

VARIABILIDAD ATMOSFÉRICA DE ALTA FRECUENCIA EN EL BORDE ORIENTAL DEL ANTICICLÓN DEL PACÍFICO SURESTE

HIGH FREQUENCY ATMOSPHERIC VARIABILITY IN THE EASTERN RIM OF THE SOUTHEAST PACIFIC ANTICYCLONE*

RENÉ D. GARREAU¹
JOSÉ A. RUTLLANT²

Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.
Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile.

¹ rgarreau@dgf.uchile.cl,

² jrutllan@dgf.uchile.cl

Recepción: 1º de marzo de 2004 - Versión corregida aceptada: 3 de febrero de 2006.

RESUMEN

La variabilidad de alta frecuencia en la cobertura estrato-cumuliforme sobre el margen oriental del anticiclón subtropical del Pacífico sureste constituye un elemento central del clima regional al modular profundamente fluctuaciones de mayor período. Esta variabilidad es particularmente marcada sobre la franja costera debido al ciclo diario de insolación y al fenómeno genéricamente conocido como depresiones costeras.

Sobre la base de cartas meteorológicas (Reanálisis) y datos de superficie y altura obtenidos durante el crucero CIMAR 6 Islas Oceánicas se documenta y discute el efecto de la variabilidad de escala sinóptica en la nubosidad asociada a la capa límite marina y en la inversión térmica que la limita por arriba. Esta variabilidad fue más marcada durante la primera mitad del CIMAR 6, debido a la proyección de perturbaciones de latitudes medias sobre el sector subtropical del Pacífico sur-oriental. La amplitud de estas perturbaciones resultó ser más pronunciada en la costa, posiblemente debido a ascensos y descensos realizados por los Andes. El flujo cálido del este y el descenso de la inversión térmica asociados a la entrada de dorsales cálidas en altura que siguieron a estas perturbaciones se extendió hasta unos 800 km mar afuera, aunque una delgada capa superficial mantuvo la dirección sur (hacia el Ecuador) en los vientos. Se puede concluir que a nivel local no existe una relación simple entre subsidencia de gran escala y espesor de la capa límite marina, probablemente debido a la advección cálida que produce el viento del este al descender sobre la ladera andina.

Palabras claves: Capa límite marina, estratocúmulos, Pacífico sur-oriental, anticiclones subtropicales.

ABSTRACT

High-frequency variability in the stratocumulus cloud cover at the eastern rim of the subtropical anticyclone of the southeast Pacific constitutes a central element of the regional climate as it deeply modulates longer period fluctuations. This variability is especially marked over the coastal strip due to the diurnal solar radiation cycle and to the existence of a generic phenomenon known as coastal lows.

Based on weather charts (Reanalysis) together with surface and upper-air data obtained during the CIMAR 6 cruise, the effect of synoptic-scale variability on the stratocumulus within the marine boundary layer and the inversion layer above it, is documented and discussed. This variability was outstanding during the first half of CIMAR 6, due to the projection of mid-latitude disturbances over the subtropical sector of the southeastern Pacific. The amplitude of these disturbances was more pronounced over the coastal strip,

* Proyecto CONA-C61 00-07.

possibly in connection with enhanced up and down flows by the Andes. The warm easterlies and the descent of the subsidence inversion associated with the onset of upper-air ridges that followed those disturbances, extended as far as 800 km offshore, though winds in a shallow surface layer maintained the south (equatorward) direction. It can be concluded that, at a local level, there is no simple relationship between large scale subsidence and depth of the marine boundary layer, probably due to the warm advection produced by the easterlies as they flow down the Andes slope.

Key words: Marine boundary layer, Stratocumulus, Southeastern Pacific, Subtropical anticyclones.

INTRODUCCIÓN

El clima frente a la costa del norte y centro de Chile está controlado por la presencia del anticiclón subtropical del Pacífico sur-oriental, que produce condiciones muy estables en la troposfera baja (inversión térmica de subsidencia), temperaturas del mar relativamente bajas, vientos predominantes desde el sur y una extensa cubierta de estratocúmulos (SC). Esta cubierta juega un importante papel en el balance superficial de radiación, al reflejar una parte importante de la radiación solar que incidiría sobre ella con cielos despejados, enfriando la superficie del mar y la columna de aire en directa interacción con ella (capa límite marina: CLM). La mezcla al interior de la CLM se mantiene por el enfriamiento del tope de la nubosidad (alta emisión de radiación infrarroja al espacio) y por la mezcla mecánica que produce el cizalle del viento en su interior. Las condiciones medias de la CLM y la circulación de gran escala sobre el Pacífico sur-oriental fueron documentadas sobre la base de los datos recopilados durante el crucero CIMAR 5 los que constituyeron la primera base de datos *in situ* en esta región del planeta (Garreaud *et al.*, 2001; Rutllant & Garreaud, 2005).

Superpuestas a estas condiciones medias, existen fluctuaciones de alta frecuencia (escalas de tiempo diario a intra-estacional) del espesor de la CLM, cobertura de SC, intensidad y dirección del viento, temperatura del mar, presión atmosférica y otras variables. Estas fluctuaciones son particularmente marcadas en la franja costera y tienen un fuerte impacto en la meteorología regional. Entre los mecanismos causantes de esta variabilidad está el ciclo diario de insolación (e.g. Rutllant *et al.*, 2003; Garreaud & Muñoz, 2004), la presencia de perturbaciones atmosféricas atrapadas a la costa en la escala de 3-10 días (Garreaud *et al.*, 2002), sistemas frontales y bajas segregadas (5-15 días), y fenómenos de gran escala atmosféricos y oceánicos (30-90 días; Shaffer *et al.*, 1997).

Particular interés tienen las perturbaciones atmosféricas atrapadas a la costa de escala sinóptica (o sub-sinóptica), genéricamente conocidas como *depresiones costeras*, debido a la intensidad de

sus manifestaciones y su difícil pronóstico. Sus manifestaciones típicas incluyen:

- episodios de vientos del sur (*surazos*), con implicancias en las pesquerías (surgencia costera) y en la navegación (oleaje y viento).
- entrada de nieblas y nubosidad baja (*camanchacas*), con implicancias en la seguridad del transporte terrestre, marítimo, aéreo (visibilidad) y disponibilidad de agua dulce en atrapanieblas.
- comienzo y término de episodios de contaminación atmosférica en Santiago asociados con la depresión/ levantamiento de la CLM.
- ocurrencias de días despejados y cálidos en el sector delantero de la depresión costera, aprovechables en actividades de turismo y recreación.

Sobre la base de datos meteorológicos de superficie y altura obtenidos durante el crucero CIMAR 6 (26 de septiembre al 13 de octubre, 2000), este estudio documenta aspectos de la variabilidad de escala sinóptica de la capa límite marina y de la inversión térmica que la limita por arriba en el borde oriental del sector subtropical del Pacífico sur-oriental. Entre los objetivos específicos del presente estudio se consideró:

- a. estudiar el borde oriental del anticiclón subtropical en relación a la variabilidad de la subsidencia, temperatura del mar y presión de superficie, estructura de la capa límite; y el efecto sobre ella de las depresiones costeras.
- b. estudiar la asociación de los procesos descritos en (a) con la cobertura, espesor, y altura de la cubierta de SC que caracteriza el área de estudio, en particular los marcados contrastes asociados con la propagación de las depresiones costeras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante el crucero CIMAR 6 a bordo del AGOR "Vidal Gormaz" realizado entre el 26 de septiembre y el 13 de octubre se contó con observaciones (promedios de 30 minutos) en cubierta de viento, temperatura, humedad, radiación solar y

presión atmosférica a través de una estación meteorológica automática Campbell. Los valores absolutos de viento fueron obtenidos de los vientos medidos (relativos al buque) con la posición satelital (GPS) durante la navegación y con los datos de rumbo durante las estaciones oceanográficas. El trayecto del buque incluyó una transecta casi zonal (a 33,5° S) desde la costa (Valparaíso) al archipiélago Juan Fernández entre los días 26 de septiembre y 6 de octubre, una transecta meridional (a 80° W) entre Juan Fernández y la isla San Félix entre el 6 y 7 de octubre, una transecta zonal (a 27° S) desde San Félix al continente (Caldera) entre el 8 y 11 de octubre, y una última transecta a lo largo de la costa entre Caldera y Valparaíso entre el 11 y 13 de octubre.

En colaboración con la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) se hicieron a lo largo del trayecto 30 lanzamientos de radiosondas Vaisala RS 80 15S con posicionamiento satelital GPS, a las 12 y 24 TUC (Tiempo Universal Coordinado) (8 AM y 8 PM), que fueron complementados por lanzamientos similares en la isla Robinson Crusoe. Estos, junto a los lanzamientos de rutina que se realizan diariamente en Santo Domingo (DMC), permitieron caracterizar la estructura vertical de la CLM y la inversión de subsidencia.

La circulación atmosférica de gran escala fue caracterizada empleando los reanálisis producidos por el NCEP-NCAR (detalles en Kalnay *et al.*, 1996), los cuales corresponden a campos en grillas regulares de 2,5° latitud x 2,5° longitud, en 7 niveles de presión (1.000, 925, 850, 700, 500, 300 y 200 hPa), disponibles a las 00, 06, 12 y 18 TUC. Adicionalmente, el viento sobre la superficie del mar (nominalmente a 10 m sobre ella) fue obtenido de un escaterómetro a bordo del satélite QuickSCAT, el cual muestrea los vientos sobre franjas que cubren cualquier lugar del planeta dos veces al día con una resolución espacial de 50 km (e.g., Liu *et al.*, 1998). La cubierta nubosa y en particular los SC sobre el Pacífico sur-oriental fue caracterizada usando imágenes visibles e infrarrojas del satélite GOES-8, disponibles cada 3 horas.

RESULTADOS

La variabilidad de escala sinóptica durante el CIMAR 6 se ilustra mediante una sección presión-tiempo de la velocidad vertical a 33,5° S promediada entre 72,5° W y 80° W (Fig. 1a) y los campos reanalizados de presión a nivel del mar y altura geopotencial del nivel 500 hPa para 3 días

seleccionados (Fig. 2). En términos generales, la variabilidad sinóptica fue más marcada durante la primera mitad del crucero CIMAR 6, debido a la proyección de perturbaciones de latitudes medias sobre el sector subtropical del Pacífico sur-oriental. Entre el 27 y 29 de septiembre se observó una situación frontal con una vaguada en altura frente a Chile central. Una baja segregada de rápido desplazamiento entre el 1 y 2 de octubre da paso a la entrada de una dorsal cálida los días 3 y 5. Después de una última y más débil perturbación el día 8, el régimen anticiclónico y la subsidencia de gran escala sobre el sector subtropical se reestablecen casi hasta el final del crucero (9 al 16 de octubre). El paso de las perturbaciones extratropicales genera un complejo patrón de nubosidad, incluyendo nubosidad frontal, áreas despejadas delante del frente y una cubierta de SC espacialmente restringida (Figs. 3a y 3b). El período más estable hacia el final del crucero muestra en cambio una cubierta de SC más extensa y uniforme (Fig. 3c).

Los efectos de las perturbaciones sinópticas en la estructura de la CLM y la inversión de subsidencia se pueden apreciar en las secciones verticales (0-6.000 m) de temperatura potencial y humedad específica para (a) Santo Domingo, (b) Robinson Crusoe y (c) AGOR "Vidal Gormaz" (Fig. 1b-d). En general, los cambios de temperatura se aprecian primero sobre el océano abierto (Robinson Crusoe / "Vidal Gormaz"), consistente con el desplazamiento hacia el este de las perturbaciones extratropicales. Sin embargo, la amplitud de los cambios tiende a ser más pronunciada en la costa (Santo Domingo), posiblemente debido a la amplificación de la velocidad vertical (ascenso y descenso) que ejerce la cordillera de los Andes. Existen también períodos en que las condiciones cerca de la costa y en océano abierto evolucionan en forma opuesta. Por ejemplo, el día 15 de octubre la troposfera baja se estaba calentando en Robinson Crusoe pero enfriando en Santo Domingo, indicativo del atrapamiento a la costa de la perturbación que causó este enfriamiento. La comparación entre velocidad vertical de gran escala y las fluctuaciones de la base de inversión (Figs. 1a y 1b-d), revela además que no existe una relación biunívoca entre estas variables, presumiblemente debido al efecto de la advección horizontal de temperatura.

Los tres radiosondas muestran el enfriamiento troposférico, y el debilitamiento y ascenso de la inversión de subsidencia durante los períodos en que se predomina ascenso de gran escala en la región (días 28 de septiembre, 2-3 y 8 de octubre). El calentamiento en la troposfera baja aso-

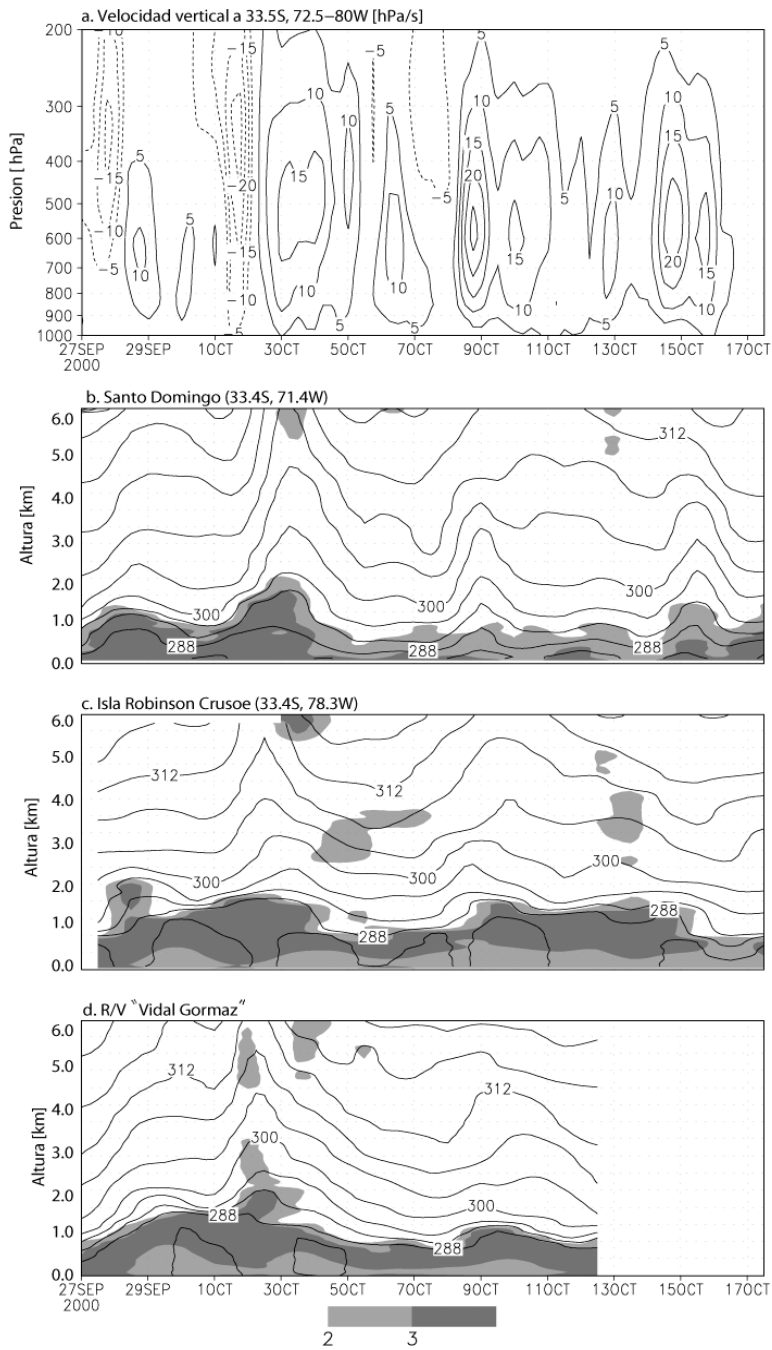


Fig. 1: (a) Corte presión-tiempo de la velocidad vertical (Pa/s) a 33,5° S promediada entre 72,5° W y 80° W. Intervalo de contornos es 5 Pa/s, el contorno 0 es omitido, y valores negativos (ascenso) en línea de puntos. (b) Corte altura-tiempo de la temperatura potencial (contornos cada 3K) y la humedad específica (sombreado claro: > 2 g Kg⁻¹; sombreado oscuro: > 4 g Kg⁻¹) obtenidos de los radiosondeos realizados en Santo Domingo. (c) Como en (b) pero para Robinson Crusoe. (d) Como en (b) pero para el AGOR "Vidal Gormaz".

Fig. 1: (a) Pressure-time section of the vertical velocity (Pa/s) at 33,5° S, averaged between 72,5° W - 80° W. Contour interval is 5 Pa/s, the zero contour has been omitted and negative values (upward motion) in dashed lines. (b) Height-time section of the potential temperature (contoured every 3K) and specific humidity (light shading: > 2 g Kg⁻¹, dark shading: > 4 g Kg⁻¹). (c) As (b) but for Robinson Crusoe. (d) As (b) but for AGOR "Vidal Gormaz".

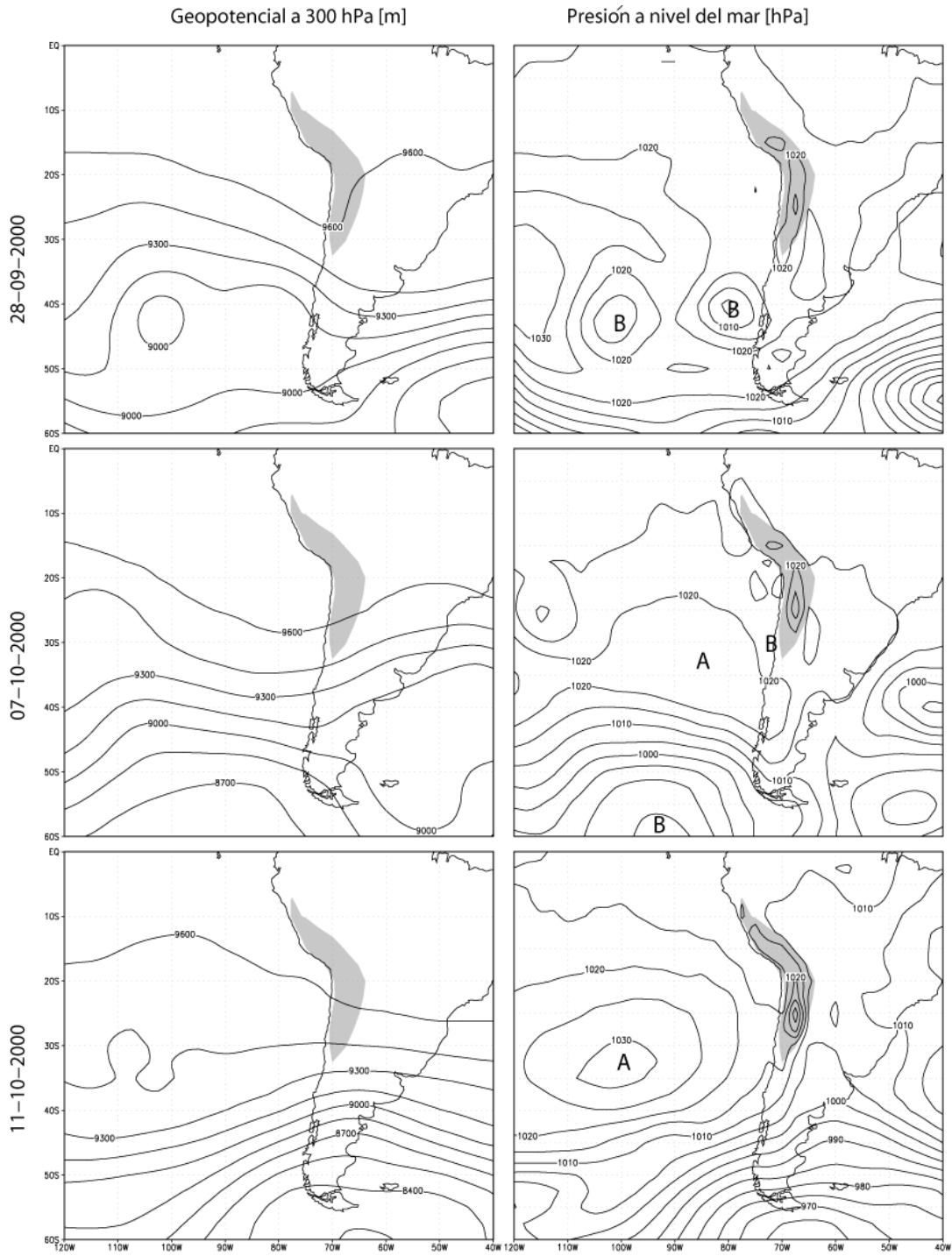


Fig. 2: Presión a nivel del mar (derecha, contornos cada 5 hPa) y altura geopotencial de 300 hPa (izquierda, contornos cada 150 m) para los días el 28 de septiembre, 7 y 11 de octubre de 2000.

Fig. 2: Sea level pressure (right, contoured every 5 hPa) and geopotential height at 300 hPa (left, contoured every 150 m) levels for September 28, and October 7, 11 - 2000.

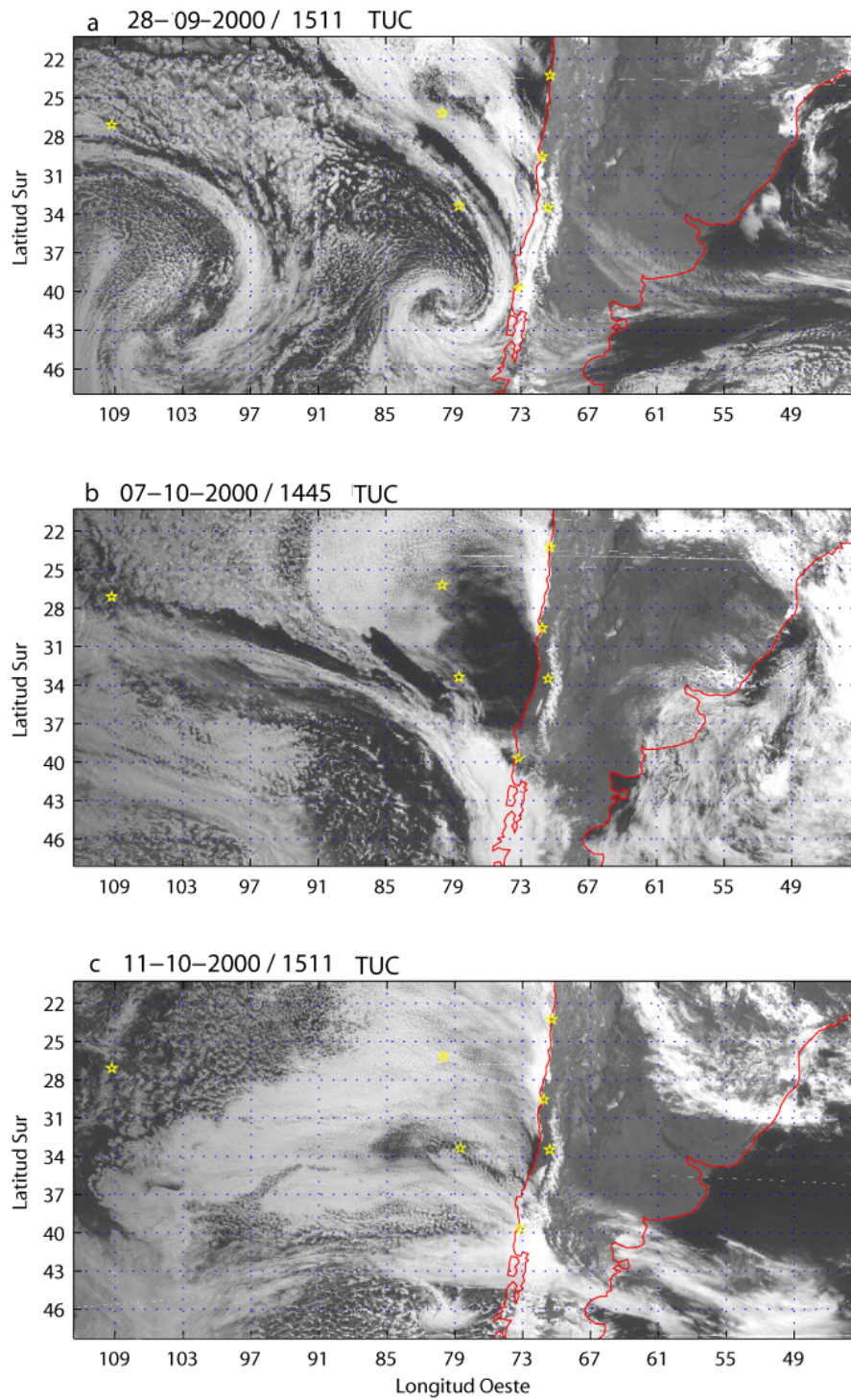


Fig. 3: Imagen satelital GOES-8 en el espectro visible para tres días durante CIMAR 6 (fecha y hora indicada en la parte superior de cada panel).

Fig. 3: Visible GOES-8 images for three days during CIMAR 6 (date and time indicated at the top of each panel).

ciado a la entrada de la dorsal en altura desde el oeste a partir del día 4 de octubre (Fig. 2a) también fue observada en océano abierto y cerca de la costa. El refuerzo y descenso de la capa de inversión térmica se extendió hasta la superficie en Santo Domingo, notándose sólo un pronunciado aumento en la estratificación baja en el trayecto entre las islas Robinson Crusoe y San Félix. En Santo Domingo la depresión costera asociada a la entrada de la dorsal cálida en la troposfera media culmina el día 7, siendo precedida el 5 y 6 de octubre por vientos cálidos del E y SE forzados por la entrada más al sur de una alta fría posfrontal (Fig. 2b). Una evolución similar ha sido descrita por Garreaud *et al.*, 2002 y Garreaud & Rutllant, 2003. Estos vientos, que habitualmente se extienden costa afuera despejando la nubosidad (Fig. 3b) cuando la base de la inversión térmica desciende por debajo del nivel de condensación, fueron observados en una capa entre 200 y 1.500 m sobre el mar cuando el buque, navegaba en las cercanías de Alejandro Selkirk (Fig. 4). Sin embargo, tanto los vientos observados sobre la cubierta del buque (Fig. 5d) como los vientos superficiales obtenidos del satélite QuikScat, mantuvieron una dirección del S-SW (no mostrados).

La Fig. 4 ilustra la aparición de las componentes del este en los vientos de la troposfera baja a

partir de unos 150 m, extendiéndose hasta unos 800 m el día 3 a las 12 TUC y hasta unos 1.500 m 24 horas más tarde (Fig. 4a). El correspondiente descenso de la base de la capa de inversión térmica entre el 2 de octubre a las 12 TUC (Fig. 4b), en que ésta se encontraba cerca de los 2.000 m de altitud y con cierto nivel de desacoplamiento por efecto de la baja segregada, y el 4 a las 12 TUC. Entre el 10 y 16 de octubre se mantuvieron condiciones anticiclónicas con perturbaciones menores que se reflejaron como enfriamientos transientes en la troposfera baja.

La marcha temporal de las variables meteorológicas observadas en la cubierta del AGOR "Vidal Gormaz" entre el 27 de septiembre y el 14 de octubre (Fig. 5) refleja el paso de las perturbaciones descritas, particularmente en la temperatura del aire (Fig. 5a) y en la humedad relativa (Fig. 5b). La primera depresión costera (día 30 de septiembre) presentó un brusco descenso en la humedad relativa mientras el calentamiento del aire parece haber sido poco importante. Lo contrario ocurrió cerca de la culminación de la segunda depresión costera (7 de octubre) en que el significativo calentamiento del aire y moderado descenso de la humedad relativa a bordo se extendieron hasta el día 9. Los intensos vientos encontrados hacia el final del trayecto (Fig. 5d) corresponden al ré-

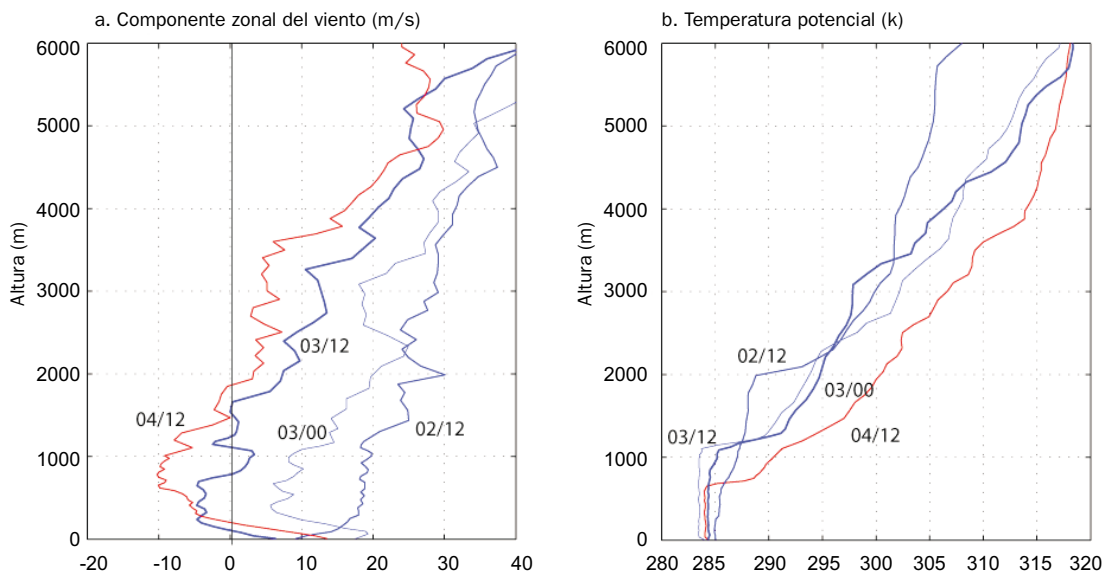


Fig. 4: Perfiles verticales obtenidos de los radiosondeos lanzados a bordo del AGOR "Vidal Gormaz" para los días 02 (12 TUC), 03 (00 y 12 TUC) y 04 (12 TUC) de octubre de 2000: a) componente zonal del viento [m s^{-1}], y b) temperatura potencial ($^{\circ}\text{K}$).

Fig. 4: Vertical profiles obtained from the rawinsondes launched on board of the AGOR "Vidal Gormaz" for the 02 (12 UTC), 03 (00 and 12 UTC) and 04 (12 UTC) October 2000: (a) zonal wind component [m s^{-1}] and (b) potential temperature ($^{\circ}\text{K}$).

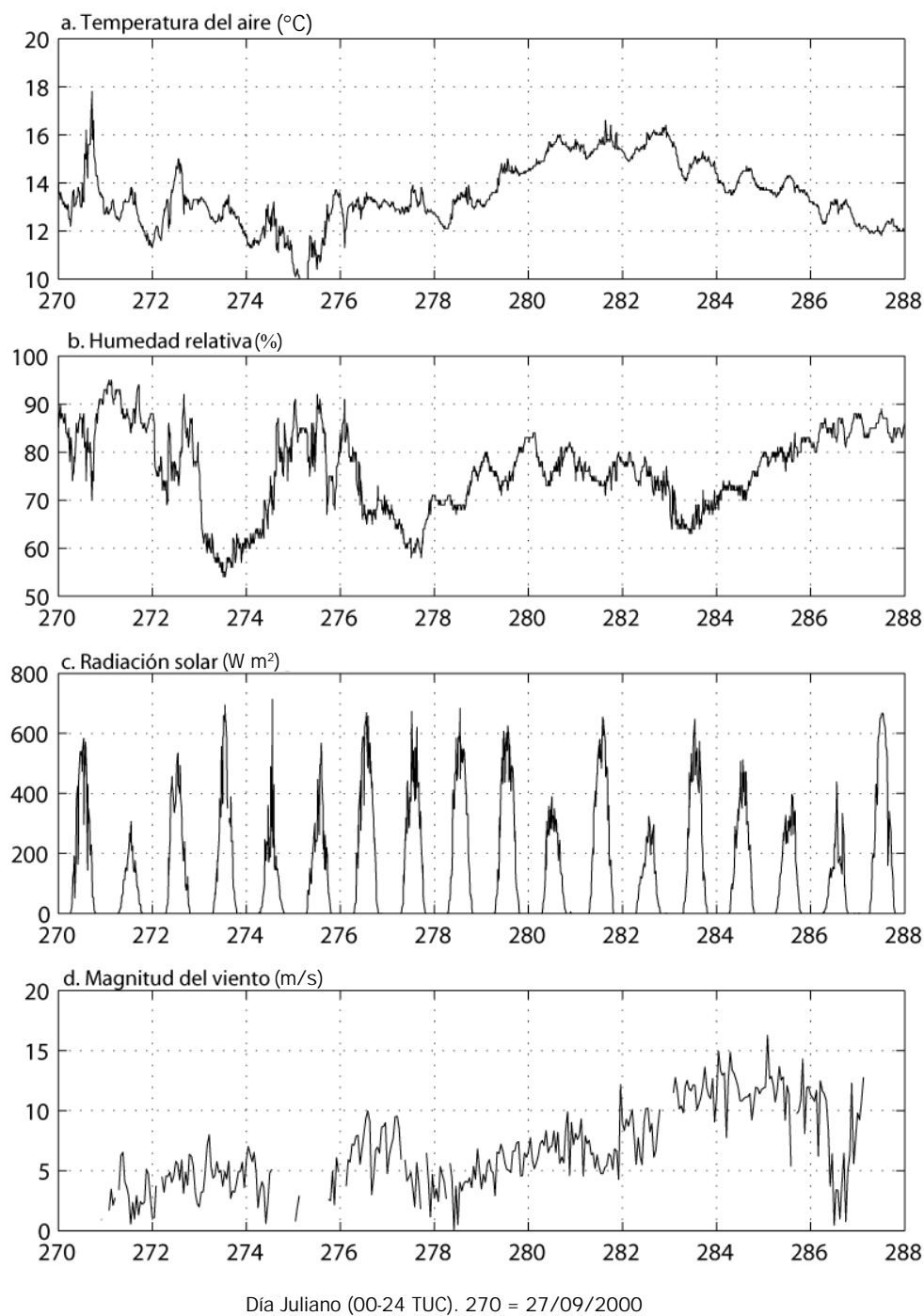


Fig. 5: Marcha temporal de la: (a) temperatura del aire, (b) humedad relativa, (c) radiación solar global y (d) velocidad del viento, observadas a bordo de la cubierta superior del AGOR "Vidal Gormaz" durante CIMAR 6.

Fig. 5: Time series of deck-level (a) air temperature, (b) relative humidity, (c) solar radiation and (d) wind speed, observed on board of the AGOR "Vidal Gormaz" during CIMAR 6.

gimen anticiclónico, primero con los alisios y luego los vientos del sur cerca de la costa, particularmente durante los días más despejados (9, 10 y 13 de octubre).

CONCLUSIONES

El análisis preliminar de las observaciones *in situ* obtenidas durante el crucero CIMAR 6, junto a reanálisis atmosféricos y datos satelitales (cobertura de nubes y vientos de superficie) permite concluir que:

- Los vientos en superficie obtenidos desde satélite (e.g. QuikSCAT) no representan necesariamente la dirección dominante del viento ni la divergencia de flujo integrada en el seno de la capa límite marina durante la ocurrencia de depresiones costeras.
- Las fluctuaciones en el espesor de la capa límite marina y variables asociadas en respuesta a la ocurrencia de depresiones costeras, son más rápidas y de mayor amplitud cerca de la costa. El calentamiento de la troposfera baja y aumento de la estabilidad tiende a manifestarse hasta unos 800 km costa afuera (es decir, son detectables en Robinson Crusoe y San Félix).
- A nivel local no existe una relación simple entre subsidencia de gran escala y espesor de la CLM. Aunque la subsidencia de gran escala es necesaria para mantener una CLM somera y bien mezclada, se observan períodos en que la CLM se deprime aun cuando la subsidencia de gran escala está disminuyendo, posiblemente debido a la advección cálida que produce el viento del este al descender sobre la ladera andina.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el esfuerzo de organización desplegado por el CONA y el constante apoyo de los oficiales y tripulación el AGOR "Vidal Gormaz" antes y durante el crucero. Asimismo, queremos destacar la dedicación y profesionalismo del Sr. José Núñez de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y la colaboración de los meteorólogos de esa misma repartición con base en la isla Robinson Crusoe. Este trabajo fue parcialmente apoyado por el Proyecto FONDECYT 1020833.

REFERENCIAS

- GARREAUD, R., J. RUTLLANT, J. QUINTANA, J. CARRASCO & P. MINNIS. 2001. CIMAR 5: A snapshot of the lower troposphere over the subtropical southeast Pacific. *Bull. Amer. Met. Soc.* 82: 2.193-220.
- GARREAUD, R., J. RUTLLANT & H. FUENZALIDA. 2002. Coastal lows along the subtropical west coast of South America: Mean structure and evolution. *Mon. Wea. Rev.* 130: 75-88.
- GARREAUD, R. & R. MUÑOZ. 2004. Diurnal cycles of the circulation and low-cloud cover over the subtropical southeastern Pacific. *J. of Climate*, 17, 1.699-1.710.
- KALNAY, E., M. KANAMITSU, R. KISTLER, W. COLLINS, D. DEAVEN, L. GANDIN, M. IREDELL, S. SAHA, G. WHITE, J. WOOLLEN, Y. ZHU, A. LEETMAA, B. REYNOLDS, M. CHELLIAH, W. EBISUZAKI, W. HIGGINS, J. JANOWIAK, K.C. MO, C. ROPELEWSKI, J. WANG, ROY JENNE & DENNIS JOSEPH, 1996. The NCEP/NCAR Reanalysis Project. *Bull. Amer. Met. Soc.* 77: 437-471.
- LIU, W. T., W. TANG & P. S. POLITO. 1998. NASA scatterometer provides global ocean-surface wind fields with more structures than numerical weather prediction. *Geoph. Res. Letters*, 25 (6), 761-764.
- RUTLLANT, J. & R. GARREAUD. 2004. Estratocúmulos en el Pacífico sudoriental subtropical durante el crucero CIMAR 5. *Cienc. Tecnol. Mar*, 28(1), 25-33.
- RUTLLANT, J., H. FUENZALIDA & P. ACEITUNO. Climate dynamics along the arid northern coast of Chile: The 1997-1998 Dinámica del Clima de la Región de Antofagasta (DICALIMA) experiment. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 108 (D17), 4358, doi:10.1029/2002JD003357, 2003.
- SHAFFER, G., O. PIZARRO, L. DJURFELDT, S. SALINAS & J. RUTLLANT. 1997. Circulation and low-frequency variability near the Chile coast: remotely-forced fluctuations during the 1991-1992 El Niño. *Journal Phys. Ocean.* 27: 217-235.