

Capacidad de transporte eólico de arena hacia las dunas en Los Taínos, Varadero, Cuba

Dr.C. Ing. Ronnie Torres Hugues
Centro de Investigaciones Hidráulicas,
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Marianao, La Habana.
e-mail: ronnie@cih.cujae.edu.cu

MSc. Lic. Ricardo Cruz Nardo
Centro de Servicios Ambientales de Matanzas, Los Taínos, Varadero, Matanzas, Cuba.
e-mail: ofiplaya@enet.cu

RESUMEN

En el presente trabajo se caracteriza la playa de Los Taínos, ubicada en Varadero, teniendo en cuenta las características del grano de su arena, del viento incidente y su orientación. De forma tal se hizo que se pudieran determinar por varias expresiones el comportamiento mensual y anual de la capacidad de transporte eólico de arena. La selección del año tipo respecto a los datos de viento fue un paso importante que se tomó en cuenta, mediante el cual se establecen las direcciones que más afectan a este tramo de costa. También, el transporte de arena hacia las dunas fue determinado para toda el área de estudio.

Palabras clave: dunas, sedimento, transporte eólico de arena, Varadero, viento.

Wind-blown transport capacity of sand toward dunes in Los Taínos, Varadero, Cuba

ABSTRACT

In this work Los Taínos beach, in Varadero, is characterized taking into account sand grain patterns, incident wind and its directions. It was made in such a way that monthly and annual behaviour of wind sediment transport capacity can be determined applying several mathematical expressions. Selection of the design year with respect to wind data was an important step, which establishes main directions of attack for this coastal segment. Also, wind-blown transport toward dunes for all the study area was determined.

Keywords: dunes, sediment, wind-blown sediment transport, Varadero, winds.

INTRODUCCIÓN

Las playas de Cuba son aprovechadas como recurso económico de manera significativa. Debido a la naturaleza de la arena, como elemento componente de esta, es un aspecto vital establecer acciones relacionadas con la conservación de este recurso. Diversos tipos de eventos climatológicos azotan con frecuencia a la isla y esto es un factor que debe tenerse en cuenta en cualquier análisis de balance sedimentológico que se lleve a cabo en aras de protegerlas y preservarlas. Un aspecto poco estudiado en este sentido es la cantidad de arena que se pone en movimiento debido a la acción del viento, el cual puede contribuir a la formación o erosión de las dunas.

Como playa insigne de Cuba se encuentra Varadero, que ha sido objeto de varios estudios y acciones ingenieriles. La dinámica a la que ella está sometida impone que los trabajos para su protección y rehabilitación no cesen y que cada vez se gane más en entendimiento.

Para esto se hace necesario, como aspecto novedoso en los estudios llevados a cabo en la zona, conocer el comportamiento de la capacidad de transporte de arena que se mueve por la acción del viento en el sector de los Taínos, en la península de Varadero, debido a la gran importancia económica que representa este litoral para el país.

CONCEPTOS PREVIOS

El transporte eólico de arena es un componente importante en el estudio de los sedimentos costeros. Es importante poder predecir cuánta arena se transportará por el viento a un sitio costero dado y conocer la dirección en que la arena se transportará y dónde se depositará.

Sobre el inicio del movimiento de un grano debido a la acción del viento, González (2009) hace referencia que las fuerzas que intervienen en el proceso son la fuerza de arrastre, la fuerza de sustentación, el peso y la fuerza de cohesión. Las dos primeras, que son ejercidas por el fluido, deben superar el efecto del peso y de la cohesión entre partículas adyacentes. El peso y la cohesión de las partículas están relacionados con sus propiedades físicas, como son el tamaño, densidad, mineralogía, forma, compactación, contenido de humedad y la presencia o no de agentes adhesivos, como sales solubles.

Los granos, en el aire, son acelerados horizontalmente absorbiendo cantidad de movimiento del viento hasta que vuelven a impactar sobre la superficie. Según González (2009), en el impacto, los granos transmiten su cantidad de movimiento a otros granos que a su vez pueden salir despedidos al aire aunque en dichos granos no se haya alcanzado la velocidad de fricción crítica. Esto quiere decir que, una vez iniciado el movimiento, el umbral de velocidad crítica de inicio del movimiento disminuye. Se plantea que para que las partículas de arena de la superficie comiencen a moverse la velocidad del viento debe ser mayor de 5 m/s (CERC 2002).

Se reconocen 3 tipos de movimientos según Department of Sustainability (2007): (1) *Salto*: las partículas que se mueven por saltos se caracterizan por seguir trayectorias con un ángulo de despegue prácticamente vertical seguido de una trayectoria parabólica tal que impactan sobre la superficie con ángulos muy bajos. (2) *Reptación*: movimientos cercanos a la superficie. (3) *Suspensión*: resulta principalmente del flujo turbulento del aire en contraste con el flujo laminar o aerodinámico. Véase la figura 1. En playas el proceso de salto es el más importante, CERC (2002).

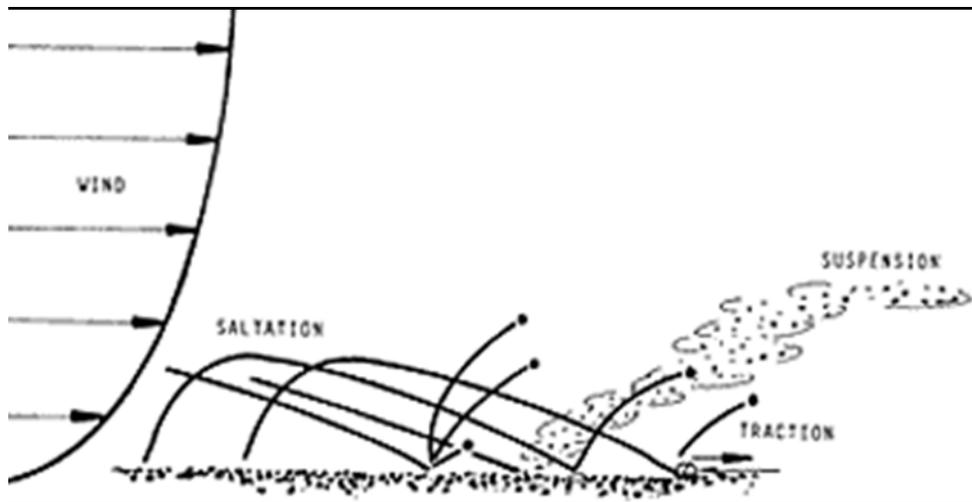


Figura 1. Tipos de movimientos -tomado de Department of Sustainability (2007)

El perfil de velocidad del viento para condiciones atmosféricas neutras y flujo según CERC (2002) responde a una distribución logarítmica, la cual está dada por la expresión (1):

$$U_z = \frac{u_*}{K} \ln \left(\frac{Z_0 + Z}{Z_0} \right) \quad (1)$$

Donde: U_z es la velocidad promedio del viento en función de la altura sobre el nivel de la superficie del terreno [m/s]; Z es la altura a la cual se desea calcular la velocidad [m], u_* es la velocidad de corte [m/s], Z_0 es la altura de los elementos rugosos de la superficie [m], κ es la constante de von Karman, igual a 0,4.

El transporte eólico de arena se desarrolla a lo largo del fetch de la playa, el cual está limitado por el mar en un extremo y por las dunas en el otro, ver figura 2, por lo que es entre estos contornos en donde tiene lugar este tipo de transporte de sedimentos.

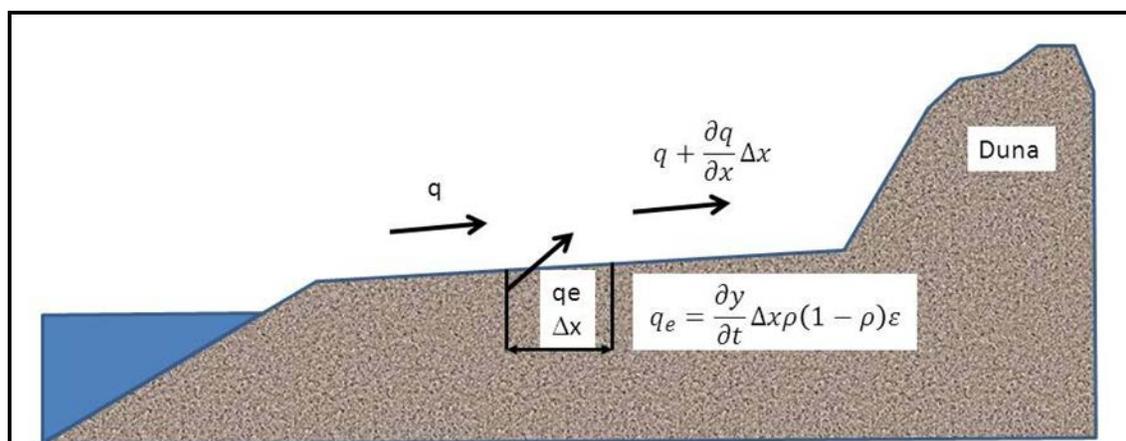


Figura 2. Esquema de cálculo

La ecuación (2) que representa la conservación de masa para este fenómeno, se puede escribir según CERC (2002) de la siguiente manera:

$$q + q_e - \left(q + \frac{\partial q}{\partial x} \Delta x \right) = 0 \quad (2)$$

Dónde: q es el transporte abatido por el viento en el volumen de control [kg/sm], la longitud es perpendicular a la dirección del transporte, q_e es la cantidad aportada de volumen de control por la erosión de la playa [kg/sm] y Δx es el volumen de control en la dirección de transporte.

MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA TASA DE TRANSPORTE EÓLICO DE ARENA

A continuación se presentan los modelos para calcular la capacidad de transporte eólico de sedimentos, S , empleados en este estudio, ver tabla 1. Los mismos han sido extraídos de Torres (2012). El trabajo de Bagnold (1941), en el que se relacionaba la cantidad de arena transportada con la tensión de corte ejercida por el viento, constituye la base teórica de partida de casi todas las investigaciones en el campo de la determinación de las tasas de transporte eólico. Siguiendo el trabajo de Bagnold, otros investigadores han desarrollado ecuaciones teóricas y empíricas para la descripción del transporte de sedimento por el viento.

En dichas ecuaciones se establece una dependencia de S con: u^* la velocidad de corte [m/s], ρ_{aire} la densidad del aire [g/cm³], D el diámetro del grano [mm], y u_{*t} la velocidad de corte crítica [m/s], la cual se calcula por la expresión (3), en la cual ρ_{arena} es la densidad del sedimento [g/cm³], y g es la aceleración de la gravedad [cm/s²]:

$$u_{*t} = A \sqrt{\frac{\rho_{arena} - \rho_{aire}}{\rho_{aire}} * g * D(cm)} \quad (3)$$

En la literatura se encuentra que el coeficiente A oscila entre 0,085 y 0,118.

El modelo de Bagnold se desarrolló a base del análisis teórico combinado con experimentos en túneles de viento y observaciones de terreno realizadas en el desierto de Libia. Establece mediante algoritmos semiempíricos, la velocidad crítica a partir de la cual cada granulometría inicia el transporte, así como las relaciones entre la magnitud del transporte de arena, la fricción del viento (parámetro derivado de la velocidad del viento y proporcional a ésta) y otras variables como el tamaño de la arena, su textura, la densidad del aire, la aceleración de la gravedad e inclusive el efecto de la inclinación del terreno. El modelo supone la existencia de un equilibrio estacionario, a escala cuasi-instantánea, entre la velocidad de fricción del viento, cuando éste supera un valor crítico, y la cantidad de arena transportada, cuya magnitud estaría controlada sólo por las características de la arena.

Un problema fundamental con esta ecuación es que no incluye un término umbral y por lo tanto, predice transporte de sedimento con velocidades de corte por debajo de las requeridas para el inicio del movimiento de las partículas. Posteriormente, esta ecuación fue modificada para incluir este aspecto.

Tabla 1. Expresiones empleadas para el cálculo de la tasa de transporte de arena -tomadas de Torres (2012)

No.	Autor	Expresión	Tipo de modelo
1	O'Brien y Rindlaub	$S = 9,96 \times 10^{-7} * (u_* + 10,8)^3$	Modelo empírico
2	Bagnold	$S = 1,8 * \frac{\rho_{aire}}{g} * \sqrt{\frac{d(mm)}{0,25}} * u_*^3$	Modelo teórico
3	Kawamura	$S = 2,78 * \frac{\rho_{aire}}{g} * (u_* - u_{*t}) * (u_* + u_{*t})^2$	Modelo teórico
4	Zingg	$S = 0,83 * \frac{\rho_{aire}}{g} * \left(\frac{d(mm)}{0,25}\right)^{3/4} * u_*^3$	Modelo teórico
5	Kadib	$S = 4,26 \times 10^{-5} * u_*^{2,1907684}$	Modelo empírico
6	Lettau y Lettau	$S = 4,2 * \frac{\rho_{aire}}{g} * \sqrt{\frac{d(mm)}{0,25}} * (u_* - u_{*t}) * u_*^2$	Modelo teórico
7	Hsu	$S = Ks * \left(\frac{u_*}{\sqrt{g * D(cm)}}\right)^3 ;$ $Ks = \frac{e^{-0,42 + 4,91 * (d(mm))}}{10000}$	Modelo teórico
8	White	$S = 2,61 * \frac{\rho_{aire}}{g} * \left(1 - \left(\frac{u_{*t}}{u_*}\right)\right) * \left(1 + \left(\frac{u_{*t}}{u_*}\right)^2\right) * u_*^3$	Modelo teórico
9	Chapman	$S = 6,99 \times 10^{-6} * u_*^{2,7186888}$	Modelo empírico
10	Piñeiro	$S = 7,1 \times 10^{-6} * u_*^{2,7753264}$	Modelo empírico

Como se puede apreciar son datos importantes la velocidad de corte y la velocidad crítica de corte. CERC (2002) plantea una metodología que determina la tasa de transporte para el caso de no poseer como dato estos valores, la cual se explica a continuación:

1. Calcular la velocidad de corte crítica para una condición de sedimento por la ecuación (3).
2. Utilizar la expresión obtenida por Hsu (1977), ecuación (4), que establece la relación entre la velocidad de corte, u^* , y la velocidad del viento a una altura de 2 m, U_{2m} , para la obtención del valor crítico de esta última. En esta se trabaja con el valor crítico de la velocidad de corte, y se obtiene la velocidad crítica del viento a 2 m:

$$u_* = 0,044 U_{2m} \quad (4)$$

3. Utilizar el principio de la ecuación (1) para determinar la velocidad crítica del viento a la altura donde fueron medidos los vientos. En esta se consideran dos alturas para la medición del viento y se desprecia la rugosidad de la superficie, ecuación (5):

$$u_* = \frac{\kappa(U_{z2} - U_{z1})}{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)} \quad (5)$$

4. Utilizar la ecuación anterior para establecer una relación entre la velocidad de corte y la velocidad del viento a la altura Z2 considerando que la altura Z1 es de 2m y la velocidad correspondiente se establece a partir de la ecuación 4. Por tanto, a partir de los valores medidos de la velocidad del viento se obtiene un valor de velocidad de corte que es el usado en las expresiones para el cálculo del transporte.
5. Calcular la capacidad de transporte de arena si la velocidad del viento excede el valor crítico y no hay precipitaciones en un día dado usando expresiones de la tabla 1.
6. Tomar en cuenta si la precipitación es mayor que la evaporación. De no ser así no afectar la tasa de transporte calculada, de lo contrario la velocidad critica de corte debe ser comparada con el resultado de la ecuación (6):

$$u_{*tw} = u_{*t} + 0,1785 \quad (6)$$

A falta de datos detallados de la humedad del suelo, en los días en que las precipitaciones excedan la evaporación debe emplearse u_{*tw} en lugar de u_{*t} .

Para el cálculo del transporte eólico de arena hacia las dunas se debe considerar solo la componente que atraviesa el ancho de la playa. También se plantea en la literatura, por ejemplo en CERC (2002), que los vientos que vienen de los rumbos que se encuentran a espaldas de la duna no son eficientes en el transporte de arena por la protección que esta representa dada la estabilización del grano producto de la vegetación imperante. El factor de eficiencia en estos casos se determina por la expresión (7), donde α es el ángulo entre la dirección del viento y la línea de costa.

$$Factor\ de\ eficiencia = \cos^2(\alpha) \quad (7)$$

CASO DE ESTUDIO “LOS TAINOS”

Datos

La región de la playa de Varadero que ha sido objeto de estudio es la correspondiente a Los Taínos. Los datos relacionados con ella se muestran en la tabla 2. El acimut de esta zona es de 60°.

Tabla 2. Datos del sector “Los Taínos”

Variables	Valor	Unidades
Densidad del aire	1,23	kg/m3
Densidad del grano de arena	2,65	g/cm3
Diámetro del grano de arena	0,29	mm
Altura a la que se considera el viento	10	m
Rugosidad de la superficie	0,01	m
Humedad	78	%
Pendiente de la superficie	5,4	%
Ancho medio de la playa	22,70	m
Longitud del tramo	4	km

Se ha considerado para el cálculo de la capacidad de transporte la información de vientos correspondiente al año 1993, que según se plantea en estudios anteriores tiene un comportamiento semejante al régimen general determinado para Varadero. Estos datos aparecen de manera resumida en la figura 3.

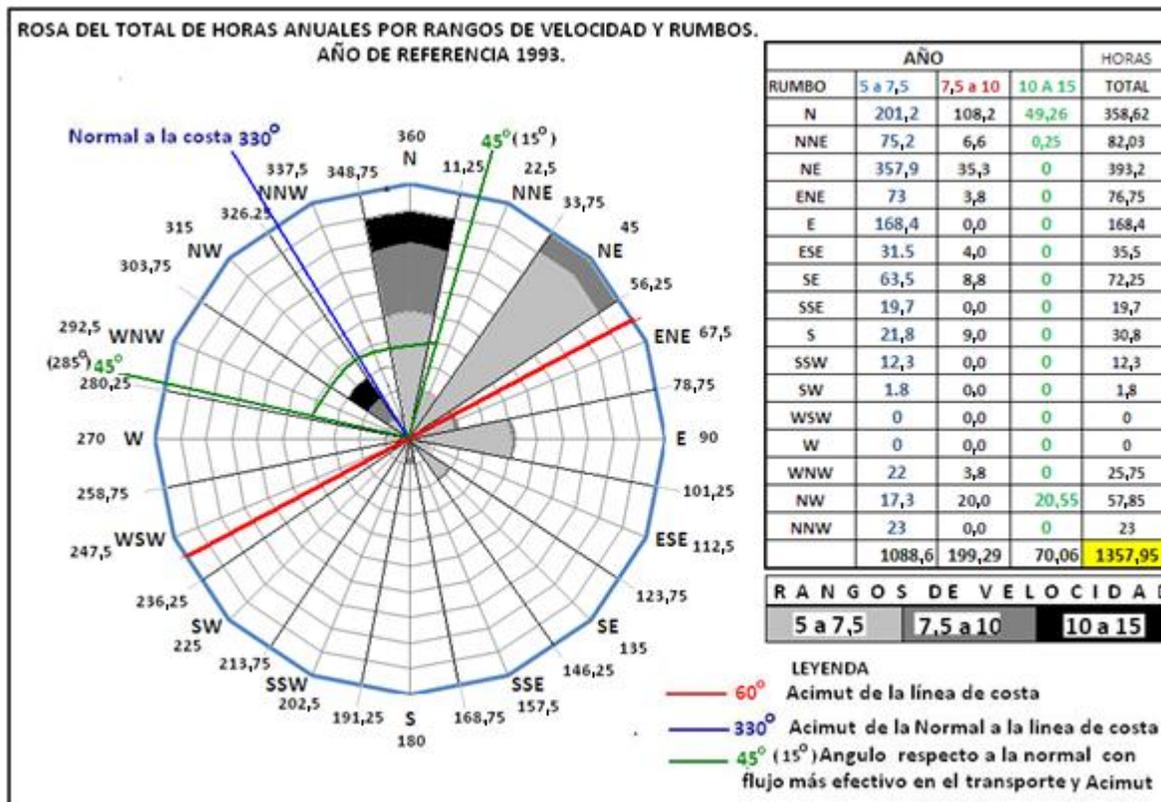


Figura 3. Rosa de los vientos y duración (en horas) de los vientos por rumbo

En la figura 3 la línea roja indica la orientación de la línea de costa de la península y muestra las direcciones principales desde donde deben producirse potencialmente los mayores desplazamientos de arena sobre las bermas en Varadero.

El año seleccionado cumple un grupo de requisitos necesarios para el procesamiento de los datos como son: tener todos los meses y días del año con las cartas Dines bien elaboradas, los instrumentos de medición bien calibrados en el período analizado y una estación al norte sin obstáculos en la zona de la estación, para que los valores medidos fueran lo más cercano posible a la realidad.

En el año, de las 1358 horas totales con vientos de más de 5 m/s de velocidad, soplan de rumbos acumulativos (WSW - NE) 940,45 h, el 69,3 %, y 417,55 h, el 30,7 %, lo hacen desde rumbos erosivos (ENE - SW) para este tramo de costa. Los rumbos acumulativos son aquellos en los que el viento sopla del mar hacia la tierra, por lo que la arena desplazada puede ser acumulada sobre la duna o seguir en la parte seca de la playa o berma. Por su parte, los rumbos erosivos son aquellos que mueven el sedimento hacia el mar provocando que salgan de la zona seca de la playa o que se muevan de manera longitudinal (paralela) a la línea de costa.

También se aprecia un predominio de las velocidades entre 5 y 7,5 m/s, en este orden el 80,1 % corresponde a este rango de velocidades, el 14,7 % al rango entre 7,5 a 10 m/s y solo el 5,2 %

a las velocidades comprendidas entre 10 y 15 m/s. Los rumbos de mayor incidencia de los vientos son el Norte y el Noreste, que representan el 26 y el 29 % del tiempo respectivamente. La suma de ambos rumbos llega al 55 % del total.

Además, los vientos con capacidad de transporte en los meses de invierno (desde Noviembre hasta Abril) representan el 65,7 % del total, donde predominan los rumbos N, NE, E, al igual que para los vientos que soplan en los meses de verano, que representan el 34,3 %.

Del total de horas computadas en los meses de invierno (892,7 h) el 28,5 %, son de rumbos erosivos y el 71,5 %, de rumbos acumulativos. En los meses de verano (465,25 h) el 35 % son de rumbos erosivos y el 65 % de rumbos acumulativos.

A partir de lo anterior, se espera que el transporte de sedimentos eólico genere un efecto acumulativo fundamentalmente en los meses de Diciembre, Febrero y Junio. Mientras que el efecto erosivo se producirá en los meses de Febrero, Abril y Mayo. En el caso del mes de Febrero el efecto acumulativo debe ser superior al erosivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las mediciones realizadas en la zona, las cuales se basan en las características del grano, los perfiles de la zona y la velocidad del viento a una altura, imponen que se aplique el procedimiento que se explica en CERC (2002), por tanto:

- 1) La velocidad de corte crítica para estas condiciones de sedimento por la ecuación (3) es de 21,04 cm/s.
- 2) La velocidad crítica del viento a 2 m es de 4,8 m/s.
- 3) La velocidad crítica del viento a la altura donde fueron medidos los vientos, que en este caso es de 10 m, es de 5,63 m/s (considerando $A = 0,085$). Este es el valor mínimo de velocidad de viento a 10 m para poner en movimiento el grano. Por lo que las velocidades que no deben ser usadas en la determinación de la tasa de transporte son aquellas que se encuentran por debajo de este valor.
- 4) En la ecuación para la velocidad de corte hallada en este punto se consideran los valores promedios de las velocidades de cada mes por rumbo (tabla 3). La relación toma la forma de la ecuación (8).

$$u_* = 0,037 \cdot U_{10m} \quad (8)$$

Como se puede apreciar en la tabla 3, todos los valores son válidos para la determinación de la tasa de transporte de sedimentos eólico ya que son mayores que 5,63 m/s. Los valores de la velocidad de corte se presentan en la tabla 4.

- 5) La tasa de transporte fue determinada para cada rumbo y mes para todas las expresiones de la tabla 1. Posteriormente, se obtuvo el valor promedio de todas (tabla 5) y se observó que los resultados con la expresión de Bagnold fueron los más cercanos a este parámetro, ver figura 4, con un error relativo que oscila entre el 0,1 % y el 14,7 % en un 97 %. Este paso se implementa con una modificación en relación con el procedimiento original al seleccionar entre todos los modelos aquel que se acerca al valor medio.

Tabla 3. Valores promedios de velocidad del viento (m/s) por mes y por rumbo

Rumbo	Mes											
	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct
N	7,57	8,37	9,70	7,79	7,84	7,60	6,25	7,23	8,75	6,25	-	-
NNE	7,20	6,25	6,25	6,25	6,43	6,32	6,25	6,25	6,25	6,25	-	-
NE	6,83	6,25	6,25	6,66	6,42	6,25	7,81	6,41	6,34	6,25	6,25	6,25
ENE	6,25	6,25	-	6,25	7,32	6,25	6,25	6,25	6,25	-	6,25	6,25
E	6,25	6,25	-	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	-	6,25
ESE	-	-	-	6,25	6,25	6,25	6,81	6,25	6,25	6,25	-	-
SE	-	8,75	-	6,25	6,25	6,25	7,61	6,25	-	6,25	6,25	-
SSE	-	-	-	6,25	6,25	6,25	-	-	6,25	-	-	-
S	-	-	-	6,25	7,47	6,25	6,25	6,25	-	-	6,25	-
SSW	-	-	-	6,25	6,25	-	-	-	-	-	6,25	-
SW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,25	-
WSW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WNW	-	6,25	6,88	6,42	-	-	-	8,75	7,64	-	-	-
NW	-	7,97	6,25	6,25	12,01	-	-	6,25	-	-	-	-
NNW	-	-	-	-	6,25	6,25	-	6,25	-	-	-	-

Tabla 4. Velocidad de corte (m/s) por mes y por rumbo

Rumbo	Mes											
	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct
N	0,28	0,31	0,36	0,29	0,29	0,28	0,23	0,27	0,33	0,23	-	-
NNE	0,27	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	-	-
NE	0,26	0,23	0,23	0,25	0,24	0,23	0,29	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23
ENE	0,23	0,23	-	0,23	0,27	0,23	0,23	0,23	0,23	-	0,23	0,23
E	0,23	0,23	-	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	-	0,23
ESE	-	-	-	0,23	0,23	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23	-	-
SE	-	0,33	-	0,23	0,23	0,23	0,28	0,23	-	0,23	0,23	-
SSE	-	-	-	0,23	0,23	0,23	-	-	0,23	-	-	-
S	-	-	-	0,23	0,28	0,23	0,23	0,23	-	-	0,23	-
SSW	-	-	-	0,23	0,23	-	-	-	-	-	0,23	-
SW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,23	-
WSW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WNW	-	0,23	0,26	0,24	-	-	-	0,33	0,29	-	-	-
NW	-	0,3	0,23	0,23	0,45	-	-	0,23	-	-	-	-
NNW	-	-	-	-	0,23	0,23	-	0,23	-	-	-	-

Tabla 5. Capacidad promedio de transporte (g/cm/s) por mes y por rumbo

Rumbo	Mes											
	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct
N	0,05	0,07	0,11	0,06	0,06	0,05	0,03	0,05	0,08	0,03	-	-
NNE	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	-	-
NE	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,06	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
ENE	0,03	0,03	-	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	-	0,03	0,03
E	0,03	0,03	-	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	-	0,03
ESE	-	-	-	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	-	-
SE	-	0,08	-	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	-	0,03	0,03	-
SSE	-	-	-	0,03	0,03	0,03	-	-	0,03	-	-	-
S	-	-	-	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	-	-	0,03	-
SSW	-	-	-	0,03	0,03	-	-	-	-	-	0,03	-
SW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,03	-
WSW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WNW	-	0,03	0,04	0,03	-	-	-	0,08	0,29	-	-	-
NW	-	0,06	0,03	0,03	0,21	-	-	0,03	-	-	-	-
NNW	-	-	-	-	0,03	0,03	-	0,03	-	-	-	-

En la siguiente figura 4 se muestra el resultado de cada modelo para el rumbo WNW y el mes de febrero. En la misma se aprecia cómo el modelo de Bagnold es el más cercano a la media de 0,030 g/cm/s.

Finalmente en este punto se determinó el régimen potencial de transporte, empleando el modelo de Bagnold, teniendo en cuenta el tiempo de acción del viento por rumbo y por mes, ver tabla 6. En la tabla 7 se muestra la tasa de transporte hacia la duna, en la cual el signo positivo está asociado con los rumbos acumulativos y el signo negativo con los rumbos erosivos.

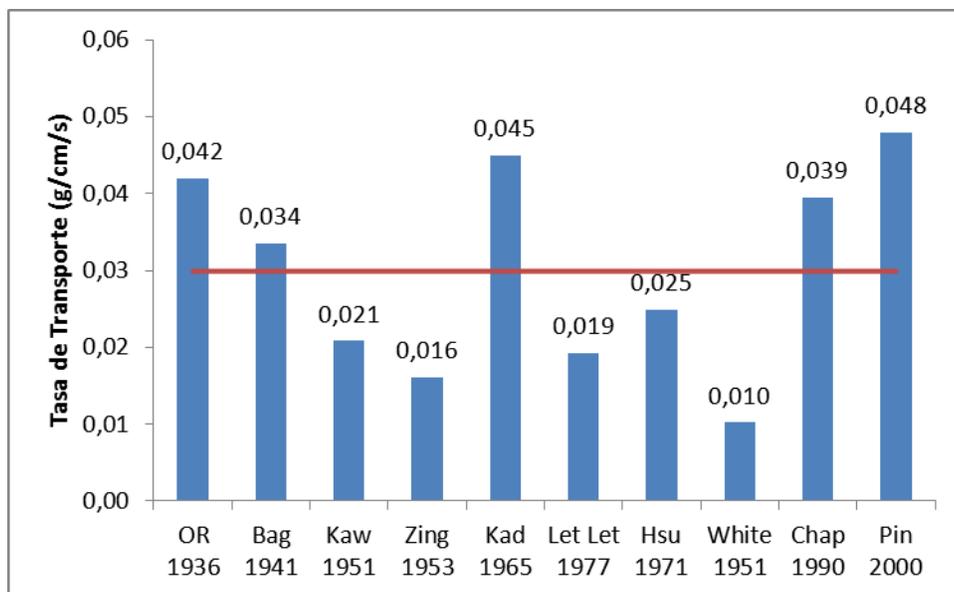


Figura 4. Tasa de transporte por autores

Tabla 6. Capacidad de transporte ($\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}$) por el modelo de Bagnold

Rumbo	Mes											
	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct
N	59,47	94,54	86,00	116,24	44,51	65,66	10,68	19,78	22,57	4,20	-	-
NNE	16,57	2,66	1,05	11,90	10,49	8,62	3,03	2,63	1,40	5,95	-	-
NE	24,48	30,34	0,70	15,53	38,55	18,84	42,69	33,05	64,02	15,58	24,50	4,20
ENE	1,23	11,61	-	7,88	9,85	12,88	5,08	0,18	4,55	-	3,33	0,88
E	0,18	0,28	-	21,53	17,15	10,50	25,55	11,20	2,63	27,48	-	1,40
ESE	-	0,00	-	7,35	0,70	2,10	16,27	0,35	1,23	0,53	-	-
SE	-	7,68	-	15,58	5,08	15,93	11,05	0,70	-	2,98	1,40	-
SSE	-	-	-	4,55	0,35	7,46	-	-	1,40	-	-	-
S	-	-	-	0,18	22,08	5,60	0,53	1,40	-	-	0,88	-
SSW	-	-	-	6,30	1,75	-	-	-	-	-	0,53	-
SW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,23	-
WSW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WNW	-	2,63	1,40	13,86	-	-	-	-	2,88	-	-	-
NW	-	47,23	-	1,40	105,69	-	-	1,40	-	-	-	-

En la tabla 8 se puede ver la tasa bruta de transporte por mes resumiendo los resultados mostrados en la tabla 6 y la tasa de transporte neto hacia la duna, lo cual es comprendido como la

diferencia de las componentes en dirección a la costa por los rumbos acumulativos y erosivos. En la figura 5 se visualizan estos resultados.

Tabla 7. Capacidad de transporte de arena hacia la duna ($\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}$)

Rumbo	Mes											
	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct
N	51,51	81,87	74,48	100,67	38,55	56,86	9,25	17,13	19,55	3,64	0,00	0,00
NNE	10,09	1,62	0,64	7,25	6,38	5,25	1,85	1,60	0,85	3,62	0,00	0,00
NE	6,34	7,85	0,18	4,02	9,98	4,88	11,05	8,55	16,57	4,03	6,34	1,09
ENE	-0,16	-1,49	0,00	-1,01	-1,26	-1,65	-0,65	-0,02	-0,58	0,00	-0,43	-0,11
E	-0,07	-0,11	0,00	-8,07	-6,43	-3,94	-9,58	-4,20	-0,98	-10,30	0,00	-0,53
ESE	0,00	0,00	0,00	-2,16	-0,21	-0,62	-4,78	-0,10	-0,36	-0,15	0,00	0,00
SE	0,00	-0,50	0,00	-1,01	-0,33	-1,03	-0,71	-0,05	0,00	-0,19	-0,09	0,00
SSE	0,00	0,00	0,00	-0,08	-0,01	-0,13	0,00	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00	-0,04	-4,78	-1,21	-0,11	-0,30	0,00	0,00	-0,19	0,00
SSW	0,00	0,00	0,00	-2,41	-0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,20	0,00
SW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	0,00
WSW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
W	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
WNW	0,00	2,08	1,11	10,99	0,00	0,00	0,00	0,00	2,28	0,00	0,00	0,00
NW	0,00	45,62	0,00	1,35	102,09	0,00	0,00	1,35	0,00	0,00	0,00	0,00
NNW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69	13,54	0,00	1,74	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 8. Capacidad de transporte de arena por meses

Mes	Tasa de transporte m^3/m	%	Tasa de transporte neto hacia la duna m^3/m	%
Noviembre	0,10	7,2	0,068	9.9
Diciembre	0,20	14,0	0,137	20.1
Enero	0,09	6,3	0,076	11.2
Febrero	0,22	15,7	0,109	16.1
Marzo	0,26	18,2	0,144	21.1
Abril	0,16	11,4	0,072	10.5
Mayo	0,11	8,1	0,006	0.9
Junio	0,07	5,1	0,026	3.8
Julio	0,10	7,1	0,037	5.5
Agosto	0,06	4,0	0,001	0.1
Septiembre	0,03	2,3	0,005	0.7
Octubre	0,01	0,5	0,000	0.1
Total	1,41	100	0,682	100

Como se puede apreciar en la tabla 8, en todos los meses se produce un transporte neto hacia la duna, lo cual debe favorecer al crecimiento de estas. En tal sentido, se estima una tasa de transporte de arena al año hacia las dunas de, aproximadamente, $0,7 \text{ m}^3/\text{m}$; los meses más propensos a esto son los de invierno (Noviembre a Abril), en los que ocurre el 89 %.

Teniendo en cuenta que el área de estudio alcanza las 9,08 ha (ancho promedio de 22,70 m y longitud de 4 km) se generan en el año cerca de $64\ 000 \text{ m}^3$ de arena hacia las dunas. Si se considera que pueda ocurrir la deposición de algunos granos, este valor puede ser menor.

Véase en la figura 5 la correspondencia que existe en los meses de invierno entre el transporte de arena en todas las direcciones y el transporte de arena dirigido hacia las dunas.

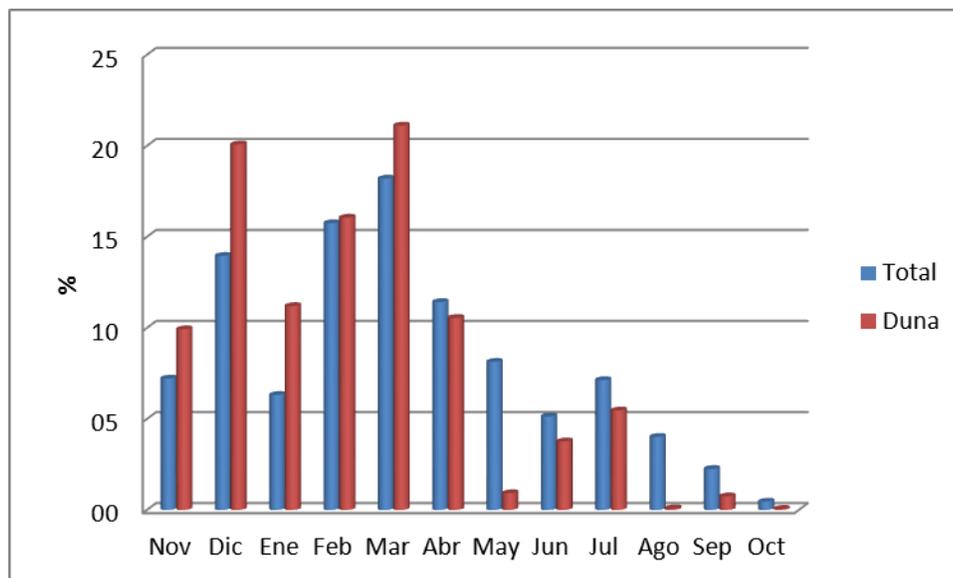


Figura 5. Por ciento de la tasa de transporte total y hacia la duna

- 6) Como no se dispone de datos de precipitación y evaporación no se puede proseguir con el algoritmo establecido. La consideración de este fenómeno conlleva a una disminución de la capacidad de transporte de arena.

Por otra parte, debe analizarse la influencia de los coeficientes. En este sentido, si el coeficiente A, de la ecuación 3, toma el valor de 0,118 ocurre que:

- El modelo más cercano al valor medio es el de Hsu (1971).
- La velocidad crítica de corte asciende a 29,21 cm/s en vez de 21,04 cm/s.
- La velocidad crítica del viento a 2 metros de altura es de 6,6 m/s en vez de 4,8 m/s.
- La velocidad crítica de corte a 2 metros es de 7,81 m/s en vez de 5,63 m/s. Por lo que la gran mayoría de los valores de la tabla 3 no produce transporte de sedimentos.
- Se hacen válidas para el cálculo solo 190 horas de las 1357.
- El transporte bruto se reduce a $0,30 \text{ m}^3/\text{m}$, el 21,2 % del cálculo correspondiente.
- El transporte hacia las dunas se reduce a $0,27 \text{ m}^3/\text{m}$, el 39,6 % del cálculo anterior, es decir, $25\ 000 \text{ m}^3$ en toda el área.

CONCLUSIONES

De los resultados anteriores se puede apreciar que debido a los rumbos del Norte al Noreste (0 a 45 grados) se produce el mayor transporte eólico de arena, representando el 63,8 % del total. Respecto al transporte hacia las dunas, este oscila entre 25 000 y 64 000 m³ y el mayor aporte se realiza en los meses de invierno (89 %), fundamentalmente en Diciembre, Febrero y Marzo (57,3 %). Esto está en consonancia con el predominio que los vientos tienen en estos meses. Por tanto, una vez más se ve reflejada la alta dependencia del transporte eólico de arena con la magnitud, dirección y duración de los vientos.

REFERENCIAS

- González R.** (2009). “Procesos físicos en sistemas dunares (morfodinámica de las playas)”. Ed. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. España.
- Department of Sustainability** (2007). “Appendix B: Coastline Processes”. Coastal Management Manual. Department of Sustainability, Australia.
- CERC** (2002). “Wind-blown sediment transport”. Coastal Engineering Manual. Coastal Engineering Research Center, EM 1110-2-1100. USA.
- Torres R.** (2012). “Transporte eólico de sedimentos en playas. Estudios realizados en Cuba”. Monografía ISBN: 978-959-261-410-9. Instituto Superior Politecnico Jose Antonio Echeverría. La Habana.
- Bagnold, R. A.** (1941). “The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Morrow, New York”. reprinted in 1954 by Ed. Methuen, London.
- Hsu, S. A.** (1971). “Wind Stress Criteria in Eolian Sand Transport”. Journal of Geophysical Research, Vol.76, p.8684-8686. American Geophysical Union, USA.
- Hsu, S. A.** (1977). “Boundary Layer Meteorological Research in the Coastal Zone, Geoscience and Man”. Ed. School of Geoscience, Louisiana State University, Baton Rouge, Los Angeles, USA.