

reduced dimensions of the climbing dune body, it was possible to interpret the local wind morphogenesis and its relation with other minor forms observable in the region. Climbing dunes are the most important forms in the region and are associated with smaller ones such as nebkhas, as well as resulting from the abrasive effect of the sand on the rock where the climbing dunes are.

**Key Word:** Aeolian morphogenesis – climbing dunes – nebkha - flutes

## Introducción

Las denominadas dunas trepadoras constituyen una geoforma muy particular en lo referido a la morfogénesis eólica, demostrado ello con la escasa literatura específica que se refiere a la misma. En las provincias de Salta y Jujuy se las encuentra en pocos lugares conformando un reducido número de sitios donde se las puede observar; uno de ellos lo conforman las emplazadas en las cercanías de Olacapato.

El cuerpo de dunas estudiado permite observar, en un área pequeña y en detalle, todo lo relacionado con el origen y evolución de esta geoforma tan particular que, en este caso constituye el macro relieve de origen eólico asociado con el micromodelado debido a la acción erosiva del viento.

La información lograda contribuye al conocimiento de esta geoforma y así avanzar en el estudio de las mismas tendientes a lograr una clasificación específica. La importancia de este trabajo no solo radica en la información obtenida con respecto a la morfogénesis de las dunas trepadoras sino también en lo relacionado con el micro modelado debido a la abrasión para comprobar que los tafoni no son de origen eólico según lo observado en el mismo lugar.

## Área de estudio

Las dunas trepadoras están emplazadas a 4 km de Olacapato, exactamente en el Km 211 de la ruta nacional N° 51 que permite acceder a las mismas en forma directa prácticamente durante todo el año, salvo en época de lluvias o precipitaciones sólidas, cuando se producen cortes temporales. La localidad de Olacapato se ubica en el Departamento de los Andes, al noroeste de la ciudad capital de Salta (Fig. 1), en la provincia morfoestructural de la Puna. La posición geográfica de las dunas trepadoras está dada por las coordenadas 24° 08' 29,6"S y 66° 41' 58,27"W, altitudinalmente se encuentran a 3.974 msm.

La condición climática del área de estudio, ubicada en la Puna Salteña, se corresponde con una zona de escasas precipitaciones, básicamente líquidas, bajas temperaturas, pronunciado cambio de ésta entre el día y la noche, todo ello asociado con fuertes vientos. Las lluvias están controladas por la orografía que actúa como barrera para los vientos húmedos provenientes del Océano Atlántico.

Las precipitaciones, según el registro de la media mensual (Tabla 1), se concentran en los meses de verano. Las precipitaciones líquidas anuales, de carácter torrencial, disminuyen de N a S y de E a W debido al rumbo meridional de los cordones montañosos. Las precipitaciones sólidas se dan con mayor frecuencia durante todo el año en los relieves más altos, tal es el caso del nevado del Acay.

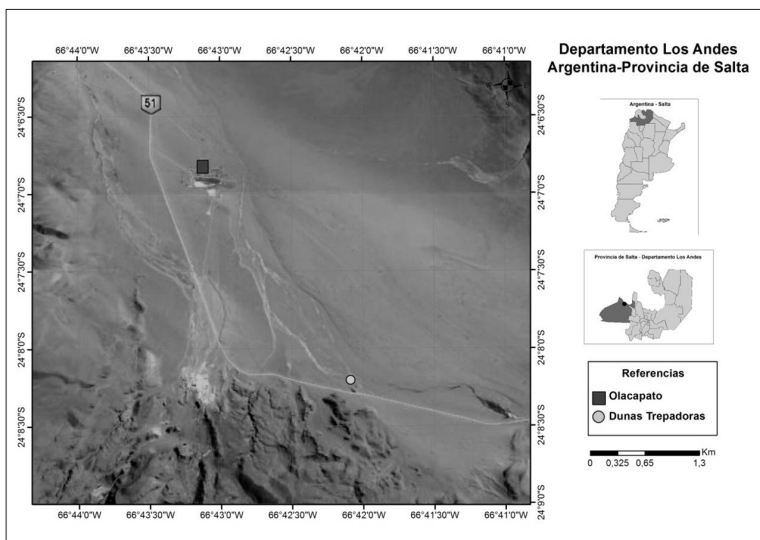


Fig. 1: Localización geográfica del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Las escasas precipitaciones y la intensa heliofanía de la que no se dispone información alguna dan lugar a un balance hídrico regional negativo para todos los meses del año, lo cual incide directamente en la vegetación, resultando reducida, lo que favorece el accionar del viento. La temperatura media mensual fluctúa entre 10,8°C y 1,6°C (Tabla 2).

Con respecto al viento, en la zona de estudio, no existen registros estadísticos por la ausencia de una estación meteorológica. Solo se dispone de información obtenida por indicadores indirectos que demuestran el accionar de este elemento del clima. De acuerdo a lo observado en el lugar de estudio, caracterizado por una depresión topográfica extensa, los vientos predominantes responden al esquema eólico de la Puna, vale decir con dirección W hacia el E, los de mayor velocidad y frecuencia. Los de dirección opuesta, E hacia el W son de menor intensidad y frecuencia. Ambos vientos son de fundamental importancia en todo lo referido a la morfogénesis eólica, fundamentalmente en lo que atañe a la generación y modificación de las dunas trepadoras.

Las dunas de Olacapato están emplazadas en una depresión topográfica situada en la región morfoestructural de la Puna, con una orientación concordante al de dicha unidad dado que, en este caso, la posición es diferente con rumbo SW – NE y de menor desarrollo.

Tabla 1: Precipitación media mensual en mm.

Lugar	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año
Olapapato FCGMB	30	20	4	0	0	1	0	0	0	0	0	9	64

Fuente: Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino (Bianchi y Yáñez, 1992).

Tabla 2: Temperatura media mensual en °C.

Lugar	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año
Olapapato	10.8	10.7	9.9	7.5	4.2	2.2	1.6	3.9	5.9	8.2	9.9	10.6	7.1

Fuente: Profesor Bianchi Alberto, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) EEA Salta.

Las dunas trepadoras están emplazadas sobre un remanente rocoso de ignimbritas pertenecientes a la Formación Tajamar, de edad Terciaria (Blasco et al, 1996), rodeado por depósitos modernos de arenas y gravas de origen fluvial, a partir de los cuales el viento genera diferentes geoformas.

### Método de trabajo

Ante la imposibilidad de realizar un análisis cuantitativo con respecto a la modificación del cuerpo de la duna trepadora mediante el empleo de imágenes satelitales, dadas las dimensiones de dicha geoforma, la metodología empleada fue un enfoque cualitativo con alcances descriptivos. Se realizó un seguimiento en el terreno para observar in situ el comportamiento del viento en diferentes épocas del año y como consecuencia de ello obtener información relacionada a la evolución y o modificación de la geoforma estudiada.

### Morfogénesis del área de estudio

El área de estudio está caracterizada por un macro modelado generado en el pasado, cuando la Puna alcanzó los rasgos que la caracterizan, es decir una serie de cordones montañosos paralelos con rumbo meridional que delimitan extensas depresiones donde se pueden observar salares y salinas debido al escurrimiento endorreico, otra particularidad de la región morfoestructural. A lo mencionado debe añadirse el relieve de origen volcánico que rodea a la depresión donde se encuentran las dunas trepadoras.

Como consecuencia de la condición climática, la morfogénesis actual está caracterizada por una intensa meteorización física, no cuantificada, debida fundamentalmente al termoclastismo y, en menor proporción, al haloclastismo activo en aquellos lugares donde se pueden observar acumulaciones de sales, generalmente en la parte baja de las laderas que se encuentran en contacto con la superficie plana de la depresión, asociada con algún curso fluvial.

El material suelto generado por la meteorización física favorece y facilita la morfogénesis eólica permitiéndole al viento un accionar efectivo y constante, responsable como consecuencia de ello, de geoformas debidas a la erosión y acumulación indistintamente.

La desagregación es responsable de formar los tafoni que se encuentran en la zona donde se emplazan las dunas trepadoras, desarrollados en diferentes rocas granudas de origen ígneo. De acuerdo con lo observado en el remanente rocoso sobre el que se apoyan las dunas trepadoras, los tafoni existentes en este lugar se deben al accionar del termoclastismo exclusivamente, desvirtuando por completo el concepto erróneo de su formación por accionar del viento.

No obstante el reducido volumen de precipitaciones, el agua desempeña un papel importante en la morfogénesis de la zona mediante la erosión debida al escurrimiento concentrado, responsable del desplazamiento de material suelto hacia los niveles inferiores, permitiéndole a posteriori al viento su traslado hacia otros sectores donde genera diferentes geoformas.

La actividad fluvial está limitada al período de lluvias, cuando las mismas aportan como consecuencia de su torrencialidad un volumen importante de agua permitiendo de esa manera el transporte de sedimentos hacia los niveles inferiores en dirección a las cuencas endorreicas de las cuales forman parte. El sistema fluvial, no obstante lo expresado, al desplazar materiales finos hacia lugares más expuestos al accionar del viento, desempeña en consecuencia un rol importante en la morfogénesis eólica.

Debido al escaso volumen de precipitaciones los diferentes cursos fluviales de la zona permanecen la mayor parte del año con sus cauces sin agua, totalmente secos, otro elemento o factor que facilita el accionar del viento en toda el área de estudio.

La remoción en masa está representada fundamentalmente por la caída de bloques y o detritos en su mayor parte, con menor incidencia o importancia en lo que se refiere a los desplazamientos de materiales y la morfogénesis del área, se observaron muy pocas evidencias de deslizamientos.

## Morfogénesis eólica

Atento a la importancia que tiene el viento como responsable en la evolución y modificación del relieve, al generar diferentes geoformas en general y, en particular, las dunas trepadoras que se encuentran a escasos kilómetros de Olacapato, amerita un análisis específico y detallado fundamentalmente en lo referido a dichas acumulaciones, de las cuales no se dispone mucha información ni documentación por ser las menos estudiadas.

Las dunas trepadoras de Olacapato apoyadas sobre ambos flancos del relieve positivo residual y aislado que se encuentra en el lugar mencionado (Km 211 de la ruta nacional 51) no presentan sus correspondientes contrapartes de dunas descendentes, *falling dune* según la denominación original en inglés (Cooke y Warren, 1975). La presencia de dos vientos con direcciones encontradas impide a la arena superar la barrera orográfica y a partir de ello generar las dunas descendentes.

Entre el frente de avance de la duna, con orientación perpendicular al viento y la parte más alta del relieve positivo se aprecia una franja del mismo sin acumulación alguna de arena en ambos flancos (Fig. 2) debido a la turbulencia que genera en el flujo laminar del mismo. El obstáculo orográfico impide a la arena no solo superar la barrera orográfica y generar la duna descendente sino que también provoca una selección del material que constituye dicha geoforma, traducido ello en la eliminación de las fracciones mediana y fina, dejando de esa manera una franja de granos gruesos y dando lugar a una cubierta continua que impide el efecto de la ablación eólica, generando así una situación particular que requirió de un monitoreo sistemático y continuo para interpretar a que se debe y como se llegó a la misma.

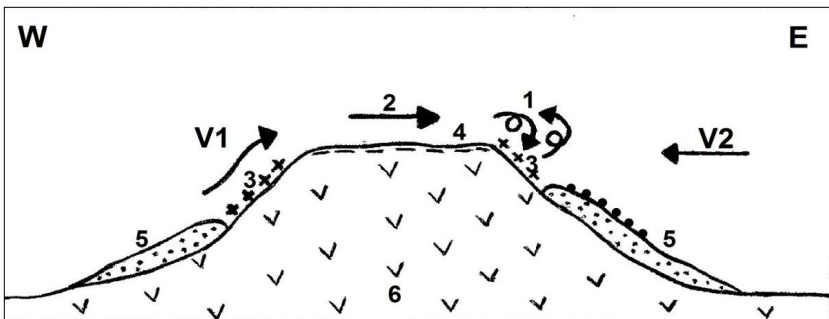


Fig. 2: Morfogénesis eólica del área de estudio. V1, V2 y 2: dirección del viento con régimen laminar, 1: viento con turbulencia, 3: superficie sin acumulación de arena, 4: superficie pulida por abrasión, 5: duna trepadora, 6: remanente rocoso de ignimbritas.

La morfogénesis eólica en este lugar muestra una marcada asimetría no solo en lo que se refiere a las dunas trepadoras sino también a otras formas de acumulación que se observan en las proximidades.

En primer lugar las dunas trepadoras logran un mejor y mayor desarrollo en el flanco oriental del afloramiento rocoso sobre el cual se apoyan, notándose todo lo contrario en la ladera opuesta con orientación NW – SE donde la potencia o fuerza del viento (V1) de la Fig. 3, desplaza la mayor parte del material suelto, acumulándose un volumen menor en la parte inferior del afloramiento.

En contraposición en esta parte del área estudiada se observa un intenso campo de nebkhas, cuya orientación es concordante con la del viento predominante. En el flanco opuesto, con frente hacia el E, la situación es completamente diferente, no se observan nebkhas y sí dunas trepadoras. Dicha asimetría observada se debe a dos factores, por un lado, el viento con diferentes direcciones que incide en el lugar y por otro, la presencia de vegetación.

Donde la vegetación nativa no fue eliminada se forman las nebkhas (Fig. 4) y la duna trepadora es de menor desarrollo. En contraposición, cuando la superficie del terreno se encuentra totalmente antropizada y, como consecuencia de ello no se observa vegetación, la ausencia de la primera forma de acumulación es total y también un buen desarrollo de la geoforma eólica mayor (Fig. 3).

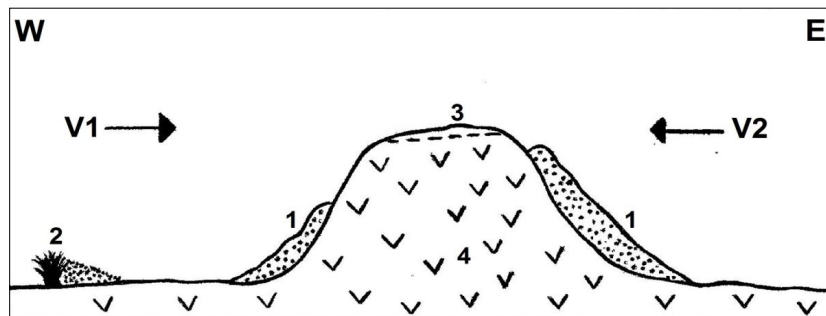


Fig.3: Dunas trepadoras y nebkhas. V1 y V2: dirección del viento, 1: duna trepadora, 2: nebkhas, 3: superficie pulida por abrasión, 4: remanente rocoso de ignimbritas.

Debido a la falta de información sobre el comportamiento del viento se corroboró *in situ* mediante las evidencias que proporcionan las rizaduras u óndulas desarrolladas sobre la superficie de los cuerpos de arena (Fig. 5 y 6) como así también la orientación de una duna emplazada sobre la ruta nacional 51 (Fig. 7) que dicho elemento del clima



Fig. 4: Fotografía del campo de nebkhas



Fig.5: Cuerpo de dunas trepadoras (derecha).

incide, en determinados momentos, sobre la superficie con una dirección opuesta aunque con menor frecuencia, energía y rumbo N - S. No obstante la menor importancia del viento, esto último incide en la dinámica y desarrollo de las dunas, fundamentalmente impidiéndole a las trepadoras que muestren un frente de avance escarpado o con mayor inclinación al que se observa *in situ*.





Fig. 6: Microondulas o rizaduras en la superficie de la duna.



Fig. 7: Fotografía de una duna emplazada sobre la ruta nacional 51.

Con respecto a las características del material que conforman las dunas, del análisis microscópico realizado se comprobó que las mismas están conformadas por granos caracterizados por un bajo grado de redondeamiento, subangulosos en menor proporción y angulosos en abundancia, predominando los de cuarzo, fragmentos líticos (líticos) correspondientes a rocas ígneas que son las predominantes en la zona.

El escaso redondeamiento y angulosidad de los granos que forman las dunas demuestran el origen y una meteorización física con poco transporte, por lo que no evidencian desgaste. En cuanto a la granulometría se nota una clara diferencia entre la parte basal de la duna trepadora, donde se observa un mayor porcentaje de arena mediana y, en la superior, fina con la cubierta mencionada correspondiente a granos medios en la superficie cubriendo los de menor granulometría, en neta concordancia con una clásica selección eólica característica de estas geoformas.

No obstante tratarse de una geoforma generada por abrasión debida al material que desplaza el viento al encontrarse con el afloramiento rocoso donde se emplaza la duna trepadora, resulta conveniente mencionar la presencia del micromodelado denominado flute o estriado (Abrahams y Parsons, 1994), desarrollado en la parte alta del relieve positivo y en lo que constituye el interfluvio o espacio inter laderas (Fig. 8).

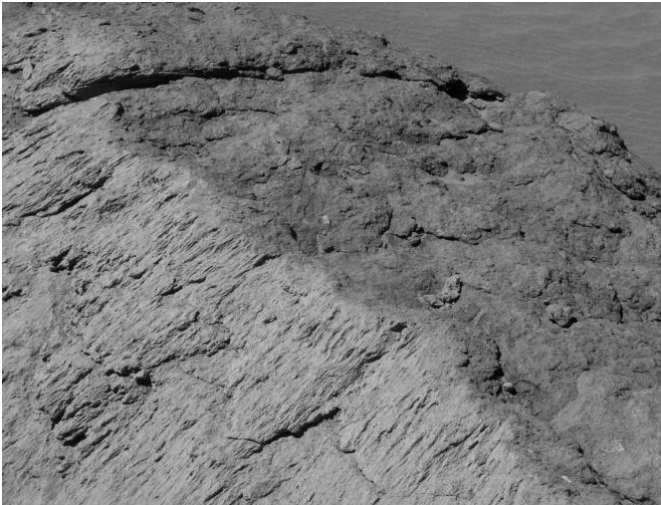


Fig. 8: Micromodelado de la parte alta del relieve positivo.

Es notoria la asimetría existente con respecto a dicho micromodelado, dado que se lo observa solamente en el flanco occidental y en la transición con el oriental. Ello es debido a dos factores: en primer lugar la mayor energía del viento que proviene del W y, por lo tanto, con más capacidad erosiva a causa del desplazamiento de arena, lo que genera un efecto abrasivo y pulido sobre la superficie de la roca dando lugar de esa forma al desarrollo del microrelieve flute. Otro factor de importancia que contribuye a la formación de flute, es la pendiente del relieve caracterizada en este caso por ser un interfluvio prácticamente horizontal, lo cual facilita el trabajo abrasivo del viento.

## Conclusiones

- Las dunas estudiadas corresponden a las denominadas trepadoras, no se observan las complementarias o descendentes porque el accionar de vientos contrarios no lo permite.
- La presencia de nebkhas únicamente hacia el W del relieve positivo se debe al accionar del viento con mayor energía y la presencia de vegetación.
- El frente de avance y ascenso de la duna trepadora es normal o perpendicular a la dirección de ambos vientos responsables de la morfogénesis eólica en el lugar de estudio.
- Las dunas trepadoras en ambos flancos conforman diferentes cuerpos de arena con diferentes alturas en sus frentes debido ello a las particularidades topográficas del relieve positivo.
- Existe una inter relación directa entre el relieve positivo, la presencia de vegetación y la dirección del viento para el desarrollo de una u otra forma de duna.
- El diseño de la duna trepadora cercana a Olacapato no concuerda con lo observado en otros cuerpos demostrando una vez más la necesidad de una sistemática específica para diferenciarlas.
- Como consecuencia de las direcciones encontradas y diferentes de los vientos se observan distintas formas de acumulación de arena, con orientación en concordancia a la componente eólica.

## Referencias

- Abrahams, A. D., Parsons, A.J. (1994). *Geomorphology of Desert Environments*. Ed. Chapman y Hall. 674 pp.
- Bianchi, A.R. (1981). *Las precipitaciones en el Noroeste Argentino*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Bianchi, A.R., Yañez, C.E. (1992). *Las precipitaciones en el Noroeste Argentino*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Blasco, G., Zappettini, E., Hongn, F. (1996). Hoja Geológica 2566-I, San Antonio de los Cobres (Provincias de Salta y Jujuy). Subsecretaría de Minería de la Nación, boletín N° 217.
- Cooke, R., Warren, A. (1975). *Geomorphology in Deserts*. Ed. Batsford. London. 394pp.
- Paoli, H.P. (2003). *Aprovechamiento de los Recursos Hídricos y Tecnología de Riego en el Altiplano Argentino*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA), Salta.

Pye, K., Tsoar, H. (1990). *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Ed. Unwin Hyman. London. 396pp.

Thomas, D.S.G. (1997). *Arid Zone Geomorphology: Process, form and Change in Drylands*. Ed. John Wiley .713 pp.