

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN TEMPORAL DE LA LÍNEA DE COSTA
Y CARACTERIZACIÓN DE LA GEOMORFOLOGÍA LITORAL:
BAHÍA DE PAITA, PERÚ 1946-2007

*Gustavo Adolfo Rondón Ramirez**

RESUMEN

La bahía de Paita es un área representativa donde encontramos diversos ambientes geográficos. Entre ellos, los que presentan grandes infraestructuras portuarias, asentamientos de población, acantilados costeros, playas arenosas, estuarios ribereños, entre otros.

En la siguiente investigación se buscó conocer las dinámicas y los cambios en la línea de costa en el periodo 1946-2007, para lo que se tuvo en cuenta las tendencias actuales, especialmente las referidas al cambio climático, la elevación media del nivel del mar y el evento de El Niño. Para analizar estos cambios en la línea de costa se combinaron e integraron distintos métodos, como la cartografía, la teledetección, el análisis estadístico y el levantamiento de información de campo; todos ellos articulados dentro de un sistema de información geográfica.

El balance erosión/sedimentación obtenido en los resultados demuestra el gran dinamismo de la línea de costa. Este dinamismo se intensifica durante los eventos de El Niño y genera una gran sedimentación.

Palabras clave: sedimentación de playas, evento El Niño, línea de costa.

**Temporal Variation Analysis of the Coastline and Characteristics of Littoral Morphology:
The Paita Bay, Peru**

Abstract

The Paita's Bay is a representative study area where we can find different geographical features. Among them, those with large port infrastructure, population settlements, coastal cliffs, sandy beaches, coastal estuaries, and others.

The following research sought to understand the dynamics and changes in the coastline in the period 1946-2007. Taking into account current trends of climate change, the average elevation of sea level and the El Niño event. To analyze these changes in the coastline, the study

* Licenciado en Geografía y Medio Ambiente. Pontificia Universidad Católica del Perú. grondon@pucp.edu.pe
Se agradece al doctor Carlos Tavares, coordinador del Proyecto DGI-0034 (Vicerrectorado de Investigación PUCP), por el apoyo financiero.

combined and integrated various methods, such as cartography, remote sensing, statistical data analysis and field surveys, all articulated in a Geographic Information System.

The balance erosion-sedimentation obtained shows the dynamism of the coastline. This dynamic is intensified during El Niño events, generating a large sedimentation.

Keywords: Beach sedimentation, El Niño event, coastline.

INTRODUCCIÓN

La erosión de la línea de costa es un problema global. Por lo menos el 70% de las playas arenosas del planeta están sufriendo este proceso (Bird, 1985). Gran parte de los estudios que corroboran esta afirmación se ubican en el hemisferio norte. En el Perú este fenómeno erosivo es poco conocido dada la escasez de estudios físicos para explicar la dinámica del litoral, conocer acerca de los agentes que participan en ella, así como sus consecuencias directas e indirectas sobre las poblaciones y las actividades antrópicas han llevado a una mala práctica de generalización —Ley de Playas (ley 26856)—. El problema radica en que al generalizar, se desconoce la diversidad ambiental que existe en la línea de costa, dominada por playas arenosas, costas rocosas, acantilados y humedales, entre otros, que debido a sus características geomorfológicas diversas responden de manera distinta a la dinámica litoral.

Por esta razón se desarrolló esta investigación, que responde a la preocupación académica de conocer cómo las tendencias de los últimos años, referidas al cambio climático y sus impactos directos sobre la elevación del nivel del mar; además de la presencia de un fenómeno global con repercusiones regionales (El Niño Oscilación del Sur - ENOS) pueden afectar el comportamiento dinámico de la línea de costa en el país, y en particular en la bahía de Paita.

ÁREA DE ESTUDIO

La bahía de Paita está ubicada en el departamento de Piura, al norte del desierto de Sechura y al oeste de la ciudad de Piura. Comprende una extensión de aproximadamente 34 km, desde la península de Paita hasta la desembocadura del río Chira (Novoa, 2007). Geográficamente está comprendida dentro de los 5°04'27" y 04°54'04" de latitud sur y dentro de los 81°08'57" y 81°03'19" de longitud oeste.

Características climáticas

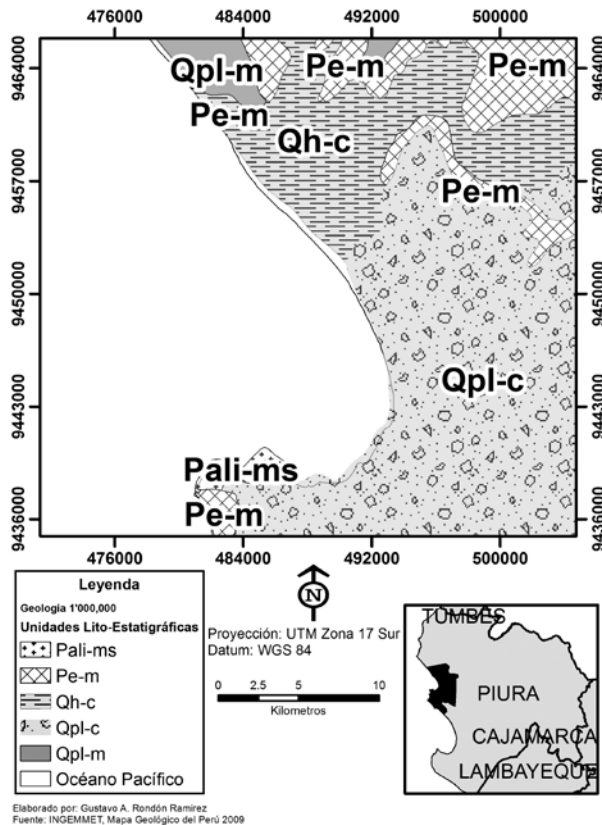
El clima de Paita se podría caracterizar como árido y semi cálido. Las precipitaciones son escasas (menos de 200 mm al año), salvo cuando se produce el evento de El Niño, años en que las lluvias son abundantes y se activan todos los cursos de las quebradas secas originando inundaciones y acciones morfológicas de gran dinamismo. Las temperaturas

máximas llegan a 34,2 °C y las mínimas a 15 °C. Los vientos que siguen una dirección al sur, tienen una velocidad promedio de 3 m/s. La dirección predominante del oleaje viene del sur y suroeste; sin embargo durante el verano se presentan también oleajes del noroeste y oeste, con mayor frecuencia durante el evento El Niño (Correa, González y Alvarado, 2007).

Características geológicas y geomorfológicas a escala general

Geológicamente la zona de estudio (véase figura 3) presenta depósitos aluviales y eólicos, así como también sedimentos de arena no consolidados, pertenecientes principalmente a la era cuaternaria (Palacios, 1994).

Figura 1. Mapa geológico de la bahía de Paita



Fuente: Elaboración propia. Leyenda del mapa: Pali-ms (Meta sedimentario del Paleozoico); Pe-m (Paleogeno Eoceno-Marino); Qh-c (Cuaternario Holoceno-Continental); Qpl-c (Cuaternario Pleistoceno-Continental); Qpl-m (Cuaternario Pleistoceno-Marino).

Los rasgos geomorfológicos en la zona de estudio han sido desarrollados a través de la evolución tectónica, habiendo incidido también los agentes de erosión, como son la actual mecánica de las olas en el modelado del borde litoral y la acción eólica en las pampas y tablazos. A continuación se describen las unidades geomorfológicas identificadas en la zona de estudio según Palacios (1994):

- Cordillera de la costa
- Plataforma costanera
- Borde litoral
- Plataforma litoral
- Talud continental

La zona de estudio se caracteriza principalmente por ser una plataforma costanera. Es sobre esta unidad donde se han esculpido los acantilados, con una estructura geológica de naturaleza sedimentaria —Cretácico-Terciaria—, la misma que descansa en partes adosadas a rocas del Basamento Paleozoico (Palacios, 1994). Su evolución geomorfológica obedece a la estructura tectónica del subsuelo, con levantamientos verticales que siguen un lineamiento y que han dado lugar a terrazas marinas escalonadas, conocidas como tablazos (Palacios, 1994). También es necesario mencionar que el talud continental es una zona de pendiente brusca, llegando a tener entre 200 m y 500 m de profundidad frente a las costas de Paita. En el extremo norte del área de estudio se encuentra el río Chira, que presenta un estuario ribereño, con llanuras arenosas, bancos de arena parcialmente vegetados y más al sur, encontramos playas de arena, con llanuras desérticas que alcanzan acantilados interiores (Novoa, 2007).

Características socioeconómicas

La bahía de Paita comprende tres distritos litorales: Paita, Colán y Vichayal, y cuenta con una población urbana total de 87 863 habitantes y una población rural de 2006 habitantes (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2007). La población comprendida en los distritos es predominantemente urbana, sobre todo en los distritos de Paita y Colán, ya que en el distrito de Vichayal —debido a que el río Chira se encuentra dentro de su jurisdicción— congrega población dedicada a actividades agrícolas. El mayor número de habitantes se encuentra en el distrito de Paita, porque debido su desarrollo en la actividad portuaria lo convierte en el foco de atracción de las personas. En cuanto a las actividades económicas, se puede señalar que la provincia de Paita cuenta con actividades portuarias en su terminal marítimo de Paita, donde existen plantas de transformación de pescado e infraestructura de apoyo a la industria (CETICOS Paita). Además cuenta con tierras bajo riego para el cultivo de maíz, algodón, frutales y leguminosas (Novoa, 2007).

A manera de síntesis se señala que en el área de estudio identificamos las distintas maneras de ocupación del espacio litoral. Empezando desde el norte, vemos como la desembocadura del río Chira permite, por extensión y capacidad, desarrollar cultivos muy cerca del mar; siguiendo por una forma de ocupación urbana menor, el balneario de Colán, donde predominan las casas de madera ubicadas en la misma playa. Más al sur se instalan pequeñas caletas, conocidas como las Salineras de Colán. Es importante señalar eso, ya que es diferente a lo que se encuentra en el puerto de Paita, pues si bien existen embarcaciones pesqueras, predomina aquí la ocupación urbana y recreativa pero sobre todo, la infraestructura portuaria. Si bien el puerto de Paita opera desde los primeros días del periodo colonial, la construcción de esta infraestructura portuaria se dio entre los años 1970 y 1972 en la bahía de Paita (Novoa, 2007).

METODOLOGÍA

Para realizar la siguiente investigación, la metodología aplicada constó de tres etapas:

a) Levantamiento de información de campo

Su objetivo fue caracterizar la línea de costa actual, así como desarrollar una zonificación geomorfológica. Constó de dos procedimientos:

– Medición de perfiles de playa

Los perfiles de playa se pueden definir como cortes transversales, y estos se realizan en la cara de playa (zona situada entre bajamar y pleamar). Los objetivos por los que se realizan los perfiles de playa son: conocer la variación horizontal del nivel de marea y obtener rasgos morfológicos de la playa. El método elegido para realizar los perfiles de playa fue el Método de Emery (Emery, 1961).

– Registro fotográfico

Se desarrolla para complementar la información obtenida en los perfiles de playa. En primer lugar se registra el entorno donde se tomaron los perfiles de playa, identificando elementos claves para futuras mediciones. Además se registran unidades geomorfológicas como dunas, cordones litorales, cúspides, etcétera; para desarrollar una adecuada zonificación geomorfológica.

b) Análisis espacial-temporal

Se buscó realizar un análisis espacial-temporal de la línea de costa durante los últimos sesenta años. Además se evaluó las tendencias en la variación de la línea de costa para predecir futuros cambios en las líneas de costa. También se generó una base de datos

cartográficos que pueden ser utilizados en futuras investigaciones. Las fuentes cartográficas utilizadas fueron:

Cuadro 1. Serie cartográfica

Título	Autor	Escala	Fotografía	Edición	Datum	Cuadrante
Pueblo Nuevo	IGN	1/25000	1960	1974	PSAD56	10A-II-SE
Paita	IGN	1/25000	1960	1974	PSAD56	11A-I-NO
Tierra Colorada	IGN	1/25000	1960	1974	PSAD56	11A-I-NE

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 2. Serie de fotografías aéreas

Nombre del proyecto	Autor	Escala aproximada	Altura del vuelo	Fecha	Escenas
1662-3	SAN	1/20000	-	1946	7
432-92-A	SAN	1/20000	-	1992	5
491-99-A-5	SAN	1/20000	-	1999	6

Fuente: Elaboración propia. Imagen satelital: Google Earth. Digital Globe. Fecha: 2003-2007

Las fotografías aéreas y la imagen satelital fueron trabajadas en el programa ArcMap 9.2. Una vez georreferenciadas todas las fotografías aéreas, el siguiente paso fue ortoregistrarlas. Este es un proceso que sirve para corregir la distorsión propia de la imagen, permitiendo realizar las medidas necesarias con mayor precisión. Para ortoregistrar las fotografías aéreas se utilizó el mismo *software*, ArcMap 9.2, ingresando las imágenes georreferenciadas y un DEM (Modelo de Elevación Digital del Terreno) que fue descargada gratuitamente de la página web de Aster. Este DEM tiene una resolución de 30 m², siendo lo más preciso que se encuentra disponible actualmente.

Como siguiente paso para el estudio se procedió a digitalizar las líneas de costa. Un punto esencial a tratar antes de explicar la metodología propiamente dicha es tener en claro qué es lo que se va a digitalizar. La elección de un criterio único para la identificación de la línea de costa desde las fuentes aéreas y satelitales se convierte en un requisito para una adecuada representación temporal de la línea de costa (Leceta, 2009). El nivel medio de marea, representado por el punto de contacto entre el mar y el continente, fue elegido como el indicador principal de la línea de costa en el presente estudio, teniendo en cuenta los registros topográficos del Instituto Geográfico Nacional, el Programa Especial de Titulación de Tierras, la Dirección de Hidrografía de la Marina del Perú y la metodología empleada por Leceta (2009).

El siguiente paso fue utilizar el Digital Analysis Shoreline System (DSAS), herramienta que requiere para el análisis tres elementos: línea de costa, línea de base y transectos (Thieler, Himmelstoss, Zichichi y Miller, 2005):

Línea de costa. Esta cobertura agrupa los vectores que representan la línea de costa para cada uno de los periodos con recubrimiento cartográfico, aerofotográfico o satelital (Leceta, 2009).

Línea de base. Vector que sirve como punto de inicio para los transectos que serán proyectados en forma perpendicularmente a esta. En el presente estudio se realizó un *buffer* de la línea de costa más antigua para realizar las mediciones.

Transectos. Son proyecciones perpendiculares a la línea de base, distribuidas a lo largo de la misma a intervalos constantes que son definidos por el usuario. En el presente estudio se trabajó con transectos de 750 m de longitud y con una separación de 200 m entre cada transecto. El primer criterio debido a que se debía incluir a todas las líneas de costa y la línea base dentro del análisis de cada transecto y el segundo criterio para diferenciar adecuadamente entre cada tipo de playa.

Una vez realizados los perfiles de playa, se procedió a calcular el margen de error estimado. Este cálculo es necesario para determinar el margen de error que debemos considerar al momento de analizar las variaciones de las líneas de costa en nuestro material cartográfico. En primer lugar se tomó en cuenta para el cálculo de la pendiente de la playa los datos obtenidos en la playa anterior. Esto significa que de todo el perfil se han tomado en cuenta los datos de variación horizontal y variación vertical de la zona que está directamente influenciada por la acción de las olas, es decir, la zona de arenas húmedas.

Los resultados obtenidos se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 3. Margen de error estimado para la bahía de Paita

Perfil	Pendiente (°)	Amplitud máxima de marea (m)	Variación horizontal de la marea (m)	Margen de error estimado (m)
Paita 1 (Sur)	1.7464°	2,20	72,1311	36,06
Paita 2 (Centro)	4.4608°	2,20	28,2051	14,10
Paita 3 (Norte)	4.3967°	2,20	28,6086	14,30
Colán 1 (Norte)	2.6748°	2,20	47,1092	23,55
Colán 2 (Sur)	3.2485°	2,20	38,7324	19,37

Fuente: Elaboración propia. Amplitud Máxima de la Marea (HIDRONAV. Fecha: 27/09/2006)

Una vez obtenido el margen de error podemos entrar a aplicar el análisis. La herramienta DSAS fue desarrollada por el United States Geology Service y dentro de esta se encuentran distintas aplicaciones para analizar los cambios en las líneas de costa. Esta herramienta ya fue utilizada en diversos estudios, como en Leceta (2009) que utilizó todas las aplicaciones; Grández (2010); Tavares y Drenkham (2010) también utilizaron esta herramienta para sus estudios de caso. En esta investigación fueron utilizadas las siguientes herramientas (Thieler, Himmelstoss, Zichichi y Miller, 2005):

- *Shoreline Change Envelope (SCE)*: Representa el cambio total de los movimientos en la línea de costa pues no presta atención al año de cada línea de costa.
- *Net Shoreline Movement (NSM)*: Muestra la distancia en que varió la línea de costa más antigua con la más nueva, representando su distancia total.
- *End Point Rate (EPR)*: Es calculado dividiendo la distancia entre la línea de costa más reciente y la más antigua entre el tiempo transcurrido entre los años estudiados.

c) Elaboración del mapa geomorfológico

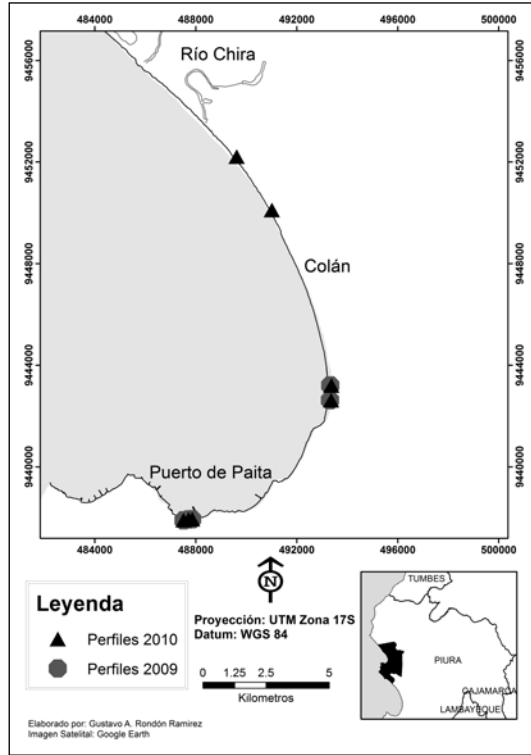
Como resultado de una síntesis de todos los datos obtenidos en los procesos anteriores se realizó un mapa geomorfológico de la zona de estudio. Para la determinar la zonificación se utilizaron las siguientes variables: pendiente de la playa; características geomorfológicas; ocupación-uso del suelo y balance erosión/sedimentación. Estas variables se integraron y generaron unidades geomorfológicas que son representadas en la zona de estudio.

RESULTADOS

Perfiles de playas: puerto de Paita y Colán

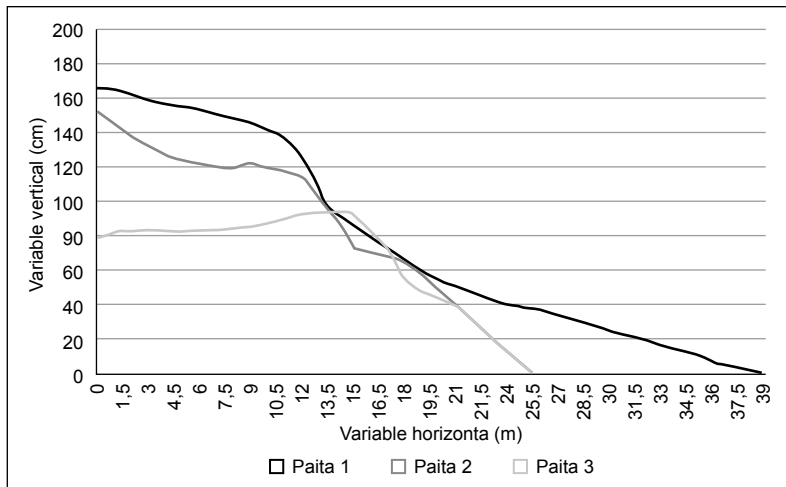
Los perfiles tomados en el puerto de Paita (figura 2) poseen características importantes que deben ser mencionadas. En primer lugar, la zona donde se realizaron los perfiles de playa es la única con acceso directo al público en general dentro del puerto. Las otras zonas son inaccesibles debido a que la infraestructura instalada impide el libre tránsito y también debido a que las diferentes empresas que operan en el puerto cortan con paredes o tranqueras la continuidad del camino. En segundo lugar, se debe destacar la influencia antrópica en esta playa. Además de la infraestructura propia de un puerto, también están instalados en la playa juegos recreativos y embarcaciones encalladas. Debido a la cercanía con un pequeño muelle, esta zona además se presenta como un área de tránsito. Al realizar los perfiles de playa (figura 3) se percibió una calma en las olas que se debe a su ubicación dentro de la bahía. No obstante, al reconstruir los perfiles de playa estos permiten señalar que estamos ante una playa con perfil erosivo, con la presencia de una pendiente que se incrementa conforme uno se acerca al mar.

Figura 2. Mapa de ubicación de perfiles de playa



Fuente: Elaboración propia.

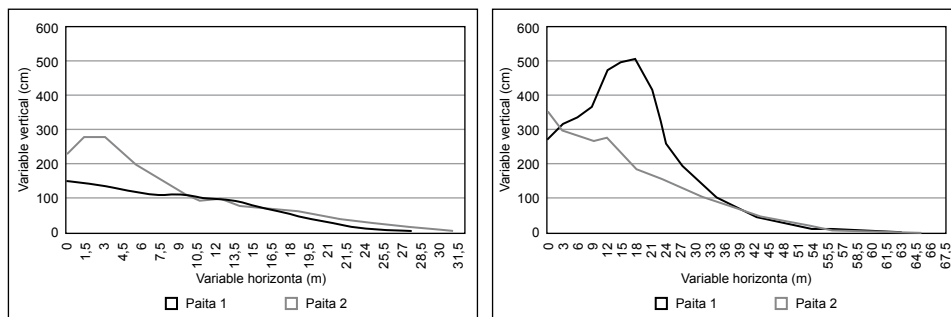
Figura 3. Perfiles de playa, puerto de Paita



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los perfiles en Colán (figura 4), «Colán 1» muestra la presencia de un cordón litoral, el que se encuentra a lo largo de todo el sector de la playa y está fijado por vegetación natural. La fuerte pendiente erosiva que se observa inmediatamente después del cordón litoral, así como la suave pendiente posterior a esta, nos indica que la acción de las olas no es tan fuerte en este sector de la playa. En el perfil «Colán 2» también es claramente erosivo, pero no encontramos la presencia de cordones litorales. Esto se puede deber a la mayor cercanía de este perfil con la ocupación humana, lo que le puede haber cortado continuidad a los cordones.

Figuras 4 y 5. Perfil de playa balneario Colán 2009 y 2010



Fuente: Elaboración propia.

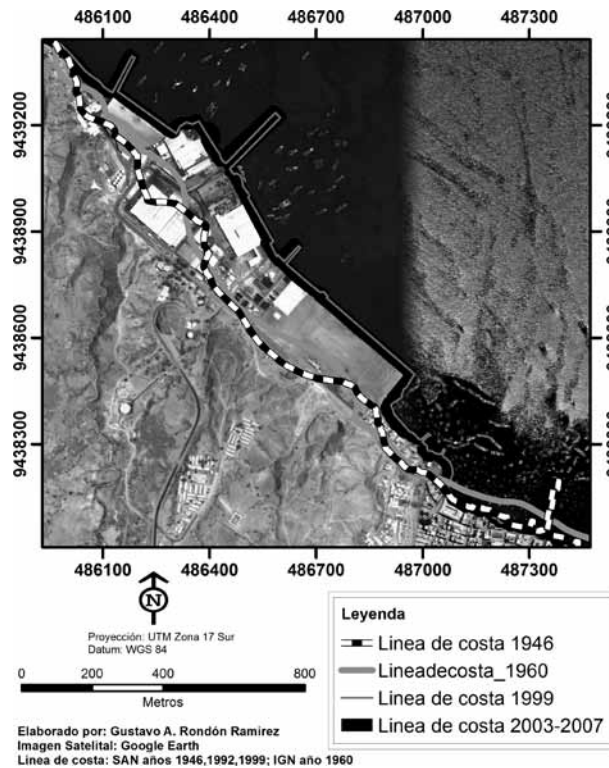
En los perfiles «Colán 3» y «Colán 4» (figura 5), la presencia de los cordones litorales está más definida. En el primero de estos el cordón supera los 2 m de altura y presenta una gran pendiente inmediatamente después del cordón litoral. El segundo de ellos fue tomado desde la cúspide de un conjunto de pequeñas dunas fijadas por vegetación (verdologa), pues representaba el tipo de playa que se encontraba en la zona. Esta formación de pequeñas dunas sufría la acción de las olas. En las zonas posteriores a la playa se podía apreciar la acción del viento, el cual formaba campos de dunas.

Análisis cartográfico

Esta zona corresponde a la parte más occidental del puerto de Paita (figura 6). De la misma manera que en Punta Colorada, existe una fuerte variación en la línea de costa, que se puede considerar como un proceso de sedimentación; pero como vemos en el mapa, este se debe a la instalación de infraestructura portuaria. Entre los años 1946 y 1960 si bien existe una variación en las líneas de costa, se puede señalar que está en un rango esperado, que podría ser considerado dentro del margen de error. Sin embargo, a partir de la década de 1980 y 1990 la instalación de estructuras portuarias hizo que la

línea de costa retrocediera varios cientos de metros, situación que se estabilizó durante los últimos dos años de estudio (1999 y 2007).

Figura 6. Variación línea de costa en el puerto de Paita

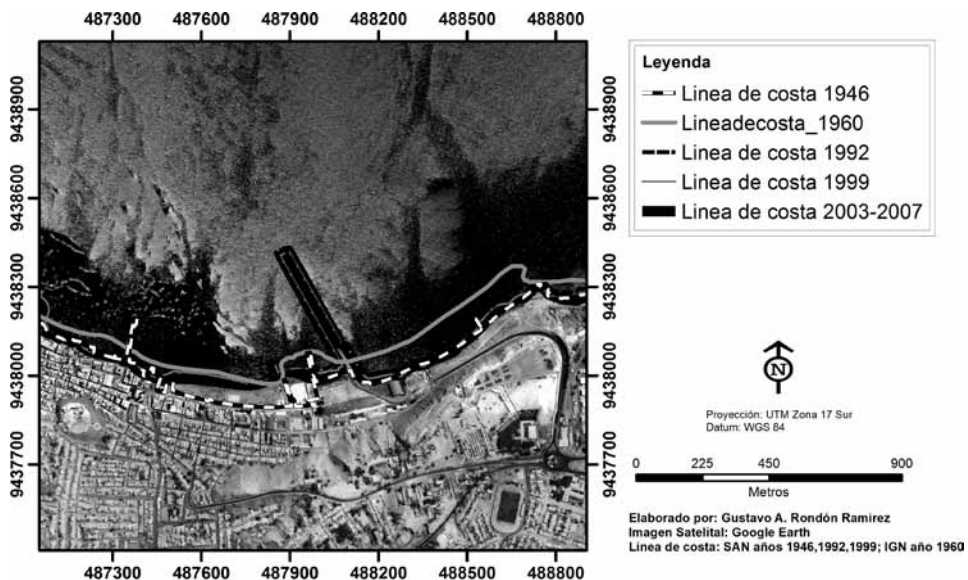


Fuente: Elaboración propia.

La zona analizada en este mapa (figura 7) corresponde al puerto de Paita, en su parte central. Lo primero que se tiene que señalar es que esta zona es donde empezó la actividad marítima de la bahía; pues como se puede ver en el mapa, ya en el año 1946 había estructuras portuarias como los muelles. En la línea de costa del año 1960 se observa que no se muestran las estructuras portuarias pero sí apreciamos un fenómeno similar a lo visto en Punta Colorada, sedimentación producto de las estructuras.

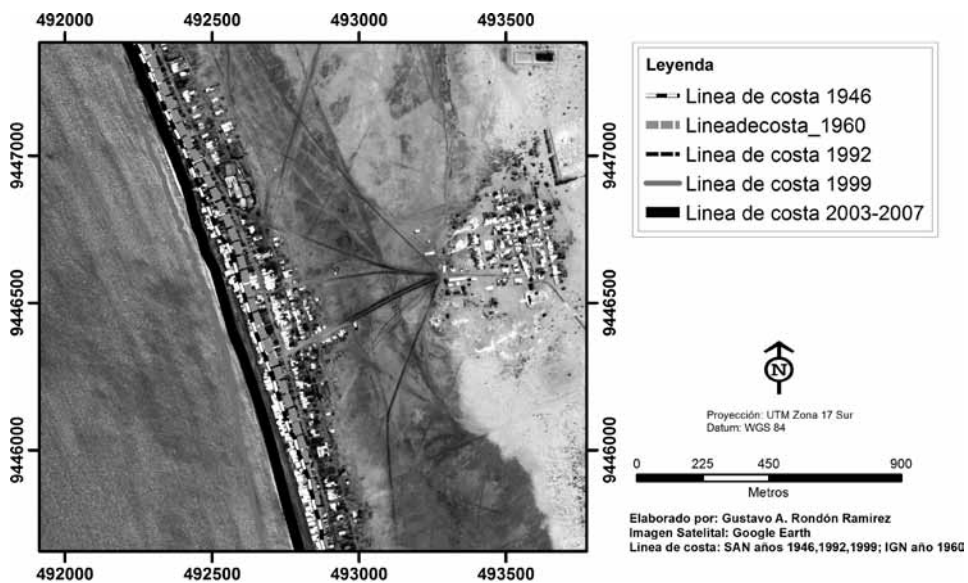
Este fenómeno se consolida en los años posteriores; sin embargo, entre las líneas de costa de los años 1992 y 1999 vemos que el fenómeno de sedimentación es aún mayor, coincidiendo con el evento El Niño 1997-1998.

Figura 7. Variación línea de costa en el puerto de Paita



Fuente: Elaboración propia.

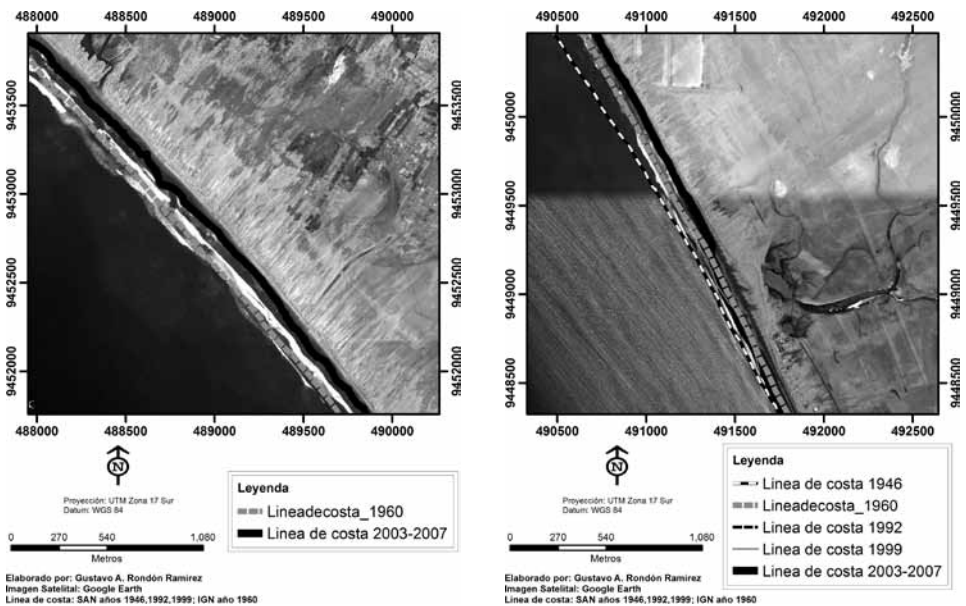
Figura 8. Variación línea de costa en el balneario de Colán



Fuente: Elaboración propia.

El mapa corresponde al balneario de Colán (figura 8). Lo primero que se señala es que el impacto del evento El Niño se distingue claramente. La línea de costa del año 1999 nos muestra que luego del evento de 1997-1998 el mar retrocedió considerablemente y se reversionó gradualmente a lo largo de los años. Esto puede estar relacionado con la mayor presencia de sedimentos producto del aumento de las lluvias en el norte. Si vemos las líneas de costa de los años 1946 y 1960 nos damos cuenta que estábamos ante un proceso erosivo que fue disminuyendo con el paso de los años. No se puede dejar de mencionar que a partir de la línea de costa de 1999 el proceso que predomina es el erosivo.

Figuras 9 y 10. Variación línea de costa en el sur del río Chira



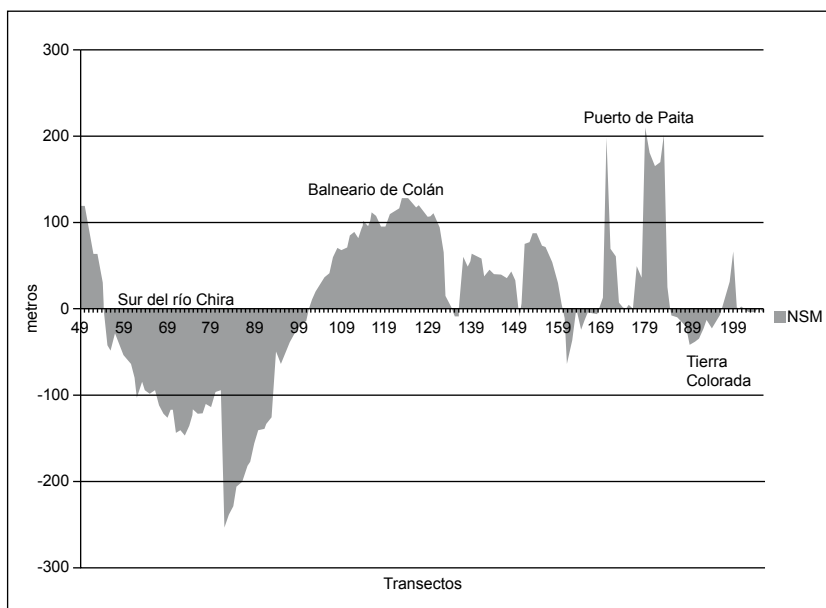
Fuente: Elaboración propia.

Estos mapas nos muestran las zonas al sur de la desembocadura del río Chira (figuras 9 y 10). En estas zonas se ve que se da un fenómeno inverso a lo visto en otras: el proceso erosivo predomina sobre el sedimentario. En el mapa de la izquierda, desde el año 1946 ha habido procesos erosivos graduales, que alcanzan varios cientos de metros. El mismo fenómeno se da en el mapa de la derecha, donde entre el año 1960 y la línea de costa actual también se ha dado un proceso de fuerte erosión. Estos procesos también podrían ser relacionados con los eventos El Niño y a las corrientes que se dan en la bahía de Paita, pues si bien el evento El Niño puede generar una mayor cantidad de sedimentos, estos no necesariamente son transportados cerca de la desembocadura del río Chira.

Análisis espacial-temporal

El primer parámetro trabajado fue el movimiento neto de la línea de costa, el cual muestra la distancia en que varió la línea de costa más antigua con la más nueva, representando su distancia total. Esto quiere decir que a diferencia del primer parámetro, en este caso tenemos una cuantificación más histórica de la línea de costa.

Figura 11. Movimiento neto de la línea de costa (NSM), bahía de Paita



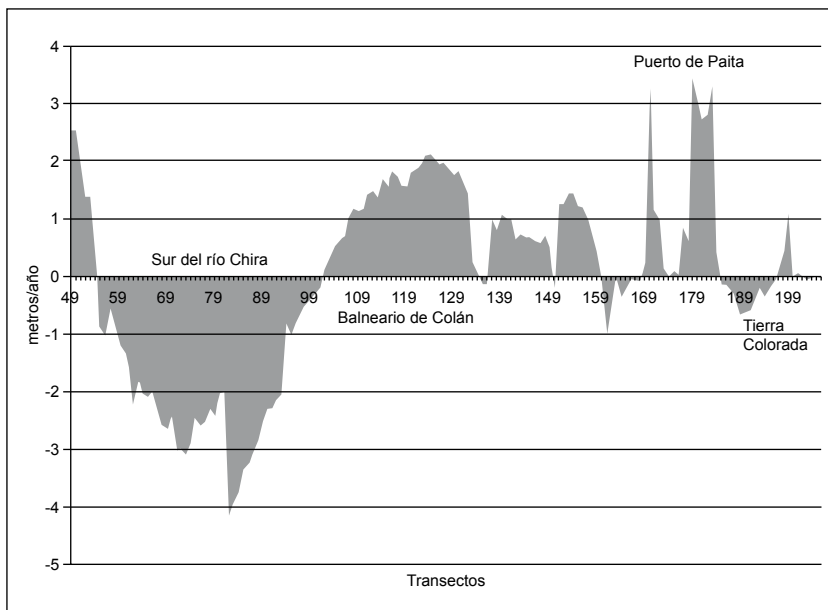
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 11 se ha etiquetado las zonas a las cuales se le está haciendo referencia en el análisis, para así poder entender mejor los resultados mostrados. Como se puede ver, se distinguen de manera clara los dos procesos: erosión al sur del río Chira y sedimentación en la mayor parte del resto del área de estudio. La erosión alcanza valores en promedio de 100 m, sin embargo, también hay zonas donde esta alcanza valores superiores a los 200 m. Por otro lado, la sedimentación se da principalmente en las zonas de las playas de Colán y en el puerto de Paita. En el primer caso, la sedimentación se da producto de eventos naturales, pues no hay estructuras costeras, mientras que en el puerto de Paita sí existen y estas se aprecian claramente en la figura. Finalmente, en Tierra Colorada se ve que hay un proceso erosivo; sin embargo este está dentro del margen de error estimado, a diferencia de la sedimentación que sí supera a este margen de error. En la zona del sur del río Chira el promedio del movimiento neto de la línea

de costa es de -94,22 m, siendo el valor de erosión promedio más alto según las zonas delimitadas. Por su parte, en la zona del balneario de Colán se encuentra el valor promedio más alto de sedimentación: 68,73 m. En la zona de los acantilados (41,55 m) y en Tierra Colorada (-6,97 m), en mayor medida, los valores de sedimentación están cercanos al margen error esperado (+/- 36 m), por lo que no se puede hablar de un gran dinamismo en la línea de costa. En el puerto de Paita el valor promedio obtenido, 48,98 m, nos habla de una sedimentación significativa. A nivel general y obteniendo un promedio de todos los valores señalados en los transectos, en la bahía de Paita se obtiene un movimiento neto de la línea de costa (NSM) de 3,11 m.

Finalmente, se analizó el parámetro de la tasa de cambio final (EPR) que fue calculado dividiendo la distancia entre la línea de costa más nueva y la más antigua entre el tiempo transcurrido entre los años estudiados. Como se puede observar, la figura 12 guarda relación con la mostrada anteriormente lo que garantiza su lógica, pues a mayor diferencia entre las líneas de costa, mayor será el índice obtenido. Al igual que en el parámetro anterior, el sur del río Chira es donde encontramos los índices más altos de erosión, que en sus valores más altos alcanza casi los -4 m/año. Sin embargo, en promedio en esta zona el promedio del proceso de erosión es de -1,77 m/año. Por su parte, en las playas de Colán vemos que la sedimentación alcanza valores un poco más bajos, con un máximo de 2 m/año. En esta zona, el promedio es de 1,13 m/año.

Figura 12. Tasa de cambio final (EPR), bahía de Paita

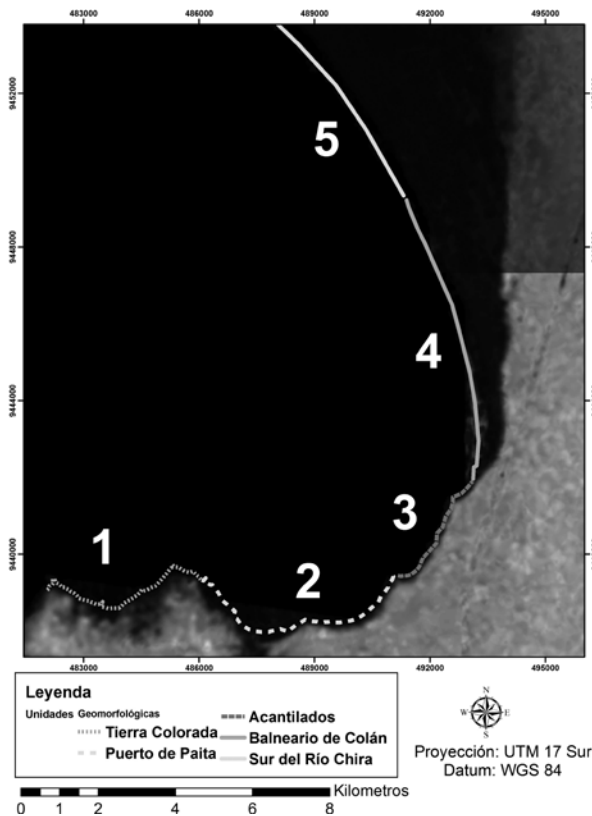


Fuente: Elaboración propia.

En la zona del puerto de Paita, la sedimentación sí alcanza valores más altos dada la instalación de infraestructura portuaria, superando en algunos casos los 3 m/año pero con un promedio 0,8 m/año. En Tierra Colorada es donde se reportan los índices más bajos, con un promedio 0,10 m/año. No obstante, también en esta zona encontramos que hay una ligera erosión que alcanza un índice promedio de -0,2 m/año. Finalmente, al realizar un promedio de todos los transectos obtenemos que en la bahía de Paita la tasa de cambio final (EPR) posee un valor de -0,02 m/año, es decir, presenta a nivel global una muy ligera erosión. Una vez analizados estos datos obtenidos a través del *script* DSAS y agregando los resultados obtenidos en los perfiles de playa, las observaciones de campo y los usos vistos del suelo, se ha elaborado un mapa geomorfológico (véase figura 13).

Mapa geomorfológico

Figura 13. Unidades geomorfológicas



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4. Unidades geomorfológicas

Unidad	Descripción
N° 1: Tierra Colorada	Área de infraestructura portuaria. Geomorfológicamente presenta acumulaciones de sedimentos (playas) entre las estructuras costeras y grupos de peñas y elevaciones rocosas. La pendiente de playa es leve en las playas y fuerte en las zonas rocosas. La línea de costa presenta una erosión de 7 m en los años de estudio. Sin embargo, en 60 años la tasa es de sedimentación (0,10 m/año).
N° 2: Puerto de Paita	Conjunto de playas e infraestructura portuaria. La playa presenta una pendiente promedio de 3° en el mismo puerto, siendo el perfil reflectivo. El comportamiento de la línea de costa es marcadamente sedimentario (0,8 m/año). La tendencia de la línea de costa observada es de una fuerte sedimentación luego de evento El Niño. La arena es más gruesa que en la zona del balneario de Colán. Tanto las acumulaciones de sedimentos como la infraestructura portuaria y el asentamiento de la población se dan sobre la plataforma costanera.
N° 3: Acantilados	Acantilados que forman parte de la plataforma costanera, con una pendiente de 45°. Casi no existen acumulaciones de sedimentos en su lecho, contacto directo del mar y el acantilado. Sin embargo, la línea de costa presenta una ligera sedimentación (0,68 m/año).
N° 4: Balneario de Colán	Presenta una pendiente de playa promedio de 2,5°, distinguiéndose dos sectores según su perfil: uno disipativo, cerca del balneario de La Esmeralda y otro erosivo, en los sectores norte y sur del mismo balneario. Geomorfológicamente encontramos cordones litorales en la zona cercana a los acantilados y también en la zona cercana al río Chira. Estos están fijados por vegetación, principalmente verdolaga. En la zona cercana al río Chira la acción eólica es intensa, desarrollándose campos de dunas inmediatamente después de los cordones litorales. La tendencia de la línea de costa es sedimentaria pues presenta un índice de 1,13 m/año.
N° 5: Sur del río Chira	Estuario ribereño formado por depósitos fluviales del río Chira. Se observa un conjunto de cordones litorales y tierras de cultivos. La tendencia de la línea de costa es claramente erosiva (-1,77 m/año). Esto debido a la dinámica generada durante los eventos El Niño que trae una gran cantidad de sedimentos y la acción de las olas, las cuales transportan el sedimento hacia el sur. Los sedimentos en esta zona son mixtos: granos finos y gruesos.

Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Si se examinamos los datos fríamente, podríamos señalar que es cierto que en la bahía de Paita la tendencia global es erosiva (-0,02 m/año). Sin embargo, el movimiento neto de la línea de costa presenta un balance positivo (3,11 m), lo que permite señalar que en primer lugar no podríamos hablar de una tendencia erosiva pues, como hemos visto en los resultados obtenidos, a una escala mayor cada sector o zona dentro de la bahía de Paita tiene características específicas. Estudios como los de Leceta (2009), Grández (2010) y Tavares y Drenkham (2010) confirman que a nivel local el aumento del nivel del mar no tiene el impacto que sí tiene en otras partes del planeta, como Estados Unidos y Brasil. Mencionando esto se discuten a continuación los factores que influyen de manera más fuerte en la tendencia de la línea de costa en la bahía de Paita.

La instalación de esta infraestructura portuaria ha producido en la zona del puerto de Paita y Tierra Colorada una sedimentación. Este proceso de sedimentación dista de los obtenidos en estudios como el de Leceta (2009) en la bahía de Miraflores y León y Tavares (2003) en Salaverry, donde al instalarse infraestructura en la playa el fenómeno que se desarrolló fue el de una fuerte erosión. Sin embargo, se puede señalar que si bien la intervención antrópica está presente, la infraestructura instalada no es similar, ya que en los estudios antes mencionados se instalaron estructuras de protección (molones, rompeolas, barreras de piedra) que produjeron con el paso del tiempo una mayor erosión. En el caso del puerto de Paita, la presencia de estructuras responde principalmente a muelles y plataformas, lo que genera un menor impacto en la dinámica de las olas. Además, al ser una bahía está muy protegida de la acción de olas de gran energía, por lo que el flujo de sedimentos puede ser atrapado entre los múltiples muelles que se encuentran a lo largo de la zona portuaria.

En cuanto al impacto del evento El Niño en la tendencia de la línea de costa, se ha observado que si bien en un principio debido a sus consecuencias inmediatas puede ser visto como un agente erosivo, con el tiempo genera una importante sedimentación. Con esto se descarta la hipótesis de que el evento El Niño genera o refuerza una tendencia erosiva, muy por el contrario, lleva a observar en el área de estudio una fuerte tendencia de sedimentación. Woodman y Mabres (1993), en el estudio sobre la formación de cordones litorales en Máncora, señalan que durante las extraordinarias lluvias de los años 1983 y 1997 los ríos y quebradas de Piura trajeron una gran cantidad de piedras y sedimentos, los que fueron depositados en grandes abanicos en las cercanías de las desembocaduras. Esta acumulación de sedimentos respalda los resultados obtenidos donde la línea de costa del año 1999, inmediata al Evento El Niño 1997-1998, muestra una sedimentación extraordinaria, principalmente en la zona sur de la desembocadura del río Chira. Sin embargo, como los mismos autores señalan, durante el evento de 1983 el primer impacto en el balneario de Colán fue una fuerte erosión, producto del mayor

nivel promedio del mar y el mayor oleaje, que trajeron la destrucción de los pilotes de las casas. Esto si bien podría parecer una contradicción con los resultados obtenidos no lo es, porque todo este sedimento traído por el río Chira y aquellos removidos de las playas no desaparecen, sino que simplemente migran.

En el caso de Colán, las arenas removidas por la erosión deben haberse acumulado en una barra inmediatamente detrás de la nueva línea de rompiente (Woodman y Mabres, 1993). En el mismo estudio, en el caso de una caleta de pescadores en Máncora, experimentaron el calado de sus botes, lo que muestra que luego del maremoto vino un progresivo periodo de sedimentación. Otro dato importante de rescatar es que en la zona del balneario de Colán si tomamos la línea de costa del año 1946 y la comparamos con la actual la sedimentación es significativa.

Esto, como hemos visto, se debería a los diferentes eventos El Niño pero además al relativo levantamiento de la costa, en una escala de miles de años (Woodman y Mabres, 1993). Estos dos elementos respaldarían los resultados obtenidos y llevarían a pensar que en las futuras líneas de costa seguiría el proceso de sedimentación.

Por su parte, tanto Woodman como Mabres en su estudio no trabajan en la misma desembocadura del río Chira, donde la línea de costa dista claramente del fenómeno apreciado más al sur de la misma: la erosión predomina sobre la sedimentación. Si bien no se ha encontrado bibliografía específica sobre esa zona, su desarrollo antes, durante y después de los eventos El Niño, existen dos opciones que podrían manejarse.

En primer lugar, como lo manifiestan diversos autores de estudios similares, la comparación en esta zona se da entre una imagen satelital con una carta nacional, lo que podría ser una fuente de error debido a la comparación de escalas y nivel de precisión. Esto podría ser considerado como un factor de distorsión, sin embargo, al tener un margen de error de casi 37 m y la erosión en el área de estudio supera ampliamente este margen, lleva a consultar otros autores que han desarrollado temas similares en otras zonas.

Es ahí donde es rescatable mencionar el estudio de Teves (1993), el cual desarrolla un estudio sobre los procesos de erosión y sedimentación después del evento El Niño 1982-1983. Lo interesante de este estudio es que dentro de las zonas o áreas que trabaja se encuentra la desembocadura del río Piura, ubicado más al sur de la bahía de Paita. El proceso que se dio en el río Piura durante y después del evento El Niño 1982-1983 fue el de una fuerte erosión, principalmente en los márgenes y en la desembocadura. Según el autor, la socavación del cauce del río Piura se midió mensualmente y este alcanzó 5 m de profundidad y 90 m de ancho. Además, Teves (1993) señala que fenómenos similares se dan al norte del río Chira y en el río Santa. Esta información permite señalar que el proceso erosivo obtenido al sur del río Chira podría estar relacionado con estos fenómenos.

Finalmente, el tema de la sedimentación al sur de la desembocadura del río Chira puede verse apoyada por diversos estudios sobre la formación de cordones litorales en Colán. Estos cordones litorales que son formados por eventos El Niño extremos, de gran intensidad, están constituidos principalmente por cantos rodados, lo que lleva a pensar que el río es la fuente de estos sedimentos y confirma una mayor afluencia de sedimentos a las playas (Ortlieb, Fournier y Macharé, 1993).

CONCLUSIONES

La cuantificación de la variación de la línea de costa tiene en los sistemas de información geográfica una gran herramienta de análisis. El *script* DSAS permite cuantificar una variación espacial-temporal de manera adecuada. No obstante, el trabajar con fuentes de primera mano, como las fotografías aéreas, asegura una mayor precisión y confianza con relación a las fuentes cartográficas.

Con respecto a la actual línea de costa de la bahía de Paita se distinguen claramente sectores de gran dinamismo y otros más estables. El mayor dinamismo de la línea de costa se encuentra principalmente al sur del río Chira, donde se distinguen procesos de erosión y sedimentación. Al carecer estas zonas de infraestructura antrópica —como muelles, rompe olas, espigones, etcétera— los cambios en la línea de costa se deben a factores naturales. Dentro de esto, destaca la variación comprendida entre los periodos 1992-1999, cuando se desarrolló una gran sedimentación en la zona del balneario de Colán. A diferencia de otros asentamientos al borde del mar, las casas ubicadas en Colán en su mayoría no presentan protecciones de piedra sino que están asentadas sobre pilotes de madera, lo que permite a las olas realizar su recorrido normal sobre la playa anterior, evitando así generar procesos erosivos. Más al norte de Colán, en el sector conocido como Bocana del Río, el proceso que predomina es el erosivo, cuantificado entre los años 1960-2007. El agente que afecta directamente a esta zona es el río Chira, el cual presenta un caudal tan importante que merece ser estudiado de manera especial.

El otro sector en la bahía de Paita que presenta un dinamismo importante es el puerto de Paita. Sin embargo, a diferencia del sector anterior, en el puerto de Paita la dinámica de la línea de costa responde claramente a una influencia antrópica. La construcción de infraestructura portuaria a partir de los años setenta ocasionó un avance de la línea de costa. Este avance o sedimentación de la línea de costa se vio acrecentado en el periodo 1992-1999, una vez más debido al evento El Niño 1997-1998. Esta infraestructura portuaria genera un efecto diferente al de las estructuras costeras de protección, pues no genera erosión, sino que permite que los sedimentos se asienten sobre la playa, quedándose atrapados ahí. También es importante mencionar que al ser una bahía, las olas llegan con una intensidad menor a la que podemos encontrar en playas abiertas.

A nivel global el aumento de nivel del mar no puede ser visto en esta área de estudio, pues en promedio la tasa de cambio final, es decir, la variación en metros entre el número de años transcurridos presenta un índice de $-0,02$ m/año, lo que es poco significativo para señalar que estamos ante un proceso de elevación de nivel del mar. Para reafirmar esto, si tomamos en cuenta el promedio del movimiento neto de la línea de costa, este es un valor positivo: $3,11$ m, lo que refuerza aun más que no estamos en un proceso de elevación del nivel del mar en el área de estudio.

Por su parte, el evento El Niño sí tiene un impacto directo en la línea de costa. En un primer momento puede ocasionar oleajes fuertes y maretazos, para luego generar un retroceso del mar y producir un proceso de sedimentación. Este proceso de sedimentación extraordinario en la línea de costa no es estable, pues luego la erosión predomina como proceso.

Finalmente, con la elaboración del mapa geomorfológico del área de estudio se ha podido identificar que las playas donde se encuentra asentada la población, especialmente en el puerto de Paita y el balneario de Colán, presentan una vulnerabilidad moderada, pues en primer lugar la pendiente promedio de la zona de estudio es baja, por lo que un aumento de la marea o de la línea de costa tendría mayor impacto. Esto sucede principalmente en Colán, pues las casas ubicadas actualmente corresponden a una segunda línea, ya que las primeras fueron destruidas por los eventos El Niño de los años 1982-1983 y 1997-1998. En el puerto de Paita la situación es parecida, pues encontramos instalaciones como restaurantes que se encuentran en contacto directo con el mar; sin embargo en la playa no hay casas sino una infraestructura de juegos para niños, del tipo recreativo, por lo que un aumento del nivel del mar no tendría un impacto directo en la población. En resumen, la dinámica de la línea de costa, la poca pendiente de la playa y la presencia de asentamientos cerca de la línea de costa hace a estas poblaciones vulnerables ante la variación o cambios en la línea de costa.

BIBLIOGRAFÍA

- Bird, E. C. F. (1985). *Coastline Changes*. Nueva York: Wiley & Sons.
- Correa, D., E. Gonzáles, V. Alvarado (2007). *Modelamiento del flujo de mareas en la bahía de Paita*. Lima: Instituto del Mar del Perú-Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Dirección de Hidrografía y Navegación. (2006). *Datum de la línea de más alta marea*. Lima: HIDRONAV.
- Emery, K. O. (1961). A Simple Method of Measuring Beach Profiles. *Limnology and Oceanography*, 6(1), 90-93.
- Grández, M. I. (2010). *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 (inérita).

- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2007). *Censos Nacionales 2007: XI de población y VI de Vivienda*. Lima: INEI.
- Leceta, F. (2009). *Análisis de variabilidad temporal de la línea de costa mediante la aplicación de métodos de teledetección y Sistemas de Información Geográfica: bahía de Miraflores, Perú 1936-2005*. Tesis de Licenciatura. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- León, J. y C. Tavares (2003). *Quantification of shoreline in Salaverry, Peru*. En International Coastal Symposium, Ed. J. O. C. Reserch, Itají, SC - Brazil.
- Novoa Goicochea, Zaniel (2007). *Geografía de las zonas marino-costeras. El litoral pacífico peruano*. Lima: Sociedad Geográfica de Lima.
- Ortlieb, L., M. Fournier y J. Macharé (1993). *Beach-ridge series in Northern Perú: Chronolog, Correlation and Relationship with major late holocene El Niño events*. *Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos*, 22(1): 191-212.
- Palacios Moncayo, O. (1994). *Geología de los cuadrángulos de Paita, Piura, Talara, Sullana, Lobitos, Quebrada Seca, Zorritos, Tumbes y Zarumilla*. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Tavares, Carlos y Fabian Drenkham (2010). Variación de la línea de litoral entre el Puerto Chicama y Puémape, La Libertad, Perú (1961-2006). Informe del Proyecto DAI-4029, PUCP. Lima, Perú.
- Teves, Néstor. (1993). Erosion and accretion processes during El Niño Phenomenon of 1982-1983 and its relation to previous events. *Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos*, 22(1): 99-110.
- Thieler, E. R., E. A. Himmelstoss, J. L. Zichichi y T. L. Miller (2005). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1304.
- Woodman, R. y A. Mabres (1993). Formación de un cordón litoral en Máncora, Perú, a raíz de El Niño de 1983. *Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos*, 22(1): 213-226.