

CARACTERIZACIÓN DE MÉDANOS PARABÓLICOS DE LA REGIÓN PAMPEANA ORIENTAL, CENTRO OESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES (ARGENTINA)

Félix I. Contreras^{1,2}, Gian M. Mavo Manstretta³, Gerardo M.E. Perillo^{3,4}, M. Cintia Piccolo^{3,5}

¹ Centro de Ecología Aplicada del Litoral (CONICET - UNNE), Ruta Provincial Nº 5 km 2.5 - 3400, Corrientes, Argentina.

² Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura, Universidad Nacional del Nordeste, 9 de julio 1449 - 3400, Corrientes, Argentina.

³ Instituto Argentino de Oceanografía (CONICET - UNS), Camino a la Carrindanga km 7 - 8000, Bahía Blanca, Argentina.

⁴ Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, cuerpo B, piso 2, oficina 202 - 8000, Bahía Blanca, Argentina.

⁵ Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, 12 de octubre y San Juan - 8000, Bahía Blanca, Argentina.

ignaciocontreras@conicet.gov.ar, mavo@iado-conicet.gob.ar, gmeperillo@criba.edu.ar, ofpiccol@criba.edu.ar

ARTICLE INFO

Article history

Received May 28, 2018

Accepted November 29, 2018

Available online December 1, 2018

Handling Editor

Fernando Gómez

Keywords

Médanos

Lagunas

Sedimentos

Escurrimiento

RESUMEN

La región pampeana, especialmente la provincia de Buenos Aires, se caracteriza por la presencia de paisajes eólicos que, si bien responden a eventos producidos en el Cuaternario Superior, en la actualidad son reactivados por la actividad agropecuaria. El objetivo de este trabajo se centra en la detección y delimitación de un campo de médanos parabólicos parcialmente reactivados, ubicados en el centro oeste de dicha provincia, que si bien han sido mencionados en la literatura, no han sido objeto de estudio detallado. Mediante la generación de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a partir de imágenes SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) se ha detectado un campo con un total de 254 médanos parabólicos que ocupan 20.200 km², ubicados entre los 120 y 90 msnm. Los mismos presentan una dirección general SW-NE, con anchos que varían entre 2 y 5 km y alturas entre 2 y 6 m. Aplicando la herramienta Distancia Vertical al Curso (Vertical Distance to Channel Network, VDCN) del Software SAGA GIS 2.1.2 y una clasificación automática no supervisada en ArcGIS 10.1, se lograron discriminar los médanos de la planicie circundante. A partir de muestras de sedimento de un médano testigo ubicado en la localidad de 30 de Agosto (Buenos Aires), se establecieron claras diferencias en la granulometría en distintos sectores del mismo. La ubicación de estos médanos es clave en la configuración del escurrimiento y, en consecuencia, este paisaje arenoso tiene un rol importante en la configuración del espacio del área de estudio ya que se forman lagunas intermedanales someras cuyo desarrollo depende de las precipitaciones locales.

EXTENDED ABSTRACT

Characterization of parabolic dunes of the oriental Pampean region, west center of the province of Buenos Aires (Argentina)

The Pampean region is a fertile and extensive

plain of Argentina. It has an extension of 613,532 km² located within the temperate region, being also adjacent to the Atlantic Ocean. The latter generates low daily and annual thermal amplitudes than in other regions in similar latitudes. In addition, the region is characterized by the occurrence of long periods of floods and drought, which affect the

availability of water resources (Aliaga *et al.*, 2017). The Buenos Aires Province is especially characterized by the presence of aeolian landscapes that, even though they were developed in the past, they are currently being reactivated by agricultural activities. The antecedents indicate different dune morphologies within the province territory, mainly associated with sediment availability and wind direction (Iriondo and Kröhling, 1995; Isla *et al.*, 2010; Zárate and Tripaldi 2012).

The focus of this work is the detection, delimitation and characterization of a parabolic dune field located in the Middle West of the Buenos Aires Province (Fig. 1) for which no precedent has been found. Likewise, we also establish the relationship between the parabolic dunes and the distribution and evolution of the interdune shallow lakes associated with them. Through the generation of a Digital Elevation Model (DEM) from Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) images, a field with 254 parabolic dunes that covers 20,200 km² was detected (Fig. 1). It is located between 120 and 90 m above mean sea level, with SW-NE general orientation; widths between 2 and 5 km, and heights between 2 and 6 m. The Vertical Distance to Channel Network (VDCN) tool of the SAGA GIS 2.1.2 software was also employed (Fig. 3) and, additionally, an automatic unsupervised classification using ArcGIS 10.1 was carried out in order to discriminate the dunes from the surrounding plain.

Grain size analysis were carried out in both dune and interdune areas. The analysis was performed employing a Mastersizer 2000 Laser Particle Analyzer, whose results were represented with the GRADISTAT v8 software. The results demonstrate clear differences between the interdune areas, having very fine materials, with respect to those obtained within the dune area, which varied depending on the sector and the depth of the sample, establishing differences in the various dune sectors. For example, an increase in finer materials in depth. Also revealed that they are fine sand dunes, but the bimodal curve obtained with fine materials suggests that its sediments respond to different climatic periods. The progressive increase of fine material inside the dune shows that there is a material redistribution.

Simultaneously with the sampling, a flight with an unmanned aerial vehicle (UAV) was made, that allowed generating a set of videos and 360° panoramic photographs, later used in the generation

of orthomosaics, dense point cloud and a three-dimensional model (Fig. 6) using the SFM (Structure From Motion) method (Genchi *et al.*, 2015). The method is based on sequential image acquisition, with a high overlap degree, and founded in the correlation of points identified in different images (Fernández and Gutiérrez, 2016). The images were optimized (USGS, 2016) obtaining a higher accuracy in the photograph parameters by correcting the distortions caused by the camera lens. Besides the method helps to improve the general model, whose scene geometry, camera location and orientation of the photographs were taken automatically but derived from the appropriate superposition (> 60 %).

According to its morphology, the dunes were categorized into three classes (Table 1), being the symmetric dunes the most common, followed by the asymmetric dunes and, finally, those of lateral coalescence that, despite being inferior in quantity, possess greater spatial development, that is, have longer crestal lengths (Fig. 7). Bordering the margins of the dune field to the north, east and south we observed the typical longitudinal dunes characteristic of this Pampean region sector. According to Bagnold (1941), it is possible that some simple semilunar forms are deformed in longitudinal features when moving in areas with variable wind directions.

The results demonstrate that there are 254 crests distributed in the area, with a density of 0.01 dunes/km², many of them are segmented due to natural process through the presence of small shallow lakes and temporary depressions whose approximate depth is 1 m (Fig. 4 and 5), but also increased by the removal of soils as a result of agricultural activity. The shallow lakes disposition allows inferring that, in presence of abundant rainfall; they can be connected and/or overflowed, flooding the surrounding areas. The location of these dunes is crucial in the spatial surface runoff configuration and, in consequence, this sandy landscape has an important role in the spatial configuration of the area generating risk conditions to both the local population and agricultural production.

Keywords: dunes, shallow lakes, sediment, surface runoff.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de información geográfica y, en es-

pecial, los modelos digitales de elevación (MDE) constituyen herramientas fundamentales para la detección de condiciones y estructuras geomorfológicas, tanto a pequeña como a gran escala. Sin embargo, su precisión se reduce en grandes áreas donde las diferencias entre las elevaciones son relativamente pequeñas, haciendo que los resultados se aproximen al nivel de ruido (Small y Sohn, 2015). Según Andrews *et al.* (2002), cuando se aplican métodos sencillos de monitoreo de datos en grandes áreas, se puede perder suficiente detalle para que la variabilidad espacial natural de la forma del relieve pueda ser bien representada. Los médanos constituyen formas de relieve complejas debido a su interacción entre la topografía, vegetación y los procesos eólicos que transportan sedimentos a través del sistema, sumado a los procesos hidrológicos asociados a condiciones húmedas que pueden modificarlos. En el presente trabajo se prefiere el uso del término español “médano” que el equivalente “duna eólica” en base a lo propuesto por Perillo (2001).

Los nuevos métodos de adquisición de datos topográficos con alta resolución espacial, no sólo han expuesto más detalles sobre morfología del paisaje, sino que permiten equiparar la escala de datos topográficos con la escala espacio temporal que involucran las características geomorfológicas (Hugenholtz *et al.*, 2013). En este marco, la presencia y morfología de los médanos brindan información sobre las condiciones ambientales que le dieron origen, incluso cuando los mismos no responden al patrón de los vientos actuales. Sin embargo, detectar su distribución y calcular morfometrías mediante imágenes satelitales dependerá exclusivamente de la resolución espacial utilizada.

Según Duran *et al.* (2009), los campos de médanos de arena muestran formas bien seleccionadas, que suelen emerger en grupos reducidos, de tamaño característico muy definido o pueden formar campos con mayor cantidad de estas geoformas. En la actualidad se conocen las leyes fundamentales que subyacen a la aparición de un único médano barjánico y los mecanismos que mantienen su forma mientras se moviliza (Duran *et al.*, 2009). Ejemplo de ello, es el conocimiento sobre lo ocurrido en áreas con viento unidireccional y baja disponibilidad de arena, la influencia de las restricciones geográficas y las condiciones físicas externas, las interacciones médano-médano, e incluso de la aparición de cubiertas vegetales sobre la dinámica y morfología de

los médanos individuales (Duran *et al.*, 2009).

El Mar de Arena Pampeano (MAP) fue definido por Iriondo y Kröhling (1995,1996), siendo el mar de arena del Cuaternario más importante de Sudamérica y uno de los más grandes del mundo, ocupando la llanura pampeana central entre los 33° y los 37° S. Los procesos eólicos se reactivaron en el Holoceno superior (ca. 3,5 a 1,4 ka) (Iriondo y Kröhling, 1995, 1996, 2007; Sanabria y Argüello, 1999), lo cual puede haber sido generalizado, ya que se evidenciaron en los registros sedimentarios de los últimos 3 ka en la provincia de Buenos Aires (Iriondo, 1990; Iriondo y García, 1993; Tripaldi y Forman, 2007).

El área central del MAP, según Iriondo y Kröhling, (1995) cubre parte de 5 provincias argentinas (S de San Luis, Santa Fe y Córdoba, NE de La Pampa, NO y O de Buenos Aires, la parte occidental y suroeste de Buenos Aires, el este de La Pampa, el sur de Córdoba y la parte más meridional de la provincia de Santa Fe. Se caracteriza por un relieve suave que desciende de 120-140 msnm al oeste a unos 50 msnm sobre su límite oriental. Su configuración geomorfológica general está controlada por la presencia subsuperficial de varias cuencas tectónicas (Macachín, Laboulaye, General Levalle, Salado occidental) rellenas de depósitos cretácicos y cenozoicos (Chebli *et al.*, 1999).

Los médanos incluidos en esta unidad de paisaje desempeñan un importante papel ambiental al controlar el sistema de drenaje superficial y mal integrado de la zona (Malagnino, 1989; Cabral y Hurtado, 1990). En el MAP se describieron diferentes formas de médanos, sin embargo, las principales formas de relieve que se mencionan en la región son médanos lineales, de 100-130 km de largo y 2-3 km de ancho, con una orientación general N-NE y un relieve relativo de alrededor de 2 m (Malagnino, 1989). Los campos de médanos parabólicos son comunes en áreas semiáridas a subhúmedas, pero su distribución es restringida (Lancaster, 2009).

En Argentina, Tripaldi y Zárate (2014) hacen mención de la existencia de médanos parabólicos y cubetas de deflación principalmente sobre el oeste de la provincia de La Pampa, que en algunos casos forman patrones superpuestos. Sin embargo, dichos médanos se encontrarían en la provincia de San Luis y en los campos de paleomédanos de Utracán (Tripaldi y Forman, 2007; Tripaldi *et al.*, 2012), los cuales se generaron entre ca. 33 y 20 ka (Iriondo y Kröhling, 1996). Por otra parte, Iriondo y Kröhling

(2007) e Iriondo *et al.* (2011) describen médanos parabólicos y ollas de deflación para el S de Santa Fe, SE de Córdoba y NO de Buenos Aires. Con la intensificación de la agricultura y los climas áridos de los siglos XIX y XX, fueron localmente reactivados en los últimos 100 años (Villalba *et al.*, 1998). Isla *et al.* (2010) describen al área de estudio como un campo eólico desarrollado al norte del sistema de lagunas Encadenadas que denota los efectos de los vientos dominantes del OSO con relación a la disponibilidad de arena durante el Holoceno. Isla *et al.* (2010) plantean que una escasa abundancia de arena en el sector más al sur originó el corredor de médanos longitudinales de Daireaux. Algo más al norte, la interacción entre la arena con la vegetación o con niveles freáticos más superficial originó médanos anclados o parabólicos que se describen en el presente trabajo.

En base a lo expuesto, el objetivo de este trabajo es delimitar y caracterizar la geomorfología de un campo de médanos parabólicos ubicado en el centro oeste de la provincia de Buenos Aires mediante el análisis espacial basado en modelos digitales de elevación. Así mismo, establecer la relación que existe entre los médanos parabólicos y la distribución y evolución de las lagunas intermedanales someras asociadas a los mismos.

Área de estudio

La región pampeana es una llanura fértil y extensa de Argentina. Tiene una extensión de 613.532 km² y es el principal centro de producción agropecuario del país. Está localizada dentro de la región subtropical de latitudes medias y climas templados. Adicionalmente, es adyacente al océano Atlántico; este hecho genera amplitudes térmicas diarias y anuales más bajas que en otras regiones con latitudes similares (Aliaga *et al.*, 2017). La región está caracterizada por la ocurrencia de largos períodos de inundaciones y sequía, lo que afecta la disponibilidad de recursos hídricos. La mayor parte de la región recibe entre 650 y 1100 mm/año de precipitación, la cual decrece desde el noreste a suroeste y determina el pasaje desde clima cálido y húmedo hasta uno semiárido (Aliaga *et al.*, 2017).

El área de estudio específicamente (Fig. 1), con una superficie de 20.200 km², se ubica en el centro-oeste de la provincia de Buenos Aires y una pequeña porción del centro-este de la provincia de La Pam-

pa. El sistema de Lagunas Encadenadas del Oeste constituye su límite sur (Fig. 1). Este campo de médanos se encuentra dentro de la unidad *Campo de Médanos Centropampeanos* (Central Pampean dune fields - CPD) propuesto en Zárate y Tripaldi (2012), caracterizada por la presencia de médanos lineales. Los únicos registros encontrados de médanos parabólicos en dicha unidad pertenecen a Gardenal (1986) y Malagnino (1989) quienes los describen sumariamente como el resultado de paleovientos del cuadrante SW.

Aliaga *et al.* (2016) realizaron un análisis de agrupamiento que permitió dividir la región pampeana en conjuntos según su régimen de precipitaciones y se seleccionaron 6 subregiones que se ajustaron a la distribución de la precipitación. Según esta clasificación, el área de estudio se puede ubicar como parte de la subregión Húmeda, en la que las precipitaciones anuales son superiores a los 650 mm. El curso anual de precipitación muestra una estacionalidad marcada de mayores lluvias durante los meses de otoño (marzo-abril) y primavera (octubre-noviembre), mientras que el invierno es la estación seca. Esta zona también se ve afectada simultáneamente por los eventos extremos de precipitación, tanto húmedos como secos en intensidad y duración. Esta alternancia de períodos secos y húmedos, y sus condiciones extremas tienen importantes consecuencias sociales y económicas, siendo algunas de las causas la canalización de su drenaje como consecuencia de actividades agrícolas. En los últimos 50 años se produjo en Argentina una sucesión de períodos de sequías severas e inundaciones significativas, todas ellas afectaron a las actividades económicas y la dinámica de los cuerpos de agua. Ello incluye las áreas de llanura donde la dinámica de los recursos hídricos se relaciona directamente con la regularidad, intensidad y frecuencia de las precipitaciones. El aumento de las precipitaciones generó en el área de estudio un incremento de la superficie lagunar, por otro lado, durante los eventos secos se ha observado una disminución de las áreas cultivadas y un aumento en los procesos de erosión eólica (Aliaga *et al.*, 2016).

METODOLOGÍA

La detección y delimitación del campo de médanos se realizó mediante la generación de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del área de

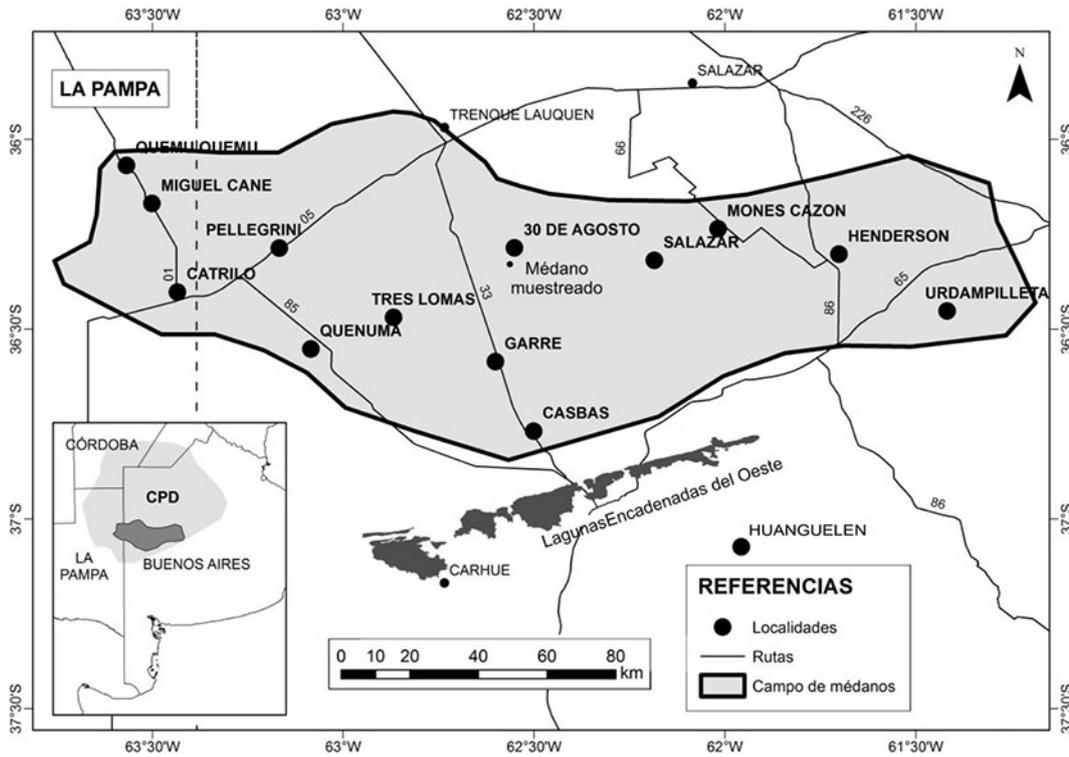


Figura 1. Área de estudio. Unidad de Campo de médanos Centropampeanos (CPD) propuesta en Zarate y Tripaldi (2012).
Figure 1. Study area. Unidad de Campo de médanos Centropampeanos (CPD) proposed by Zarate & Tripaldi (2012).

estudio a partir de imágenes SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 3 arc/seg, obtenidas del Servicio Geológico de Estados Unidos. Debido a la inclinación de la pendiente O-E, se empleó la herramienta Distancia Vertical al Curso (*Vertical Distance to Channel Network, VDCN*) del *Software SAGA GIS 2.1.2*. Cabe destacar que fue necesaria la aplicación de dicha herramienta ya que permite distinguir los sectores elevados en función de la ubicación de las áreas deprimidas circundantes y, con ello, descartar el error producido por la pendiente natural del área de estudio cuya dirección general es O-E. Los perfiles topográficos fueron trazados mediante el uso de imágenes SRTM, que posteriormente fueron comparados con los resultados en campo.

Considerando que los resultados obtenidos en el análisis VDCN se representan en una capa ráster con una graduación de colores, y a fin de seleccionar exclusivamente el área perteneciente a los médanos, en una segunda instancia del análisis se realizó una Clasificación Automática No Supervisada en ArcGIS 10.1. Previamente a la confección de la cartografía correspondiente, se superpusieron los resultados obtenidos en la clasificación automática con las imágenes del *World Imagery*, a modo de discriminar los errores de detección de elevación que se pudieran haber generado en las imágenes

SRTM como resultado de la presencia de arboledas.

Para el análisis de sedimentos se obtuvieron muestras del área intermedanal, de las pendientes de barlovento y sotavento en un perfil sobre la cresta a 15, 70 y 110 m respectivamente de un médano ubicado en la localidad de 30 de Agosto (Buenos Aires) (Fig. 1). El análisis granulométrico de los sedimentos se realizó mediante un analizador láser de Partículas Mastersizer 2000, cuyos resultados fueron representados con el software GRADISTAT v8.

Se realizaron vuelos con un vehículo aéreo no tripulado (UAV por sus siglas en inglés) a distintas alturas de vuelo y orientaciones de cámara, con la finalidad de adquirir un conjunto de videos panorámicos a 360°, imágenes con vistas de las lagunas presentes e imágenes ortogonales a la superficie de los médanos, para posteriormente ser utilizadas en la generación de ortomosaicos, nube densa de puntos y modelo tridimensional utilizando el método SFM (*Structure-From-Motion*) (Genchi *et al.*, 2015). El método se basa en la adquisición de imágenes de forma secuencial, con un alto grado de solapamiento entre ellas, y se fundamenta en la determinación de puntos correlacionables identificados en las distintas imágenes (Fernández y Gutiérrez, 2016). Las imágenes a su vez fueron sometidas a un proceso de optimización (USGS, 2016) que permite obtener

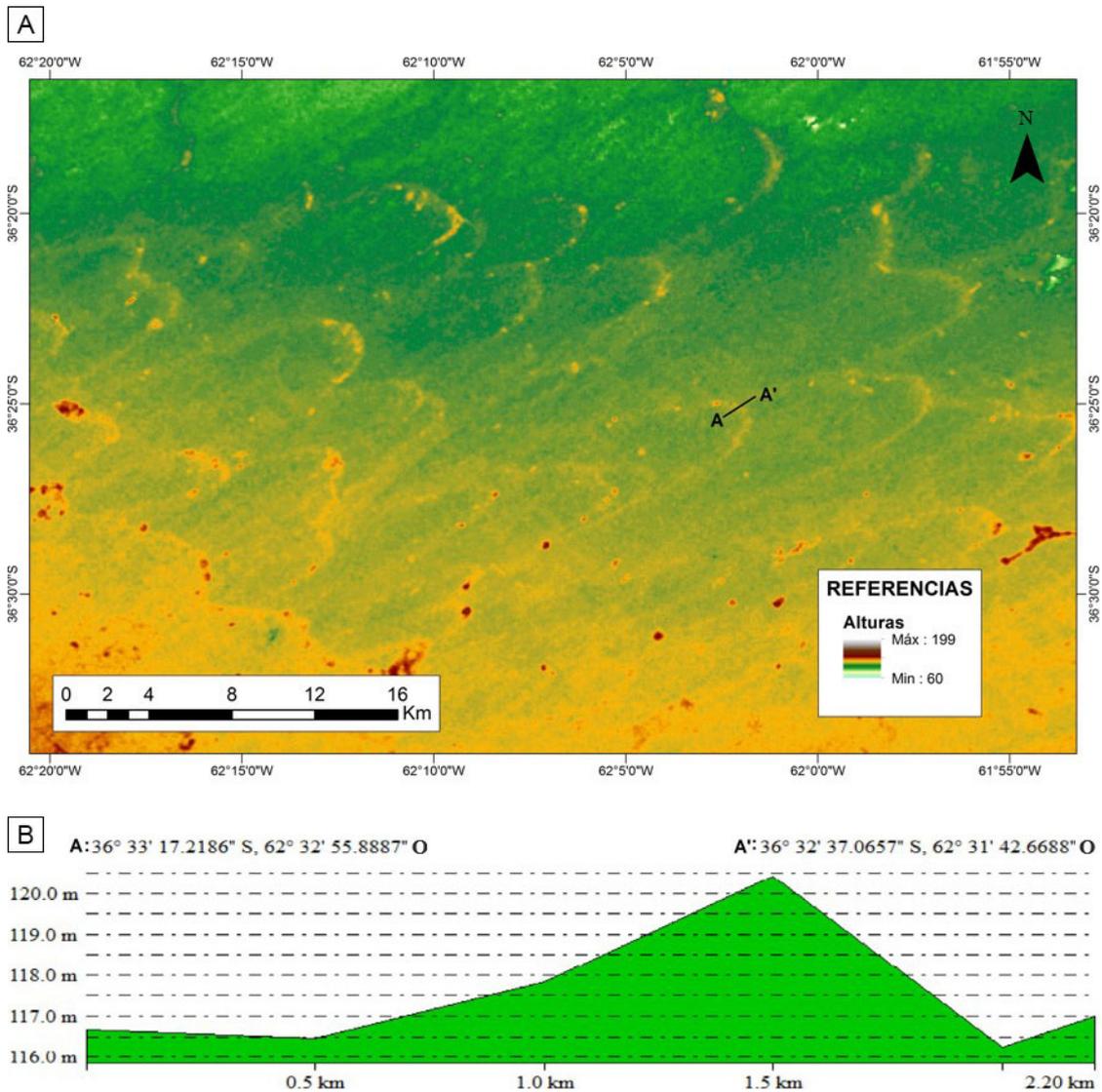


Figura 2. a) Visualización de médanos parabólicos en una imagen SRTM 3 arc/seg. **b)** Perfil topográfico de un médano parabólico estimado desde una imagen SRTM 3 arc/seg.

Figure 2. a) Parabolic dunes visualization in a SRTM 3 arc/sec image. **b)** Topographic profile of a parabolic dune estimated from a SRTM 3 arc/sec image.

una mayor exactitud en los parámetros de las tomas y corregir distorsiones causadas por el lente de la cámara, además de mejorar el modelo general, cuya geometría de la escena, la locación de la cámara y la orientación son automáticas y simultáneamente derivadas de la apropiada superposición (> 60%) de las fotografías tomadas (Genchi *et al.*, 2015; Pikelj *et al.*, 2018).

RESULTADOS

Mediante el empleo de imágenes SRTM se ha detectado un campo con un total de 254 médanos

parabólicos (Fig. 2a y 3), donde la superficie que actúa como sustrato está ubicada entre los 90 y 120 msnm, con una dirección general SO-NE. La superficie aproximada de todo el campo es de 20.200 km², los médanos individuales tienen alturas entre 2 y 6 m (Fig. 2B) y anchos entre 2 y 5 km (Fig. 3).

Los resultados demostraron que existe un total de 254 crestas distribuidas en el área, dando una densidad de 0,01 médanos/km², muchos de los cuales se encuentran segmentados por procesos naturales de disintegración de médanos mediante la presencia de pequeñas lagunas someras y depresiones temporales cuya profundidad aproximada es 1 m, potenciado

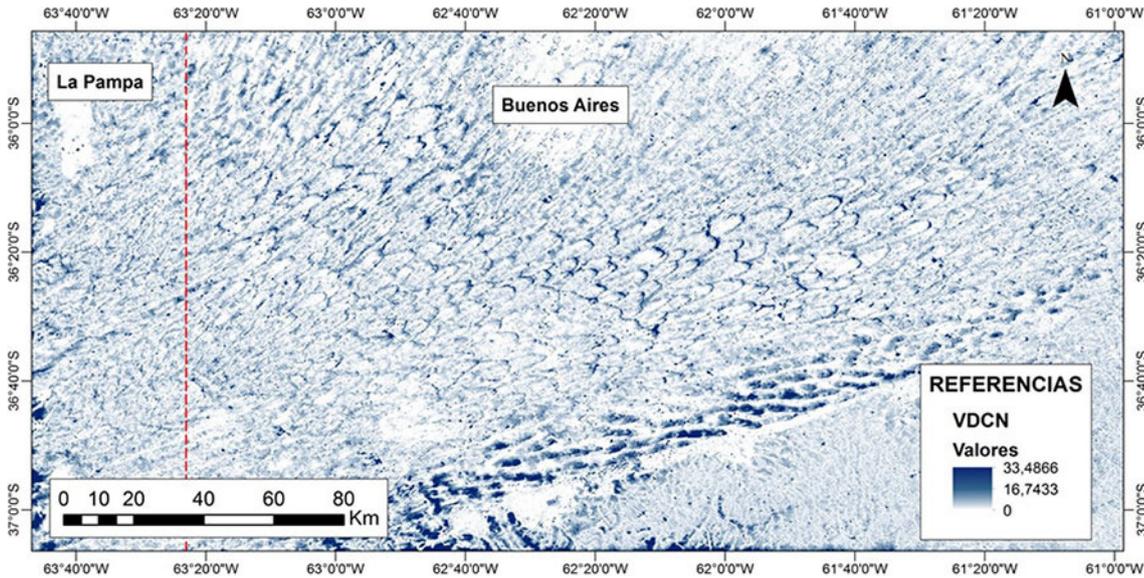


Figura 3. Detección de médanos mediante VDCN en base a una imagen SRTM 3 arc/seg.
Figure 3. Dunes detection through VDCN based on a SRTM 3 arc/sec image.

por la erosión de suelos como consecuencia de la actividad agrícola (Fig. 4 y 5). La disposición de las lagunas permite inferir que, ante la ocurrencia de abundantes precipitaciones, las mismas pueden conectarse y/o desbordarse, inundando con ello las áreas aledañas, tal como se observa en la figura 6 donde, a partir de un modelo tridimensional y un ortomosaico, se puede determinar el patrón de conexión existente entre las lagunas y las líneas de contorno de inundación.

En relación a sus características morfológicas y morfométricas, los médanos del área de estudio fueron categorizados en tres clases (Fig. 7; Tabla 1). Los de mayor abundancia son los médanos parabólicos simétricos que, como su nombre lo indica, son aquellos cuya morfología pero, principalmente, el largo de sus brazos son similares. Los resultados morfométricos permitieron comprobar que estos médanos poseen mayor desarrollo en la porción a sotavento de la cresta, con diferencias topográficas que varían hasta casi 5 m. Son escasos los ejemplos donde la relación entre ambas alturas es inversa, siendo la misma de 1,4 m. Tanto el largo como el ancho varían entre 1,5 y 9 km, siendo muy equilibrada la relación entre ambas, lo cual se ve reflejado en los resultados de la variable largo/ancho.

Los médanos parabólicos asimétricos deben su nombre a que uno de sus brazos es notoriamente más largo; sin embargo, son los que presentan una mayor similitud entre el largo de los flancos de barlovento

y sotavento. El nivel de base a barlovento era más alto que a sotavento, siendo mínima en algunos casos (Tabla 1). En cuanto al largo y ancho de estos médanos, la diferencia con los simétricos se asocia al mayor desarrollo de uno de sus brazos, no obstante, por lo general son más angostos y, en consecuencia, la relación entre el largo y el ancho da resultados alargados (Tabla 1).

Por último se encuentran los médanos parabólicos con coalescencia lateral. Estas formas representan la unión de dos o más médanos, independientemente de tratarse de simétricos o asimétricos. En consecuencia, poseen un desarrollo lateral de hasta 26 km, mientras que el largo no supera los 10 km; lo que se refleja en los bajos valores de relación existente entre ambas variables (Tabla 1). Si bien los flancos de barlovento y sotavento presentan valores similares a los casos anteriores, la diferencia significativa se da en los valores máximos.

Los resultados del análisis de la granulometría permitieron detectar claras diferencias en distintos sectores de un médano representativo del campo (Fig. 1). Es decir, si bien existe un predominio de arena, el porcentaje de los materiales finos puede variar considerablemente. En el flanco de barlovento el porcentaje de fango (arcilla y limo) es de 57,8%, en la cresta un 37,8%, mientras que a sotavento disminuye a 24,7% (Fig. 8). En este caso, los altos valores de fango se asocian por encontrarse próximo al área intermedanal, y de allí la semejanza

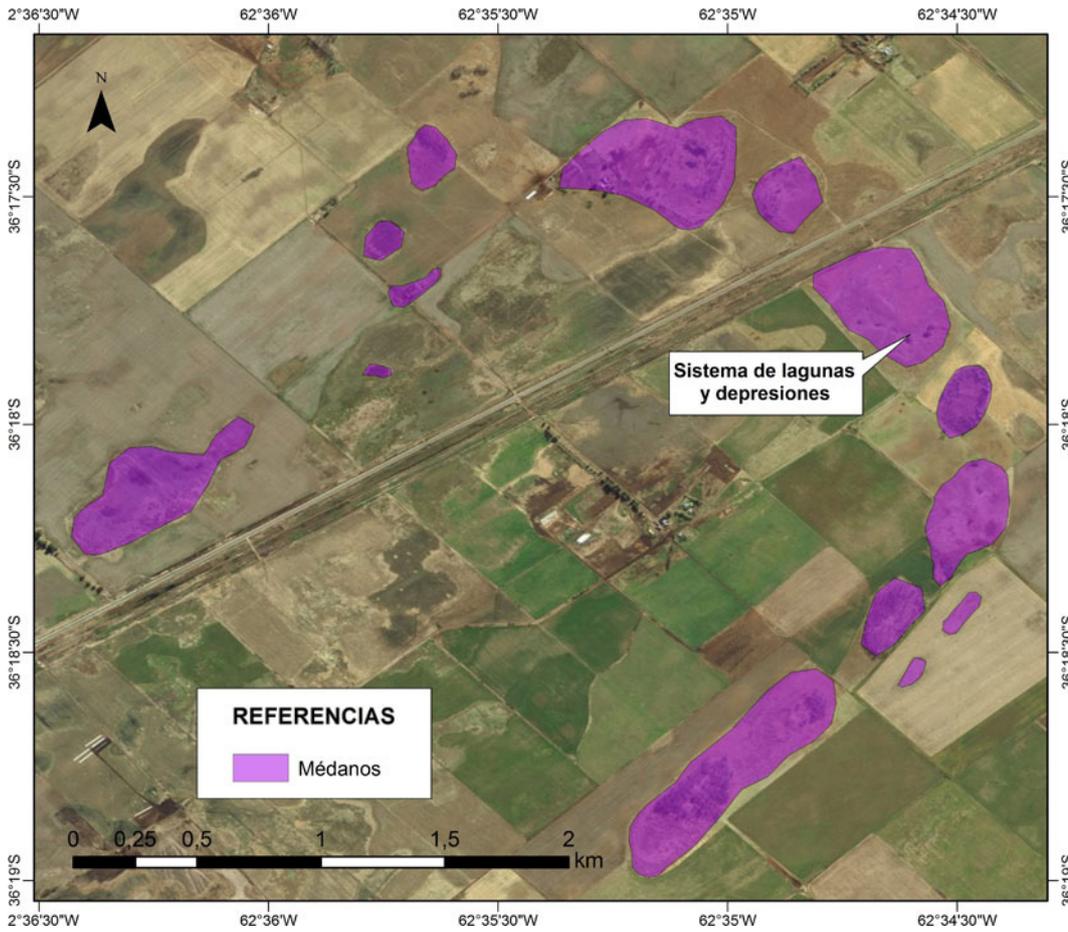


Figura 4. Médano parabólico segmentado por la presencia de lagunas y la actividad agrícola en la localidad de 30 de Agosto, Buenos Aires.

Figure 4. Parabolic dune segmented by the presence of lagoons and agricultural activity in the town of 30 de Agosto, Buenos Aires.



Figura 5. Fotografía de lagunas indicadas en la Figura 4, tomada con vehículo aéreo no tripulado (UAV) a 48 m de altura. Localidad de 30 de Agosto, Buenos Aires, 18 de julio de 2017.

Figure 5. Image of shallow lakes indicated in Figure 4, taken with unmanned aerial vehicle (UAV) at 48 m height. Locality of 30 de Agosto, Buenos Aires. July 18, 2017.

Características morfométricas por tipo de médano parabólico							
Simétrico	LPB	LPS	LPB/LPS	DAByS	A	L	L/A
Unidades/Categorías	km	km	dimensionales	m	km	km	dimensionales
Máximo	1.23	2.08	2	1.4	9.17	9.68	2.4
Mínimo	0.47	0.4	0.5	-4.99	1.47	1.54	0.45
Media	0.53	0.6	0.97	-1.07	3.66	4.24	1.24
Asimétrico	LPB	LPS	LPB/LPS	DAByS	A	L	L/A
Unidades/Categorías	km	km	dimensionales	m	km	km	dimensionales
Máximo	1	1	2	-0.1	7.39	10.4	3.24
Mínimo	0.47	0.47	0.5	-3.5	0.9	2.17	0.58
Media	0.53	0.62	0.93	-1.4	3.44	5.18	1.69
Coalescencia lateral	LPB	LPS	LPB/LPS	DAByS	A	L	L/A
Unidades/Categorías	km	km	dimensionales	m	km	km	dimensionales
Máximo	1.57	2.62	3	0.26	25.97	9.88	1.93
Mínimo	0.49	0.38	0.43	-4.6	3.58	3.34	0.13
Media	0.61	0.63	1.08	-1.59	9.18	6	0.8

Tabla 1. Características morfométricas por tipo de médano parabólico.

Table 1. Morphometric characteristics by type of parabolic dune.

entre dicha zona y el flanco a barlovento. Esta disminución significativa de materiales finos a sotavento se encuentra asociada a la pérdida de los mismos por la acción de los vientos que los remueve al quedar expuestos, mientras que los altos valores a barlovento, son fundamentales para el desarrollo del sistema de lagunas y depresiones indicadas en las figuras 4 y 5, ya que disminuye la infiltración por una disminución de la permeabilidad en el fondo. Pero también puede ser debido al transporte de sedimentos, consecuencia de la separación de flujo en la cresta del médano. Es decir, los sedimentos finos son exportados y se depositan una cierta distancia (típicamente 4-5 H) de la cresta en el seno anterior (Perillo, 2003).

Los resultados obtenidos en el perfil del médano han permitido detectar curvas bimodales, con un aumento progresivo de materiales finos en profundidad (Fig. 9). La presencia de estos resultados podría estar indicando aportes sedimentarios en distintos momentos climáticos; sin embargo, la constante remoción de suelo derivada de la intensa

actividad agrícola en la región puede ser un factor determinante en la distribución, presencia y/o concentración de los sedimentos que componen los médanos, principalmente en sus estratos superiores.

DISCUSIÓN

Al describir el noreste de Arizona, Hack (1941) menciona que los médanos longitudinales se produjeron en áreas con menor cantidad de arena y vegetación cuando se comparan con las regiones de médanos parabólicos. Situación que puede ser trasladada al área de estudio, ya que los médanos longitudinales mencionados por Zárate y Tripaldi (2012), se encuentran en áreas próximas a los médanos parabólicos. Es decir, que médanos parabólicos darían paso a los longitudinales donde la disponibilidad de arena es menor. Bordeando los márgenes del campo de médanos hacia el norte, este y sur se pueden observar los médanos longitudinales característicos de este sector de la región pampeana (Zárate y Blasi, 1993; Iriando y Kröhling, 1995,

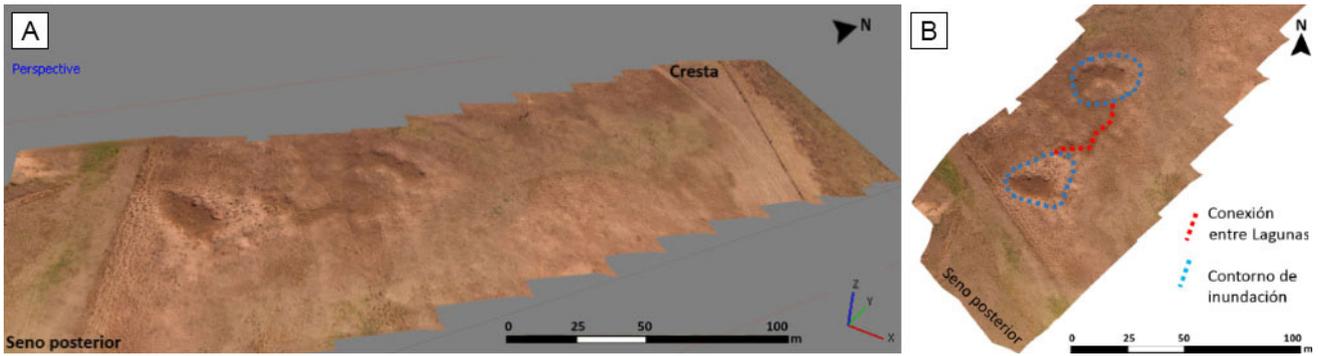


Figura 6. Patrón de conexión y contorno de inundación de las lagunas presentes en el perfil de un médano parabólico en época de abundantes precipitaciones. **a)** Modelo tridimensional del perfil del médano. **b)** Ortomosaico del perfil del médano.
Figure 6. Connection pattern and flooding contour of the lagoons present in the parabolic dune profile in times of abundant rainfall. **a)** Three-dimensional model of the dune profile. **b)** Orthomosaic of dune profile.

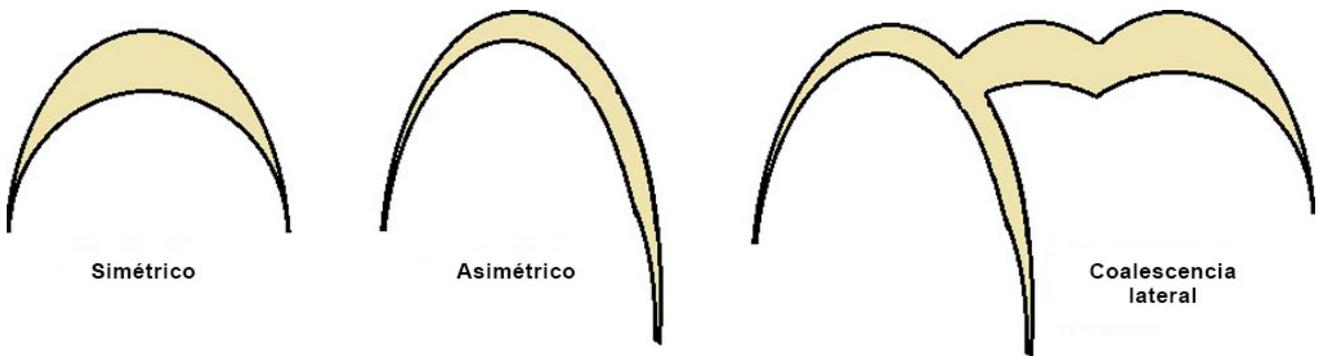


Figura 7. Esquema de las morfologías representativas de los médanos en el área de estudio.
Figure 7. Scheme of representative morphologies of the dune in the study area.

1996; Zárate y Tripaldi, 2012). Es posible que algunas formas semilunares simples se deformen en rasgos longitudinales cuando se mueven en áreas con direcciones de viento variables (Bagnold, 1941). Lancaster (1982) sugirió que una asimetría en el suministro de sedimentos en la proximidad del mar de arena también puede haber influido en esta morfología. Otro motivo puede ser la extensión asimétrica de los brazos bajo la influencia de vientos bidireccionales o como también por la colisión de médanos (Bourke y Goudie, 2009). Por otra parte, la coalescencia lateral de los médanos parabólicos, sumado al escaso desarrollo de sus brazos, con el tiempo, podría dar lugar a la formación de médanos transversales.

En cuanto a la distribución de los médanos mencionados, no se establecieron unidades de paisaje en las cuales se desarrolla un tipo en particular. Por el contrario, su distribución suele ser más bien heterogénea, pero con clara tendencia a la co-

alescencia lateral. No obstante, existe un mayor predominio de médanos longitudinales sobre las márgenes del área de estudio debido a una influencia topográfica en el viento. Situación similar fue descrita por Bourke y Goudie (2009) para un campo de médanos barjanes, donde esta condición puede estar indicando un mayor suministro de sedimentos (locales) y una menor velocidad de corte.

Pye (1982) sugiere etapas de evolución de médanos parabólicos alargados, las cuales tienen en cuenta la presencia de lagunas someras dentro de ellos (Fig. 10). Teniendo en cuenta dicha clasificación y la morfología de las lagunas observadas en este trabajo, se puede decir que los médanos en estudio serían principalmente médanos parabólicos alargados, maduros y generados por el aumento de la altura de los brazos divergentes.

Los espacios que se encuentran entre los médanos pueden o no corresponderse con zonas de encharcamiento temporal o permanente (Bernat

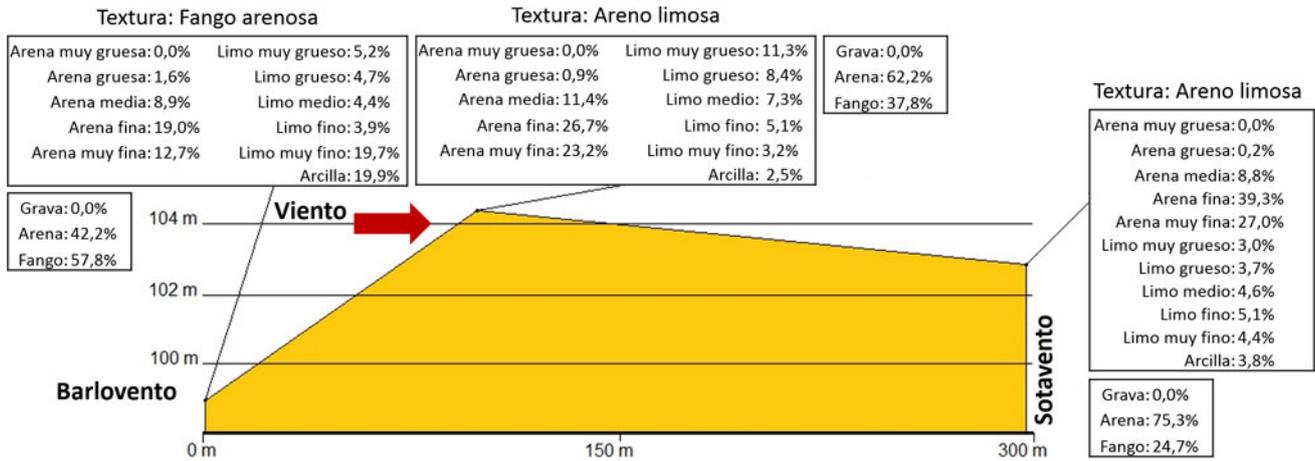


Figura 8. Perfil topográfico y granulometría de un médano parabólico (30 de Agosto, Buenos Aires).
 Figure 8. Topographic profile and granulometry of a parabolic dune (30 de Agosto, Buenos Aires).

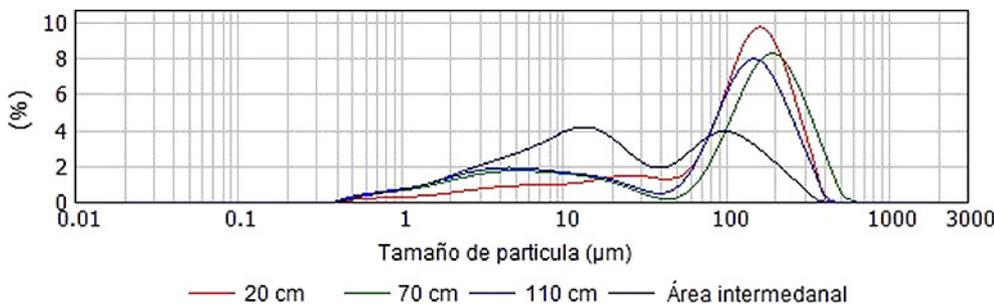


Figura 9. Granulometría de los sedimentos en un perfil sobre la cresta del médano (30 de Agosto, Buenos Aires).
 Figure 9. Granulometry of sediments in the dune crest (30 de Agosto, Buenos Aires).

Rebollal y Pérez González, 2005). En la figura 11 se observa un ejemplo de ello, al comparar la imagen SRTM con una imagen del World Imagery, distinguiendo el sector intermedanal del área de estudio como un área deprimida con la presencia de numerosas lagunas temporales que poseen un largo máximo entre 200 y 500 m. Los resultados granulométricos determinaron una gran concentración de materiales muy finos, muy superiores a los encontrados en el área intermedanal. Si bien esta característica permite explicar el sistema lagunar, es importante señalar que se trata de un ambiente fuertemente impactado por la actividad agrícola. A su vez la presencia de curvas bimodales en los resultados de la distribución granulométrica puede estar asociada a procesos de pedogénesis, similares a lo descrito por Contreras (2016) en las lomadas arenosas de la provincia de Corrientes correspondientes al mega abanico aluvial del río Paraná. Abundantes precipitaciones saturan con

agua al médano que, al ir descendiendo el agua, arrastra consigo los materiales finos permitiendo una redistribución de sedimentos, discriminando los más gruesos por encima y los más finos por debajo (Contreras, 2016). En estos casos es frecuente encontrar estructuras sedimentarias de disipación, descritas por Iriondo y Kröling (2007) en médanos del Mar de Arena Pampeano. Otra opción es el transporte diferencial, ya que el viento, sobretodo en la cresta, tiende a capturar el sedimento fino generando un acorazamiento de la cresta con sedimentos más gruesos (Perillo, 2003).

La disposición de estas lagunas permite inferir que ante la ocurrencia de abundantes precipitaciones, las mismas pueden conectarse y/o desbordarse, inundando con ello las áreas aledañas. A su vez, la figura 11 muestra las prácticas agrícolas sobre los médanos, ya mencionado por Zárate y Tripaldi (2012), cuando hacen mención que la comprensión de la dinámica eólica en el Cuaternario es crítica,

Representación esquemática del desarrollo evolutivo de médanos parabólicos

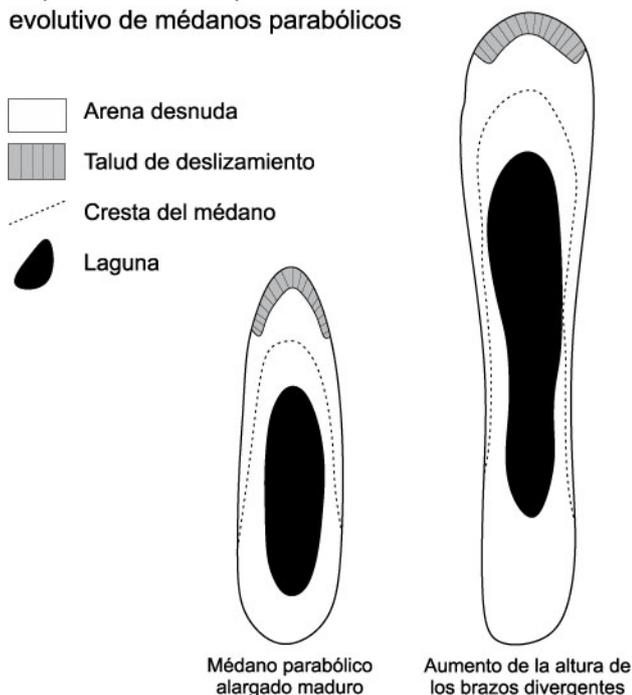


Figura 10. Estado de madurez de médanos parabólicos. (Modificado de Pye, 1982).

Figure 10. State of maturity of parabolic dunes. (Modified from Pye, 1982).

ya que el material de origen de estos depósitos son suelos actualmente removidos y cultivados en una región que se ve afectada por la variabilidad climática y profundamente modificada por la agricultura. Posiblemente, este sea uno de los principales motivos por el cual no se han encontrado antecedentes sobre el área en cuestión.

Al igual que en gran parte de la provincia de Buenos Aires y del Mar de Arena Pampeano, la disposición de estos médanos incide directamente en el escurrimiento superficial local y, en consecuencia, en la morfología y morfometría de los cuerpos de agua intermedanales. En este sentido, la disposición del médano y las lagunas (Fig. 11) que se encuentran dentro de él, son clasificadas en su mayoría como triangulares e irregulares simples según Contreras y Contreras (2017). Estas morfologías lagunares responden a un período de inundación donde el desarrollo de la línea de costa adopta formas desde triangulares a irregulares, como las descritas para lagunas someras del valle aluvial del río Paraná (Contreras y Paira, 2016).

No obstante, estas lagunas que en la figura 11 poseen 200 m de largo máximo, pueden secarse por

completo o bien ocupar todo el sector intermedanal alcanzando un largo máximo de 6 km para el año 1987 (Fig. 12). En consecuencia, estos fuertes cambios morfométricos representan potenciales riesgos de inundación, considerando que es un área de gran explotación agrícola y que, en muchos casos, estas cubetas se encuentran sobre los límites de las áreas periurbanas de las distintas localidades de la región. Ante esta situación es fundamental contar con políticas de ordenamiento territorial que actúen como reguladores y controladores de los ejes de expansión de una ciudad y más aún cuando las condiciones naturales pueden dejar expuestas a la población ante determinadas amenazas (Contreras, 2015).

CONCLUSIONES

Mediante el empleo de modelos digitales de elevación ha sido posible delimitar un campo de médanos parabólicos de aproximadamente 20.200 km² con una orientación SW-NE. El ancho de los médanos va de entre 2 a 5 km, cuyas alturas rondan entre los 2 y 6 m. La herramienta de análisis espacial ha sido fundamental para poder discriminar la ubicación de los médanos, reduciendo al mínimo los errores producidos por la diferencia entre las alturas entre los extremos del campo de médanos.

Los resultados granulométricos de tres puntos en un médano parabólico permitieron demostrar que se tratan de médanos de arena fina, pero la curva bimodal obtenida con materiales finos estaría indicando que sus sedimentos responden a períodos climáticos diferentes o que los médanos sufrieron eventos de disipación y/o pedogénesis durante períodos húmedos del Cuaternario, sin dejar de considerar eventos deflacionarios en períodos secos posteriores al momento que dio origen a dichas geoformas. El aumento progresivo de los materiales finos dentro del médano demuestra que hay una redistribución de materiales, con un proceso de pedogénesis. Esta situación es clave para el desarrollo de un sistema de lagunas y charcas temporales sobre el médano, cuyo aumento y disminución de los niveles de agua erosionan al médano que las contiene, segmentándose, proceso similar al descrito en la región de lomadas arenosas de la provincia de Corrientes (Contreras, 2016).

La ubicación de estos médanos es clave en la configuración del escurrimiento y, en consecuencia,

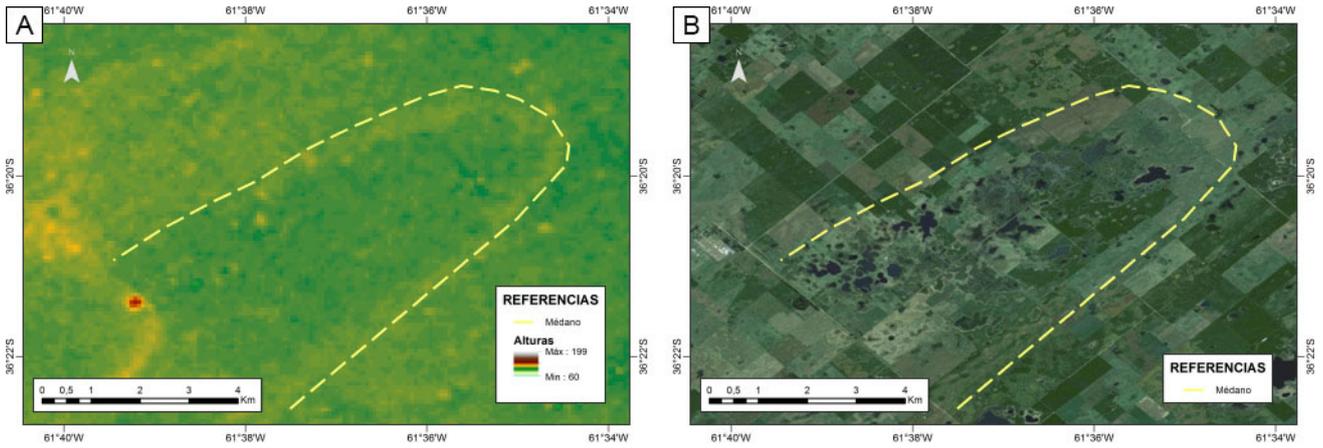


Figura 11. Comparación entre una imagen SRTM 3 arc/seg (a) y el World Imagery (b).
Figure 11. Comparison between an SRTM 3 arc/sec image (a) and the World Imagery (b).

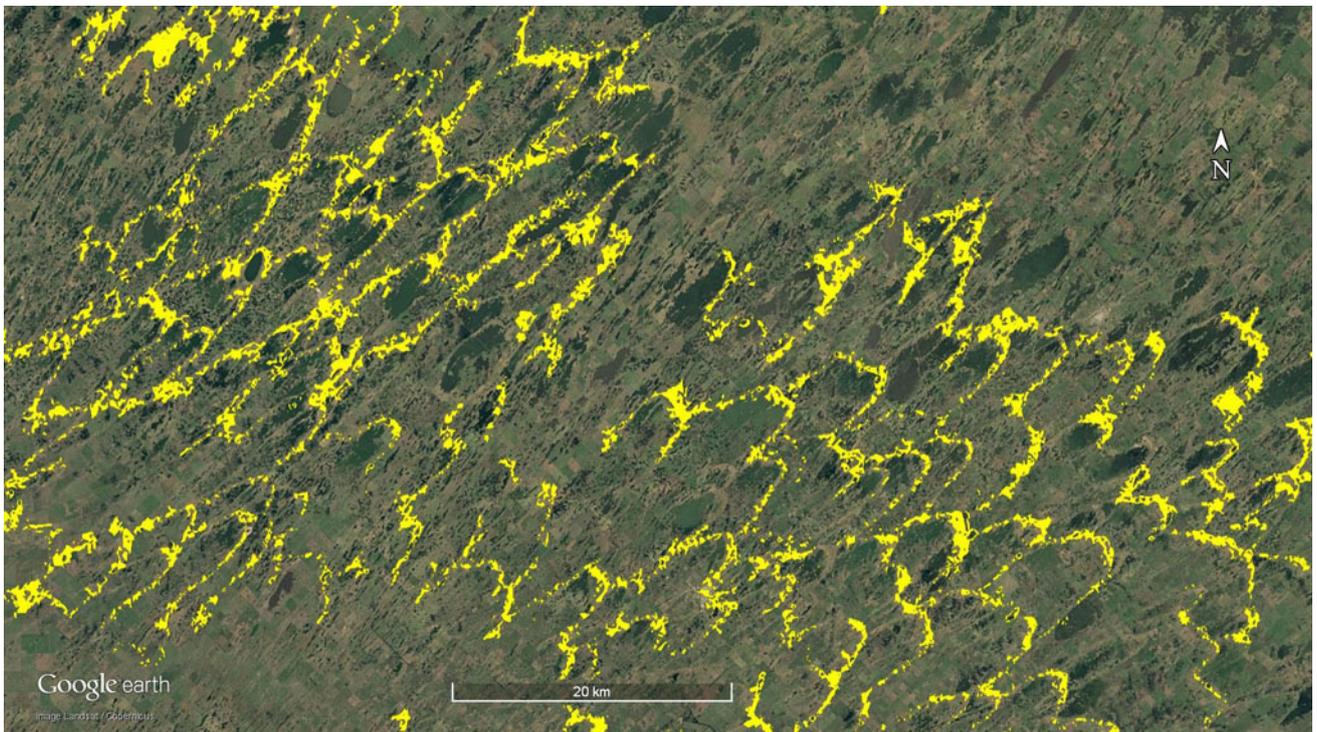


Figura 12. Anegamiento del área intermedanal durante el año 1987.
Figure 12. Waterlogging of the interdune area during 1987.

en el paisaje local. Las áreas intermedanales son naturalmente deprimidas, en ellas fue posible detectar un gran número de lagunas temporales y permanentes, cuyo largo máximo superaban los 200 m. La delimitación de estos cuerpos de agua resulta de gran interés a la hora de clasificarlos según su origen. No se descarta la posibilidad de que la actividad agrícola, al igual que en otros sectores

de la provincia, reactive los procesos eólicos o los mantenga activos.

Agradecimientos

El presente trabajo fue financiado parcialmente por proyectos: redes PAMPA² (CONICET), ANPCyT, Universidad Nacional del Sur (PGI 24/G059), el

Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) CRN3038 (US NSF Award GEO-1128040) y PI – UNNE 17Q004.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aliaga, V., Ferrelli, F., Alberdi, E., Bohn, V. y Piccolo, M.,** 2016. Distribución y variabilidad de la precipitación en la región pampeana, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 42 (1):261-280.
- Aliaga, V., Ferrelli, F. y Piccolo, M.,** 2017. Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *International journal of climatology* 37 (1):1237-1247.
- Andrews, B. D., Gares, P. A. y Colby, J. D.,** 2002. Techniques for GIS modeling of coastal dunes. *Geomorphology* 48:289-308.
- Bagnold, R. A.,** 1941. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen, London: 265.
- Bernat Rebolal, M. y Pérez González, A.,** 2005. Campos de dunas y mantos eólicos de la Tierra de Pinares (Sureste de la cuenca del Duera, España). *Boletín Geológico y Minero* 116 (1):23-38.
- Bourke, M. C. y Goudie, A.,** 2009. Varieties of barchan form in the Namib Desert and on Mars. *Aeolian Research* (1):45-54.
- Cabral, M. y Hurtado, M.,** 1990. *Riesgo de inundación en el área sur de la Pampa arenosa, provincia de Buenos Aires*. Actas I Simposio Latinoamericano sobre riesgo geológico urbano: 1-42. São Paulo.
- Chebli, W., Mozetic, M., Rossello, E. y Buhler, M.,** 1999. Cuenas sedimentarias de la llanura chacopampeana. *Anales del Instituto de Geología y Recursos Naturales, Argentina* 29 (1): 627-644.
- Contreras, F. I.,** 2015. El impacto ambiental del crecimiento espacial de la ciudad de Corrientes sobre lagunas periurbanas. *Boletín Geográfico* 37:29-42.
- Contreras, F. I.,** 2016. *Las lagunas y sus dinámicas geomorfológicas en la transformación de los paisajes de lomadas arenosas de la provincia de Corrientes (Argentina)*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Nordeste.
- Contreras, F. I. y Contreras, S. A.,** 2017. La Incidencia de la pendiente en la distribución de las morfologías de las lagunas sobre lomadas arenosas (Corrientes, Argentina). *Anuario do Instituto de Geociencias – UFRJ* 40 (1):15-25.
- Contreras, F. I. y Paira, A. R.,** 2016. Aplicación del “índice de cambio” a las variaciones morfométricas de las lagunas de lomadas arenosas. El caso de Bella Vista (Corrientes, Argentina). *Revista de Geografía* 21:31-38.
- Duran, O., Schawämmle, V. y Lind, P. G.,** 2009. The dune size distribution and scaling relations of barchans dune fields. *Granular Matter* 11:7-11.
- Fernández, J. y Gutiérrez, J.,** 2016. Aplicaciones geológicas de los drones. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 29(1): 537-554.
- Gardenal, M.,** 1986. *Geomorfología del partido de Salliqueló, provincia de Buenos Aires*. LEMIT, serie II, 33, La Plata, Argentina: 72.
- Genchi S. A., Vitale, A. J., Perillo G. M. E. y Delrieux, C. A.,** 2015. Structure-from-motion approach for characterization of bioerosion patterns using UAV imagery. *Sensors* 15:3593-3609.
- Hack, J. T.,** 1941. Dunes of the Western Navajo County. *Geographical Review* 31(2):240-263.
- Hugenholtz, C. H., Whitehead, K., Brown, O. W., Barchyn, T. E., Moorman, B. J., LeClair, A., Riddell, K. y Hamilton, Taylor.,** 2013. Geomorphological mapping with small unmanned aircraft system (sSUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology* 194:16-24.
- Iriondo, M.,** 1990. A late Holocene dry period in the Argentine plains. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*. 7:198-218.
- Iriondo, M. y García, N. O.,** 1993. Climatic variations in the Argentine plains during the last 18,000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 101 (3-4):209-220.
- Iriondo, M. y Kröhling, D.,** 1995. El sistema eólico pampeano. *Comunicaciones del Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino (N.S.)* 5 (1).
- Iriondo, M. y Kröhling, D.,** 1996. Los sedimentos eólicos del noreste de la llanura pampeana. *XIII Congreso Geológico Argentino*, Buenos Aires Actas Aridización, disipación de dunas y pedogénesis en el Cuaternario del Mar de Arena Pampeana Oriental IV: 27-48.
- Iriondo, M. y Kröhling, D.,** 2007. Geomorfología y sedimentología de la Cuenca Superior del Río Salado (Sur de Santa Fe y Noroeste de Buenos Aires, Argentina). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 14 (1):1-23.
- Iriondo, M., Kröhling, D., y Brunetto, E.** (2011). Aridization, dune dissipation and pedogenesis in the Quaternary of Eastern Pampean Sand Sea. *Sand Dunes: Conservation, Shapes/Types and Desertification*, 1-42.
- Isla, F., Dondas, A. y Taglioretti, M.,** 2010. Médanos relicticos interpampeanos en Daireaux y Centinela del Mar, Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 67 (1), 58-64.
- Lancaster, N.,** 1982. Dunes on the Skeleton Coast, Namibia (south West Africa): geomorphology and grain size relationships. *Earth Surface Processes and Landforms* 7:575-587.
- Lancaster, N.,** 2009. Dune Morphology and Dynamics. En Parsons, A.J. y Abrahams, A.D. (Eds.) *Geomorphology of Desert Environments*. Segunda Edición. Springer. Pp. 557-598.
- Malagnino, E. C.,** 1989. Paleoformas de origen eólico y sus relaciones con los modelos de inundación de la provincia de Buenos Aires. IV Simposio de Percepción Remota, IX Reunión Plenaria SELPER. Bariloche, Argentina. Tomo II: 611-620.
- Perillo, G. M. E.,** 2001. Hacia una nomenclatura y clasificación de formas de fondo transversales formadas por flujos de agua. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*. 8:15-34.
- Perillo, G. M. E.,** 2003. Dinámica del Transporte de Sedimentos. *Asociación Argentina de Sedimentología*, Publicación Especial Nro. 2, La Plata, 201 pp.
- Pikelj, K., Ružić, I., Ilić, S., James M., R. y Kordić, B.,** 2018. Implementing an efficient beach erosion monitoring system for coastal management in Croatia. *Ocean and Coastal Management* 156:223-238.
- Pye, K.,** 1982. Morphological Development of Coastal Dunes in a Humid Tropical Environment, Cape Bedford and Cape Flattery, North Queensland. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography* 64(3/4): 213-227.
- Sanabria, J. y Argüello, G.,** 1999. La edad de los materiales parentales loésicos de los suelos y desarrollo del perfil, en un sector de la plataforma basculada, Córdoba, Argentina. *XVI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*, Temuco, Chile Actas: 201-214.

- Small, C. y Sohn, R.**, 2015. Correlation scales of digital elevation models in developed coastal environments. *Remote Sensing of Environment* 159:80-85.
- Tripaldi, A. y Forman, S. L.**, 2007. Geomorphology and chronology of Late Quaternary dune fields of western Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology* 251 (2):300-320.
- Tripaldi, A. y Zárate, M. A.**, 2014. A review of Late Quaternary inland dune systems of South America east of the Andes. *Quaternary International* 30:1-15.
- Tripaldi, A., Mehl, A. y Zárate, M. A.**, 2012. Mantos de arena y campos de dunas del valle Utracán-Argentino, provincia de La Pampa, Argentina. *V Congreso argentino de Cuaternario y Geomorfología Actas*: 88-89.
- U.S. Geological Survey.**, 2016. Unmanned Aircraft Systems Data Post-Processing. USGS National UAS Project Office – March 2016.
- Villalba, R., Grau, H. R., Boninsegna, J. A., Jacoby, G. C. y Ripalta, A.**, 1998. Tree-ring evidence for long-term precipitation changes in subtropical South America. *International Journal of Climatology* 19 (13):1463-1478.
- Zárate, M. y Blasi, A.**, 1993. Late Pleistocene and Holocene deposits of the southeastern Buenos Aires province: a preliminary model. *Quaternary International* 17:15-20.
- Zárate, M. y Tripaldi, A.**, 2012. The aeolian system of central Argentina. *Aeolian research*. 3:401-417.