



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

HABILITACIÓN Y VALIDACIÓN DE EQUIPO SODAR PARA MEDICIÓN DE  
PERFILES VERTICALES DE VIENTO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA Y  
CLIMATOLOGÍA

NICOLÁS ANDRÉS DONOSO CASTRO

PROFESOR GUÍA:  
RICARDO MUÑOZ MAGNINO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JOSÉ RUTLLANT COSTA  
VICTOR VILLAGRÁN ORELLANA

SANTIAGO DE CHILE  
2017



RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL GRADO DE MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA  
POR: NICOLÁS ANDRÉS DONOSO CASTRO  
FECHA: 2017  
PROF. GUÍA: SR. RICARDO MUÑOZ MAGNINO

## HABILITACIÓN Y VALIDACIÓN DE EQUIPO SODAR PARA MEDICIÓN DE PERFILES VERTICALES DE VIENTO

Realizar mediciones viento en altura con técnicas tradicionales como globos cautivos y radiosondas es una tarea demandante en tiempo y recursos. Una de las soluciones a esto es la utilización de técnicas remotas como SODAR o LIDAR. El Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup> adquirió el año 2014 un SODAR y en el presente trabajo se presenta una habilitación del equipo mediante una campaña donde se comparan las mediciones contra Globo Cautivo, estación meteorológica en superficie y mediciones obtenidas de aviones (AMDAR).

Se utilizó como referencia a la comparación realizada contra el Globo Cautivo bibliografía que reúne 20 años de mediciones SODAR (Crescenti, 1995) utilizando estadísticos de sesgo, diferencia cuadrática media, precisión, y coeficiente de correlación. Se obtuvo resultados acorde a lo publicado en todos los estadísticos menos en el sesgo.

Los resultados del trabajo indican que el SODAR, según categorías del fabricante, mide con un alcance categorizado como bueno en el lugar seleccionado y las mediciones comparan bien con respecto al globo cautivo y no tan bien para las mediciones AMDAR, siendo esto último explicado por la distancia entre las mediciones y el terreno complejo de la zona.



*A mi familia y a todos los que amo.*



# Agradecimientos

No puedo dejar de agradecer al Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup> por adquirir el equipo SODAR que utilicé en este trabajo y a Meteodata por el tiempo y recursos invertidos.

Agradezco a todos los que participaron en la campaña de mediciones Ricardo Muñoz, René Garreaud, José Rutllant, Andrés Arriagada, Federico Flores, Cecilia Farías, Camilo Barahona, Andrea Orfanoz, Pamela Pizarro, Alicia Muñoz, Ilona Jaekel, Javier Rojas y Yenny Saavedra.

En el desarrollo del trabajo me ayudó Andrés Martínez y Marcelo Ibarra en la topografía presentada en el documento.

El video que muestra el montaje del equipo SODAR fue editado por Luz Fariña. Aldo Viscarra me ayudó en el montaje realizado para el video.

El apoyo y paciencia de Ricardo Muñoz me hizo ordenar y aterrizar muchas veces. Sin duda fue muy importante durante el proceso.

En especial agradezco a mi familia por el apoyo durante estos años.





# Tabla de Contenido

<b>Índice de Tablas</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Ilustraciones</b>	<b>xii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo . . . . .	2
1.2. Motivación . . . . .	2
1.3. Metodología . . . . .	2
<b>2. Revisión de antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Principios de medición del SODAR . . . . .	3
2.2. Tipos de SODAR . . . . .	4
2.2.1. SODAR Monoestático . . . . .	4
2.2.2. SODAR Biestático . . . . .	5
2.3. Aplicaciones de la tecnología SODAR . . . . .	6
2.4. Descripción del SODAR MFAS SCINTEC . . . . .	7
2.4.1. Características del SODAR MFAS Scintec . . . . .	8
2.4.2. Reprocesamiento de datos . . . . .	10
<b>3. Campaña de mediciones</b>	<b>11</b>
3.1. Descripción de sitio . . . . .	11
3.2. Mediciones meteorológicas en superficie . . . . .	12
3.3. Mediciones meteorológicas con Globo Cautivo . . . . .	15
<b>4. Resultados</b>	<b>16</b>
4.1. Contexto meteorológico de escala sinóptica . . . . .	16
4.2. Visión global de las mediciones obtenidas . . . . .	19
4.3. Descripción a nivel diario de las mediciones obtenidas . . . . .	24
4.3.1. Martes 7 de octubre . . . . .	24
4.3.2. Miércoles 8 de octubre . . . . .	25
4.3.3. Jueves 9 de octubre . . . . .	27
4.3.4. Viernes 10 de octubre . . . . .	28
4.4. Intercomparación entre mediciones SODAR y otros sistemas de medición . . . . .	29
4.4.1. Intercomparación SODAR-Globo Cautivo . . . . .	30
4.4.2. Intercomparación SODAR–Estación meteorológica en superficie . . . . .	38
4.4.3. Intercomparación SODAR–Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) . . . . .	43

<b>5. Conclusiones</b>	<b>46</b>
<b>6. Bibliografía</b>	<b>48</b>
<b>A. Perfiles AMDAR</b>	<b>50</b>
<b>B. Procesamiento por script Bash</b>	<b>52</b>
<b>C. Montaje del equipo SODAR</b>	<b>54</b>
<b>D. Mapas de geopotencial en 500 hPa</b>	<b>55</b>

# Índice de Tablas

2.1. Características del equipo SODAR MFAS según lo reportado por los fabricantes en el manual. . . . .	10
2.2. Características del equipo SODAR MFAS según lo reportado por los fabricantes en el manual. . . . .	10
3.1. Distancias desde el lugar de medición hasta lugares indicados en la primera columna . . . . .	11
3.2. Equipos y tipos de cálculos implementados en la estación meteorológica de superficie . . . . .	13
3.3. Especificaciones de los sensores del Globo Cautivo . . . . .	15
4.1. Resumen del sesgo (B), diferencia cuadrática media (C), precisión (S) y correlación lineal de Pearson (r) para los dos niveles de medición a 100 y 140 m.s.n.s, y su comparación con lo publicado por Crescenti (1995). . . . .	32
4.2. Tabla 1: Resumen del sesgo (B), diferencia cuadrática media (C), precisión (S) y correlación lineal de Pearson (r) para los dos niveles de medición en dirección y su comparación con lo publicado por Crescenti (1995). . . . .	35

# Índice de Ilustraciones

2.1. Primer facsímil publicado de la técnica SODAR (McAllister, 1968), en donde se muestra la intensidad del pulso retrodispersado. Se logra identificar el crecimiento de las plumas termales. En la parte superior se muestra la temperatura y velocidad de viento en superficie. . . . .	4
2.2. Imagen de un SODAR monoestático en donde se puede observar que posee tres transductores. Uno está orientado verticalmente y mide el viento vertical, mientras que los otros dos emiten/reciben en un ángulo de 30 grados (Scintec, 2013) con respecto a la vertical para lograr obtener las tres componentes del viento. . . . .	4
2.3. Registro fotográfico de la primera prueba realizada en el equipo SODAR que se utilizó en este trabajo. Se puede observar los 64 transductores piezo-eléctricos que se utilizan para la emisión de los pulso de sonido. Al igual que el SODAR que se muestra en la Figura 2.2 este equipo emite pulsos inclinados en 29° con respecto a la vertical pero utiliza un desfase entre los transductores para lograr emitir el frente de onda inclinado, generándose a la vez un lóbulo reflejado con 22° en el sentido opuesto al lóbulo primario Scintec (2013). . . . .	5
2.4. Esquema de un arreglo de SODAR biestático utilizado por Gaynor (1977) en Haswell, CO. Las antenas transmisoras están en los puntos B y C, mientras que el receptor está orientado verticalmente en el punto A. Se muestra a 300 metros del punto A la ubicación de una torre instrumentada de 150 metros de altura que fue utilizada para una validación. . . . .	6
2.5. Ángulos de emisión logrados por el efecto de desfase en las distintas columnas o filas de transductores. Se especifica el ángulo que posee el lóbulo principal y el reflejado. . . . .	8
2.6. Esquema de secuencia de medición típica del equipo SODAR Scintec MFAS.	8
2.7. Esquema del procesamiento de datos que realiza el equipo SODAR Scintec MFAS. . . . .	9
3.1. Topografía con líneas de nivel cada 100 metros y altura máxima de 1.880 m.s.n.m.. En un cuadrado negro se indica la ubicación del lugar donde se realizaron las mediciones. . . . .	12
3.2. Distribución de los equipos instalados. Con el número 1 se señala la ubicación del SODAR, con el número 2 la estación meteorológica en superficie y con el número 3 el punto de izaje del globo cautivo. . . . .	13
3.3. Imagen donde se muestra la instalación de la estación meteorológica en superficie y el SODAR . . . . .	14

4.1. Mapa de presión (Pa) a nivel del mar para el 6/10/2014 06:00 UTC. . . . .	17
4.2. Mapa de presión (Pa) a nivel del mar para el 7/10/2014 06:00 UTC. . . . .	17
4.3. Mapa de presión (Pa) a nivel del mar para el 8/10/2014 06:00 UTC. . . . .	17
4.4. Mapa de presión (Pa) a nivel del mar para el 9/10/2014 06:00 UTC. . . . .	18
4.5. Mapa de presión (Pa) a nivel del mar para el 10/10/2014 06:00 UTC. . . . .	18
4.6. Mediciones de la estación meteorológica en superficie. . . . .	19
4.7. Gráfico superior velocidad del viento medido por el SODAR, y en la figura inferior la velocidad del viento (3m) temperatura (1,5m) medido por la estación meteorológica automática. . . . .	20
4.8. Gráfico superior dirección del viento medido por el SODAR, y en la figura inferior la dirección del viento (3m) temperatura (1,5m) medido por la estación meteorológica automática. . . . .	21
4.9. Gráfico superior velocidad vertical medida por el SODAR, magnitudes positivas indican ascenso y las negativas un descenso. En la figura inferior la velocidad y dirección del viento medidas en superficie (3m). . . . .	22
4.10. Gráfico de velocidad de viento horizontal medido por el SODAR el día martes 7 de octubre. . . . .	24
4.11. Gráfico de velocidad de viento horizontal medido por el SODAR el día miércoles 8 de octubre. . . . .	26
4.12. Gráfico de velocidad de viento horizontal medido por el SODAR el día jueves 9 de octubre. . . . .	27
4.13. Gráfico de velocidad de viento horizontal medido por el SODAR el día viernes 10 de octubre. . . . .	28
4.14. Intercomparaciones de velocidad de viento medida con SODAR y Globo Cautivo para cuatro experimentos. En rojo se muestran las mediciones a 100 m.s.n.s. y en azul las mediciones a 140 m.s.n.s.. Las líneas con asteriscos corresponden a las mediciones SODAR, mientras que las mediciones en puntos continuos a mediciones con Globo Cautivo, ambos en promedio móvil de 30 minutos. . .	31
4.15. Gráfico de dispersión entre las mediciones de velocidad de viento horizontal realizadas con el Globo Cautivo y el SODAR. Se incluye la curva de referencia 1:1 y los ajustes lineales para ambas alturas. En azul se presentan los datos en el nivel nominal de 100 metros, mientras que en rojo se presentan las mediciones realizadas en el nivel nominal de 140 metros. Los coeficiente $r^2$ de los niveles de 100 y 140 metros fueron de 0,82 y 0,74 respectivamente. . . . .	33
4.16. Histograma de la diferencia de velocidad entre las mediciones del Globo Cautivo con las mediciones del SODAR en ambos niveles. . . . .	34
4.17. Dirección del viento horizontal medido con el SODAR y Globo Cautivo (GC) para los niveles de 100 y 140 m.s.n.s. Las series de ambos instrumentos corresponden a promedios móviles de 30 minutos. Simbología idéntica a la Figura 4.14 . . . . .	35
4.18. Gráfico de dispersión entre las mediciones de dirección de viento realizadas con el Globo Cautivo y el SODAR. Se incluye la curva de referencia 1:1 y los ajustes lineales para ambas alturas. Los coeficiente $r^2$ de los niveles de 100 y 140 metros fueron de 0,59 y 0,47, respectivamente. . . . .	36
4.19. Histograma de la diferencia entre las mediciones de dirección del Globo Cautivo con las mediciones del SODAR en ambos niveles. . . . .	37

4.20. Gráfico de dispersión entre la velocidad y la diferencia de dirección entre el Globo Cautivo y el SODAR. . . . .	38
4.21. Gráfico superior muestra las series de tiempo de velocidad horizontal del SODAR, estación meteorológica en superficie y perfil logarítmico calculado con $z_0 = 0,08m$ , mientras que en el gráfico inferior se muestra la serie de tiempo de dirección del viento obtenida con el SODAR y Estación Meteorológica en superficie. . . . .	39
4.22. Gráfico de dispersión de velocidad entre los datos medidos con el SODAR y la estación meteorológica en superficie. . . . .	40
4.23. Gráfico de dispersión en la dirección del viento medido con el SODAR y la estación meteorológica en superficie, la barra de color indica la velocidad del viento medida en la estación meteorológica y la línea negra indica la referencia 1:1 . . . . .	41
4.24. Gráfico de dispersión entre dirección y velocidad del viento. Panel superior indica los datos medidos por el SODAR en el nivel de 30 m.s.n.s. y el panel inferior los datos medidos en la estación meteorológica en superficie a 3m.s.n.s.	42
4.25. Diferencia de velocidades SODAR-AMDAR . . . . .	44
4.26. Diferencia de direcciones SODAR-AMDAR. Importante es destacar que la diferencia de direcciones de la velocidad del viento no se ve afectada por la discontinuidad entre 0-360 grados debido a que las direcciones de viento de los perfiles estudiados no se encuentran entre esas direcciones como se puede observar en las Figuras A.1 y A.2. . . . .	45
A.1. Comparación de velocidad de viento medida con SODAR (azul) y AMDAR (rojo) . . . . .	50
A.2. Comparación de dirección de vientos medida por SODAR (azul) y AMDAR (rojo) . . . . .	51
C.1. Impresión de pantalla del video disponible en Youtube donde se muestra la instalación y operación básica del SODAR MFAS . . . . .	54
D.1. Geopotencial en 500 hPa para el 6/10/2014 06:00 UTC . . . . .	55
D.2. Geopotencial en 500 hPa para el 7/10/2014 06:00 UTC . . . . .	55
D.3. Geopotencial en 500 hPa para el 8/10/2014 06:00 UTC . . . . .	56
D.4. Geopotencial en 500 hPa para el 9/10/2014 06:00 UTC . . . . .	56
D.5. Geopotencial en 500 hPa para el 10/10/2014 06:00 UTC . . . . .	56

# Capítulo 1

## Introducción

Realizar mediciones in situ de viento en altura implica un esfuerzo importante. Las técnicas normalmente utilizadas son torres meteorológicas, radiosondas, globos cautivos, globos piloto y aeronaves instrumentadas, siendo de estas sólo las torres meteorológicas y globos cautivos capaces de generar promedios robustos de las mediciones en un volumen acotado. A la vez, estas dos técnicas son las que presentan mayores complejidades a la hora de intentar alcanzar mediciones a mayor altura ya sea por el costo y mantención de la torre meteorológica o por los peligros de vientos intensos que pueden comprometer a las sondas y el propio globo de un sistema cautivo.

Por otra parte, la implementación de estas técnicas puede estar regulada por organismos aeronáuticos que resguardan el espacio aéreo como es el caso de los permisos asociados a un lanzamiento de radiosonda o un globo piloto, izaje de un globo cautivo y vuelo de aeronave. Esto se traduce en cotas máximas de operación y prohibición de operar en ciertas zonas y horas.

La resolución vertical de las técnicas in situ es inherentemente alta solo en el radiosonda y, dependiendo del caso, en las mediciones de aeronaves. La implementación de resoluciones verticales altas en torres meteorológicas y globos cautivos aumenta significativamente los costos asociados a equipos, mantenciones y, para el globo cautivo, en helio.

La calidad de las mediciones de las técnicas in situ no está libre de errores como el efecto de la misma torre en las mediciones de anemómetros de copela y veleta, el efecto boyante de un globo cautivo que genera mediciones de velocidad mayores y el efecto del mismo globo en el flujo.

La medición remota de la atmósfera por técnicas que utilizan sonido se ha desarrollado desde la década de 1960 permitiendo la identificación en un primer trabajo de McAllister (1968) de plumas termales. En sus inicios la técnica fue llamada Ecosonda y permitió el estudio de la capa límite y dinámica del desarrollo de las plumas termales. La técnica posteriormente fue rebautizada como SODAR haciendo similitud al RADAR y se desarrolló la

tecnología para evitar efectos adversos en sus mediciones, llegando en los años 1980 a ser capaz de medir el corrimiento doppler de la frecuencia emitida al ser retrodispersada por turbulencia que se desplazaba en el viento, para así ser capaz de medir el perfil de viento.

Actualmente el desarrollo de la técnica SODAR es impulsada, principalmente, por las mediciones necesarias para la prospección de viento en estudios de energía eólica y en menor medida para estudios de dispersión de contaminantes.

El presente trabajo explica, en el capítulo 2 la técnica de medición SODAR, se revisan antecedentes, se describe el equipo SODAR, modelo MFAS de la marca Scientec adquirido por el CR2 y se muestran aplicaciones que han sido publicadas en la literatura. En el capítulo 3 se describe la ubicación donde se realizó la campaña y los equipos utilizados. En el capítulo 4 se documenta la campaña y se intercompara los resultados obtenidos en la técnica SODAR con las mediciones de Globo Cautivo, Estación Meteorológica Automática y datos meteorológicos obtenidos de aviones AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay). El capítulo 5 presenta las conclusiones del trabajo.

## 1.1. Objetivo

Describir y documentar la operación de un SODAR mediante el desarrollo de una campaña en donde se puedan intercomparar las mediciones del SODAR con otros sistemas in situ.

## 1.2. Motivación

El año 2014 el CR2 adquirió un perfilador de viento SODAR. Este equipo realiza mediciones de velocidad y dirección de viento mediante emisión/recepción de pulsos acústicos. Para poder obtener mediciones que saquen el mayor provecho del equipo se requiere documentar su instalación y posibles aplicaciones, siendo necesario a la vez conocer las potenciales aplicaciones de la técnica.

## 1.3. Metodología

La forma de abordar la implementación del equipo SODAR es mediante una búsqueda de bibliografía en artículos científicos, libros y manuales con la finalidad de conocer las cualidades y debilidades de la técnica de medición. Una vez documentado y realizado algunas pruebas preliminares, se busca una ubicación donde se diseña una campaña de medición para comparar la medición que genera el SODAR con otras técnicas más convencionales como el globo cautivo, estación meteorológica en superficie y datos medidos por aviones comerciales AMDAR.

Para analizar las mediciones se construyen rutinas Bash (adjunto en apéndice) que generan archivos de datos que pueden ser fácilmente utilizados por software de análisis.



# Capítulo 2

## Revisión de antecedentes

### 2.1. Principios de medición del SODAR

Los equipos SODAR operan con el principio de retro-dispersión de pulsos acústicos (Scintec, 2013). El sonido es emitido hacia la atmósfera por transductores y a medida que se propaga por la atmósfera, una pequeña fracción de esa energía es dispersada por inhomogeneidades de temperatura de pequeña escala con tamaños similares a la longitud de onda emitida (10-30 cm). Estas inhomogeneidades de temperatura son producidas por turbulencias en regiones de alto gradiente de temperatura potencial, inversiones de temperatura, cizalle de viento o plumas termales producidas por calentamiento superficial.

Después de que el pulso es transmitido a la atmósfera, un receptor en la superficie adquiere y amplifica (por un factor  $10^7$ ) la señal retrodispersada. La señal es muestreada digitalmente a tasas de varios cientos de muestras por segundo sobre un periodo de varios segundos. La serie de tiempo es dividida en bloques, donde cada bloque es directamente relacionado a una capa discreta en la atmósfera. Por medio de una transformada de Fourier discreta (DFT), calculada utilizando un algoritmo de FFT se calcula la frecuencia media de la señal dispersada y utilizando el corrimiento Doppler entre la señal emitida y recibida, se calcula el viento radial en el camino seguido por el pulso de sonido.

Las primeras mediciones con la técnica SODAR se realizaron a finales de los años 60 por McAllister (1968) y solo se medía la intensidad del pulso retrodispersado quedando esto registrado en un facsímil que se imprimía en el mismo equipo, como se muestra en la Figura 2.1. Si bien, en esos primeros prototipos no se podía medir el corrimiento doppler para derivar el viento, sí fueron significativas sus mediciones para estudiar el desarrollo de las plumas termales que se desarrollan durante los días calurosos, los desarrollos de la capa límite y ondas atmosféricas. Interesante es notar que en estos primeros trabajos el termino SODAR aún no era acuñado y se utilizaba el nombre de ecosonda para describir la técnica.

Existen dos arreglos geométricos que normalmente son usados por equipos SODAR: Monoestático y Biestático, los que se describen en la sección siguiente.

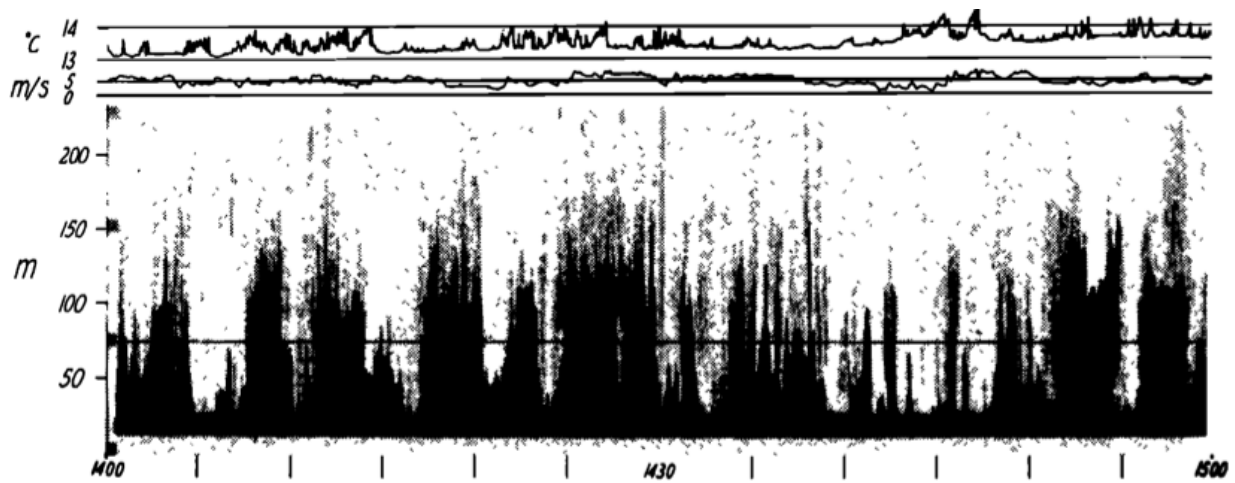


Figura 2.1: Primer facsímil publicado de la técnica SODAR (McAllister, 1968), en donde se muestra la intensidad del pulso retrodispersado. Se logra identificar el crecimiento de las plumas termales. En la parte superior se muestra la temperatura y velocidad de viento en superficie.

## 2.2. Tipos de SODAR

### 2.2.1. SODAR Monoestático

El arreglo monoestático consiste en una antena emisora y receptora instalada en el mismo lugar o a una distancia pequeña. En la mayoría de los casos, la transmisión y recepción están combinadas en una misma antena. El ángulo de dispersión utilizado es de  $180^\circ$ . En este modo, la intensidad de la señal retrodispersada depende sólo de la estructura termal de la atmósfera.



Figura 2.2: Imagen de un SODAR monoestático en donde se puede observar que posee tres transductores. Uno está orientado verticalmente y mide el viento vertical, mientras que los otros dos emiten/reciben en un ángulo de 30 grados (Scintec, 2013) con respecto a la vertical para lograr obtener las tres componentes del viento.

Dentro de la categoría de SODAR monoestático existen los que tienen transductores orientados como el que se muestra en la Figura 2.2 y la nueva generación de arreglo en fase como el que es utilizado en este trabajo y se muestra en la Figura 2.3.

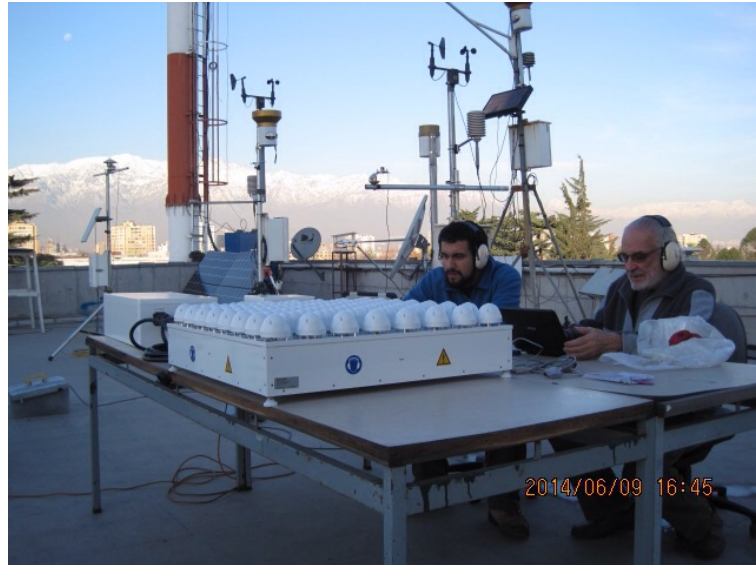


Figura 2.3: Registro fotográfico de la primera prueba realizada en el equipo SODAR que se utilizó en este trabajo. Se puede observar los 64 transductores piezo-eléctricos que se utilizan para la emisión de los pulso de sonido. Al igual que el SODAR que se muestra en la Figura 2.2 este equipo emite pulsos inclinados en  $29^\circ$  con respecto a la vertical pero utiliza un desfase entre los transductores para lograr emitir el frente de onda inclinado, generándose a la vez un lóbulo reflejado con  $22^\circ$  en el sentido opuesto al lóbulo primario Scintec (2013).

## 2.2.2. SODAR Biestático

Un sistema biestático consiste en antenas de emisión y recepción separada por distancias entre 100 a 300 m, como la configuración que se muestra en la Figura 2.4 . Este modo de operación se caracteriza por que el volumen medido es el mismo, es decir, los pulsos de sonido apuntan a un mismo volumen lo que genera menores errores en el cálculo de la velocidad horizontal. Actualmente, por la dificultades de montaje de las distintas antenas emisoras y receptoras, no existen versiones comerciales de SODAR biestático (Bradley, 2006).

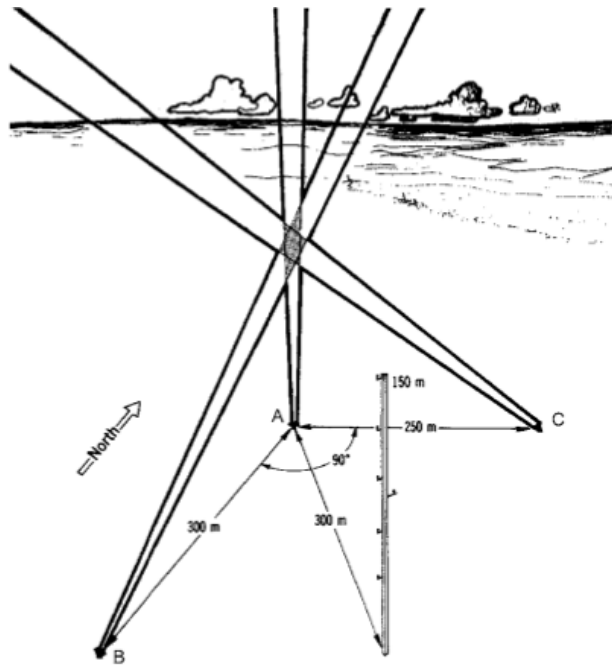


Figura 2.4: Esquema de un arreglo de SODAR biestático utilizado por Gaynor (1977) en Haswell, CO. Las antenas transmisoras están en los puntos B y C, mientras que el receptor está orientado verticalmente en el punto A. Se muestra a 300 metros del punto A la ubicación de una torre instrumentada de 150 metros de altura que fue utilizada para una validación.

## 2.3. Aplicaciones de la tecnología SODAR

- Circulaciones tierra/océano, brisas costeras
  - Aggarwal et al. (1980) estudia, mediante un SODAR y torre meteorológica, la estructura diurna/nocturna y transiciones de las brisas costeras en Tarapur, India.
- Capa límite
  - Lokoshenko (2002) estudia la estratificación termal baja en Moscú mediante radiosondas y SODAR, generando una climatología de la capa de mezcla.
  - La capa límite estable generada durante el invierno del hemisferio sur en la Antártica ha sido estudiada sobre hielos oceánicos por King et al. (1989) utilizando un equipo SODAR monoestático, torres con anemómetros de copela y sónicos en 5 torres de hasta 32 metros. Durante estos años la medición SODAR sólo se utilizaba para identificar la profundidad y dinámica de la capa límite, es decir, la medición Doppler no era aun implementada.
  - Durante el verano austral del 1988-1989, Argentini et al. (1992) estudiaron mediante SODAR doppler y estaciones meteorológicas la interacción de flujos catabáticos que presentaban distintas temperaturas potenciales y que drenaban en una capa de hielo marino.

- Flujos de viento en terreno complejo
  - Bradley et al. (2012) proponen correcciones para las mediciones en terreno complejo y comparan las mediciones de un SODAR contra las de un LIDAR, concluyendo que la precisión de ambos equipos es similar y que las diferencias reportadas por otros trabajos son principalmente causadas por la distancia a la que se instala el SODAR de la torre meteorológica para lograr evitar el eco fijo.
  - Gudiksen and Leone (1992) mediante 7 torres meteorológicas y un SODAR monoestático estudiaron y caracterizaron los flujos de drenaje que se dan en la zona montañosa del estado de Colorado en USA. En su estudio identificaron la recurrencia de estos eventos e identificaron el efecto de forzantes sinópticos en la inhibición de los flujos.
  
- Ondas de gravedad
  - Ralph et al. (1992) mediante dos SODAR, radiosondas, RADAR y estaciones de superficie logra resolver una detallada estructura vertical del flujo que presenta las ondas de gravedad e investiga un caso de estudio en donde ondas de gravedad interactúan con una inversión nocturna y una capa elevada neutral.
  
- Pasos frontales
  - Gera and Weill (1991) estudian mediante mediciones SODAR y estaciones meteorológicas de superficie la evolución frontal en la capa límite y cómo el frente afecta la capa límite con bastante anterioridad a la llegada de éste.
  
- Contaminación atmosférica
  - Oliver et al. (2000) investigan los máximos de ozono en Essen, Alemania, mediante SODAR y estaciones en superficie y los asocian a eventos de un viento en chorro nocturno de baja altura y pasos frontales.
  - Harrison et al. (1978) estudian mediante un SODAR y estaciones en superficie eventos de disminución en las concentraciones de ozono durante periodos de alta contaminación.

## 2.4. Descripción del SODAR MFAS SCINTEC

El equipo desarrollado por SCINTEC, al igual que todos los SODAR comercializados actualmente, es del tipo monoestático, es decir, su emisión y recepción ocurren en el mismo punto. El SODAR MFAS puede emitir frentes de onda direccionales en hasta 9 direcciones distintas para obtener las distintas componentes de la velocidad del viento horizontal y vertical como se muestra en la Figura 2.5.

Identificador	Lóbulo principal	Lóbulo reflejado
Vertical	0º	N/A
Norte	29º norte	22º sur
Este	29º este	22º oeste
Sur	29º sur	22º norte
Oeste	29º oeste	22º este

Figura 2.5: Ángulos de emisión logrados por el efecto de desfase en las distintas columnas o filas de transductores. Se especifica el ángulo que posee el lóbulo principal y el reflejado.

La secuencia de medición por defecto del equipo se muestra en la Figura 2.6. La medición consiste en emisiones de pulsos de sonido que contienen hasta 10 frecuencias, estas emisiones (Tx) se alternan con periodos de recepción (Rx), generando una secuencia que se repite 10 veces para cada dirección. Cuando se vuelve a repetir la emisión hacia una determinada dirección se finaliza un subciclo. Para lograr una medición se deben completar 5 subciclos.



Figura 2.6: Esquema de secuencia de medición típica del equipo SODAR Scintec MFAS.

El esquema de procesamiento de datos que realiza el equipo MFAS se muestra en la Figura 2.7. Las extensiones de los archivos que se muestran (\*.raw y \*.mnd) son las salidas por defecto, pudiendo el usuario configurar a su necesidad la extensión y contenido.

### 2.4.1. Características del SODAR MFAS Scintec

El manual de Hardware (Scintec, 2013) entrega las siguientes características del equipo:

Las características físicas del equipo se presentan en la Tabla 2.2

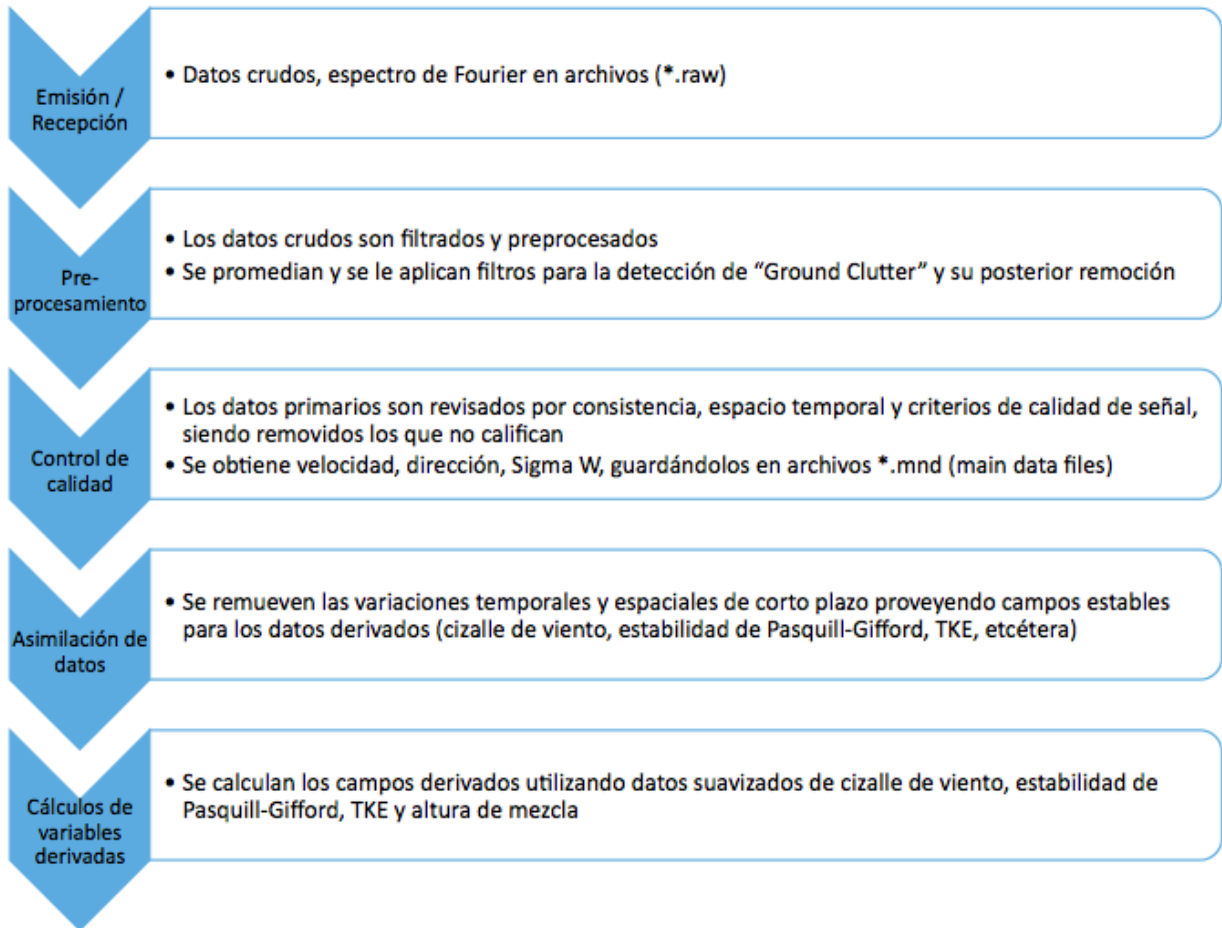


Figura 2.7: Esquema del procesamiento de datos que realiza el equipo SODAR Scintec MFAS.

Descripción	Especificaciones	Comentarios
Precisión viento horizontal	0,1-0,3 [m/s]	Promediando sobre condiciones variadas
Precisión viento vertical	0,03-0,1 [m/s]	Promediando sobre condiciones variadas
Precisión dirección	<1,5°	Con viento >2 m/s
Rango medición viento horizontal	0-50 [m/s]	Nominal
Rango medición viento vertical	-10 – 10 [m/s]	Nominal

Tabla 2.1: Características del equipo SODAR MFAS según lo reportado por los fabricantes en el manual.

Descripción	Especificaciones
Masa antena	32 Kg
Tamaño antena	74x72x20 cm
Masa SPU	17 Kg
Tamaño SPU	60x31x18 cm
Masa fuente de poder	10 Kg
Tamaño fuente de poder	23x20x18 cm
Consumo DC	± 12V, 2 A
Consumo AC	300 W
Temperatura de Operación	-35 – 55 °C

Tabla 2.2: Características del equipo SODAR MFAS según lo reportado por los fabricantes en el manual.

## 2.4.2. Reprocesamiento de datos

El reprocesamiento significa calcular nuevamente los datos obtenidos utilizando una nueva configuración del software o una nueva versión de este que implementa nuevos algoritmos de cálculo. Mediante este proceso se puede llegar, en algunos casos, a aumentar la disponibilidad de datos y su calidad.

El proceso de reprocesamiento se ejecuta sobre los archivos llamados crudos y tienen extensión .raw y se ejecutan en el software APRun. Algunas configuraciones del software pueden ser cambiadas y están indicadas con el indicativo (P). Otras configuraciones tienen restricciones físicas en el proceso de emisión de señal y no pueden ser cambiadas. Por ejemplo, se puede aumentar los intervalos en que se promedian los datos pero no disminuir, debido a que se debe dar el tiempo mínimo para realizar un ciclo de medición. El detalle del reprocesamiento de los datos se encuentra en Scintec (2013), página 28.



# Capítulo 3

## Campaña de mediciones

### 3.1. Descripción de sitio

El parque Laguna Carén se encuentra ubicado al oeste de la ciudad de Santiago en la comuna de Pudahuel y su acceso es por el kilómetro 19 de la autopista 68 que conduce a Valparaíso. El parque está entregado a la Universidad de Chile donde se planifica un Parque Científico Tecnológico.

El parque presenta una urbanización tal que existen tomas de corriente (220 VAC) en lugares alejados de oficinas y casas de la administración del parque. Se realizaron visitas y reuniones con el personal que administra el parque para identificar el lugar idóneo para la instalación del SODAR, encontrándose un sector que se ubica en la parte más alejada de la urbanización. Las distancias desde el lugar de medición a los lugares más significativos se presentan en la Tabla 3.1

Lugar	Distancia [km]
Ruta 68	1
Administración	1, 4
Aeropuerto	6
Sector residencial más cercano	2

Tabla 3.1: Distancias desde el lugar de medición hasta lugares indicados en la primera columna

Las principales fuentes de ruido ambiental que puede afectar las mediciones del SODAR son la ruta 68 y el aeropuerto, sin embargo, durante algunos días se realizan en el parque, practicas de la Fuerza Aérea de Chile que consisten en vuelos de helicóptero a baja altura, transformándose en la fuente principal de ruido. Durante el desarrollo de la campaña de mediciones los helicópteros operaron durante el primer día y ya para el día martes 6 de octubre se habían hecho las gestiones para que las prácticas se redujesen y se desplazaran a mayor distancia del sitio de mediciones.

La topografía del sitio de medición se muestra en la Figura 3.1 y la distribución de equipos

instalados en la Figura 3.2.

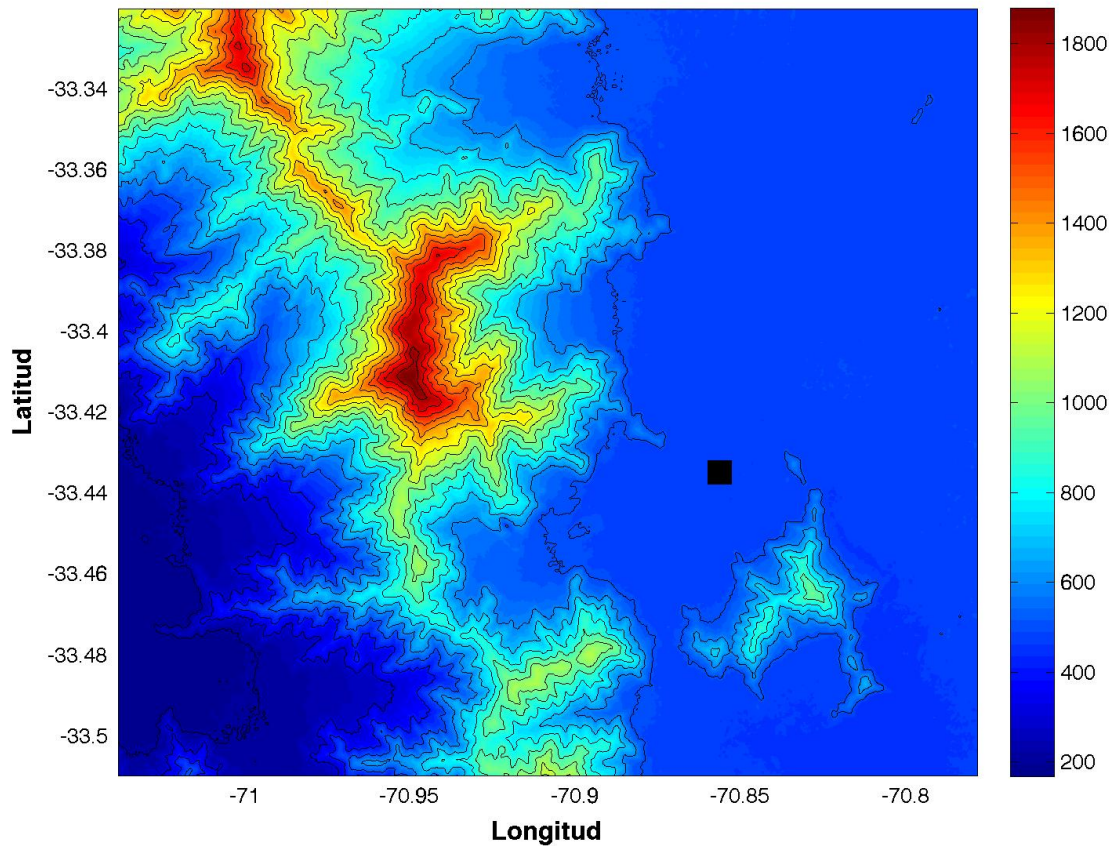


Figura 3.1: Topografía con líneas de nivel cada 100 metros y altura máxima de 1.880 m.s.n.m.. En un cuadrado negro se indica la ubicación del lugar donde se realizaron las mediciones.

### 3.2. Mediciones meteorológicas en superficie

Se utilizó una estación meteorológica en superficie que medía temperatura, humedad relativa, presión, velocidad y dirección de viento. Las características de estas mediciones se presentan en la Tabla 3.2.

Los equipos fueron montados en un trípode ventado a 20 metros horizontales del SODAR como se muestran en la Figura 3.3.



Figura 3.2: Distribución de los equipos instalados. Con el número 1 se señala la ubicación del SODAR, con el número 2 la estación meteorológica en superficie y con el número 3 el punto de izaje del globo cautivo.

Variable (Sensor)	Altura s.n.s [m]	Precisión	Comentarios
Temperatura (HMP50)	1,5	$\pm 0,6^{\circ}\text{C}$	Promedio, en Shield Young
Humedad Relativa (HMP50)	1,5	$\pm 5\%$	Muestra, en Shield Young
Presión (CS100)	0	$\pm 1,0\text{ mb}$	Muestra
Velocidad (Wind Setry)	3	$\pm 0,5\text{m/s}$	Viento vectorial
Dirección (Wind Setry)	3	$\pm 5^{\circ}$	Viento vectorial
Unidad de registro (CR10X)	0		En caja NEMA con CS100

Tabla 3.2: Equipos y tipos de cálculos implementados en la estación meteorológica de superficie



Figura 3.3: Imagen donde se muestra la instalación de la estación meteorológica en superficie y el SODAR

### 3.3. Mediciones meteorológicas con Globo Cautivo

Para realizar mediciones de dirección y velocidad de viento en altura se implementó un sistema de Globo Cautivo el que estaba compuesto por dos sondas TS-5A-SP, un receptor de radio en banda meteorológica (UHF) AIR-5A-RCVR, guinch AIR-TS-3AW y un globo TSB-X. El sistema fue utilizado cuando la velocidad de viento no implicara un riesgo para el globo considerando los árboles de la zona.

El lugar donde se realizó el izaje del sistema Globo Cautivo se seleccionó teniendo en cuenta la dirección de los vientos predominantes con tal de no interferir con las mediciones del SODAR. El lugar donde se instaló el guinch se indica en la Figura 3.2 con el número 3.

Sensor/Propiedad	Valor
Velocidad de viento	
Rango	0 a $20 \text{ ms}^{-1}$
Precisión	$\pm 0,5 \text{ ms}^{-1}$
Dirección de viento	
Rango	0 a $360^\circ$
Precisión	$\pm 10^\circ$

Tabla 3.3: Especificaciones de los sensores del Globo Cautivo

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Contexto meteorológico de escala sinóptica

El despliegue de los equipos en terreno se realizó el día 6/10/2014 y para el día 7 se habían resuelto los problemas iniciales y todas las mediciones estaban operativas. El fin de la campaña ocurrió el día 10/10 donde progresivamente se fueron retirando equipos hasta las 12 horas cuando se retiró la estación meteorológica generando la finalización de todas las mediciones. Dado lo anterior el periodo donde se describirá el contexto sinóptico es entre los días 6/10/2014 y 10/10/2014. Los mapas sinópticos presentados a continuación fueron realizados utilizando los reanálisis NCEP (Kalnay et al., 1996).

El día 6 mientras se realizaba la instalación de los equipos se estaba generando una vaguada costera como se muestra en la Figura 4.1, caracterizada por el mínimo de presión superficial medido en la estación meteorológica de superficie en la Figura 4.6, la humedad relativa de 31 % y el máximo de temperatura registrado durante la campaña con 27°C (Figura 4.6). Para los días 7, 8 y 9 la característica principal es la aproximación desde el océano Pacífico de una alta migratoria, como se muestra en las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 y caracterizado por la tendencia al aumento de presión medido por la estación meteorológica en superficie (Figura 4.6). Ya para el día 9/10 a las 06 UTC se estaba generando una vaguada costera que llegaba hasta los 30°S, la que afectó la zona de medición para el día 10/10 como se observa en la Figura 4.5 y en las mediciones en superficie presentadas en la Figura 4.6. Los mapas de geopotencial en 500 hPa correspondientes a los mismos tiempos presentados en los mapas de presión superficial se muestran en el apéndice D.

Dado lo anterior, podemos concluir que durante la campaña dominaba el paso de sistemas de alta presión en superficie, siendo el día de instalación de equipos y el día de finalización de la campaña caracterizados por el paso del mínimo de presión asociado a vaguadas costeras generadas por el paso de altas migratorias.

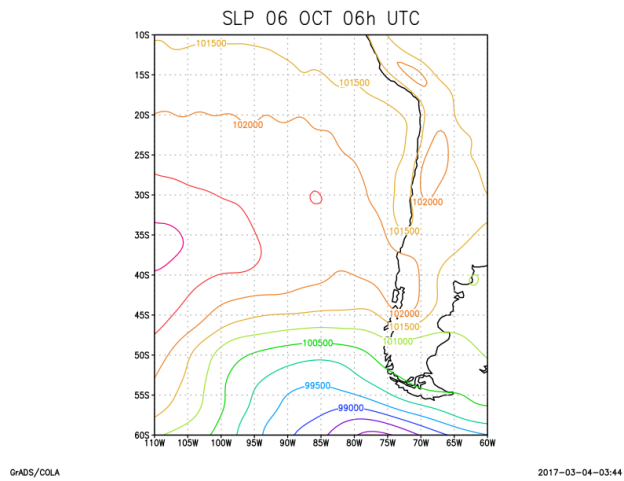


Figura 4.1: Mapa de presión (Pa) a nivel del mar para el 6/10/2014 06:00 UTC.

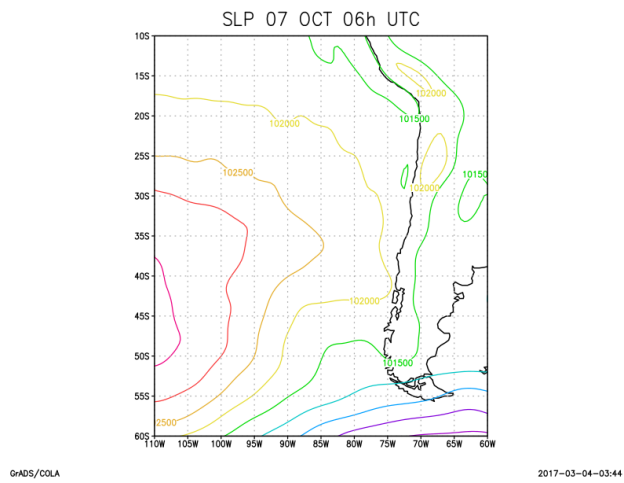


Figura 4.2: Mapa de presión (Pa) a nivel del mar para el 7/10/2014 06:00 UTC.

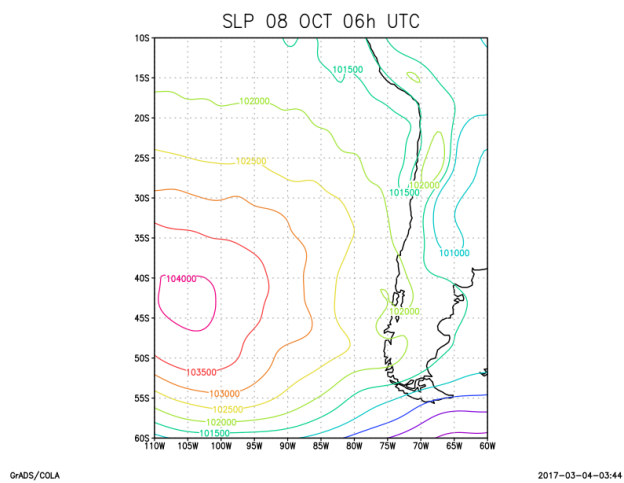


Figura 4.3: Mapa de presión (Pa) a nivel del mar para el 8/10/2014 06:00 UTC.

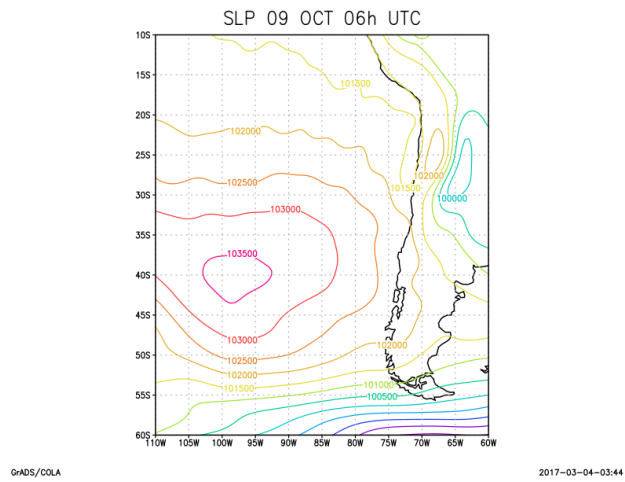


Figura 4.4: Mapa de presión (Pa) a nivel del mar para el 9/10/2014 06:00 UTC.

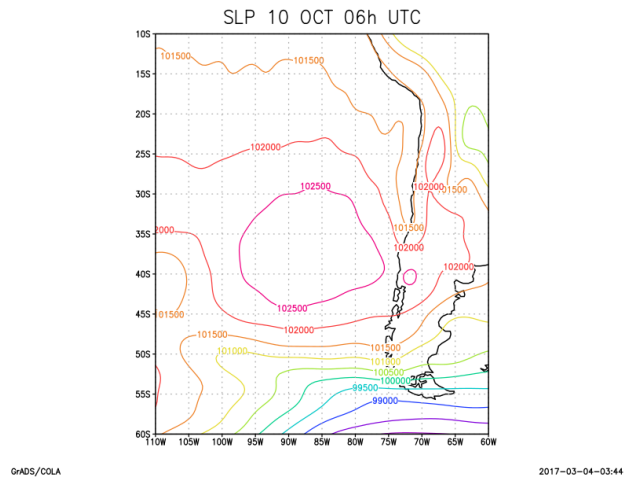


Figura 4.5: Mapa de presión (Pa) a nivel del mar para el 10/10/2014 06:00 UTC.



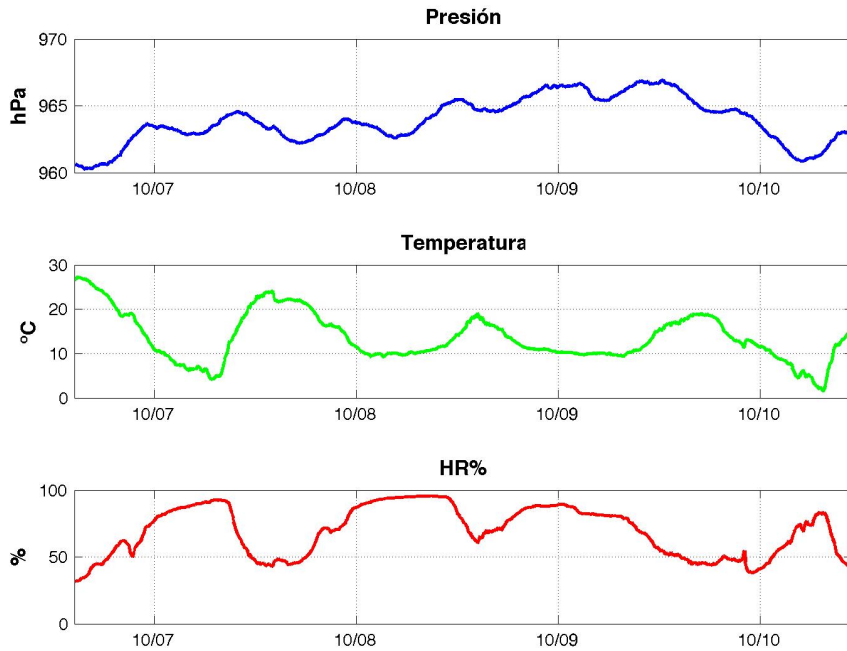


Figura 4.6: Mediciones de la estación meteorológica en superficie.

## 4.2. Visión global de las mediciones obtenidas

En las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se presentan los datos obtenidos con el SODAR. En el caso de las Figuras 4.7 y 4.8, en la parte inferior se incluyen las mediciones en superficie de velocidad y dirección del viento, respectivamente. Además en ambos gráficos se muestra la temperatura en superficie. La Figura 4.9 muestran la velocidad vertical medida con el SODAR y se omiten los datos cuyo módulo de la velocidad vertical es menor o igual a 0.3 m/s.

En las figuras 4.7, 4.8, y 4.9 se identifica que el alcance máximo que presentó el SODAR es variable en el tiempo, y durante el transcurso de estas mediciones, varió entre los 200-1000 metros sobre el nivel del suelo. Observando el detalle de las mediciones en los puntos de mayor alcance, es posible notar que el alcance reportado varía ligeramente entre los distintos campos, debido a que los controles de calidad que aplica el software APRUN son distintos y dependen del campo en cuestión, es decir, el alcance máximo varía según cada variable .

En el primer nivel de medición del SODAR (30 m.s.n.s), los días 6, 7 y 8 de octubre se midieron vientos mayores a 10 m/s. Estos vientos se registraron entre las 15-16 horas y aparentan ser parte de un ciclo diario característico de la zona de medición. Además, por la estructura vertical que se desarrolla, se hace necesario describir en detalle estos eventos de vientos intensos a los que llamaremos chorros.

Las mediciones superficiales (1,5 m.s.n.s) de presión, temperatura y humedad relativa se presentan en la Figura 4.6 , mientras que las mediciones de velocidad y dirección de viento

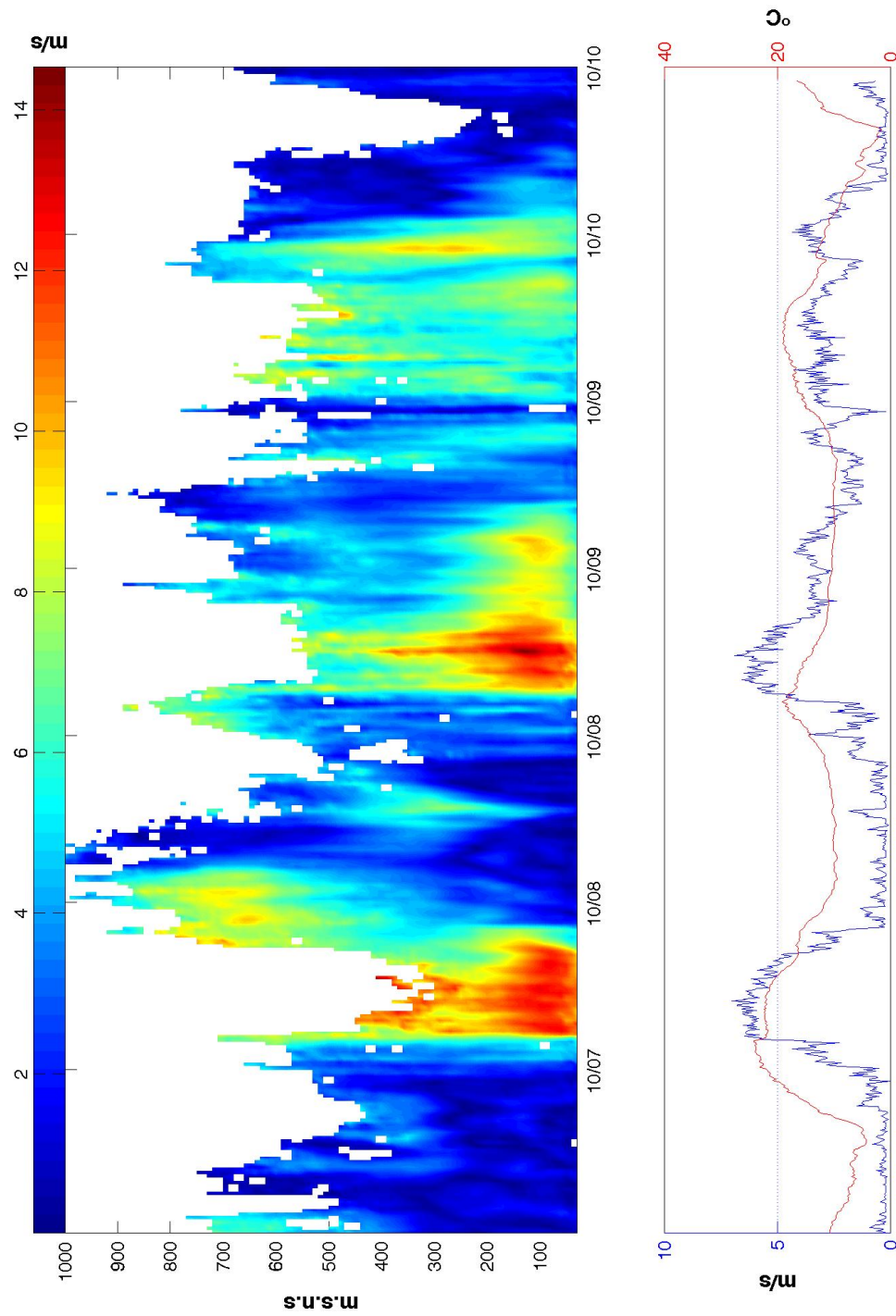


Figura 4.7: Gráfico superior velocidad del viento medido por el SODAR, y en la figura inferior la velocidad del viento (3m) temperatura (1,5m) medido por la estación meteorológica automática.

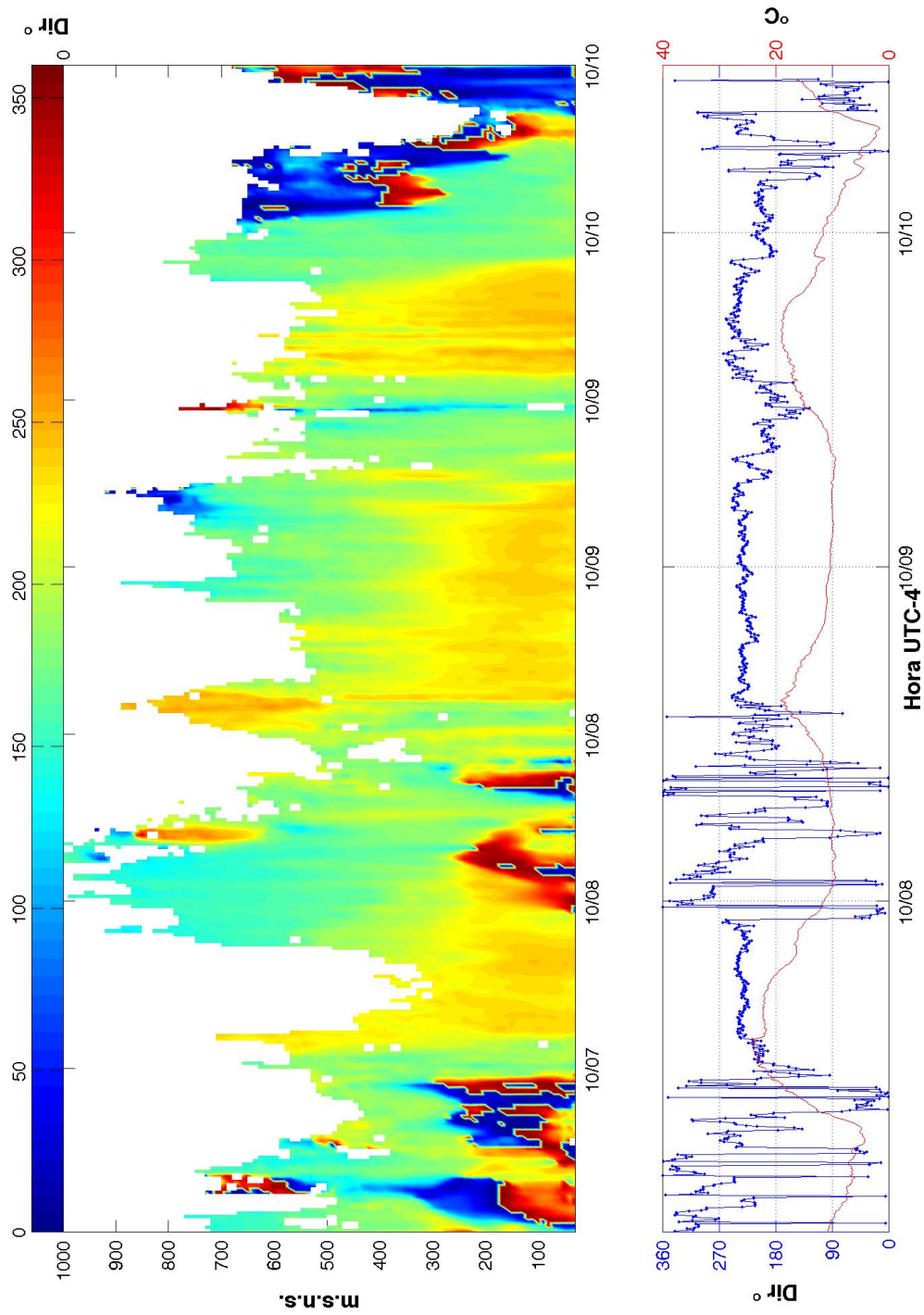


Figura 4.8: Gráfico superior dirección del viento medido por el SODAR, y en la figura inferior la dirección del viento (3m) temperatura (1,5m) medido por la estación meteorológica automática.

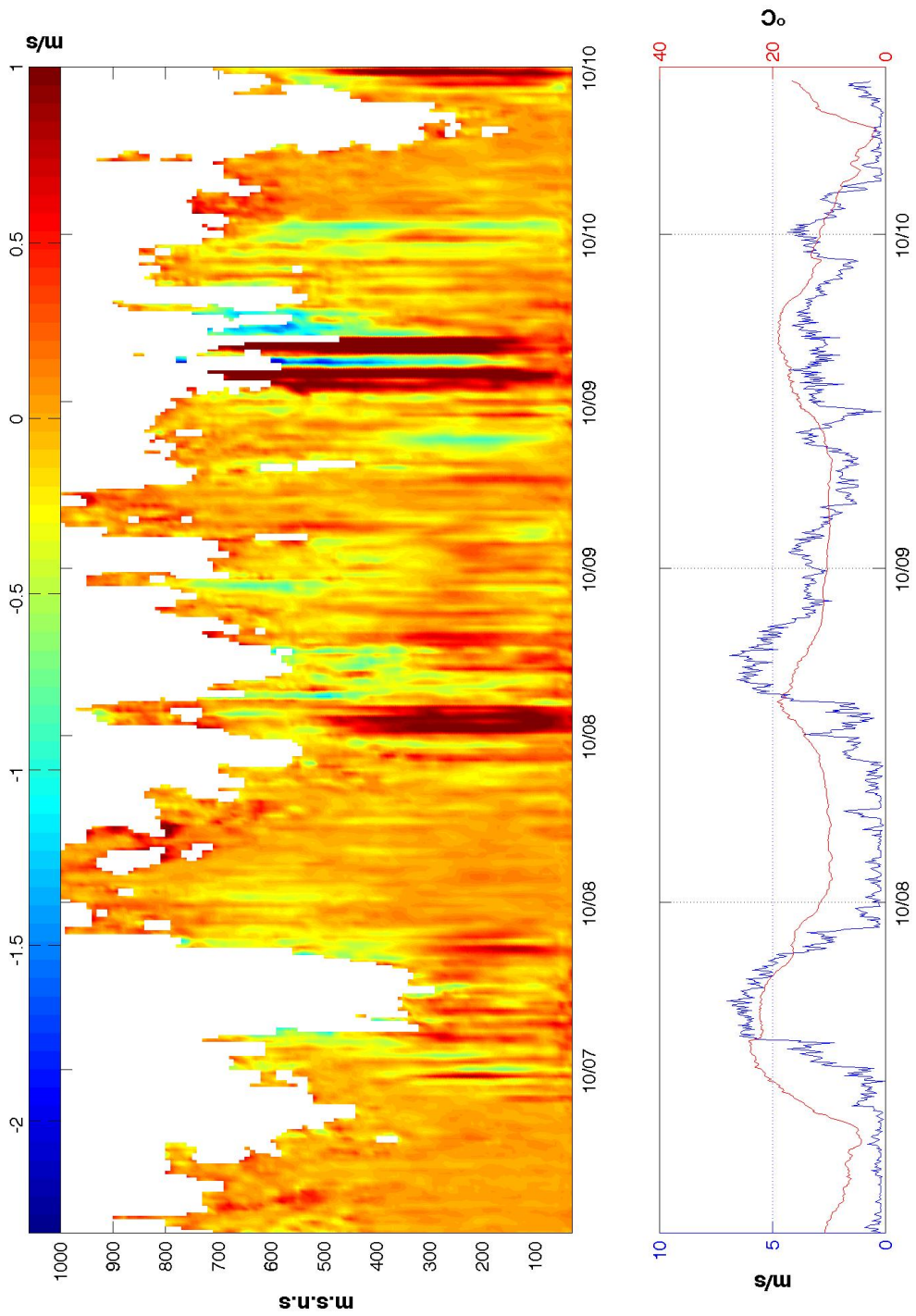


Figura 4.9: Gráfico superior velocidad vertical medida por el SODAR, magnitudes positivas indican ascenso y las negativas un descenso. En la figura inferior la velocidad y dirección del viento medidas en superficie (3m).

(3 m.s.n.s.) se encuentran en la Figura 4.21.

En los datos medidos en superficie se identifican los patrones descritos en las características sinópticas de la semana en que se realizaron las mediciones. En la presión superficial medida (Figura 4.6), se aprecia que el día 6 y día 10 se midieron valores mínimos de presión cercanos a 960 hPa, y en el caso del día 6 está asociado al días más caluroso medido durante la campaña con 27°C. Los días entre el 6 y el 10 se caracterizan sinópticamente por el paso de un sistema de alta presión migratoria que viaja hacia el este, generando al inicio y final de la campaña, una baja costera.

Para lograr una descripción detallada de los datos obtenidos con el SODAR se analizan en la sección siguiente los distintos días de observación.

## 4.3. Descripción a nivel diario de las mediciones obtenidas

### 4.3.1. Martes 7 de octubre

En la Figura 4.10 se presenta el viento horizontal medido por el SODAR para el día 7/10. Se logra identificar que desde las 0 a las 12 horas existen vientos débiles a moderados, menores a 3 m/s en la mayor parte de los perfiles medidos, exceptuando las dos zonas descritas a continuación:

- Un núcleo de viento entre las 0-2 horas y que abarcó entre 400-700 m.s.n.s. , con vientos entre 4-7 m/s. La dirección del viento durante este núcleo es similar a lo que se registró durante toda la mañana y es principalmente sur.
- Una zona no muy definida entre las 4-10 horas con distribución vertical entre 300-650 m.s.n.s. y vientos entre 4-6 m/s. La dirección del viento es principalmente sur.

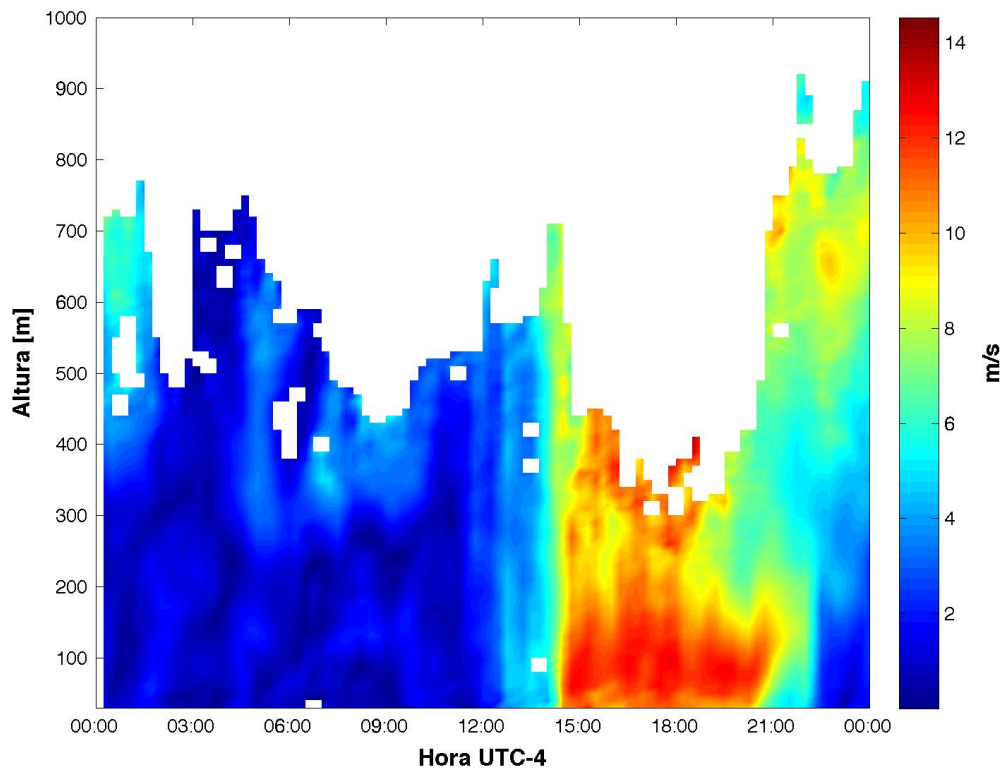


Figura 4.10: Gráfico de velocidad de viento horizontal medido por el SODAR el día martes 7 de octubre.

En la zona de vientos débiles matutinos se puede identificar que, desde los 30-300 m.s.n.s., los vientos presentan dirección mayoritariamente norte pero con velocidades entre 0-2 m/s.

Desde las 12:30 hasta las 14:30 horas se produce un aumento en la velocidad del viento. El aceleramiento se produce homogéneamente en toda la vertical medida entre 30 y 550 m.s.n.s. , llegando a magnitudes en velocidades de 5-6 m/s. Este aumento de velocidad está asociado a un viento sur.

El desarrollo del viento intenso de la tarde se da, en una primera etapa al igual que el aceleramiento previo, homogéneamente en toda la vertical medida hasta los 700 m.s.n.s. y con vientos entre 8-9 m/s durante un periodo de 30 minutos para después acelerarse en la zona entre los 30-150 m a 10-13 m/s con dirección SW en toda la capa.

El viento intenso se prolonga entre las 14:30-20 horas, presentando su núcleo de intensidad entre los 50-100 metros, el que a momentos se proyecta hasta el rango 30-300 metros. De estas proyecciones se identifican 4 pulsos de crecimiento vertical. En la figura se puede identificar que el viento intenso o Chorro presenta pulsos cuyos núcleos se encuentran entre 100-150 metros. Estos pulsos generan proyecciones verticales que, en algunos casos, llegan hasta el límite del rango medido (500 m.s.n.s).

El fin del viento intenso de la tarde se da, en una primera etapa, por una desaceleración en el nivel 200-300 metros a las 18 horas, mientras que a las 20 horas se inicia una desaceleración en el primer nivel de medición. Estas dos disminuciones se unen cerca de las 22 horas, donde se genera un perfil de velocidad de viento homogéneo entre 30-500 m con velocidades en el rango de 4-6 m/s. Durante el final del viento intenso el alcance del SODAR aumenta desde 400 hasta 800 metros, permitiendo identificar una zona de viento entre 8-10 m/s que se ubica entre 500-800 metros, posiblemente una capa residual.

### 4.3.2. Miércoles 8 de octubre

El día miércoles hasta las 15 horas predominaron los vientos débiles ( $<3\text{m/s}$ ) (ver Figura 4.11), con excepción de los siguientes momentos y alturas:

- Chorro de viento entre los 500-900 m.s.n.s desde el inicio del día hasta las 3 de la madrugada, con vientos máximos de 9 m/s y dirección característica 225-300 grados.
- Chorro nocturno entre 30-500 m.s.n.s. con velocidades máximas de 8 m/s entre los 200-400 m.s.n.s., la extensión temporal es entre las 5-9 de la madrugada.

La aceleración de las 15 horas posee similares características a las del día anterior, es decir, el aumento de velocidad es homogéneo en la mayor parte del rango de medición alcanzado por el SODAR en esos momentos (30-650 m.s.n.s).

Desde las 15 horas se inicia el desarrollo de un chorro con vientos intensos que llegan en momentos hasta 14 m/s a 120 m.s.n.s.. El chorro posee similares características a las del día anterior, con la excepción de que en este día no se experimenta una declinación en las magnitudes del viento como las que se midieron el día anterior, manteniéndose vientos de 9 m/s a los 100 m.s.n.s. hasta las 24 horas.

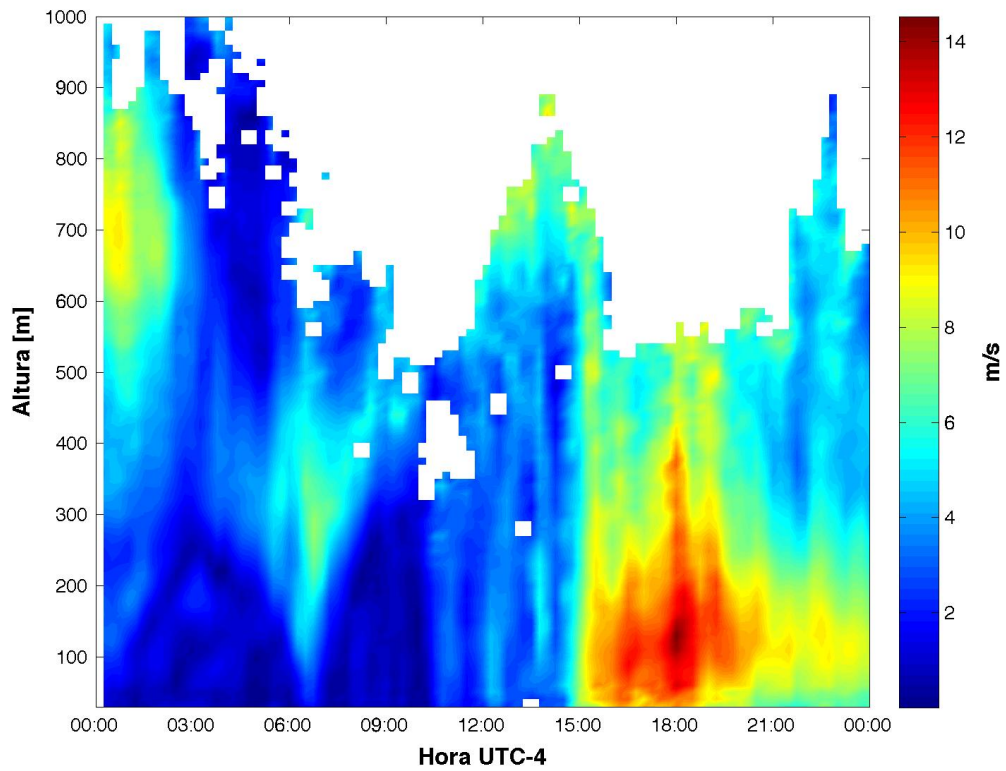


Figura 4.11: Gráfico de velocidad de viento horizontal medido por el SODAR el día miércoles 8 de octubre.



### 4.3.3. Jueves 9 de octubre

El día jueves se inicia con el remanente del chorro de la tarde del día anterior (ver Figura 4.12), el que presenta una aceleración llegando a valores cercanos de 10 m/s a las 2 de la madrugada. La extensión vertical llega hasta los 300 m.s.n.s y se termina abruptamente a las 5 de la madrugada. Este día antes de las 12 horas presenta, en su mayor parte, vientos débiles, con excepción de los siguientes puntos:

- Remanente del chorro del día anterior, ya descrito.
- Vientos de 7 m/s en altura 250-500 m.s.n.s.
- Viento que llega al primer nivel y abarca hasta los 300 m.s.n.s. entre las 9-10 horas, con velocidades máximas de hasta 7 m/s.

Desde las 12 del día se inicia el desarrollo del viento de la tarde, pero en este día no se alcanza las magnitudes de los días anteriores, presentando una velocidad máxima de 9 m/s. Este día los vientos no son tan intensos pero se prolongan hasta las 24 horas. Se identifica una disminución de viento que abarca todo el rango de medición del SODAR a las 22 horas, para después desarrollarse un chorro de hasta 10 m/s con núcleo a los 300 m.s.n.s.

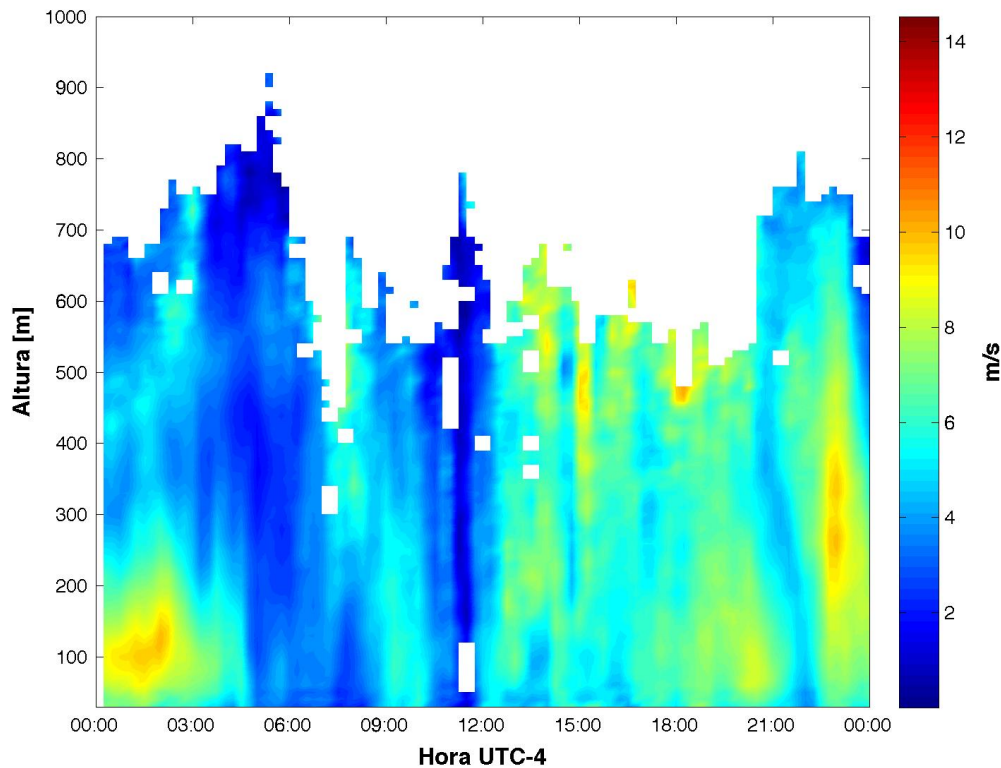


Figura 4.12: Gráfico de velocidad de viento horizontal medido por el SODAR el día jueves 9 de octubre.

#### 4.3.4. Viernes 10 de octubre

El día viernes se midió hasta medio día (ver Figura 4.12), momento en que se puso fin a la campaña.

Este día se inicia con un chorro que corresponde al decaimiento de los vientos nocturnos intensos registrados el día anterior (hasta 10 m/s). La extensión vertical de este chorro va desde la superficie hasta los 600 m.s.n.s., a las 0 horas y experimenta un decrecimiento en su alcance máximo, llegando a su fin a eso de las 4 AM.

Durante esta mañana de mediciones se registró el mínimo alcance del SODAR, llegando a las 8:30-9 AM a medir hasta los 200 m.s.n.s.. Este alcance mínimo no tiene relación con contaminación sonora, sino más bien con las bajas temperaturas registradas durante la noche (ver Figura 4.6), llegando a presenciarse la aparición de escarcha matutina. Este efecto de disminución del alcance máximo con bajas temperaturas está bien documentado Scintec (2013) y posee como solución la implementación de calefactores en los transductores, los que para efecto de esta campaña no se poseían.

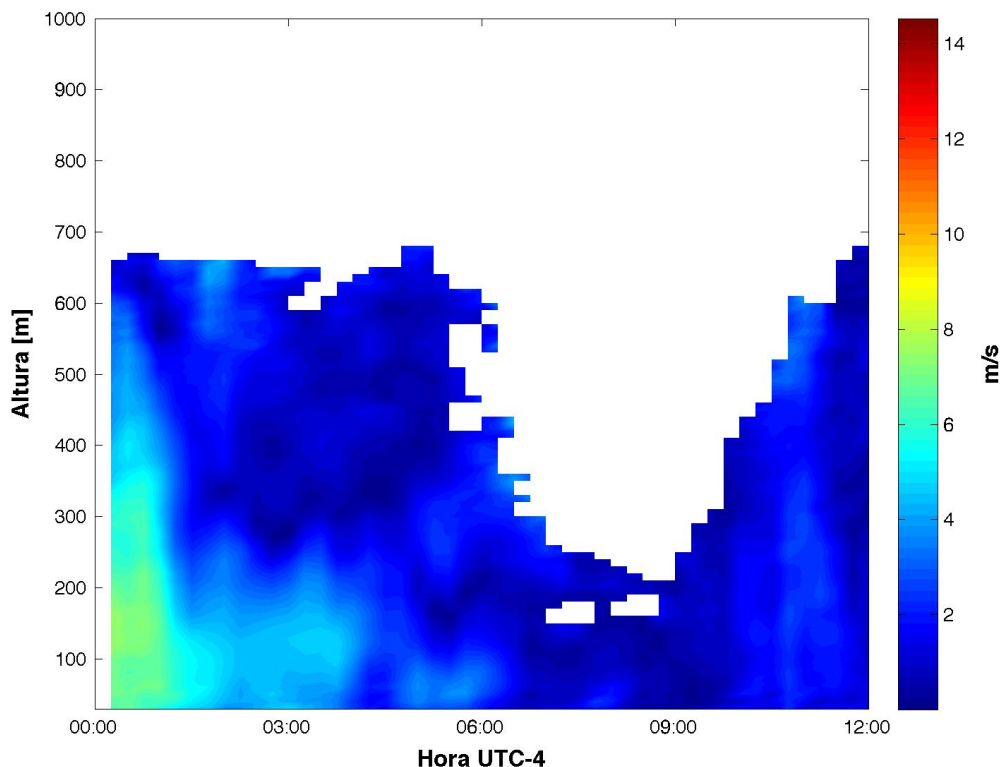


Figura 4.13: Gráfico de velocidad de viento horizontal medido por el SODAR el día viernes 10 de octubre.

## 4.4. Intercomparación entre mediciones SODAR y otros sistemas de medición

El sistema de medición SODAR es considerado un sistema remoto, debido a que no se encuentra directamente en contacto con lo que mide, y como todo sistema de medición remoto, debe de ser comparado con sistemas de medición directos u otras técnicas más estándar.

Existe considerable cantidad de bibliografía en la literatura donde se validan y comparan las mediciones de equipos SODAR con otros sistemas de medición más estándares, pero en cada bibliografía se cuantifica con distintas métricas y métodos, haciendo la intercomparación dependiente de la herramienta utilizada.

En el artículo de Crescenti (1995) se recopila información de comparaciones realizadas en los últimos 20 años y se comenta sobre las distintas métricas utilizadas. De acuerdo con esta referencia, las formas de comparación y cuantificación de errores más utilizadas por los diversos autores son:

- Sesgo (Diferencia media)

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)$$

- Comparabilidad (Diferencia cuadrática media)

$$C = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2 \right]^{1/2}$$

- Precisión (Desviación estándar)

$$S = (C^2 - B^2)^{1/2}$$

- Coeficiente de correlación de Pearson
- Regresión lineal simple

En las expresiones anteriores  $X_i$  representa las mediciones con el instrumento de referencia e  $Y_i$  las mediciones realizadas con el SODAR.

Comparar las mediciones del SODAR con una estación meteorológica en superficie puede llegar a establecer controles mínimos de calidad que son fáciles de implementar. En el caso de la campaña se utilizó una estación meteorológica a 3 m.s.n.s. y se calculó un perfil logarítmico según la ecuación 4.1 en donde  $z = 30m$ ,  $z_{ref} = 3m$ ,  $u_* = 0,08m/s$  y  $V_{ref}$  es la medición de velocidad de viento realizada por la estación meteorológica.

$$U(z) = V_{ref} \frac{\ln(z/u_*)}{\ln(z_{ref}/u_*)} \quad (4.1)$$

#### 4.4.1. Intercomparación SODAR-Globo Cautivo

Se utilizó el sistema de medición de Globo Cautivo como instrumento de referencia para comparar las mediciones obtenidas con el SODAR. La configuración utilizada consiste en dos sondas ubicadas a 100 y 140 metros desde el inicio de la cuerda que une el guinch con el globo, quedando el globo 10 metros por sobre la sonda instalada a 140 metros.

En la fase donde se diseñó el experimento se tomó en cuenta el no izar el Globo Cautivo en un punto que pudiese ocupar el volumen de medición del SODAR para así no generar un eco fijo que perturbase las mediciones del SODAR. Esto se tradujo en que el punto de izamiento del Globo se encontraba 100 m desplazado en contra de la dirección de viento predominante.

#### Velocidad del viento

En la Figura 4.14 se presentan cuatro comparaciones entre mediciones de velocidad de viento obtenidas con el SODAR y las obtenidas con el Globo Cautivo. Ambas corresponden a un promedio móvil de 30 minutos. Las mediciones reportadas corresponden a los días 7, 8 y 9 de octubre, generándose dos mediciones en el día 9, las que distinguiremos llamándolas AM (que se inicia a las 10:30 horas) y PM (que inicia a las 18 horas). La extensión del periodo en el que se comparan ambos sistemas de medición varía desde 2 horas hasta 5 horas y las interrupciones en las mediciones del Globo Cautivo se deben, principalmente, a cambios de baterías en las sondas del Globo Cautivo.

Se puede apreciar en la Figura 4.14 que las series de tiempo obtenidas para ambos equipos son similares y que en las comparaciones correspondientes a los días 7, 8 y 9PM el 86 %, 55 % y 90 %, respectivamente, de los puntos medidos con el SODAR son menores a los valores medidos por el Globo Cautivo, mientras que para las mediciones del día 9AM las mediciones del SODAR tienden a tener magnitudes mayores a las reportadas por el Globo Cautivo, pero en cantidad, éstas representan un poco más de la mitad de las mediciones de ese experimento (53 % de las mediciones).

La Tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos para el sesgo ( $B$ ), diferencia cuadrática media ( $C$ ), precisión ( $S$ ) y coeficiente de correlación ( $r$ ). Los resultados obtenidos se comparan en la tercera columna con lo obtenido por Crescenti (1995). Se aprecia en la tabla que la comparación es levemente mejor para el nivel de 100 metros que para el de 140 metros en los cuatro estadísticos presentados B, C, S y r. La diferencia sistemática o sesgo que se reporta entre las mediciones SODAR y Globo Cautivo presenta valores de  $-0,39m/s$  y  $-0,59m/s$ , respectivamente, para los niveles de 100 y 140 metros, donde el signo indica que las mediciones de velocidad realizadas con el SODAR tienden a ser menores a las realizadas con el Globo Cautivo.

Comparando los valores de los cuatro estadísticos obtenidos en ambos niveles con el trabajo de Crescenti (1995), se aprecia que las mediciones en los dos niveles presentan valores menores o iguales en la diferencia cuadrática media ( $C$ ) y la precisión ( $S$ ), mientras que el sesgo ( $B$ ) en los dos niveles es mayor al publicado por Crescenti (1995). El coeficiente de correlación en ambos niveles es similar a lo reportado por Crescenti (1995).

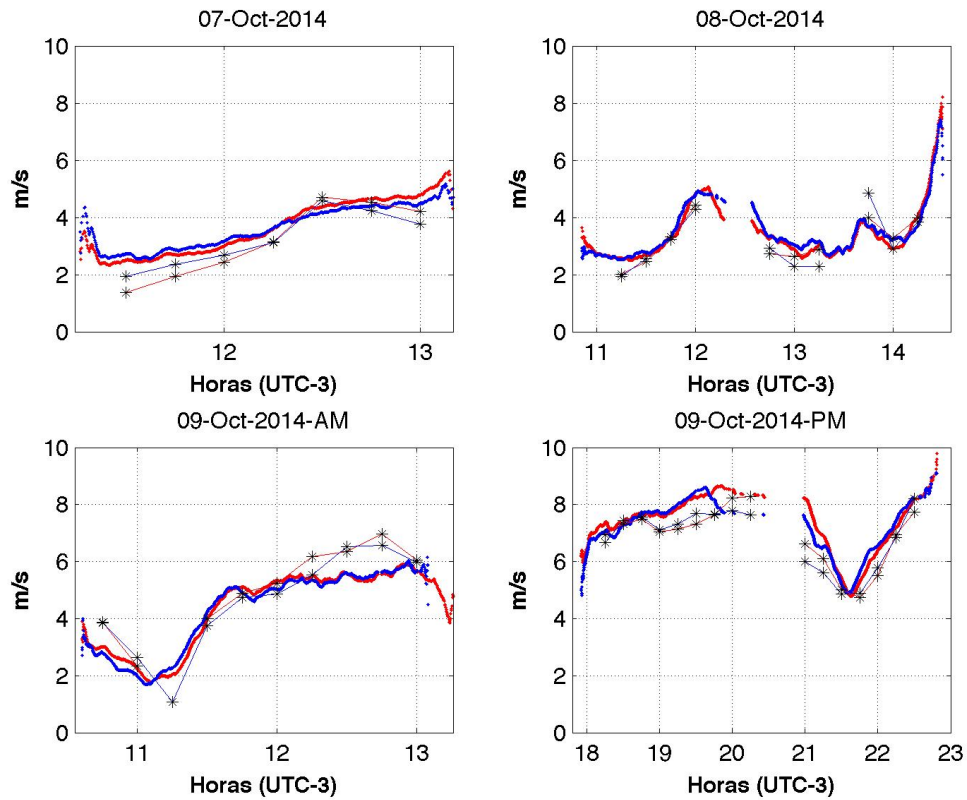


Figura 4.14: Intercomparaciones de velocidad de viento medida con SODAR y Globo Cautivo para cuatro experimentos. En rojo se muestran las mediciones a 100 m.s.n.s. y en azul las mediciones a 140 m.s.n.s.. Las líneas con asteriscos corresponden a las mediciones SODAR, mientras que las mediciones en puntos continuos a mediciones con Globo Cautivo, ambos en promedio móvil de 30 minutos.

	100 m.s.n.s	140 m.s.n.s	Literatura
B [m/s]	-0,39	-0,59	-0,05
C [m/s]	0,87	1,11	1,11
S [m/s]	0,78	0,94	1,06
r [m/s]	0,93	0,91	0,91

Tabla 4.1: Resumen del sesgo (B), diferencia cuadrática media (C), precisión (S) y correlación lineal de Pearson (r) para los dos niveles de medición a 100 y 140 m.s.n.s, y su comparación con lo publicado por Crescenti (1995).

En la Figura 4.15 se presenta el gráfico de dispersión y ajuste lineal entre las mediciones del SODAR con el Globo Cautivo. Los coeficientes  $r^2$  obtenidos para las mediciones en el nivel nominal de 100 y 140 metros fueron de 0,82 y 0,74 respectivamente, obteniéndose nuevamente que la comparación en el nivel de 140 metros presenta discrepancias mayores que lo medido en el nivel de 100 metros.

En las Figura 4.15 podemos notar que la diferencia entre las mediciones SODAR-Cautivo es dependiente de la velocidad del viento, generando una peor comparación a medida que el viento aumenta, en particular en el rango de [7-10 m/s]. Esta dependencia se podría explicar por el efecto que tiene el movimiento de la cuerda que mantiene cautivo al globo, sobre las mediciones de viento horizontal, tal como ha sido reportado por Haugen et al. (1975).

La Figura 4.16 es un histograma que presenta un esquema gráfico del error sistemático presente en las mediciones y que se aprecia debido al máximo no centrado en el cero y el error aleatorio asociado a la amplitud de la dispersión de la figura.

Todos los estadísticos y las figuras de comparación sugieren que para la velocidad existe un error sistemático en la medición. Este error sistemático no es posible de identificar si está presente en uno u otro sistema de medición .

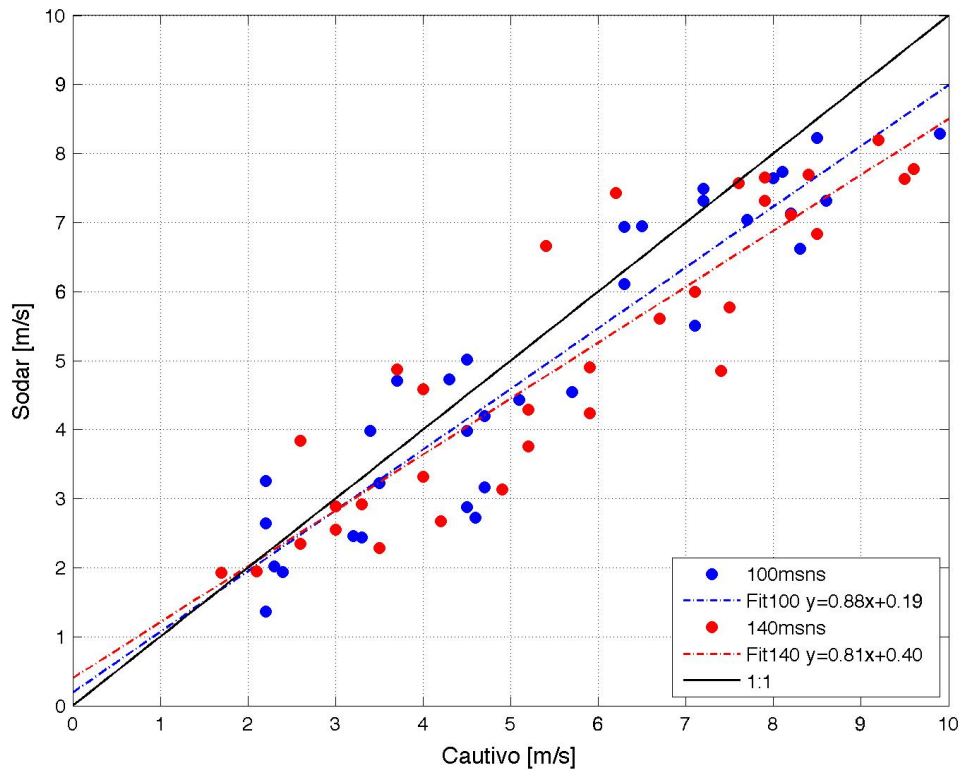


Figura 4.15: Gráfico de dispersión entre las mediciones de velocidad de viento horizontal realizadas con el Globo Cautivo y el SODAR. Se incluye la curva de referencia 1:1 y los ajustes lineales para ambas alturas. En azul se presentan los datos en el nivel nominal de 100 metros, mientras que en rojo se presentan las mediciones realizadas en el nivel nominal de 140 metros. Los coeficiente  $r^2$  de los niveles de 100 y 140 metros fueron de 0,82 y 0,74 respectivamente.

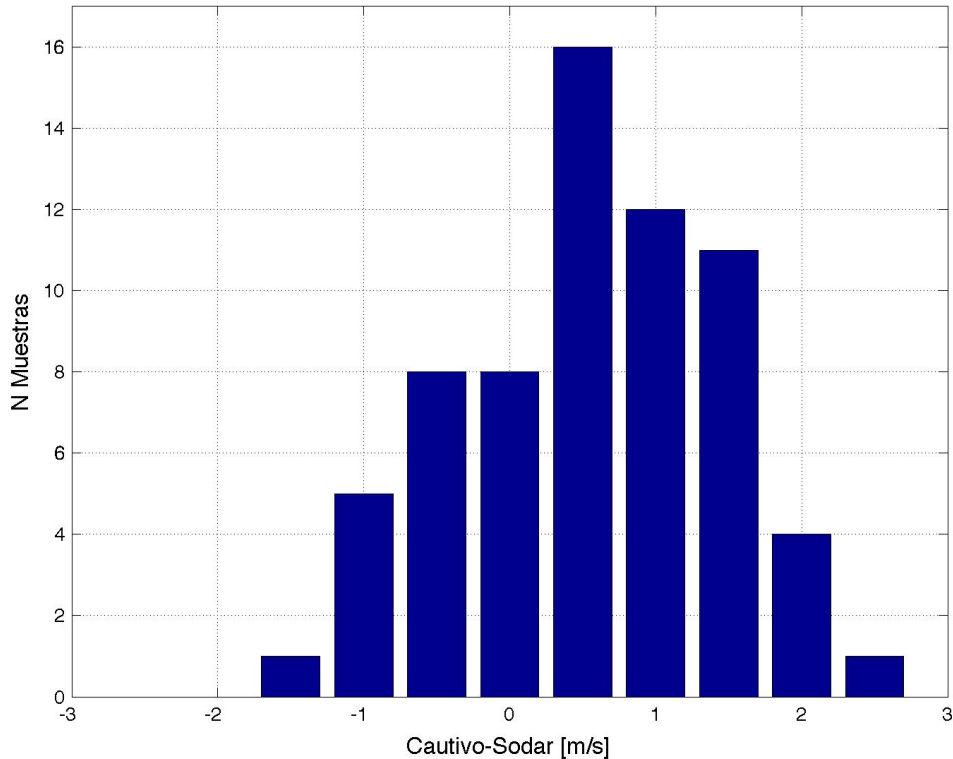


Figura 4.16: Histograma de la diferencia de velocidad entre las mediciones del Globo Cautivo con las mediciones del SODAR en ambos niveles.

## Dirección del viento

Para comparar las mediciones de dirección de viento se sigue el mismo procedimiento realizado para la velocidad. Las 4 series de tiempo donde se pudo comparar la dirección del viento entre las mediciones obtenidas con el Globo Cautivo y el SODAR se presentan en la Figura 4.17.

En las series de tiempo de la Figura 4.17 se logra apreciar que la dirección del viento obtenida con el SODAR en ambos niveles es similar a la obtenida con el Globo Cautivo.

La Tabla 4.2 muestra los resultados obtenidos en este caso para el sesgo ( $B$ ), diferencia cuadrática media ( $C$ ), precisión ( $S$ ) y coeficiente de correlación ( $r$ ). Los resultados obtenidos se comparan en la tercera columna en lo obtenido por Crescenti (1995). Los resultados presentados en la Tabla 4.2 muestra nuevamente que la sonda a 100 metros obtiene mejores resultados que la sonda a 140 metros. El sesgo reportado por Crescenti (1995) presenta valores 20 y 40 veces menores a lo obtenido para las sondas a 100 y 140 metros respectivamente. Los valores obtenidos para la diferencia cuadrática media son similares a lo reportado por Crescenti (1995).

En la Figura 4.18 se presenta el gráfico de dispersión para la dirección del viento medida



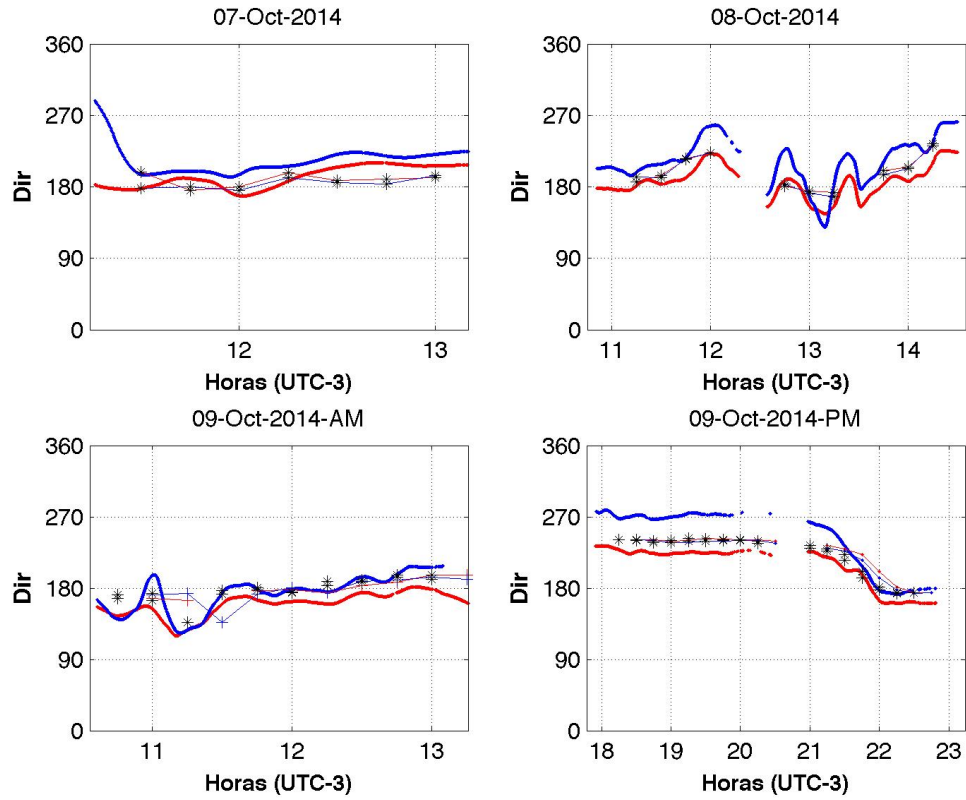


Figura 4.17: Dirección del viento horizontal medido con el SODAR y Globo Cautivo (GC) para los niveles de 100 y 140 m.s.n.s. Las series de ambos instrumentos corresponden a promedios móviles de 30 minutos. Simbología idéntica a la Figura 4.14

[grados]	100 m.s.n.s	140 m.s.n.s	Literatura
B	8,6	18,9	-0,5
C	14,2	23,7	22,0
S	11,3	14,3	21,5
r	0,89	0,95	0,92

Tabla 4.2: Tabla 1: Resumen del sesgo (B), diferencia cuadrática media (C), precisión (S) y correlación lineal de Pearson (r) para los dos niveles de medición en dirección y su comparación con lo publicado por Crescenti (1995).

por el SODAR y el Globo Cautivo. En la figura podemos ver que se hace notoria la diferencia sistemática entre el SODAR y el Globo Cautivo en el nivel de 100 m.s.n.s., presentando un ajuste lineal con pendiente de 0.96 y evidenciándose el corrimiento de la línea de referencia 1:1, mientras que para las mediciones al nivel de 140 m.s.n.s. se aprecia un mejor ajuste. Sin embargo, la pendiente es de 0.71 con un intercepto de  $45^\circ$ .

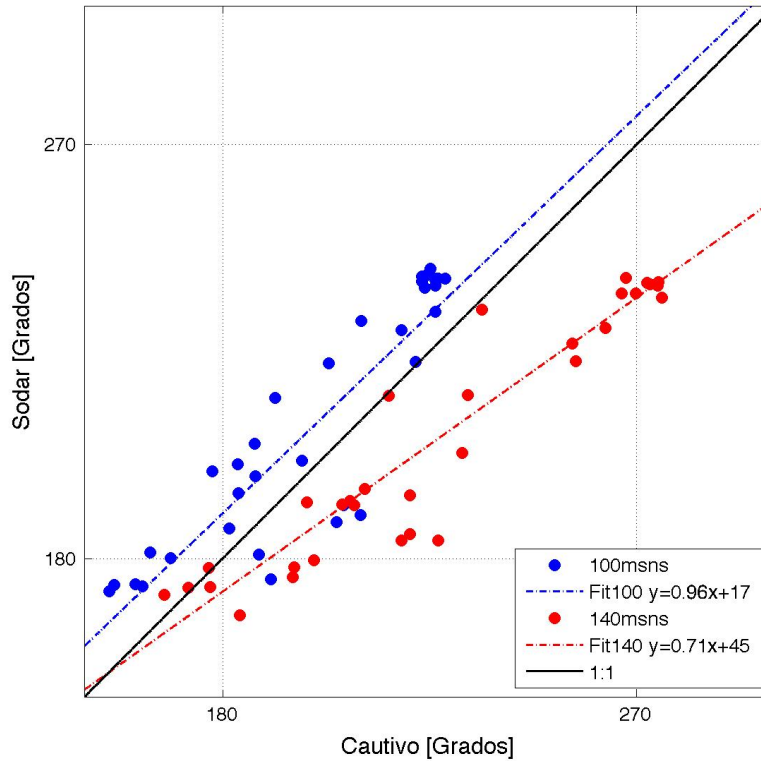


Figura 4.18: Gráfico de dispersión entre las mediciones de dirección de viento realizadas con el Globo Cautivo y el SODAR. Se incluye la curva de referencia 1:1 y los ajustes lineales para ambas alturas. Los coeficiente  $r^2$  de los niveles de 100 y 140 metros fueron de 0,59 y 0,47, respectivamente.

La Figura 4.19 corresponde a un histograma de la diferencia de direcciones entre lo obtenido con el Globo Cautivo y el SODAR. Se puede apreciar que la distribución no presenta un máximo centrado. Por el contrario posee un máximo de diferencias en torno a  $+20^\circ$ , pero con una cola significativa hacia diferencias negativas llegando hasta  $-30^\circ$ . Interpretando la Figura 4.19 con lo obtenido en el gráfico de dispersión (Figura 4.17), se concluye que el máximo de la distribución es debido a las mediciones de la sonda ubicada a 140 m.s.n.s. mientras que las diferencias negativas están asociadas a las mediciones realizadas con la sonda ubicada a 100 m.s.n.s.

Evaluando el desempeño para velocidad y dirección de viento horizontal en la comparación entre el SODAR y el Globo Cautivo notamos que la comparación en el nivel referencial de 140 metros es en general peor que la comparación a 100 metros. A primer orden no existen fundamentos para atribuir a uno u otro sistema de medición dicho error, pero hay

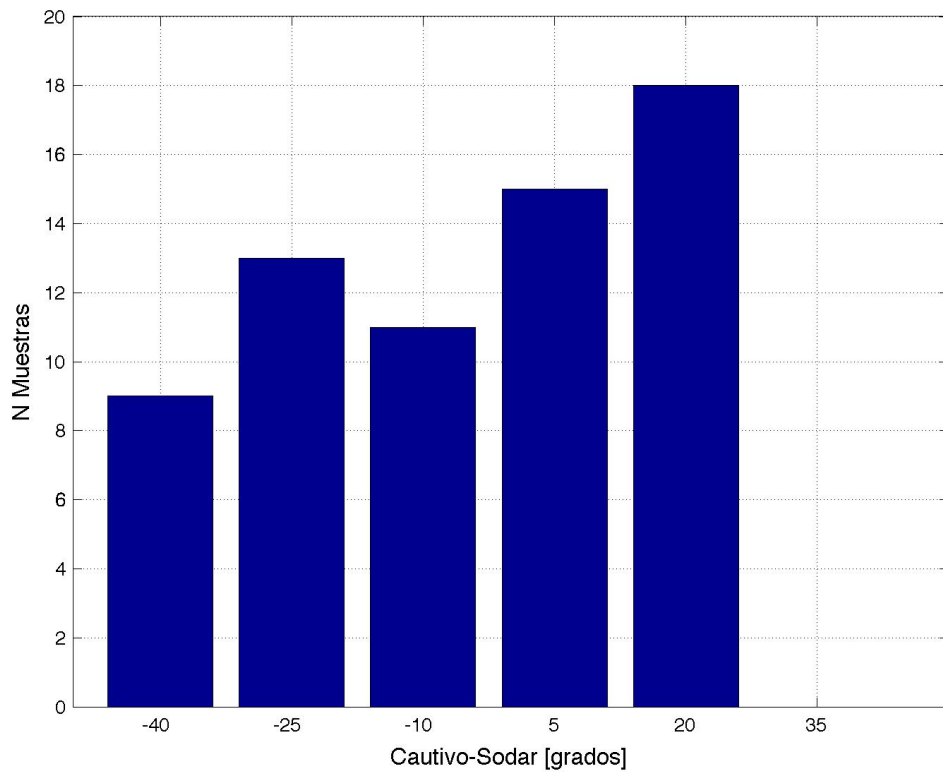


Figura 4.19: Histograma de la diferencia entre las mediciones de dirección del Globo Cautivo con las mediciones del SODAR en ambos niveles.

que considerar la recomendación de "dejar la sonda lo más lejos posible del globo", que realizó Haugen et al. (1975), siendo posible que la distancia de 10 metros entre la sonda y el globo no fuese suficiente.

El análisis de si existe una dependencia entre las diferencias de dirección con respecto a la velocidad se presenta la Figura 4.20, donde se puede observar que hay dos regímenes distintos, el primero con velocidad de viento menor a  $5\text{m/s}$  donde las direcciones en ambos niveles presentan una diferencia de hasta  $20^\circ$  y  $40^\circ$  para las sondas de 100 y 140 metros respectivamente, existiendo bastante dispersión. El segundo régimen se da para valores de viento mayores a  $5\text{m/s}$  en donde las diferencias tienen menor dispersión y presentan valores centrados en  $-15^\circ$  y  $33^\circ$  para las mediciones a 100 y 140 metros respectivamente.

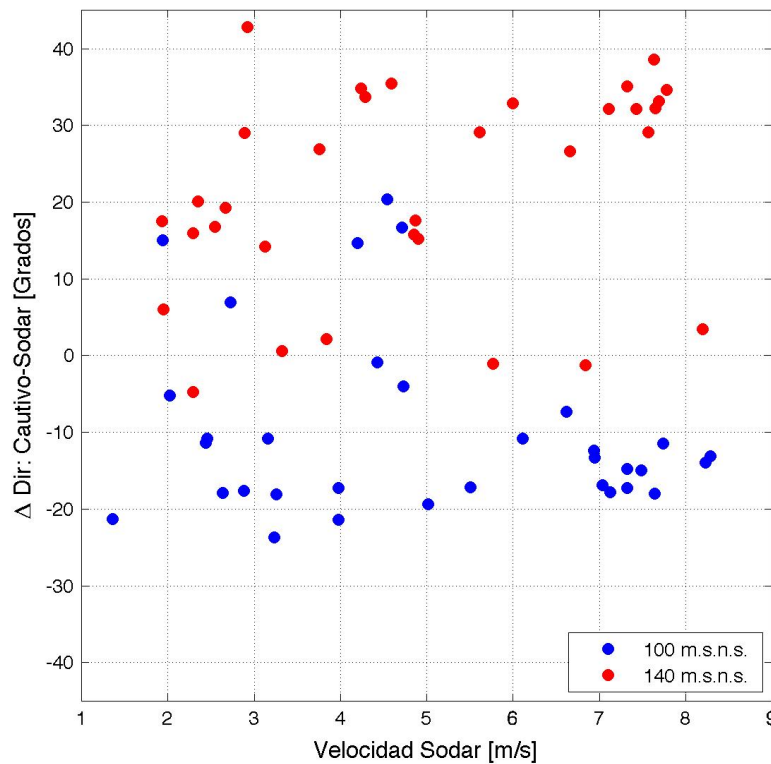


Figura 4.20: Gráfico de dispersión entre la velocidad y la diferencia de dirección entre el Globo Cautivo y el SODAR.

#### 4.4.2. Intercomparación SODAR–Estación meteorológica en superficie

Debido a que el primer nivel de medición del SODAR es a 30 metros sobre el nivel del suelo, la intercomparación entre las mediciones del SODAR con la estación meteorológica en superficie, a diferencia de la comparación con el Globo Cautivo, no se realiza en el mismo nivel de medición. Sin embargo, es importante conocer qué tan comparables son las mediciones

del primer nivel del SODAR con respecto a una medición en superficie, en el sentido que esta medición puede ser utilizada como un control de calidad mínimo para las mediciones del SODAR.

En la Figura 4.21 se presentan las series de tiempo de velocidad y dirección de viento de ambos sistemas de medición. La altura del anemómetro de la estación meteorológica está a 3 metros y el primer nivel de medición del SODAR está a 30 metros. Se puede apreciar que para la velocidad horizontal las mediciones son similares cuando las velocidades del viento son bajas (menor a 2 m/s), mientras que la dirección de viento medida por los dos sistemas compara mejor cuando la velocidad de viento es alta. Además en la misma Figura 4.21 superior se muestra el resultado de calcular un perfil logarítmico según la ecuación 4.1.

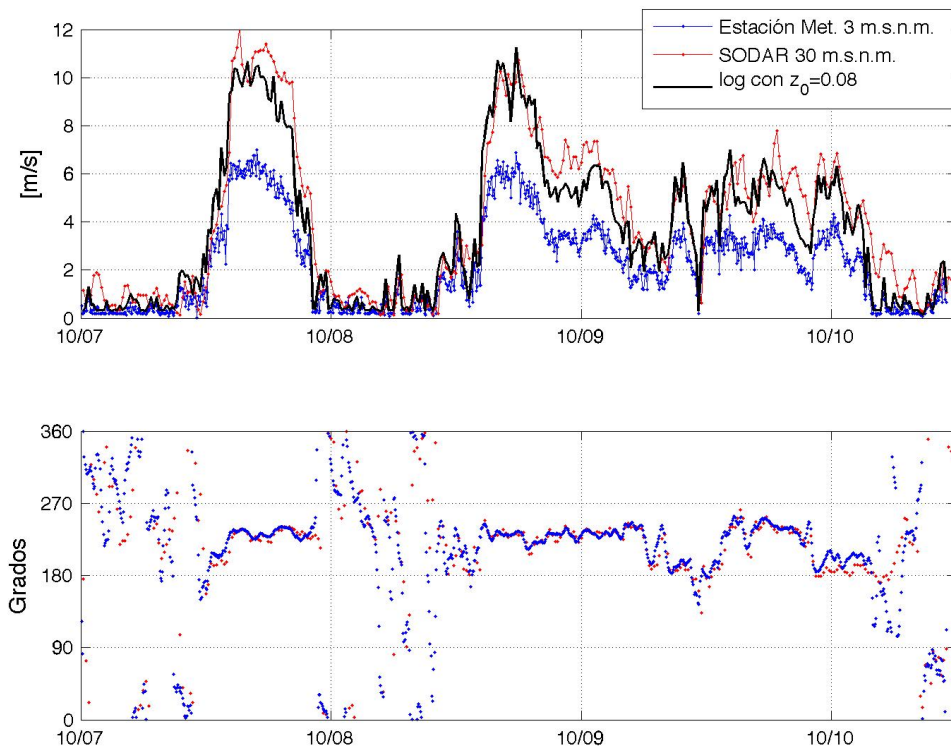


Figura 4.21: Gráfico superior muestra las series de tiempo de velocidad horizontal del SODAR, estación meteorológica en superficie y perfil logarítmico calculado con  $z_0 = 0,08m$ , mientras que en el gráfico inferior se muestra la serie de tiempo de dirección del viento obtenida con el SODAR y Estación Meteorológica en superficie.

En la Figura 4.22 se muestra un gráfico de dispersión entre la velocidad medida en la Estación Meteorológica y lo medido por el SODAR, además se muestra en el gráfico la línea 1:1 (negro) y el ajuste realizado (rojo), obteniéndose que las mediciones de velocidad de viento realizadas por el anemómetro a 3 metros tienden a ser un 56 % de lo medido por el SODAR en su primer nivel a 30 metros.

La Figura 4.23 presenta el gráfico de dispersión entre las direcciones de viento medidas

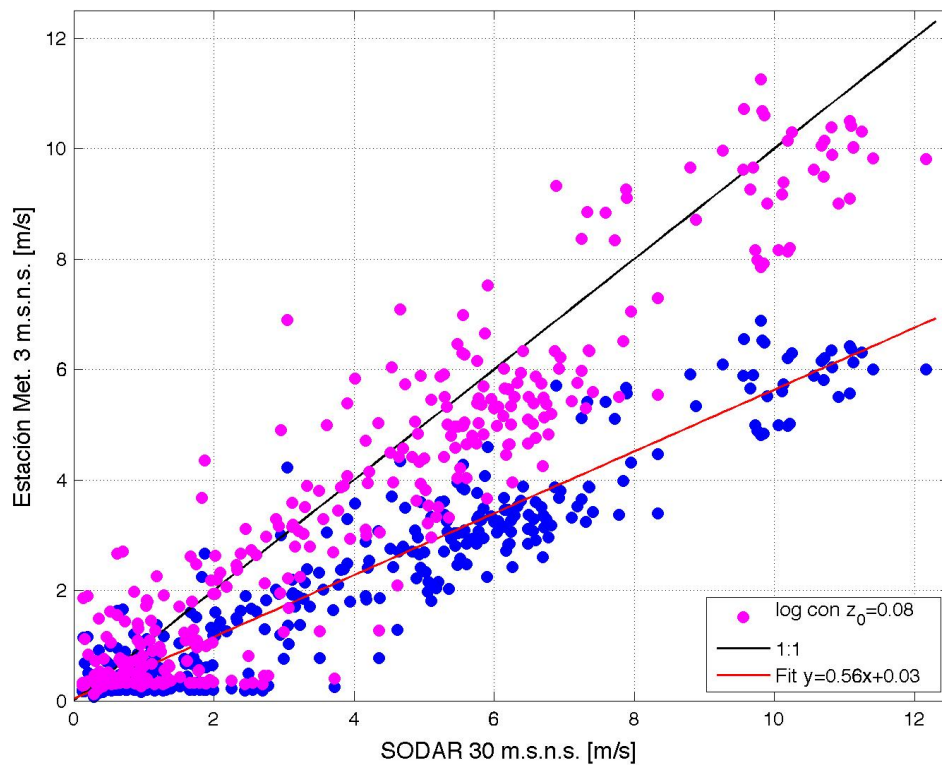


Figura 4.22: Gráfico de dispersión de velocidad entre los datos medidos con el SODAR y la estación meteorológica en superficie.

por los equipos SODAR y Estación Meteorológica. Se puede notar en la figura que existe una buena correlación en la dirección de viento si la velocidad del viento es mayor a 3 m/s.

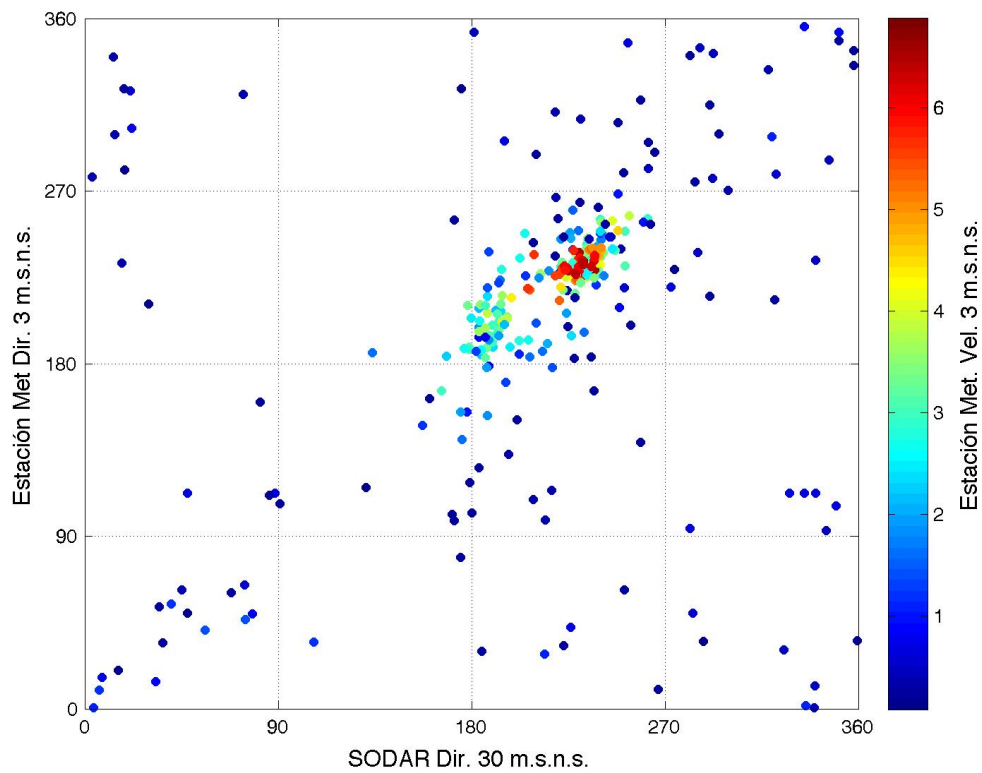


Figura 4.23: Gráfico de dispersión en la dirección del viento medido con el SODAR y la estación meteorológica en superficie, la barra de color indica la velocidad del viento medida en la estación meteorológica y la línea negra indica la referencia 1:1

En la Figura 4.24 se presentan dos gráficos de dispersión entre velocidad y dirección en las mediciones de cada equipo . Podemos notar que el SODAR en su nivel más bajo reproduce la estructura que se logra apreciar en el nivel de 3 metros mediante la estación meteorológica. Esta estructura nos revela las direcciones del viento más recurrente durante el desarrollo de la campaña, presentándose en el nivel de 30 metros dos máximos de velocidad con direcciones de 190° y 230°, donde el primer máximo presenta velocidades de hasta 7 m/s y el segundo de hasta 12 m/s. Observando en el nivel de 3 metros, podemos notar que el máximo que presenta velocidades menores a 190° pierde su resolución y se mezcla con el máximo de 230°.

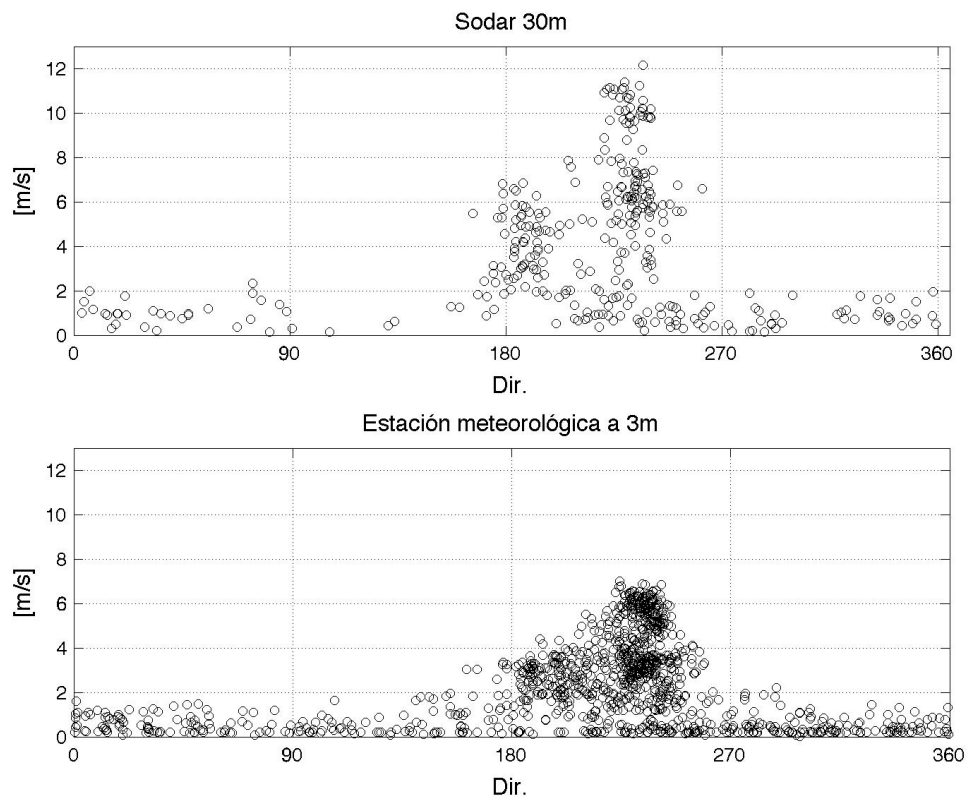


Figura 4.24: Gráfico de dispersión entre dirección y velocidad del viento. Panel superior indica los datos medidos por el SODAR en el nivel de 30 m.s.n.s. y el panel inferior los datos medidos en la estación meteorológica en superficie a 3m.s.n.s.



### 4.4.3. Intercomparación SODAR–Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR)

AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay) (Drue et al., 2008) es un programa iniciado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) en donde se utilizan aviones comerciales instrumentados para obtener datos meteorológicos. Estos datos son utilizados por aeropuertos, investigadores y agencias meteorológicas para enriquecer la resolución temporal y espacial de los radiosondas.

Durante el desarrollo de la campaña, 7 aviones con mediciones AMDAR aterrizaron/despegaron en el aeropuerto de Santiago, el que se encuentra a 7 kilómetros al noreste del parque Laguna Carén. Se compararon las mediciones AMDAR de velocidad y dirección del viento con lo medido por el SODAR, donde los perfiles se presentan en el Apéndice, Figuras A.1 y A.2.

Considerando que la resolución vertical de los datos AMDAR es de aproximadamente 100 metros, mientras que la del SODAR es de 10 metros; se buscó, en cada perfil SODAR que coincide con el tiempo del dato AMDAR, las alturas que estuviesen más cerca de cada punto de medición reportado por AMDAR hasta llegar a la altura máxima que logró medir el SODAR. Las Figuras 4.25 y 4.26 muestran las diferencias SODAR-AMDAR para velocidad y dirección, respectivamente.

Las principales características que se pueden observar en las Figuras 4.25 y 4.26 son:

- Un perfil con diferencias de velocidades de viento de hasta 12 m/s.
- Dos perfiles con diferencias de 9 m/s
- Los perfiles tienden a compararse mejor entre ellos entre los 350-500 metros
- Desde 550 metros cuatro perfiles AMDAR tienden a presentar mayores velocidades que las medidas por el SODAR

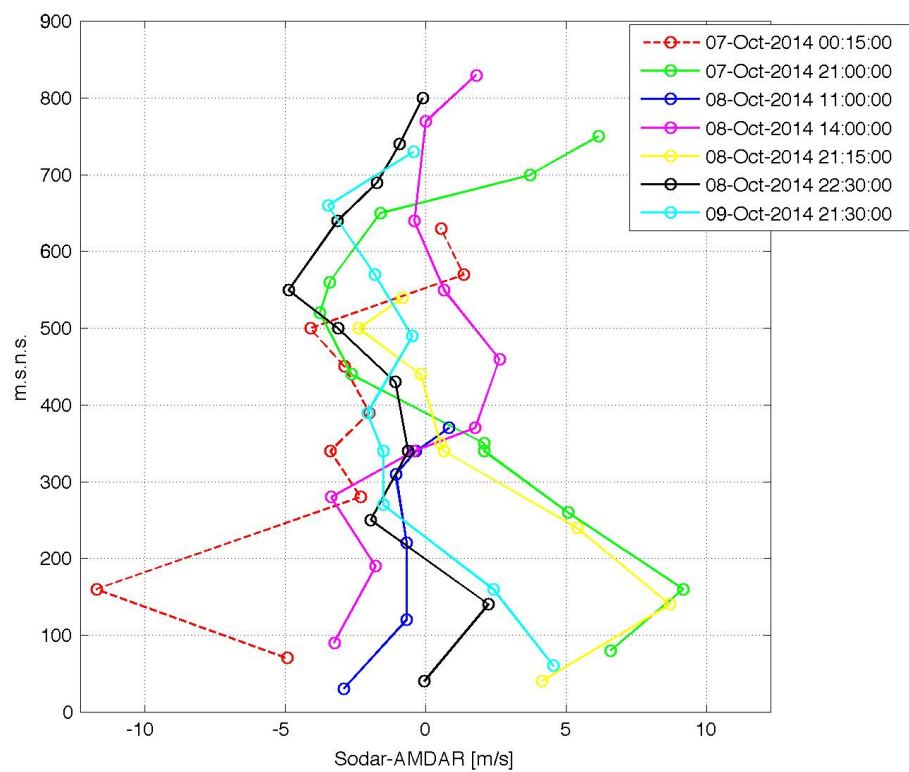


Figura 4.25: Diferencia de velocidades SODAR-AMDAR

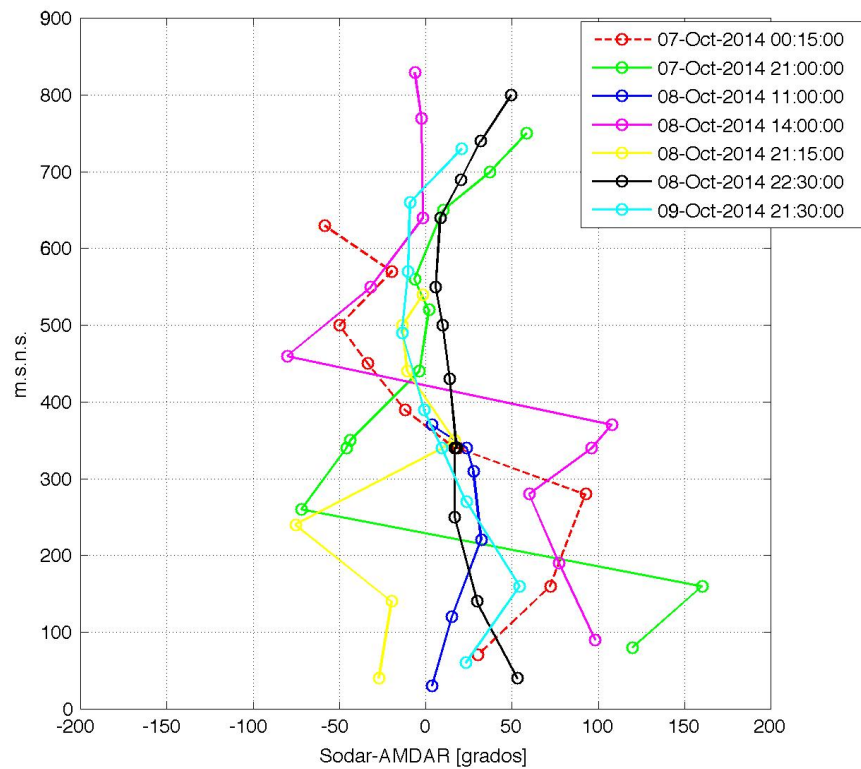


Figura 4.26: Diferencia de direcciones SODAR-AMDAR. Importante es destacar que la diferencia de direcciones de la velocidad del viento no se ve afectada por la discontinuidad entre 0-360 grados debido a que las direcciones de viento de los perfiles estudiados no se encuentran entre esas direcciones como se puede observar en las Figuras A.1 y A.2.

# Capítulo 5

## Conclusiones

El alcance máximo donde logró medir el SODAR en la campaña varió entre 300-1000 m.s.n.s. (Figura 4.7) siendo la altura mínima explicada por el efecto de escarcha asociado a bajas temperaturas registradas en la madrugada del día 10 de octubre, como se midió en la estación meteorológica en superficie (Figura 4.6) y un segundo evento de bajo alcance el día 7 de octubre asociado al desarrollo de viento intenso. El efecto de la escarcha se puede remediar adquiriendo el calentador que se vende como accesorio para este equipo SODAR mientras que el evento de bajo alcance medido el día 7/10 no puede ser explicado satisfactoriamente, siendo necesario investigar en mayor detalle. Sin tomar en cuenta los dos eventos mencionado anteriormente, las mediciones oscilan entre 1000-500 metros sobre el nivel del suelo, clasificándose el lugar de medición como bueno a moderado.

La disminución del alcance máximo de medición del equipo durante el desarrollo de viento intenso (día 7/10 en Figura 4.7) ha sido registrada en esta campaña así como en otras realizadas posteriormente por el Departamento de Geofísica. Normalmente el viento intenso se desarrolla durante la tarde y el alcance máximo del SODAR disminuye. Esta variación ha sido discutida con los fabricantes del equipo donde ellos han dicho que puede ser explicado debido a que el viento intenso medido no posee suficiente turbulencia para retrodispersar la señal de sonido emitida. La explicación no es satisfactoria y debiese ser evaluada con más mediciones, en particular mediante la utilización de un globo sonda para medir el perfil de temperatura y la estructura superior del viento que hace disminuir el alcance del SODAR.

El correcto emplazamiento del equipo lejos de ecos fijos asociados a estructuras, en ambientes de poco ruido ambiental en las frecuencias de operación y su correcta operación es crítica para medir bien y tener un buen alcance. Para cada instalación del equipo SODAR en las campañas se recomienda considerar 2 o 3 días para depurar la operación de equipo con tal de lograr un buen alcance, teniendo en cuenta evitar ecos fijos, ruidos ambientales, vibraciones metálicas inducidas por la misma emisión de pulsos del SODAR, evaluar la necesidad de utilizar el enclouser y siempre considerar la seguridad misma de los operarios y gente que transita por el sector según las recomendaciones del fabricante (Scintec, 2013).

La comparación realizada entre las mediciones SODAR y el Globo Cautivo son satisfactorias para velocidad y dirección con respecto a los estadísticos entregados por Crescenti

(1995), teniendo en cuenta que el sesgo es el que presenta las comparaciones más bajas y revelando un potencial efecto de la cercanía del Globo Cautivo en la sonda más alta (10 metros por debajo del globo), efecto también discutido por Haugen et al. (1975). La comparación realizada contra las mediciones de la estación meteorológica en superficie aporta mostrando la correlación de las mediciones en superficie con respecto al nivel más bajo de medición del SODAR a 30 m.s.n.s., concluyendo que es recomendado mantener mediciones con estaciones meteorológicas como un control de calidad mínimo. Por otra parte las comparaciones con respecto a los datos AMDAR no son satisfactorias y pueden ser explicadas por el efecto de la distancia entre los puntos de medición y refleja la compleja estructura meteorológica que existe en la cuenca de Santiago y alrededores.

El equipo SODAR logra medir en la cuenca de Santiago, sector laguna Carén, hasta los 1000 m.s.n.s. en algunas oportunidades y normalmente sobre alturas de 500 m.s.n.s. utilizando la configuración que se empleó en este trabajo, siendo esta ubicación recomendada para mediciones extendidas.

La medición de un equipo que utiliza un principio remoto como un SODAR debe ser siempre mirada con desconfianza y ser respaldado por otras evidencias que de preferencia deben de ser directas o in situ.

# Capítulo 6

## Bibliografía

- Aggarwal, S. K., Singal, S.P., Kapoor, Ramesh K., and Adiga, B. B. A study of atmospheric structure using SODAR in relation to land and sea breezes. *Boundary Layer meteorology*, 18:361–371, 1980.
- Argentini, S., Mastrantonio, G., and G. Fiocco, R.Ocone. Complexity of the wind field as observed by sodar system and by automatic weather stations on the nansn ice sheet, antarctica, during summer 1988-89: two case studies. *Tellus*, 44B:422–429, 1992.
- Bradley, Stuart. *Atmospheric Acoustic Remote Sensing*. Reading, Massachusetts, 2006.
- Bradley, Stuart, Perrott, Yvette, and Behrens, Paul. Corrections for wind-speed error from sodar and lidar in complex terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 143:37–48, 2012.
- Crescenti, Gennaro H. A look back on two decades of doppler SODAR comparison studie. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 322(10):651–673, 1995.
- Drue, C., Frey, W., A.Hoff, and Hauf, Th. Aircraft type-specific errors in AMDAR weather reports from commercial aircraft. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 134:229–239, 2008.
- Gaynor, J. E. Acoustic doppler measurement of atmospheric boundary layer velocity structure functions and energy dissipation rates. *Journal of applied meteorology*, 16:148–165, 1977.
- Gera, B.S. and Weill, A. Doppler SODAR observations of the boundary-layer parameters and a frontal system during the Mesogers 84 experiment. *Boundary Layer meteorology*, 54: 361–371, 1991.
- Gudiksen, P. H. and Leone, J.M. Measurements and modeling of the effects of ambient meteorology on nocturnal drainage flows. *Journal of applied meteorology*, 31:1023–1032, 1992.
- Harrison, R., Holman, C., McCarthey, H., and Mcilveen, J. Nocturnal depletion of photochemical ozone at a rural site. *Atmospheric Enviroment*, 12:2021–2026, 1978.

- Haugen, Kaimal, Readings, and Rayment. A comparison of balloon-borne and tower mounted instrumentation for probing the atmospheric boundary layer. *Journal of applied meteorology*, 14:540–545, 1975.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., W., Collins, Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, Roy, and Joseph, Dennis. The ncep/ncar 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77:437–471, 1996.
- King, J. C., Mobbs, S. D., Rees, J. M., Anderson, P. S., and Culf, A. D. The stable antarctic boundary layer experiment at halley station. *Weather*, 44:398–405, 1989.
- Lokoshenko, Mikhail A. Long-term observation in moscow and a new approach to potential mixing determination by radiosonde data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19:1151–1162, 2002.
- McAllister, L. G. Acoustic sounding of lower troposphere. *Atmos. Terr. Phys.*, 30:1439–1440, 1968.
- Oliver, R., S., Anja, E., Stefan, and K., Wilhem. Nocturnal secondary ozone concentration maxima analysed by sodar observations and surface measurements. *Atmospheric Environment*, 34:4315–4329, 2000.
- Ralph, F.M., Mazaudier, C., M.Crochet, and Venkateswaran, S. Doppler SODAR and RADAR wind profiler observations of gravity wave activity associated with a gravity current. *Monthly Weather Review*, 121:444–463, 1992.
- Scintec. *Software and Hardware Manual*. Wilhem-Maybach-Str. 14 72108 Rottenburg Germany, 2013.

# Apéndice A

## Perfiles AMDAR

Los perfiles AMDAR y SODAR se presentan en las Figuras A.1 y A.2.

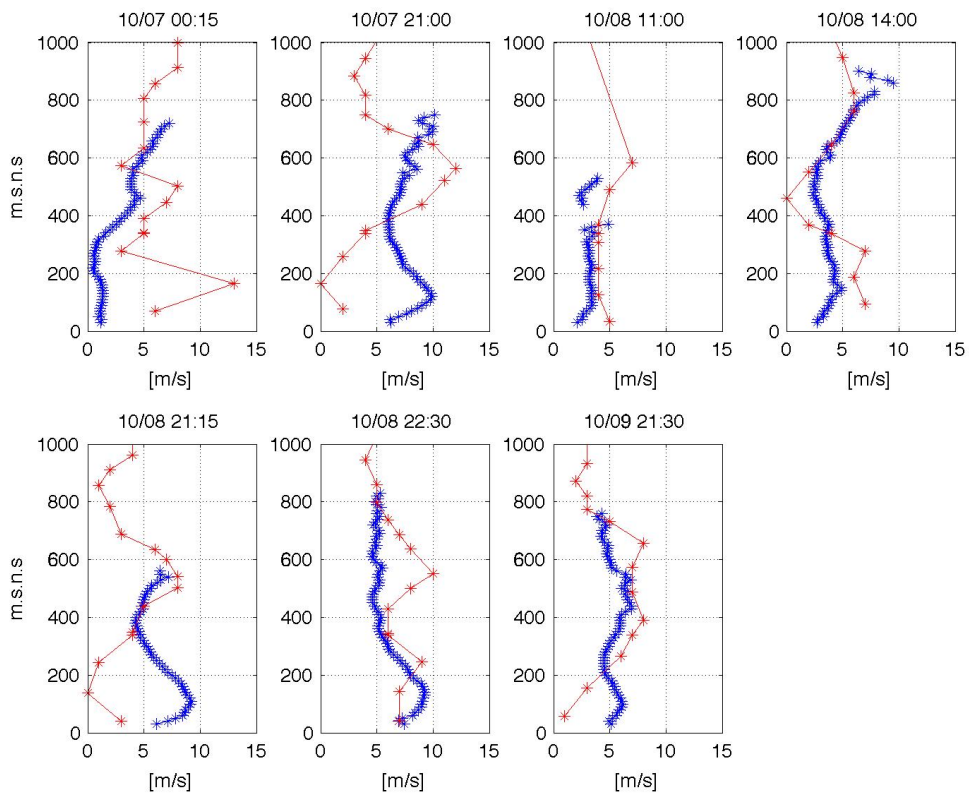


Figura A.1: Comparación de velocidad de viento medida con SODAR (azul) y AMDAR (rojo)



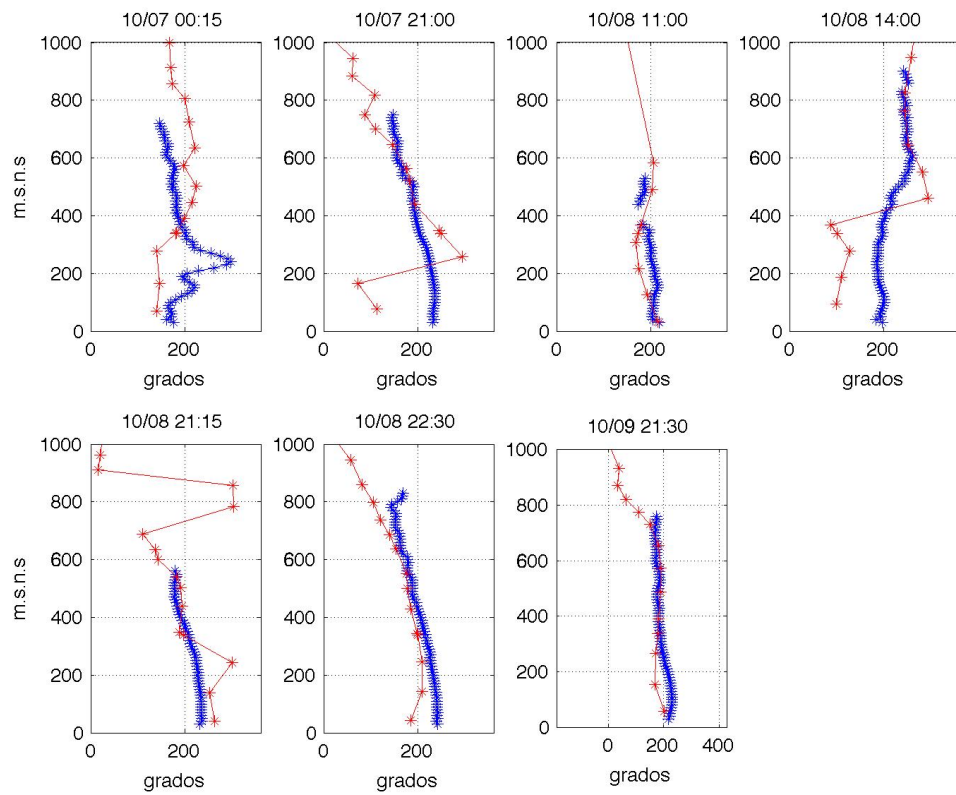


Figura A.2: Comparación de dirección de vientos medida por SODAR (azul) y AMDAR (rojo)

# Apéndice B

## Procesamiento por script Bash

Se realizó un código bash que procesa el archivo generado por el SODAR con extensión .mnd en formato experto y genera como salida tres archivos con extensiones .hlim .wrk y .mnd.date. Estos tres archivos son leídos por cualquier software de procesamiento. El script es el siguiente:

```
#!/bin/sh

#Script para pre procesar los datos obtenidos desde el SODAR MFAS con la configuracion
avanzada
#se obtiene:
#archivo de datos
#archivo de fechas
#archivo de altura capa
# # #Se ejecuta ./SODAR.sh input.mnd
#Genera:
#input.hlim >datos de altura capa de mezcla
#input.mnd.wrk >datos leibles por matlab u otra cosa
#input.mnd.date >fechas de las mediciones
#Por Nico Donoso nicolasdonosocastro@gmail.com

in="$1"
out="$2" #no se utiliza...
sed '1,92d' "$in» aux.dat #Se borran las primeras 92 lineas

sed -n '/^2014/p' "$in» aux2.dat #"$in".date #Guardamos las fechas en un .date
awk '$3 = ; print' aux2.dat >"$in".date

grep -A 1 "#PG.aux.dat >"$in".hlim #Guardo las linea siguiente y la seleccionada que
inician con #PG y se gurda como hlim
```

```
sed -i -e '/^#/d' "$in".hlim #Se borran las lineas que inician con
sed -i -e '/^-/d' "$in".hlim #Se borran del archivo hlim las lineas que inician con -
```

```
sed -i -e 's/9.99E+37/NaN/g' aux.dat #Cambiamos a NaN
sed -i -e 's/9.99999/NaN/g' aux.dat #Cambiamos a NaN
sed -i -e 's/999.9/NaN/g' aux.dat #Cambiamos a NaN
sed -i -e 's/99.99/NaN/g' aux.dat #Cambiamos a NaN
sed -i -e 's/9NaN/NaN/g' aux.dat #Cambiamos a NaN
sed -i -e 's/NaN9/NaN/g' aux.dat #Cambiamos a NaN
sed -i -e '/^2014/d' aux.dat #Borramos las lineas que inician con 2014 (OJO que hay que
cambiar según el año de la medición)
sed -i -e '/^99/d' aux.dat
```

```
sed -i -e '/^ 1 /d' aux.dat #Borro la linea de datos donde está hlim y PG=1 (importante
los espacios)
sed -i -e '/^ 2 /d' aux.dat #Borro la linea de datos donde está hlim y PG=2
sed -i -e '/^ 3 /d' aux.dat #Borro la linea de datos donde está hlim y PG=3
sed -i -e '/^ 4 /d' aux.dat #Borro la linea de datos donde está hlim y PG=4
sed -i -e '/^ 5 /d' aux.dat #Borro la linea de datos donde está hlim y PG=5
sed -e '/^#/d' aux.dat >"$in".wrk #Borramos las lineas que inician con
```

```
rm aux*
rm *-e
```

## Apéndice C

### Montaje del equipo SODAR

Para ilustrar la forma de montar el equipo SODAR se realizó, con ayuda de Luz Fariña y Aldo Vizcarra, un video donde se muestra el armado y funcionamiento del equipo (Figura C.1). El video se encuentra en Youtube en el siguiente link: <https://youtu.be/rr-SIX6P10g>

Clic aquí para ver video en Youtube.



Figura C.1: Impresión de pantalla del video disponible en Youtube donde se muestra la instalación y operación básica del SODAR MFAS

# Apéndice D

## Mapas de geopotencial en 500 hPa

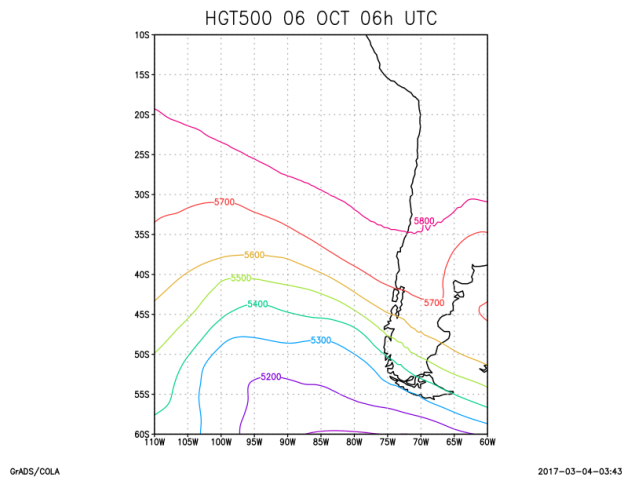


Figura D.1: Geopotencial en 500 hPa para el 6/10/2014 06:00 UTC

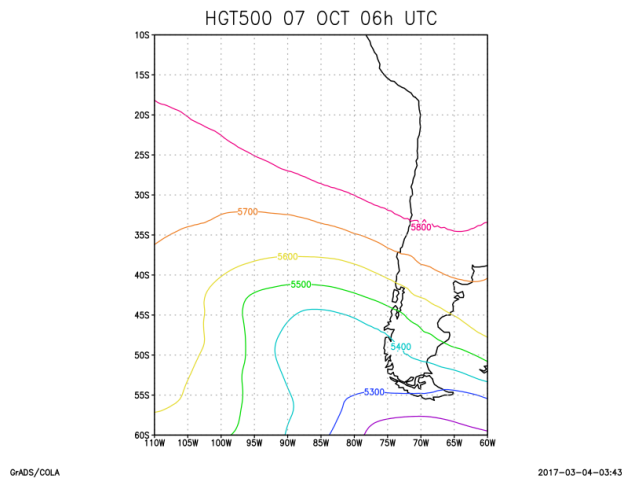


Figura D.2: Geopotencial en 500 hPa para el 7/10/2014 06:00 UTC

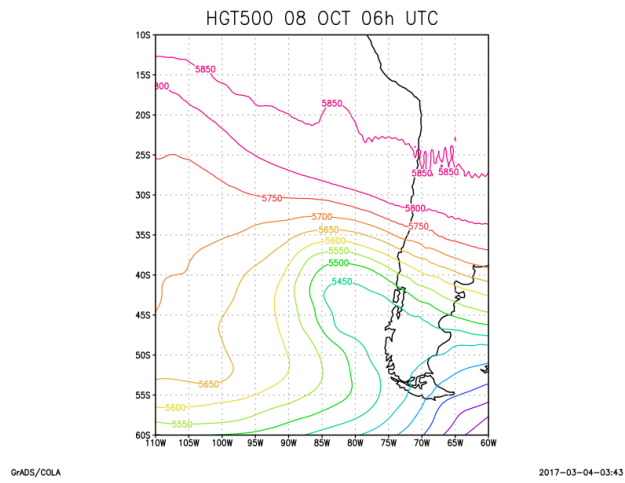


Figura D.3: Geopotencial en 500 hPa para el 8/10/2014 06:00 UTC

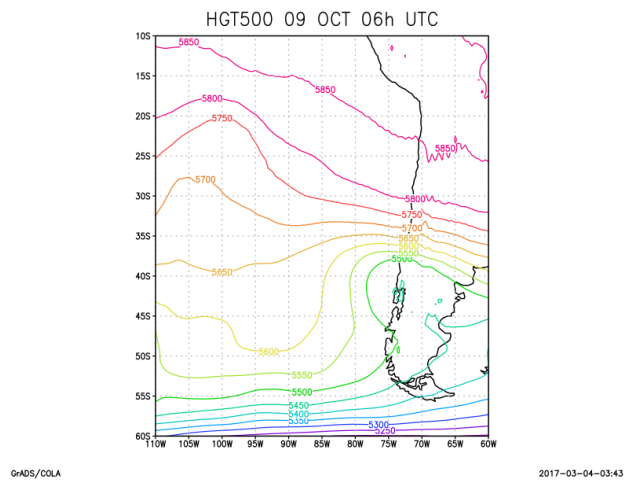


Figura D.4: Geopotencial en 500 hPa para el 9/10/2014 06:00 UTC

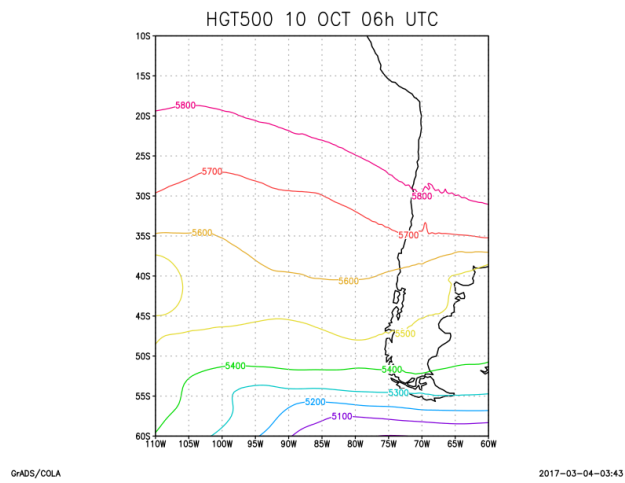


Figura D.5: Geopotencial en 500 hPa para el 10/10/2014 06:00 UTC