20th century acceleration in global sea-level rise”, *Geophysical Research Letters*, vol. 33, no. 1, 2006.
- Grández, M.I., *Evolución de línea de costa en las playas: La Chira, La Encantada de Villa, Mamacona y Conchan. Distritos de Chorrillos, Villa el Salvador y Lurín*, tesis de licenciatura en Geografía y Medio Ambiente, Facultad de Letras y Ciencias Humanas, Pontificia Universidad Católica del Perú (inédita), 2009.
- Leon, J. y Tavares Corrêa, C., “Quantification in shoreline change in Salaverry, Peru”, *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium), pp. 1013-1016, Coastal Education & Research Foundation, 2005.
- Leceta, F., *Análisis de variabilidad temporal en geomorfología costera mediante la aplicación de métodos de teledetección y sistema de información geográfica: bahía de Miraflores, Perú 1936-2005*. tesis de licenciatura en Geografía y Medio Ambiente, Facultad de Letras y Ciencias Humanas, Pontificia Universidad Católica del Perú (inédita), 2009, 102 pp.
- Quispe Arce, J., “Sea Level Variations in Callao (12° S) - Peru 1942-2001”, *Investigaciones marinas*, vol. 30, no. 1:101-102, 2002. Disponible en: <http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S071771782002030100017&script=sci_arttext>, consulta: 4 de octubre de 2009.
- Rondón, R.G., *Análisis de la variación temporal de la línea de costa y caracterización de la geomorfología litoral: bahía de Paita, Perú 1946-2007*, tesis de Licenciatura en Geografía y Medio Ambiente Facultad de Letras y Ciencias Humanas, 2011, 83 pp. Disponible en: <<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/716>>.
- Saillard, M.; Hall, S.R.; Audin, L.; Farber, D.L.; Regard, V.; Hérelil, G., “Andean coastal uplift and active tectonics in southern Peru: 10Be surface exposure dating of differentially uplifted marine terrace sequence (San Juan de Marcona, ~15.4°S)”, *Geomorphology*, vol. 128, no. 3-4, pp. 178-191, 2011.
- SENAMHI, *Escenarios del cambio climático en el Perú 2004-2050: cuenca del río Piura*, Senamhi, Lima, 2004, 129 pp. Disponible en: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd50/escenarios/escenarios.html>>, consulta: 4 de octubre 2009.
- Tavares Corrêa, C., “Los fenómenos de la erosión en el territorio de Lima”, *Revista de arquitectura, urbanismo y territorio*, pp. 4-11, 2010.
- Tavares Corrêa, C. y Drenkham, F., “Variación de la línea de litoral entre el puerto Chicama y Puémape, La Libertad, Perú (1961-2006)”, *Revista Espacio y Desarrollo*, núm. 22, pp. 103-117, 2010.
- Thieler, E.R.; Himmelstoss, E.A.; Zichichi, J.L. y Miller, T.L., *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change*, U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1304, 2005.

- Woodman, R. y Mabres, A., “Formación de un cordón litoral en Máncora, Perú, a raíz del Niño de 1983”, *Boletín Instituto Francés de Estudios Andinos*, tomo 22, núm. 1, pp. 213-226, Lima, Perú, 1993.
- Zhang, K., Douglas B.C. y Leatherman, S.P., “Global warming and coastal erosion”, *Climatic Change*, vol. 64, no. 1-2, pp. 41-58, Kluwer Academic Publishers, 2004.