Evolución reciente de la barrera El Mogote como indicador ambiental, Baja California Sur, México

Saúl Chávez-López *

Programa de Planeación y Conservación Ambiental, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., Mar Bermejo No. 195, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, B. C. S. México., C. P. 23090

Artículo recibido el 5 de abril de 2022 y aceptado el 1 de junio de 2022

Recent evolution of El Mogote barrier as an environmental indicator, Baja California Sur, Mexico.

Abstract

El Mogote sand barrier stands out as part of the geomorphology of La Paz Bay and gives origin to La Paz Lagoon, in which the city and its conurbation of the same name are located in its southern portion, the same which in the last three decades there has been an accelerated population increase and increase in the urban area. This situation justifies analyzing its recent evolution as an environmental indicator, using the methodologies of geomorphological and morphodynamic changes. In the bay, there are three geomorphological and structural zones, whose aspects characterize its coastal strip. In the northwestern portion, the hydrographic basins stand out due to their scarce human activity in contrast to those of the southern portion, where the city of La Paz is located, which allows them to maintain a practically pristine effective runoff area and an important sedimentary supply. These environmental factors, together with the hydrodynamics generated by the waves in the bay, have favored the establishment of the sedimentary balance, and efficient longitudinal transport, conditioning the barrier to reach evolutionary maturity, with behavior that varies over time both in magnitude and in the type of response (erosion-accretion). It is identifiable in the interdecadal periods analyzed between the years 1973 to 2020, a cumulative and prograding evolutionary state of the barrier, where the variations observed to date show a remodeling process of natural origin, in response to a hyperstable sedimentary dynamics, with geomorphological changes due to advance and lateral movement, generating a rotational instability behavior in the coastline. The evolutionary analysis of the El Mogote barrier has been significant, given its potential for use and management, as well as that of the basins identified, for their planning and management, and in whose management process we must take the dynamic nature of the system. The analysis and evolutionary follow-up of the barrier is a good environmental indicator, which allows for making forecasts about human and natural activity in the future, and the possible environmental effects.

Key words: barrier, sediments, morphodynamics, evolution, environment.

Resumen

Como parte de la geomorfología de la Bahía de La Paz destaca la barrera arenosa El Mogote, que da origen a la laguna de La Paz en cuya porción sur se ubica la ciudad del mismo nombre y su zona conurbada, misma en la que en las últimas tres décadas se ha dado un acelerado aumento poblacional e incremento de área urbana. Dicha situación, justifica analizar su evolución reciente como indicador ambiental, empleando para ello las metodologías de cambios geomorfológicos y morfodinámicos. En la bahía se diferencian tres zonas geomorfológicas y estructurales cuyos aspectos particularizan su franja costera. En la porción noroeste

*Autor de correspondencia
Email: schavez04@cibnor.mx; Tel: 612 123-8428
ISSN 2594-0384 (Electrónica)
DOI: https://doi.org.1033154/rlrn.2022.01.02

destacan las cuencas hidrográficas que por su escasa actividad humana contrastan con las de su porción sur en donde se ubica la ciudad de La Paz, lo que les permite mantener un área de escurrimiento efectivo prácticamente prístino e importante suministro sedimentario. Dichos factores ambientales, aunado a la hidrodinámica generada por el oleaje en la bahía, ha favorecido el establecimiento del balance sedimentario, y un eficiente transporte longitudinal, condicionando que la barrera alcance madurez evolutiva, con un comportamiento variable en el tiempo tanto en magnitud como en tipo de respuesta (erosión-acreción). Lo que es identificable en los periodos interdecadales analizados entre los años de 1973 al 2020, con un estado evolutivo acumulativo y progradante, en donde las variaciones observadas manifiestan a la fecha un proceso de remodelación de origen natural, como respuesta a una dinámica sedimentaria hiperestable, con cambios geomorfológicos por avance y movimiento lateral, generando en la línea de costa un comportamiento de inestabilidad rotatoria. El análisis evolutivo de la barrera El Mogote, ha resultado importante ante su potencial uso y manejo, así como el de las cuencas identificadas, para su planificación y ordenamiento, y en cuyo proceso de gestión se tenga en cuenta el carácter dinámico del sistema. El análisis y seguimiento evolutivo de la barrera es un buen indicador ambiental, que permite plantear pronósticos sobre la actividad humana y natural en el futuro, y de los posibles efectos ambientales.

Palabras claves: barrera, sedimentos, morfodinámica, evolución, ambiental.

Introducción

Las principales evidencias de impacto ambiental en las costas mexicanas se encuentran asociadas a la tendencia de crecimiento poblacional, e incremento de las áreas urbanas carentes de planificación y ordenamiento (Chávez 2020a).

En la ciudad de La Paz, el aumento poblacional se hace evidente a partir de la década de los años noventa del siglo pasado, motivado por una economía basada en la actividad turística, y con ella el incremento indiscriminado de área urbana; en cuya dinámica ha ido en aumento la presión sobre sus ecosistemas con la fragmentación o pérdida de ambientes costeros, así como la pérdida de biodiversidad y la de flujos y ciclos naturales, como los hidrológicos y sedimentarios. En este contexto Chávez (2020b), refiere que las variaciones observadas en la línea de costa de la barrera El Mogote entre los años de 1973 al 2017, se observan como un proceso de remodelación natural, generado por una dinámica evolutiva estable, debido a la escasa actividad humana en las cuencas hidrográficas que drenan hacia la porción occidental de la Bahía de La Paz. Situación en la que analizar la evolución reciente de la barrera, permite ante un cambio de escenario, no solo emplear su información como diagnóstico e indicador ambiental, sino que además como refiere Gutiérrez (2008), permite plantear pronósticos sobre la actividad de los procesos en el futuro y de los posibles efectos de los cambios ambientales en los que han podido intervenir el medio geológico, el clima o la actividad humana.

De acuerdo con Fernández (1995), la comprensión de los fenómenos y leyes que gobiernan la dinámica litoral y los procesos naturales que modelan la morfología costera, exigen la consideración de la costa como un espacio amplio y complejo, cuyos límites se extienden tierra y mar adentro. Asimismo, a lo largo del litoral son los sectores morfológicos costeros y las unidades fisiográficas que se agrupan en los mismos, los que establecen los tramos en los que cualquier actuación puede afectar a la estabilidad del sistema. Por lo que teniendo en consideración lo anterior el presente trabajo se aborda en el contexto regional de la geomorfología de la Bahía de La Paz, entendiendo la evolución de la barrera de El Mogote como un sistema abierto en donde se intercambia energía y la materia puede movilizarse en tiempo y espacio.

Materiales y Métodos

Para las bases de datos, estadística y elaboración de gráficos se empleó la hoja de cálculo Excel 2007, y el software MapInfo 9.5 y surfer 8 para los mapas.

El mapa base se preparó con cartas raster y vectoriales escalas 1: 50,000, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1999), elaboradas con fotografías aéreas del año de 1993 (G12D61,62, 71, 72, 73, 81, 82, 83; F12B11, 12, 13), cuya línea de costa se encuentra referida al nivel medio del mar (nmm).

La zonificación geomorfológica se apoya en el mapa base, imagen pancromática SPOT E55633021002272T2A05007. EADS, del año 2010 e imágenes tomadas de Google Earth (en línea) para el año 2020, con verificación en campo del 19 al 23 de marzo, del 10 al 12 de septiembre y del 6 al 10 de octubre de 2018, empleando para ello un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, iQue M5).

La batimetría se basa en la elaborada por Cruz et al. (1996) y actualizada con datos registrados del 15 al 17 de junio, 21 al 23 de noviembre, 6 y 7 de diciembre de 2006, del 6 al 8 de febrero y 22 y 23 de marzo de 2007; los registros en profundidad inferior a los 20 m se efectuaron en lancha con motor fuera de borda, empleando GPS y sonar DEPTHMATE portable modelo SM5 y los registrados en profundidades superiores se efectuaron a bordo del barco BIP XII, empleando su posicionador y ecosonda. Durante estas mismas campañas se colectaron 150 muestras de sedimentos empleando draga Van Veen de 0.05 m^2 y 0.1 m^2 respectivamente para las profundidades antes referidas; cuya información estadística (media, desviación estándar, sesgo, curtosis) y minerales pesados entre otros aspectos sedimentológicos, se encuentran publicados en Chávez (2012). Por lo que para complementar el presente trabajo adicionalmente se colectaron 43 muestras de sedimentos, en desembocaduras de arroyos, bermas, frente de playa (estrán) y dunas, durante las fechas de verificación geomorfológica antes referidas. La granulometría de los sedimentos se determinó a intervalos de un cuarto de phi (ϕ), utilizando las técnicas de tamizado y pipeteo descritas en Lewis (1984), y los minerales pesados por el método de diferencia de densidad con bromoformo (Álvarez, 2003); para los parámetros estadísticos y nomenclatura de los sedimentos se empleó el método de los momentos descrito en Fredman & Sanders (1978); mismos métodos y técnicas empleadas en Chávez (2012).

Para estimar la velocidad critica de iniciación de movimiento y transporte de partículas sedimentarias por corriente, se empleó el diagrama de Hjulstrom (Sedimentología para todos, 2022), y para condiciones de oleaje la ecuación de Hallermeier (ecuación 1) y el gráfico de velocidad máxima del fondo a partir de la teoría de ola de pequeña amplitud (ecuación 2) relación periodo de ola profundidad (CERC, 1984), así como la información de oleaje reportado por los autores referidos en el punto de área de estudio.

$$V_{max(-d)} = (8[S-1]gD_{50})^{0.5} \quad \text{ecuación (1)}$$

0.1 mm < D_{50} < 2mm (condiciones de campo)

$$V_{max(-d)}\ T / H \quad \text{ecuación (2)}$$

En donde $V_{max(-d)}$ es la velocidad de pico critica cerca del lecho, S densidad del sedimento, g aceleración de la gravedad, D_{50} tamaño promedio de sedimentos, T periodo de ola y H altura de ola.

El trabajo de morfodinámica se abordó teniendo como referencia el mapa base y empleando la digitalización de las líneas de costa de las fotografías aéreas, del año de 1973 de la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL), cartas topográficas raster de INEGI (1983: G12D82; G12D83) elaboradas con fotografías aéreas del año 1978, fotografías aéreas de INEGI de 1990, ortofoto de INEGI de 1999, imagen pancromática SPOT del 2010 e imágenes tomadas de Google Earth (imágenes históricas) de 2020; cuyos materiales se corrigieron con apoyo de puntos de control del mapa base, reconocibles tanto en campo como en las fotografías aéreas e imágenes de satélite, para referir las líneas de costa al nivel medio del mar.

Con las líneas de costa digitalizadas (1973, 1978, 1990, 1999, 2010, 2020), y una línea de referencia arbitraria, se trazaron polígonos para obtener el área de referencia para cada año, que se sobrepusieron para observar los cambios espaciotemporales en la línea de costa y estimar sus tasas evolutivas para cada intervalo de tiempo empleando el método de RL (Linear Regression), descrito en Jiménez *et al*. (2000).

Para la respuesta evolutiva de la barrera se empleó el modelo genérico de cambios geomorfológicos de McBride *et al*. (1995), que permite en función del movimiento de línea de costa identificar la respuesta evolutiva.

Área de estudio

La barrera arenosa El Mogote, corresponde a una flecha de barrera que da origen a la laguna conocida como Ensenada de La Paz y al mismo tiempo separa a esta de la bahía del mismo nombre, cuya ubicación geográfica y morfometría se muestra en la figura 1.

En la Bahía de La Paz, las corrientes se deben a la superposición de las de marea, termohalinas, de deriva de viento y de Stokes, con velocidades superficiales en el rango de 8 a 20 cm/s, y la

amplitud del oleaje no es grande por lo protegido de la zona (Salinas, 2000). Por lo que de acuerdo con información de autores como Salinas *et al*. (1997), Obeso (2003), en la bahía para condiciones de verano con vientos del sureste y sur, se genera un oleaje tipo swell con alturas de ola (H) en el rango de 0.10 a 0.20 m. Para condiciones de invierno con vientos persistentes e intensos del noroeste y norte, alturas de ola en el rango de 0.3 a 0.5 m, con predominio de periodos (T) en el rango de 6 a 7 s; mientras que alturas de ola de entre 0.5 a 1m se generan por vientos intensos locales y oleaje superior a 1.5 m se asocia a vientos regionales de tormenta, que al igual que las lluvias torrenciales se presentan generalmente por la incidencia aleatoria de huracanes con énfasis entre los meses de agosto a septiembre (Chávez & Mendoza, 2016).

El clima es muy seco muy cálido, con temperatura media anual de 22º a 23ºC y precipitación total anual promedio de 400 mm; lo que caracteriza la aridez de la región con predominio de vegetación de tipo de matorrales xerófilos (CRM, 1999).

Resultados

Geomorfología

Teniendo como referencia la isobata de 200 m, en la Bahía de La Paz se diferencian dos zonas

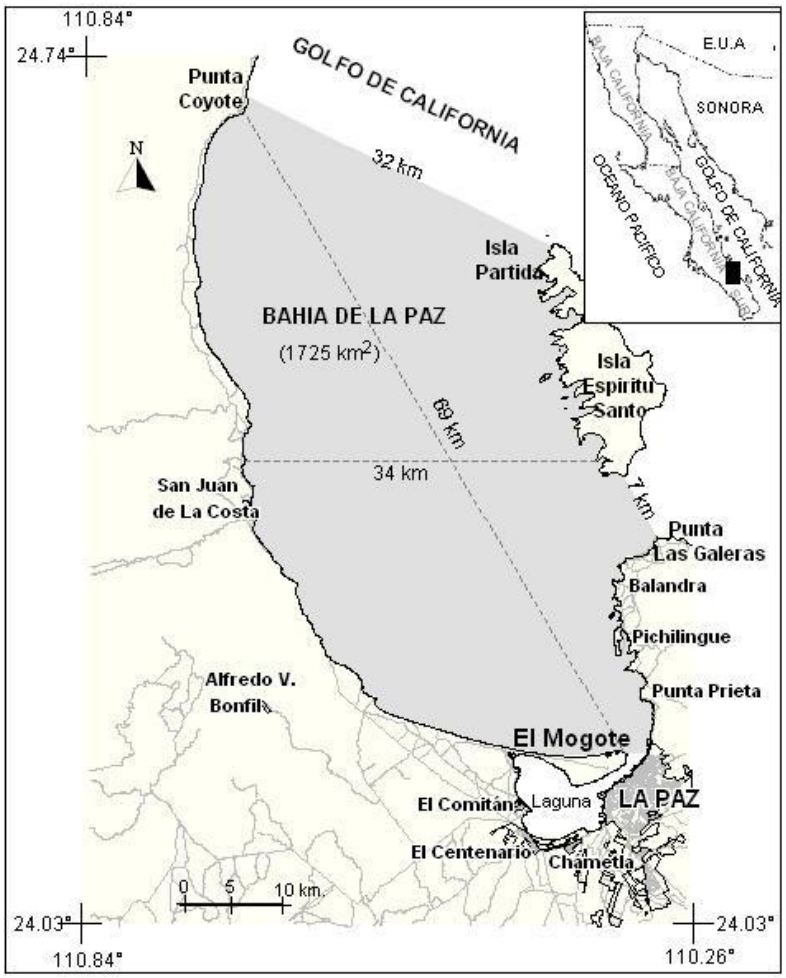


Figura 1. Ubicación área de estudio.

batimétricas (Fig. 2): la primera de los 200 m de profundidad hacia el norte, con un incipiente desarrollo de plataforma continental lo que genera una mayor pendiente hacia el interior de la bahía con profundidad superior a los 400 m. La segunda de los 200 m de profundidad hacia el sur en donde la plataforma se amplía notablemente, por lo que esta zona es relativamente somera; situación que ha favorecido la evolución de la barrera de El Mogote.

El relieve en la parte peninsular se encuentra integrado por las subprovincias fisiográficas Sierra de La Giganta, Discontinuidad Llanos de Magdalena y Discontinuidad del Cabo (CRM, 1999). Las cuales en la región de la Bahía de La Paz se encuentran limitadas por las fallas El Carrizal y La Paz, diferenciando a dichas subprovincias en tres zonas geomorfológicas y estructurales (Z-1, Z-2, Z-3); lo que ha influido en la génesis y evolución de la franja costera de la bahía, con particularidades geomorfológicas que permiten diferenciarla desde Punta Coyote a Punta Las Galeras en tres franjas y que a continuación se describen (Fig. 2):

Z-1. Integra la porción noroeste de la bahía, estructuralmente corresponde a un pilar tectónico (*Horst)*, cuyo relieve corresponde a la porción meridional de la subprovincia fisiográfica Sierra de La Giganta, en donde afloran secuencias de rocas sedimentarias de origen marino de las Formaciones San Gregorio (Oligoceno superior), y San Isidro (Mioceno inferior – medio), a las que sobreyace discordantemente rocas volcanoclásticas de la Formación Comondú (Mioceno Superior - Plioceno). El relieve que caracteriza esta zona es de mesetas segmentadas por cañadas de corto recorrido, y pendiente pronunciada que drenan hacia la bahía. En esta zona la cercanía de la Sierra de La Giganta a la línea de costa condiciona que en su mayor parte esté integrada por acantilados (costa erosiva), por lo que las playas son estrechas y rocosas con razas de erosión y bloques rocosos en las bases de acantilados, y hacia la desembocadura de las cañadas la geomorfología es de deltas torrenciales con playas rocosas, formadas por cantos rodados, guijarros y arenas de textura muy gruesa de color gris obscuro.

Z-2. Corresponde a la porción sur de la Bahía, estructuralmente es una fosa tectónica (*Graben*), limitada al Oeste por la Sierra de La Giganta y al Este por la Sierra Las Cruces, integrada por rocas graníticas del Cretácico. Dicha fosa ha sido rellenada por formaciones sedimentarias del cenozoico, por lo que desde el punto de vista

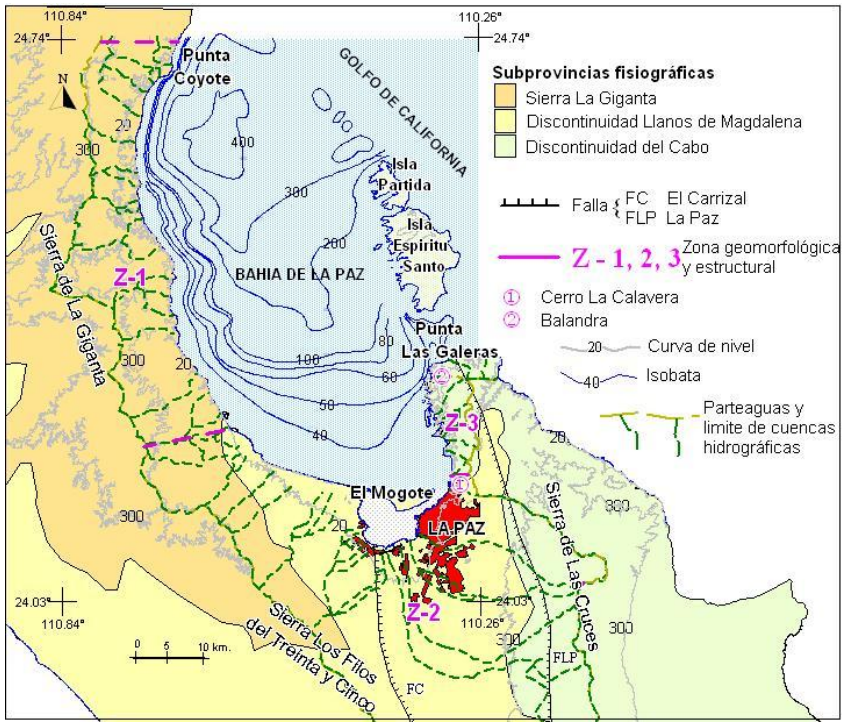


Figura 2. Contexto batimétrico, fisiográfico y geomorfológico.

geomorfológico corresponde a un istmo, considerado como parte de la subprovincia fisiográfica Discontinuidad Llanos de Magdalena. Destaca la topografía integrada por las bajadas de la sierra Los Filos del Treinta y Cinco ubicada al suroeste y la sierra Las Cruces al sureste, así como abanicos aluviales, que forman una amplia llanura disectada por arroyos tipo dendrítico, de régimen intermitente, por lo que predominan depósitos Cuaternarios. En esta zona la franja costera es de tipo acumulativo y de amplitud irregular, destaca la flecha de barrera El Mogote, cuya génesis y evolución da origen a la laguna de La Paz; en esta zona la franja costera se integra por diferentes ambientes de depósito como playas arenosas, dunas, pantanos de manglar y planicies de inundación diseminados en pequeñas áreas en la periferia de la laguna, así como una planicie costera que limita hacia la cota de los 20 msnm, con las bajadas de las sierras antes mencionadas. Los sedimentos predominantes en esta zona son arenas de textura media a fina en playas y dunas y limos y arcillas en los pantanos de manglar y marismas.

Z-3. Corresponde a la porción sureste de la bahía, e integra el pilar tectónico oriental, que forma parte de la subprovincia fisiográfica Discontinuidad del Cabo, cuyas rocas conforman el Bloque de los Cabos (CRM, 1999). En esta porción de la bahía la franja costera se encuentra delimitada por una sierra (sin nombre), de topografía abrupta con cimas estrechas e irregulares compuesta por rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Comondú; la cual se encuentra separada tajantemente de la sierra Las Cruces por la falla de La Paz (CRM, 1999). En esta zona la franja costera inicia del Cerro La Calavera hacia el norte, es irregular y de tipo mixta con acantilados y pequeñas playas encajadas. Desde el punto de vista geomorfológico se les tipifica como caletas; con desarrollo de dunas y en algunos casos pantanos de manglar, estas características geomorfológicas, condicionan una alta complejidad evolutiva ya que se encuentran limitadas por acantilados erosivos, que al mismo tiempo condicionan áreas protegidas en donde se desarrollan playas sedimentarias acumulativas, con pequeñas barreras arenosas como es el caso del área conocida como Balandra.

En este contexto geomorfológico es conveniente destacar la hidrología superficial de la periferia de la bahía, compuesta por una serie de cuencas hidrográficas (Fig. 2), mediante las cuales durante episodios de lluvia se efectúa el principal aporte sedimentario hacia la línea de costa, lo que aunado a la hidrodinámica de la bahía establecen el balance sedimentario que dio origen y mantiene la evolución de su franja costera. Por lo que también es de hacer notar la creciente actividad antrópica en las cuencas de las zonas geomorfológicas 2 y 3 evidenciada por el incremento del área urbana de la ciudad de La Paz y su zona conurbada.

Sedimentos

Empleando la correlación de tamaño promedio ($X_{\emptyset}$), contra grado de selección desviación estándar ($S_{\emptyset}$), se diferenciaron dos grupos de sedimentos (Fig. 3).

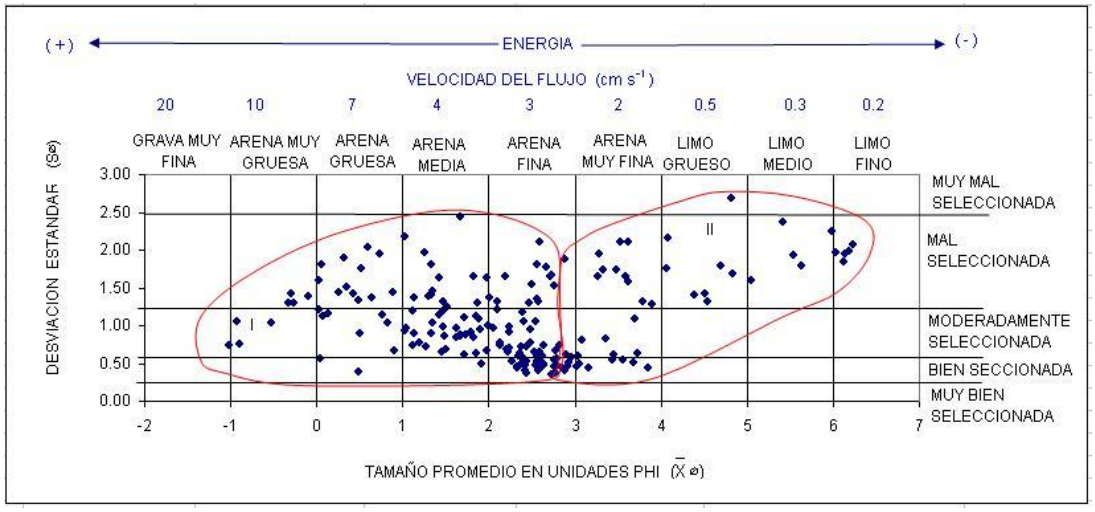


Figura 3. Correlación tamaño promedio desviación estándar, y velocidad de la corriente requerida para mantener en movimiento sedimentos, de acuerdo con el diagrama de Hjulstrom.

El grupo I, lo integra el rango que va de graba muy fina a arena fina (-2 ø a 3 ø), de bien a mal seleccionadas y en su mayoría de asimétricas a muy asimétricas hacia sedimentos gruesos, el grupo II, se encuentran en el rango de arenas muy finas a limo fino (3 ø a 7 ø), de moderados a muy mal seleccionados, y asimetría no definida ya que pasan de muy asimétricos hacia gruesos a muy asimétricos hacia finos. De la inspección visual de las muestras se observa que la asimetría hacia gruesos en los sedimentos del grupo II, se debe básicamente a la presencia de fragmentos de conchas y coral calcáreo, componentes que son más abundantes en los sedimentos muestreados en la zona geomorfológica Z-3; esto debido a la existencia de un arrecife de coral calcáreo en el área marina cercana al puerto de Pichilingue, lo que aunado a la predominancia de rocas de composición granítica en la zona 3, da a estos sedimentos una coloración clara.

La distribución espacial de sedimentos que se muestra en la figura 4, indica una relación de tamaño de partículas sedimentarias con respecto a la profundidad (Fig. 2), ya que los sedimentos que integran el grupo I (graba muy fina a arena fina), se distribuyen entre la línea de costa y los 50 m de profundidad, mientras que los sedimentos del grupo II (arenas muy finas a limo fino), se distribuyen en profundidades superiores a los 50 m en donde la tendencia de asimetría de los sedimentos colectados a profundidades superiores a los 100 m es hacia sedimentos finos.

Dicha distribución de sedimentos infiere el nivel de energía que se requiere para su transporte (Fig. 3), lo cual es identificable en el diagrama de Hjulstrom (Sedimentología para todos, 2022), que muestra estos procesos como relación entre la velocidad de la corriente y el tamaño de partículas; así durante

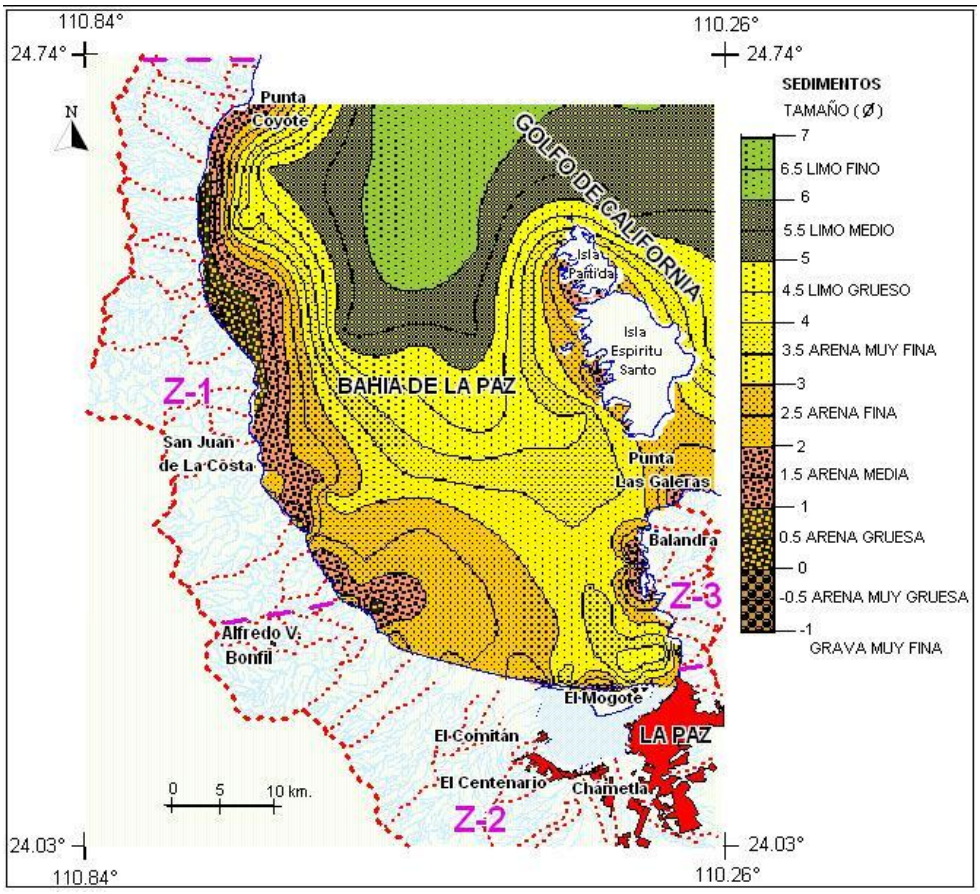


Figura 4. Distribución textural de sedimentos.

episodios de lluvia, los sedimentos son transportados por las corrientes a través de los arroyos y bajadas que integran las cuencas que inciden en la franja costera de la bahía, y a medida que las corrientes, pierden velocidad disminuye su capacidad de carga, depositando primero las partículas de textura gruesa y hacia el interior de la bahía, transportan sólo las que requieren de menores velocidades para su desplazamiento y depósito (Fig. 4).

Evidencias de lo anterior son los deltas torrenciales que se encuentran en la zona geomorfológica 1, integrados por arenas de textura muy gruesa, guijarros y cantos rodados de hasta 0.30 m de diámetro, indicando que el nivel energético de las corrientes que los transportaron es superior al de la hidrodinámica en la bahía (corrientes y oleaje), lo cual ha favorecido su establecimiento y evolución hacia el mar.

De acuerdo con la información del diagrama de Hjulstrom (Sedimentología para todos, 2022), los sedimentos una vez depositados requieren de velocidades mayores para la iniciación de su movimiento, por lo que las velocidades de la corriente requerida para erosionar del lecho, partículas del tamaño de la arena muy fina (3 ø) a grava muy fina (-2 ø) es de entre 20 a 80 cm/s; por lo que las velocidades de corrientes reportadas para la bahía por Salinas (2000), en el rango de 8 a 20 cm/s, se descartan como agente energético capaz de trasportar sedimentos de la zona geomorfológica 1 hacia la 2, en donde se ubica la barrera arenosa El Mogote.

Peredo (1994), refiere que para poner en movimiento clastos de 0.30 m de diámetro, como los que se encuentran en los deltas torrenciales de la zona geomorfológica 1, se requieren alturas de ola superiores a 1.8 m. En este sentido en la tabla 1, se anotan los resultados de la estimación hecha empleando la ecuación de Hallermeier, para obtener la altura de ola mínima requerida para iniciar el movimiento de sedimentos, con tamaños en el rango de grava muy fina (-1 ø), a arena muy fina (3 ø), a 1 y 0.5 m de profundidad, considerando el oleaje reportado por los autores referidos en el punto de Área de estudio y en particular la mayor frecuencia de periodos (T) en el rango de 6 a 7 s (6.5 s promedio); cuyos resultados son consistentes con las alturas de ola reportadas para la Bahía de La Paz, por lo que podemos asumir que el oleaje en la bahía tiene capacidad para movilizar los sedimentos no cohesivos, depositados a lo largo de su línea de costa.

Tabla 1. Estimación de altura de ola mínima requerida (H), para iniciar el movimiento de sedimentos, empleando la ecuación de Hallermeier (ecuación 1) y velocidad máxima del fondo a partir de la teoría de ola de pequeña amplitud relación periodo de ola – profundidad (ecuación 2), para un oleaje caracterizado con periodo (T) de 6.5 s, a 1 y 0.5 m de profundidad (CERC, 1984).

Sedimento	Tamaño (mm)	H (1m)	H (0.5 m)
Grava muy fina	4	0.52	0.36
Arena muy gruesa	2	0.36	0.26
Arena gruesa	1	0.26	0.18
Arena media	0.5	0.18	0.13
Arena fina	0.25	0.13	0.10
Arena muy fina	0.125	0.10	0.07

Resulta importante destacar que en las costas sedimentarias el oleaje se considera como el agente energético más importante, por ser estas altamente modificables por la movilización del material debido a las corrientes transversal y longitudinal, inducidas durante el proceso de rotura del oleaje; siendo el transporte longitudinal el más importante debido a que es el principal responsable de los cambios morfodinámicos (acreción – erosión) en planta y por lo tanto de los cambios a largo plazo de las playas. Sin embargo, para que se genere el transporte longitudinal, aunado al flujo de energía del oleaje, este tiene que incidir de forma oblicua con respecto a la costa. En este sentido es importante mencionar que un factor, que reducen el potencial del transporte longitudinal son las costas acantiladas con playas rocosas, como las de la zona geomorfológica Z-1.

De acuerdo con el régimen de vientos que se esquematiza en la figura 5, durante la época de invierno se generan las condiciones para un eficiente transporte longitudinal; el cual hacia la porción occidental de la bahía pierde importancia al encontrarse integrada por acantilados y playas rocosas. Dicha situación permite, referir que el oleaje que incide en la zona Z-1 no tienen capacidad para transportar sedimentos hacia la zona Z-2, por lo que, al igual que las corrientes, se excluyen a las cuencas ubicadas en la zona Z-1, como tributarias significativas de material sedimentario para el mantenimiento y evolución de la barrera El Mogote.

Al mismo tiempo hacia la zona Z-2, caracterizada por una costa acumulativa, la eficiencia del

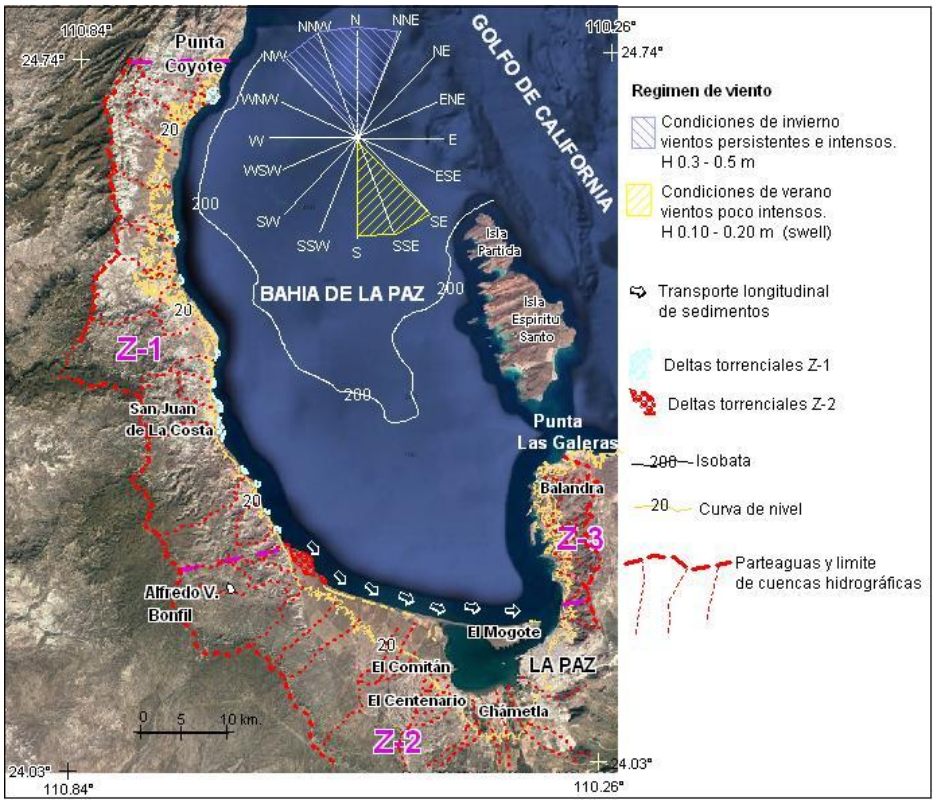


Figura 5. Esquema del régimen de vientos que condiciona el oleaje en verano e invierno (imagen de Google Earth).

transporte longitudinal durante la época de invierno se ve favorecido por las playas integradas por arenas con tamaños de media a fina (Fig. 4) y una mayor amplitud de la plataforma continental (Fig. 2). Evidencias de la efectividad del transporte longitudinal se presenta en los deltas torrenciales ubicados en la porción norte de la zona geomorfológica 2 los cuales se identifican en la figura 5, en color rojo y su detalle en la figura 6, en la cual se destaca la formación de una flecha de barrera y una barrera cuspada (triangular); cuyo desarrollo indica un transporte longitudinal en dirección sur – sureste siguiendo el contorno de la línea de costa. Dichas barreras arenosas al igual que la flecha de barrera El Mogote, son elementos típicos de costas sedimentarias, en cuya génesis y evolución se requiere de abundante material sedimentario y una dinámica litoral lo suficientemente intensa para generar el transporte longitudinal de sedimentos que las mantienen (Chávez, 2020b).

La información anterior aunada a la de distribución de minerales pesados, que se muestra en la figura 7, permite identificar las cuencas hidrográficas que aportan sedimentos hacia la bahía, las cuales se delimitan en el polígono Z-C. Resulta conveniente mencionar que el tamaño de los minerales pesados se encuentra en el rango de 3 a 4 ø (arena muy fina), cuya característica como su nombre genérico lo indica es el de tener una gravedad específica mayor de 2.9 (densidad), mayor al de las arenas (2.65), por lo que son transportados junto con granos en el rango de arena gruesa a media (0.5 – 2 ø), cuyo efecto es conocido como "razón hidráulica"; el cual se aprecia al comparar las figuras 4 y 7, por consiguiente a mayor tamaño de las partículas y por tanto más pesadas, se requiere un mayor nivel energético para poder ser transportadas. Lo que se sustenta con la pluma de dispersión de altas concentraciones de minerales pesados, desde la costa hacia el interior de la bahía; confirmando que las cuencas identificadas como ZC, representan un importante suministro sedimentario (Fig. 7). Situación que se mantiene debido a la escasa actividad antrópica, que ha permitido mantener un

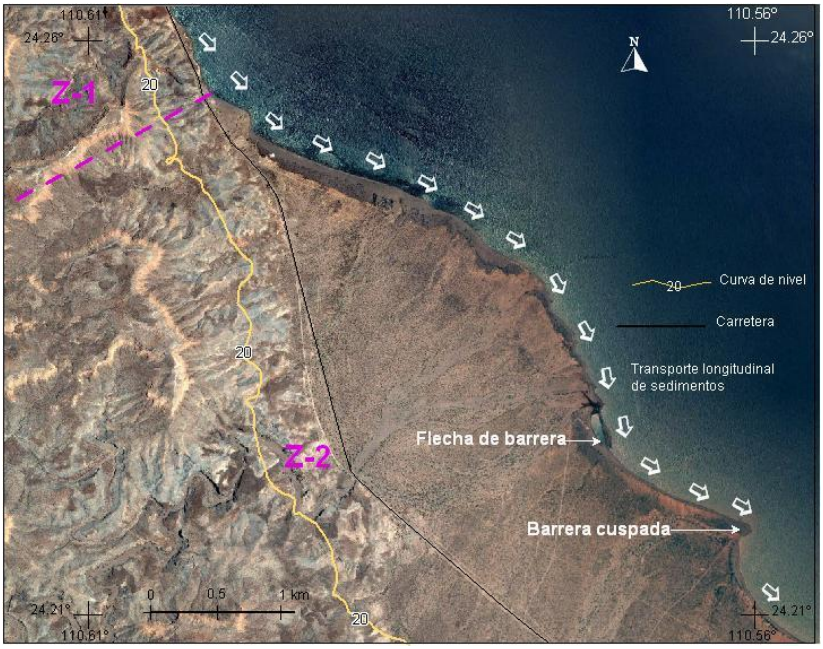


Figura 6. Detalle de los deltas torrenciales de la zona geomorfológica Z-2 (imagen tomada de Google Earth).

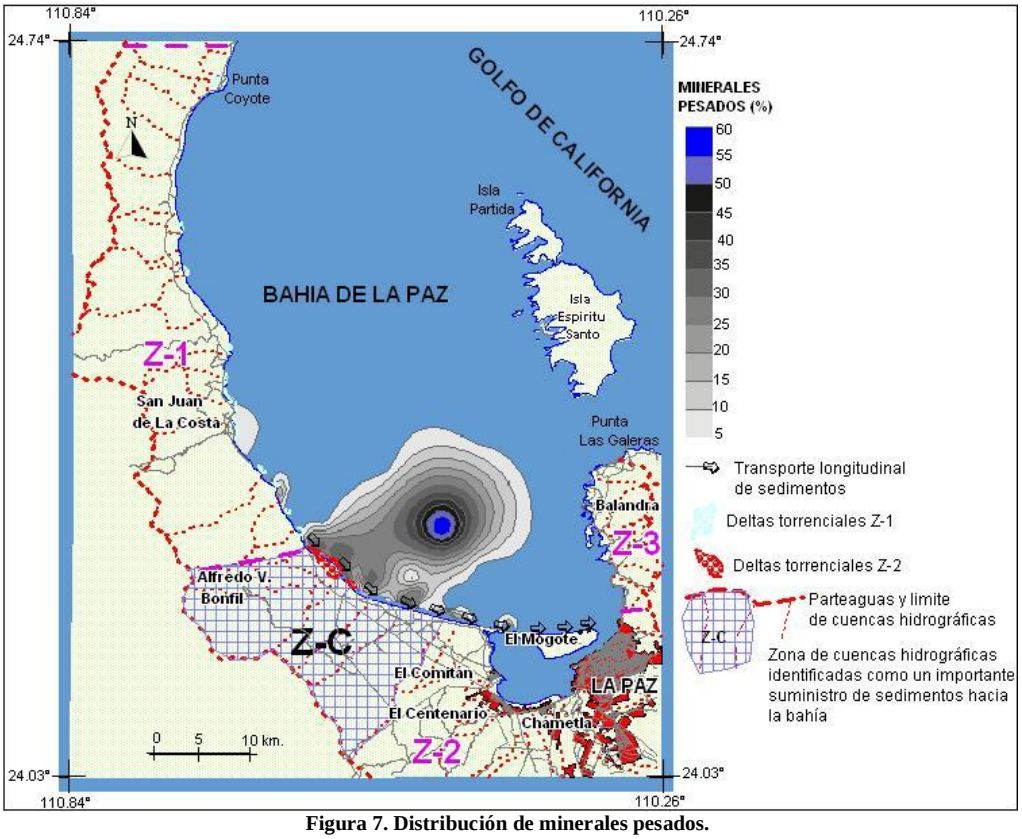


Figura 7. Distribución de minerales pesados.

área efectiva de escurrimiento prácticamente prístina. Por lo que el aporte de sedimentos hacia la franja costera y su redistribución por el oleaje, mantienen el balance sedimentario mediante el transporte longitudinal de sedimentos que dio origen y mantienen la evolución de la barrera de El Mogote.

Morfodinámica

Dado que el análisis evolutivo de la barrera El Mogote se efectúa una vez conformada, limita y sesga su análisis a un periodo de 47 años, sin embargo, las evidencias geomorfológicas que se muestran en la figura 8, y en particular para el año de 1973, muestran un ambiente prácticamente prístino, el que para el año 2020 se observa ya impactado por una creciente actividad antrópica, que inicia desde el año 2004, principalmente hacia la porción del lóbulo de la barrera que son zonas identificadas como las más dinámicas. Por lo que pese a dicha actividad al comparar los escenarios de 1973 y 2020, se aprecia un estado evolutivo acumulativo y progradante. Corroborado con la distribución temporal de los datos analizados (1973, 1978, 1990, 1999, 2010, 2020), que se muestra en la figura 9, en donde la sobreposición de las áreas limitadas por la línea de costa para los años de 1973 y 2020, resumen el estado evolutivo (morfodinámica) de la barrera; por lo que los cambios morfológicos registrados entre la primer y última línea de costa, representa el resultado integrado de la acción de los diferentes agentes dinámicos actuantes con su consecuente tipo de respuesta; por lo que a medida que aumenta el lapso entre las líneas de costa se produce un filtrado de los procesos a corto plazo (Crowell *et al.*, 1993), lo



Figura 8. Evidencias del estado geomorfológico de la barrera El Mogote para el año de 1973 (fotografía aérea CETENAL) y 2020 (imagen tomada de Google Earth).

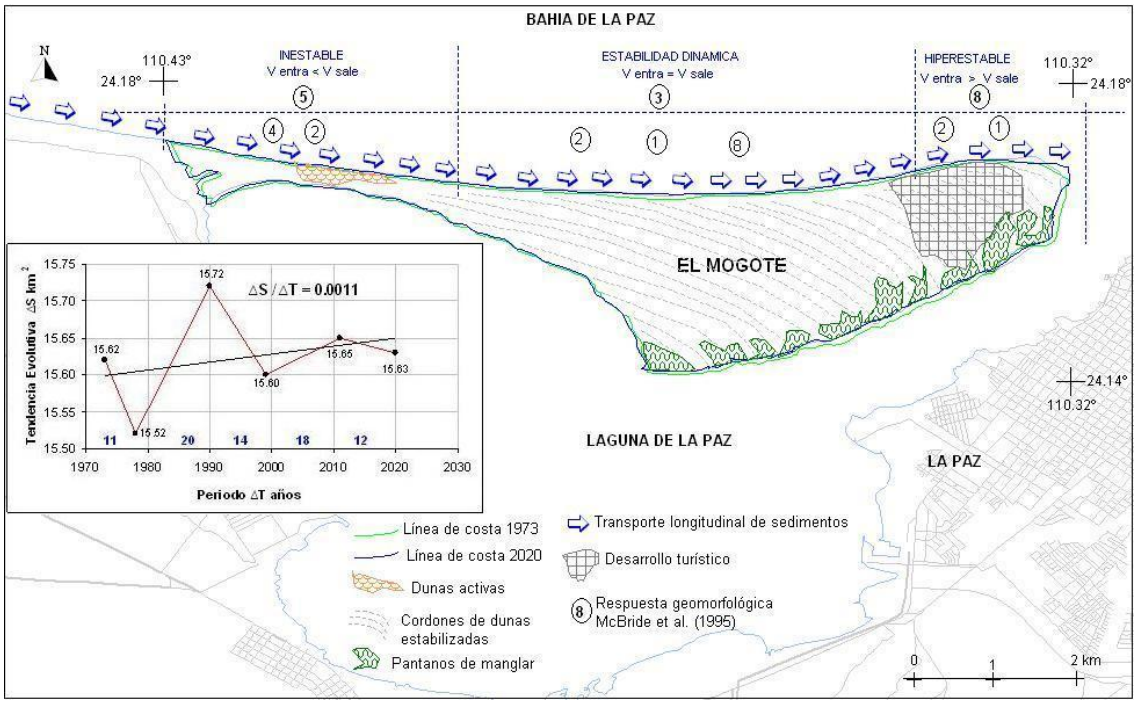


Figura 9. Morfodinámica y respuesta evolutiva de la barrera El Mogote (1973 - 2020). Los números en los círculos corresponden al tipo de respuesta geomorfológica como función del movimiento de línea de costa de acuerdo con McBride et al, (1995): (1) movimiento lateral, (2) avance, (3) equilibrio dinámico, (4) retroceso, (5) estrechamiento, (6) rebase hacia tierra, (7) rotura, y (8) inestabilidad rotatoria.

que permite estimar, de forma más o menos directa, el comportamiento evolutivo a largo plazo de la barrera.

De igual manera en el gráfico de la figura 9, se muestran los órdenes de magnitud de acuerdo con los periodos y datos analizados; señalando un comportamiento variable en el tiempo tanto en magnitud como en tipo de respuesta (erosión - acreción). Así al segregar los datos en épocas equivale a evaluar el comportamiento no-lineal del sistema, manifestando, que la respuesta de los agentes que actúan sobre la costa no se puede interpretar como una causa y efecto constante, ya que dicha respuesta se da de manera diferenciada, tanto en tiempo como en espacio; resultando para la barrera El Mogote una tasa evolutiva en el periodo de 47 años de 0.0011 km^2, lo que equivaldría a un "incremento lineal neto" si lo hubiese de 23.4 m^2/año. confirmando un estado evolutivo acumulativo y progradante, en donde las variaciones observadas en la barrera manifiestan a la fecha un proceso de remodelación de origen natural, consistente con Chávez (2020b).

En dicho proceso de remodelación, es posible en función del movimiento de línea de costa identificar la respuesta evolutiva de la barrera, empleando el modelo genérico de cambios geomorfológicos de McBride *et al*. (1995), y cuyos cambios son función de la dinámica sedimentaria, la cual para la barrera El Mogote se muestra en la figura 9; en la que se observa un desplazamiento lateral progresivo en dirección de oeste a este (transporte neto), en el que destacan tres tramos de costa, cuya dinámica sedimentaria explica la geomorfología y el estado evolutivo actual de la barrera:

El primer tramo corresponde a la parte inicial y más angosta de la barrera, situación generada por una dinámica sedimentaria inestable, en donde el volumen de sedimentos que entra al sistema (barrera), es menor al que sale; ocasionando el estrechamiento (5), como respuesta a periodos de retroceso (4 erosión), y avance (2 depósito), en la línea de costa. Dichos procesos de retroceso y avance en principio se generan como efecto interanual de la divergencia en el transporte longitudinal de sedimentos ocasionado por el oleaje

que se genera en condiciones de verano e invierno; el cual se esquematiza en la figura 5, y cuya dinámica es más evidente en los periodos interdecadales que se indican en el gráfico de la figura 9; cuya respuesta es función del aporte de sedimentos que se da desde las cuencas hidrográficas hacia la costa, que a su vez depende de la intensidad y periodicidad de lluvia, que en la región se presentan de manera aleatoria y asociadas a la incidencia de huracanes. Dicha incidencia se indica en el mismo gráfico con números en color azul (Chávez & Navarro, 2018; Unisys Weather, 2021), mostrando en general consistencia con la respuesta evolutiva de la barrera; con periodos de poca incidencia erosión y mayor incidencia acreción, lo que explica en general el comportamiento variable en tiempo tanto en magnitud como en tipo de respuesta de la barrera.

El segundo tramo inicia a partir de donde la barrera se amplía formando un abanico integrado por antiguos cordones de dunas estabilizadas y líneas de costa, indicando que en las primeras etapas de la barrera los cambios geomorfológicos se efectuaron por avance (2), y movimiento lateral (1), de la línea de costa; condicionados por una dinámica sedimentaria hiperestable en donde el volumen que entra al sistema es mayor al que sale, ocasionando el depósito y acreción de la barrera, lo que en suma estableció una dinámica de inestabilidad rotatoria (8), en sentido contrario a las manecillas del reloj, hasta alcanzar su posición actual y un equilibrio dinámico (3), o estabilidad dinámica en donde el volumen de sedimentos que entra al sistema es igual al que sale; situación que indica, que la barrera El Mogote ha alcanzado madurez evolutiva.

El tercer tramo corresponde al lóbulo de la barrera, en cuyo desarrollo se mantienen los cambios geomorfológicos por avance (2), y movimiento lateral (1), condicionados por una dinámica sedimentaria hiperestable. Situación que ha mantenido el desarrollo depositacional y progradante de la barrera, generando una respuesta evolutiva en la línea de costa de inestabilidad rotatoria (8); concepto introducido por Leatherman *et al.* (1982), para describir la forma de cómo cambia de orientación una barrera por el efecto neto de erosión y/o acreción de sedimentos.

Por lo que de acuerdo con la respuesta evolutiva de la barrera El Mogote, aún con las variaciones interdecadales antes descritas, indica que el balance sedimentario establecido entre el aporte de sedimentos desde las cuencas hidrográficas y la hidrodinámica generada por el oleaje en la bahía se ha mantenido hasta la actualidad.

Dicha aseveración se sustenta con el transporte y depósito de sedimentos neto, que ha generado en la porción del lóbulo la acreción y la migración de la línea de costa en sentido contrario al de las manecillas del reloj por lo que las antiguas líneas de costa y cordones de dunas se encuentran del lado de la laguna y los más recientes hacia la bahía. Situación que indica que las corrientes que se producen durante el reflujo de la marea, al interior de la laguna son más intensas que las generadas durante el flujo, así como las generadas por el oleaje en la bahía; evidenciado además con los sedimentos que salen del sistema (barrera) y que frente a la boca de la laguna forman una zona de bajos con forma de abanico en dirección hacia la bahía la cual actúa como un "sumidero" de sedimentos.

Discusión

De acuerdo con las evidencias presentadas, podemos asumir que a partir del establecimiento del actual nivel del mar, e inicio de la formación de la barrera El Mogote hace 5000 años (Nava & Cruz, 1989), las variaciones experimentadas son de origen natural, asociadas a la aleatoriedad de lluvias Intensas que producen el escurrimiento y transporte de sedimentos hacia la costa; lo que aunado a la hidrodinámica en la bahía generada por la bidireccionalidad del oleaje (invierno – verano), mantienen el balance sedimentario y un eficiente transporte longitudinal de sedimentos neto en dirección este - oeste, permitiendo alcanzar la madurez evolutiva de la barrera El Mogote. Estado que se ha mantenido por la escaza actividad antrópica en las cuencas Z-C, ubicadas en la porción noroeste de la zona geomorfológica Z-2, que contrastan con las de su porción sur, por el acelerado y desordenado incremento del área urbana de la ciudad de La Paz y su zona conurbada; reflejándose en la fragmentación y pérdida de ambientes costeros y erosión del borde interno de la laguna (Chávez, 2020b). Este proceso de deterioro ambiental se ha dado y continúa, pese a que, en el año de 2008 los humedales denominados como Mogote - Ensenada La Paz, fueron declarados sitio Ramsar, situación que genera alerta y evidencia la falta de aplicación de leyes, reglamentos y normas ambientales, que se refleja en el sesgo discrecional

para cambios de uso de suelo para desarrollos turísticos, como los dados en el lóbulo de la barrera. Por lo que resulta importante destacar el periodo 2010 al 2020 puesto que, de acuerdo con la información morfodinámica, se observa un proceso de erosión que resulta difícil de asociar a una respuesta ya sea por efectos naturales (internos al sistema), debido a periodos prolongados de suministro de sedimentos por falta de lluvia, como en anteriores periodos interdecadales, o inducido (externos al sistema), por el emplazamiento del desarrollo turístico, o bien si es una respuesta combinada. Lo que requiere para precisar dicha respuesta, es el dar seguimiento al estado evolutivo de la barrera que resulta en un buen indicador ambiental; ya que al igual que las playas arenosas, su balance sedimentario suele ser especialmente frágil por el potencial suministro de sedimentos, así como las alteraciones y modificaciones realizadas por el hombre, ya sea de forma directa en la franja costera o indirectas alejadas de la costa (Chávez, 2020b).

De tal manera que, ante el acelerado aumento poblacional y área urbana de la ciudad de La Paz y su zona conurbada, se incrementa el riesgo de ocupación en las cuencas identificadas como Z-C, en donde no solo se requerirá de su planificación y ordenamiento, sino que además como refiere Pineda *et al.* (1997), en el proceso de gestión se ha de tener en cuenta en todo momento el carácter dinámico del sistema y adaptarse a la geomorfología.

De lo contrario el pronóstico de los efectos ambientales será muy similar a los de la ciudad de La Paz y su zona conurbada; lo cual, de llegar a presentarse en la franja costera de las cuencas antes referidas, se corre el riesgo que ante el establecimiento de un proceso de erosión, la respuesta evolutiva más factible de acuerdo a la dinámica sedimentaria de la barrera, se reflejaría en un continuo adelgazamiento de la porción más angosta hasta llegar a la rotura; por consiguiente, el proceso de erosión se continuaría, reflejándose al mismo tiempo en la porción del lóbulo en donde actualmente se encuentra el desarrollo turístico. Generalmente cuando se presenta un proceso de erosión en la costa resulta difícil revertirlo, por lo que para mitigarlo, se requiere de continuo mantenimiento mediante aporte artificial de sedimentos y/o la construcción de estructuras como espigones, lo cual representa un alto costo económico, ecológico y ambiental.

Conclusiones

Dada la cercanía de las cuencas identificadas como Z-C y la barrera El Mogote a la ciudad de La Paz, existe una alta probabilidad de que continúe su ocupación, por lo que emplear el estado evolutivo de la barrera, resulta en un buen indicador ambiental que permite plantear pronósticos sobre la actividad de los procesos en el futuro, y de los posibles efectos ambientales generados por la actividad humana; la cual requerirá de planificación y ordenamiento, con apego a leyes, reglamentos y normas ambientales, para garantizar en su gestión, la integridad de la barrera para mantener sus servicios ecosistémicos y de protección que brindan a la ciudad de La Paz y su zona conurbada.

Referencias

Álvarez, A. A., 2003. *Prácticas del laboratorio de sedimentología*. Serie didáctica, 1 ed., México: Universidad Autónoma de Baja California Sur, 91 p., ISBN: 968-896-139-6.

CERC. U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 1984. Shore Protection Manual Vol. 1. Fourth edition. Washington, D.C. p.4-68.

CETENAL., 1973. Fotografías aéreas zona 47-A: fotografías mR1410-1; mR 149-1; mR 147-1. [1: 70, 000], Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Chávez L. S., 2020a. *Impactos ambientales en las costas mexicanas*. México es Ciencia. Investigación y Desarrollo, México: INVDES.COM.MX, Available: <https://invdes.com.mx/los-investigadores/impactos-ambientales-en-las-costas-mexicanas/ >, [Consulted: Jun 1, 2020].

Chávez, L. S., 2020b. "Efecto antrópico en la geomorfología y morfodinámica de la franja costera de la Laguna de La Paz, Baja California Sur, México". *Investigaciones Geográficas*, Instituto de Geografía, UNAM: 1- 15, ISSN: 2448-7279, DOI: dx.doi.org/10.14350/rig.60084.

Chávez, L. S. & Navarro, M. A., 2018. "Geomorfología como factor de riesgo a inundaciones en la cuenca hidrográfica de Mulegé, Baja California Sur, México". *Recursos Naturales y Sociedad*, 4 (2): 31-51, ISSN: 2448-7406, DOI: https://doi.org/10.18846/renaysoc.2018.04.04.02.0003

Chávez, L. S. & Mendoza, A. A., 2016. "Aspectos Geomorfológicos e Hidrográficos de la Cuenca San José del Cabo, B.C.S., México, como Factor de Riesgo a Inundaciones". *Áreas Naturales Protegidas Scripta*, 2(2): 103 – 126, ISSN: 2448-7287, DOI: https://doi.org/10.18242/anpscripta.2016.02.02.02.0006.

Chávez, L. S., 2012. "Fondo marino, Tipos de sedimentos". In: Lechuga, D. (ed.), *Una Piscicultura sustentable: Bahía de La Paz, Golfo de California*, Saarbrücken, Alemania: Editorial Académica Española, pp. 50 – 62, ISBN: 978-3-659-00459-9, Available: <https://www.eae-publishing.com/catalog/details//store/gb/book/978-3-659-00459-9/una-piscicultura-sustentable:-bah%C3%ADa-de-la-

paz,-golfo-de-california>, [Consulted: October 6, 2021].

CRM. Consejo de Recursos Minerales. 1999. *Monografía Geológico-Minera del Estado de Baja California Sur*. Serie Monografías-Mineras, 1 ed., México: Consejo de Recursos Minerales, 237 p., ISBN 968-6710-84-1.

Crowell, M.; Leatherman, S. P. & Buckley, M. K., 1993. "Shoreline change rate analysis: long term versus short term data". *Shore and Beach*, 61 (2): 13-20, ISSN: 0037-4237.

Cruz, O. R.; Martínez, N. C. & Mendoza, M. A., 1996. "Batimetría y sedimentos de la Bahía de La Paz, B.C.S., México". *Oceánides*, 11 (1): 21-26, ISSN: 2448-9123.

Fernández P. J., 1995. "La gestión integral de la costa: hacia una nueva estrategia territorial". *Ingeniería del Agua*, 2 (Num. Extraordinario): 7-18, ISSN: 1886-4996, https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/2659/2644.

Fredman, G. M. & Sanders, J.E., 1978. *Principles of sedimentology*. 1 ed., Indianapolis:
John Wiley & Sons, 792 p., ISBN: 10-0471752452.

Google Earth (2020), Imágenes históricas La Paz. [1:45,000], <https://www.google.com>, [Consulted: February 6 de 2021].

Gutiérrez, E. M., 2008. *Geomorfología*. Martín, R. M. & Caicoya, M. (eds.), 1 ed., España: Pearson Prentice Hall, 898 p., ISBN: 978-84-8322-389-5, Available: <https://docer.com.ar/doc/nvxs8e>, [Consulted: september 21, 2021].

INEGI., 1999. Carta topográfica El Coyote G12D61. [1: 50, 000], 1 ed., Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI., 1999. Carta topográfica Isla Partida G12D62. [1: 50, 000], 1 ed., Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI., 1999. Carta topográfica San Juan de La Costa G12d71. [1: 50, 000], 1 ed., Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI., 1999. Carta topográfica El Cajete G12D72. [1: 50, 000], 1 ed., Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI., 1999. Carta topográfica El Coyote G12D73. [1: 50, 000], 1 ed., Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI., 1999. Carta topográfica El Conejo G12D81. [1: 50, 000], 1 ed., Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI., 1999. Carta topográfica El Centenario G12D82. [1: 50, 000], 1 ed., Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI., 1999. Carta topográfica La Paz G12D83. [1: 50, 000], 1 ed., Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI., 1999. Carta topográfica Conquista Agraria F12B11. [1: 50, 000], 1 ed., Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI., 1999. Carta topográfica La Victoria F12B12. [1: 50, 000], 1 ed., Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI., 1999. Carta topográfica San Antonio F12B13. [1: 50, 000], 1 ed., Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI., 1999. Ortofoto, G12D83-563/302. [1: 20, 000], Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI., 1990. Fotografías aéreas zona 47-A: fotografías mR 639-1; mR 627-1; mR 648-1. [1: 70, 000], Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI., 1983. Carta topográfica El Centenario G12D82. [1: 50, 000], 1 ed., Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI., 1983. Carta topográfica La Paz G12D83. [1: 50, 000], 1 ed., Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Jiménez, J. A.; Gracia, V.; Sánchez, A. A.; Stive, M. J. F. & Girolamo, P., 2000. *Costal Monitoring and Data Analysis Along The Abruzzo Coast*. Barcelona España: Universitat Politecnica de Catalunya, International Center For Coastal Resources Research, 79 p.

Leatherman, S. P.; Rice, T. E. & Goldsmith, V., 1982. "Virginia barrier island configuration: a reappraisal". *Science*, 215 (4530): 285-287, ISSN: 0036-8075, DOI: 10.1126/science.215.4530.285.

Lewis, D.W., 1984. *Practical Sedimentology*. 1 ed., New YorK: Van Nostrand Reinhold Company Inc, 229 p., ISBN: 0-87933-443-6.

Mcbride, R. A.; Bynrne, M. R. & Hiland M. W., 1995. "Geomorphic response-type model for barrier coastlines: a regional perspective". *Marine Geology*, 126 (1995): 143-159, SSDI: 0025-3227(95)0070-4.

Nava, S. E. H. & Cruz, O. R., 1989. "Origen y evolución geomorfológica de la laguna de La Paz, Baja California Sur, México". *Investigaciones Marinas*, 4 (1): 49- 58, ISSN: 0186-5102, URI: https://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/14443.

Obeso, N. M., 2003. *Variabilidad espacio-temporal de las condiciones oceanográficas de la Bahía de La Paz, B.C.S., México*. Tesis doctoral. México: Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional. 337 p., Available: <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/15365>, [Consulted: september 23, 2021].

Peredo, J. J. I., 1994. *Estimación de oleaje extremo a partir del análisis de clastos en costas rocosas*. Tesis de Maestría. México: Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, 73 p., Available: <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/handle/20.500.12930/8197>, [Consulted: October 12, 2021]

Pineda, J.; Sánchez, A. A. & Jiménez. J., 1997. *Plan para mejorar la gestión costera*. Barcelona España: Gestión de Sistemas Oceanográficos del Pacifico Oriental. Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO. IOC/INF-1046. 432 PP.

Salinas. G. F., 2000. *Mezcla turbulenta y transporte de masa en la Bahía y Ensenada de La Paz, B.C.S.: experimentación y modelación numérica*. Tesis doctoral. México: Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional, 260 p., Available: <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/15370>, [Consulted: september 23, 2021].

Salinas, G. F.; Zaytsev, O. V. & Troyo, D. S., 1997. "Corrientes, mareas y sus espectros en la playa norte de la barrera arenosa El Mogote, B. C. S. México". *Oceánides*, 12(2): 65-67, ISSN: 2448-9123.

Sedimentología para todos (2022). http://sedimentologia4all.blogspot.com/2016/03/el-diagrama-de-hjulstrom-nos-relaciona.html

SPOT., 2010. Imagen satelital pancromática E55633021002272T2A05007. EADS, Matra Systemes &

Information.
Unisys Weather., 2021. *National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center*, Available: <https://www.nhc.noaa.gov/data/>, [Consulted: October 12, 2021].