

Comportamiento espacio-temporal de la nube estratocúmulo, productora de niebla en la costa del desierto de Atacama (21° lat. S., 70° long. W.), durante un mes de invierno y otro de verano

Martín Farías Salvador*
Pilar Cereceda Troncoso*
Pablo Osses McIntyre*
Rodrigo Núñez Cárdenas*

Recibido: 23 de febrero de 2004
Aceptado en versión final: 3 de marzo de 2005

Resumen. Se muestran los resultados de la utilización de imágenes satelitales GOES, cada 90 minutos, para estudiar el comportamiento espacio-temporal de la nube estratocúmulo, productora de niebla advectiva, en un sector costero del desierto de Atacama. Este potencial recurso hidrológico, muy influyente en los ecosistemas de desierto, se investiga además con la intención de abastecer de agua potable a pequeños poblados rurales, para agricultura, bebederos en predios ganaderos y reforestación. A través de la comparación del comportamiento de este tipo de nube, entre un mes de invierno y otro de verano, se determinan sus ciclos diario y mensual, la frecuencia de su presencia, los corredores por donde penetra desde el océano hacia el interior, potenciales lugares para captación de agua y una gran diferencia existente entre los meses seleccionados.

Palabras claves: Estratocúmulo, niebla, desierto, percepción remota.

Spatial and temporal behavior of the stratocumulus cloud, fog producer in the coast of the Atacama desert (21° south lat., 70° west long.), during one month of winter and another of summer

Abstract. This paper shows the use of GOES satellite images, every 90 minutes, to study the spatial and temporal behavior of the stratocumulus clouds, which produce the advective fog, in a coastal sector of the Atacama desert. This potential hydrological resource, which has an important influence in the desert ecosystems, is also investigated with the intention to supply drinkable water to little villages, for agriculture, watering places for animals and reforestation.

* Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile.
E-mails: mfarass@puc.cl; dcereced@puc.cl; posses@puc.cl; rhnunez@puc.cl

Through the comparison of the behavior of this type of cloud between two months, winter and summer, the study determines its daily and monthly cycles, the frequency of its presence, penetration corridors from the ocean to the continent, potential places to catch water and a big difference between the selected months.

Key words: Stratocumulus, fog, desert, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

La nube estratocúmulo y su producción de niebla han sido estudiadas por su influencia en los ecosistemas, especialmente de desierto (Schemenauer y Cereceda, 1994; Cereceda *et al.*, 2000; Osses *et al.*, 2000). Desde el punto de vista geográfico, en Chile y en el mundo, en numerosas ocasiones se ha documentado su potencial de colección de agua (Cereceda *et al.*, 1992; Schemenauer y Cereceda, 1997; Osses *et al.*, 1998; Larraín *et al.*, 2002) y, como recurso hidrológico, se ha probado con distintos niveles de éxito para abastecer de agua potable a pequeños poblados rurales, para agricultura, bebederos en predios ganaderos y reforestación (Marzol *et al.*, 1994; Schemenauer y Cereceda, 1997; Cereceda *et al.*, 1998; Sabino, 1998). También se está explorando su utilidad en proyectos de forestación como un medio para captura de CO₂, siendo este último considerado como un importante factor del cambio climático global.

Por otro lado, al igual que las lluvias ácidas, las nieblas que ocurren en ambientes contaminados se transforman en agentes nocivos para los ecosistemas, dañando la vegetación y su fauna asociada (Burgess *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2001). También son aspectos importantes en la agenda científica los numerosos accidentes aéreos, terrestres y marítimos debido a nieblas densas, así como los problemas suscitados en los aeropuertos con las llegadas y partidas de los aviones.

En Geofísica y Meteorología se ha logrado una definición de parámetros determinantes en la generación de nieblas costeras y se han analizado los factores de distribución espacial y temporal (Fuenzalida *et al.*, 1988; Marzol *et al.*, 1994; Olivier, 1997 y 1998; Espejo, 1998 y

2001), así como algunas relaciones entre el océano y la atmósfera (Fuenzalida *et al.*, 1989). Especialmente importantes son los estudios realizados de dinámica de vientos, surgencias costeras, inversión térmica y comportamiento de la niebla (Espejo *et al.*, 1993; Espejo, 1998 y 2001). Junto a estos estudios, los diferentes tipos de niebla (de radiación, orográfica y de advección) han sido parte de la investigación científica.

La nube de tipo estratocúmulo como productora de niebla de advección, también se ha transformado en tema prioritario en el ámbito de la geofísica (Garreaud *et al.*, 2001 y 2002; Garreaud and Rutllant, 2003). En efecto, la nubosidad estratocúmulo localizada en el Pacífico sur se estudia, debido a que es altamente probable que sea un modificador del clima mundial por la gran superficie que ocupa y por su alta persistencia en el tiempo (Minnis and Harrison, 1984; Klein and Hartmann, 1993; Rozendaal *et al.*, 1995). En la actualidad VEPIC (VAMOS East Pacific Investigation of Climate) congrega a un grupo de científicos que estudian este fenómeno desde variadas perspectivas. Numerosos estudios se han hecho para conocer las propiedades meteorológicas de esta nubosidad, entre ellos está el de Garreaud *et al.* (2001) donde además de realizar sistemáticos sondeos verticales, se midieron las condiciones de temperatura, humedad relativa, radiación solar, presión y vientos en una transecta en el océano que se inició en la costa de Caldera (27° lat. S, 70° long. W) y culminó en Isla de Pascua (27° lat. S, 109° long. W), teniendo una duración de 15 días en octubre de 1999.

Respecto a estudios de niebla utilizando percepción remota, quizás el científico que más ha avanzado es el Dr. Jörg Bendix

(Instituto de Geografía, Universidad de Bonn), quien además dirige un Grupo de Estudios de Niebla y Sensores Remotos creado a raíz de la Primera Conferencia Internacional de Niebla llevada a cabo en Vancouver en 1997. También ha realizado estudios en la región Alpina como el valle del río Po mediante imágenes NOAA-AVHRR.

Se determinaron mapas de extensión vertical de las nieblas; tope de nube con base en la combinación de radiosondeo y el modelo de elevación digital; visibilidad y contenido de agua; y discriminación entre nieblas de tipo advectivo y de radiación (Bendix y Bachman, 1993; Bendix, 2001).

Tomando en cuenta la necesidad de mejorar el conocimiento acerca del comportamiento espacio-temporal de la nubosidad estratocúmulo y de la niebla que genera, con el fin de aprovechar el recurso hidrológico que de ella se puede obtener en esta zona desértica, y debido a que los estudios hechos en Chile habían sido puntuales en el espacio y por sólo cortos periodos de tiempo, en el 2001 se inició un proyecto utilizando imágenes digitales GOES-Imager, cada 90 minutos, para un periodo comprendido entre mayo de 2001 y abril de 2003 con el propósito de explorar las posibilidades de este tipo de imágenes en los siguientes aspectos: discriminación de estratocúmulo, análisis de su comportamiento espacio-temporal, diferenciación de tipos de eventos (advectivos, orográficos y de radiación) y detección de corredores de penetración del océano hacia el continente. Los resultados del procesamiento de los datos satelitales GOES se han contrastado con observaciones de terreno, simultáneas a las imágenes, durante una campaña de 15 días en julio de 2002 (Osses *et al.*, 2005a). En esta publicación se muestran los resultados obtenidos, en los primeros aspectos señalados, a través de una comparación entre los meses de agosto de 2001 y enero de 2002.

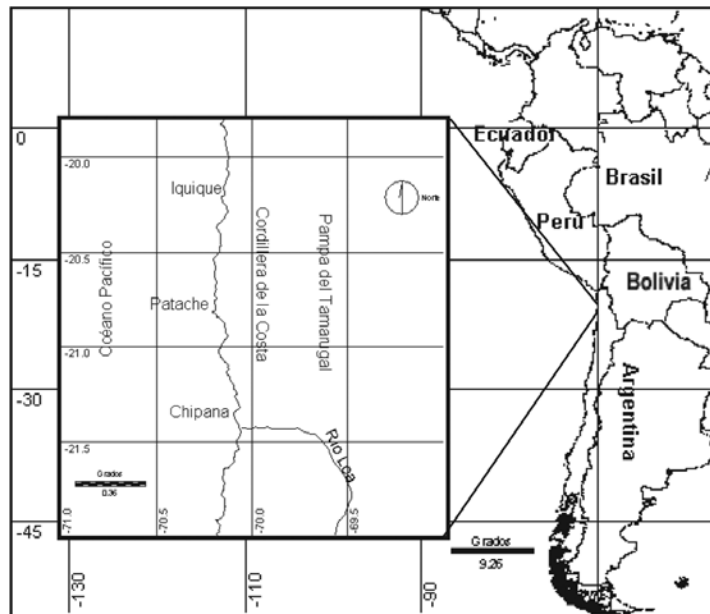
ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio (Figura 1) se localiza en el norte de Chile, en el desierto de la Región de Tarapacá. Se enmarca entre los 19° 48' -22° 00' Lat. S y los 69° 00' -71° 00' Long. W, lo que corresponde a 50 755 km², donde un 57% pertenece a masa continental y un 43% a superficie oceánica (Fariás *et al.*, 2001).

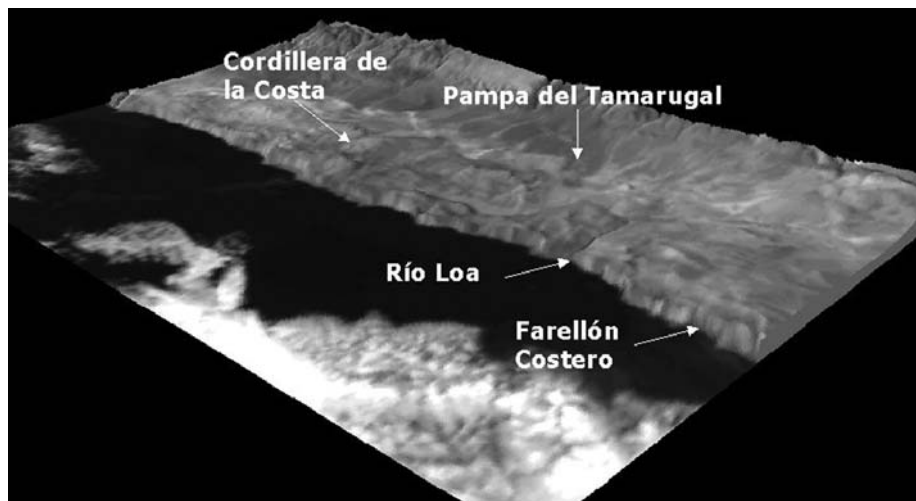
Los rasgos orográficos constituyen un componente fundamental de la estructura y funcionamiento de los ambientes naturales (IGM, 1985) y presentan un patrón oeste a este en donde, desde el Océano Pacífico al oriente, se encuentran: la línea litoral que presenta planicies angostas y un farellón costero con alturas de hasta 1 000 msnm; la cordillera de la Costa que se manifiesta con altitudes máximas entre 1 500 y 2 000 msnm; la Pampa del Tamarugal que se emplaza en la Depresión Intermedia constituida principalmente por un gran glacis y llanos de sedimentación, donde las menores altitudes bordean los 500 msnm; y en el sector más oriental, parte de la cordillera de los Andes alcanzando altitudes de 3 000 msnm (Figura 2).

El clima de esta zona del desierto de Atacama está clasificado por Köppen como Desértico con nublados abundantes (BWn), lo que se ha traducido en las últimas tres décadas del siglo XX en precipitaciones casi nulas (0.2 mm promedio anual en la ciudad de Iquique) y por lo tanto en una extrema aridez (Cereceda *et al.*, 2002). Sin embargo, las importantes altitudes alcanzadas por el farellón costero y la cordillera de la Costa, tienen una implicancia constante en la intercepción del nivel de subsidencia atmosférica y, con ello, en la presencia de un techo frecuente de nubes y niebla, que caracterizan al desierto costero como un área de alta humedad atmosférica y nubosidad (IGM, 1985).

Las hipótesis sobre la formación de niebla consultan varias situaciones que pueden



1. Área de estudio (Fuente: Cereceda *et al.*, 2002).



.Figura 2. Fusión modelo de elevación digital con imagen satelital (Fuente: Farías *et al.*, 2001).

producirse en el área de estudio (Fariás *et al.*, 2002). Las orográficas que se forman en un día despejado son inducidas por el ascenso de una masa de aire húmedo por efecto del relieve y las advectivas se producen cuando el relieve intercepta la nube estratocúmulo que se ha formado a varios kilómetros de la costa en el mar. Una nube estratocúmulo al pasar durante el día por el terreno recalentado se disipa y al disminuir la temperatura ambiente, al atardecer o en la noche, vuelve a condensar su humedad en lugares ubicados en el interior del continente, en ese caso debiera considerársela niebla radiativa. Esta última se puede formar, ya sea por el enfriamiento de una masa de aire advectada desde el océano o por la condensación del vapor de agua emanado del suelo, cuando existe, por ejemplo, un salar o alguna vegetación que saca el agua del subsuelo para nutrirse. En cualquiera de estos casos, dos factores son importantes para la formación de nieblas: el relieve y la dinámica de los vientos locales. El primero forma corredores de penetración de las masas de aire y el segundo es el mecanismo mediante el cual ellas se desplazan.

METODOLOGÍA

La metodología se ha detallado en Fariás *et al.* (2001 y 2002) y consiste básicamente en el procesamiento digital de imágenes satelitales en combinación con la modelación numérica de terreno del área de estudio. El procesamiento de imágenes permite discriminar la cobertura de nubes bajas como elemento principal, mientras que la modelación numérica se utiliza para el análisis y cartografía de los corredores de penetración.

a) Imágenes satelitales

Las imágenes utilizadas para discriminación de nubes bajas, medias y altas, son GOES-Imager (*Geostationary Operational Environmental Satellite-Imager*), las que son adecuadas para una escala cartográfica 1:5 000 000 y tienen una

frecuencia de observación nominal de 90 minutos.

El procesamiento de las imágenes se fundamenta en la elaboración de algoritmos de discriminación de nubes bajas. El enfoque se basa en la clasificación de categorías mediante *umbrales espectrales* y en el concepto *detección de cambios*, por lo que también se procesan imágenes sin presencia de nubes como referencias. El resultado de este procesamiento es un mapa temático con tres categorías (Fariás *et al.*, 2001): sin nubes, nubes bajas y nubes medias-altas (Figura 3).

b) Validación de imágenes

Durante 10 días de julio de 2002 se realizó una campaña de terreno, con el propósito de confeccionar mapas temáticos mediante observaciones visuales simultáneas a las captaciones de las imágenes de satélite. La metodología y resultados preliminares de esta campaña de terreno están descritos en Osses *et al.* (2005a).

c) Modelo de elevación digital

El modelo de elevación digital (MED) se realiza con base en la digitalización de las curvas de nivel, cotas y drenaje de la cartografía IGM (Instituto Geográfico Militar) escala 1:250 000. La información vectorial es ingresada a un sistema de información geográfica (SIG), donde se genera un MED raster con tamaños de celda de 250 m.

Una vez realizado el MED, además de los cálculos de pendiente y exposición, se elaboran vistas en dos y tres dimensiones con diferentes orientaciones a manera de destacar las características del relieve y su relación con el comportamiento espacial de la nube.

d) Análisis espacio-temporal

El análisis del comportamiento espacio-temporal de la cobertura de nubes bajas se realiza con los resultados del procesamiento de imágenes GOES cada 90 minutos, utili-

zando para comportamientos más dinámicos, imágenes cada 30 minutos.

Con estas imágenes se realizan los siguientes análisis:

d1) Comportamiento diario

Para cada mapa temático se determina el área cubierta por estas nubes con el propósito de identificar y caracterizar espacio-temporalmente eventos advectivos, orográficos y radiativos, además de conocer los eventuales ciclos diarios, en especial las horas de menor y mayor expansión. Este cálculo se realiza tanto para el área total como también para el sector continental.

d2) Comportamiento decenal

El comportamiento diario, durante una decena de días, se utiliza para calcular promedios de los tres periodos decenales del mes. Además, para cada decena, se realiza un se-

gundo cálculo que consiste en determinar frecuencia de la nube estratocúmulo con el propósito de establecer sitios en que su presencia es más frecuente.

d3) Comportamiento mensual

Basados en los mismos cálculos anteriores, determinados ahora mensualmente, se estudian los comportamientos para un mes de invierno y otro de verano. También el cálculo de frecuencia promedio para cada mes permite comparar el ciclo diario originado por ambos tipos de cálculos, el de área cubierta y el de frecuencia.

d4) Identificación de corredores

Para cada evento advectivo, detectado con imágenes GOES, se identifican los corredores de penetración en el farellón costero y aquellos interiores que atraviesan la cordillera de la Costa hacia la Pampa del Tamarugal.

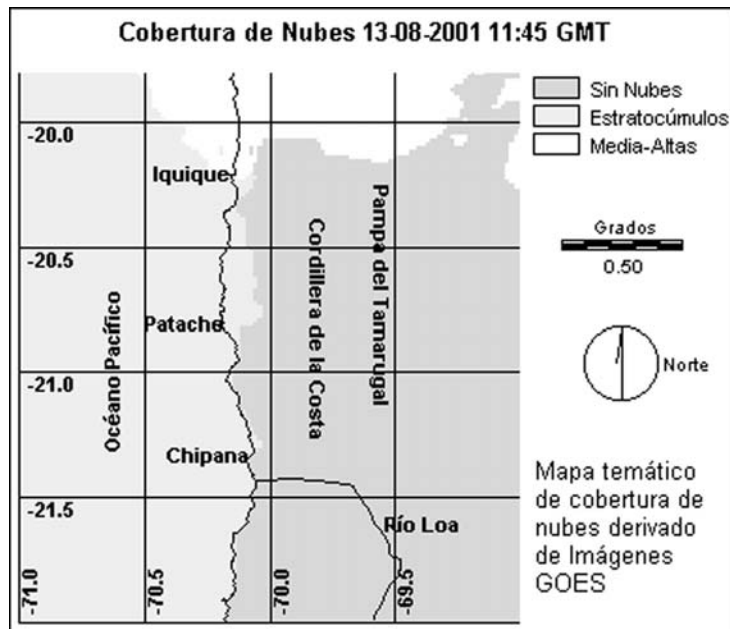


Figura 3. Mapa temático (Fuente: Farías *et al.*, 2001).

El análisis de relieve de los corredores se basa en los resultados del procesamiento de imágenes y en la modelación numérica de terreno. La cobertura de nubes bajas determinada en cada imagen se sobrepone al MED dejando la información de relieve solamente en aquellos sectores cubiertos, y realizándoles entonces los análisis de altitudes, exposición y pendientes. Analizando además el borde del área cubierta, permite estimar la altitud en que el tope de nube baja hace contacto con el relieve transformándose por consiguiente en niebla.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a) Mapas temáticos

De las 496 imágenes que corresponden al mes de agosto, 40 no estuvieron disponibles mientras que 70 fueron afectadas por nubes medias-altas, por lo tanto, para el cálculo de frecuencia se obtuvo un total de 456 mapas temáticos y para el cálculo de superficie cubierta, un total de 398.

Respecto al mes de enero, 21 no estuvieron disponibles mientras que 67 imágenes fueron afectadas por nubes medias-altas, por lo tanto, para el cálculo de frecuencia se obtuvo un total de 475 mapas temáticos y para el cálculo de superficie cubierta, un total de 419.

Cabe hacer notar que el horario que aparece en los mapas temáticos es GMT, existiendo una equivalencia para el horario local de GMT menos cuatro horas en agosto y menos tres horas en enero.

b) Validación de imágenes GOES

Entre los días 13 y 27 de julio de 2002 se realizó una campaña de terreno obteniendo 100 mapas temáticos de observaciones visuales, simultáneas a las imágenes GOES, con el propósito de evaluar los resultados de estas últimas. Debido a la limitación natural de visibilidad de los observadores, el área de compara-

ción se redujo considerablemente tal como se muestra en un recuadro del ejemplo en la Figura 4. El acierto de coincidencia para este caso es de 94.5% y tanto la metodología de observación como resultados preliminares de la comparación están descritos en Osses *et al.*, 2003.

c) Análisis visual

En agosto, un análisis visual de las imágenes de todo el mes, nos refleja una alta presencia de estratocúmulos en el área de estudio, en especial en el sector oceánico donde hay importantes zonas con permanencia casi total de estas nubes durante todos los días, exceptuando los días 5, 12 y 24, en los cuales durante sólo algunas horas se despejó, pero no más del 70% de ese sector. En general, la masa de nubes bajas se mantuvo cercana a la costa y gran parte del tiempo permaneció junto al farellón costero.

Enero refleja una muy baja presencia de estratocúmulos en el área de estudio, en especial en el sector continental con ausencia casi total de estas nubes por alrededor de 20 días. En general, las nubes bajas se presentaron en forma aislada y en pocas ocasiones como una masa compacta.

c1) Eventos advectivos

A modo de ejemplo se muestra el desarrollo de un evento advectivo, con penetración hasta la Pampa del Tamarugal, que comienza el 4 de agosto a las 17:45 GMT y termina a las 14:45 GMT del día siguiente (Figura 5).

Durante el inicio se aprecian todavía signos de un evento orográfico previo, producido en algunos sectores cercanos a la desembocadura del río Loa y en el norte del litoral. A las 20:45 GMT se observa la presencia de nubes bajas penetrando el farellón costero en cinco corredores, las que avanzan alcanzando la Pampa del Tamarugal a las 05:45 GMT. En la secuencia de mapas temáticos se aprecia que el máximo de cobertura de nubes bajas se produce a las

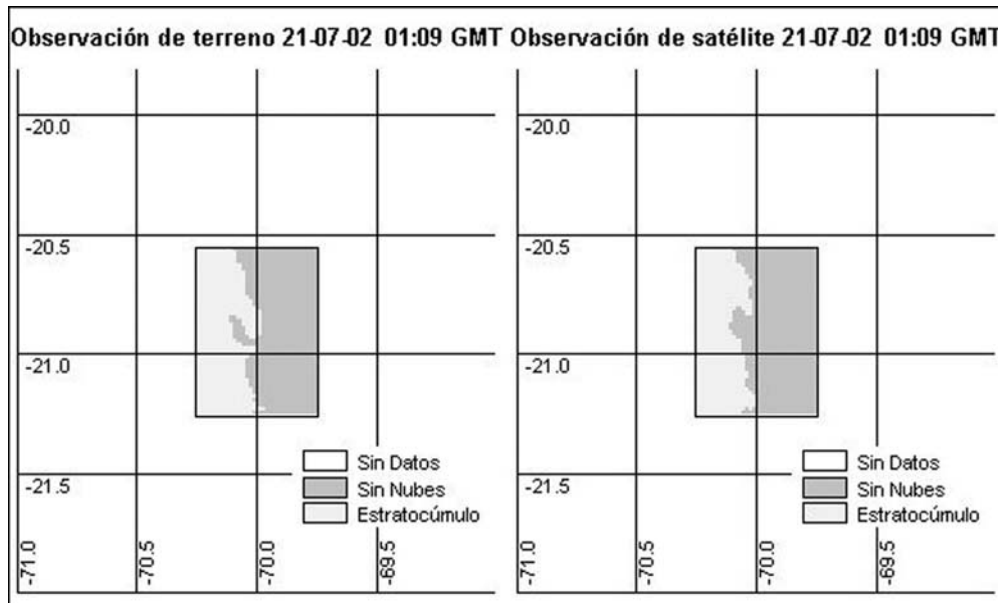


Figura 4. Comparación-observación de terreno e imagen GOES (Fuente: Osses *et al.*, 2003).

11:45 GMT. A partir de esta hora empieza la etapa de disipación, quedando a las 14:45 GMT todavía residuos en el interior y sobre el farellón costero. Llama la atención la temprana disipación que se produce en el litoral frente al río Loa y que se repite para los eventos de penetración que llegaron hasta el interior.

Para agosto, en todos los días se produjeron penetraciones hasta la cordillera de la Costa y en diez de éstos la cobertura nubosa alcanzó hasta la Pampa del Tamarugal, produciéndose las penetraciones de mayores proporciones durante los días 5 (12 676 km²), 12 (8 968 km²) y 31 (6 516 km²). Estos eventos comienzan alrededor de las 19:10 GMT y la cobertura nubosa empieza a disiparse alrededor de las 08:45 GMT, excepto en casos de penetración hacia el interior del continente donde permanecen importantes residuos en la Pampa del Tamarugal, incluso hasta las 14:45 GMT. Una explicación para este último hecho podría ser que en esta zona

existe un reforzamiento de tipo radiativo.

Durante enero se produjeron sólo cinco eventos advectivos, todos ellos de muy baja intensidad, ya que no penetraron más allá del borde occidental de la cordillera de la Costa y abarcaron sólo algún sector latitudinal del área de estudio. No existió ningún evento que llegara hasta la Pampa del Tamarugal. La mayor de las penetraciones fue la primera, desarrollándose entre el día 9 (22:09 GMT) y el día 10 (10:09 GMT) y abarcando 2 750 km², generalizada a lo largo de la línea costera. El segundo evento solamente se apreció en el mapa temático del día 22 a las 05:45 GMT con una penetración de 689 km², sobre el río Loa. El tercero se produjo también sobre el río Loa, entre las 23:45 GMT del día 23 y las 05:45 GMT del día 24 con una penetración de 686 km². Los dos últimos se presentaron durante el mismo día (25) y separados tanto espacial como temporalmente. Uno se inició sobre el mismo sector anterior de penetración, entre las 02:45 GMT y las 04:09 GMT con

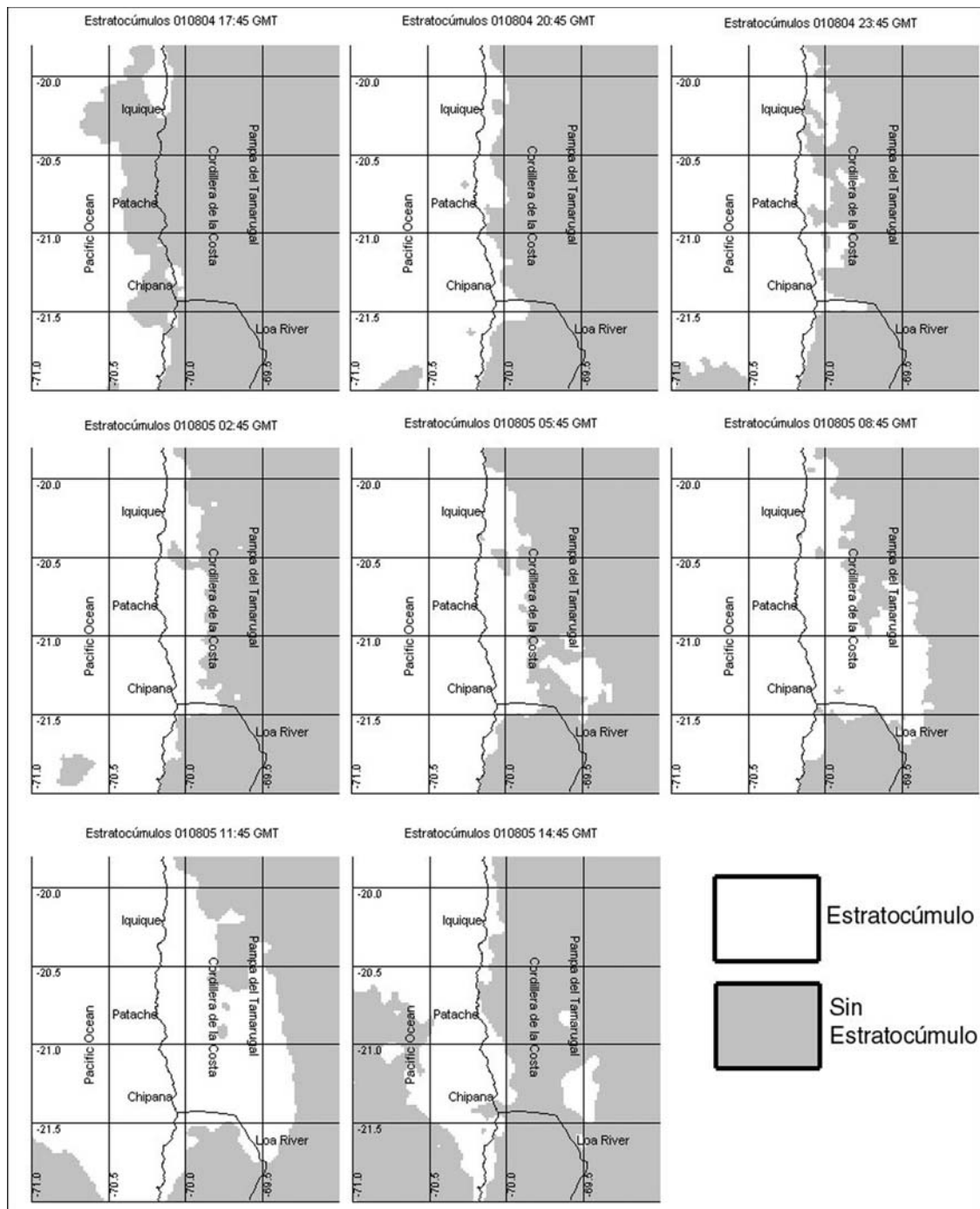


Figura 5. Evento advectivo 4-5 de agosto de 2001.

698 km², seguido por otro entre las 08:45 GMT y las 13:09 GMT a través de un avance en el sector norte (Iquique) con 2 093 km² de penetración, asociado además, a un paso de nubes medias-altas.

En el evento presentado anteriormente se realizó un cálculo de frecuencia de estratocúmulos, cuyo resultado se muestra en la Figura 6. En ésta se aprecia que en el continente, la mayor frecuencia se produce precisamente en algunos corredores del farellón costero con valores de permanencia sobre el 80% del tiempo que duró el evento, destacándolos como potenciales lugares para captación de agua mediante atrapanieblas.

c2) Eventos orográficos

Los eventos orográficos son detectados en los mapas temáticos, a través de la forma que adquiere la cobertura de nubes bajas sobre el farellón costero. Una de sus formas es una superficie pequeña, aislada y casi circular (imagen derecha Figura 7), mientras que una segunda se presenta como un cordón longitudinal, casi aislado y angosto (imagen izquierda Figura 7).

En agosto, estos eventos se presentaron durante todo el mes, exceptuando los días 21, 22 y 23. Su presencia mayoritariamente fue previa al avance de los estratocúmulos desde el mar hacia el continente (entre 14:45 y 23:45 GMT) y en algunos casos inmediatamente después que la masa nubosa comenzó a retirarse hacia el mar (entre 04:09 y 11:45 GMT). Para enero se produjeron solamente en 18 días, siendo la mayoría de ellos de corta duración alrededor de las 20:45 GMT.

En general, los de mayor duración se presentaron asociados a eventos advectivos, como los días 9 a 10 y 22 a 25 de enero.

c3) Eventos radiativos

Las características del comportamiento de la cobertura de nubes bajas que se utilizan para identificar eventos radiativos son, por una

parte, la existencia aislada de ésta con respecto a la gran masa que proviene desde el mar y, por otra parte, la presencia de ella en las partes más deprimidas del interior del continente.

Sin embargo, la identificación de este tipo de eventos no es del todo clara, ya que se producen situaciones confusas respecto a si es nubosidad totalmente independiente o si son parte de la advección del estratocúmulo. La limitada resolución espacial de las imágenes utilizadas (4.5 km) puede hacerlas aparecer como nubes aisladas. Por ejemplo, en el día 2 a las 07:09 GMT (imagen izquierda Figura 8) se encuentran las características descritas, pero como también se produjo un evento advectivo puede que haya existido una conexión entre ambas coberturas de nubes, la que no es captada por el grueso detalle espacial de las imágenes. Lo mismo sucede para las madrugadas de otros días del mes.

También se plantea la duda sobre el efecto que permite a importantes residuos aislados en la Pampa del Tamarugal permanecer hasta varias horas después de la disipación general de la masa de estratocúmulos que ingresó desde el mar (imagen derecha Figura 8).

Para agosto los eventos radiativos fueron más escasos que los advectivos y orográficos, presentándose solamente en diez días del mes entre las 02:45 y 14:45 GMT.

En enero, sólo en dos oportunidades se observó su presencia sobre la Pampa del Tamarugal. El día 10 se desarrolló uno de pequeñas dimensiones entre las 10:09 GMT y las 11:45 GMT, asociado al evento advectivo de ese día. Otro, un poco mayor en dimensiones pero más corto en duración, se presentó a las 11:45 GMT del día 24.

Este último se produjo seis horas más tarde del término del respectivo evento advectivo y aparece como totalmente independiente de los estratos anteriores que a esa hora ya estaban bastante alejados del continente.

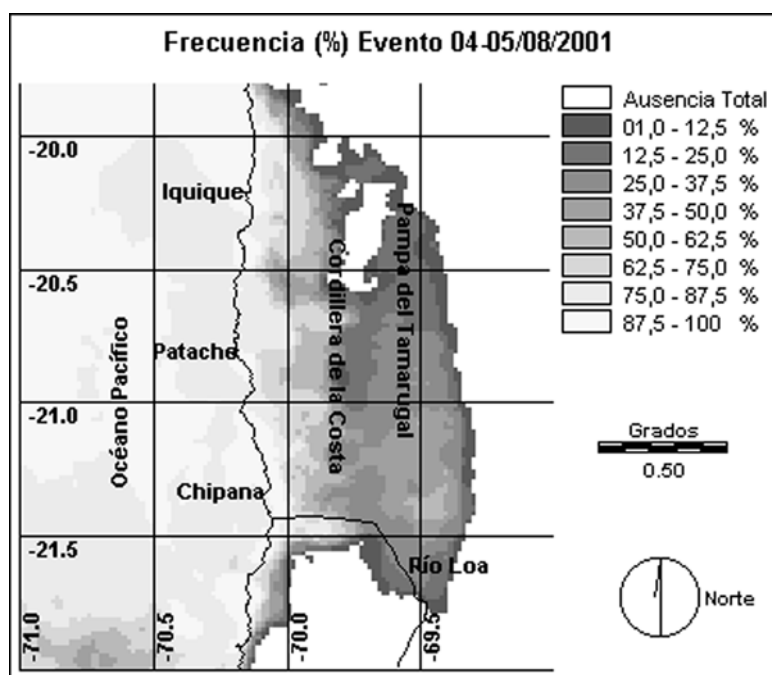


Figura 6. Porcentaje de permanencia de estratocúmulo evento 4-5 de agosto de 2001.

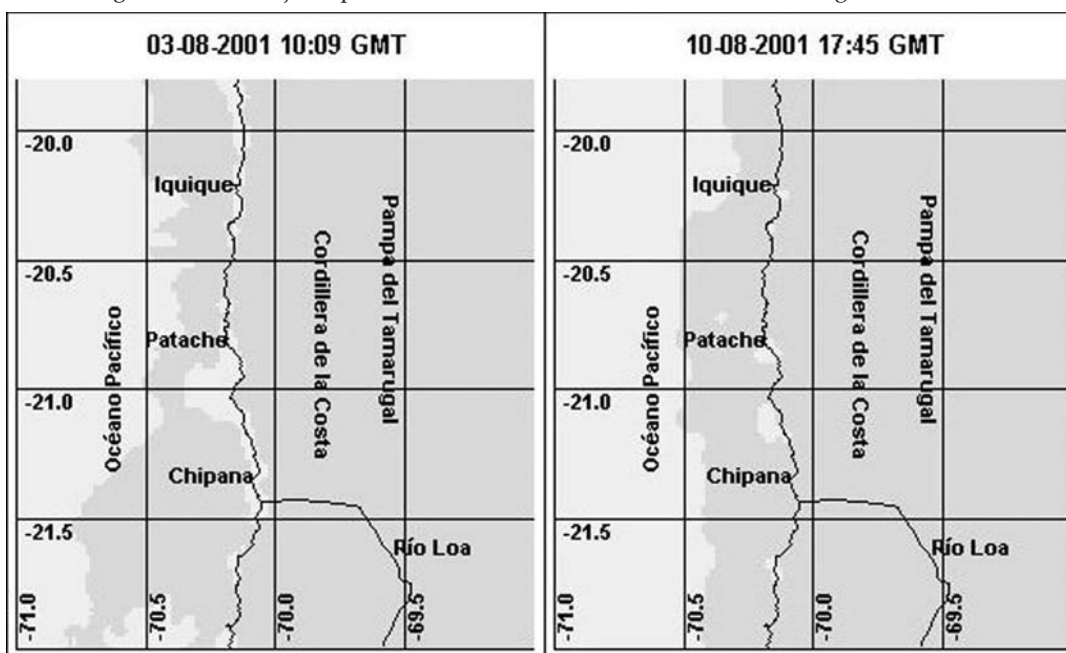


Figura 7. Ejemplos de eventos orográficos.

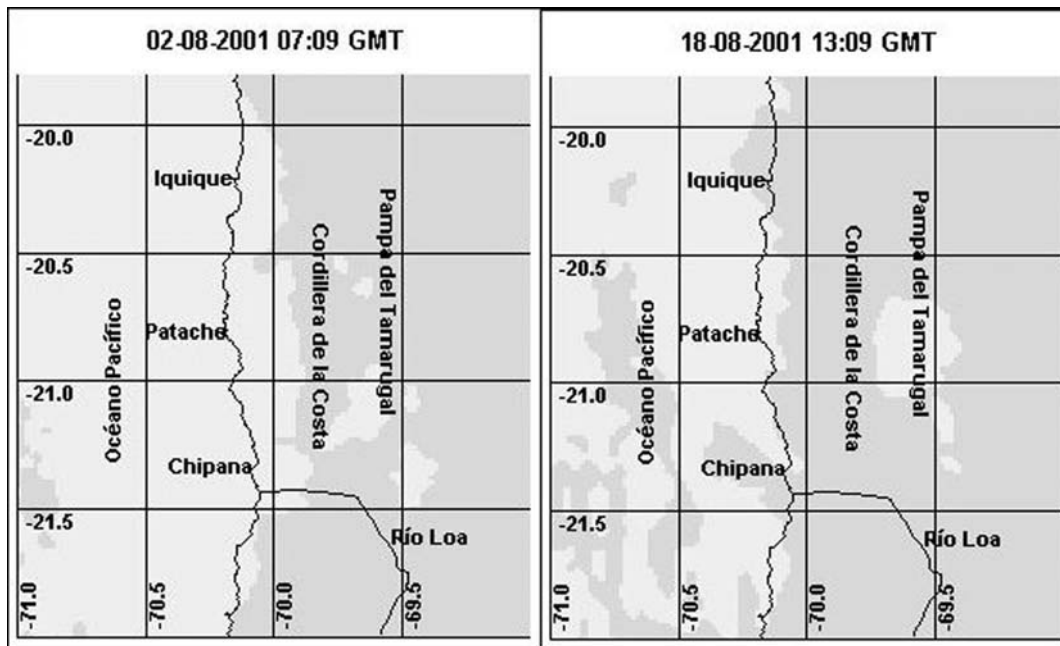


Figura 8. Ejemplos de eventos radiativos.

d) Ciclo diario y superficie cubierta

d1) Área total (50 755 km²)

Uno de los objetivos del estudio ha sido comparar el comportamiento espacio-temporal de las nubes estratocúmulos entre un mes de invierno y otro de verano.

Como primera comparación, en la Figura 9 se muestra un gráfico basado en el cálculo de superficie cubierta, en el área total, tomando los promedios respectivos de los meses analizados para cada uno de los horarios utilizados.

Ambas curvas en el gráfico revelan mínimas en la mitad de la tarde GMT, mientras que las máximas difieren, siendo para agosto en la madrugada (07:09 GMT) y en enero alrededor de las 20:45 GMT, a pesar que este último mes también tiene un aumento en la madrugada (05:45 GMT). De todas maneras, los ciclos diarios son muy similares, siendo más definido el de agosto de 2001.

Una diferencia más notoria se aprecia en la cantidad de superficie cubierta en donde agosto presenta un promedio mensual por imagen de 20 895 km² y el promedio respectivo para enero es de 2 486 km², la máxima promedio en agosto es de 24 153 km² y en enero es de 3 211 km², mientras que la mínima promedio para agosto es 16 539 km² y para enero es de 895 km². Por tanto, se aprecia una diferencia generalizada de alrededor de ocho veces.

d2) En el sector continental (28 930 km²)

En la Figura 10 se muestra un gráfico basado en el cálculo de superficie cubierta, ahora en el sector continental, tomando los promedios respectivos de los meses analizados para cada uno de los horarios utilizados.

Las curvas en el gráfico también revelan mínimas en la mitad de la tarde GMT, mientras que las máximas difieren, siendo en agosto en la madrugada (07:09 GMT) y en enero a co-

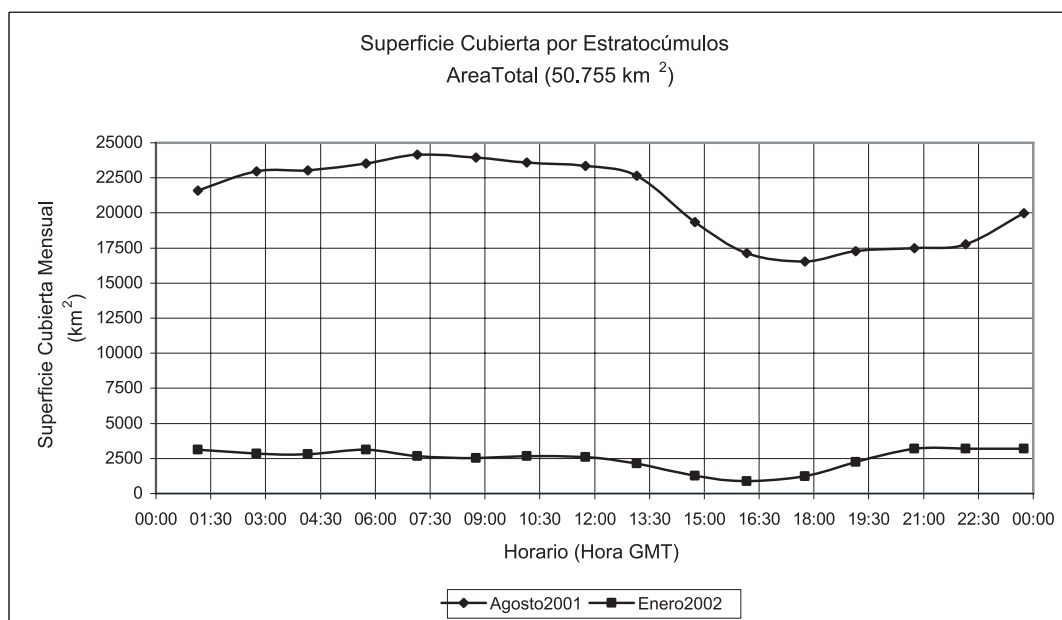


Figura 9. Comparación ciclo diario para el área total.

mienzos de la mañana (10:09 GMT).

Se repite la diferencia notoria en la cantidad de superficie cubierta. Agosto presenta un promedio mensual por imagen de 1 934 km² y el promedio respectivo para enero es de 52 km², la máxima promedio en agosto es de 3 096 km² y en enero es de 139 km², mientras que la mínima promedio para agosto es de 422 km² y para enero de 0 km². La diferencia generalizada es en el sector continental alrededor de 37 veces.

d3) Relación sector continental y área total

En agosto la correlación (R), entre el comportamiento del estratocúmulo para el sector continental con respecto al área total, es de 0.95 con un coeficiente de determinación ajustado (R²) de 0.89, lo que indica que casi el 90% de la nubosidad en el continente se explica por el comportamiento de la gran masa nubosa que se genera en el mar y por lo tanto en el invierno, lo que predomina es el

evento advectivo, siendo quizás el otro 10% explicado por lo eventos orográficos y radiativos.

Para enero la situación cambia sustancialmente. La correlación es de 0.44 con un coeficiente de determinación ajustado de 0.14, lo que indica que predominan los pocos eventos orográficos y radiativos producidos para este mes de verano.

d4) Comportamiento diario durante agosto

El gráfico de la Figura 11 presenta las coberturas máximas de estratocúmulo para cada día de agosto. Se observan varios ciclos de temporalidad variable, un periodo relativamente parejo desde el día 20 al día 29 y una tendencia de disminución desde el comienzo hacia el final del mes. Este comportamiento no ha sido todavía estudiado respecto a las variables meteorológicas locales o sinópticas que sucedieron en el área de estudio para ese mes y es una de las ideas que serán incluidas a futuro en esta investigación.

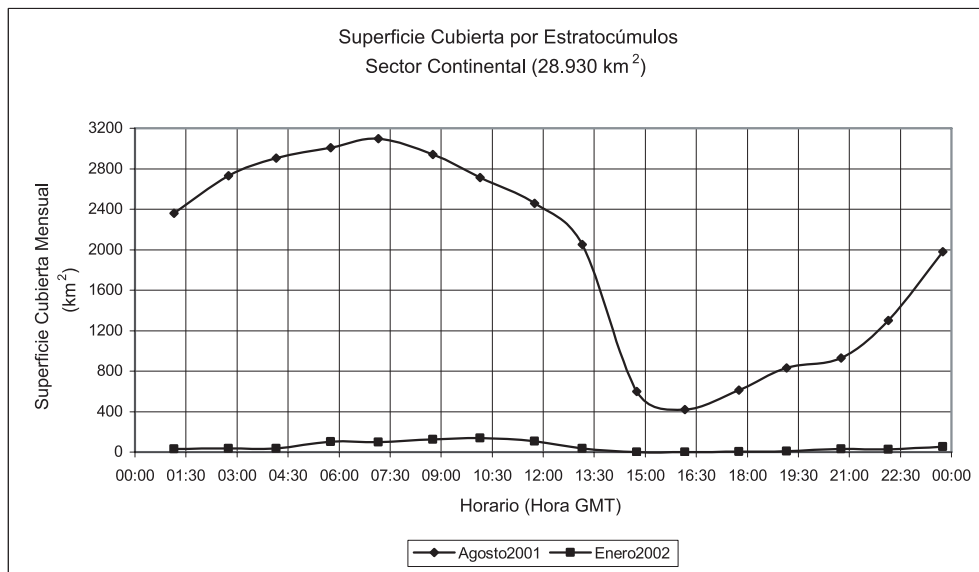


Figura 10. Comparación ciclo diario en el Sector Continental.

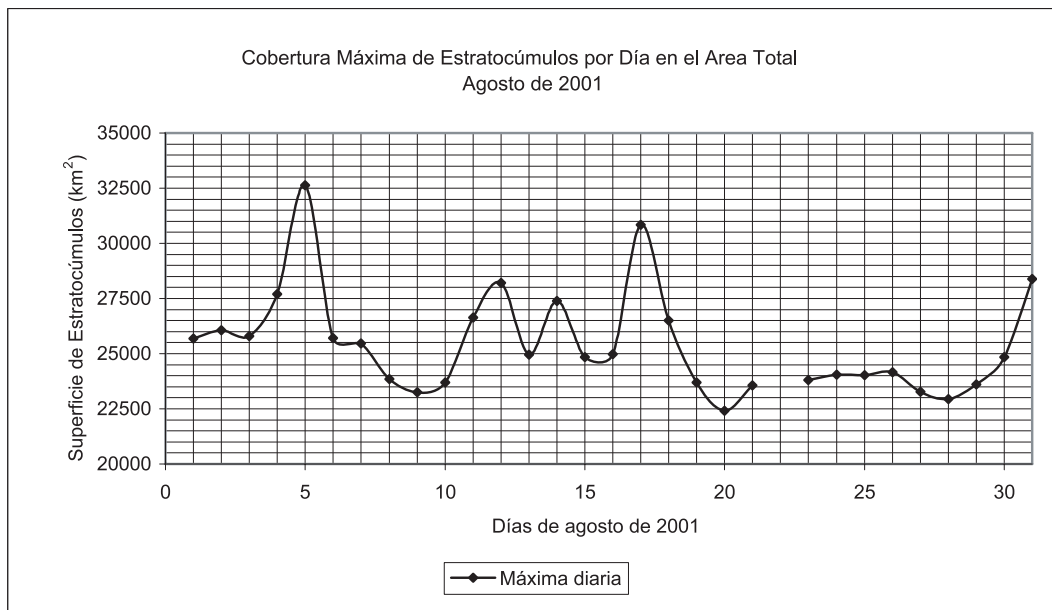


Figura 11. Cobertura máxima de cada día en agosto 2001.

e) Comparación de frecuencia de estratocúmulos

Por otro lado, la Figura 12 presenta una comparación de frecuencia, mediante imágenes mensuales generadas para los meses de agosto de 2001 y enero de 2002. Como se aprecia en éstas, existieron zonas que durante todo agosto estuvieron libres de cobertura de nubes ($14\,479\text{ km}^2$), mientras que para enero esta condición se dio para una superficie de $21\,974\text{ km}^2$. Llama la atención que en enero se hicieron presentes nubes bajas en el sector norte de la Pampa del Tamarugal, lugar en que agosto presentó ausencia total de estratocúmulos.

Para agosto, en importantes sectores oceánicos la frecuencia fue sobre el 85% alcanzando un máximo de 97.9% y la menor frecuencia no bajó del 60%. Por su parte, enero presentó en el océano una máxima de 36% y una mínima de 0%; ambas máximas se produjeron bastante alejadas del continente, pero las mínimas no coinciden en su posición geográfica, la de invierno ocurrió frente al río Loa y en enero en el sector

oceánico norte.

En el mes de invierno es notorio un cordón longitudinal casi generalizado sobre el farellón costero que varía entre un 60 y 85% de frecuencia. Entre el farellón costero y las primeras cumbres de la cordillera de la Costa existen abundantes sectores que varían entre 20 y 50% de frecuencia mensual, mientras que en el sector interior del continente (Pampa del Tamarugal) la frecuencia mensual no supera el 15%. Para enero no se aprecia claramente el cordón sobre el farellón costero, entre el farellón y la cordillera costera existen abundantes sectores que varían entre 0.2 y 3.5% mientras que en el interior del continente (Pampa del Tamarugal) la frecuencia mensual no superó el 0.5%.

f) Detección de corredores de penetración

La revisión de los mapas temáticos GOES se utiliza en la detección de corredores de penetración, desde el océano hasta la cordillera de la costa y aquéllos que la atraviesan llegando a la Pampa del Tamarugal. En las Figuras 13a y b

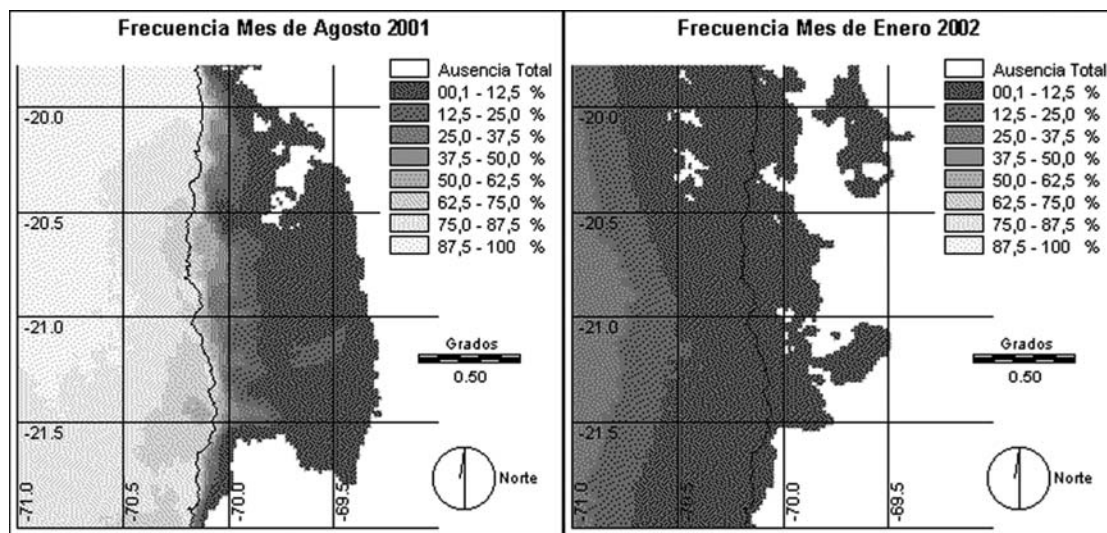


Figura 12. Comparación frecuencias entre agosto 2001 y enero 2002.

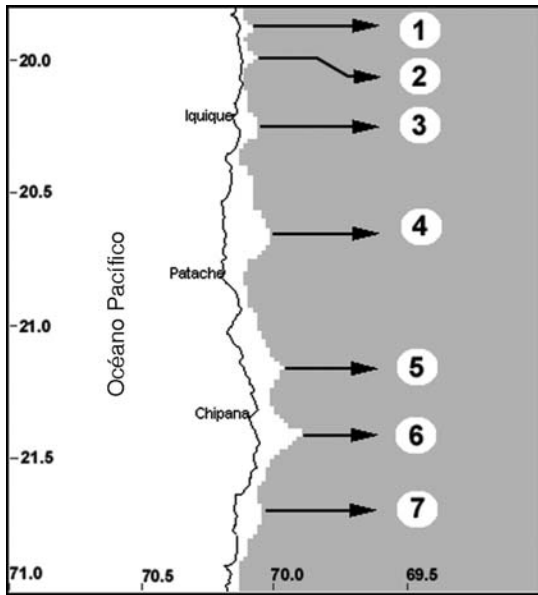


Figura 13a. Corredores costeros.

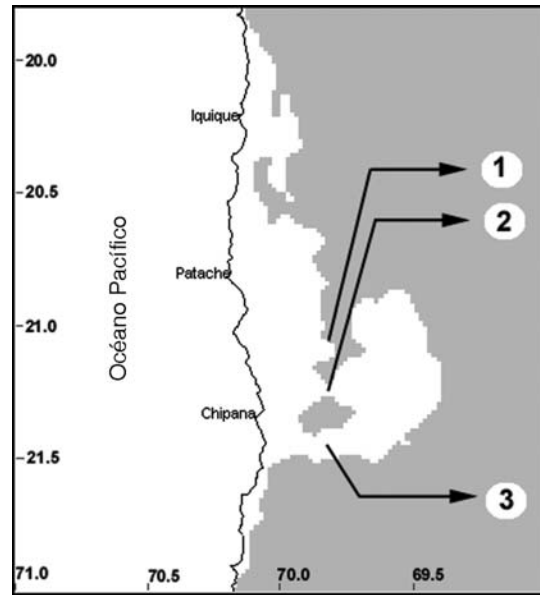


Figura 13b. Corredores interiores.

se exhiben, respectivamente, los corredores costeros e interiores más frecuentes.

Para el mes de invierno, los corredores costeros presentan frecuencias promedios entre 50 y 70%, incluyendo algunos sectores con frecuencias sobre el 85%. Por su lado, los corredores interiores muestran frecuencias promedios entre 15 y 30%, adentro de ellos contienen sectores con frecuencias mayores a 35%.

En enero los corredores costeros tienen frecuencias promedios no mayores a 3% con algunos sectores que alcanzan hasta un 5%, mientras que los interiores presentan frecuencias promedios de 1% con algunos sectores que alcanzan el 2% como máximo.

La información de frecuencias obtenida de estos análisis, junto a un estudio de relieve de cada uno de los corredores que se está realizando, permitirá determinar en el futuro sectores con mayor probabilidad de captación de agua provenientes del estratocúmulo.

CONCLUSIONES

Las imágenes del satélite GOES son adecuadas en su resolución temporal, ya que permiten seguir los procesos dinámicos que presenta el estratocúmulo. En cuanto a sus características espectrales, éstas presentan limitaciones, ya que las nubes medias-altas impiden las observaciones de los objetos cubiertos por ellas, como también la gruesa resolución espacial no permite aclarar ciertas confusiones en la detección de eventos advectivos y radiativos.

El comportamiento de la nube estratocúmulo mostró claramente un ciclo diario, en donde la máxima expansión se produce en las madrugadas, mientras que la mínima es alrededor del mediodía. Si bien el ciclo diario para ambos meses muestra la misma tendencia, en agosto se presenta mucho más definido que en enero. Este ciclo fue determinado indistintamente por ambos cálculos, el de área cubierta y el de frecuencia de presencia.

La nube estratocúmulo estuvo presente en los dos meses estudiados, siendo agosto notoriamente superior a enero en cuanto a superficie cubierta, ocho veces en el área total y 37 veces en el sector continental.

En el mes de invierno, el comportamiento de la nubosidad baja sobre el continente se explica en casi un 90% por el comportamiento de la gran masa nubosa que se genera en el mar, mientras que en el mes de verano esta relación no alcanza el 15%.

Tanto las imágenes como la metodología diseñada permiten reconocer lugares de mayor potencial de colección de agua de niebla con base en la frecuencia de presencia de nube estratocúmulo sobre un área determinada.

Lo anterior, sumado a la validación en tiempo real que se ha llevado a cabo en relación con la información obtenida de las herramientas de percepción remota, en este caso GOES-Imager, permite que con trabajos de terreno breves y de costos moderados, se realice un seguimiento acucioso de la nube mediante herramientas satelitales y así se pueda determinar en forma bastante precisa y fiable la estacionalidad e intensidad de la presencia de niebla, con miras al aprovechamiento del potencial hídrico que ésta tiene, ya sea para uso doméstico, ecológico, reforestación u otro uso que se le quiera dar al agua obtenida.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido realizada gracias al proyecto Fondecyt 1010801 año 2001 "La importancia de la niebla y lluvia en ecosistemas de oasis de niebla en el desierto costero de Tarapacá con especial énfasis en la vegetación y entomofauna".

REFERENCIAS

Bendix, J. and M. Bachman, M. (1993), "Climatology of fog layers in the Alpine Region-a

study based on AVHRR data", *6TH AVHRR Data User's Meeting*, Italy, 6, pp. 237-243.

Bendix, J. (2001), "A 10-year fog climatology of Germany and the Alpine region based on satellite data-preliminary results", *Proceedings of the Second International Conference on Fog and Fog Collection*, Canada, pp. 357-360.

Burgess, S., E. Dubinsky and T. Dawson (2001), "The role of fog in the ecology and water relations of coast redwood *Sequoia sempervirens*", *Proceedings of the Second International Conference on Fog and Fog Collection*, Canada, pp. 121-124.

Cereceda, P., R. S. Schemenauer and M. Suit (1992), "An alternative water supply for Chilean coastal desert villages", *Intl. J. Water Resource Development*, 8, pp. 53-59.

Cereceda, P., L. Villegas, P. Osses and R. S. Schemenauer (1998), "Evaluation of the use of fog water for regeneration of arid ecosystems", *First International Conference of Fog and Fog Collection*, Canada, pp. 461-463.

Cereceda, P., H. Larrain, P. Lázaro, P. Osses y R. S. Schemenauer (2000), "La niebla, agua potable para zonas rurales", *Terra Australis*, 45, pp. 143-160.

Cereceda, P., P. Osses, H. Larraín, M. Farías, M. Lagos, R. Pinto and R. S. Schemenauer (2002), "Advective, orographic and radiation fog in the Tarapaca region, Chile", *Atmospheric Research*, vol. 64, pp. 261-271.

Espejo R., C. Burgos, R. Zuleta, L. Martínez, H. Correa y A. Gioda (1993), "Balance teórico y experimental de captación de agua de los estratocúmulos costeros", *III Encuentro de Física*, Chile, pp. 237-246.

Espejo, R. (1998), "Coast fog water potential and its applications", *First International Conference of Fog and Fog Collection*, Canada, pp. 341-343.

Espejo, R. (2001), "Climatological and microbiological characteristics of the camanchaca

- phenomenon at Cerro Moreno, Antofagasta, Chile", *Proceedings of the Second International Conference on Fog and Fog Collection*, Canada, pp. 463-466.
- Farías, M., M. Lagos, P. Cereceda, H. Larraín, P. Osses, R. Pinto y R. Núñez (2001), "Metodología para el análisis del comportamiento espacio-temporal de nubes estratocúmulos mediante percepción remota, con énfasis en su penetración en el desierto costero de Tarapacá", *XXII Congreso Nacional y VII Internacional de Geografía*, Chile, pp. 35-43.
- Farías, M., R. Núñez, P. Cereceda, P. Osses y H. Larraín (2002), "Análisis del comportamiento espacial y temporal de la nube estratocúmulo en el Norte Grande de Chile durante el mes de agosto de 2001 mediante imágenes GOES", *VII Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra*, Chile [CD].
- Fuenzalida, H., J. Rutllant, P. Aceituno and J. Vergara (1988), "On the coastal stratocumuli variability in Chile at 30°S, Project Camanchaca-Chile", *Meteorological Group Technical Report*, pp. 01-88.
- Fuenzalida, H., J. Rutllant and J. Vergara (1989), "Meteorological aspect of water collection from stratocumuli in northern Chile", *Third International Conference on Meteorology and Oceanography in the southern hemisphere*, Argentina, pp. 156-161.
- Garreaud, R., J. Rutllant, J. Quintana, J. Carrasco and P. Minnis (2001), "CIMAR 5: A snapshot of the lower troposphere over the Subtropical Southeast Pacific", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol 82, pp. 2193-2207.
- Garreaud, R., J. Rutllant and H. Fuenzalida (2002), "Coastal lows along the subtropical West Coast of South America: mean structure and evolution", *American Meteorological Society*, vol 130, pp. 75-88.
- Garreaud, R. and J. Rutllant (2003), "Coastal lows along the subtropical West Coast of South America: numerical simulation of a typical case", *American Meteorological Society*, vol 131, pp. 891-908.
- IGM (1985), *Geografía: I Región de Tarapacá*, Geografía de Chile, vol 22.
- Klein, S. and D. Hartmann (1993), "The seasonal cycled of low stratiform clouds", *Journal of Climate*, 6, pp. 1587-1606.
- Larraín, H., F. Velásquez, R. Espejo, R. Pinto, P. Cereceda, P. Osses y R.S. Schemenauer (2002), "Fog measurements at the site "Falda Verde, North of Chañaral, compared with other North Chilean fog stations", *Atmospheric Research*, vol 64, pp. 271-284.
- Marzol, M., P. Dorta, P. Valladares, P. Morin, J. Sánchez and M. Abreu (1994), "La captation de l'eau à Tenerife (iles Canaries). L'utilisation des brouillard", *Association Internationale de Climatologie*, vol 7, pp. 83-91.
- Minnis, P. and E. Harrison (1984), "Diurnal variability of regional cloud and clear-sky radiative parameters derived from GOES data. Part II: November 1978 cloud distributions", *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol 23, pp. 1012-1031.
- Olivier, J. (1997), "Fog: a possible solution to rural water problems?", *S.A. Geographical Journal*, vol. 79, pp. 161-165.
- Olivier, J. (1998), "A high elevation fog water collection experiment in South Africa", *First International Conference of Fog and Fog Collection*, Canada, pp. 441-444.
- Osses, P., P. Cereceda, H. Larraín and R. S. Schemenauer (1998), "Influence of relief on the origin and behaviour of fog at Tarapaca, Chile", *First International Conference of Fog and Fog Collection*, Canada, pp. 245-247.
- Osses, P., P. Cereceda, R. S. Schemenauer, H. Larraín y C. Correa (2000), "Los atrapanieblas del santuario del Padre Hurtado y sus proyecciones en el combate a la desertificación", *Norte Grande*, vol 26, pp. 61-67.

- Osses, P., M. Farías, R. Nuñez, P. Cereceda and H. Larraín (2005a), "Coastal fog, satellite imagery, and drinking water: student fieldwork in the Atacama Desert", *Geocarto International*, vol 20, no. 1, pp. 69-74.
- Rozendaal, M., C. Leovy and S. Klein (1995), "An observational study of diurnal variations of the marine stratiform clouds", *Journal of Climate*, 8, pp. 1795-1809.
- Sabino, A. A. (1998), "Fog water collection in Cape Verde Island: An alternative source of water for agriculture and domestic use", *First International Conference of Fog and Fog Collection*, Canada, pp. 445-448.
- Schemenauer, R. S. and P. Cereceda (1994), "Fog collection's role in water planning for developing countries", *Natural Resources Forum ONU*, vol. 18 (2), pp. 91-100.
- Schemenauer, R. S. and P. Cereceda (1997), "Fog Collection", *Tiempo (UK)*, pp. 17-21.
- Wang, Q., B. Deng and H. Xu (2001), "The experimental study on Beijing urban fog and its effect on environment", *Second International Conference on Fog and Fog Collection*, Canada, pp. 121-124.