Tipos de dunas

Cómo se forman (elementos que intervienen y dinámica del movimiento)

Erosión de playas y su relación con las dunas

Tipos de dunas

· Dunas embrionarias, dunas frontales y planicies de dunas frontales · Hondonadas · Dunas parabólicas · Barjanes · Dunas transgresivas · Dunas fósiles · Dunas amarillas, cafés y grises · Dunas primarias, secundarias y terciarias · Cómo evolucionan unas a otras, estabilización

Topografía y microhábitats

Tipos de dunas en México

Las dunas costeras en los estados

· Hondonadas y planicies de inundación

Foto: Gerardo Sánchez Vigil

Foto: Gerardo Sánchez Vigil

Óscar Jiménez-Orocio
Patrick Hesp
Ma. Luisa Martínez
Ileana Espejel
Patricia Moreno-Casasola

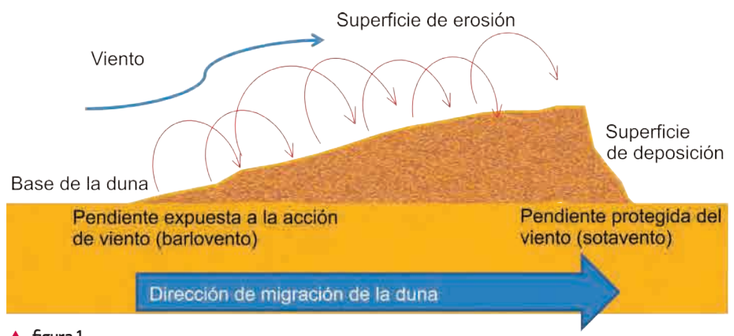
Cómo se forman (elementos que intervienen y dinámica del movimiento)

Las playas y dunas intercambian sedimentos continuamente y son interdependientes. Es decir, interactúan continuamente y esta interacción tiene un impacto fuerte en la evolución y desarrollo de las costas (Packham y Willis, 1997). Un ejemplo de ello es lo que sucede cuando se modifican las fuentes de arena cercanas a la playa y dunas, como ocurre cuando los ríos se canalizan, se construyen presas río arriba, o bien se destruyen las dunas en la parte posterior de la playa. Como respuesta a estas alteraciones, se reajusta la dinámica sedimentaria de la costa y entonces las playas se hacen angostas e incluso llegan a desaparecer. Las dunas también pueden crecer o disminuir por efecto del oleaje y el viento que acumulan sedimentos, y también por la presencia de las minas submarinas de arena y los sedimentos aportados por los arroyos circunvecinos.

Las playas son ambientes muy dinámicos y autorregulados. Su comportamiento depende de cuatro factores (Pilkey et al., 1998): 1) la energía de las olas (proporcional a su altura); 2) la cantidad y tipo de arena en la playa; 3) la orientación de la playa y 4) la tasa de incremento o descenso del nivel del mar. Las playas mantienen un equilibrio natural entre estos cuatro factores que se reconoce como equilibrio dinámico. Cuando uno de los cuatro cambia, se desarrolla un ajuste en los otros tres para volver al equilibrio dinámico. A veces estos reajustes naturales son los responsables de daños cuantiosos en las construcciones establecidas en las playas. Por ejemplo, durante las tormentas y huracanes, las olas incrementan su energía (tienen mayor altura y fuerza) y las playas responden aplanándose, con lo que la energía de las olas es amortiguada sobre una mayor superficie. Si se mantuviera una pendiente pronunciada, la gran energía de las olas se ejercería sobre una superficie menor y el daño a la costa sería mucho mayor. Así, conforme las playas se aplanan el impacto de las olas disminuye. Sin embargo, cuando hay construcciones sobre las dunas, éstas absorben el oleaje de alta energía, y los daños materiales pueden ser cuantiosos. Esta interacción entre la playa y el oleaje es parte de la vida misma de la playa. Sin ella no llegaría arena y no existirían estos ecosistemas a los que el ser humano da tanto valor. El problema se produce cuando el humano construye en una de las zonas más dinámicas de la tierra, pensando que sus construcciones de cemento podrán detener la fuerza del mar.

En el caso de las dunas, la fuente inicial de arena para que se formen estas geoformas es la depositada en las playas gracias a las corrientes de agua del océano, o de lagos y ríos en dunas interiores. Cuando la arena de la playa queda expuesta al aire durante tiempo suficiente, se seca y entonces es susceptible de ser movida por el viento. Así da inicio la formación de las dunas costeras.

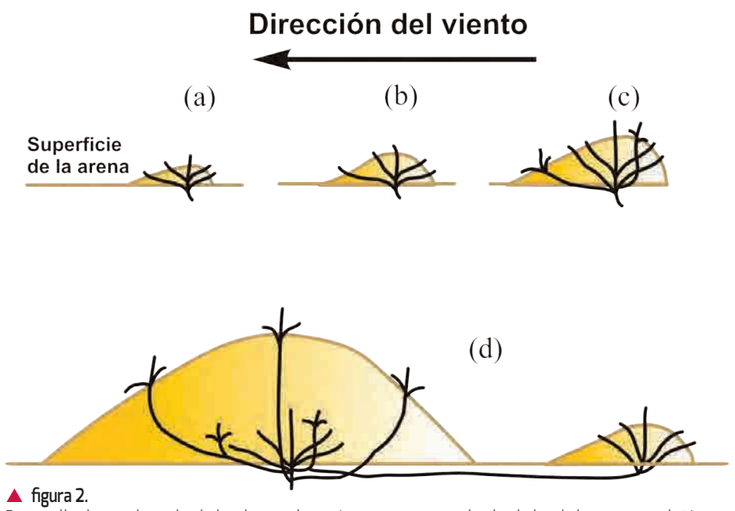
Aunque existen dunas de muchos tamaños y formas, todas se generan de la misma manera. Cada duna es un montículo de arena que se mueve y acumula como resultado de la acción del viento. Pye y Tsoar (1990) han realizado estudios detallados sobre el complicado proceso que da lugar a la formación de las dunas, y la siguiente descripción se basa en sus resultados. Se sabe que los factores críticos para la formación de dunas son: 1) el aporte de sedimentos; 2) el tamaño de los sedimentos; 3) la velocidad del viento y 4) la presencia de obstáculos. Una vez que existe el aporte de sedimentos, la formación de una duna empieza cuando la velocidad del viento es tal que puede levantar los granos de arena. Se ha calculado que la velocidad mínima para que haya movimiento de arena es de 4.5 m/seg. Casi toda la arena se transporta a una distancia muy cercana a la superficie del suelo. Cuando el viento sopla, los granos individuales de arena se mueven en una serie de brincos como resultado de un fenómeno conocido como saltación. Durante la saltación, una vez que los granos de arena están en el aire, describen una curva, volviendo a caer en el suelo, pero con un impacto tal que rebotan y son lanzados al aire nuevamente. El impacto de este rebote provoca que otros granos de arena también sean lanzados al aire, de manera que en realidad, más arena se puede poner en movimiento que la que el aire es capaz de levantar desde la superficie (figura 1). Conforme más granos de arena son impactados por los granos previamente en movimiento, más granos son lanzados hacia el aire, hasta que en poco tiempo, toda la superficie de la arena está en movimiento. Obviamente, conforme mayor es la velocidad del viento, aumenta la distancia a la que viajan los granos de arena saltantes, y mayor será el impacto que tengan sobre los que están en la superficie de la arena. El movimiento de arena por lo tanto, también es mucho mayor. En la práctica se ha observado que el movimiento de arena más importante ocurre durante periodos de altas velocidades de viento, más que como resultado de vientos moderados, por ejemplo durante los nortes. Cuando uno se para en una playa o duna durante un norte en pocos minutos puede sentir la cara cubierta con una capa fina de arena.



▲ **figura 1.**
Esquema donde se muestra el movimiento de la arena por medio de la saltación. (*Dibujo elaborado por M.L. Martínez*).

Una vez levantadas, las nubes de granos de arena saltantes viajarán en la misma dirección que el viento, hasta que éste pierde velocidad y los granos de arena son depositados nuevamente. En esta etapa de la formación de las dunas, otro factor importante que afecta el movimiento de la arena es la presencia de obstáculos que modificarán a su vez, la velocidad del viento. Así pues, una duna empieza a formarse cuando el viento se encuentra con un obstáculo. Por ejemplo, cuando el viento choca contra un alga, una planta, una roca o un tronco caído, cambia de dirección y rodea este obstáculo, perdiendo velocidad. Conforme esto sucede, la arena es depositada hasta que eventualmente se forma un montículo de arena alrededor del obstáculo, llegando, incluso, a quedar cubierto de arena por completo. Este montículo, a su vez, representa un obstáculo aún mayor para el viento, con lo que se puede ir acumulando más y más arena. La forma que finalmente adquirirá la duna dependerá de su ubicación respecto al viento y del impacto que éste tenga sobre ella.

Dentro de los diferentes tipos de obstáculos que disminuyen la velocidad del viento y provocan que la arena sea depositada, las plantas son las más efectivas, ya que son capaces de crecer conforme la arena se va acumulando (figura 2). Hay muchas especies que tienen esta capacidad, y forman ramas, tallos y rizomas para mantenerse sobre la superficie de la arena, evitando así ser cubiertas por ésta (figura 3). Los ejemplos más conocidos de estas plantas son hierbas y arbustos de especies como *Ipomoea pes-caprae*, *Canavalia rosea*, *Croton punctatus*, *Palafoxia lindenii*, *Chamaecrista chamaecristoides* y *Uniola paniculata* en las costas mexicanas del Golfo de México (Moreno-Casasola, 1986) y *Abronia maritima* y *Uniola pittieri* en el Pacífico (Espejel et al., 2013). Se ha de-



▲ **figura 2.**
Desarrollo de una duna alrededor de una planta. La arena se acumula alrededor de las ramas, cubriéndolas por completo. En respuesta, la planta crece y funciona como un obstáculo de mayor tamaño que retiene más arena (modificado de Packham y Willis, 1997; elaborado por R. Landgrave).

mostrado que estas especies son muy tolerantes al encubrimiento con arena (Martínez y Moreno-Casasola, 1996).

Una vez formadas y si carecen de vegetación que las cubra, todas las dunas empiezan a migrar en la misma dirección que los vientos dominantes. En el lado donde pega el viento (barlovento), se forma una pendiente suave donde los vientos fuertes golpean arrastrando consigo los granos de arena. Al llegar a la parte más alta de la duna (la cima), el viento pierde velocidad, por lo que es incapaz de sostener los granos de arena y por ello los deposita en la pendiente contraria (sotavento), que es mucho más pronunciada (figura 3). Este proceso continúa hasta que la pendiente de sotavento es tan marcada (mayor de 35° respecto a una línea horizontal) que se generan derrumbes de arena. De esta manera, las dunas van avanzando, con procesos de erosión en la pendiente de barlovento y de acumulación de arena en la de sotavento. La erosión en la pendiente interna (barlovento) de las dunas se mantiene mientras continúa la acción del viento y no hay cubierta vegetal, hasta que se alcanza el nivel del agua del subsuelo o algún tipo de sustrato menos erosionable, como una superficie rocosa (figura 3).

La velocidad a la que avanzan las dunas depende de:

a) su forma
b) su tamaño
c) el tamaño de los granos de arena
d) la pendiente del terreno sobre el que avanzan
e) el tipo de obstáculos que encuentran en su camino
f) la cubierta vegetal que tiene cada duna
g) la velocidad y la dirección del viento

Si los granos de arena son pequeños, una brisa de 13-20 km/hr es suficiente para levantarlos y generar movimiento de la duna. Sin embargo, la mayoría de las dunas están conformadas por arena de tamaño mediano, los cuales se mueven cuando los vientos alcanzan, cuando menos, 32 km/hr. La altura de la vegetación juega un papel muy importante en el avance de las dunas, ya que mientras más altas sean las plantas, menor será la velocidad del viento sobre la arena, y por lo tanto, menor será la posibilidad de que ésta sea transportada a grandes distancias. Se ha calculado que cuando las dunas avanzan sobre bosques altos, migran a una velocidad de 1-2 metros al año; cuando avanzan sobre arbustos su tasa de migración es de 2-5 metros al año y si avanzan sobre pastizales y hierbas de poca altura, pueden incluso cubrir de 100 a 200 metros al año (Hesp, 2000).

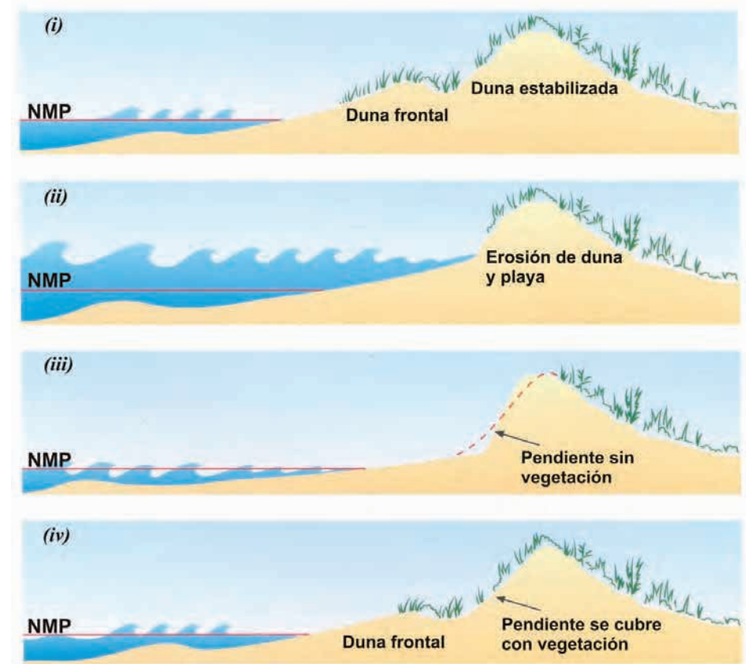
Además de la altura de las plantas, el movimiento de la arena de las dunas se ve muy afectado por la cantidad de plantas que hay y la superficie que cubren (cobertura vegetal), ya que el proceso de saltación no puede dar inicio bajo las plantas, donde la velocidad del viento se ha reducido notablemente. Generalmente, las dunas más retiradas de la costa son las que tienen una mayor cobertura vegetal y por ende, son las que se mueven menos, es decir, están más estabilizadas. Lo anterior se debe a que estas dunas son más antiguas, y por lo tanto las plantas han tenido más tiempo para colonizar la arena y crecer. Además, el impacto de los vientos fuertes es menor en las dunas ubicadas tierra adentro, lo que también es favorable para el crecimiento de la vegetación y la disminución del movimiento de arena (Packham y Willis, 1997).

Erosión de playas y su relación con las dunas

Para manejar las dunas, es muy importante comprender que son sistemas dinámicos con momentos y espacios en que no hay vegetación y se mueven, se erosionan. También es fundamental entender que hay una interacción permanente e intensa entre las playas y las dunas. Una le proporciona arena a la otra y viceversa. Las dunas juegan un papel muy importante en la estabilidad de la línea de costa, en particular de las playas arenosas. Funcionan como reservas de sedimentos, ya que reciben, proveen y almacenan arena transportada de y hacia playas adyacentes (Ranwell y Boar, 1986). El suministro periódico de arena de la duna a la playa es un ciclo de retroalimentación que reduce la erosión costera debido a que disipa la energía del oleaje. La interrupción o disminución del balance de arena puede provocar la desaparición de playas (Nordstrom et al., 1990). Esta función es fundamental hoy en día en que las playas del mundo se están erosionando. Bird (1996) considera que entre el 70 y 90% de las playas del mundo están sufriendo intensos procesos de erosión debido a la falta de sedimentos. Lo anterior es particularmente preocupante, puesto que en muchos países, entre ellos México, hay grandes inversiones económicas en los litorales con playas, y éstas son uno de los destinos más importantes de los vacacionistas.

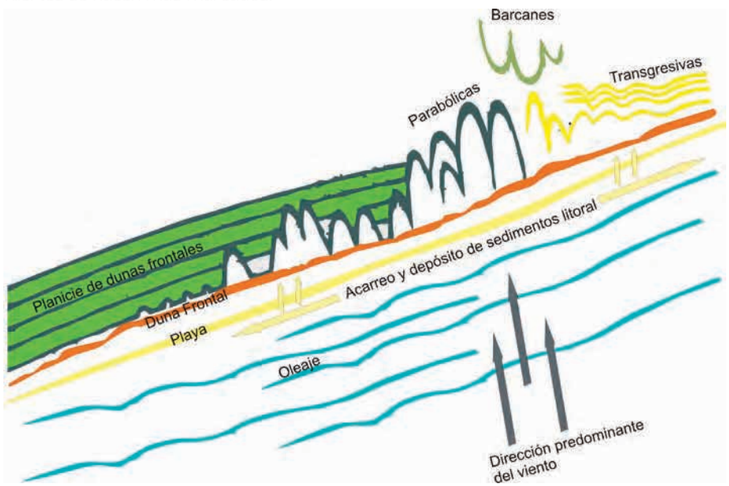
▲ figura 3.
Movimiento de una duna en dirección del viento. La arena erosionada en la pendiente donde pega el viento (barlovento) es depositada en la cima y en la pendiente donde no pega el viento (sotavento), de manera que avanza la duna poco a poco (Modificado de Moreno-Casasola, 1982). La línea punteada indica la posición original de la duna (esquema elaborado por R. Landgrave).

Asimismo, las dunas costeras funcionan como barreras naturales de protección que actúan como defensa ante fenómenos hidrometeorológicos extremos e inundaciones; son ecosistemas clave para la recarga de acuíferos y para amortiguar la intrusión salina. Además, son hábitat de especies endémicas o en alguna categoría de riesgo (Ranwell y Boar, 1986; Agardy et al., 2003; Martínez et al., 2004; Seingier et al., 2009). Se ha demostrado que en las zonas donde se mantienen dunas costeras en buen estado de conservación, el impacto de fenómenos naturales como tormentas y huracanes es menor que en aquellas zonas donde las dunas están severamente deterioradas. Las dunas costeras ayudan a mantener la línea de costa y a sostener las playas. Estas funciones son cada vez más importantes ante escenarios de cambio climático, donde se predice que los eventos meteorológicos extremos (como huracanes) aumentarán en número e intensidad, al tiempo que el nivel del mar se incrementará, teniendo un mayor efecto erosivo en las playas y líneas litorales. En la sección de descripción de las dunas por estado, se podrá apreciar la vulnerabilidad de nuestras costas ante la elevación del nivel del mar y valorar la importancia de estos ecosistemas en cada una de las entidades, desde el punto de vista de protección. En este sentido, Leyva et al., (2009) las denominaron ecosistemas protectores.



▲ figura 4.
Dinámica de la playa y las dunas frontales. En tiempos de clima tranquilo (i), las olas son moderadas. Rompen en la playa, depositan arena y se forman las dunas frontales. Durante las tormentas (ii) se erosionan las playas y las dunas frontales. Cuando regresa el buen tiempo (iii) las olas nuevamente depositan sedimentos en la playa. Con el tiempo, la vegetación vuelve a cubrir la duna y se forma otra duna frontal (NMP = Nivel del mar Máximo Promedio) (traducido de Hesp, 2000; esquema elaborado por R. Landgrave).

Los fenómenos naturales como las tormentas y los huracanes juegan un papel importante en la dinámica de las playas y dunas, ya que elevan el nivel medio del mar y generan procesos de erosión intensa. Si las olas son lo suficientemente grandes, o si la tormenta dura mucho tiempo, entonces la playa y las dunas embrionarias o frontales son severamente erosionadas (figura 4). Posteriormente, conforme la arena vuelve a ser depositada por los oleajes más suaves, se reconstruyen la playa y las dunas embrionarias, manteniéndose así hasta la siguiente tormenta (Hesp, 2000). El ciclo de erosión-restauración de las dunas es totalmente natural e inherente a estos sistemas, y mantiene a las dunas embrionarias como una barrera eficiente que protege contra la intrusión del agua de mar durante las tormentas. Cuando se pierden estas dunas por eventos naturales o por las actividades humanas, los efectos tierra adentro del viento y los oleajes fuertes se hacen más marcados.



▲ **figura 5.**
Representación esquemática de diferentes tipos de dunas encontradas en las costas de México (Modificado de Bird, 2010).

Tipos de dunas

Existen dunas costeras y dunas interiores, de desierto. Las dunas costeras se encuentran, como su nombre lo dice, en las costas, y las dunas interiores están principalmente en los desiertos. Ambos tipos de duna pueden ser de gran tamaño y comparten características, como la escasez de nutrientes y agua, y la movilidad del sustrato. Pero además, en las costas existe una fuerte influencia marina en forma de salinidad y de tormentas. En este trabajo solamente se presenta información sobre las dunas costeras.

Conforme las dunas costeras se forman y migran tierra adentro o a lo largo de la costa, adquieren diferentes formas que son el resultado de procesos de deposición y de acumulación de arena, así como de su interacción con las plantas. De acuerdo con sus

▲ **figura 6.**
figura 6. Duna embrionaria y cubierta de vegetación en la costa de Quintana Roo.
(**Foto:** *G. Sánchez Vigil*)

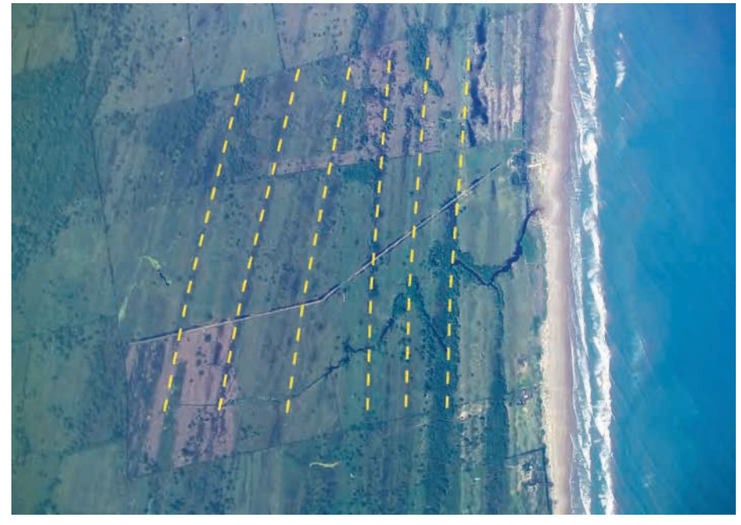
características topográficas y la manera en que se mueven, las dunas se han clasificado en cinco grandes grupos (Hesp, 2000): 1) dunas embrionarias o frontales; 2) hondonadas; 3) dunas parabólicas; 4) barjanes y 5) dunas transgresivas (figura 5).

Dunas embrionarias o frontales y planicies de dunas frontales

Las dunas frontales son montículos de arena relativamente pequeños y aislados, y generalmente se encuentran más cercanos al mar, ubicándose con una orientación paralela a la costa (figura 6). Su formación da inicio cuando la arena transportada por el viento queda atrapada por la vegetación que crece en la playa, o bien por otros obstáculos, como troncos o animales arrastrados por las corrientes del mar. La arena transportada por el viento es gradualmente depositada y "atrapada" por las plantas conforme el flujo de viento se mueve a través de la vegetación (Hesp, 2000).

Debido a su tamaño y ubicación, las dunas embrionarias y las dunas frontales pueden ser confundidas. Las dunas embrionarias son dunas cuya formación está dando inicio, y se está formando un pequeño montículo. Las dunas embrionarias son montículos de arena dispersos en la zona entre la línea de marea más alta y la base del primer cordón de dunas, fijados por vegetación pionera (especies de plantas tolerantes a la salinidad, estrés hídrico y enterramiento) (figura 6). Las dunas frontales se forman mediante la unión de dunas embrionarias y gracias a la rápida intervención de las plantas en la disminución de la velocidad del viento. La acumulación de dunas embrionarias y el incremento del sedimento atrapado llevan a la formación de las dunas frontales. Las dunas frontales son cordones de dunas paralelos a la línea de costa, de longitud variable. Pueden medir solo unos cuantos metros de longitud o alcanzar varios kilómetros a lo largo del litoral costero. Asimismo, dependiendo de la cantidad de sedimento disponible pueden medir menos de un metro o llegar por arriba de los tres metros de

▲ **figura 7.**
Dunas frontales semiestabilizadas al fondo de la playa, seguidas por un campo de dunas transgresivas tierra adentro.
(**Foto:** *M.L. Martínez*).



▲ **figura 8.**
Planicie de dunas frontales; norte de Veracruz. Líneas punteadas: canales interdunarios.
(**Foto:** *INECOL*).

▲ **figura 9.**
Hondonada alargada, en forma de "corredor". En el fondo se acumulan semillas y hojarasca.
(**Foto:** *J.G. García-Franco*).

altura. La dinámica y complejidad ecosistémica es mucho mayor en las dunas frontales que en las dunas embrionarias, ya que se presenta una mayor abundancia y número de especies de plantas (figura 7).

Planicie de dunas frontales

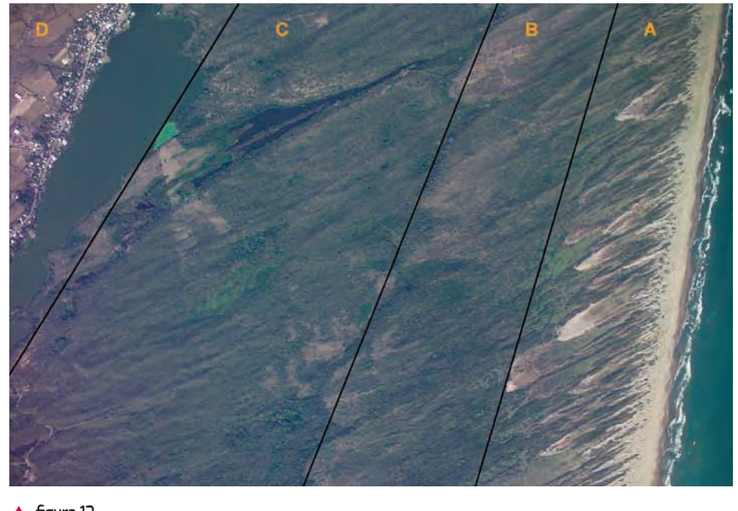
En algunas costas hay múltiples cordones de dunas, usualmente con una orientación paralela a la línea de costa, las cuales se han formado sucesivamente como dunas frontales detrás de una playa arenosa progradante (o que le gana terreno al mar por la acumulación de sedimentos). Lo anterior es el resultado del recurrente ciclo de erosión y acreción en las playas. En este ciclo, el sedimento es depositado, como en la formación de dunas frontales incipientes, para la construcción de una nueva duna frontal, frente a la duna ya establecida; en dirección a la línea de costa. La duna anterior se convierte así en un cordón paralelo a la línea de costa, generalmente separados por un canal inundable (Bird, 2010). El lado frontal de la duna (en dirección al mar) es erosionado por acción de las olas durante la época de tormenta formando un escarpe pronunciado en la duna. Subsecuentemente, durante las épocas de calma, la playa es restaurada por el depósito de sedimento y nuevas dunas incipientes son formadas en el fondo de la playa. De esta manera, comienza nuevamente el proceso de construcción de un nuevo cordón de dunas frontales establecidas, paralelas a la línea de costa. La formación de los canales se debe a la dinámica del viento entre cada uno de los cordones de dunas; la velocidad del viento es reducida por el primer cordón de dunas, y a su vez la dirección es cambiada siguiendo la forma de la duna y erosionando el espacio entre ambos cordones (Jarmalavicius et al., 2012). Las planicies de dunas frontales frecuentemente son rápidamente colonizadas por vegetación y no alcanzan grandes alturas, sin embargo, sí pueden alcanzar muchos kilómetros de ancho (figura 8). Los procesos de sucesión en estos tipos de dunas son relativamente rápidos. Los primeros cordones de dunas son fijados por especies pioneras, seguidas del establecimiento de pastos. Conforme se incrementa el número de cordones de dunas, la vegetación va cambiando y la presencia de especies leñosas es más común. Por otro lado, la captación de agua de los múltiples canales interdunarios facilita la presencia y establecimiento de vegetación hidrófila. Lo anterior da lugar a un mosaico de ecosistemas y microhábitats en un solo lugar. Desde el aire, los campos de dunas frontales se identifican fácilmente porque se observan como líneas paralelas a la costa.

Hondonadas

Las hondonadas son el resultado de procesos erosivos, y se encuentran en las partes más bajas de los sistemas de dunas. Pueden tener una gran variedad de formas, pero la mayoría se clasifican como hondonadas en forma de plato (formando un semi-círculo) (figura 9) o bien hondonadas alargadas (Hesp, 2000) (también llamados corredores de viento). Las hondonadas son comunes en cualquier zona costera con suelo arenoso donde haya procesos de erosión, ya sea por la acción de los vientos o por los oleajes intensos.

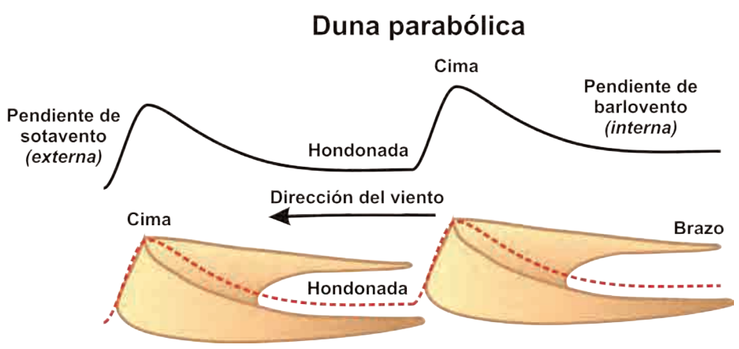
La formación de las hondonadas da inicio cuando ocurre una disminución de la cubierta vegetal y posteriormente la acción del viento o del oleaje acelera los procesos de erosión. Algunas de las causas naturales por las que puede haber una reducción de la cubierta vegetal son: a) erosión debido a oleajes intensos, como sucede durante tormentas y huracanes; b) presencia de vientos muy intensos, por ejemplo, en el Golfo de México, los vientos fuertes del norte y que predominan durante la temporada de invierno, y en el Pacífico Norte y Golfo de California donde los vientos conocidos como "santanas" y "westes" acarrean grandes cantidades de arena y erosionan fuertemente las dunas; c) muerte de la vegetación debido a encubrimientos con arena, más intensos de lo que naturalmente toleran las especies; d) herbivoría intensiva debida a la actividad de los herbívoros naturales (como conejos). Otras causas de pérdida de vegetación y que están asociadas con las actividades de los humanos son el pastoreo por ganado, los vehículos para "pasear" en las dunas, los caballos que llevan a las personas a paseos durante los cuales pisotean y destruyen la vegetación. Todas estas actividades llegan a matar a las plantas que han logrado detener los granos de arena y estabilizar las dunas. Sin plantas, la arena de ese sitio queda nuevamente libre para ser movida y acarreada por el viento. Debido a que los vientos dentro de las hondonadas son mucho más intensos que afuera, las hondonadas se forman de manera relativamente rápida (Hesp, 2000). En muchas ocasiones la erosión continúa hasta que se alcanza el nivel del agua del subsuelo o bien una superficie más consolidada y menos erosionable como podría ser una capa

▲ figura 10.
En las hondonadas se pueden formar lagos interdunarios durante la época de lluvias.
(**Foto:** *INECOL*)

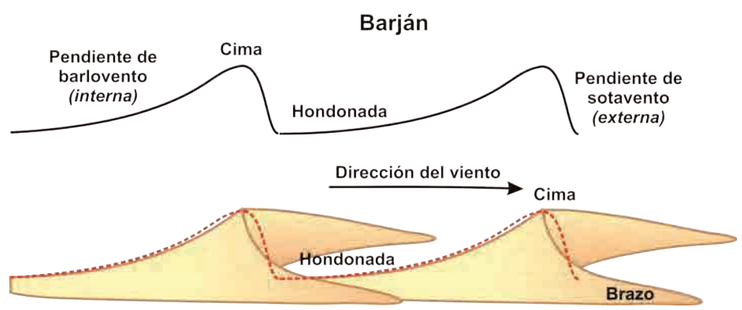


▲ figura 12.
Campo de dunas parabólicas con diferentes grados de estabilización:
A) y B) Móviles y semimóviles; C) Estabilizadas; y D) Laguna interdunaria permanente.
(**Foto:** *INECOL*)

▲ figura 14.
Campos de dunas transgresivas en forma de barjanes en Baja California Sur.
(**Foto:** *Gerardo Sánchez Vigil*).



▲ figura 11.
Esquema que muestra las diferentes partes de una duna parabólica.
(Modificado de Moreno-Casasola, 1982; esquema elaborado por R. Landgrave).



▲ figura 13.
figura 13. Esquema mostrando las diferentes partes de una duna en forma de un barján.
(esquema elaborado por Rosario Landgrave).

de carbonato. Dependiendo de la proximidad al agua del subsuelo (manto freático), las hondonadas también se clasifican como húmedas, cuando se inundan al subir el nivel del manto freático, o secas, cuando nunca se inundan (Ranwell, 1972). En el caso de las hondonadas húmedas, la inundación puede durar desde unos pocos meses hasta ser permanente, formándose lagos interdunarios. El nivel de agua varía dependiendo de las fluctuaciones del mismo manto freático y del régimen local de lluvias. Los lagos que son permanentes albergan una gran variedad de animales, como patos, garzas y especies vegetales acuáticas, como los lirios acuáticos (Peralta-Peláez y Moreno-Casasola, 2009; Moreno-Casasola, 2010) (figura 10).

Dunas parabólicas

Las dunas parabólicas son dunas en forma de "U" invertida y, como su nombre lo indica, semejan una parábola (figura 11). Esta forma se hace más evidente sobre todo cuando son observadas desde arriba. Las dunas parabólicas se caracterizan por tener dos brazos y una cima, que es la parte más alta y donde se unen los brazos (figura 12). La cima está orientada hacia la dirección donde viajan los vientos dominantes. Además se pueden reconocer una pendiente interna y una externa. La primera está en dirección de donde viene el viento (barlovento) y la segunda en la dirección hacia donde sopla (sotavento). Las hondonadas húmedas o secas se localizan entre los dos brazos. Las dunas parabólicas se pueden formar de manera repetitiva, dando como resultado campos de dunas parabólicas que, vistos desde arriba, semejan un techo con tejas.

Barjanes

Los barjanes tienen forma de media luna, y se parecen a las dunas parabólicas. Sin embargo, existe una diferencia muy importante entre ambos tipos de dunas, ya que en los barjanes los brazos apuntan hacia donde avanzan los vientos predominantes, lo que es contrario a lo que ocurre en las dunas parabólicas. Es decir, en los barjanes los brazos avanzan más rápido que la cima. Además, contrario a lo que ocurre en las dunas parabólicas, la pendiente pronunciada de sotavento se encuentra entre los brazos (Figuras 13 y 14).

Los barjanes pueden medir de 9 a 30 metros de altura y la distancia entre la punta de un brazo y la otra puede ser de hasta 365 metros (Gallant, 1997). Al igual que las dunas parabólicas, se forman en grupos. Los geomorfólogos no comprenden exactamente cómo son las primeras etapas en la formación de los barjanes. Se piensa que inicialmente, un barján se origina a partir de un montículo de arena. Si el montículo permanece seco, entonces se van formando los brazos que gradualmente van avanzando en dirección del viento. En México, estas dunas son raras, y sólo existen en Baja California Sur y Sonora.

Dunas transgresivas

Cuando se habla de campos de dunas transgresivas, se está haciendo referencia a conjuntos de dunas que están avanzando (o que han avanzado) tierra adentro o a lo largo de la costa y que tienen una cubierta de vegetación muy escasa o nula (figura 15). Es decir, que están transgrediendo. Avanzan sobre todo tipo de terrenos, desde aquellos totalmente cubiertos por vegetación hasta aquellos parcialmente desnudos. También pueden avanzar sobre zonas con pendientes muy pronunciadas. Debido a su gran movilidad cuando no están cubiertas de vegetación, estas dunas también se conocen como dunas migratorias. Al igual que con los otros tipos de dunas, pueden presentar diferentes grados de cobertura vegetal: pueden estar totalmente cubiertas por plantas o bien estar totalmente carentes de vegetación. La extensión que abarcan los campos de dunas transgresivas es muy variable, y fluctúan entre algunos cientos de metros a lo largo de las costas y tierra adentro, hasta muchos kilómetros.

Las dunas de los campos de dunas transgresivas pueden tener una gran variedad de formas. Por ejemplo, pueden ser ondas semejantes a las que se ven en la superficie del mar, pero su movimiento no es tan perceptible por nosotros. Pareciera como si las ondas estuvieran congeladas. Estas dunas en forma de ondas se llaman dunas transversas. También existen campos de dunas transgresivas cuya forma es principalmente parabólica.

El límite tierra adentro de los campos de dunas transgresivas se conoce como borde de precipitación, ya que es ahí donde la arena se deposita y cubre el terreno sobre el que van avanzando las dunas. Estos bordes de precipitación tienen pendientes muy pronunciadas que varían desde un ángulo de 32-34° (el máximo ángulo en el que se puede acumular la arena sin deslizarse) hasta uno de 50° cuando hay una cobertura vegetal densa. En contraste con lo anterior, en las partes cercanas al agua es común encontrar zonas erosionadas que forman hondonadas, donde el manto freático está cercano a la superficie de la arena.

Los campos de dunas transgresivas se originan o han originado en respuesta a un conjunto de factores (Hesp, 2000): a) en respuesta a cambios climáticos o cambios en el nivel del mar, en particular los ocurridos hace 7,000 a 10,000 años; b) en regiones con un aporte abundante de sedimento y con un régimen de vientos fuertes; c) en costas con fuertes procesos erosivos tanto naturales como inducidos por las actividades humanas. En cualquiera de estas circunstancias, que dan como resultado que una gran cantidad de sedimento sea transportada hacia las playas, se pueden formar extensos campos de dunas transgresivas, sobre todo en aquellos lugares con vientos intensos y frecuentes. Aunque se tiene este conocimiento básico sobre los campos de dunas transgresivas, los mecanismos o factores directamente responsables de su formación requieren más investigación.

Dunas fósiles

Las dunas muy antiguas se denominan "dunas fósiles". Existen diferentes tipos de dunas fósiles. Por un lado, puede tratarse de una duna móvil que tenga la particularidad de no estar siendo alimentada por arena de la playa (Sociedad Geológica de Chile - http://www.sociedadgeologica.cl). Estas dunas también reciben el nombre de "dunas colgadas". La situación geomorfológica de las dunas colgadas las hace frágiles porque no se están renovando. Un ejemplo de dunas fósiles "colgadas" son las dunas de El Rosario, en Baja California, que aunque son móviles, ya no reciben aporte de sedimentos nuevos.

Otro tipo de dunas fósiles son aquellas cuya arena ya se ha consolidado, formando una roca llamada arenisca. Es decir, se trata de "dunas petrificadas". La arenisca es una de las rocas sedimentarias más comunes en el planeta (Flor, 1990; Vignaud et al., 2002) (figura 16). Se forma a partir de material acumulado por procesos de sedimentación, ya sea por agua o por aire. En el caso de la arenisca de origen costero, se forma, entre otras maneras, a partir de la arena de la playa y las dunas costeras. Una vez acumulada, la arena se compacta por la presión de los depósitos acumulados y se cementa por los minerales que se percolan entre los granos de la arena. Estos minerales funcionan como una especie de pegamento de los sedimentos, siendo los más comunes el sílice y el carbonato de calcio, los cuales se generan por la modificación de la arena cuando está bajo presión de otras capas de sedimento (Protheros, 2004). Frecuentemente, en estas dunas petrificadas es posible observar abundantes rizolitos, que son rocas que se forman alrededor de las raíces de las plantas, dejando la cavidad donde estaba la raíz originalmente (Vignaud et al., 2002).

◀ **figura 15.**
Campo de dunas transgresivas
(**Foto:** *Gerardo Sánchez Vigil*).

▲ **figura 16.**
Arenisca: roca formada a partir de la compactación y cementación de la arena.
(**Foto:** *M.L. Martínez*)

La mayoría de las dunas del mundo datan del Holoceno (hace unos 20 mil años). Sin embargo, existen dunas fósiles que se calcula que fueron formadas durante el Pleistoceno, hace alrededor de dos millones de años.

Dunas amarillas, cafés y grises

En algunos países del mundo se clasifica a las dunas en función del color aparente de la arena, mismo que está relacionado con las etapas sucesionales. Así, las dunas amarillas son aquellas que no tienen vegetación y que por lo tanto son muy móviles. La falta de materia orgánica les brinda un tono amarillento.

Conforme la arena se estabiliza, aumenta la cubierta vegetal y se acumula la materia orgánica, lo que hace que la arena adquiera un tono café. Las dunas semimóviles a veces se llaman dunas cafés.

Por último, las dunas grises son aquellas que ya están cubiertas de vegetación y que han desarrollado un mantillo orgánico. Además, en los países donde se usa esta clasificación colorida de las dunas, en las etapas más estabilizadas se desarrolla una capa de líquenes que le brindan el tono grisáceo a las dunas.

Es importante tener en cuenta que el color de la arena también depende de los componentes de la misma: por ejemplo, puede ser blanca por la presencia de material calcáreo, o negra por la presencia de cenizas volcánicas. En ambos casos, el color no es indicativo de estado sucesional ni de conservación. Es por ello que rara vez se utiliza esta clasificación multicolor (Ranwell, 1972).

Dunas primarias, dunas secundarias y dunas terciarias

Otra clasificación de los tipos de dunas las identifica como embrionarias, primarias, secundarias y terciarias. Las dunas embrionarias son las que se forman en el fondo de la playa y conforme se aglutinan dan lugar a las dunas frontales (Hesp y Walker 2013). Éstas son las que reciben el impacto directo del oleaje producido por las mareas astronómicas y las marejadas de tormentas. Atrás de las dunas embrionarias y frontales se encuentran las dunas primarias, que pueden formar cordones de dunas. En las dunas primarias el movimiento de la arena es intenso y la influencia marina es fuerte, por lo que la vegetación característica de estas dunas es tolerante a la salinidad y al movimiento de arena. Las dunas secundarias se encuentran tierra adentro, y la influencia marina es mucho menor. Aquí el movimiento de arena es reducido, puesto que la cobertura vegetal es mayor. Se comparan con las dunas semi-móviles. Por último, en las dunas terciarias el sustrato tiene una mayor estabilización y el movimiento de arena es prácticamente nulo (San Martín et al. 1992).

Cómo evolucionan unas a otras, estabilización

La estabilización de las dunas cobra importancia desde varios puntos de vista: cuando se busca hacer un uso forestal de la vegetación, cuando las dunas están cerca de un poblado y no se quiere que la arena cubra las calles y las casas, para evitar los daños que causa el movimiento de la arena a la infraestructura urbana. La estabilización siempre es parte de un proceso donde unas especies germinan y crean un microambiente donde se facilita la germinación y el establecimiento de otras especies que pueden llegar a formar una cubierta vegetal densa. Es decir, hay tres tipos de estadios dentro de la dinámica natural de las dunas costeras: a) dunas en formación y móviles; b) dunas semiestabilizadas y c) dunas totalmente estabilizadas. En los tres tipos de estadios pue-

den existir espacios inundables en las partes más bajas y cercanas al agua del subsuelo. Estas zonas inundables se conocen como hondonadas húmedas o lagos interdunarios mencionados anteriormente.

En el paso de una duna móvil a una estabilizada, primero existe una cubierta vegetal constituida por plantas herbáceas y después esta vegetación herbácea es sustituida por vegetación leñosa, tanto arbustiva como arbórea. Este recambio de especies es un proceso natural y frecuente. Pero también ocurre en dirección contraria, ya que como se vio anteriormente, la arena puede ponerse nuevamente en movimiento debido a la muerte de plantas por procesos naturales, factores indirectos inducidos por el hombre o por actividades humanas de impacto directo sobre las dunas. Al quedar la arena descubierta, el proceso de colonización y estabilización da inicio nuevamente. La dinámica de las dunas y su interacción con la playa (su fuente de sedimentos), con las plantas y el viento lleva justamente a un proceso de estabilización- movilidad que se repite constantemente.

El hecho de que naturalmente existan dunas sin vegetación, es decir móviles, significa que no siempre se debe reforestar. De hecho, existen plantas exclusivas de dunas costeras que crecen mejor cuando son enterradas por la arena, justamente porque han evolucionado bajo el movimiento constante de la arena que las entierra. Por tanto, solamente se debe reforestar cuando la duna está estabilizada por una cubierta de vegetación natural como son los pastizales y matorrales, y además se tiene un objetivo específico (ver capítulo de Reforestación).

Topografía y microhábitats

Una característica común de las dunas costeras es su heterogeneidad topográfica y ambiental. Esto significa que son ambientes muy variables en términos de su tamaño, longevidad y movilidad. Por ejemplo, las dunas costeras pueden ser pequeñas acumulaciones con una breve duración, o bien pueden estar formadas por grandes volúmenes de arena y ser relativamente persistentes y duraderas. La extensión de las dunas hacia tierra adentro abarca desde unos cuantos pocos metros hasta cerca de 10 km y también es muy posible que tengan diferentes grados de movilidad, la cual está directamente relacionada con la cantidad de cubierta vegetal con que cuenten (Moreno-Casasola, 1986). Cuando carecen de vegetación son sumamente móviles y ganan y pierden arena constantemente, en respuesta a la acción del viento (figura 17). Cuando las dunas están parcialmente cubiertas por vegetación son llamadas semi-móviles (figura 18) y, como su nombre lo implica, la arena no es completamente móvil. Finalmente, las dunas estabilizadas (figura 19) están totalmente cubiertas por plantas y su arena prácticamente no tiene ningún movimiento. A menudo, los sistemas de dunas están conformados por un mosaico complejo de dunas móviles, semimóviles y estabilizadas distribuidas en áreas relativamente pequeñas, aumentando así la heterogeneidad ambiental (figura 20).

▲ **figura 18.**
Dunas semimóviles en el estado de Sonora.
(**Foto:** *Gerardo Sánchez Vigil*).

◀ **figura 17.**
Paisaje de dunas móviles en Baja California Sur.
(**Foto:** *Gerardo Sánchez Vigil*).

▲ **figura 19.**
Dunas estabilizadas en el estado de Veracruz.
(**Foto:** *J.G. García-Franco*).

figura 20. ▶
Mosaico de dunas móviles y estabilizadas en Sinaloa.
(**Foto:** *Óscar Jiménez-Orocio*).

Tipos de dunas en México

En México existen tanto dunas costeras como dunas interiores. Las dunas costeras se encuentran, como su nombre lo dice, en las costas, y las dunas interiores están principalmente en los desiertos de Chihuahua y Sonora. Algunas de estas son utilizadas en actividades mineras (Chihuahua). En este trabajo solamente se presenta información sobre las dunas costeras. La superficie total de dunas en México suma 808,711 hectáreas, lo cual es similar a lo cubierto por los manglares (cuadro 1). La extensión y tipos de dunas presentes en cada estado son muy variables. En todos los estados existen dunas frontales y planicies de dunas frontales (excepto en Baja California). Las dunas parabólicas se encuentran en Baja California Sur, Veracruz, Oaxaca, Baja California, Tamaulipas y Jalisco. Las dunas en forma de barjanes son exclusivas de Baja California Sur y Sonora. En Veracruz y Tabasco hay cuerpos de agua y hondonadas inmersos en los sistemas de dunas (cuadro 1).

Para condensar la información, en el análisis nacional de las dunas costeras se agruparon todas las dunas frontales (dunas frontales y campos de dunas frontales) en una sola categoría. Del mismo modo, los campos de dunas transgresivas con barjanes se integraron en la categoría de dunas transgresivas. Los cuerpos de agua no se incluyeron en este análisis global, ya que en la escala nacional cubren una superficie reducida. Sin embargo, esto no implica que no sean relevantes. Se analizan en detalle en el diagnóstico de los estados.

A nivel nacional, casi el 50% de las dunas costeras son dunas frontales (de baja altura, paralelas a la línea de costa) y el 45% son dunas transgresivas. Las dunas parabólicas son mucho más escasas, y representan menos del 10% de todas las dunas mexicanas (Figuras 21 y 22).

▼ cuadro 1.
Superficie acumulada (hectáreas) de los diferentes tipos de dunas y total para cada estado costero de México.
También se muestra el porcentaje que la superficie total de dunas por cada estado representa respecto al total nacional.

Estado	Dunas frontales	Planicie de dunas frontales	Parabólicas	Transgresivas	Barjanes	Cuerpo de agua	Total por estado	% respecto al total nacional
Baja California Sur	5,013	3,123	227	207,844	5,418		221,625	27.4
Veracruz	343	35,384	38,774	31,619		473	106,592	13.2
Sinaloa	1,263	57,876		31,592			90,731	11.2
Tabasco	145	72,225		2,115		168	74,653	9.2
Nayarit	752	46,937					47,690	5.9
Oaxaca	1,213	37,796	5,330	776			45,116	5.6
Campeche	259	43,275					43,534	5.4
Sonora	1,190	4,280		37,028	53		42,551	5.3
Baja California	1,707		1,896	24,410			28,014	3.5
Tamaulipas	1,658	3,194	1,809	20,344			27,005	3.3
Chiapas	1,740	21,616					23,357	2.9
Guerrero	1,225	19,245					20,470	2.5
Quintana Roo	2,520	9,757					12,278	1.5
Yucatán	218	11,266		0			11,484	1.4
Colima	68	7,344					7,412	0.9
Michoacán	565	2,600					3,166	0.4
Jalisco	1,351	1,204	478				3,034	0.4
Total por tipo	**21,233**	**377,123**	**48,514**	**355,728**	**5,470**	**641**	**808,711**	
Superficie total de dunas en México							**808,711**	

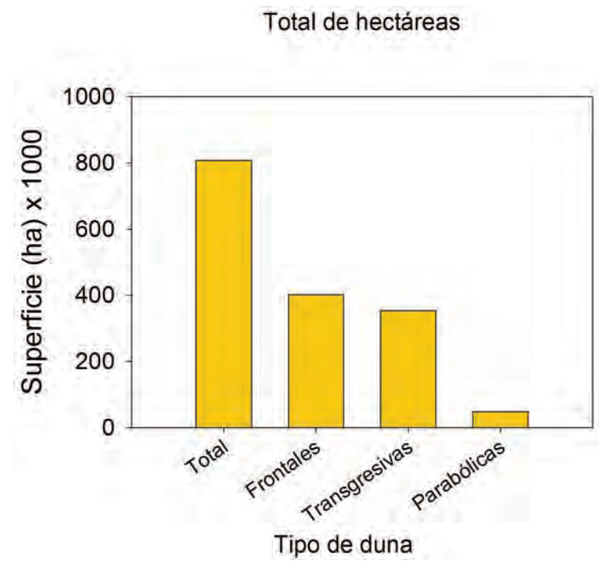


figura 21. ▶
Superficie total de dunas costeras presentes en México y superficie que cubren las geoformas más abundantes.

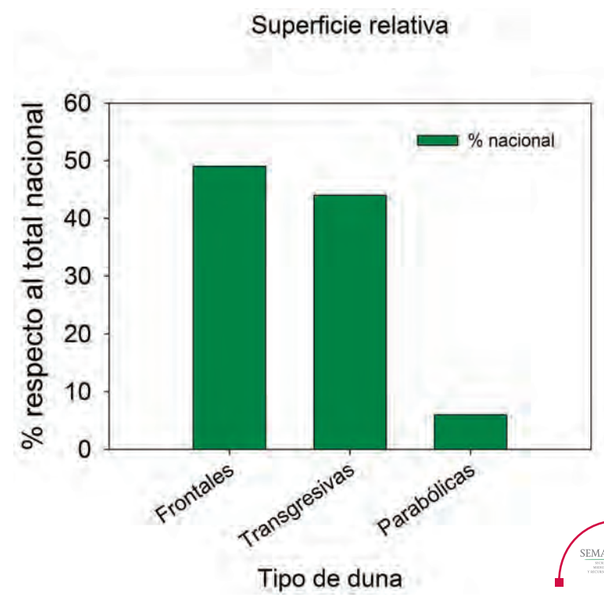


figura 22. ▶
Porcentaje relativo que cubre cada tipo de duna en el país.

Las dunas costeras en los estados

A nivel nacional, los estados que contienen las superficies más extensas de dunas costeras son, en orden decreciente, Baja California Sur, Veracruz, Sinaloa, Tabasco y Nayarit (figura 23). Todos los estados costeros tienen dunas, aunque su superficie sea muy pequeña como es el caso de Jalisco y de Michoacán (cuadro 1).

Cuando se analizan los diferentes tipos de dunas a nivel estatal, se observa que Tabasco, Sinaloa, Nayarit, Campeche, Oaxaca y Veracruz son los que tienen las mayores extensiones de dunas frontales (figura 24). En algunos estados, como Jalisco, se observan grandes campos de dunas individuales (montículos) que son formadas por la deposición de arena alrededor de algún objeto, siendo los más comunes las plantas. Estas dunas reciben el nombre de *nebkas*, y cuando se unen unas con otras pueden formar dunas frontales.

En contraste con lo anterior, las dunas parabólicas y las transgresivas son mucho menos abundantes, y solamente están presentes en unos pocos estados. En el caso de las dunas parabólicas, más del 80% se encuentran en Veracruz, y son mucho menos frecuentes y extensas en Oaxaca, Tamaulipas, Jalisco y Baja California Sur. No hay dunas parabólicas en los otros estados (figura 25). Una situación similar se observa en las dunas transgresivas, las cuales son muy abundantes en Baja California Sur, aunque también están presentes en Sonora, Veracruz, Sinaloa, Baja California, Tamaulipas, Tabasco y Oaxaca. Tampoco existen dunas transgresivas en los otros estados (figura 26).

Hondonadas y planicies de inundación

Las hondonadas húmedas e inundables, así como las planicies inundables representan una superficie mucho menor que las dunas costeras y no son apreciables en la escala de trabajo de este diagnóstico. Sin embargo, son ambientes importantes que dan diversidad al ecosistema de dunas costeras. En un mismo sistema de dunas puede haber varias hondonadas inundables ya sean temporales o permanentes. Se pueden encontrar en la playa o en la depresión que se forma entre los brazos de una duna parabólica o de una duna transgresiva.

Cuando las dunas se mueven, las hondonadas también migran. El viento sigue teniendo su misma función, siempre por delante de la pendiente de sotavento, adquiriendo velocidad en la parte más baja y levantando la arena hasta que aflora el manto freático, de agua dulce o con una salinidad muy baja. La vegetación no siempre puede migrar y establecerse a la misma velocidad, por lo que hay hondonadas totalmente desprovistas de plantas. En el caso de las hondonadas permanentes, o sea lagos interdunarios, el tamaño puede variar, desde 1 hasta 150 hectáreas (Peralta-Peláez y Moreno-Casasola, 2009). En estos casos la vegetación es abundante, tanto a la orilla

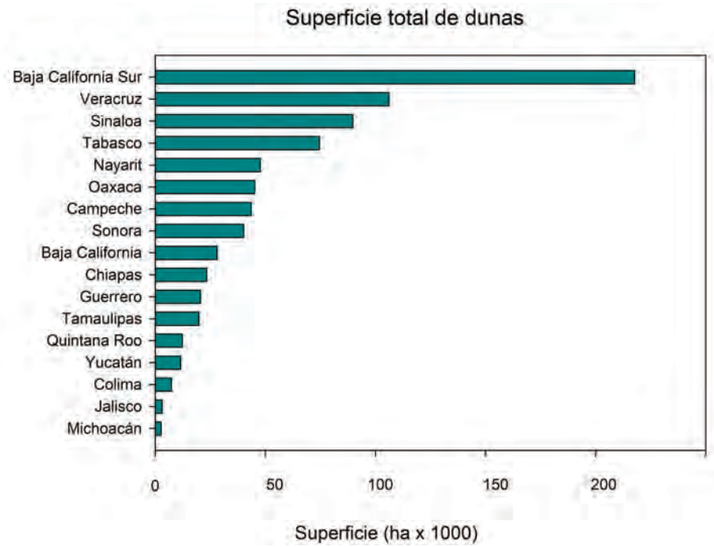


figura 23. ▲
Porcentaje de la superficie relativa de dunas que tienen todos los estados costeros.

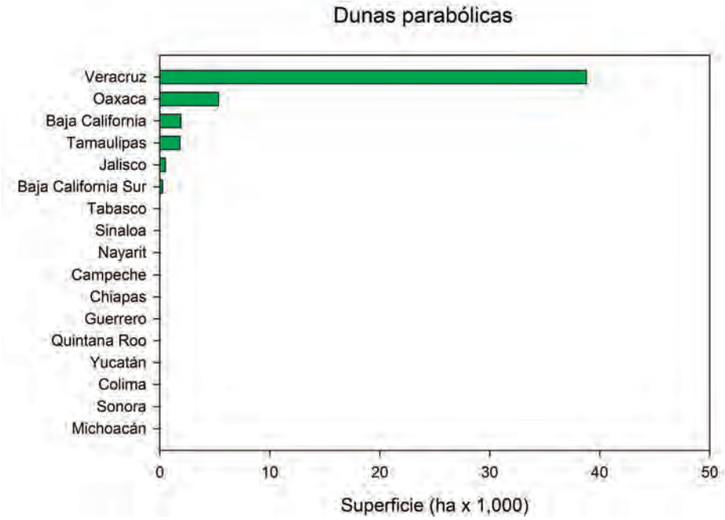


figura 25. ▲
Porcentaje de la superficie relativa que representan las dunas parabólicas de cada estado respecto la extensión total nacional de dunas parabólicas.

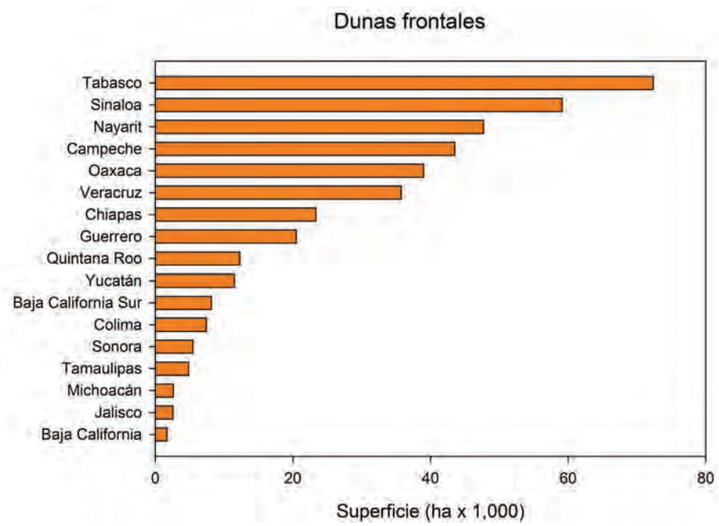


figura 24. ▲
Porcentaje de la superficie relativa que representan las dunas frontales de cada estado respecto la extensión total nacional de dunas frontales.

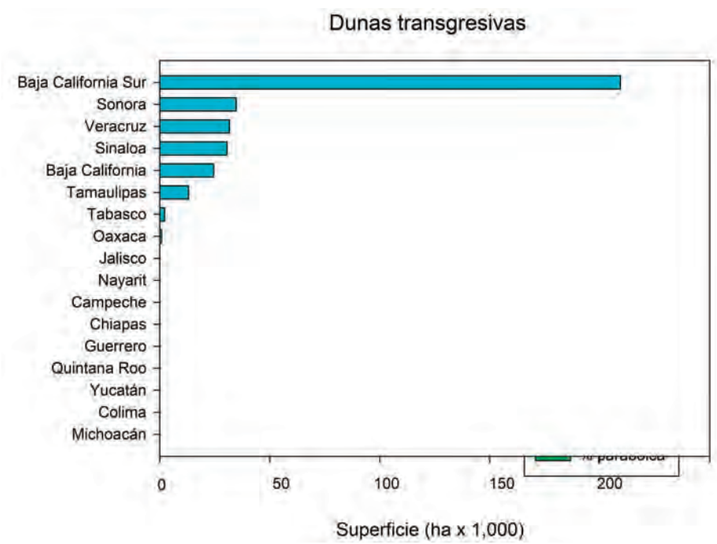


figura 26. ▲
Porcentaje de la superficie relativa que representan las dunas transgresivas de cada estado respecto la extensión total nacional de dunas transgresivas.

como flotando. Como el agua es permanente, se forman humedales que incluyen desde selvas inundables, popales y tulares, o bien vegetación cuyas hojas cubren la superficie del cuerpo de agua (Moreno-Casasola, 2010). Estos lagos interdunarios pueden considerarse como un ecosistema inmerso dentro de las dunas ya que posee características propias y flora y fauna especialmente adaptada a la inundación, muchas veces, endémicas. En Yucatán son muy interesantes estas lagunas porque en ellas crecen especies de las selvas secas aledañas, y en Veracruz hasta crecen árboles de selvas inundables.

Las planicies se encuentran donde no hay mucho viento y no hay posibilidad de formación de montículos de arena. Muchas veces son suelos lodosos cercanos o entremezclados con manglares o marismas. Estas planicies se forman en las zonas de transición entre las dunas y los humedales salobres y salinos como son los manglares y las marismas. Las islas de barrera, como parte de sus características propias, tienen una cara hacia el mar y otra hacia una laguna costera salobre (como en el caso de la Laguna Bojórquez y sus manglares frente a Cancún) o salinas a hipersalinas, como la Laguna Madre en Tamaulipas (figura 27). Se forma un gradiente de inundación y salinidad que va cambiando lentamente. Algunas especies de plantas pueden vivir en estas zonas de transición. Hay otros casos en los que no hay un cuerpo de agua de por medio, sino una transición de vegetación arbórea de dunas a vegetación de manglar, por ejemplo en algunas zonas de Quintana Roo y de Chiapas (Moreno-Casasola y Espejel, 1986). Se conoce poco del funcionamiento de estos gradientes o zonas de transición incluyendo su distribución en el país. Nuevamente se requiere de una escala de trabajo más fina. Con el conocimiento que se tiene actualmente de los sistemas de dunas del país, no se puede cuantificar la superficie de las hondonadas, lagos y planicies de inundación, y en muchos casos tampoco se puede precisar su distribución.

◀ **figura 27.**
Zona de transición entre las dunas y las marismas de Laguna Madre, Tamaulipas.
(**Foto:** *Gerardo Sánchez Vigil*).

Referencias bibliográficas

Agardy, T., Bridgewater, P., Crosby, M.P., Day, J., Dayton, P.K., Kenchington, R., Laffolley, D., McConney, P., Murray, P.A., Parks, J.E. y Peau, L. 2003. Dangerous targets? Unresolved issues and ideological clashes around marine protected areas. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems: 13: 353–367.

Bird, E.C. 1996. Beach management. John Wiley & Sons. Nueva York.

Bird, E. C. (ed.). 2010. Encyclopedia of the World's Coastal Landforms (Vol. 1). Springer.

Espejel, E., Peña-Garcillán, P. y Jiménez-Orocio, O. 2013. Flora de playas y dunas de México. Informe Técnico Final Conabio HJ007.

Flor, G. 1990. Tipología de dunas eólicas. Procesos de erosión-sedimentación costera y evolución litoral de La provincia de Huelva (Golfo de Cádiz occidental, sur de España). Estudios Geológicos 46: 99-109.

Gallant, R.A. 1997. The story of dunes: sand on the move. Franklin Watts. A Division of Grolier Publishing, USA.

Hesp, P.A. 2000. Coastal sand dunes: form and function. Coastal Dune Vegetation Network. Technical Bulletin No. 4. Massey University, New Zealand.

Hesp P.A. y Walker I.J. 2013. Coastal Dunes. En: John F. Shroder, J.F. (ed.). Treatise on Geomorphology, San Diego. Academic Press. Volume 11, pp. 328-355.

Jarmalavičius, D., Satkūnas, J., Žilinskas, G., y Pupienis, D. 2012. Dynamics of beaches of the Lithuanian coast (the Baltic Sea) for the period 1993–2008 based on morphometric indicators. Environmental Earth Sciences 65(6): 1727-1736.

Leyva C., Espejel I., Arellano E., Arredondo C., Delhumeau S., Calderon de la Barca N., Sánchez A. y Cruz E. 2009 Apropiación de espacios naturales como espacios públicos (http://futurocostaensenada.files.wordpress.com/2009/07/cleyva2.pdf)

Martínez, M.L. y Moreno-Casasola, P. 1996. Effects of burial by sand on seedling growth and survival in six tropical sand dune species. Journal of Coastal Research 12 (2): 406-419.

Martínez M.L., Maun, A.M. y Psuty, N.P. 2004. The fragility and conservation of the world´s coastal dunes: geomorphological, ecological and socioeconomic perspectives. En: Martínez, M.L. and Psuty, N. (eds.). Coastal dunes: ecology and conservation. Springer-Verlag Berlin. pp. 355-370.

Moreno-Casasola, P. 1982. Ecología de la vegetación de dunas costeras: factores físicos. Biotica 7 (4): 577 602.

Moreno-Casasola, P. 1986. Sand movement as a factor in the distribution of plant communities in a coastal dune system. Vegetatio 65: 67-76.

Moreno-Casasola, P. y Espejel, I. 1986. Classification and ordination of coastal dune vegetation along the Gulf and Caribbean Sea of Mexico. Vegetatio 66: 147 182.

Moreno-Casasola, P. 2010. Veracruz. Mar de arena. Gobierno del Estado de Veracruz para la Conmemoración de la Independencia Nacional y de la Revolución Mexicana- Universidad Veracruzana.

Nordstrom, K.F., Psuty, N.P. y Carter, R.W.G. 1990. Coastal dunes: form and process (Vol. 2). John Wiley & Sons Inc.

Packham, J.R. y Willis, A.J. 1997. Ecology of dunes, Salt Marsh and Shingle. Chapman & Hall. University Press, Cambrige.

Peralta-Peláez, L. A., y Moreno-Casasola, P. 2009. Composición florística y diversidad de la vegetación de humedales en los lagos interdunarios de Veracruz. Boletín de la Sociedad Botánica de México 85: 89-99.

Pilkey, O.H., Bullock, J. y Cowan, B.A. 1998. The North Carolina shore and its barrier islands, Duke University Press, EUA.

Protheros, D. 2004. Sedimentary Geology. New York, NN: W.H. Freeman and Company.

Pye, K. y Tsoar, H. 1990. Aeolian Sand and Sand Dunes. Unwin Hyman, London.

Ranwell, D. 1972. Ecology of salt marshes and sand dunes. Chapman and Hall, Londres.

Ranwell, D.S. y Boar, R. 1986. Coastal Dune Management Guide. Institute of Terrestrial Ecology, Abbots Ripton, Norwich.

San Martin, J., Ramírez, C. y San Martín C. 1992. La flora de las dunas chilenas y sus adaptaciones morfológicas. Bosque 13(1): 29-39.

Seingier, G., Espejel, I., Ferman, J.L. 2009 Cobertura vegetal y marginación en la costa mexicana. Investigación Ambiental: 1(1):54-69.

Vignaud, P., Duringer, P., Mackaye, H.T., Likius, A., Blondel, C., Boisserie, J.R., Bonis, L., Eisenmann, V., Etienne, M.E., Geraadsk, D., Guy, F., Lehmann, T., Lihoreau, F., Lopez-Martinez, N., Mourer-Chauvire, C., Otero, O., Rage, J.C., Schuster, M., Viriot, L., Zazzo, A., y Brunet, M. 2002. Geology and palaeontology of the upper Miocene Toros-Menalla hominid locality, Chad. Nature 418: 152-155.