



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio sedimentológico de
dunas costeras parabólicas y
barján del este de Oaxaca,
México**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Lizeth Carlos Delgado

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Juan José Kasper Zubillaga



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Contenido

Agradecimientos	5
Resumen	6
Abstract	7
1. Introducción	8
1.1 Justificación.....	9
1.2 Objetivo.....	10
1.2.1 General	10
1.2.2 Particular	10
2. Marco teórico	11
2.1 Mecanismos de transporte y tamaño de grano	11
2.2 Clasificación de dunas.....	12
2.3 Parámetros texturales	14
2.4 Redondez.....	14
3. Área de estudio	15
3.1 Clima.....	15
3.2 Vientos Tehuanos.....	17
3.3 Geomorfología continental y costera	17
3.3.1 Provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur	17
3.3.2 Subprovincia Costas del Sur.....	18
3.3.3 Llanura Costera de Oaxaca	18
3.4 Red fluvial y circulación costera	19
3.5 Marco geológico.....	19
3.6 Desprendimientos.....	21
4. Metodología	22
4.1 Trabajo de campo.....	22
4.1.1 Muestreo.....	22
4.2 Vientos	22
4.3 Mapas de pendientes	23
4.4 Análisis de laboratorio	23
4.4.1 Análisis de tamaño de grano por láser.....	23
4.4.2 Análisis modal.....	23
4.4.3 Análisis de redondez	24

4.5	Análisis estadístico	24
5.	Resultados	25
5.1	Caracterización de las dunas	25
5.2	Vientos	27
5.2.1	Ventifactos y estrías eólicas	28
5.3	Pendientes	29
5.4	Influencia meteorológica: Desprendimientos rocosos.....	29
5.5	Análisis textural.....	30
5.6	Redondez.....	35
5.7	Análisis estadístico.....	36
5.7.1	Prueba de correlación	36
5.7.2	Análisis Discriminante Lineal (ADL)	36
6.	Discusión	38
6.1	Mecanismos de transporte.....	38
6.2	Composición	39
6.3	Redondez.....	40
6.4	Geomorfología, clima y tamaño de grano.....	40
6.5	Dinámica costera: influencia en el tamaño de grano.....	41
6.6	Implicaciones del ADL	42
	Conclusiones	43
	Fuentes consultadas	44
	Anexo 1: Parámetros texturales.....	55
	Anexo 2: Redondez.....	56
	Anexo 3: Equipo para análisis de muestras	57
	Anexo 4: Valores granulométricos.....	58
	Anexo 5: Valores de redondez.....	60
	Índice de figuras	61
	Índice de Tablas.....	62

*A todas la niñas y mujeres que han formado directa e indirectamente parte
de mi vida.*

“Las amo, valoro y respeto en mi mente, corazón y alma”

(Dworkin, 1975, p.73).

Agradecimientos

A mi madre y padre, por su continuo amor y confianza. Por guiarme cuando el sol estaba cubierto por nubes densas y oscuras.

A mi hermana, que su experiencia ha sido de gran enseñanza. Gracias por ser mi compañera de aventuras.

A mi director de tesis, Juan Kasper. Le agradezco hacerme parte de su grupo de trabajo, gracias a usted, descubrí un mundo nuevo. Gracias por su tiempo, paciencia y constancia.

A mis sinodales, M. en C.T. Yoalli Bianii Hernández Marmolejo, Dra. Mayumy Amparo Cabrera Ramírez, M. en C. Noé Santillán Piña y M. en ED. Miguel Idelfonso Vera Ocampo por sus oportunas observaciones y correcciones. Fueron decisivas y útiles para elevar la calidad de mi trabajo.

En general quiero agradecer a todas y todos mis colegas y amigos que “*aprecio y admiro, no por costumbre y por contacto sino también por sus méritos*” (Shelley, 1978, p. 249). En especial, agradezco a mis amigos Manuel y Brandon por su apoyo y compañía en el viaje de campo; por ser entrañables amigos y colegas con los que compartí inolvidables momentos. También agradezco a mi amiga Yalina que, aunque nuestros caminos se tornaron diferentes, es y fue incondicional. Tus palabras de aliento me motivaron a iniciar y terminar este trabajo con éxito.

Finalmente, al proyecto PAPIIT *Estudio de dunas costeras y continentales en México: implicaciones para propuesta de programas piloto de energía eólica (IN105919)*, por la beca otorgada para la realización de este trabajo en el periodo de abril a diciembre 2021.

Resumen

Las dunas costeras de Oaxaca, México son del tipo barján, barjanoide, parabólica, ascendente y descendente. Este trabajo explica los factores geológicos y físicos que producen polimodalidad en las distribuciones de tamaño de grano. Esto, mediante el análisis de parámetros texturales de tamaño de grano y su relación con los vientos, las corrientes litorales y las condiciones climáticas del área. Las fracciones de arena fina están asociadas a la deflación del viento que remueve los minerales ligeros y deja atrás los pesados. Estos son generados por la erosión de granitos y rocas volcanosedimentarias, respectivamente. La arena gruesa a media es producida por la red fluvial y la corriente litoral. Adicionalmente, el impacto de lluvias y huracanes en la costa induce desprendimientos rocosos de los afloramientos graníticos y volcanosedimentarios que contribuyen a la acumulación de arena gruesa a media en los sistemas de dunas.

Palabras clave: Duna, Tamaño de grano, Granitos, Secuencia volcanosedimentaria, Huracanes, Oaxaca.

Abstract

The coastal dunes of Oaxaca, Mexico develop tall dunes characterized by barchan, barchanoid, parabolic, climbing, and falling dunes. This thesis elucidates the geological and physical factors that produce probable polymodality in their grain size distributions. This is done by the analyses grain-size textural parameters and their relationship to wind patterns, longshore drifts and climatic conditions in the area. Fine-grained size sands are associated with wind deflation that removes light minerals onshore and leave heavy mineral lag deposits behind. They are mainly generated by the erosion of granite and volcano-sedimentary rocks respectively. Coarse to medium grained sand sizes are produced by fluvial input and longshore drifts along the coast. Additionally, the impact of heavy storms/hurricanes in the coastal produce landslides of nearby outcrops of granitic and volcano sedimentary rocks that contribute to the accumulation of coarse to medium sized sands in the dune systems.

Key words: Dune, Grain-size, Granites, Volcano-sedimentary sequence, Hurricanes, Oaxaca.

1. Introducción

La sedimentología es la ciencia que estudia la clasificación, origen y procesos mediante los que, se forman los sedimentos y las rocas sedimentarias (Boggs, 2006). Dichos procesos ocurren sobre la superficie de la Tierra en los diversos ambientes sedimentarios.

Los sistemas de depósitos eólicos forman parte de los ambientes costeros. Se forman en la interface entre los sistemas terrestre, oceánico y atmosférico (Pye, 1983). Las dunas de arena son depósitos eólicos formados por la acumulación de arena suelta transportada por el viento. Varían en tamaño desde menos de un metro a varios kilómetros (Glenn, 1979; Pye y Tsoar, 2009). Estas tienen una pendiente suave donde los vientos impactan arrastrando los granos de arena (barlovento), una parte más alta (cresta) donde el viento pierde velocidad y una pendiente más empinada (sotavento), donde los granos de arena se depositan por efecto de la gravedad (Jiménez Orocio y Hesp, 2014).

Los análisis de distribución de tamaño de grano son útiles en la investigación de depósitos eólicos; el tamaño de grano controla los diferentes mecanismos de transporte así como el desarrollo de dunas (Zhang y Dong, 2015). Alrededor del mundo, dichos estudios se realizan desde los años 40's (Bagnold, 1941; Folk y Ward, 1957; Lancaster, 1981; Livingstone *et al.*, 1999; Pye, 1983; Tsoar, 2001). Los estudios se han enfocado en entender la bimodalidad y polimodalidad de la arena de duna como factor en la determinación de mecanismos físico-químicos (Abuodha, 2003; Lancaster *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2019).

En México, los análisis texturales de arena de dunas continentales y costeras son extensos. Kasper-Zubillaga *et al.*, (2005; 2007; 2009) efectuaron un análisis sedimentológico, composicional y geoquímico en las dunas costeras y continentales del Desierto de Altar, Sonora, para determinar su procedencia. El estudio fue sustentado con un análisis de redondez en granos de cuarzo. Un análisis similar fue efectuado en el Desierto del Vizcaíno. En esta región, los vientos hacia la costa generan arena fina, bien clasificada, simétrica y con distribuciones mesocúrticas (Kasper-Zubillaga y Zolezzi-Ruiz, 2007).

Mejía-Ledezma *et al.*, (2020) y Mendieta-Lora *et al.*, (2018), analizaron mineralógica, geoquímica y texturalmente arena de playa y dunas confinadas por el Cinturón Volcánico

Transmexicano. Evaluaron las implicaciones del transporte fluvial, eólico y marino, así como las tasas de meteorización química.

Kasper-Zubillaga *et al.*, (2021) realizaron un estudio petrográfico y geoquímico de dunas de Oaxaca, México. Reportan que los sistemas de dunas son producto de la denudación de granitos, esquistos y rocas volcanosedimentarias.

Los estudios realizados en el área de interés han estado mayormente enfocados en la comprensión de los eventos climatológicos, oceanográficos y geológicos que dominan la región (Carfantan, 1981, 1983; Delgado-Argote, 1989; Elliott *et al.*, 2004; Morán-Zenteno *et al.*, 2000; Ortega-Gutiérrez, 1981; Ortiz Olvera, 2019; Pérez-Gutiérrez, 2010; Romero-Centeno *et al.*, 2003; Trasviña *et al.*, 1995; Velázquez-Muñoz *et al.*, 2011).

La región costera de Oaxaca, México es una región interesante por confinar dunas simples de diversas morfologías y alturas. Este trabajo está enfocado en determinar los mecanismos que dominan el transporte de arena en megadunas de Oaxaca, México. Se efectuó el análisis granulométrico de arena de dunas costeras de tres localidades: Concepción Bamba, Chipehua y Playa Azul. Se utilizaron técnicas estadísticas para determinar los parámetros texturales y el análisis de láminas delgadas para evaluar redondez.

1.1 Justificación

La región costera del este de Oaxaca, México es un laboratorio natural para observar los mecanismos fluviales, eólicos y marinos que dominan la distribución del tamaño de grano de arena de dunas costeras. Las principales preguntas a resolver son: ¿Cuál es el mecanismo de transporte dominante? y ¿Qué papel juega el clima en la distribución del tamaño de grano? La falta de estudios texturales en la arena de dunas de Oaxaca da lugar a la implementación de diversas técnicas de análisis con el fin de entender la compleja dinámica de las dunas. Aún hay aspectos de su formación, historia y evolución geológica que siguen siendo poco entendidos. Dar a conocer los procesos que interactúan en la región costera es clave para resaltar la importancia del análisis textural e impulsar el desarrollo de proyectos de investigación. Este tipo de estudios aportan información preliminar sobre el transporte de arena y su relación espacial y temporal con los vientos locales y regionales. La integración

de proyectos de parques eólicos para la sustentabilidad energética tiene gran vinculación con este tipo de estudios.

1.2 Objetivo

1.2.1 General

Analizar los mecanismos de transporte dominante mediante el estudio de tamaño de grano para entender parte de la historia de las dunas costeras de Oaxaca, México.

1.2.2 Particular

- ◆ Determinar la existencia de diferentes distribuciones de tamaño de grano en las tres localidades de estudio.
- ◆ Precisar el factor que está dando los cambios granulométricos en la arena de dunas (geomorfología, clima o vientos).
- ◆ Analizar los grados de redondez de tres grupos de especies minerales y evaluar el transporte eólico.

2. Marco teórico

2.1 Mecanismos de transporte y tamaño de grano

Los procesos eólicos involucran los mecanismos de erosión, transporte y depósito (Pye, 1983; Pye y Tsoar, 2009).

El transporte eólico de sedimentos implica la interacción entre el viento y la superficie del suelo. Hay tres modos de transporte eólico (**Fig. 1**). Éstos dependen principalmente del tamaño de grano del sedimento disponible (Bagnold, 1941; Lancaster, 1995).

Las partículas muy pequeñas ($< 5 \phi$ y $4 - 5 \phi$), se transportan en suspensión (Baas, 2019; Tegen y Fung, 1995). Estas partículas ejercen un menor control en el tamaño de grano de las dunas, sin embargo, son significativas en el transporte de polvo eólico (Muhs, 2013).

En las dunas, el control del tamaño de grano está dado por las partículas entre 4 a 1ϕ de diámetro. Se mueven por saltación, son arrancadas de la superficie y arrastradas en dirección del flujo de aire siguiendo una trayectoria balística hasta regresar a la superficie (Baas, 2019). El impacto de las partículas transportadas por saltación también puede causar movimiento de corta distancia de los granos adyacentes por reptación (Lancaster, 1995). Las partículas más grandes ($> 1 \phi$) permanecen en estrecho contacto con la superficie moviéndose por arrastre o rodamiento.

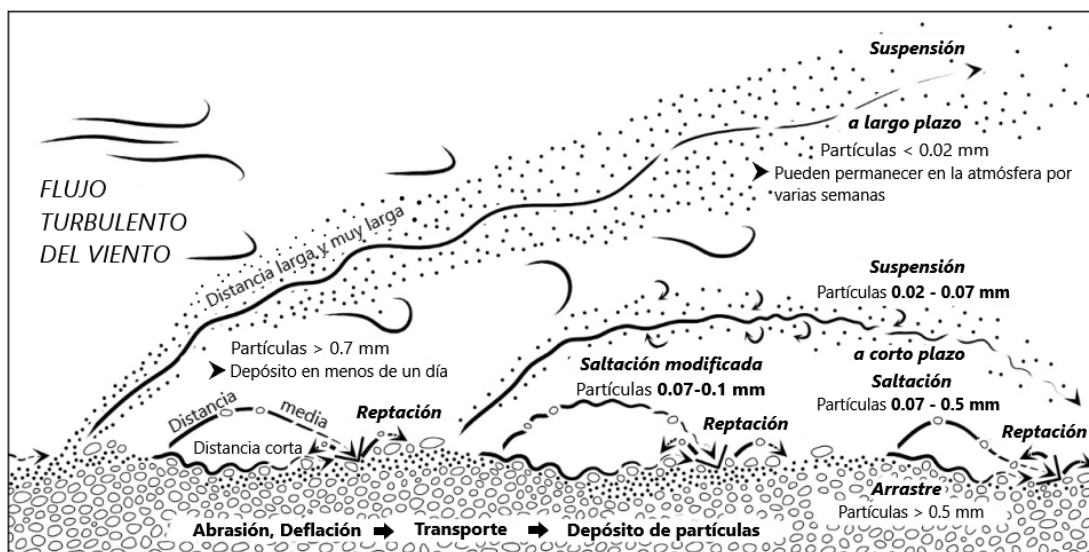


Fig. 1. Modos de transporte eólico. Modificada de Opp *et al.*,(2021)

2.2 Clasificación de dunas

La enorme variedad de dunas de arena hace que su clasificación sea una tarea difícil. Sus patrones se han descrito utilizando clasificaciones morfológicas y morfodinámicas (Lancaster, 1995). Sin embargo, existe un consenso en los requerimientos para su formación: 1) suministro abundante de arena; 2) tamaño de grano; 3) vientos; 4) clima y 5) condiciones que favorezcan la sedimentación, como obstáculos topográficos, relieve o vegetación (Lancaster, 2005; Pye y Tsoar, 2009).

La clasificación más sencilla es la propuesta por McKee (1979). Propuso que las dunas pueden ocurrir de tres formas, simples, compuestas y complejas. Las dunas simples consisten en formas de dunas individuales que están espacialmente separadas de las dunas cercanas. Las dunas compuestas consisten en dos o más dunas simples de la misma morfología que se superponen. En las dunas complejas dos o más dunas simples de diferente morfología se unen o se superponen. A su vez, clasificó a las dunas simples morfológicamente, es decir, en función de su forma. Algunos tipos son:

(a) Dunas barján

Representan la morfología clásica de las dunas, con forma de media luna, crestas alineadas perpendicularmente a la dirección del viento dominante y cuernos dirigidos paralelos a ella (**Fig. 2a**). La pendiente de barlovento es típicamente convexa con una pendiente máxima promedio de 12° , mientras que la pendiente de sotavento se caracteriza por una cara de deslizamiento de 33° a 34° (Pye y Tsoar, 2009; Wiggs, 2013). Son comunes en áreas limitadas de suministro de arena y vientos unidireccionales.

(b) Dunas barjanoide

Se forman cuando el suministro de arena aumenta; son dunas asimétricas que en vista de planta se observan medias lunas conectadas. Tienen pendientes suaves a barlovento y pronunciadas ($32 - 34^\circ$) a sotavento (**Fig. 2b**) (Glenn, 1979).

(c) Dunas parabólicas

Tienen forma de U (parábolas) o V, con los brazos apuntando contra el viento (**Fig. 2c**). Estos últimos son comunes que se encuentren anclados por vegetación (Wiggs, 2013). Son

habituales en entornos áridos, semiáridos y húmedos. Pueden ser activas o totalmente estabilizadas e inactivas. Los regímenes de viento asociados generalmente se consideran unimodales o bimodales. (Goudie, 2011; Nishimori y Tanaka, 2018).

(d) Dunas asociadas a obstáculos topográficos (dunas de montaña)

Los obstáculos topográficos como acantilados, colinas, cantos rodados o arbustos pueden acelerar y desacelerar el flujo de aire y crear turbulencias, lo que a menudo conduce a una mayor erosión, depósito y / o transporte de sedimentos (Chojnacki *et al.*, 2010).

La acumulación de arena en el frente de cualquier obstáculo topográfico, forma dunas eco y ascendentes, en la cima forma dunas de cima o al reverso forman dunas descendentes (**Fig. 2d**). Su formación depende de la combinación de tres factores: distancia horizontal, altura y ángulo de pendiente del obstáculo (Liu *et al.*, 1999; Qian *et al.*, 2011; Tsoar, 1983).

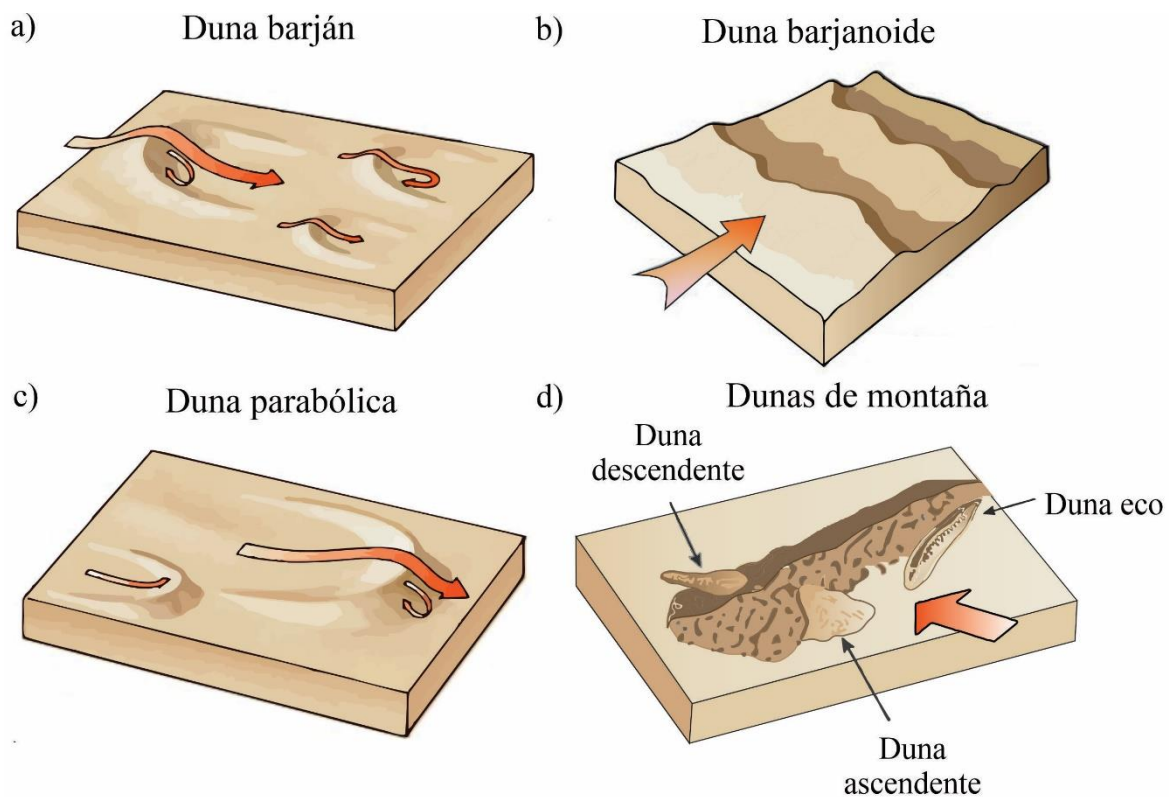


Fig. 2. Clasificación de dunas. Modificado de McKee (1979).

2.3 Parámetros texturales

El tamaño de grano (M_z), es el diámetro equivalente a la media aritmética o tamaño medio de grano (Glenn, 1979). Se utilizan las divisiones de clases de tamaño y la terminología de la escala Udden-Wentworth. También puede expresarse con valores phi (ϕ). Los últimos permiten simplificar la representación gráfica y manipulación estadística de los datos de tamaño de grano (Krumbein, 1934) (Ver Anexo 1).

La clasificación (σ) es la medida de dispersión del tamaño de grano alrededor de la media (Boggs, 2006). La expresión matemática de la clasificación es la desviación estándar. Depende de tres factores principales: (1) El tamaño del material suministrado al medio, (2) tipo de depósito y (3) las características del fluido (Folk, 1980).

La asimetría refleja la clasificación de las "colas" de una población de tamaño de grano. Si una población tiene una cola con exceso de partículas finas está sesgada positivamente o asimétrica hacia los finos. Las poblaciones con una cola con exceso de partículas gruesas están sesgadas negativamente o asimétricas hacia los gruesos (Folk, 1955; Martins, 1965)

La curtosis es la forma de la curva de frecuencias de tamaño de grano (Folk y Ward, 1957) (Ver Anexo 1).

2.4 Redondez

La redondez es un atributo para caracterizar la sedimentología de ambientes eólicos. Se define como la curvatura de las esquinas en la superficie de una partícula (Krumbein, 1941; Powers, 1953; Resentini *et al.*, 2018; Zhao y Wang, 2016).

Tradicionalmente se utilizan las escalas visuales de redondez. Los valores considerados son los propuestos por Krumbein (1941) y modificados por Resentini (2018) (Ver Anexo 2: **Fig. 21**).

3. Área de estudio

El área de estudio está ubicada en la costa sur-este del Pacífico Mexicano, entre 16° 0' y 16° 20' latitud norte; 95 ° 36' y 95° 12' longitud oeste, al oeste del Golfo de Tehuantepec (**Fig. 3**).

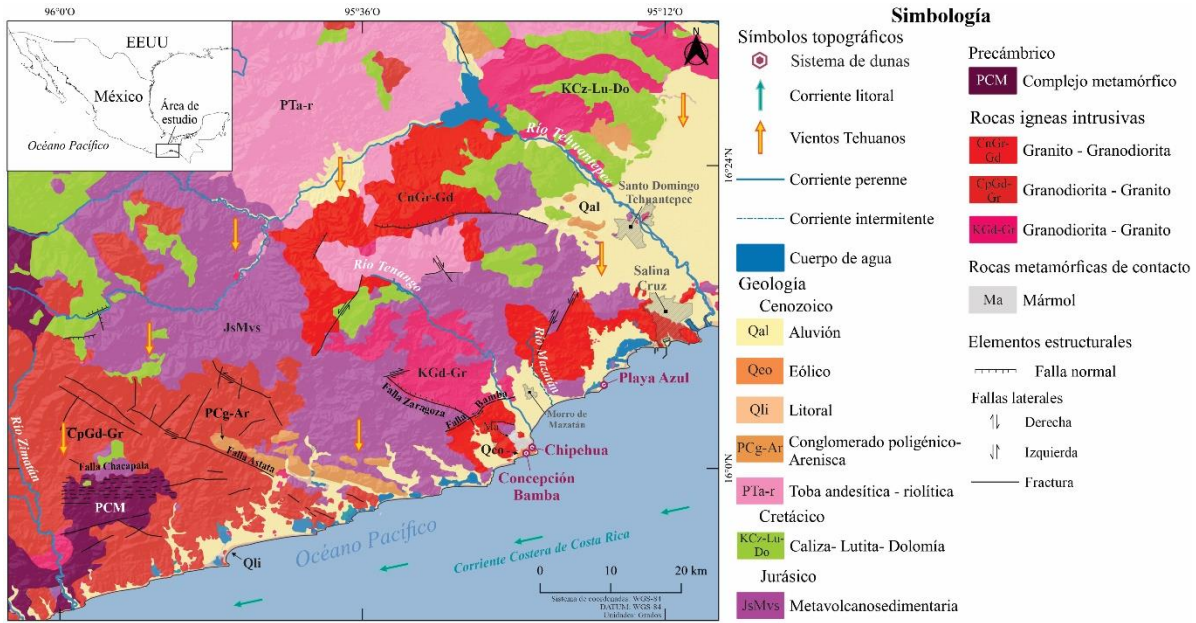


Fig. 3. Mapa geológico del área de estudio. Se señalan los vientos, corrientes dominantes y ubicación de las dunas de estudio. Modificado de Carta Geológico-Minera Juchitán E15-10 D15-1 Oaxaca y Chiapas (SGM, 2000) y Carta Geológico-Minera Morro Mazatán E15-C82 Oaxaca (SGM, 2020).

3.1 Clima

La región costera de Oaxaca está definida como una región cálida subhúmeda con lluvias en verano e inviernos fríos (García, 2004). Las temperaturas medias mínimas y máximas van de 26 y 32 °C, respectivamente (World Weather Online, 2021). La precipitación media anual oscila entre 800 a 1,000 mm • año⁻¹ (INEGI, 2017) , aunque en los últimos cuatro años, ésta no ha sido mayor que 400 mm • año⁻¹ (World Weather Online, 2021). La temporada de mayor precipitación se da en verano y parte del otoño (mayo a octubre), épocas de ciclones tropicales.

Los ciclones tropicales que impactan al estado de Oaxaca, se originan en el Golfo de Tehuantepec y aportan lluvias torrenciales a la costa de Oaxaca. En 1997 impactaron dos de los ciclones tropicales (CT) más violentos registrados en la región. En octubre el huracán *Pauline* ingresó por el norte con dirección hacia la costa del Pacífico Sur Mexicano. Alcanzó la categoría 4 en la escala de intensidad Saffir-Simpson originando una lluvia máxima en 24 h mayor a 400.0 mm (Hernández Unzón y Bravo Lujan, 2009a). El huracán *Rick*, categoría 1, atravesó el Istmo de Tehuantepec con lluvia máxima en 24 h de 243.0 mm en Santo Domingo Tehuantepec (Hernández Unzón y Bravo Lujan, 2009b). Variedad de tormentas tropicales (TT) y depresiones tropicales (DT) han afectado la región. Entre las más representativas se encuentran: TT *Olaf* (septiembre-octubre, 1997), DT *No. 11-E* (septiembre, 2010), DT *No. 12-E* (octubre, 2011), DT *1-E* (junio, 2016) (CONAGUA, 2012; Ramos García, 2016). Desde 1971, la zona ha estado expuesta a 6 ciclones tropicales, 8 tormentas tropicales y 7 depresiones tropicales. La **Fig. 4**, muestra algunos de los diversos eventos meteorológicos y sus rutas de desplazamiento.



Fig. 4. Mapa de las rutas de eventos meteorológicos que han afectado el Golfo de Tehuantepec. Modificado del Atlas de Riesgos del municipio de Oaxaca de Juárez (IGL, 2011).

3.2 Vientos Tehuanos

La región del Golfo de Tehuantepec está sujeta a eventos de viento extremo durante los meses de invierno. Estos vientos son conocidos como Tehuanos. Producen un considerable descenso de la temperatura superficial del mar y surgencias (Romero-Centeno *et al.*, 2003).

Los Tehuanos se forman cuando existe una diferencia de presión atmosférica entre el Golfo de México y el Pacífico Tropical, originando un flujo de viento a través del Istmo de Tehuantepec (depresión topográfica de 40 km de ancho y 220 de longitud que separa las aguas de Océano Pacífico de las del Golfo de México) (Trasviña *et al.*, 1995; Velázquez-Muñoz *et al.*, 2011).

Los vientos se producen todo el año, pero son más frecuentes (75 - 80 %) y veloces (10 a 20 m/s con ráfagas de hasta 30 m/s) durante la temporada norte, de noviembre a febrero, con máxima intensidad en enero. A partir de marzo, hay una disminución sustancial de la frecuencia de los vientos. Su intensidad se mantiene alta hasta abril. Durante el final de la primavera y el verano (mayo-septiembre) los vientos son menos frecuentes (15 - 30 %), aunque se ha registrado un máximo relativo en julio (Gallegos y Barberán, 1998; Romero-Centeno *et al.*, 2003; Trasviña *et al.*, 1995).

La dirección de los vientos está influida por la topografía regional. Romero-Centeno *et al.*, (2003) divide los vientos en: del norte (N), noroeste (NW) y noreste (NE) y un grupo diferente del sureste (SE) y suroeste (SW). Elliott *et al.*, (2004) reporta que en áreas con bajas elevaciones dominan los procedentes del N, en lugares elevados (500 a 1,000 m), dominan los del NE, mientras que en las zonas costeras dominan los del S o SW y N a NE.

3.3 Geomorfología continental y costera

3.3.1 Provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur

El área de estudio se encuentra limitada por la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur. Ésta se extiende paralela a la costa del Océano Pacífico dentro de los estados de Jalisco, Michoacán, Colima, Guerrero, Morelos, Edo. de México, Puebla y Oaxaca. Tiene una longitud aproximada de 1,200 km y una altura que varía de los 2,000 a 3,000 m (Morán-Zenteno *et al.*, 2018). Limita al norte con el Cinturón Volcánico Transmexicano, al este con

la Llanura Costera del Golfo, al sur y suroeste con el Océano Pacífico. Está dividida en diez subprovincias. Las localidades de estudio se encuentran dentro de la subprovincia Costas del Sur (Fig. 5).

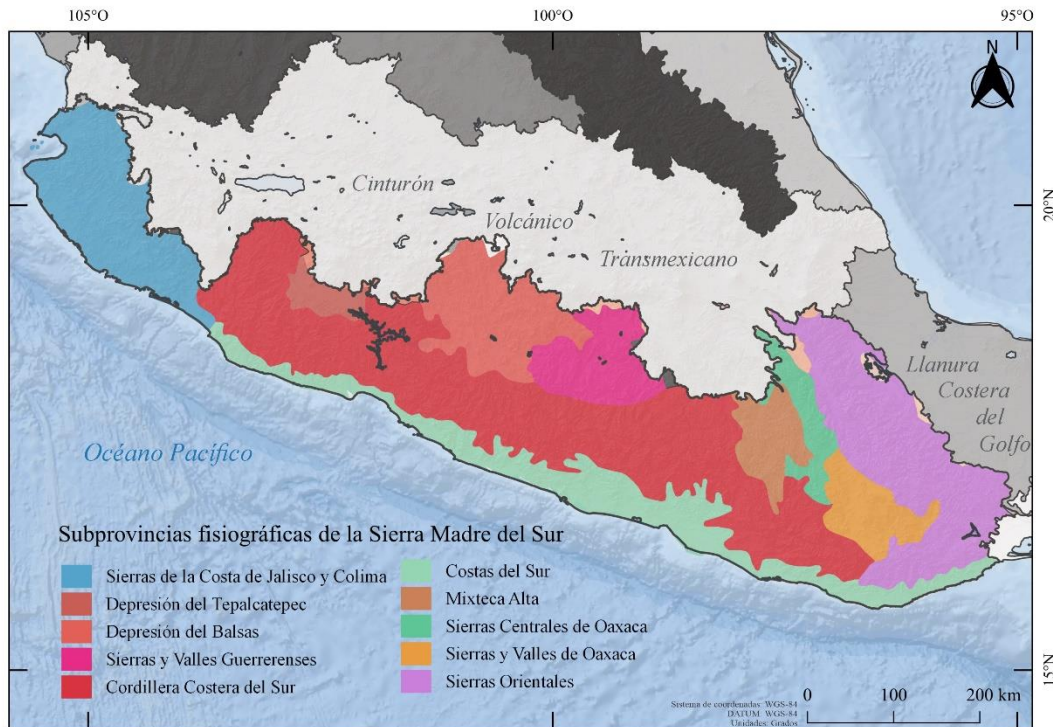


Fig. 5. Subprovincias fisiográficas de la Sierra Madre del Sur.

3.3.2 Subprovincia Costas del Sur

Comprende sierras con alturas de 500 a 1,850 m. A partir de los 500 m, la geomorfología está representada por lomeríos al este y oeste. Los primeros presentan alturas de 160 m e inclinaciones que varían entre los 17° a 45°, mientras que los del occidente presenta una altura máxima de 280 m con inclinaciones que varían entre los 15° a 64° (INEGI, 2017; Martínez-Amador *et al.*, 2000).

3.3.3 Llanura Costera de Oaxaca

La región tiene aproximadamente 20 km de ancho, con características litorales rocosas y pequeñas bahías como la Bahía Ventosa y la Bahía Salina Cruz, localizadas al SE y S de Salina Cruz, respectivamente (Kasper-Zubillaga *et al.*, 2021). La región también está caracterizada por salientes continentales, rocosas y redondeadas. Se observan sobre la costa Punta Chipehua, Punta Chivo, Punta Conejo y Punta Ventosa. También cuenta con islas que se encuentran dentro de las lagunas de la región.

3.4 Red fluvial y circulación costera

La red fluvial de la costa de Oaxaca se produce a partir de la irregular orografía de la Sierra Madre del Sur con arreglos dendríticos a subparalelos (**Fig. 3**), con influencia hacia la costa del Pacífico Sur (Kasper-Zubillaga *et al.*, 2021).

El área de estudio está controlada por las regiones hidrológicas (RH) 21 y 22, Costa de Oaxaca y Tehuantepec, ambas constituidas por cuencas y subcuencas (CONAGUA, 2014).

En la RH 21, se localizan los ríos Zimatán y Mazatán. El primero tiene una longitud de 50 km, se origina en la Sierra Madre del Sur y desemboca en el Océano Pacífico (Martínez-Ramírez *et al.*, 2004). El segundo, es un río intermitente que mide aproximadamente 15 km de longitud (Google Earth, 2021).

Dentro la RH 22, se encuentra el río Tehuantepec. Es el principal río de la región, con una longitud de 240 km. Desemboca $30 \text{ m}^3/\text{s}$ en el Golfo de Tehuantepec (INEGI, 2004).

La circulación costera en el Golfo de Tehuantepec está caracterizada por la Corriente Costera de Costa Rica (CCCR). Con dirección noroeste, a lo largo de la costa del Pacífico de América Central, a una velocidad media de $20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ y volumen de 1.2 y 5 millones de $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (Brenes, 1985; Kessler, 2006). Frente a las costas de México, la CCCR gira hacia al oeste uniéndose a la Corriente Ecuatorial del Norte (CEN) (Schönau y Rudnick, 2015). Este giro es mayormente impulsado durante el invierno cuando los vientos Tehuanos desvían la corriente inhibiendo la entrada de agua tropical ($T > 25^\circ\text{C}$) a la costa mexicana (Molina-Cruz y Martínez-López, 1994).

3.5 Marco geológico

La región se encuentra limitada por las rocas de tres terrenos tectonoestratigráficos, Oaxaca, Xolapa y Cuicateco (Campa y Coney, 1983; Ortega-Gutiérrez, 1981; Sedlock *et al.*, 1993).

Las rocas más antiguas de la región están representadas por rocas metamórficas de alto grado de edad Proterozoica del terreno Oaxaca. Consiste en ortogneises cuarzofeldespáticos y paragneises, rocas metasedimentarias, charnokitas y anortositas en facies de granulita. En contacto inconforme sobreyacen sucesiones sedimentarias marinas a continentales del Paleozoico (Centeno-García, 2017; Ortega-Gutiérrez, 1981; Sedlock *et al.*, 1993).

El Terreno Xolapa (Campa y Coney, 1983) y su basamento, el Complejo Xolapa (**Fig. 3**, PCM) está representado por migmatitas en facies de anfibolitas, gneises y esquistos que se encuentran intrusionadas por plutones cenozoicos (Ortega-Gutiérrez, 1981). La mineralogía de las rocas metamórficas comprende cuarzo, plagioclasa, biotita, feldespato potásico, granate, circón y clorita (Pérez-Gutiérrez *et al.*, 2009). En el área de estudio, estas rocas afloran en las proximidades del río Zimatán.

Al NE del área de estudio está el Terreno Cuicateco. Una franja con orientación NW- SE con una longitud mayor a los 230 km y anchura de 20 km. Está formado por una secuencia de rocas vulcanosedimentarias con metamorfismo de bajo grado del Jurásico-Cretácico (**Fig. 3**, JsMvs) (Campa y Coney, 1983; Carfantan, 1983; Delgado-Argote, 1989; Moreno, 2006; Sedlock *et al.*, 1993).

Su litología comprende serpentinitas, leucogranitos, metagranitoides, migmatitas, metabasaltos, sedimentos vulcanogénicos, filitas-esquistos de metamorfismo de bajo grado y mármol (**Fig. 3**, Ma).

Sobre la secuencia metavolcanosedimentaria yacen calizas, lutitas y dolomías (Cretácico Superior-Inferior) (**Fig. 3**, KCz-Lu-Do).

El Cenozoico está representado por rocas volcánicas, plutónicas, depósitos piroclásticos de composición intermedia a riolítica, depósitos de bloques y cenizas y plutones (Iriando *et al.*, 2004; Pérez-Gutiérrez, 2010) de la Sierra Madre del Sur (SMS). El cinturón plutónico de la SMS varía de basaltos-gabros hasta riolitas-granitos con carácter subcalalino (Morán-Zenteno *et al.*, 2018).

Los plutones emplazados en el área de estudio son: Xadani (monzogranito, monzodiorita y granodiorita), Astata (monzogranito), Bamba (monzogranito), Salina Cruz (sienogranito), Morro-Salina Cruz (Cuarzomonzonita) y Jalapa del Marqués (Granito - Granodiorita). Están compuestos de cuarzo, feldespato, plagioclasa, biotita, anfíboles, clinopiroxenos, titanita y opacos (Ortiz Olvera, 2019).

En el área afloran conglomerados polimícticos con clastos de rocas metamórficas, calizas, fragmentos de cuarzo y areniscas (Paleoceno-Eoceno) (**Fig. 3**, PCg-Ar).

Los depósitos costeros (**Fig. 3**, Qli) son de composición feldespática y lítica, enriquecidas en líticos plutónicos, metamórficos y volcánicos (Carranza-Edwards *et al.*, 2018).

Los depósitos de origen aluvial están compuestos por fragmentos de rocas ígneas y metamórficas, así como de monocristales de cuarzo, feldespato y micas (SGM, 2000).

3.6 Desprendimientos

La carta de inestabilidad de laderas, reporta que las localidades Concepción Bamba, Chipehua y Playa Azul muestran desprendimiento, caída de fragmentos y bloques rocosos asociadas a zonas de contacto entre las rocas de la secuencia metavolcanosedimentaria y los cuerpos plutónicos (Hernández-Hernández *et al.*, 2003).

4. Metodología

4.1 Trabajo de campo

4.1.1 Muestreo

La recolección de muestras se llevó a cabo en abril de 2019. El material repositivo de la colecta está resguardado en la Arenoteca del Laboratorio de Geoquímica del ICMYL, UNAM; este fue consultado y revisado para el desarrollo de este trabajo (Ver Anexo 3: **Fig. 22**).

El estudio está exclusivamente dedicado a dunas del este: Concepción Bamba (CB; n=7), Chipehua (CH; n = 8) y Playa Azul (PA; n = 5). Las muestras de arena, de aproximadamente 500 g, fueron tomadas de los flancos (F), barlovento (B), sotavento (S) y crestas (C) de las dunas (**Fig. 6**), además se colocaron en bolsas de plástico, se etiquetaron y sometieron a análisis de tamaño de grano.

En otoño del 2021, se realizó un reconocimiento de campo para ampliar la base de datos de imágenes y reforzar las observaciones de los rasgos morfológicos de las dunas.



Fig. 6. Partes de una duna parabólica en Concepción Bamba. Fotografía de Kasper-Zubillaga (2019).

4.2 Vientos

Se utilizó una base de datos promedio de cinco años (2014 - 2019) para elaborar rosetas de viento que muestran la frecuencia del viento (%), velocidad ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) y dirección en todo el Golfo de Tehuantepec. Los datos del viento fueron obtenidos por Remote Sensing Systems (<http://data.remss.com/ccmp/v02.0/>). Los gráficos de viento se construyeron con el paquete air-R desarrollado para observar las variaciones mensuales de los parámetros del viento.

4.3 Mapas de pendientes

Se crearon dos mapas de pendientes en QGIS 3.4.5-Madeira con la herramienta de análisis del terreno: Pendiente, para evidenciar la formación de dunas del tipo ascendente y descendente. Se utilizaron dos modelos digitales de elevación (DEM) correspondientes a las cartas E15C82F4 (Concepción Bamba y Chipehua) y E15C83D1 (Playa Azul) del Servicio Geológico Mexicano (SGM).

4.4 Análisis de laboratorio

El repositorio del material disponible en la arenoteca fue tratado previamente de la siguiente manera: Las muestras fueron lavadas (aproximadamente 20 g de arena), con agua destilada; se decantaron cuidadosamente para remover las sales, pequeños fragmentos de madera y hojuelas de detritos no minerales. Las muestras fueron secadas en un horno a 40 °C durante un par de horas. Se utilizó cerca de 0.1 g de muestra para la determinación del tamaño de grano.

4.4.1 Análisis de tamaño de grano por láser

Los parámetros texturales se determinaron usando el analizador de tamaño de partícula laser (modelo Coulter LS230) que se localiza en el Laboratorio de Sedimentología del ICMYL, UNAM (Ver Anexo 3: **Fig. 23 a**). Este calcula el diámetro de la partícula a partir del patrón de difracción creado cuando el grano cae a través del rayo láser (Kasper-Zubillaga, Zolezzi-Ruiz, *et al.*, 2007; Livingstone *et al.*, 1999). El equipo Coulter se utiliza para la determinación del tamaño de grano de partículas entre -1.0ϕ a 14.6ϕ . Los valores de tamaño de grano se determinaron mediante canales análogos a los tamices para cada intervalo de tamaño en el equipo láser. Los valores fueron obtenidos en unidades micrométricas (μm) y después se convirtieron en unidades phi (ϕ) (Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards, 2005).

4.4.2 Análisis modal

El análisis modal de las dunas costeras de Oaxaca, se ha reportado previamente en un estudio mineralógico y geoquímico de la zona (Kasper-Zubillaga *et al.*, 2021).

4.4.3 Análisis de redondez

Basado en los trabajos de Krumbein (1941) y Resentini (2018), se observó el grado de redondez de tres grupos de especies minerales previamente observadas en un microscopio polarizante Velab VE-148 P con objetivo 4x (n= 15 láminas delgadas) (Ver Anexo 3: **Fig. 23 b**). Los minerales incluidos son: cuarzo mono y policristalino, feldespato potásico, óxidos de Fe-Ti, granate, líticos ígneos, sedimentarios y metamórficos. El análisis se realizó capturando fotografías digitales en el mismo microscopio.

A cada grano se le asignó un valor según la clasificación de Krumbein (1941): 0.1, muy anguloso; 0.2, anguloso; 0.3 - 0.4, subanguloso; 0.5 – 0.6, subredondeado; 0.7 - 0.8, redondeado; 0.9, muy bien redondeado (Ver Anexo 2). Se calculó la media, desviación estándar y límites de confianza de cada especie mineral.

4.5 Análisis estadístico

Las poblaciones de tamaño de grano se diferenciaron mediante el uso de histogramas. Se realizaron diagramas bivariados con los parámetros texturales de tamaño de grano entre las localidades.

Se realizó una prueba de correlación de Pearson ($\rho = 0.05$) para todos los datos.

Un análisis discriminante lineal fue llevado a cabo en el software Statistica para las dunas de las tres localidades. Se realizó a fin de discriminar entre las tres localidades en función de los parámetros texturales obtenidos.

5. Resultados

5.1 Caracterización de las dunas

El área de estudio está constituida por dunas de promedio 50 metros de altura. Las dunas en general son barján, parabólicas, barjanoides y ascendentes y descendentes (**Fig. 7**). Sus morfologías dependen de la estacionalidad de los vientos y el clima. Durante la temporada seca predominan las dunas barján y barjanoide, mientras que en la húmeda prevalecen las barján.



Fig. 7. Morfologías típicas de las dunas de estudio. (a) Parabólica; (b) Barján; (c) Barjanoide. Fotografías de campo de Kasper-Zubillaga (2019) y Carlos-Delgado (2021).

El enriquecimiento local de minerales ligeros y pesados propician la formación de laminación a barlovento y cresta de las dunas en las tres localidades donde se observa el control eólico (**Fig. 8**).

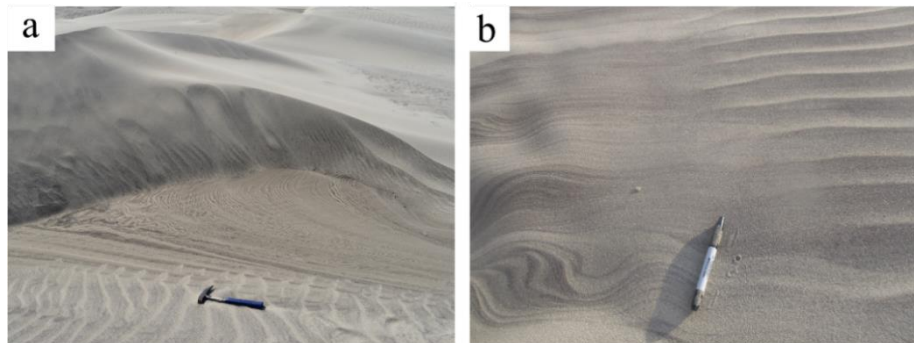


Fig. 8. Laminación en la superficie de las dunas. (a) Duna barján en Playa Azul. (b) Laminación en Concepción Bamba. Fotografías de campo de Kasper-Zubillaga (2019) y Carlos-Delgado (2021).

Concepción Bamba

Las dunas de Concepción Bamba (CB) tienen aproximadamente 200 metros de altura sobre el nivel del mar. Presentan morfología de tipo barján, parabólica y ascendente y descendente (**Fig. 9**). Los vientos Tehuanos tienen influencia en la generación de las últimas.

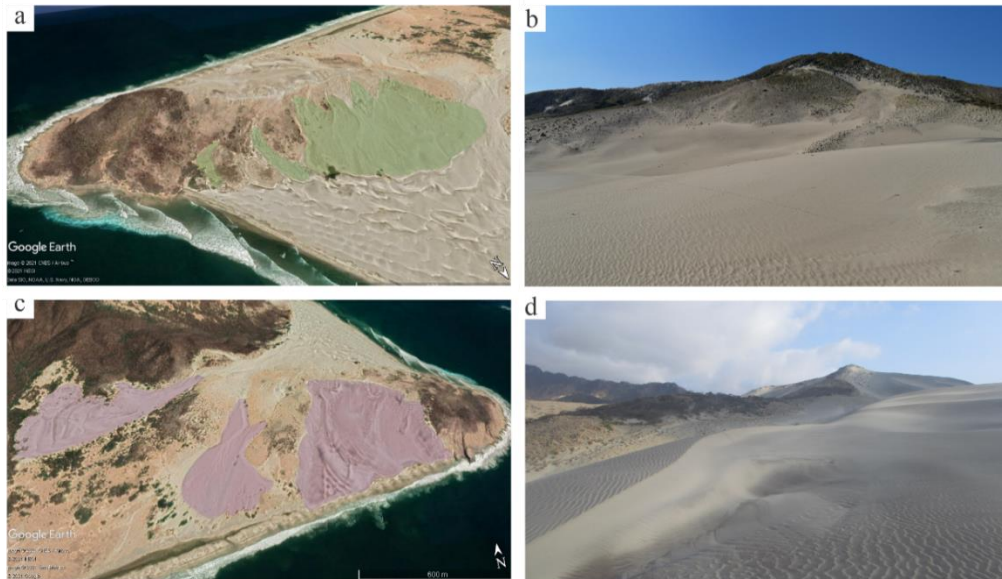


Fig. 9. Morfología de dunas de Concepción Bamba. (a y b) Dunas ascendentes. (c) Dunas descendentes. (d) Duna parabólica. Imágenes satelitales obtenidas de Google Earth (2021). Fotografías de campo de Kasper-Zubillaga (2019) y Carlos-Delgado (2021).

Chipehua

El sistema de dunas de Chipehua (CH) tiene altura aproximada de 20 a 30 metros sobre el nivel de mar (Google Earth, 2021); predominan las morfologías barján y barjanoide. Se encuentran confinadas por la geomorfología local, la cual controla su altura. Las dunas más altas son aquellas cercanas al promontorio geomorfológico. Adicionalmente, se forma pozas de grandes extensiones y profundidades en las concavidades de las dunas barján (**Fig. 10a y b**).

Playa Azul

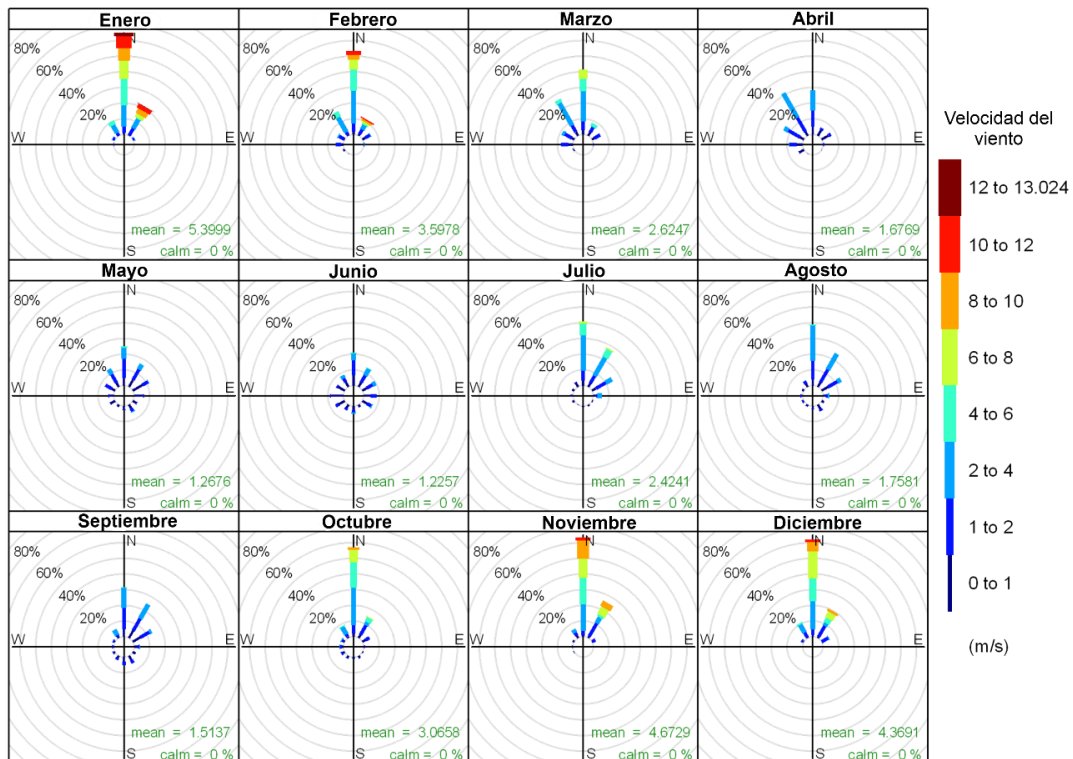
En contraste, las dunas de Playa Azul (PA) tienen altura aproximada de 15 a 25 metros sobre el nivel del mar (Google Earth, 2021); se localizan en un área costera abierta que permite la formación de dunas barján y barjanoide de mayor amplitud (**Fig. 10c y d**).



Fig. 10. Morfología de dunas de Chipehua y Playa Azul. (a y c) Dunas barján. (b y d) Dunas barjanoide. Fotografías de campo de Carlos-Delgado (2021).

5.2 Vientos

La roseta de vientos muestra una frecuencia promedio del 30 al 50 % con velocidades de 4 a $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y de 6 a $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (**Fig. 11**). La mayor velocidad es durante el mes de enero ($12\text{-}13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) con frecuencia del 70 %. Se observa que la dirección preferencial durante las épocas de otoño - invierno (octubre – febrero) es al norte (N), con algunas variaciones hacia el noreste (NE). De abril a junio se presentan las menores frecuencias del viento ($< 30 \%$), con velocidades que no exceden $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y sin alguna dirección preferencial. En julio, se observa un incremento en la velocidad del viento ($6\text{-}8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ con frecuencias del 40 %) (Romero-Centeno *et al.*, 2003), este máximo relativo disminuye un poco en los meses de agosto y septiembre.



Frecuencia de la dirección del viento (%)

Fig. 11. Roseta de vientos de datos promedio de cinco años (2014-2019) del área de estudio. Se muestra frecuencia, velocidad y dirección.

5.2.1 Ventifactos y estrías eólicas

La gran intensidad de los vientos se ve reflejada en las diversas litologías de la región. Los procesos de abrasión y erosión son evidentes con la presencia de ventifactos y estrías eólicas (**Fig. 12**). También, es evidente la presencia de la deflación sobre las dunas.

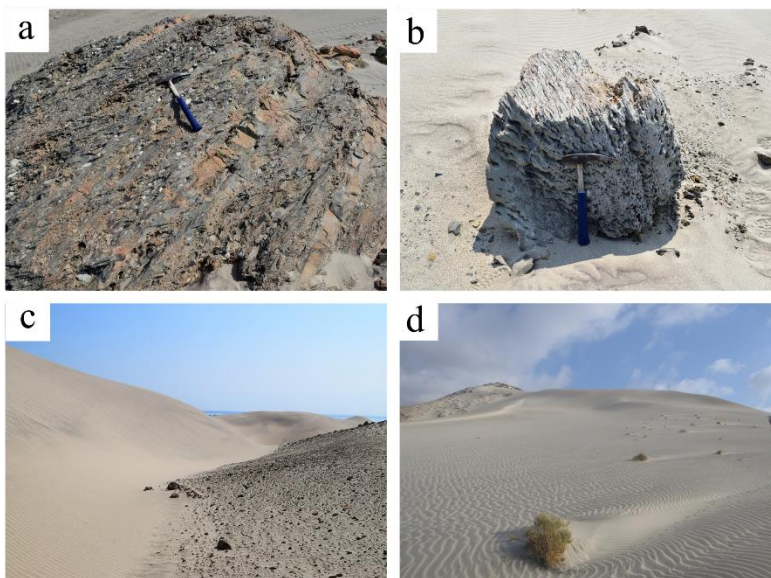


Fig. 12. Procesos de erosión eólica. (a) Estrías eólicas; (b) ventifactos en Playa Azul. (c y d). Deflación en Chipehua y Concepción Bamba. Fotografías de campo de Carlos-Delgado (2021).

5.3 Pendientes

El mapa de pendientes muestra que el promontorio de Concepción Bamba presenta ángulos que varían de los 13° hasta los 52° , con predominancia en los 13° a 25° (**Fig. 13 a**). Según las simulaciones de túnel de viento efectuadas por Tsoar (1983), Liu *et al.* (1999) y Qian *et al.*, (2011) pendientes menores o iguales a 50° forman dunas del tipo ascendente. En contraste, Playa Azul no presenta pendientes significativas que contribuyan a la formación de tipo ascendente (**Fig. 13 b**). La geomorfología que limita la zona no es efectiva como barrera topográfica y sólo permite la formación de dunas del tipo barján y barjanoide.

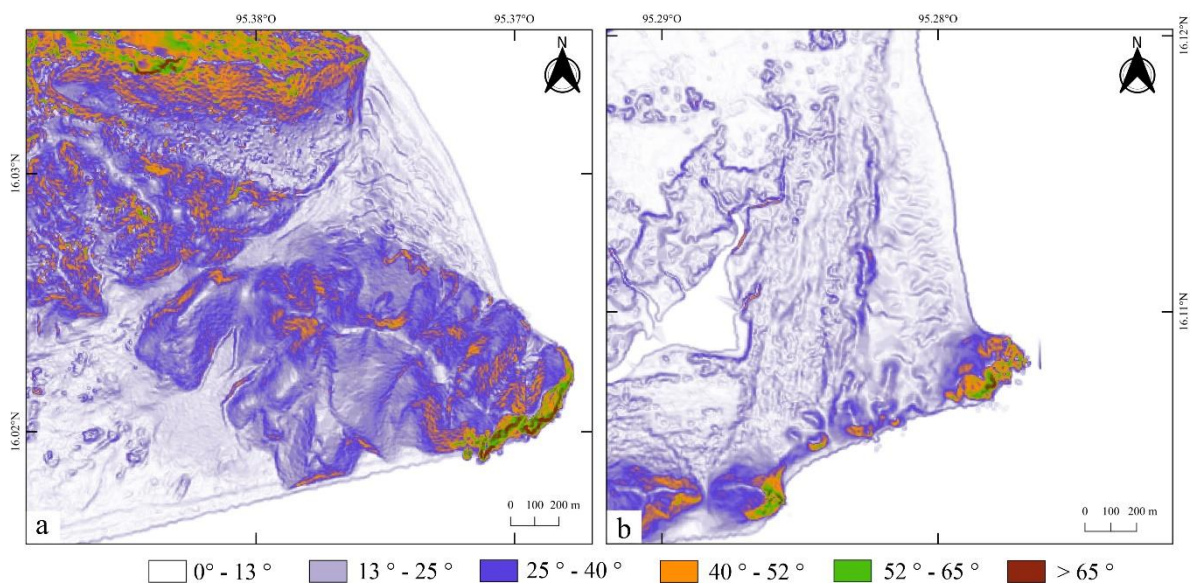


Fig. 13. Mapas de pendientes en grados. (a) Concepción Bamba y Chipehua. (b) Playa Azul.

5.4 Influencia meteorológica: Desprendimientos rocosos

Los afloramientos rocosos presentan diversidad de familias de discontinuidades. Los procesos meteorológicos, así como las condiciones ambientales han propiciado el desprendimiento de bloques y fragmentos rocosos y su posterior acumulación en laderas, faldas de los afloramientos y en las concavidades de las dunas (**Fig. 14**).

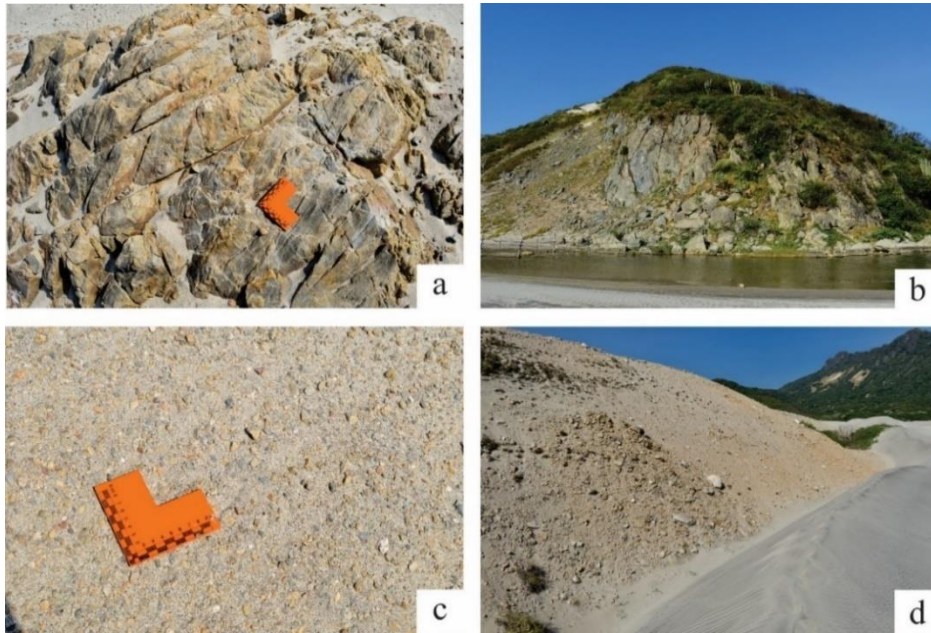


Fig. 14. Desprendimientos rocosos. (a) Familias de discontinuidades en los batolitos costeros. (b) Bloques de roca desprendidos en los alrededores de Chipehua. (c) Fragmentos de roca del tamaño de las gravas. (d) Aporte de fragmentos rocosos del promontorio de Concepción Bamba. Fotografías de campo de Carlos-Delgado (2021).

5.5 Análisis textural

Concepción Bamba

La arena de dunas de Concepción Bamba presenta distribución bimodal (**Fig. 15**). El tamaño de grano varía entre arena media fina (1.4ϕ a 2.6ϕ), con ausencia de fracciones gruesas. La arena está muy bien, bien a moderadamente bien clasificada. Las distribuciones son simétricas y asimétricas hacia los finos (0.05 a 0.25). Las curvas son platicúrticas y mesocúrticas (0.88 a 1.08) (**Fig. 19**).

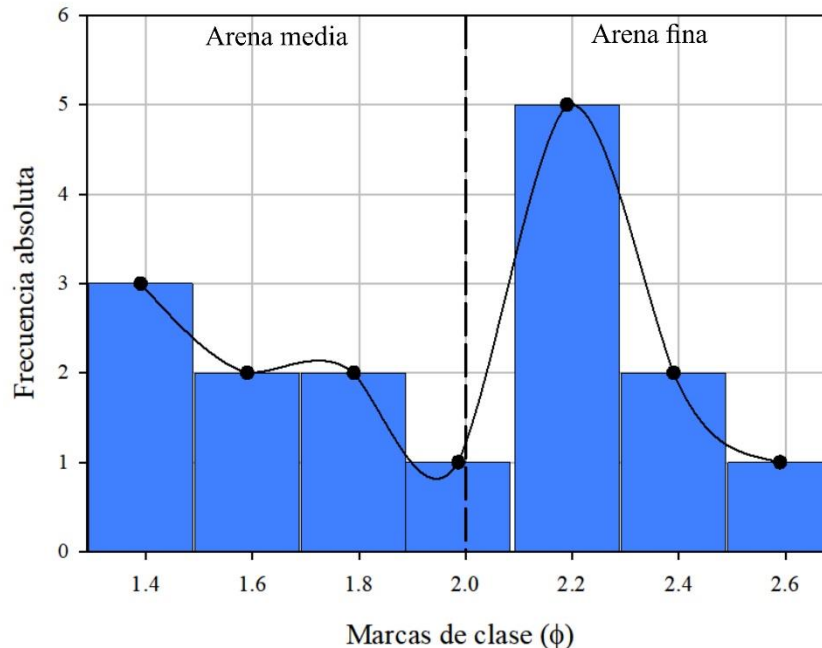


Fig. 15. Histograma de frecuencias de tamaño de grano en arena de dunas de Concepción Bamba.

Subambientes de duna

Los tamaños más gruesos se observan en el barlovento de las dunas de CB. En contraste el sotavento tiene tendencia hacia los finos. Las fracciones finas se concentran en la cresta a excepción de CB-1, en donde se observan fracciones de arena media. Esta localidad presenta distribuciones platicúrticas (0.89) (Ver Anexo 4).

Chipehua

La distribución de la arena de dunas de Chipehua es polimodal, con arena gruesa, media y fina (0.4ϕ a 2.4ϕ) (**Fig. 16**). La arena está bien a moderadamente bien clasificada, simétrica hacia los finos con algunas distribuciones simétricas. Las curvas varían de mesocúrtica a leptocúrtica (**Fig. 19**).

Subambientes de duna

En contraste a las dunas de CB, la cresta de dunas en CH concentra tamaños de grano heterogéneos. Es decir, la arena va de gruesa a fina. Se observan tres distribuciones granulométricas: simétricas (CH-1 C.50 y CH-7 C.67), asimétricas positivas (CH-3 C.55, CH-5 C.61, CH-6 C.64, CH-10 C.76, CH-11 C.79 y CH-12 C.82) y muy asimétricas positivas

(CH-2 C.52, CH-4 C.58, CH-8 C.70 y CH-9 C.73). Es notorio que la muestra CH-7 S.68 es moderadamente clasificada con asimetría negativa y muy leptocúrtica (Ver Anexo 4).

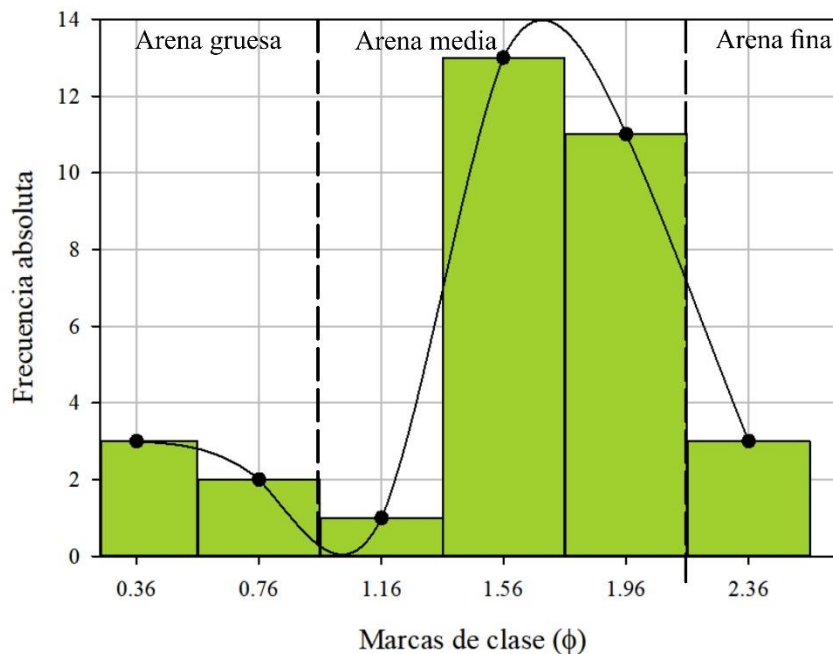


Fig. 16. Histograma de frecuencias de tamaño de grano en arena de duna de Chipehua.

Playa Azul

Playa Azul presenta polimodalidad como Chipehua (**Fig. 17**). Se observan tres poblaciones de tamaño de grano: arenas gruesas a finas (0ϕ a 2.5ϕ). Los granos van de muy bien a moderadamente bien clasificados. Son simétricos a asimétricos hacia los finos. Las curvas son de mesocúrticas a leptocúrticas (0.9 a 1.25) (**Fig. 19**).

Subambientes de duna

Las crestas de PA concentran arena media a gruesa, moderadamente bien clasificada con valores de 0.5ϕ a 0.6ϕ . La simetría es positiva y las curvas con mesocúrticas a leptocúrticas. El barlovento de las dunas concentra arena media; la simetría y curtosis en estos se encuentra en los valores esperados (0.12 y 1.0 , respectivamente) (Ver Anexo 4).

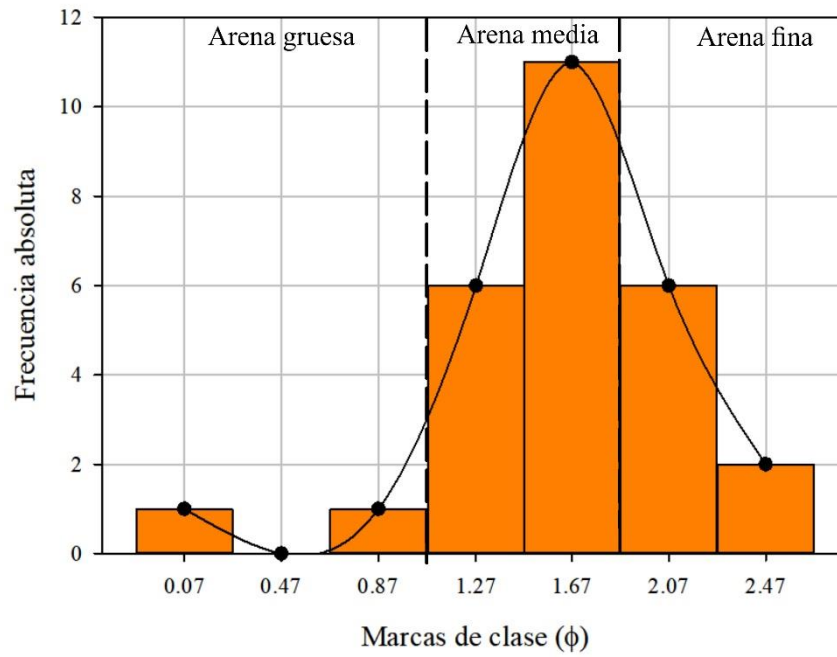


Fig. 17. Histograma de frecuencias de tamaño de grano de arena en duna de Playa Azul.

Dunas costeras del este de Oaxaca, México

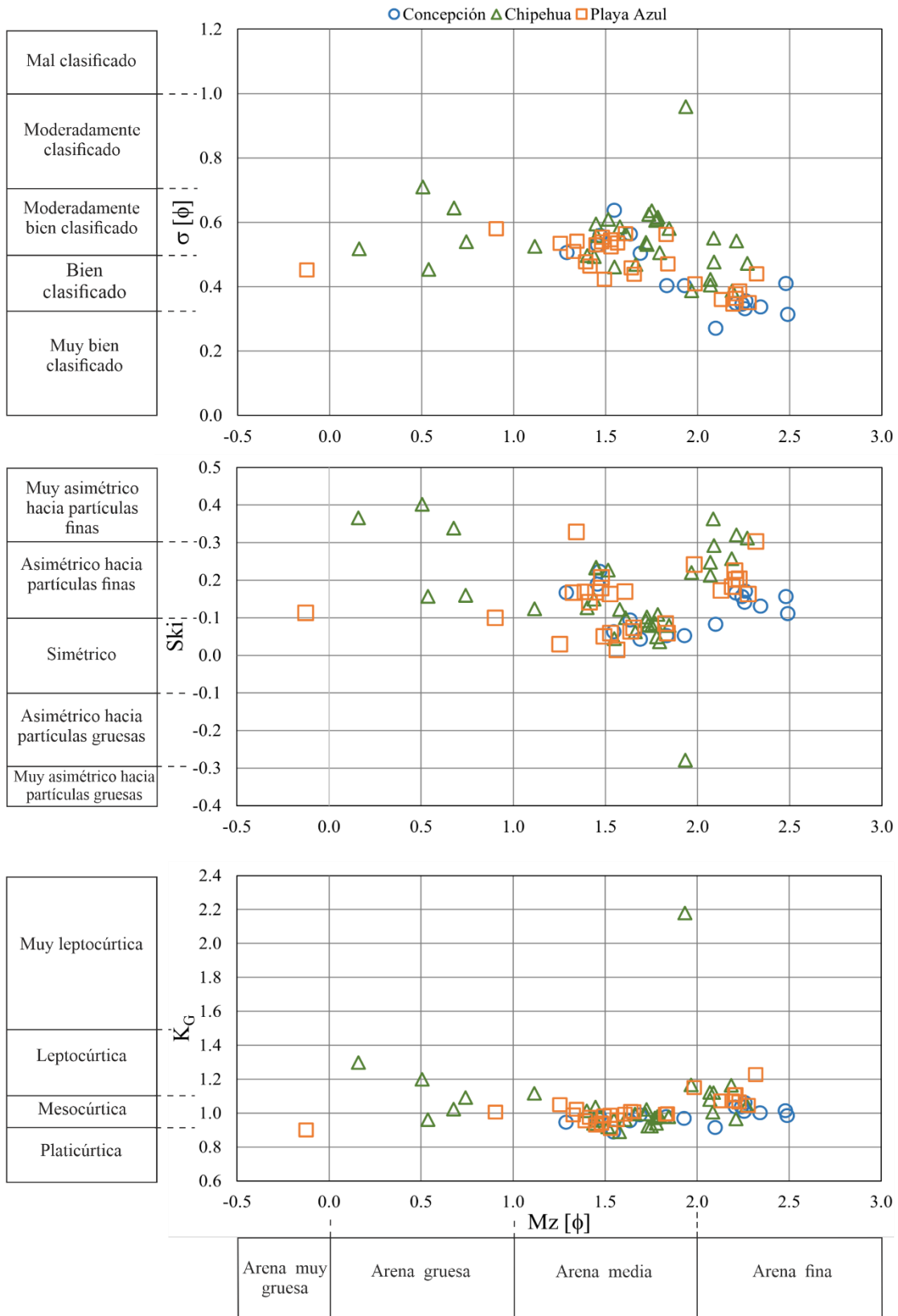


Fig. 18. Diagramas bivariados de los parámetros texturales de la arena de dunas de Oaxaca.

5.6 Redondez

El análisis de redondez indica que los granos van de subanguloso, subredondeado a redondeado (0.6;0.7;0.8) (Resentini *et al.*, 2018).

En promedio, los minerales ligeros, pesados y líticos presentan valores similares en las tres localidades: a) En cuarzo monocristalino, se observan granos subangulosos a subredondeados (**Fig. 19 b y c**); b) en cuarzo policristalino, los granos son subredondeados (~ 0.5 a 0.6) (**Fig. 19 a**); c) en feldespato potásico, los granos son subangulosos a subredondeados (**Fig. 19 b y c**); d) en esquisto (Lm), los granos se encuentran subredondeados a muy bien redondeados (0.6 a 0.9) (**Fig 18 d y f**); e) En pedernal y arenisca (Ls), son subangulosos a subredondeados (**Fig. 19 e y f**); f) los minerales opacos, están subangulosos a subredondeados (**Fig. 19 g**); g) el granate es subanguloso. Algunos granates presentan grado de corrosión de ligero a avanzado según la escala de Andò *et al.* (2012).

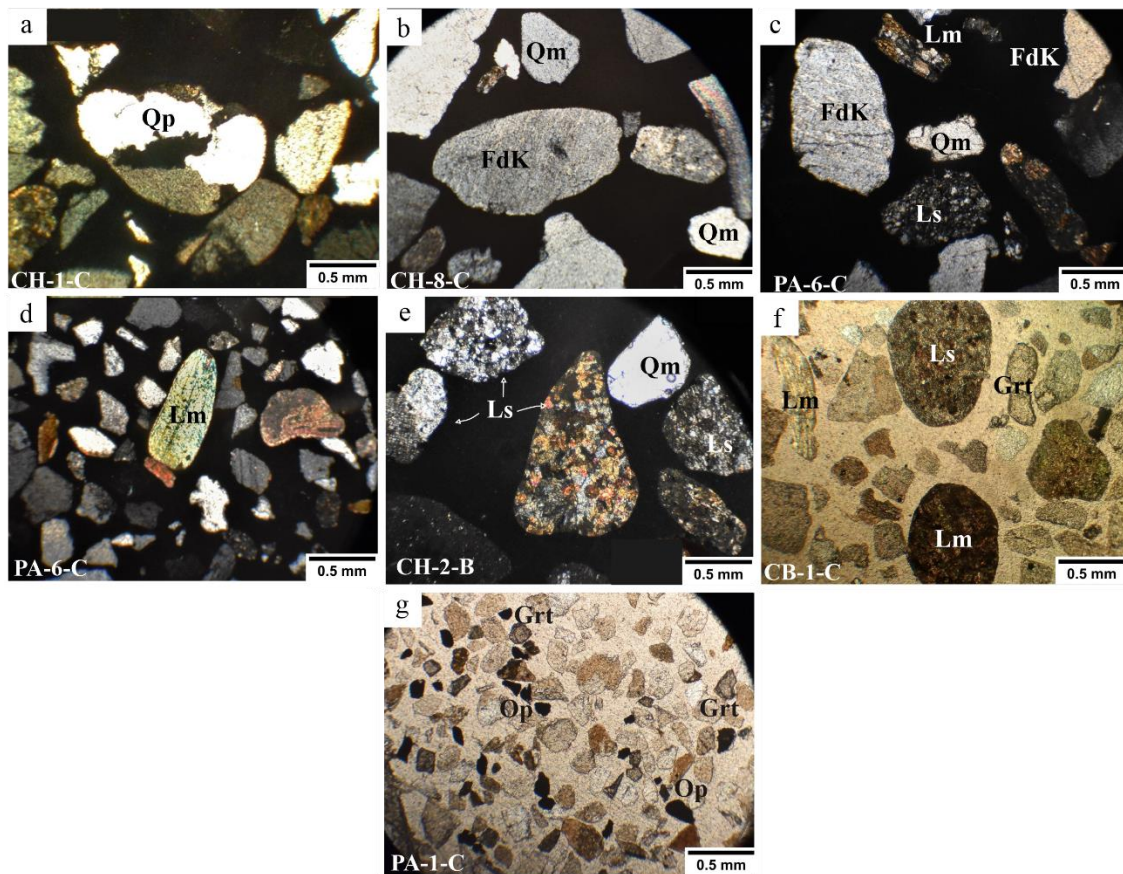


Fig. 19. Fotomicrografías de cuarzo policristalino (Qp); cuarzo monocristalino (Qm); feldespato potásico (FdK); esquisto y gneiss en facies de granulita (Lm); pedernal y arenisca (Ls); granate (Grt) y minerales opacos (Op). Fotografías de Carlos-Delgado (2021).

5.7 Análisis estadístico

5.7.1 Prueba de correlación

La prueba de correlación efectuada en la arena de dunas de CB muestra correlación negativa alta entre Mz y σ ($r = -0.83$; $t_{\text{Student}} = -3.03$; $r = 0.05$; $t_{\text{crítica}} = 2.145$). A medida que aumenta el valor de tamaño de grano la clasificación disminuye, es decir, a tamaño de arena más fina mejor clasificación.

También, existe correlación positiva moderada entre Mz y K_G ($r = 0.58$; $t_{\text{Student}} = 2.15$; $\rho = 0.05$; $t_{\text{crítica}} = 2.145$). Al aumentar el valor de tamaño de grano aumenta la curtosis. No hay correlación significativa entre Mz y Sk_i .

La localidad de Chipehua no presenta correlación significativa entre sus variables, en general, los valores son cercanos a cero. Esto indica que no existe correlación lineal.

La prueba de correlación efectuada en PA muestra que, hay correlación negativa moderada entre Mz y σ ($\rho = -0.54$; $t_{\text{Student}} = -2.7$; $\rho = 0.05$; $t_{\text{crítica}} = 2.06$) y positiva moderada entre Mz y K_G ($\rho = 0.66$; $t_{\text{Student}} = 3.4$; $\rho = 0.05$; $t_{\text{crítica}} = 2.06$). La correlación entre Mz y Sk_1 no es significativa ($r = 0.32$) (**Tabla 1**).

Tabla 1. Valores de r de la prueba de correlación de Pearson.

Localidad	Mz vs Si	Mz vs SkI	Mz vs KG
Concepción Bamba	- 0.83	0.01	0.583
Chipehua	- 0.153	- 0.215	- 0.011
Playa Azul	-0.545	0.33	0.684

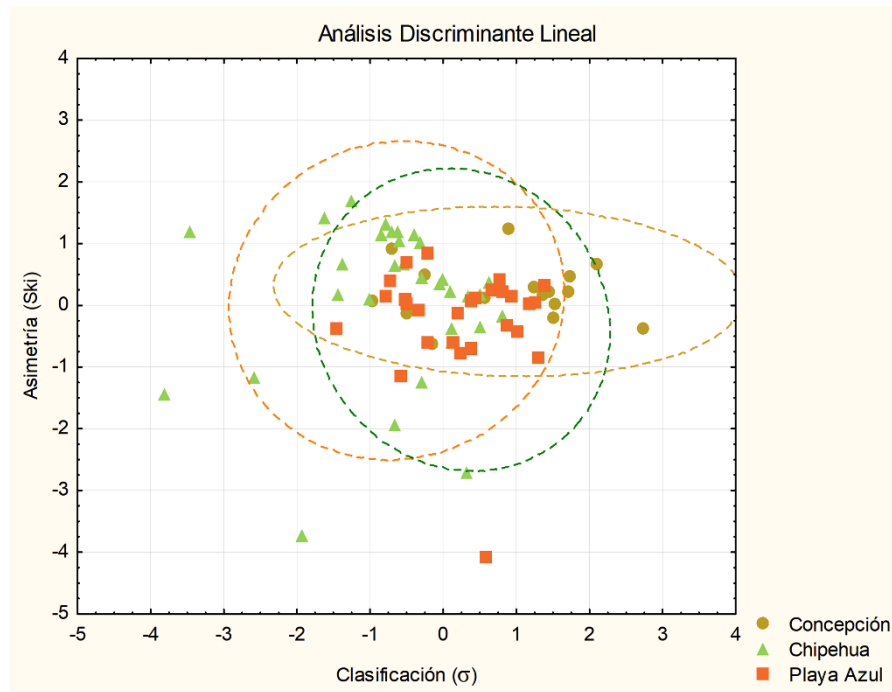
5.7.2 Análisis Discriminante Lineal (ADL)

El ADL (**Tabla 2, Fig. 20**), muestra que la primera función discriminante es la clasificación (σ). Presenta valores de $\rho = 0.001$; $F = 7.365$. La segunda función discriminante es la asimetría, $\rho = 0.054$; $F = 3.039$.

Tabla 2. Resumen del ADL

No. de variables en el modelo: 4; Grupos: 3; Wilks' lambda: 0.70114 Approx. $f(8,140) = 3.3995$
 $p < 0.0013$

	Wilks' - Lambda	Partial - Lambda	F-remove (2,70)	p-value	Toler.	1-Toler. - (R-Sqr.)
Mz	0.724428	0.967849	1.162660	0.318617	0.774798	0.225202
Si	0.848688	0.826141	7.365639	0.001250	0.683440	0.316560
Sk _i	0.762027	0.920094	3.039610	0.054215	0.867292	0.132708
K _G	0.709785	0.987815	0.431727	0.651104	0.860825	0.139175

**Fig. 20.** Diagrama del Análisis Discriminante Lineal.

6. Discusión

6.1 Mecanismos de transporte

Las dunas de Oaxaca presentan valores de tamaño relativamente diferentes a los obtenidos en dunas costeras de otras regiones de México (Kasper-Zubillaga, Carranza-Edwards, *et al.*, 2007; Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards, 2005; Mendieta-Lora *et al.*, 2018).

El aumento del tamaño de grano hacia las crestas sugiere un mecanismo particular. Aproximadamente la mitad de las dunas reportadas en la literatura presentan crestas con tamaños más gruesos que sus otros subambientes (Folk, 1971). Abuodha (2003), Lancaster *et al.* (2002) y Yang *et al.* (2019) han estudiado el mecanismo anteriormente descrito en función de episodios climatológicos. Reportan que el movimiento de las partículas de arena está dominado por arrastre bajo vientos débiles. En contraste los vientos fuertes, combinan los mecanismos de transporte. Por ejemplo, la saltación impulsa a la reptación y al rodamiento arrastrando granos gruesos hacia la cresta de las dunas. Chaudhri y Khan, (1981), atribuyen este mecanismo a la remoción, adición o mezcla de sedimentos por los cambios en la velocidad del viento.

El decremento en tamaño de grano (granos gruesos) en la cresta de las dunas de Oaxaca, sugiere fragmentos de fracciones menos densas (ej. cuarzo, feldespato y líticos), que son transportados a la cresta por el viento (Garzanti *et al.*, 2015; Kasper-Zubillaga *et al.*, 2021). Sin embargo, esto no es una regla general porque hay dunas cuyas crestas concentran fracciones más finas debido a la turbulencia del viento que transporta minerales pesados ($\gamma > 2.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$) a esa región (Garzanti *et al.*, 2016; Garzanti y Andò, 2019; Komar, 2007).

El transporte selectivo de arena depende de la composición, gravedad específica y densidad de los sedimentos superficiales, así como del régimen del viento (Mejía-Ledezma *et al.*, 2020; Qian *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2015, Kasper Zubillaga *et al.*, 2021).

Los vientos Tehuanos impactan con mayor intensidad la costa de Oaxaca durante el otoño e invierno, generando gran poder abrasivo en las partículas. La roseta de vientos muestra que en la región costera de Oaxaca hay vientos de hasta $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en enero (Elliott *et al.*, 2004). Esto sugiere que, durante la temporada norte, la región está experimentando un cambio activo

y es posible el movimiento masivo de granos de arena a diferentes tasas y mediante diferentes mecanismos. Esto sucede por saltación y/o reptación. Así, se producen planicies de deflación que son causadas por la remoción de granos menos densos por el viento (Pye y Tsoar, 2009). Esto es evidente en Oaxaca en los escarpes de los afloramientos que confinan las dunas costeras, sobre todo en Chipehua (**Fig. 14**).

La clasificación de la arena sugiere que puede estar influida por la mezcla de procesos marinos y eólicos que producen arenas moderadamente clasificadas (Sevon, 1966). Se presentan correlaciones significativas negativas con el tamaño de grano, siendo los granos más finos los que presentan mejor clasificación. Esta correlación es común y ha sido reportada en arenas de dunas y playas de otras localidades de México, como en el desierto de Sonora, la Península de Yucatán y el Golfo de México y California (Kasper-Zubillaga *et al.*, 2017; Kasper-Zubillaga, Zolezzi-Ruiz, *et al.*, 2007; Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards, 2005; Mejía-Ledezma *et al.*, 2020).

La mejor clasificación para las tres localidades se observa tanto en la parte central de la distribución como en las colas. Sin embargo, existen algunas excepciones en CH, donde la parte central de la distribución está mejor clasificada que las colas. Esto influye en la forma de las curvas de tamaño de grano. Lo anterior, se ha reportado en las dunas del NW de México, Veracruz y en arena de playa (Carranza-Edwards, 2001; Kasper-Zubillaga *et al.*, 2007; Mejía-Ledezma *et al.*, 2020). La correlación positiva entre tamaño de grano y curtosis indica que los granos finos se clasifican mejor que los gruesos.

6.2 Composición

En Oaxaca, la mayor parte de las dunas está composicionalmente influida por la denudación de rocas graníticas de la SMS, unidades metamórficas (Terreno Xolapa y Oaxaca) y volcanosedimentarias (Terreno Cuicateco). La zona también está controlada por sedimentos cuaternarios de aluvión (Kasper-Zubillaga *et al.*, 2021). Así la composición de las dunas costeras de Oaxaca varía de litofeldespática a litocuarcítica. Los líticos metamórficos y sedimentarios, el cuarzo mono y policristalino con y sin extinción ondulante y el feldespato potásico dominan composicionalmente las dunas. También hay concentración de óxidos de Fe-Ti y granate (Kasper-Zubillaga *et al.*, 2021).

El cuarzo y feldespato junto con esquisto y gneis en facies de granulita, así como pedernal y arenisca, presentan los tamaños más gruesos (**Fig. 19**). Esto también se reporta en las playas adyacentes al área (Carranza-Edwards *et al.*, 2018).

La asimetría positiva observada en la dunas de Oaxaca está controlada por los tamaños de grano fino compuestos por minerales de alta densidad como se observó en el análisis modal y láminas delgadas en el laboratorio (Garzanti *et al.*, 2015; Kasper-Zubillaga *et al.*, 2021; Komar, 2007; Komar y Wang, 1984; Li y Komar, 1992; Mejía-Ledezma *et al.*, 2020; Mendieta-Lora *et al.*, 2018; Resentini *et al.*, 2018).

También, la simetría y asimetría positiva en la arena de duna de Oaxaca, sugiere la dominancia por la alta energía del transporte eólico en la zona. Esto se respalda con los trabajos en dunas en otras regiones del mundo (Folk y Ward, 1957; Friedman, 1961; Mason y Folk, 1958).

6.3 Redondez

El análisis de redondez sugiere que los minerales ligeros presentan los valores de redondez más altos (subredondeado a redondeado; **Fig. 19**). En Oaxaca, la redondez aumenta con el tamaño de grano como lo reportado anteriormente en trabajos (Dietz, 1973; Folk, 1980; Sagga, 1993). La redondez también es más efectiva durante el transporte eólico como lo demostraron las observaciones realizadas en láminas delgadas. Esto se respalda con trabajos de redondez en ambientes eólicos en diferentes localidades (Garzanti, 2016, 2019; Kasper-Zubillaga, 2009; Kuenen, 1960; Twenhofel, 1945).

6.4 Geomorfología, clima y tamaño de grano

La textura gruesa, pobremente clasificada se asocia a distancias cortas de transporte y/o a la naturaleza de la roca parental que puede generar partículas con amplias variedades de tamaño (Blount y Lancaster, 1990; Carranza-Edwards *et al.*, 2018).

La presencia de fragmentos de tamaño grueso sugiere que las dunas costeras de Oaxaca están siendo influenciadas por varios mecanismos: a) cercanía a la erosión de afloramientos que confinan a las dunas, b) presencia de lluvias intensas y ciclones tropicales, c) naturaleza propia de la roca que suministra el material. Por ejemplo, los fragmentos líticos del tamaño

de las gravas expuestos en las dunas y los granos de cuarzo del tamaño de arena están controlados por la cercanía de las laderas que desprenden fracciones con estas características como se ha reportado en otros trabajos (Carranza-Edwards *et al.*, 2018; Folk, 1980).

Las lluvias y los ciclones tropicales propician el deslave de las laderas adyacentes a los campos de dunas (González de Vallejo *et al.*, 2002). Esto también se observa, debido a la presencia de rocas plutónicas (ej. granito) y volcanosedimentarias, las que por sus propiedades físicas son susceptibles a sufrir meteorización mecánica por efecto del clima (Arel y Tugrul, 2001; Binal *et al.*, 1997).

Es posible que la saturación de las rocas a través de las fracturas existentes haya propiciado el desprendimiento de bloques y fragmentos de roca que anteriormente han sido independizados del macizo. Es evidente que estos fragmentos al entrar en contacto con el viento, experimentan meteorización mecánica por la abrasión eólica, modificando su tamaño y forma; resultando en la fuente principal de la arena de dunas de tamaños gruesos. La meteorización química en el área es moderada ($CIA = 60.30 \pm 3.85$) (Kasper-Zubillaga *et al.*, 2021). Esto confirma que el área está compuesta por rocas graníticas que son menos susceptibles a sufrir meteorización química aún en condiciones de alta humedad y temperatura (Garzanti *et al.*, 2013). Sin embargo, la evidencia granulométrica y mineralógica muestra que la zona ha estado expuesta a una mayor meteorización mecánica.

6.5 Dinámica costera: influencia en el tamaño de grano

La corriente litoral es fundamental en la redistribución de sedimentos. Sin embargo, no es constante a lo largo del año. Durante el verano, el río Zimatán transporta fragmentos de arena media a gruesa de rocas metamórficas (Complejo Xolapa), hacia el este por efecto de la dinámica costera (Kasper-Zubillaga *et al.*, 2021). La anchura poco desarrollada de la playa sugiere que las dunas en las regiones estudiadas invaden la meso y supraplaya debido al gran aporte de arena.

El tamaño de grano de las dunas de CB, CH y PA sugiere que existe una realimentación de arena por parte de las playas de la región oeste (arena media a gruesa, moderadamente bien clasificada a clasificada) (Carranza-Edwards *et al.*, 2018).

La variabilidad en tamaño de grano está controlada por el transporte litoral a corta distancia y el depósito de fracciones de tamaño de grano de medio a grueso hacia la zona de rompiente (infraplaya) (Kasper-Zubillaga, *et al.*, 2007). Los granos finos se depositan en la zona de meso y supraplaya los que pueden ser removidos por acción energética del viento hacia las dunas (Garzanti *et al.*, 2015). Sin embargo, la deflación es otro mecanismo paralelo que transporta de manera selectiva los granos con densidades menores hacia las dunas (Pye y Tsoar, 2009).

De acuerdo con las observaciones, los minerales opacos se transportan rápidamente hacia la duna debido a su poco transporte eólico pero mayor energía eólica en su transporte. Esta observación se respalda con la baja redondez observada en láminas delgadas de los minerales opacos (Carranza-Edwards *et al.*, 2018; Resentini *et al.*, 2018).

6.6 Implicaciones del ADL

El ADL muestra traslape entre las tres áreas de estudio. La variable que contribuye significativamente en la separación de las localidades es la clasificación (Si). La localidad CB se separa de CH y PA (Tabla 2; **Fig. 20**). Esto sugiere que, las dunas de CH y PA están texturalmente influidas por el desprendimiento de rocas adyacentes constituidas por granitos lo cual genera un conjunto de parámetros de tamaño de grano similar.

En contraste, las dunas de CB están influidas de forma significativa por la acción del viento y el promontorio geomorfológico que genera dunas de tipo ascendente y descendente. En consecuencia, las fracciones de grano están más más asociadas al transporte eólico que a la generación de granos más gruesos por influencia climática (Pye y Tsoar, 2009; J. Zhang *et al.*, 2019).

Conclusiones

1. Los resultados obtenidos del análisis textural, de redondez, así como, las observaciones en campo y laboratorio confirman que el transporte sedimentario de la arena de dunas del este de Oaxaca está dominado por la acción eólica de los vientos Tehuanos. Estos resultados se aplican exclusivamente para una estación del año con base al muestreo realizado en esa temporada. Se sugiere ejecutar un análisis de redondez y texturas superficiales de minerales, mediante el análisis de imágenes de microscopía electrónica.
2. La morfología tipo de las dunas indican la dinámica eólica, unidireccional y posiblemente influida de manera estacional.
3. Existe correlación entre el tamaño de grano y la mineralogía de la arena. Esto se respalda con la presencia de fracciones finas asociadas a minerales de alta densidad. Se sugiere realizar el análisis de curvas de probabilidad acumulada de tamaño de grano. Estas describen los patrones de transporte de partículas.
4. La fracción de grano grueso está compuesta por minerales ligeros. Su acumulación está controlada por a) la deflación por el viento, b) desprendimientos rocosos vulnerables al intemperismo mecánico por efectos climáticos y c) transporte litoral.
5. La concentración de minerales finos de alta densidad en las regiones más altas de las dunas es indicio del a) aporte local de sedimentos y b) posible transporte por vientos muy fuertes y turbulencia.
6. Las dunas de CB son significativamente diferentes a las dunas de CH y PA debido a una mayor influencia eólica y selectividad en el tamaño de grano.

Fuentes consultadas

- Abuodha, J. O. Z. (2003). Grain size distribution and composition of modern dune and beach sediments, Malindi Bay coast, Kenya. *Journal of African Earth Sciences*, 36(1–2), 41–54. [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(03\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(03)00016-2)
- Andò, S., Garzanti, E., Padoan, M., y Limonta, M. (2012). Corrosion of heavy minerals during weathering and diagenesis: A catalog for optical analysis. *Sedimentary Geology*, 280(May 2018), 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.03.023>
- Arel, E., y Tugrul, A. (2001). Weathering and its relation to geomechanical properties of Cavusbasi granitic rocks in Northwestern Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60(2), 123–133. <https://doi.org/10.1007/s100640000091>
- Baas, A. C. W. (2019). Grains in Motion. En I. Livingstone y A. Warren (Eds.), *Aeolian Geomorphology. A new Introduction* (2a ed., pp. 27–60). <https://doi.org/10.1002/9781118945650.ch2>
- Bagnold, R. A. (1941). *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes* (1a ed., Vol. 43, Número 147). Chapman & Hall. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5682-7>
- Binal, A., Kasapoglu, K. E., y Gokceoglu, C. (1997). The surficial physical deterioration behaviour of Neogene volcano sedimentary rocks of Eskisehir-Yazilikaya, NW-Turkey. *Engineering geology and the environment. Proc. symposium, Athens, 1997. Vol.3, January*, 3065–3069.
- Blount, G., y Lancaster, N. (1990). Development of the Gran Desierto sand sea, northwestern Mexico. *Geology*, 18(8), 724–728. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0724:DOTGDS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0724:DOTGDS>2.3.CO;2)
- Boggs, S. J. (2006). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy* (4th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Brenes, C. L. (1985). *Condiciones de movimiento geostrófico para la Corriente Costera de Costa Rica*.
- Campa, M. F., y Coney, P. J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1040–1051. <https://doi.org/10.1139/e83-094>

- Carfantan, J. C. (1981). Evolución estructural del sureste de México, paleogeografía e historia tectónica de las zonas internas mesozoicas. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 5(2), 207–216.
- (1983). Les Ensembles Geologiques Du Mexique Meridional. Evolution Geodynamique Durant Le Mesozoique Et Le Cenozoique. En *Geofísica Internacional* (Vol. 22, Número 1, pp. 9–37). <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1983.22.1.829>
- Carranza-Edwards, A. (2001). Grain size and sorting in modern beach sands. *Journal of Coastal Research*, 17(1), 38–52.
- Carranza-Edwards, Arturo, Kasper-Zubillaga, J. J., Martínez-Serrano, R. G., Cabrera-Ramírez, M., Rosales Hoz, L., Alatorre Mendieta, M. A., Márquez-García, A. Z., y Lozano-Santa Cruz, R. (2018). Provenance inferred through modern beach sands from the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Geological Journal*, 54(1), 552–563. <https://doi.org/10.1002/gj.3205>
- Centeno-García, E. (2017). Mesozoic tectono-magmatic evolution of Mexico: An overview. *Ore Geology Reviews*, 81, 1035–1052. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.010>
- Chaudhri, R. S., y Khan, H. M. M. (1981). Textural parameters of desert sediments-Thar Desert (India). *Sedimentary Geology*, 28, 43–62.
- Chojnacki, M., Moersch, J. E., y Burr, D. M. (2010). Climbing and falling dunes in valleys marineris, mars. *Geophysical Research Letters*, 37(8), 1–7. <https://doi.org/10.1029/2009GL042263>
- CONAGUA. (2012). *Análisis de las temporadas de huracanes de los años 2009, 2010 y 2011 en México*. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (ed.); 2012a ed.).
- (2014). *Atlas del Agua en México 2014*.
- Delgado-Argote, L. A. (1989). Regional implications of the Jurassic-Cretaceous volcanosedimentary Cuicateco Terrane, Oaxaca, Mexico. *Geofísica Internacional*, 28(5), 939–973. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1989.28.5.1292>
- Dietz, V. (1973). Experiments on the influence of transport of shape and roundness of heavy minerals. *Contributions to Sedimentology*, 1, 69–102.
- Elliott, D., Schwartz, M., Scott, G., Haymes, S., Heimiller, D., y George, R. (2004). *Atlas de Recursos*

Eólicos del Estado de Oaxaca.

- Folk, R. L. (1955). *Of skewness and sands*. 145–146.
- (1971). Longitudinal Dunes of the Northwestern Edge of the. *Sedimentology*, 16(1968), 5–54.
- (1980). *Petrology of Sedimentary Rocks*. [https://doi.org/10.1016/0169-555x\(91\)90027-8](https://doi.org/10.1016/0169-555x(91)90027-8)
- Folk, R. L., y Ward, W. C. (1957). Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. En *Journal of Sedimentary Research* (Vol. 27, Número 1, pp. 3–26). <https://doi.org/10.1306/74d70646-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- Friedman, G. M. (1961). Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics. *Journal of Sedimentary Petrology*, 31(4), 514–529. <https://doi.org/https://doi.org/10.1306/74D70BCD-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Gallegos-García, A. y Barberán-Falcon, J. (1998). Surgencia Eólica. En M. T. García, *El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos*. (págs. 27-34). Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.
- García, E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Köppen* (Quinta Ed.). Instituto de Geografía-UNAM.
- Garzanti, E. (2016). From static to dynamic provenance analysis-Sedimentary petrology upgraded. *Sedimentary Geology*, 336, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.07.010>
- (2019). Petrographic classification of sand and sandstone. *Earth-Science Reviews*, 192, 545–563. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.12.014>
- Garzanti, E., y Andò, S. (2019). Heavy minerals for junior woodchucks. *Minerals*, 9(3), 1–25. <https://doi.org/10.3390/min9030148>
- Garzanti, E., Padoan, M., Andò, S., Resentini, A., Vezzoli, G., y Lustrino, M. (2013). Weathering and relative durability of detrital minerals in equatorial climate: Sand petrology and geochemistry in the east African rift. *Journal of Geology*, 121(6), 547–580. <https://doi.org/10.1086/673259>
- Garzanti, E., Resentini, A., Andò, S., Vezzoli, G., Pereira, A., y Vermeesch, P. (2015). Physical

- controls on sand composition and relative durability of detrital minerals during ultra-long distance littoral and aeolian transport (Namibia and southern Angola). *Sedimentology*, 62(4), 971–996. <https://doi.org/10.1111/sed.12169>
- Glenn, M. (1979). A study of global sand seas. En E. D. McKee y U. S. G. P. Office (Eds.), *A Study of Global Sand Seas* (Vol. 1052, pp. 399–407). United States National Aeronautics and Space Administration.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica* (Pearson Education (ed.); Reimpresión). Prentice Hall.
- Google Earth. (2021). *Dunas de Oaxaca*. <https://earth.google.com/web/@16.03792978,-95.35867311,-8.2260019a,10171.69232938d,35y,-10.55918812h,14.12698659t,0r>
- Goudie, A. S. (2011). Parabolic Dunes: Distribution, Form, Morphology and Change. *Annals of arid zone*, 50(3&4), 1–7.
- Hernández-Hernández, J., Arceo Y Cabrilla, F., y Ramírez Bárcenas, M. (2003). *Carta de Inestabilidad de Laderas, Estado de Oaxaca*.
- Hernández Unzón, A., y Bravo Lujan, C. (2009a). *Temporada de Ciclones Tropicales 1997, Océano Pacífico: Huracán Pauline [05 octubre - 10 octubre]*.
- (2009b). *Temporada de Ciclones Tropicales 1997, Océano Pacífico: Huracán Rick [07 noviembre - 10 diciembre]*.
- IGL. (2011). *Atlas de Riesgos del Municipio de Oaxaca de Juárez, Oaxaca 2011* (Vol. 01, Número 55).
- INEGI. (2004). *Síntesis de Información Geográfica del Estado de Oaxaca*.
- (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Oaxaca 2017*.
- Iriondo, A., Kunk, M. J., Winick, J. A., y CRM. (2004). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating studies of minerals and rocks in various areas in Mexico: USGS/CRM scientific collaborations (Part II). *Open File Report 04-1444, Part II*, 1–46.
- Jiménez Orocio, O., y Hesp, P. A. (2014). *Tipos de dunas. October*.

- Kasper-Zubillaga, J. J. (2009). Roundness in quartz grains from inland and coastal dune sands, Altar desert, Sonora, Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61(1), 1–12. <https://doi.org/10.18268/BSGM2009v61n1a1>
- Kasper-Zubillaga, J. J., Arellano-Torres, E., Armstrong-Altrin, J. S., y Sial, A. N. (2017). A study of carbonate beach sands from the Yucatan Peninsula, Mexico: a case study. *Carbonates and Evaporites*, 32(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13146-015-0283-0>
- Kasper-Zubillaga, J. J., y Carranza-Edwards, A. (2005). Grain size discrimination between sands of desert and coastal dunes from northwestern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(3), 383–390.
- Kasper-Zubillaga, J. J., Carranza-Edwards, A., y Morales De la Garza, E. (2007). Caracterización textural de la arena de playa del Golfo de California, México: Implicaciones para los procesos costeros y el relieve. *Ciencias Marinas*, 33(1), 83–94.
- Kasper-Zubillaga, J. J., Martínez-Serrano, R. G., Arellano-Torres, E., Álvarez Sánchez, L. F., Patiño Andrade, D., González Bermúdez, A., y Carlos-Delgado, L. (2021). Petrographic and geochemical analyses of dune sands from southeastern Mexico, Oaxaca, Mexico. *Geological Journal*, 56(6), 3012–3034. <https://doi.org/10.1002/gj.4086>
- Kasper-Zubillaga, J. J., y Zolezzi-Ruiz, H. (2007). Grain size, mineralogical and geochemical studies of coastal and inland dune sands from El Vizcaíno Desert, Baja California Peninsula, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24(3), 423–438.
- Kasper-Zubillaga, J. J., Zolezzi-Ruiz, H., y Carranza-Edwards, A. (2007). Sedimentological, modal analysis and geochemical studies of desert and coastal dunes, Altar Desert, NW Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(March), 613–628. <https://doi.org/10.1002/esp>
- Kessler, W. S. (2006). The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2–4), 181–217. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.009>
- Komar, P. (2007). Chapter 1 The Entrainment, Transport and Sorting of Heavy Minerals by Waves and Currents. *Developments in Sedimentology*, 58(07), 3–48. [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(07\)58001-5](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(07)58001-5)
- Komar, P., y Wang, C. (1984). Processes of selective grain transport and the formation of placers on

- beaches. *Journal of Geology*, 92(6), 637–655. <https://doi.org/10.1086/628903>
- Krumbein, W. C. (1934). Size Frequency Distributions of Sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 4(2), 65–77. <https://doi.org/10.1306/d4268eb9-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- (1941). Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 11(2), 64–72.
- Kuenen, P. H. (1960). Experimental Abrasion 4: Eolian Action. *The Journal of Geology*, 68(4), 427–449. <https://doi.org/10.1086/626675>
- Lancaster, N. (1981). Grain size characteristics of Namib Desert linear dunes. *Sedimentology*, 28(1), 115–122. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1981.tb01668.x>
- (1995). Geomorphology of desert dunes. En *Geomorphology of desert dunes*. <https://doi.org/10.2307/622601>
- (2005). Aeolian Processes. *Springer Geology*, 1991, 285–310. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1539-4_13
- Lancaster, N., Nickling, W. G., y McKenna Neuman, C. (2002). Particle size and sorting characteristics of sand in transport on the stoss slope of a small reversing dune. *Geomorphology*, 43(3–4), 233–242. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00135-0](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00135-0)
- Li, M. Z., y Komar, P. (1992). *Longshore grain sorting and beach placer formation adjacent to the Columbia river*. 62(3), 429–441.
- Liu, X., Li, S., y Shen, J. (1999). Wind tunnel simulation experiment of mountain dunes. *Journal of Arid Environments*, 42(1), 49–59. <https://doi.org/10.1006/jare.1998.0488>
- Livingstone, I., Bullard, J. E., Wiggs, G. F. S., y Thomas, D. S. G. (1999). Grain-size variation on dunes in the southwest kalahari, Southern Africa. *Journal of Sedimentary Research*, 69(3), 546–552. <https://doi.org/10.2110/jsr.69.546>
- Martínez-Amador, H., Castro-Rodríguez, M. G., Motolinía-García, O., Salinas-Rodríguez, J. M., Aranda-Osorio, J. N., y Zarate-Barradas, R. (2000). *Carta Geológico-Minera Salina Cruz-Juchitán. E15-10 Escala 1:250,000. Estado de Oaxaca*. (p. 58).
- Martínez-Ramírez, E., Doadrio Villarejo, I., y De Sostoa Fernández, A. (2004). Peces Continentales.

Biodiversity of Oaxaca, January 2004, 357–373.

- Martins, L. R. (1965). Significance of skewness and kurtosis in environmental interpretation. *Journal of Sedimentary Research*, 35(3), 768–770. <https://doi.org/10.1306/74d7135c-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- Mason, C. C., y Folk, R. L. (1958). Differentiation of Beach, Dune, and Aeolian Flat Environments by Size Analysis, Mustang Island, Texas. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 28(2), 211–226. <https://doi.org/10.1306/74d707b3-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- McKee, E. D. (1979). A study of global sand seas. *Oxford University*, 1052, 429.
- Mejía-Ledezma, R. O., Kasper-Zubillaga, J. J., Alvarez-Sánchez, L. F., Mendieta-Lora, M., Arellano-Torres, E., Tetlalmatzi-Martínez, J. L., Gonzalez-Bermúdez, A., Patiño-Andrade, D., y Armstrong-Altring, J. S. (2020). Surface textures of quartz and ilmMejía-Ledezma, R. O., Kasper-Zubillaga, J. J., Alvarez-Sánchez, L. F., Mendieta-Lora, M., Arellano-Torres, E., Tetlalmatzi-Martínez, J. L., Gonzalez-Bermúdez, A., Patiño-Andrade, D., y Armstrong-Altring, J. S. (2020). Sur. *Aeolian Research*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2020.100611>
- Mendieta-Lora, M., Mejía-Ledezma, R. O., Kasper-Zubillaga, J. J., Arellano-Torres, E., y Álvarez Sánchez, L. F. (2018). Mineralogical and geochemical implications of weathering rates in coastal dunes and beach sands close to a volcanic rock source in the western Gulf of Mexico, Mexico. *Chemie der Erde*, 78(3), 323–339. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2018.06.004>
- Molina-Cruz, A., y Martínez-López, M. (1994). Oceanography of the Gulf of Tehuantepec, Mexico, indicated by Radiolaria remains. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 110(3–4), 179–195. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(94\)90083-3](https://doi.org/10.1016/0031-0182(94)90083-3)
- Morán-Zenteno, D. J., Martiny, B. M., Solari, L., Mori, L., Luna-González, L., y González-Torres, E. A. (2018). Cenozoic magmatism of the Sierra Madre del Sur and tectonic truncation of the Pacific margin of southern Mexico. *Earth-Science Reviews*, 183, 85–114. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.010>
- Morán-Zenteno, D. J., Martiny, B., Tolson, G., Solís Pichardo, G., Alba Aldave, L., Hernández Bernal, M. del S., Martínez Serrano, R. G., Silva Romo, G., y Schaaf, P. (2000). Geocronología y características geoquímicas de las rocas magmáticas terciarias de la Sierra Madre del Sur. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 27–58.

<https://doi.org/10.18268/bsgm2000v53n1a2>

- Moreno, E. A. (2006). *Petrografía, geología estructural y geocronología del borde noroccidental del terreno Cuicateco, Sierra Mazateca, estado de Oaxaca, México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Muhs, D. R. (2013). The geologic records of dust in the Quaternary. *Aeolian Research*, 9, 3–48. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.aeolia.2012.08.001>
- Nishimori, H., y Tanaka, H. (2018). A simple model for the formation of vegetated dunes. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 26(10), 1143–1150. <https://doi.org/10.1002/esp.258>
- Opp, C., Groll, M., Abbasi, H., y Foroushani, M. A. (2021). Causes and Effects of Sand and Dust Storms: What Has Past Research Taught Us? A Survey. *Journal of Risk and Financial Management*, 14(7), 326. <https://doi.org/10.3390/jrfm14070326>
- Ortega-Gutiérrez, F. (1981). Metamorphic belts of southern Mexico and their tectonic significance. En *Geofísica Internacional* (Vol. 20, Número 3, pp. 177–202). <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1981.20.3.1085>
- Ortiz Olvera, V. (2019). *Petrología, Geoquímica y Geocronología de los Batolitos Cenozoicos de la zona ubicada entre Xadani y Salina Cruz, Oaxaca*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pérez-Gutiérrez, R. (2010). *Geología del Terreno Cuicateco en el Istmo de Tehuantepec y sus implicaciones tectónicas en la evolución del sur de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pérez-Gutiérrez, R., Solari, L. A., Gómez-Tuena, A., y Martens, U. (2009). Mesozoic geologic evolution of the Xolapa migmatitic complex north of Acapulco, southern Mexico: implications for paleogeographic reconstructions. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1), 201–221. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742009000100017&lng=es&nrm=iso&tlng=en
- Powers, M. C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 23(2), 117–119.
- Pye, K. (1983). Coastal dunes. *Progress in Physical Geography*, 7(4), 531–557.

<https://doi.org/10.1177/030913338300700403>

Pye, K., y Tsoar, H. (2009). Aeolian Sand and Sand Dunes. En Springer Berlin Heidelberg (Ed.), *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952. (2a ed.). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-85910-9> Library

Qian, G., Dong, Z., Luo, W., y Lu, J. (2011). Mean airflow patterns upwind of topographic obstacles and their implications for the formation of echo dunes: A wind tunnel simulation of the effects of windward slope. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(4), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2011JF002020>

Qian, G., Dong, Z., Zhang, Z., Luo, W., y Lu, J. (2012). Granule ripples in the kumtagh desert, china: Morphology, grain size and influencing factors. *Sedimentology*, 59(6), 1888–1901. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01330.x>

Ramos García, G. E. (2016). *Ciclones Tropicales 2016: Depresión Tropical 1-E del Océano Pacífico [6-8 junio]*.

Resentini, A., Andò, S., y Garzanti, E. (2018). Quantifying roundness of detrital minerals by image analysis: Sediment transport, shape effects, and provenance implications. *Journal of Sedimentary Research*, 88(2), 276–289. <https://doi.org/10.2110/jsr.2018.12>

Romero-Centeno, R., Zavala-Hidalgo, J., Gallegos, A., y O'Brien, J. J. (2003). Isthmus of Tehuantepec wind climatology and ENSO signal. *Journal of Climate*, 16(15), 2628–2639. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<2628:IOTWCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<2628:IOTWCA>2.0.CO;2)

Sagga, A. (1993). Roundness of sand grains of longitudinal dunes in Saudi Arabia. *Sedimentary Geology*, 87(1–2), 63–68. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(93\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0037-0738(93)90036-5)

Schönau, M. C., y Rudnick, D. L. (2015). Pacific Gilder observations of the North Equatorial Current in the western tropical Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(5), 3586–3605. <https://doi.org/10.1002/2014JC010595>.Received

Sedlock, R. L., Ortega-gutierrez, F., Speed, R. C., y Ortega-gutierrez, F. (1993). Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico. En *Special Paper of the Geological Society of America* (Vol. 278). <https://doi.org/10.1130/SPE278-p1>

Sevon, W. D. (1966). Sediment Variation on Farewell Spit, New Zealand. *New Zealand Journal of*

- Geology and Geophysics*, 9(1–2), 60–75. <https://doi.org/10.1080/00288306.1966.10420195>
- SGM. (2020). *Carta Geológico-Minera Morro Mazatán E15-C82. Escala 1: 250,000*.
- Tegen, I., y Fung, I. (1995). Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification. *Journal of Geophysical Research*, 100(D9), 707–726. <https://doi.org/10.1029/95jd02051>
- Trasviña, A., Barton, E. D., Kosro, M., y Smith, R. (1995). Offshore wind forcing in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: The asymmetric circulation. *October*, 100(95), 649–663.
- Tsoar, H. (1983). Wind Tunnel Modeling of Echo and Climbing dunes. *Developments in Sedimentology*, 38, 247–259.
- (2001). Types of Aeolian Sand Dunes. En N. Balmforth y A. Provenzale (Eds.), *Geomorphological fluid mechanics* (pp. 403–429). Springer Science & Business Media.
- Velázquez-Muñoz, F., Martínez, J., Chavanne, C., Durazo, R., y Flament, P. (2011). *Circulación costera forzada por el viento en el golfo de Tehuantepec, México*. 37, 443–456.
- Twenhofel, W.H. (1945). The Rounding of Sand Grains. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 15(2). <https://doi.org/10.1306/d4269224-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- Wang, X., Dong, Z., Zhang, J., Qu, J., y Zhao, A. (2003). Grain size characteristics of dune sands in the central Taklimakan Sand Sea. *Sedimentary Geology*, 161(1–2), 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(02\)00380-9](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(02)00380-9)
- Wiggs, G. F. S. (2013). Dune Morphology and Dynamics. En *Treatise on Geomorphology* (Vol. 11). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00304-3>
- World Weather Online. (s/f). *Salina Cruz, Oaxaca, Mexico Weather Averages | Monthly Average High and Low Temperature | Average Precipitation and Rainfall days*. Recuperado el 18 de septiembre de 2021, de <https://www.worldweatheronline.com/salina-cruz-weather-averages/oaxaca/mx.aspx>
- Yang, Z., Qian, G., Han, Z., Dong, Z., Luo, W., Zhang, Z., Lu, J., Liang, A., y Tian, M. (2019). Variation in grain-size characteristics as a function of wind direction and height in the Sanlongsha dune field of the northern Kumtagh Desert, China. *Aeolian Research*, 40(322), 53–

64. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2019.06.004>

Zhang, J., Zhang, C., Li, Q., y Pan, X. (2019). Grain-size distribution of surface sediments of climbing and falling dunes in the Zedang valley of the Yarlung Zangbo River, southern Tibetan plateau. *Journal of Earth System Science*, 128(1). <https://doi.org/10.1007/s12040-018-1030-4>

Zhang, Z., y Dong, Z. (2015). Grain size characteristics in the Hexi Corridor Desert. *Aeolian Research*, 18, 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2015.05.006>

Zhang, Z., Dong, Z., y Li, C. (2015). Wind regime and sand transport in China's Badain Jaran Desert. *Aeolian Research*, 17, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2015.01.004>

Zhao, B., y Wang, J. (2016). 3D quantitative shape analysis on form, roundness, and compactness with μ CT. *Powder Technology*, 291, 262–275. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.12.029>

Anexo 1: Parámetros texturales

Tabla 3. Escala de tamaño de sedimento de Udden (1914) y Wentworth (1922).

Fracción	Tamaño en		Terminología de clase de tamaño de sedimento (Wentworth, 1922)
	mm	phi	
GRAVA	2056	-8	Peñasco
	64	-6	Guijarro
	4	-2	Guijo
	2	-1	Gránulo
ARENA	1	0	Arena muy gruesa
	0.5	1	Arena gruesa
	0.25	2	Arena media
	0.125	3	Arena fina
	0.0625	4	Arena muy fina
	LODO LIMO	0.031	5
0.0156		6	Limo medio
0.0078		7	Limo fino
0.0039		8	Limo muy fino
ARCILLA			

Tabla 4. Terminología aplicada a los valores de los parámetros texturales estadísticos (modificado de Folk, 1980).

Índice de clasificación (σ)	Asimetría (Sk_k)	Curtosis (K_G)
Muy bien clasificado < 0.35	Muy asimétrico hacia las partículas finas 0.3 a 1.0	Muy platicúrtica < 0.67
Bien clasificado 0.35 - 0.50	Asimétrico hacia las partículas finas 0.1 a 0.3	Platicúrtica 0.67 - 0.90
Moderadamente bien clasificado 0.50 - 0.70	Simétrico 0.1 a -0.1	Mesocúrtica 0.90 - 1.11
Moderadamente clasificado 0.70 - 1.00	Asimétrico hacia las partículas gruesas -0.1 a -0.3	Leptocúrtica 1.11 - 1.50
Mal clasificado 1.00 - 2.00	Muy asimétrico hacia las partículas gruesas -0.3 a -1.0	Muy leptocúrtica 1.50 - 3.00
Muy mal clasificado 2.00 - 4.00		

Anexo 2: Redondez

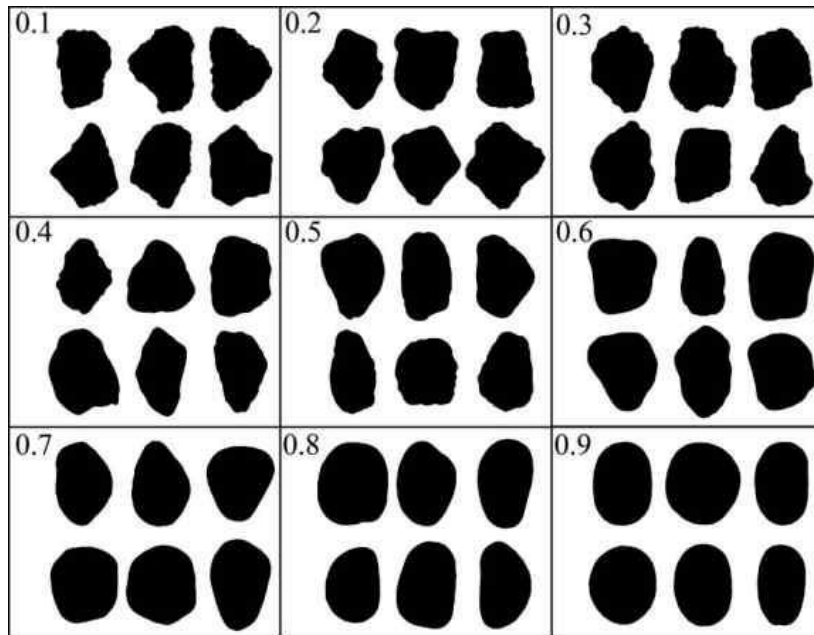


Fig. 21. Escala visual actualizada de Krumbein (1941) modificada por Resentini et al. (2018). utilizada para determinar la redondez del grano.

Anexo 3: Equipo para análisis de muestras



Fig. 22. Material repositario de la colecta resguardado en la Arenoteca del Laboratorio de Geoquímica del ICMYL, UNAM (Fotografía de Carlos-Delgado, 2021).



Fig. 23. Equipo para el análisis de muestras. (a) Analizador Beckman Coulter modelo LS 230, de difracción láser (Fotografía de ICMYL, 2019); (b) Microscopio polarizante Velab VE-148 P y láminas delgadas (Fotografía de Carlos-Delgado, 2021).

Anexo 4: Valores granulométricos

	No. De Muestra	Tamaño De Grano (Mz)	Clasificación (σ)	Asimetría (Sk _i)	Curtosis (K _g)
CONCEPCIÓN BAMBÁ	CB-1 F1.23	1.688	0.505	0.044	0.990
	CB-2 B.26	2.255	0.332	0.142	1.012
	CB-3 F1.29	2.489	0.315	0.112	0.986
	CB-4 B.32	1.831	0.404	0.053	0.980
	CB-5 F1.122	1.455	0.530	0.190	0.972
	CB-6 F1.124	1.287	0.507	0.168	0.948
	CB-1 C.22	1.544	0.638	0.063	0.890
	CB-2 C.25	2.259	0.356	0.172	1.063
	CB-3 C.28	2.206	0.349	0.167	1.038
	CB-4 C.31	2.097	0.271	0.083	0.917
	CB-1 F2.24	2.477	0.411	0.157	1.016
	CB-2 S.27	2.240	0.347	0.157	1.039
CHIPEHUA	CB-3 S.30	2.341	0.338	0.132	1.002
	CB-4 S.33	1.927	0.404	0.053	0.971
	CB-5 F2.123	1.632	0.564	0.094	0.956
	CB-6 F2.125	1.468	0.559	0.224	0.981
	CH-1 B.49	1.514	0.609	0.227	0.918
	CH-2 B.51	1.548	0.461	0.044	0.960
	CH-3 B.54	1.967	0.387	0.221	1.166
	CH-4 B.57	2.210	0.542	0.321	0.966
	CH-5 B.60	1.719	0.537	0.092	0.994
	CH-6 B.63	1.724	0.531	0.102	1.021
	CH-7 B.66	1.450	0.559	0.234	0.957
	CH-8 B.69	1.771	0.606	0.086	0.972
	CH-9 B.72	1.845	0.580	0.080	0.979
	CH-10 B.75	1.733	0.625	0.082	0.923
	CH-11 B.78	2.069	0.405	0.213	1.079
	CH-12 B.81	1.577	0.586	0.122	0.891
	CH-1 C.50	1.609	0.565	0.100	0.961
	CH-2 C.52	2.086	0.550	0.363	1.004
	CH-3 C.55	2.186	0.387	0.257	1.164
	CH-4 C.58	0.676	0.645	0.338	1.025
CH-5 C.61	1.115	0.525	0.124	1.117	
CH-6 C.64	1.448	0.595	0.233	1.036	
CH-7 C.67	1.750	0.636	0.079	0.922	
CH-8 C.70	0.159	0.518	0.366	1.298	

PLAYA AZUL	CH-9 C.73	0.537	0.454	0.157	0.962
	CH-10 C.76	0.741	0.540	0.160	1.092
	CH-11 C.79	1.400	0.497	0.127	1.014
	CH-12 C.82	0.506	0.710	0.402	1.200
	CH-2 S.53	2.270	0.472	0.312	1.047
	CH-3 S.56	1.794	0.506	0.036	0.986
	CH-4 S.59	2.089	0.476	0.292	1.121
	CH-5 S.62	2.068	0.422	0.248	1.122
	CH-6 S.65	1.662	0.469	0.062	0.994
	CH-7 S.68	1.934	0.959	-0.279	2.179
	CH-8 S.71	1.784	0.616	0.109	0.981
	CH-9 S.74	1.437	0.494	0.149	0.939
	CH-10 S.77	1.778	0.610	0.049	0.939
	PA-2 F.95	2.190	0.347	0.183	1.074
	PA-3 F.96	2.226	0.387	0.203	1.066
	PA-4 B.97	1.563	0.537	0.014	0.962
	PA-5 B.100	1.527	0.524	0.059	0.909
	PA-6 B103	1.480	0.554	0.208	0.941
	PA-7 B.106	1.476	0.540	0.178	0.944
	PA-8 F1.110	1.638	0.459	0.063	1.011
	PA-9 F1.113	1.252	0.535	0.030	1.051
	PA-10 F1.116	1.654	0.439	0.073	1.009
	PA-11 F1.119	2.128	0.361	0.172	1.072
	PAIC	2.318	0.441	0.302	1.227
	PA-4 C.98	1.526	0.547	0.162	0.988
	PA-5 C.101	1.447	0.531	0.167	0.931
	PA-6 C.104	-0.125	0.452	0.112	0.903
	PA-7 C.107	1.343	0.542	0.328	1.024
	PA-8 C.109	1.325	0.510	0.166	0.990
	PA-9 C.112	0.903	0.580	0.099	1.008
	PA-10 C.115	1.414	0.465	0.141	0.977
	PA-11 C.118	2.209	0.364	0.202	1.110
	PA-4 S.99	1.983	0.410	0.241	1.153
	PA-5 S.102	2.204	0.378	0.225	1.109
	PA-6 S.105	1.827	0.563	0.084	0.996
	PA-7 S.108	1.607	0.565	0.169	0.994
PA-8 F2.111	1.390	0.478	0.169	0.955	
PA-9 F2.114	1.492	0.424	0.050	0.986	
PA-10 F2.117	1.837	0.471	0.059	0.998	
PA-11 F2.120	2.277	0.351	0.162	1.047	

Anexo 5: Valores de redondez

CONCEPCIÓN BAMBA						
		Medi a	Desv. Est.	Intervalo de confianza		Redondez (Resentini et al., 2018)
Minerales ligeros	Qz mono	0.54	0.10	0.48	0.59	Subanguloso-Subredondeado
	Qz poli	0.56	0.07	0.52	0.60	Subredondeado
	Fld K	0.54	0.11	0.48	0.60	Subanguloso-Subredondeado
Líticos	Ígeno	0.50	0.14	0.42	0.58	Subanguloso-Subredondeado
	Sedimentario	0.67	0.13	0.60	0.74	Subredondeado-Redondeado
	Metamórfico	0.66	0.17	0.56	0.75	Subredondeado - Redondeado
Minerales pesados	Opácos	0.51	0.20	0.40	0.62	Subanguloso-Subredondeado
	Granate	0.49	0.18	0.39	0.59	Subanguloso-Subredondeado
CHIPEHUA						
Minerales ligeros	Qz mono	0.48	0.15	0.41	0.55	Subanguloso - Subredondeado
	Qz poli	0.59	0.08	0.55	0.62	Subredondeado
	Fld K	0.56	0.12	0.51	0.61	Subredondeado
Líticos	Ígeno	0.55	0.07	0.52	0.58	Subredondeado
	Sedimentario	0.53	0.06	0.51	0.56	Subredondeado
	Metamórfico	0.72	0.13	0.66	0.78	Subredondeado-Redondeado
Minerales pesados	Opácos	0.58	0.15	0.51	0.64	Subredondeado
	Granate	0.63	0.15	0.57	0.70	Subredondeado-Redondeado
PLAYA AZUL						
Minerales ligeros	Qz mono	0.57	0.07	0.54	0.60	Subredondeado
	Qz poli	0.62	0.14	0.57	0.68	Subredondeado
	Fld K	0.53	0.12	0.48	0.58	Subanguloso-Subredondeado
Líticos	Ígeno	-	-	-	-	-
	Sedimentario	0.65	0.09	0.62	0.69	Subredondeado
	Metamórfico	0.65	0.13	0.59	0.70	Subredondeado-Redondeado
Minerales pesados	Opácos	0.54	0.18	0.47	0.61	Subanguloso-Subredondeado
	Granate	0.52	0.15	0.46	0.58	Subanguloso-Subredondeado

Índice de figuras

Fig. 1. Modos de transporte eólico. Modificada de Opp et al.,(2021)	11
Fig. 2. Clasificación de dunas. Modificado de McKee (1979).	13
Fig. 3. Mapa geológico del área de estudio. Se señalan los vientos, corrientes dominantes y ubicación de las dunas de estudio. Modificado de Carta Geológico-Minera Juchitán E15-10 D15-1 Oaxaca y Chiapas (SGM, 2000) y Carta Geológico-Minera Morro Mazatán E15-C82 Oaxaca (SGM, 2020).15	
Fig. 4. Mapa de las rutas de eventos meteorológicos que han afectado el Golfo de Tehuantepec. Modificado del Atlas de Riesgos del municipio de Oaxaca de Juárez (IGL, 2011).....	16
Fig. 5. Subprovincias fisiográficas de la Sierra Madre del Sur.....	18
Fig. 6. Partes de una duna parabólica en Concepción Bamba. Fotografía de Kasper-Zubillaga (2019).	22
Fig. 7. Morfologías típicas de las dunas de estudio. (a) Parabólica; (b) Barján; (c) Barjanoide. Fotografías de campo de Kasper-Zubillaga (2019) y Carlos-Delgado (2021).	25
Fig. 8. Laminación en la superficie de las dunas. (a) Duna barján en Playa Azul. (b) Laminación en Concepción Bamba. Fotografías de campo de Kasper-Zubillaga (2019) y Carlos-Delgado (2021). 25	
Fig. 9. Morfología de dunas de Concepción Bamba. (a y b) Dunas ascendentes. (c) Dunas descendentes. (d) Duna parabólica. Imágenes satelitales obtenidas de Google Earth (2021). Fotografías de campo de Kasper-Zubillaga (2019) y Carlos-Delgado (2021).	26
Fig. 10. Morfología de dunas de Chipehua y Playa Azul. (a y c) Dunas barján. (b y d) Dunas barjanoide. Fotografías de campo de Carlos-Delgado (2021).....	27
Fig. 11. Roseta de vientos de datos promedio de cinco años (2014-2019) del área de estudio. Se muestra frecuencia, velocidad y dirección.	28
Fig. 12. Procesos de erosión eólica. (a) Estrías eólicas; (b) ventifactos en Playa Azul. (c y d). Deflación en Chipehua y Concepción Bamba. Fotografías de campo de Carlos-Delgado (2021)....	28
Fig. 13. Mapas de pendientes en grados. (a) Concepción Bamba y Chipehua. (b) Playa Azul.	29
Fig. 14. Desprendimientos rocosos. (a) Familias de discontinuidades en los batolitos costeros. (b) Bloques de roca desprendidos en los alrededores de Chipehua. (c) Fragmentos de roca del tamaño de las gravas. (d) Aporte de fragmentos rocosos del promontorio de Concepción Bamba. Fotografías de campo de Carlos-Delgado (2021).	30
Fig. 15. Histograma de frecuencias de tamaño de grano en arena de dunas de Concepción Bamba.31	
Fig. 16. Histograma de frecuencias de tamaño de grano en arena de duna de Chipehua.	32
Fig. 17. Histograma de frecuencias de tamaño de grano de arena en duna de Playa Azul.	33
Fig. 18. Diagramas bivariados de los parámetros texturales de la arena de dunas de Oaxaca.....	34

Fig. 19. Fotomicrografías de cuarzo policristalino (Qp); cuarzo monocristalino (Qm); feldespato potásico (FdK); esquistos y gneiss en facies de granulita (Lm); pedernal y arenisca (Ls); granate (Grt) y minerales opacos (Op). Fotografías de Carlos-Delgado (2021).....	35
Fig. 20. Diagrama del Análisis Discriminante Lineal.....	37
Fig. 21. Escala visual actualizada de Krumbein (1941) modificada por Resentini et al. (2018). utilizada para determinar la redondez del grano.	56
Fig. 22. Material repositario de la colecta resguardado en la Arenoteca del Laboratorio de Geoquímica del ICMYL, UNAM (Fotografía de Carlos-Delgado, 2021).....	57
Fig. 23. Equipo para el análisis de muestras. (a) Analizador Beckman Coulter modelo LS 230, de difracción láser (Fotografía de ICMYL, 2019); (b) Microscopio polarizante Velab VE-148 P y láminas delgadas (Fotografía de Carlos-Delgado, 2021).....	57

Índice de Tablas

Tabla 1. Valores de r de la prueba de correlación de Pearson.....	36
Tabla 2. Resumen del ADL.....	37
Tabla 3. Escala de tamaño de sedimento de Udden (1914) y Wentworth (1922).	55
Tabla 4. Terminología aplicada a los valores de los parámetros texturales estadísticos (modificado de Folk, 1980).	55