

Geomorfología y geopatrimonio del Mar de Dunas de Atacama, Copiapó (27° S), Chile¹

Consuelo Castro Avaria², Álvaro Zúñiga Donoso³
y Carlos Pattillo Barrientos⁴

RESUMEN

En el sur del desierto de Atacama se halla un conjunto de seis campos dunarios intermontanos con tipologías complejas de dunas desérticas activas, semiactivas y estabilizadas; además del cerro Medanoso donde las dunas activas alcanzan 1.643 metros de altitud. El conjunto de dunas denominado Mar de Dunas de Atacama cubre una superficie de 335 km². La singularidad de las formas dunarias desérticas y su gran volumen constituyen un conjunto escénico-paisajístico notable, de relevancia regional y nacional, localizado en las cercanías de la ciudad de Copiapó (27° S). Además, la masa de arenas de las dunas es una herencia de condiciones morfoclimáticas pasadas, de allí su importancia científica. El estudio geomorfológico del Mar de Dunas, su clasificación tipológica y cartografía, junto a su descripción y análisis, son los fundamentos científicos que aquí se exponen como base para promover la protección y el uso sostenible de las dunas, que son parte del geopatrimonio de la Región de Atacama.

Palabras clave: Mar de Dunas, geopatrimonio, dunas desérticas.

ABSTRACT

In the south of the Atacama desert it is located an Aeolian Sand Sea Dunes that is composed by six intermountain dune fields with complex typology of active, semi-active, and stable desert dunes; plus cerro Medanoso, where active dunes reach 1,643 meters of altitude. The uniqueness of desert dune forms and their large volume constitute a remarkable scenic landscape, of regional and national relevance, in the neighbourhoods of Copiapó (27° S). Besides this, the mass of sand in the dunes is an heritage that comes from morphoclimatic conditions from the past, hence their scientific relevance. The typological classification, description, and analysis of the Sand Sea, plus detailed cartography, all of them results from this research, constitute a scientific foundations base to promote protection, and sustainable use of the Sand Sea, and Atacama's geoheritage.

Key words: Sand sea, geoheritage, desert dunes

¹ Proyecto FONDECYT N°1100400. Los autores agradecen a Francisco Chirino y Jorge Espinoza de la Oficina de Planificación Territorial del Gobierno Regional de Atacama, quienes participaron activamente en actividades de terreno, organización de talleres y reuniones de trabajo en Copiapó y Caldera. Asimismo, a la Asociación de Raidistas de Atacama y al señor Patricio Ríos por su apoyo logístico para

acceder y recorrer el Mar de Dunas. Artículo recibido el 7 de agosto de 2012, aceptado el 30 de julio de 2012 y corregido el 26 de septiembre de 2012.

² Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile). E-mail: consuelo@uc.cl

³ Geógrafo (Chile). E-mail: azunigdo@uc.cl

⁴ Ingeniero Civil (Chile). E-mail: carlos.pattillo@gmail.com

Se presentan los resultados de una investigación sobre la geomorfología del Mar de Dunas de Atacama, en la que se establece un inventario, descripción y clasificación geomorfológica de las dunas, además de un análisis de su organización espacial, expresado en cartografía de detalle. La definición de la originalidad geomorfológico-paisajística de las dunas, además de su relevancia natural y científica, permiten fundamentar su protección y uso sostenible como recurso y componente singular del geopatrimonio de la Región de Atacama (Figura N°1).

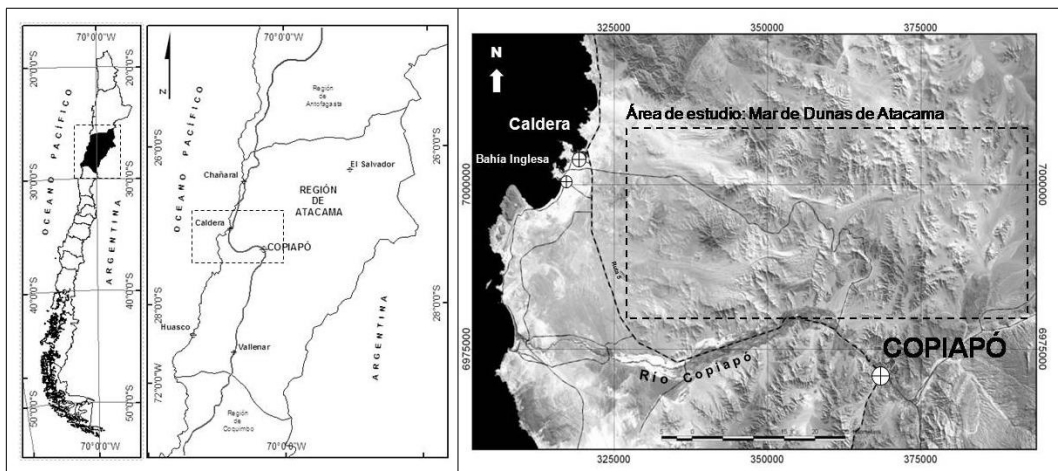
Además, para las propuestas de ordenación territorial de Atacama, la inclusión de los factores geomorfológicos, junto a otras variables de carácter espacial, es fundamental para la puesta en valor del Mar de Dunas a través de una zonificación según su potencial y fragilidad para acoger actividades y usos humanos diversos. En efecto, las dunas continentales de Atacama constituyen un recurso natural en cuyo entorno se generan actividades económicas, socioculturales y recreativas susceptibles de incluirse en los procesos de planificación orientados al desarrollo de la III Región. En dicho contexto, los resultados que aquí se presentan, proporcionan una base científica integrada para la valoración de las dunas como recurso geopatrimonial y

componentes únicos e irremplazables del desierto chileno.

Es preciso señalar que los fundamentos teóricos sobre la importancia geopatrimonial de las dunas de Atacama, implícitos en esta investigación, se insertan en el marco del programa de Geositios y Geoparques de UNESCO, 1999. Asimismo, la proposición del Mar de Dunas como geositio forma parte de una iniciativa de los autores para promover la creación de un geoparque en la zona costera de Atacama. En efecto, en el sur del desierto de Atacama hay otros reconocidos elementos del patrimonio natural y cultural como son playas vírgenes, formaciones geológicas multicolores, campos de tafonis, el santuario de la naturaleza granito orbicular, una gran diversidad de fósiles, y cada cierto tiempo el fenómeno del desierto florido, como lo han destacado.

La vasta extensión de las dunas continentales de Copiapó conforma un mar de arenas correspondiente a un *erg*, término utilizado para denominar una superficie cubierta por arena que cubre como mínimo un área de 125 km cuadrados (Fryberger & Dean, 1979), y cuyas circunstancias esenciales de formación son la existencia de grandes suministros

Figura N°1
Mapa de localización del Mar de Dunas de Atacama



Fuente: Elaboración propia en base a imagen Landsat.

de arena, condiciones climáticas y topográficas adecuadas y suficiente energía del viento.

Es preciso decir que en este artículo se exponen datos científicos sistemáticos e integrados del Mar de Dunas y su entorno, con el fin de apoyar iniciativas de valoración y ordenación territorial. Las valiosas investigaciones previas de otros autores, son específicas y han aportado información esencial para explicar el origen, edad y procesos de formación de las dunas.

Así, la importancia científica de las dunas continentales de Atacama, radica en sus formas originales de grandes dimensiones que no tienen una fuente actual de alimentación de arenas, sino que su masa arenosa fue heredada de condiciones paleográficas diferentes de las actuales (Paskoff *et al.*, 2003: 2), de allí su carácter de dunas remanentes que representan un tesoro morfogenético o *Formenschatz*, según la acepción de Mortensen (1927: 2), refrendada por Araya (2001). También, el Mar de Dunas es un lugar destacado donde ocurre el desierto florido en los años de eventos El Niño-Oscilación del Sur (Castro *et al.*, 2011a: 52).

En sus investigaciones, Araya (2001: 62) señala que las dunas se presentan en sucesiones de formas que representan las distintas etapas evolutivas que dieron origen a su instalación. Por su parte, el estudio petrográfico y sedimentológico de las arenas, efectuado por Paskoff *et al.* (2003: 6), determina que las dunas se originaron a partir de formaciones detríticas acumuladas en el Neógeno cerca de las orillas y desembocadura del río Copiapó y de las quebradas La Higuera y Chorrillos, localizadas más al norte.

Si bien las dunas se formaron próximas a la orilla litoral, su composición mineralógica es diferente a aquella de las dunas costeras cercanas, las que poseen un alto porcentaje de carbonato de calcio proveniente de los depósitos sedimentarios de las terrazas marinas (Paskoff *et al.*, 2003: 7). Las arenas de origen fluvial de las dunas continentales fueron transportadas tierra adentro por el viento, a través de corredores transversales y valles interiores de la cordillera costera, hasta una distancia aproximada de 60 kilómetros de la costa. Aquí, las dunas culminan en el cerro

Medanoso, donde las dunas activas alcanzan 1.643 metros de altitud (Paskoff *et al.*, 2003: 1).

Finalmente, en las cartas geológicas de Caldera y Copiapó, realizadas por Godoy *et al.* (2003), respectivamente, se representan las áreas con arenas dunarias tanto en depresiones, como llanuras y altos topográficos, como el cerro Medanoso. Dichos autores señalan el origen eólico de los depósitos generalmente activos y compuestos por dunas lineales, depósitos mantiformes y campos de dunas parabólicas, en sucesiones de crestas, filos y familias de formas del Holoceno y Pleistoceno.

Materiales y Métodos

Desde el punto de vista metodológico, el empleo de las técnicas de percepción remota aplicada ha sido muy relevante para el estudio espacial y geomorfológico de las dunas, porque permite una mejor comprensión de la estructura y disposición de los vastos mares de arena. Ya desde la década del setenta, autores como Fryberger & Dean (1979), Breed & Grow (1979) destacaron su utilidad para clasificar las dunas en diferentes categorías, determinar su distribución y propiedades morfométricas junto a correlaciones entre largo, ancho, diámetro y longitud de onda.

Posteriormente, los trabajos de Ewing & Kocurek (2010) ratifican las ventajas de la percepción remota para identificar los procesos dinámicos y la organización interna de complejos *ergs*. Por su parte, los autores del presente artículo han aplicado previamente dichas herramientas de análisis multispectral en dunas costeras de Chile centro-norte, utilizando imágenes *Landsat*, Castro y Pattillo (1997); y también en la bahía de Tongoy en la IV Región, efectuando mediciones de radiometría de campo para determinar las curvas espectrales características de playas, mantos de arena y dunas costeras, Castro y Pattillo (1997).

Del mismo modo, para el estudio y análisis del Mar de Dunas, se estableció una base de datos geomorfológicos y de la cobertura vegetal, con apoyo de percepción remota aérea y espacial para el levantamiento de los datos.

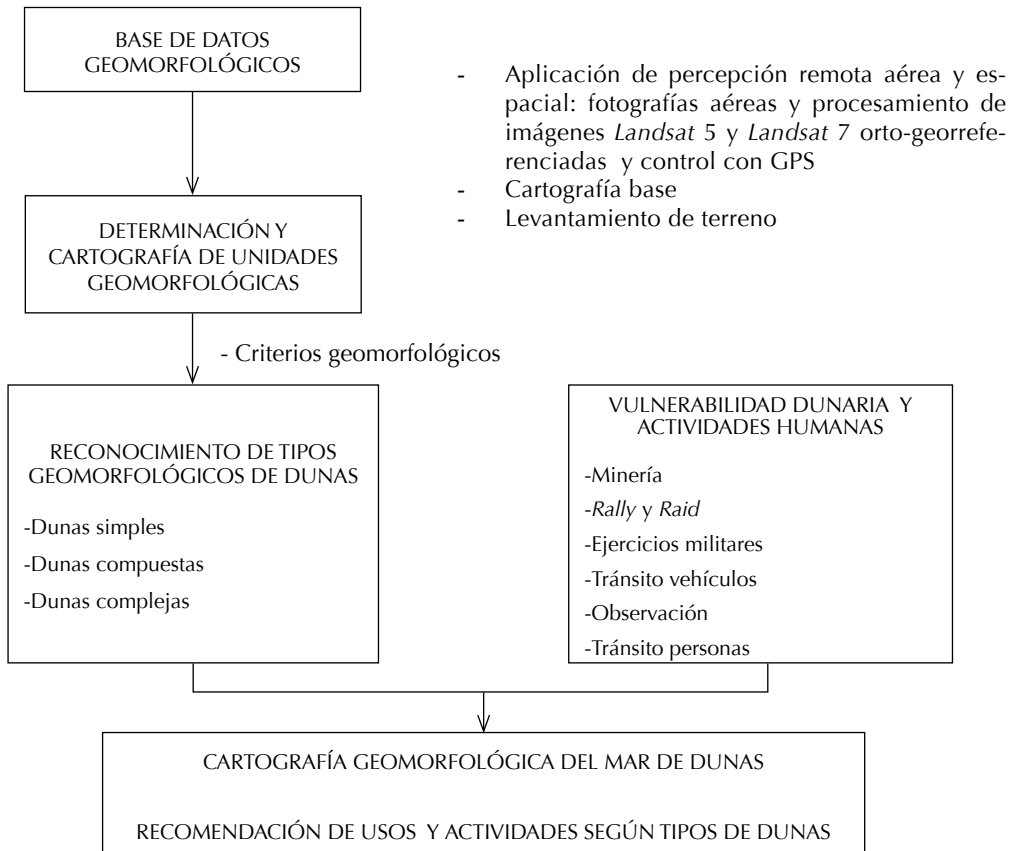
Primeramente, se efectuó un proceso de ortogeoreferencia controlado con mediciones con GPS; posteriormente, se procesaron y analizaron fotografías aéreas e imágenes de satélite tanto en lo que concierne a la descripción del área de estudio en sus aspectos estáticos; como a los aspectos cinemáticos de su evolución.

Se utilizaron imágenes de alta resolución del *Landsat 5* y *Landsat 7* con sus sensores TM y ETM, además de imágenes *Google Earth* del año 2003 al 2011. Para georeferenciar las fotografías aéreas e imágenes *Landsat*, se generó un Modelo Digital de Elevación y puntos de control obtenidos con GPS. Dichas fotografías e imágenes se utilizaron para efectuar la caracterización geomorfológica de las dunas; la determinación de sus límites o bordes; la dirección de lineamientos y orien-

tación de sus crestas; la estructura interna del campo dunario y, ocasionalmente, la dinámica de procesos naturales; además de los aspectos morfoestructurales de las serranías y valles donde se emplazan las dunas.

El análisis e interpretación geomorfológico se complementó con levantamientos de los siguientes datos en terreno: a) recorridos del área de estudio con GPS y puntos cada un segundo; b) muestreo de arenas y de las diferentes formaciones superficiales; c) muestreo y distribución de la cubierta vegetal; d) medición de radiometría de campo para el estudio de firmas espectrales e interpretación digital de las imágenes; e) análisis de imágenes *Google Earth*. Realizando los procedimientos anteriores, se elaboró una cartografía de unidades geomorfológicas y se delimitaron los márgenes del Mar de Dunas. Posterior-

Figura N° 2
Flujo metodológico



Fuente: Elaboración propia.

mente, utilizando criterios de clasificación geomorfológica de dunas, se establecieron las diferentes tipologías presentes en el Mar de Dunas. Finalmente, se analizaron los impactos que ocasionan los diferentes usos y actividades en relación a las características de cada tipología de dunas (Figura N° 2).

Condiciones climáticas y geográficas del Mar de Dunas de Atacama

El extremo sur del desierto de Atacama, según el clásico estudio de Mortensen (1927: 1) corresponde a un desierto marginal en que la morfodinámica se manifiesta por las acciones conjuntas del viento y el agua, como principales agentes exógenos actuantes.

En el área de emplazamiento de las dunas impera un clima desértico con nublados abundantes y régimen oceánico que determina una oscilación térmica diaria moderada y un promedio anual de temperatura de 15,5° C; las condiciones de aridez están determinadas por el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur y la corriente fría de Humboldt.

En la estación costera de Caldera se registra un promedio anual de 32 mm y en Copiapó es menor a 30 mm, lo que ratifica que las lluvias son mínimas. No obstante, en el área ocurren lluvias ocasionales relacionadas con eventos de El Niño-Oscilación del Sur, elevando considerablemente los promedios anuales de lluvia en dichos años (Cuadro N° 1).

Cuadro N° 1
Lluvia anual (mm), Estación Copiapó-Chamonte (27°18' S/ 70°25' O)

Año	mm	Año	mm
1970	3	1984	27,3
1971	0	1985	3,5
1972	s/i	1986	9,8
1973	7,5	1987	60,6
1974	3	1988	1,9
1975	2,5	1989	16,5
1976	3,1	1990	s/i
1977	11,7	1991	59,2
1978	0	1992	38,7
1979	s/i	1993	0
1980	29,3	1994	0
1981	5	1995	0
1982	0,5	1996	0
1983	42,6	1997	138,6

Fuente: Dirección Meteorológica de Chile.

Las lluvias esporádicas se concentran en breves períodos de tiempo, habiéndose registrado intensidades de hasta 40 mm en 24 horas; dicho monto es el valor umbral de las lluvias críticas que activan deslizamientos y remociones en masa en Caldera y Copiapó, como lo señala Castro *et al.* (2010: 35). Una consecuencia relevante de la ocurrencia de

Cuadro N° 2
Dirección (frecuencia) y velocidad media del viento. Estación Copiapó-Chamonte (27°18' S/ 70°25' O)

Dirección	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Frecuencia (%)	1	2	3	2	1	7	82	2
Velocidad media (m/s)	2,1	2,5	2,6	2,5	2,5	5,0	5,3	2,4

Fuente: Dirección Meteorológica de Chile.

las lluvias ocasionales, es que ellas provocan la germinación espontánea del desierto florido en los mantos de arenas eólicas localizados en los márgenes de los campos dunarios, por debajo de los 500 metros de altitud.

Basándose en los registros de dirección de vientos de la Dirección Meteorológica de Chile, es posible señalar que el 82% de los vientos predominantes provienen del Oeste y un 7% del Suroeste (Cuadro N° 2); en tanto, la velocidad media anual del viento es de 3,7 m/s, habiendo registros de máximas cercanas a los 15 m/s. Esto último es consistente con valores de velocidad del viento de hasta 16 m/s medidos en terreno, en los sitios más elevados de los campos de dunas, en las cumbres y en portezuelos; en dichos lugares el viento modela y mantiene activas las dunas de grandes dimensiones, las cuales tienden a mantenerse en el sitio más que a trasladarse hacia el interior de las tierras.

La cordillera de la Costa a la latitud de Copiapó se encuentra a unos 20 kilómetros del borde costero y la conforman serranías de dirección Este-Oeste cuyas principales elevaciones promedian los 1.000 metros de altitud;

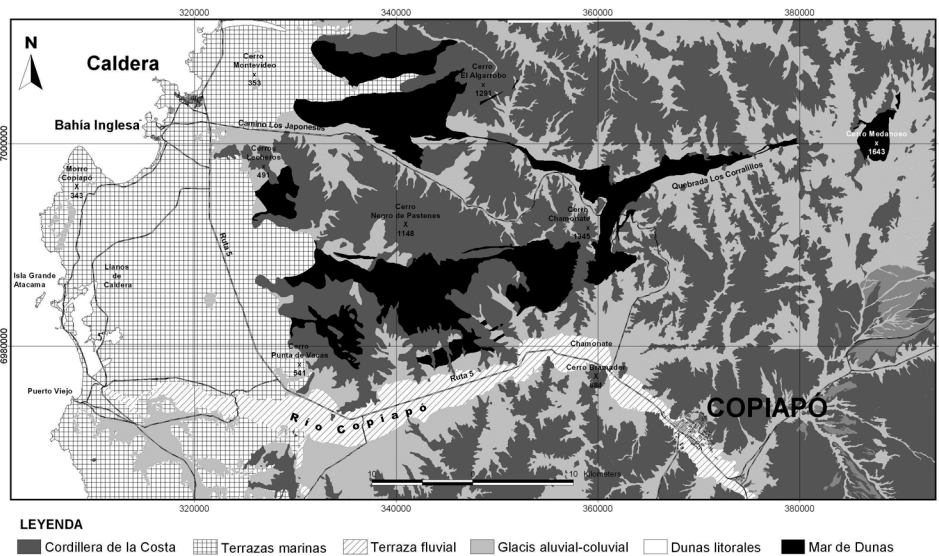
junto a quebradas y amplias cuencas ocupadas por las dunas desérticas (Figura N° 3).

La zona costera de esta región de Chile, se caracteriza por la existencia de amplias terrazas marinas, escalonadas y muy bien conservadas, las cuales se sitúan entre los 0 y 200 metros sobre el nivel del mar actual (Quezada *et al.*, 2007: 2), (Figura N° 3).

Dichas terrazas están labradas en areniscas marinas del Mioceno-Plioceno de la formación Bahía Inglesa y los estratos de Caldera (Godoy, 2003: 16, 19), en superficie las terrazas tienen cubiertas de dunas litorales, de mantos de arenas eólicas y también, de pavimentos desérticos. Los vestigios de antiguas líneas de playas y cordones litorales sobre las terrazas marinas actuales, son también observables en las imágenes del área, al igual que los depósitos fluviales en los márgenes del río Copiapó (Marquardt, 1999:33), (Figura N° 3).

La vasta extensión de las dunas continentales de Copiapó cubre un área de 335 kilómetros cuadrados, conformando un mar de arenas o *erg* según la terminología geomorfológica de los desiertos. La morfología

Figura N° 3
Unidades geomorfológicas de la zona costera de Atacama (simplificado)



Fuente: Elaboración propia en base a imágenes satelitales, fotos aéreas y cartas geológicas.

y disposición de las dunas está condicionada por la topografía de valles y cerros subyacentes, por lo que se originan variadas formas complejas que responden a la dinámica del viento predominante y los sistemas de circulación locales.

Geomorfología del Mar de Dunas

Las dunas continentales de Atacama se localizan al noroeste de Copiapó, entre 300 y 1.600 metros de altitud. Según se observa en la Figura N° 4, el mar de dunas es un conjunto de seis campos de dunas continentales tipo *erg*, localizadas en las serranías y cuencas de la cordillera de la Costa. Las dunas cubren parte de las terrazas marinas más altas, glaciais, laderas y también se disponen cubriendo los rellenos aluviales y coluviales de valles y quebradas locales.

Los vientos predominantes del cuadrante suroeste (Cuadro N° 4) tienen una distribución muy compleja debido a la influencia de la configuración montañosa del relieve donde se localizan las dunas. A escala general de análisis, las crestas principales de los conjuntos de dunas activas se organizan perpendiculares a la dirección del viento suroeste y lo mismo ocurre con los grupos de dunas de menores dimensiones que resultan de la removilización actual de arenas.

En su conjunto, el Mar de Dunas está formado por sucesiones de familias de dunas entramadas del tipo transversal barjanoide, las que pueden ser semiactivas y/o estabilizadas cuando se localizan en altitudes que varían entre los 500 y los 800 metros, ocupando valles y cuencas intermontanas. La cubierta vegetal que estabiliza las dunas es xerofítica de baja densidad, con predominio del género *Tillandsia*, especie bromeliácea que se instala en sectores hasta donde llega la influencia de la niebla costera (Castro *et al.*, 2012, inédito); (Castro *et al.*, 2011a); (Castro *et al.*, 2011b).

Por sobre los 800 metros de altitud, las dunas son activas y sin vegetación; ellas se encuentran confinadas por el relieve de las serranías ocupando laderas y cumbres en amplias cuencas de 6 a 8 kilómetros de ancho.

Los distintos campos dunarios se enlazan a través de dunas lineales complejas que corresponden a cordones arenosos activos que ascienden y descienden por las laderas, conectando las cuencas intermontanas; estas expansiones de arenas eólicas generan derrames hacia los valles formando muros de hasta 400 metros de altura.

Las dunas activas alcanzan su mayor altitud en el cerro Medanoso, donde el relieve está sepultado bajo mantos de arena y dunas activas ascendentes y descendentes en sus laderas. Por efecto de flujos encontrados del viento, se originan en este sitio singulares dunas tipo estrella, piramidales y otras de gran volumen y atractivo escénico (Cuadro N° 3).

Para denominar los diferentes campos de dunas es práctico considerar su posición relativa dentro de la cuenca donde se localizan, esto es norte y sur, y también su altura; este criterio utilizó Araya (2001: 29), y en el presente estudio se propone una denominación similar para identificar los seis campos de dunas definidos (Figura N° 4).

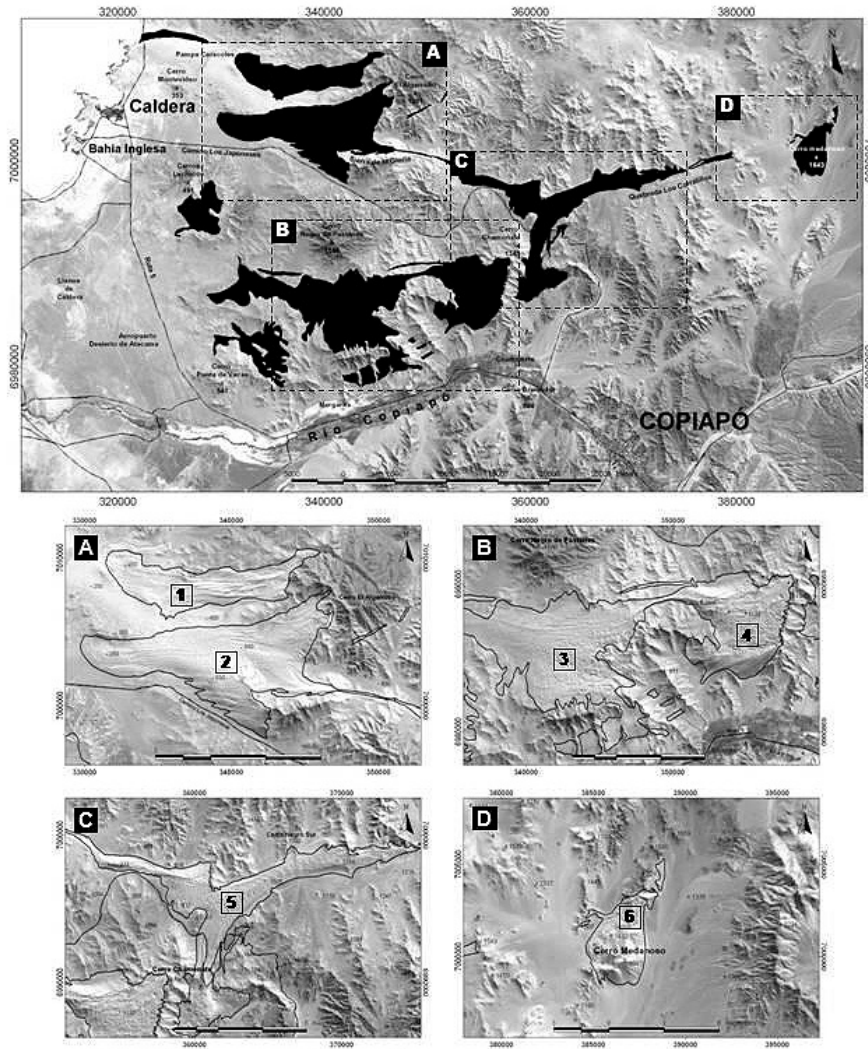
Clasificación morfológica del Mar de Dunas

De acuerdo a criterios geomorfológicos, se estableció una clasificación y una cartografía de los tipos dunarios reconocidos, según se observa en el Cuadro N° 3 y las Figuras N° 5, N° 6 y N° 7, respectivamente. Los tipos de dunas desérticas continentales del Mar de Dunas son:

A) Formas simples, las que corresponden a dunas libres activas, con escasos frentes de deslizamiento. Se localizan en las superficies horizontales y subhorizontales de los glaciais y las terrazas marinas, también en laderas y cumbres de las serranías costeras. Estas formas representan el 51% del total de los tipos reconocidos (Cuadro N° 3 y Figura N° 5).

B) Formas compuestas de agrupación, corresponden a dunas activas y semiactivas de un tipo morfológico de grandes dimensiones, hasta 700 metros de largo, sobre las cuales se sobreponen dunas del mismo tipo más pequeñas, en torno a 50 metros de largo, en que el tipo y orientación del frente de

Figura N° 4
Distribución espacial del Mar de Dunas de Atacama



Mar de Dunas	Superficie (km ²)	Altitud (msnm)	Localización
1. Mar de Dunas bajo norte	29,73	300 a 1000	Valles y cuencas costeras, terrazas marinas altas
2. Mar de Dunas bajo central	64,67	200 a 900	Valles y cuencas costeras, terrazas marinas altas
3. Mar de Dunas bajo sur	67,61	300 a 900	Valles y cuencas costeras, terrazas marinas altas
4. Mar de Dunas medio norte	50,66	600 a 1300	Valles intermontanos, glacis, fondos de valles, laderas
5. Mar de Dunas alto	38,36	800 a 1200	Cuencas intermontanas, valles intermontanos
6. Cerro Medanos	11,94	1200 a 1643	Glacis, laderas

Fuente: Elaboración propia en base a imagen *Landsat*.

Cuadro N° 3
Clasificación geomorfológica de los tipos de dunas de Atacama

Tipos de dunas	Morfología	Superficie		Estado	Dirección del viento	Localización (posición y topografía)
		(km ²)	%			
A) Formas simples	A.1. Barjanas	0,19	0,06	Activas	Unidireccional	-laderas -glacis
	A.2. En estrella	21,15	6,81	Activas	Bidireccional y multidireccional	-glacis -laderas -cumbres
	A.3. Transversales	74,17	23,87	Estabilizadas Semiestables Activas	Unidireccional	-terrazas marinas -glacis
	A.4. Piramidal	0,83	0,27	Activas	Multidireccional	-glacis
	A.5. Lineales	60,85	19,58	Activas	Unidireccional	-glacis -laderas -cumbres
B) Formas compuestas	B.1. Lineales compuestas	47,84	14,13	Activas	Unidireccional	-terrazas marinas -glacis -laderas -cumbres
	B.2 Transversales compuestas	13,40	4,31	Activas	Unidireccional	-glacis -fondo de valle -laderas
C) Formas complejas	C.1 Barjanoides coalescentes	12,63	4,06	Semiactivas Activas	Multidireccional	-laderas
	C.2 Transverso barjanoide	65,88	20,67	Semiactivas	Multidireccional	-laderas -fondo de valle
	C.2 Lineales complejas	13,79	6,23	Semiactivas Activas	Multidireccional	-laderas -fondo de valle

Fuente: Castro *et al.*, 2011a; Castro *et al.*, 2011b.

deslizamiento son similares (Figura N° 6). Se emplazan sobre las superficies horizontales y subhorizontales de glacis y terrazas marinas, también en laderas y cumbres de las serranías costeras, fondos de los valles y cuencas intermontanas. Las dunas compuestas representan el 18% del total de los tipos reconocidos (Cuadro N° 3 y Figura N° 6).

C) Formas complejas de agrupación, donde existen combinaciones de dos o más tipos

de dunas coalescentes y sobrepuestas; hay dunas activas y también semiactivas, según estén provistas de cubierta vegetal o no. Este tipo de dunas se encuentra en los fondos de valles y también formando conjuntos de cordones arenosos que ascienden y descienden por las laderas de las serranías. Dichas formas complejas agrupadas, corresponden al 31% del total de los tipos reconocidos en el Mar de Dunas (Cuadro N° 3 y Figura N° 7).

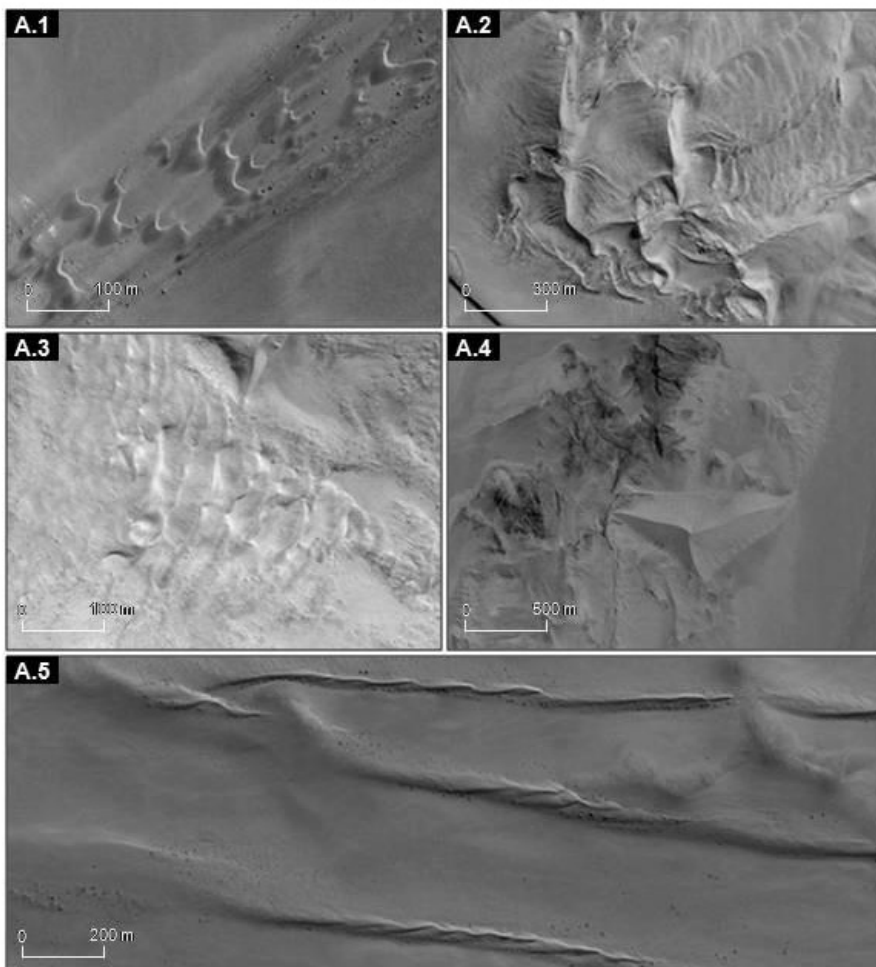
Vulnerabilidad natural de dunas y actividades humanas

La determinación de los rasgos geomorfológicos del mar de dunas, junto a la clasificación, catastro y cartografía de los tipos de dunas aquí expuestos, constituyen la base científica necesaria para determinar la capacidad relativa del Mar de Dunas para acoger diferentes actividades humanas. Con ello, se dispone de criterios objetivos para efectuar una propuesta de zonificación en unidades territoriales, según la vulnerabilidad natural de los diferentes tipos de dunas; así, desde el punto de vista de la gestión de dunas, se debe

considerar que son sistemas vulnerables. Se denomina vulnerabilidad natural de un campo dunario a las condiciones que provocan erosión acelerada, decaimiento del ecosistema y estado avanzado de degradación con transformación y/o pérdida de las formas dunarias (Castro, 2004: 2).

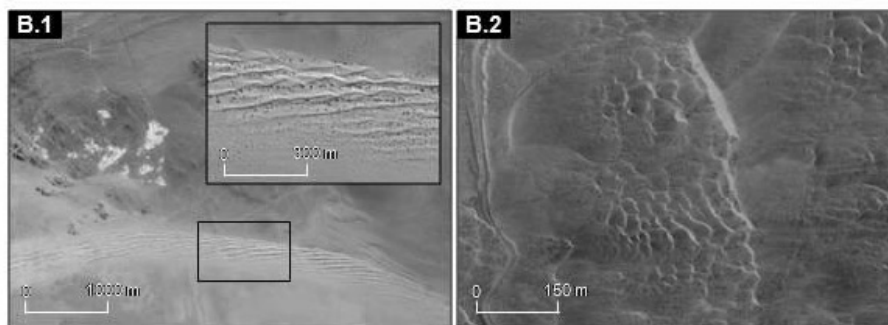
Las diversas actividades humanas que se realizan en el Mar de Dunas se sintetizan en el Cuadro N° 3. Si estas se efectúan sin el control necesario, en el tiempo, ellas provocarán diversos impactos como pérdida de naturalidad, transformaciones topográficas y otros perjudiciales para la preservación de las

Figura N° 5
Formas simples de agrupación



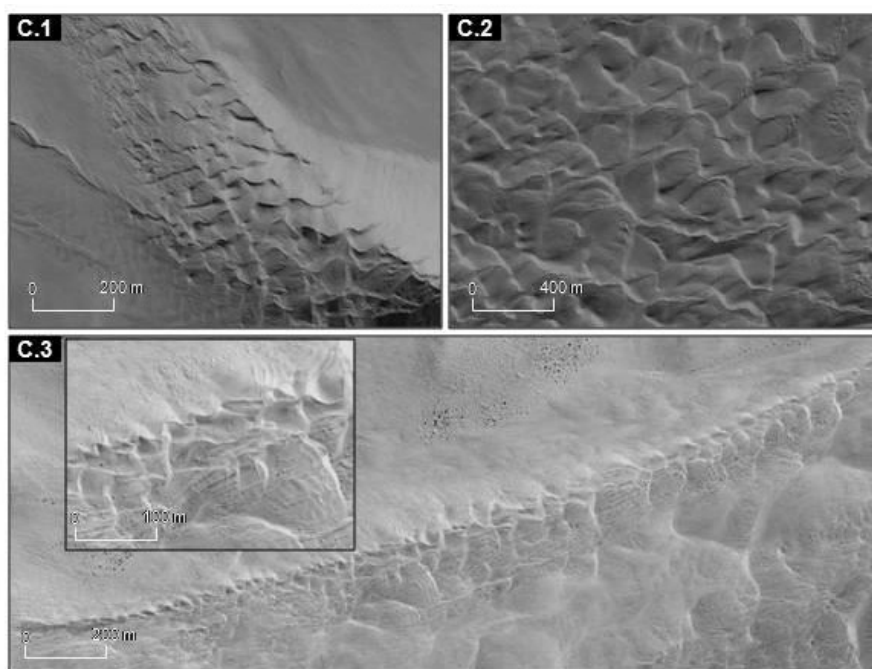
Fuente: Elaboración propia en base a imágenes *Google Earth*, 2012.

Figura N° 6
Formas compuestas: B.1 Lineales compuestas; B.2 Transversales compuestas.



Fuente: Elaboración propia en base a imágenes *Google Earth*, 2012.

Figura N° 7
Formas complejas: C.1 Barjanoides coalescentes; C.2 Transverso barjanoide;
C.3 Lineales complejas



Fuente: Elaboración propia en base a imágenes *Google Earth*, 2012.

dunas, como componente original del geopatrimonio de Atacama.

Así, el Mar de Dunas es un recurso natural no renovable que sustenta ecosistemas frágiles, además de constituir un recurso

turístico reconocido y relevante de la Región de Atacama (Castro *et al.*, 2011a; Castro *et al.*, 2011b). En efecto, las dunas continentales son el soporte del *Raid* de Atacama, actividad deportiva extrema para vehículos todo terreno que se realiza desde el año 1983. La ruta

Cuadro N° 4
Tipos morfológicos y actividades humanas en Mar de Dunas de Atacama

Tipos morfológicos	Estado	Actividades humanas						
		Rally	Raid	Minería	Ejercicios militares	Tránsito vehículos	Observación	Tránsito personas
A.1. Barjanes	Activas	☑	☑	■	☑	☑	☐	☐
A.2. En estrella	Activas	☑	☑	■	☑	☑	☐	☐
A.3. Lineales	Activas	☑	☑	■	☑	☑	☐	☐
A.4. Piramidal	Activas	☑	☑	■	☑	☑	☐	☐
A.5. Transversales	Estabilizadas	■	■	■	☑	■	☐	☐
	Semiestables	■	■	■	☑	■	☐	☐
	Activas	☑	☑	■	☑	☑	☐	☐
B.1. Lineales compuestas	Activas	☑	☑	■	☑	☑	☐	☐
B.2. Transversales compuestas	Activas	☑	☑	■	☑	☑	☐	☐
C.1. Barjanoides coalescentes	Semiactivas	■	■	■	☑	■	☐	☐
	Activas	☑	☑	■	☑	☑	☐	☐
C.2. Transverso barjanoide	Semiactivas	■	■	■	☑	■	☐	☐
C.2. Lineales complejas	Semiactivas	■	■	■	☑	■	☐	☐
	Activas	☑	☑	■	☑	☑	☐	☐
☐	Actividades permitidas							
☑	Actividades permitidas reguladas							
■	Actividades no permitidas							

Fuente: Elaboración propia.

incluye más de 100 kilómetros de recorrido entre Copiapó y Bahía Inglesa, cruzando el Mar de Dunas, que es el mayor atractivo de la competencia por la dificultad de ascenso de sus laderas arenosas y las alturas como el cerro Medanos. Desde el año 2009 también se efectúa el *Rally Dakar*, competencia internacional en que el Mar de Dunas de Atacama y su entorno representan una etapa de gran relevancia debido a la extensión de las dunas y la diversidad de obstáculos que deben atravesar motocicletas, autos y camiones.

La minería del hierro es otra actividad relevante que se lleva a cabo en el subsuelo de la cordillera costera de Copiapó, donde se emplazan las dunas. Actualmente hay faenas de explotación en los yacimientos de las minas San José, Las Adrianitas y Cerro Negro, las que son abastecidas por tres subestaciones eléctricas localizadas en el entorno del Mar de Dunas.

En el Cuadro N° 4 se sintetiza la relación del impacto relativo de las actividades humanas, según el tipo morfológico de la duna y

su estado de estabilización. La mayor parte de los usos observados son ocasionales, donde el tránsito de vehículos todo terreno es el principal agente que altera la morfología de las dunas. En los sucesivos levantamientos de terreno efectuados en el área, se comprobó que los tipos de dunas activas, desprovistos de vegetación, son capaces de recuperar en algunos días su forma original, a través de la acción remodeladora del viento.

Por el contrario, las huellas de los vehículos motorizados y de tránsito en general, permanecen y generan modificaciones en las formas y la vegetación de las dunas semiestabilizadas y estabilizadas y también en los mantos de arena del entorno del Mar de Dunas, afectando el hábitat de la vegetación xerófitica permanente y los sustratos donde germina el desierto florido (Castro, 2012, inédito).

Por lo anterior, se recomienda que las competencias motorizadas, junto a otros usos permanentes como la minería e instalaciones de infraestructura, no sean excluidos, pero sí debidamente regulados considerando la vulnerabilidad de los tipos de dunas donde se lleven a cabo dichas acciones. En algunos sectores de alta vulnerabilidad de los campos dunarios y su entorno, deberá considerarse la exclusión total de las actividades que lleven a la pérdida de la calidad natural del hábitat dunario.

Los usos de bajo impacto, tales como el tránsito de personas, diversos tipos de actividades turísticas, científicas y otras similares, son muy recomendables de llevar a cabo para el aprovechamiento y puesta en valor del Mar de Dunas. Lo anterior, es posible si dichas iniciativas se sustentan en planes de manejo y gestión elaborados por los servicios responsables (Cuadro N° 4).

Conclusiones

El Mar de Dunas de Atacama es un componente singular del geopatrimonio de la III Región que se destaca por sus rasgos geomorfológicos, naturales y escénicos, únicos a escala regional y nacional. La singularidad de las formas se debe tanto a la superficie que ocupan, a sus grandes dimensiones y volumen, como también por ser un elemento

representativo de dunas desérticas continentales, las únicas de tal envergadura en Chile. Este rasgo confiere gran valor al Mar de Dunas, como componente original del geopatrimonio del desierto chileno.

El reconocimiento de los tipos geomorfológicos de dunas, su clasificación y cartografía permiten la puesta en valor del Mar de Dunas y su reconocimiento como sitio de interés científico.

De acuerdo a criterios geomorfológicos, las dunas se clasifican en tres grandes categorías que son: conjuntos de dunas simples; conjuntos de dunas compuestos; y conjuntos de dunas complejos. A su vez, cada categoría comprende varios tipos de dunas y asociaciones.

Los tipos morfológicos de dunas, según su estado de estabilización por la vegetación, sus dimensiones y posición, tienen distinta capacidad de respuesta a las diferentes actividades humanas que se realizan en ellas. La vulnerabilidad del tipo de duna es, por lo tanto, un factor que debe considerarse para la asignación de usos compatibles en el Mar de Dunas.

La cartografía geomorfológica resultante de la investigación, constituye una base científica que servirá para efectuar una propuesta de zonificación del Mar de Dunas y su entorno, según su potencial y vulnerabilidad para acoger diversas actividades y usos humanos.

Los resultados obtenidos, junto a otros sobre la distribución espacial de la vegetación y el desierto florido –no expuestos en este artículo– permitirán, posteriormente, elaborar una propuesta de zonificación del Mar de Dunas para usos sustentables.

Este estudio fundamenta la importancia del Mar de Dunas de Atacama como sitio de interés geomorfológico y aporta antecedentes de base para contribuir a la planificación territorial orientada al desarrollo de la Región de Atacama.

Referencias bibliográficas

ARAYA-VERGARA, J. Los Ergs del desierto marginal de Atacama, Chile. *Revista Investigaciones Geográficas*, 2001, N° 35, p. 27-66.

BREED, C. & GROW, T. Morphology and distribution of dunes in sand seas observed by remote sensing. In: MCKEE, E. (Editors). *A Study of Global Sand Seas*. Washington D.C.: U.S. Geological Survey Paper, 1979, p. 253-304. 1052.

CASTRO, C. El Índice de Vulnerabilidad de dunas litorales: un instrumento para la gestión. *Revista Terra Australis*, Vol. 49, 2004, p: 87-111.

CASTRO, C. y PATTILLO, C. Geomorfología dunaria y teledetección espacial. *Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas*, 1997.

CASTRO, C.; MARQUARDT, C. y ZÚÑIGA, A. Peligros Naturales en Geositios de interés Patrimonial en la Costa Sur de Atacama. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2010, N° 45, p. 21-39.

CASTRO, C.; MARQUARDT, C. y ZÚÑIGA, A. Geositios de Caldera y Copiapó, Región de Atacama, Chile. *Actas Conferencia Geográfica Regional UGI*, 2011a.

CASTRO, C.; PATTILLO, C. y ZÚÑIGA, A. Mar de Dunas de Atacama, Copiapó: patrimonio y desarrollo territorial. *Actas del Primer Simposio sobre Geoparques*, 2011b, p. 52-55.

CASTRO, C.; PATTILLO, C.; ZÚÑIGA, A. y MONTAÑA, A. *Determinación del Área con Desierto Florido en el Mar de Dunas de Copiapó, Región de Atacama, Chile, Mediante Percepción Remota*. Santiago de Chile, 2012 (Inédito).

EWING, R.C. & KOCUREK, G. Aeolian dune interactions and dune-field pattern formation: White Sands Dune Field, New Mexico. *Sedimentology*, 2010, Vol. 57, N° 5, p. 1199-1219.

FRYBERGER, S. & DEAN, G. Dune forms and wind regime. In: MCKEE, E. (Editors). *A Study of Global Sand Seas*. Washington D.C.: U. S. Geological Survey Paper, 1979, p. 137-170.

GODOY, E.; MARQUARDT, C. y BLANCO, N. *Carta Caldera, Región de Atacama*. Santiago de Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 2003, N° 76.

MORTENSEN, H. Der Formenschatz der nordchilenischen Wüste. *Abh. Ges. Wissensch.*, 1927, N° 12.

MARQUARDT, C. *Neotectónica de la Franja Costera y aportes a la Geología Regional entre Caldera y Caleta Pajonal (27°00'-27°45')*. III Región de Atacama. Santiago de Chile: Tesis Magíster, 1999.

PASKOFF, R.; CUITIÑO, L. y MANRÍQUEZ, H. Origen de las arenas dunares de la Región de Copiapó, Desierto de Atacama, Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 30, N° 2, 2003, p. 355-361.

QUEZADA, J.; GONZÁLEZ, G.; DUNAI, T.; JENSEN, A. & JUEZ-LARRÉ, J. Alzamiento litoral Pleistoceno del norte de Chile: edades ²¹Ne de la terraza costera más alta del área de Caldera-Bahía Inglesa. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 34, N° 1, 2007, p. 81-96.