



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

CARACTERIZACIÓN OBSERVACIONAL DE EVENTOS DE TERRAL EN EL VALLE
DEL RÍO PELAMBRES

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA

ANDRÉS ELIESER ARRIAGADA PINTO

PROFESOR GUÍA:
RICARDO MUÑOZ MAGNINO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALDO MONTECINOS GULA
JOSÉ RUTLLANT COSTA

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA
POR: ANDRÉS ELIESER ARRIAGADA PINTO
FECHA: 2019
PROF. GUÍA: RICARDO MUÑOZ MAGNINO

CARACTERIZACIÓN OBSERVACIONAL DE EVENTOS DE TERRAL EN EL VALLE DEL RÍO PELAMBRES

En este trabajo se realiza, en base a observaciones meteorológicas, una caracterización climatológica de los eventos de viento Terral en el Valle del Río Pelambres (2340 mnsnm), Región de Coquimbo. Además, se analiza un caso de estudio ocurrido entre el 20 y 26 de julio de 2015, para el cual se contó con mediciones meteorológicas especiales. Para este estudio en particular se define Terral como vientos intensos valle abajo con una intensidad superior a los 5 ms^{-1} . Se observa que el Terral es un fenómeno que se manifiesta principalmente durante invierno en el periodo nocturno, con horas de inicio entre el fin de la tarde del día anterior y primeras horas de la mañana, mientras que el fin de los eventos se da principalmente en las primeras horas de la mañana. El Terral de Pelambres puede llegar a intensidades de viento horarias de 14 ms^{-1} en superficie. Durante el inicio de los eventos se observa, en general, anomalías positivas de temperatura, disminución en el contenido de humedad y alzas de material particulado MP10, características que se mantienen durante todo el desarrollo del Terral. Se observa una relación directa entre la intensidad de los eventos (magnitud de viento promedio) y la duración de estos en horas. El caso de estudio presenta características consistentes con la climatología del Terral, con aumentos de temperatura, baja humedad y alzas de MP10. El caso de estudio permite determinar que el Terral de Pelambres es un fenómeno que se manifiesta al interior del Valle del Río Pelambres típicamente en superficie entre las estaciones HM (2340 msnm) y Hualtatas (3400 msnm). En estaciones ubicadas río abajo no se observa vientos intensos durante el desarrollo del Terral. Asimismo, se observa una diferencia positiva de las anomalías de presión a lo largo del valle, entre la estación HITO (4000 msnm) y la estación HM. Además, se observa un cambio en las condiciones de estabilidad dentro del valle, pasando de un perfil estable durante los no-eventos a un perfil neutro durante los eventos, lo que sugiere que existe conservación de temperatura potencial en el flujo que desciende desde las zonas altas del Valle Pelambres hacia valle abajo hasta estación HM. Sinópticamente, el Terral se manifiesta durante el desarrollo de una vaguada costera, en un periodo post-frontal en los primeros días y pre-frontal en los últimos días del evento.

Agradecimientos

- Se agradece al proyecto Fondecyt N° 1170214 “Mesoscale dynamics of Raco winds in Central Chile” por el financiamiento parcial de este trabajo.
- Se agradece a la empresa Ingeniería y Geofísica Ltda (Meteodata) por facilitar parcialmente los espacios físicos, junto con la destinación de horario laboral para la dedicación al desarrollo de este trabajo.

Tabla de Contenido

| | |
|---|-----------|
| Índice de Ilustraciones | ix |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Motivación | 1 |
| 1.2. Zona de estudio | 2 |
| 1.3. Antecedentes | 2 |
| 2. Objetivos y Metodología | 7 |
| 2.1. Objetivo General | 7 |
| 2.2. Objetivos Específicos | 7 |
| 2.3. Metodología | 7 |
| 3. Datos | 8 |
| 3.1. Datos Observacionales | 8 |
| 3.1.1. Observaciones Históricas | 8 |
| 3.1.2. Observaciones Campaña Intensiva | 9 |
| 3.2. Reanálisis | 11 |
| 3.3. Imágenes Satelitales | 12 |
| 4. Resultados | 13 |
| 4.1. Climatología general del valle | 13 |
| 4.2. Climatología del Terral | 14 |
| 4.2.1. Definición del Terral | 17 |
| 4.2.2. Características del Terral | 21 |
| 4.3. Caso de estudio | 38 |
| 4.3.1. Observaciones en HM (superficie) | 38 |
| 4.3.2. Mediciones en altura | 41 |
| 4.3.3. Situación Sinóptica | 41 |
| 4.3.4. Alcance Espacial | 43 |
| 4.3.5. Estabilidad y humedad | 48 |
| 4.3.6. Gradientes de presión | 58 |
| 5. Conclusiones | 61 |
| 6. ANEXOS | 64 |
| 6.1. Glosario | 64 |
| 6.2. Saltos horarios climatológicos | 65 |

Índice de Ilustraciones

| | | |
|------|--|----|
| 1.1. | Mapa de la zona de estudio y puntos de interés. La paleta de colores y contornos representan la altura del terreno sobre el nivel del mar. | 3 |
| 1.2. | Representación esquemática de un (a) Foehn y (b) flujos valle abajo forzados radiativamente. En (a) el sombreado gris representa la capa de Foehn y las flechas indican cualitativamente la dirección y magnitud del flujo. Las líneas sólidas en (a) y (b) representan las iséntropas. Figura extraída de Plavcan et al. (2014) | 5 |
| 1.3. | Perfiles verticales de temperatura potencial θ en temporada de invierno en la mañana (línea sólida) y tarde (línea segmentada) para caso de (a) no-Foehn, (b) Foehn sin y (c) con intrusión hasta la superficie. Figura extraída y adaptada de Drechsel and Mayr (2008) | 5 |
| 3.1. | Serie de tiempo horaria de viento en estación HM. La franja vertical de color rojo indica el periodo de datos no utilizados debido al terremoto de Illapel. . | 9 |
| 3.2. | Serie de tiempo horaria de temperatura y humedad relativa en estación HM. | 10 |
| 3.3. | Parte de la instrumentación utilizada durante la campaña intensiva. a) LIDAR Doppler 3D WindCube 200s. b) Nefobasímetro Vaisala CL31. c) Estación monitora de calidad del aire (MP10) y viento E-Sampler marca MetOne Instruments. | 10 |
| 4.1. | Ciclos diarios en estación HM. a) magnitud de viento, b) dirección de viento , c) temperatura, d) humedad específica y e) radiación solar incidente. Periodo 2010-2015. | 15 |
| 4.2. | Variación estacional de los ciclos diarios en estación HM. a) magnitud de viento, b) dirección de viento , c) temperatura, d) humedad específica y e) radiación solar incidente (línea segmentada negra representa la curva de nivel de $10 W/m^2$). Periodo 2010-2015. | 16 |
| 4.3. | Ciclo anual de la amplitud térmica ($T_{max} - T_{min}$) en estación HM. Promedio (línea negra) y el rango del 90% de las observaciones (sombreado). Periodo 2010-2015. | 17 |
| 4.4. | a) Diagrama de dispersión y b) distribución de frecuencia bivariada entre magnitud y dirección de viento a nivel horario en estación HM. Periodo 2010-2015. | 18 |
| 4.5. | Distribución de frecuencia de V_d en HM, periodo 2010-2015. (a) Distribución horaria para todos los meses del año. (b) Distribución horaria mensual. . . . | 20 |
| 4.6. | Periodo de ejemplo de detección de Terral. | 21 |

| | |
|---|----|
| 4.7. a) Frecuencia de ocurrencia horaria de Terral (suma de todas las horas es 100 %). b) Frecuencia de ocurrencia horaria de Terral (azul) respecto de las horas no-Terral (amarillo). Periodo considerado es 2010 a 2015 para meses de mayo a septiembre. | 22 |
| 4.8. Distribución de frecuencia de la duración de los Casos Terral. | 23 |
| 4.9. a) Distribución horaria de los inicios (azul) y fin (rojo) de los eventos de Terral. b) Diagrama de dispersión entre la hora de inicio (azul) y fin (rojo) del evento v/s la duración del evento. | 24 |
| 4.10. Distribución de frecuencia de duración de los ET en función del número de CT consecutivos. | 24 |
| 4.11. Características de los inicios de los eventos durante mayo-septiembre. Distribución de los saltos iniciales de a) componente valle abajo del viento, b) anomalía de temperatura, c) material particulado MP10 y d) humedad específica. | 27 |
| 4.12. Diagrama de dispersión entre índices de saltos en los inicios de los CT. Dispersión entre (a) salto de anomalías de temperatura y salto de viento, (b) salto de MP10 v/s salto de viento, (c) salto de humedad específica y salto de viento y (d) salto de humedad específica y salto de anomalías de temperatura. | 28 |
| 4.13. Características del fin de los eventos durante mayo-septiembre. Distribución de frecuencia de los saltos finales de (a) componente valle abajo del viento, (b) anomalía de temperatura, (c) material particulado MP10 y (d) humedad específica. | 30 |
| 4.14. Diagrama de dispersión entre índices de saltos en el fin de los CT. Dispersión entre (a) salto de anomalías de temperatura y salto de viento, (b) salto de MP10 y salto de viento, (c) salto de humedad específica y salto de viento y (d) salto de humedad específica y salto de anomalías de temperatura. | 31 |
| 4.15. Otros índices del Terral. Distribución de frecuencias de a) temperatura promedio, b) amplitud térmica, c) humedad específica promedio, d) secamiento e) MP10 promedio, f) carga de material particulado, g) intensidad y h) amplitud de viento máxima. | 35 |
| 4.16. Diagramas de dispersión entre a) salto de temperatura máximo y secamiento máximo b) salto de temperatura máximo y salto de MP10 máximo, c) salto de temperatura máximo y salto de viento máximo, d) salto de temperatura máxima y secamiento máximo. | 36 |
| 4.17. Diagramas de cajas de la (a) duración de los CT en horas v/s intensidad promedio del Terral. (b) duración de los CT en horas v/s anomalía de intensidad (se extrae el promedio climatológico). | 37 |
| 4.18. Series de tiempo de la componente valle abajo del viento (panel superior) y MP10 (panel inferior) en HM para todo el periodo de campaña LIDAR, junio-julio 2015. Las franjas de color rojo indican las horas consideradas como Terral según el criterio descrito en la sección 4.2.1. La línea segmentada color negro representa el día 1 de julio. | 38 |
| 4.19. Periodo de caso de estudio. a) componente valle abajo del viento, b) temperatura c) humedad relativa y d) humedad específica. Las franjas color rojo indican los periodos clasificados como Terral. | 40 |

| | |
|--|----|
| 4.20. a) Backscatter nefo NIM. b) Backscatter nefo en 50 m (puntos grises) y MP10 en NIM (línea negra). c) Backscatter nefo en HM. d) Backscatter nefo en 50m (puntos grises) y MP10 en HM (línea negra). Las bandas color rojo indican los periodos clasificados como Terral. | 42 |
| 4.21. Mapa sinóptico para el día 20 de julio a las 17 HL. Se muestra imagen satelital MODIS-Aqua, presión a nivel del mar (GFS, contornos azules) y altura geopotencial en 500 hpa (GFS, contornos rojos). El triángulo amarillo indica la ubicación de la estación HM. | 44 |
| 4.22. Evolución sinóptica entre el 19 y 26 de julio de 2015 en base al reanálisis CFSR. Los colores representan la altura geopotencial en 1000 hpa (proxy de presión a nivel del mar) y los contornos color negro representan la altura geopotencial en 500 hpa. | 45 |
| 4.23. Igual que la figura 4.22, pero en términos de anomalía en base a la climatología de invierno CFSR 2010-2015. | 46 |
| 4.24. Panel superior: radiación de onda corta incidente en estación Hito (negro) y HM (gris). Panel inferior: altura de nieve en estación HM. Periodo 10 al 29 de julio de 2015. | 47 |
| 4.25. Series de tiempo de magnitud del viento (m/s) para el caso de estudio en a) Hito, b) Hualtatas c) NIM, d) C2, e) HM, f) Chacay y g) Cuncumén. | 49 |
| 4.26. Lo mismo que en la figura 4.25, pero para temperatura. *Las estaciones C2 y NIM no miden la temperatura de forma adecuada, en particular durante las horas del día. | 50 |
| 4.27. Lo mismo que en la figura 4.25, pero para humedad relativa. | 51 |
| 4.28. Lo mismo que en la figura 4.25, pero para humedad específica. | 52 |
| 4.29. Serie de tiempo de magnitud de viento en NIM a 4 m de altura (línea negra), y magnitud de viento horizontal LIDAR en 50 m de altura (puntos color gris). | 53 |
| 4.30. Perfil de viento promedio durante los casos Terral a lo largo del Valle Pelambres, entre Hito (4000 m) y Cuncumén (1000 msnm). Las barras horizontales en la estación NIM representan el rango de magnitud de viento medido por el equipo LIDAR a 50 m de altura. | 53 |
| 4.31. a) Componente de viento valle abajo en HM. b) Temperatura potencial en HM (negro) y Hualtatas (azul). c) Diferencia de temperatura potencial entre Hualtatas y HM. | 55 |
| 4.32. Digrama de dispersión entre la diferencia de temperatura potencial Hualtatas-HM y la componente valle abajo del viento. Promedios horarios. | 56 |
| 4.33. Perfil de estabilidad promedio durante los casos Terral a lo largo del Valle Pelambres, entre Hito (4000m) y Cuncumén (1000 msnm). Las barras horizontales en las estaciones C2 y NIM representan el error en la medición de temperatura (+-2°C). | 56 |
| 4.34. Igual que en la Figura 4.33 pero para los periodos de no-Terral. No se muestran las estaciones NIM y C2 debido a las malas mediciones de temperatura durante el día. | 57 |
| 4.35. Perfil de humedad específica promedio durante los casos Terral a lo largo del Valle Pelambres , entre Hito (4000m) y Cuncumén (1000 msnm). | 57 |
| 4.36. Igual que en la Figura 4.35 pero para los periodos de no Terral. No se muestran las estaciones NIM y C2 debido a las malas mediciones de temperatura durante el día. | 58 |

| | |
|--|----|
| 4.37. Perfil medio durante los CT en estudio en términos de anomalías para (a) temperatura potencial, (b) humedad específica y (c) magnitud del viento. Las líneas horizontales en (a) indican la incertidumbre en la medición de temperatura. La línea horizontal color rojo en (c) muestra el rango del 80 % de las mediciones de magnitud de viento LIDAR. Los perfiles en color gris representa el perfil promedio en el periodo nocturno (00-10 AM) de los días de no-Terral, para los meses junio y julio de 2015. | 59 |
| 4.38. a) Serie de tiempo de anomalías de presión en superficie en estación HM (negro), C2 (naranja), NIM (azul) e Hito (rojo). b) Diferencias de anomalías de presión entre estación HITO y HM. Periodo 18 al 29 de julio de 2015. | 60 |
| 6.1. Tendencia horaria climatológica de invierno (mayo - septiembre) en estación HM | 66 |

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

En Chile la meteorología y la climatología se desarrollan en base a 2 insumos principales: 1) observaciones (in situ, remotas, etc), 2) modelos numéricos (regionales, globales, reanálisis). Las observaciones meteorológicas en superficie están a cargo, en su mayor parte, de instituciones públicas, tales como, Dirección Meteorológica de Chile (DMC), Ministerio de Agricultura, Dirección General de Aguas (DGA), etc. Estas observaciones están destinadas a cumplir los objetivos de cada institución a nivel País. Aun siendo diversas las instituciones y los objetivos, estas observaciones de carácter público no necesariamente satisfacen los requerimientos de todos los sectores productivos del país. En esta línea muchas instituciones o empresas privadas auto-gestionan mediciones meteorológicas para llenar los vacíos de datos y así responder a sus problemáticas internas.

Meteodata, una empresa privada, en el contexto de sus servicios de consultoría ambiental prestados a Minera Los Pelambres (MLP), ha realizado actividades de mediciones en terreno con el fin de investigar fenómenos meteorológicos que afectan a la zona donde se emplaza la faena. Estas mediciones buscan complementar las mediciones que la minera ha realizado durante algunos años. Un fenómeno en particular que genera inconvenientes en la operación normal de la minera es el Terral. El Terral es un fenómeno meteorológico de vientos intensos valle abajo que se manifiesta en algunas zonas de la cordillera de los Andes, en la región de Coquimbo. En particular, parte de la operación de MLP se emplaza al interior del valle del Río Pelambres, donde se manifiesta el fenómeno principalmente en horas de la noche, causando levantamiento y transporte de polvo. Para entender mejor el fenómeno, en este trabajo se hace uso de observaciones convencionales y no-convencionales realizadas por MLP y Meteodata. Si bien el fenómeno de Terral ha sido estudiado anteriormente ([Rutllant and Garreaud \(2004\)](#); [Montes et al. \(2016\)](#)) en lugares relativamente cercanos, los resultados de estos trabajos no necesariamente aplican al Terral de Pelambres, ya que las condiciones geográficas locales son distintas. En particular, la estación de referencia para este estudio se encuentra ubicada a 2340 msnm, mientras que en los estudios anteriores la estación de viento más alta fue Cuncumén ([Rutllant and Garreaud \(2004\)](#)) a 1120 msnm. En general en Chile las estaciones en cordillera

son escasas, lo cual en este trabajo podría añadir información importante al estudio del Terral. La motivación del presente trabajo, es, por lo tanto, enriquecer el conocimiento científico de fenómenos meteorológicos en zonas montañosas, en particular en la cordillera de Los Andes.

1.2. Zona de estudio

El Valle Pelambres se encuentra ubicado en el lado oeste de la cordillera de Los Andes, en la zona sur de la Región de Coquimbo, Chile (31.8°S , 70.51°W). Su extensión horizontal es de unos 10 km, iniciando a los 2000 msnm (al noreste de Chacay) hasta los 3000 msnm, con orientación noreste(NE) a suroeste(SO). Este valle se caracteriza por una topografía compleja, donde el interior del valle se ve rodeado por picos de cerros que llegan a 1000m de desnivel en comparación al eje del valle. Es en el interior de este valle donde se encuentra ubicada la estación HM. La localidad más cercana es Cuncumén, ubicada a 1100 msnm, a 16 km al suroeste de HM. Un mapa de la topografía de la zona y puntos de interés se puede ver en la figura 1.1.

1.3. Antecedentes

Estudios en Chile

En cuanto al estudio de vientos del este intensos en Chile, fue el trabajo de [Rutllant and Garreaud \(2004\)](#) uno de los pioneros en el tema. Realizaron una caracterización sinóptica y observacional de los eventos de viento intenso valle abajo, en el lado oeste de los Andes. Si bien el foco del estudio se centró en el Cajón del Maipo, donde se manifiesta el viento Raco, también abordaron la manifestación regional de estos eventos, como es el Terral en la localidad de Cuncumén, Valle del Choapa, Región de Coquimbo. Según el estudio, estos eventos de viento intenso se asocian a un forzamiento sinóptico, donde se identifican 2 situaciones: 1) condición post-frontal (tipo A), asociada al 80 % de los casos; 2) condición pre-frontal (tipo B), asociada al 20 % de los casos. Para el presente trabajo de tesis es interesante que [Rutllant and Garreaud \(2004\)](#) hayan usado observaciones del Terral en la localidad de Cuncumén, ya que dicha localidad se encuentra a 16 km al suroeste de HM, uno de los puntos importantes de este estudio al interior del Valle Pelambres. Los resultados presentados de la estación Cuncumén muestran que cuando se observa viento Raco en el Cajón del Maipo (estación El Manzano) los vientos son de una intensidad máxima de 7 m/s, mientras que al mismo tiempo en Cuncumén es de a los más 3 m/s, mucho más débil que en El Manzano.

En el trabajo de [Khodayar et al. \(2007\)](#) estudiaron la estructura de la capa límite atmosférica en el Valle del Elqui (entre la costa y el interior del valle), Región de Coquimbo, Chile (30°S), a 200 km al norte del Valle Pelambres. Específicamente, se realizaron radiosondeos en la costa (La Serena) y en el interior del Valle del Elqui (Vicuña) para determinar la altura de la capa límite, estimar balances de calor y humedad, y establecer los factores responsables de los cambios de temperatura en el valle durante el día. [Bischoff-Gauß et al. \(2008\)](#) es la continuación del trabajo anterior, en la que se aplica modelamiento numérico para el mismo

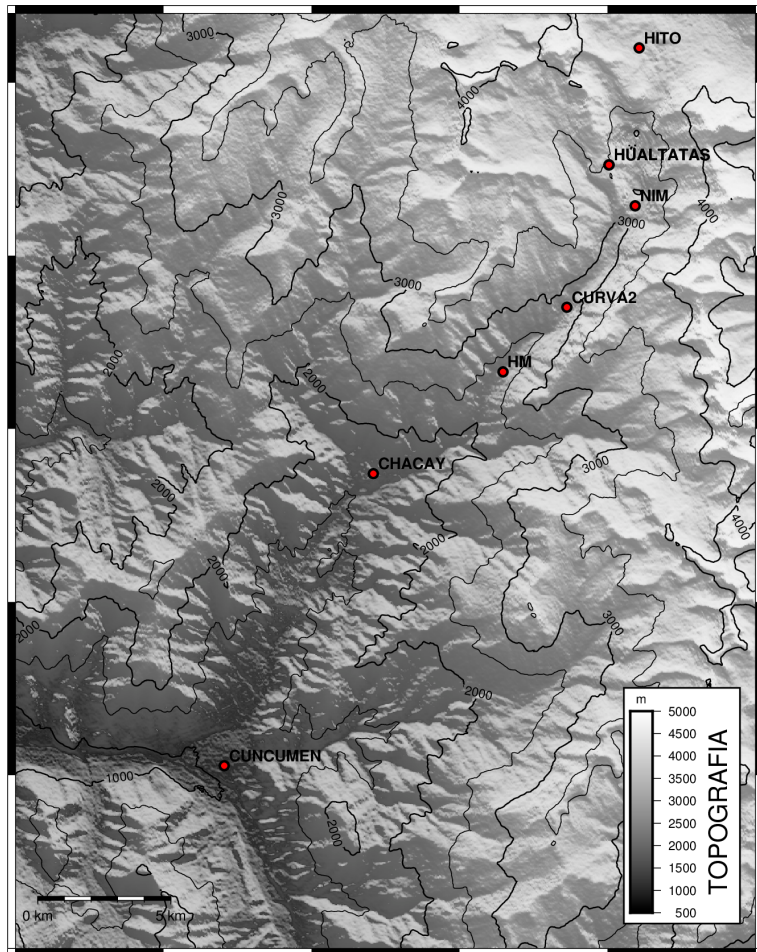


Figura 1.1: Mapa de la zona de estudio y puntos de interés. La paleta de colores y contornos representan la altura del terreno sobre el nivel del mar.

día de estudio. Ambos estudios no consideran el fenómeno de Terral o vientos del este intensos, ya que el enfoque del estudio estaba orientado más al estudio de los ciclos diarios, más que entender los fenómenos de viento intensos.

Montes et al. (2016) estudiaron el "Terral de Vicuña", haciendo alusión al fenómeno Terral en la localidad del Vicuña, en el interior del Valle del Elqui. El enfoque del estudio fue determinar el impacto negativo del Terral en la acumulación de frío en las hojas de los árboles frutales. Para esto se realizó una caracterización meteorológica del Terral usando una climatología de 11 años (2004-2014), en la temporada de invierno. Este trabajo define Terral como un viento cálido ($T > 11^{\circ}C$), seco ($HR < 30\%$), magnitud relativamente intensa ($V > 2 \text{ m s}^{-1}$) con dirección valle abajo ($0^{\circ} < \text{dir} < 180^{\circ}$). La definición de Terral es un poco distinta a la empleada en este trabajo de tesis, la cual será descrita en la sección 4.2.1. Según este estudio, el viento Terral se manifiesta preferentemente durante la noche y primeras horas de la mañana, con características de aumento de viento del este en su inicio, aumento de temperatura nocturno y secamiento del aire producido por la advección y mezcla de aire seco calentado adiabáticamente sobre el Valle del Elqui.

Montecinos et al. (2017) realizaron una caracterización climatológica del viento Puelche en la zona centro-sur de Chile, basado en datos de reanálisis NCEP, validados con campañas observacionales en la región del Bio-Bio ($37,5^{\circ}S$). Según este estudio, el Puelche es un fenómeno que se presenta durante todo el año, que se manifiesta por el forzamiento de escala sinóptica, caracterizado por el paso de un anticiclón migratorio a través de los Andes. El paso del anticiclón produce una circulación zonal en superficie desde Argentina a Chile. La definición de Puelche usada por los autores es viento del este sobre 2 m s^{-1} , 3 m s^{-1} , 5 m s^{-1} y 5 m s^{-1} para la temporada de verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente. Es importante destacar que para llegar a esta definición los autores adaptaron el método de Plavcan et al. (2014), un método más sofisticado para la clasificación de eventos tipo Foehn.

Generalidades Foehn

Dada la zona de estudio, en el lado oeste de la cordillera de los Andes, junto a que el fenómeno de interés se manifiesta a sotavento de la cordillera, es bueno entender algunos aspectos del viento Foehn. "Fohen" es un nombre genérico para un viento intensos pendiente abajo, cálido y seco, en general a sotavento de una montaña, originalmente asociado a la región de Los Alpes. (Brinkmann (1971), Chow et al. (2013)). Según la literatura, cuando el proceso es adiabático y la fricción se puede despreciar, una manera en que se diferencia un Foehn de un flujo forzado radiativamente es que en un Foehn existe conservación de temperatura potencial (figura 1.2a), mientras que para un flujo catabático la condición es estable, con mayor temperatura potencial a mayor altura (figura 1.2b) (Miltenberger et al. (2016); Plavcan et al. (2014)). Considerando la interacción del Foehn con zonas más frías valle abajo (por ejemplo una poza fría), el Foehn puede manifestarse en altura, pero sin destruir la poza fría, por lo cual el Foehn no llega a superficie (figura 1.3b) observándose un perfil homogéneo en altura y muy estable cerca de la superficie. También puede romper la poza fría y llegar a la superficie, observándose un perfil completamente homogéneo (figura 1.3c) (Drechsel and Mayr (2008))

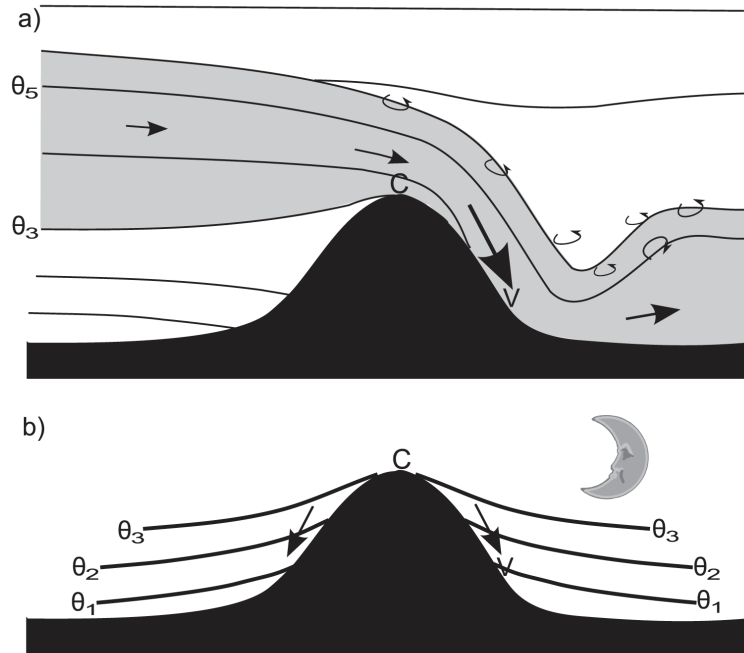


Figura 1.2: Representación esquemática de un (a) Föhn y (b) flujos valle abajo forzados radiativamente. En (a) el sombreado gris representa la capa de Föhn y las flechas indican cualitativamente la dirección y magnitud del flujo. Las líneas sólidas en (a) y (b) representan las iséntropas. Figura extraída de [Plavcan et al. \(2014\)](#)

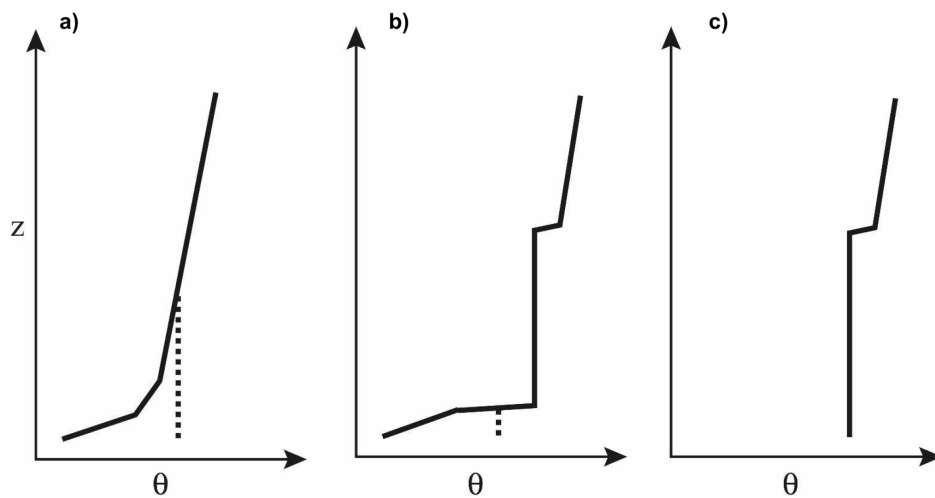


Figura 1.3: Perfiles verticales de temperatura potencial θ en temporada de invierno en la mañana (línea sólida) y tarde (línea segmentada) para caso de (a) no-Föhn, (b) Föhn sin y (c) con intrusión hasta la superficie. Figura extraída y adaptada de [Drechsel and Mayr \(2008\)](#)

Capítulo 2

Objetivos y Metodología

2.1. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es la caracterización climatológica de los eventos de Terral en el interior del valle del Río Pelambres, complementada con un análisis de un caso de Terral ocurrido durante campaña de medición intensiva.

2.2. Objetivos Específicos

Dentro de los objetivos específicos se pretende lo siguiente:

1. Describir la climatología general del valle
2. Definir qué es un Terral en el contexto del lugar de estudio
3. Caracterizar la climatología del Terral y su relación con otras variables
4. Análisis detallado de un caso específico de Terral

2.3. Metodología

La metodología de trabajo consiste en un análisis de observaciones meteorológicas y de calidad del aire de una estación de monitoreo existente en el interior del valle del Río Pelambres. Esta estación es llamada HM y contiene un periodo de 6 años de datos (2010-2015). Se describen las condiciones meteorológicas típicas del valle Pelambres (sección 4.1). Luego se identifica el fenómeno de Terral para lo cual se define un índice basado en las observaciones de viento en HM (sección 4.2.1). Definido el Terral, se realiza una climatología del viento Terral (sección 4.2.2). Finalmente se analiza en detalle un caso de estudio usando datos de HM y diversas estaciones instaladas en el contexto de una campaña de medición intensiva (sección 4.3).

Capítulo 3

Datos

Para responder a los objetivos de este trabajo, se hace uso de diferentes fuentes de información, las cuales se dividen en 2 grupos:

- Datos Observacionales
 - Observaciones históricas
 - Observaciones de campaña intensiva
- Datos de Reanálisis
- Imágenes Satelitales

El detalle se describe a continuación.

3.1. Datos Observacionales

3.1.1. Observaciones Históricas

Las observaciones históricas corresponden a datos horarios de meteorología y calidad del aire de la estación HM entre los años 2010 a 2015. Esta estación se encuentra ubicada al interior del Valle Pelambres a una altura de 2350 msnm (figura 1.1). Las variables disponibles son:

- Temperatura
- Magnitud y dirección de viento
- Humedad relativa
- Presión en superficie
- MP10

En las figuras 3.1 y 3.2 se muestran los valores horarios de magnitud de viento (3.1a), dirección de viento (3.1b), temperatura (3.2a) y humedad relativa (3.2b) para los 6 años de

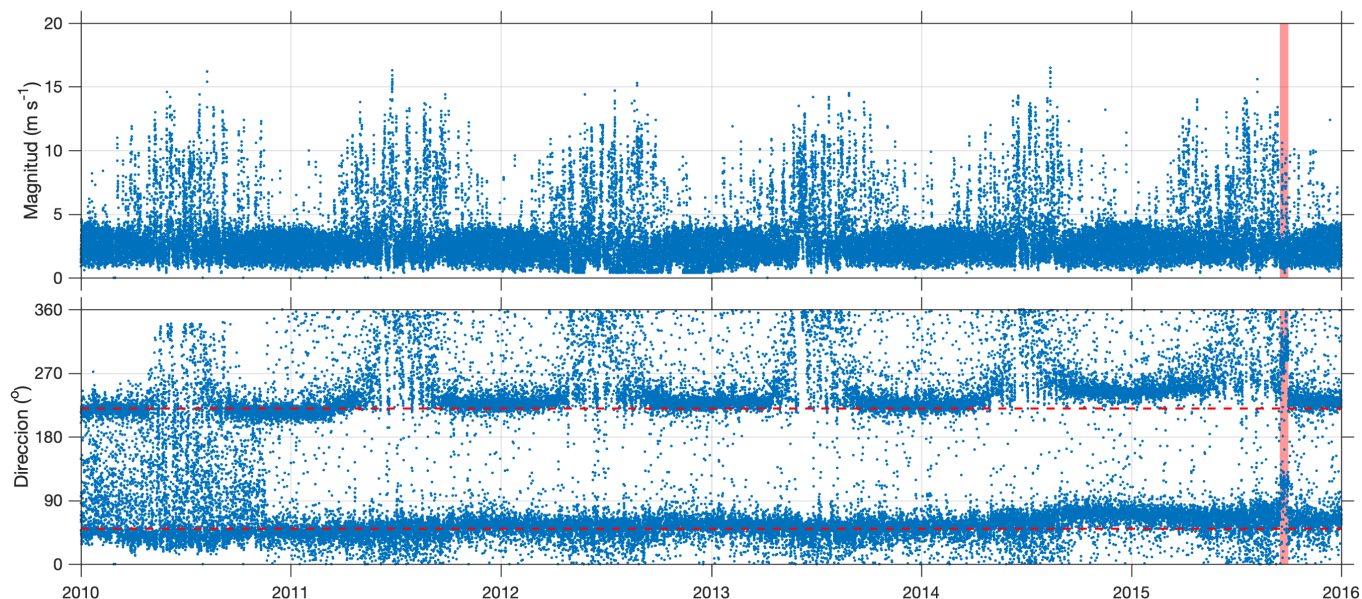


Figura 3.1: Serie de tiempo horaria de viento en estación HM. La franja vertical de color rojo indica el periodo de datos no utilizados debido al terremoto de Illapel.

datos. A la serie de tiempo de dirección se le corrigió el error sistemático que se aprecia en la figura 3.1b, donde existe un leve desvío con los años, mientras que a las series de temperatura y humedad relativa le fueron eliminados los valores disparados. A causa del terremoto de Illapel ocurrido el 16 de septiembre de 2015 (Tilmann et al. (2016)), cercano al valle, la estación HM tuvo daños importantes en su torre de 10 m, por lo cual, se introdujeron errores significativos en las mediciones de temperatura y viento, debido a una des-nivelación del protector de radiación y veleta, respectivamente. Por lo tanto, los datos entre el 16 y 30 de septiembre de 2015 no son utilizados en el análisis (franja roja en figura 3.1).

3.1.2. Observaciones Campaña Intensiva

La campaña intensiva tuvo lugar durante los meses de junio y julio de 2015. Las mediciones realizadas corresponden a variados instrumentos convencionales y no-convencionales de meteorología y calidad del aire. Entre ellos se encuentra un LIDAR Doppler 3D (figura 3.3a), dos Nefobasímetros (figura 3.3b) y monitores de material particulado E-Sampler (figura 3.3c). Adicionalmente, en este trabajo se incluyen las observaciones de estaciones de la red de monitoreo de MLP.

A continuación se describe en detalle la instrumentación utilizada:

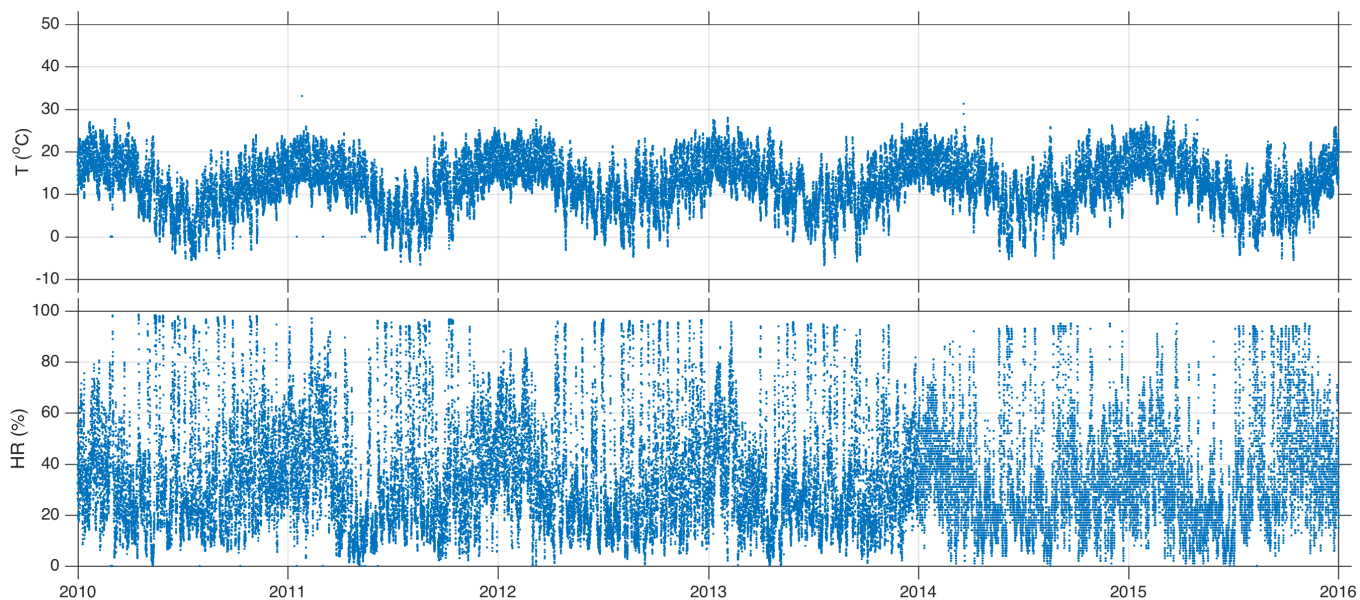


Figura 3.2: Serie de tiempo horaria de temperatura y humedad relativa en estación HM.

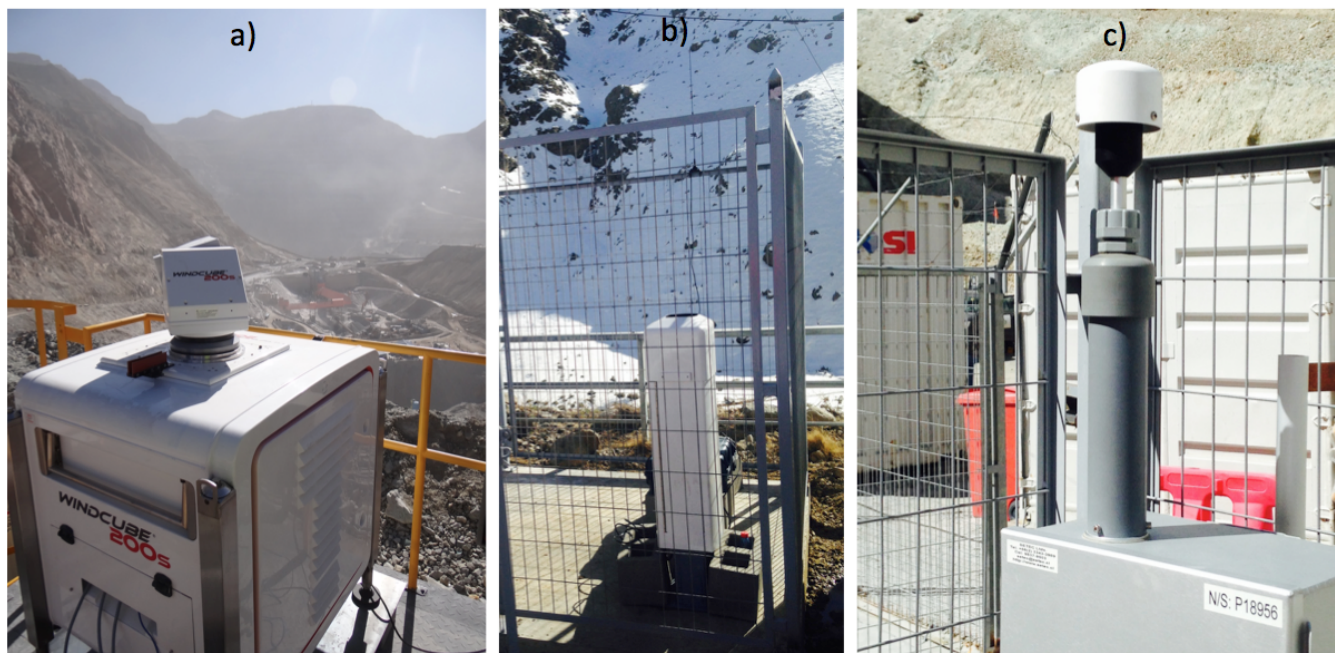


Figura 3.3: Parte de la instrumentación utilizada durante la campaña intensiva. a) LIDAR Doppler 3D WindCube 200s. b) Nefobasímetro Vaisala CL31. c) Estación monitora de calidad del aire (MP10) y viento E-Sampler marca MetOne Instruments.

LIDAR Doppler 3D

Instrumento LIDAR Doppler 3D modelo Windcube 200s desarrollado por la empresa francesa Leosphere. Este instrumento fue traído desde Francia en modo de arriendo por el periodo de campaña. Dentro de las capacidades de este instrumento se encuentran:

- Barrido horizontal en un ángulo de elevación fijo. Entrega retrodispersión y viento radial.
- Barrido vertical a azimut fijo. Entrega retrodispersión y viento radial.
- Perfil vertical. Entrega retrodispersión y viento en 3 componentes.

Este instrumento se ubicó en NIM (figura 1.1) a una altitud de 3050 msnm. Para efectos de este trabajo, se usaron solo los datos de perfil vertical de viento y retrodispersión.

Nefobasímetro

Si bien los nefobasímetros (Ceilometer en inglés) fueron desarrollados con el fin principal de la detección de la base de las nubes, con aplicaciones mayormente en el área de la aviación, en los últimos años también se ha visto un incremento importante de su uso en aplicaciones o estudios relacionados con la capa límite y calidad del aire (Muñoz and Alcañiz (2012); Wiegner et al. (2014)). Esta campaña consideró 2 equipos nefobasímetros, los cuales son parte de la red de monitoreo de calidad del aire de MLP y que son operados por Meteodata. Estos fueron ubicados en HM y NIM (figura 1.1).

E-Sampler

E-Sampler es un monitor de material particulado MP10 de la marca Met One Instruments. Trae incorporado un sensor de magnitud (tipo copas) y dirección (veleta) de viento, sensor de humedad relativa externo y sensor de temperatura externo, pero sin protector de radiación solar. El hecho de que no tenga protector de radiación solar produce que las mediciones durante el día, cuando se observan las máximas temperaturas, no sean mediciones de buena calidad, por lo cual éstas no se usan en este estudio (estaciones NIM y C2). Por otro lado, el fabricante declara un error de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en la medición de temperatura.

3.2. Reanálisis

Para determinar las condiciones sinópticas asociadas a eventos de Terral del caso de estudio, se hace uso de la base de datos de reanálisis NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSR, Saha et al. (2014)). Para las variables atmosféricas este reanálisis posee una resolución horizontal de 38 km y 64 niveles verticales. Los campos utilizados son la altura

geopotencial en 1000 hpa (HGT1000) y 500hpa (HGT500), niveles usados como proxies de las condiciones cercanas al nivel del mar y de altura, respectivamente.

3.3. Imágenes Satelitales

Para describir la situación sinóptica del caso de estudio en la sección [4.3.3](#), se hace uso de imágenes satelitales del sensor MODIS montado en la plataforma Aqua. En particular se hace uso de la reflectancia corregida, también conocida como color verdadero, el cual es una reconstrucción de lo que vería el ojo humano en base a una combinación de bandas en distintas longitudes de onda.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Climatología general del valle

La climatología general del valle se describe en base a los ciclos diarios (Figura 4.1) y estacionales (Figura 4.2) de las variables meteorológicas en estación HM, ubicada en el interior del Valle Pelambres.

El viento en promedio posee un ciclo diario en magnitud y dirección (Figura 4.1a y b). En su magnitud, tanto en el promedio como en los valores máximos (percentil 90), posee un notorio ciclo diurno, aunque los valores máximos son muchos más altos que el promedio. Las direcciones de viento predominantes se alinean de acuerdo a la orientación del eje principal del valle (45° respecto del norte geográfico), lo cual explica la poca variabilidad de la dirección de viento. La transición del cambio de dirección ocurre entre las 08 - 09 AM y 06-08 PM. De los ciclos diarios estacionales de la magnitud de viento (figura 4.2a) se tiene que existe una importante variación estacional, donde las mayores diferencias se observan entre la temporada de invierno (MJJA) y verano (DEF). El viento nocturno es más intenso en invierno, mientras que el viento diurno es más intenso en verano. Los vientos nocturnos son en promedio 5 ms^{-1} en invierno y 3 ms^{-1} en verano, mientras que los vientos diurnos tienen una intensidad promedio de 3 ms^{-1} en invierno y 3.5 ms^{-1} en verano. También es notorio que el periodo de tiempo con vientos intensos durante la noche es más prolongado en invierno que en verano. La Figura 4.4 muestra la relación entre dirección e intensidad de viento. Es evidente que existen 2 direcciones predominantes de viento: i) viento del noreste (45° aprox.) ii) viento del suroeste (225° aprox.), donde además se observa que los vientos más intensos se dan en condiciones de viento del NNE (valle abajo).

La temperatura en promedio es de 10°C durante la noche y tiene un máximo de 16°C durante el día (figura 4.1c), sin embargo, al igual que con el viento, existe una importante variación estacional (figura 4.2c), donde en promedio en invierno, la temperatura fluctúa entre 6°C en la noche y 12°C durante el día, mientras que en verano la temperatura promedio fluctúa entre 13°C durante la noche y 21°C durante el día. Existe una marcada variación estacional de la amplitud térmica (figura 4.3) con una mayor amplitud térmica en verano que en invierno, con 9.5°C en los meses noviembre a marzo y 7°C en los meses junio-julio.

En cuanto a la humedad en el ambiente (figuras 4.1d y 4.2d), en base a la humedad específica calculada, se observa la existencia de un ciclo diario débil, tanto en invierno como en verano, sin embargo, hay una importante variación estacional. Invierno es la temporada donde se observa menor humedad en el ambiente, con un mínimo en el periodo nocturno (2 g/kg) y un máximo pasado el mediodía (3.5 g/kg). Durante el verano la humedad promedio es el doble de lo observado en invierno, con un mínimo en la madrugada (4 g/kg) y una máximo en la tarde-noche (7.5 g/kg , 17HL a 23HL).

La radiación solar incidente (figura 4.1e) presenta un marcado ciclo diario, y también una importante variación estacional (figura 4.2e). Los valores de radiación más altos se observan en los meses de verano, con una intensidad promedio de 950 Wm^{-2} entre las 11 y 13 HL, mientras que en invierno la intensidad máxima es en torno a los 500 Wm^{-2} . El horario en el cual se observa radiación incidente (horas de sol), estimada y representada por la curva de nivel color negro de 10 Wm^{-2} en la figura 4.2e, también presenta una importante variación estacional. Durante el verano las "horas de sol" se observan entre las 6 y 20 HL, mientras que en invierno se dan entre las 7 y 18 HL. Este rango horario de radiación solar está directamente relacionado con la variación estacional de temperatura, donde el rango horario en que ocurre el calentamiento es mayor en verano que invierno.

Tal como se describió en la introducción, durante el día el calentamiento diferencial de la superficie produce que se desarrollen los vientos valle arriba y durante la noche, debido al enfriamiento diferencial de la superficie, los vientos valle abajo. En general, los vientos de valle presentan cuatro fases en la evolución de la estructura de viento y temperatura a lo largo del día (Whiteman (2000) pp. 172). Estas fases se observan claramente en estación HM: i) fase de transición durante la tarde, entre las 18 y 20 HL, donde el viento valle arriba se revierte en dirección valle abajo; ii) durante la fase nocturna, entre las 20 y 07 HL, el viento es en general siempre valle abajo.; iii) la fase de transición de la mañana ocurre entre las 07 y 09 HL, donde el viento valle abajo revierte de dirección a valle arriba, justo cuando el calentamiento de la mañana comienza.; iv) durante la fase diurna, el viento sopla valle arriba hasta la fase de transición de la tarde. La duración de la fase diurna y nocturna tiene una variación estacional determinada por el horario de salida y puesta de sol, que determina el inicio del calentamiento y enfriamiento de la superficie (fases de transición de viento). En este caso, el calentamiento comienza entre las 06 y 07 HL en verano y 09 y 11 en invierno. En la tarde, el periodo de transición ocurre entre las 18 y 20 HL en verano y entre las 16 y 18 HL en invierno.

4.2. Climatología del Terral

Para realizar una climatología del Terral, se debe en primer lugar definir un criterio para decir qué es un Terral. En la siguiente sección se describe la metodología adoptada para esta definición.

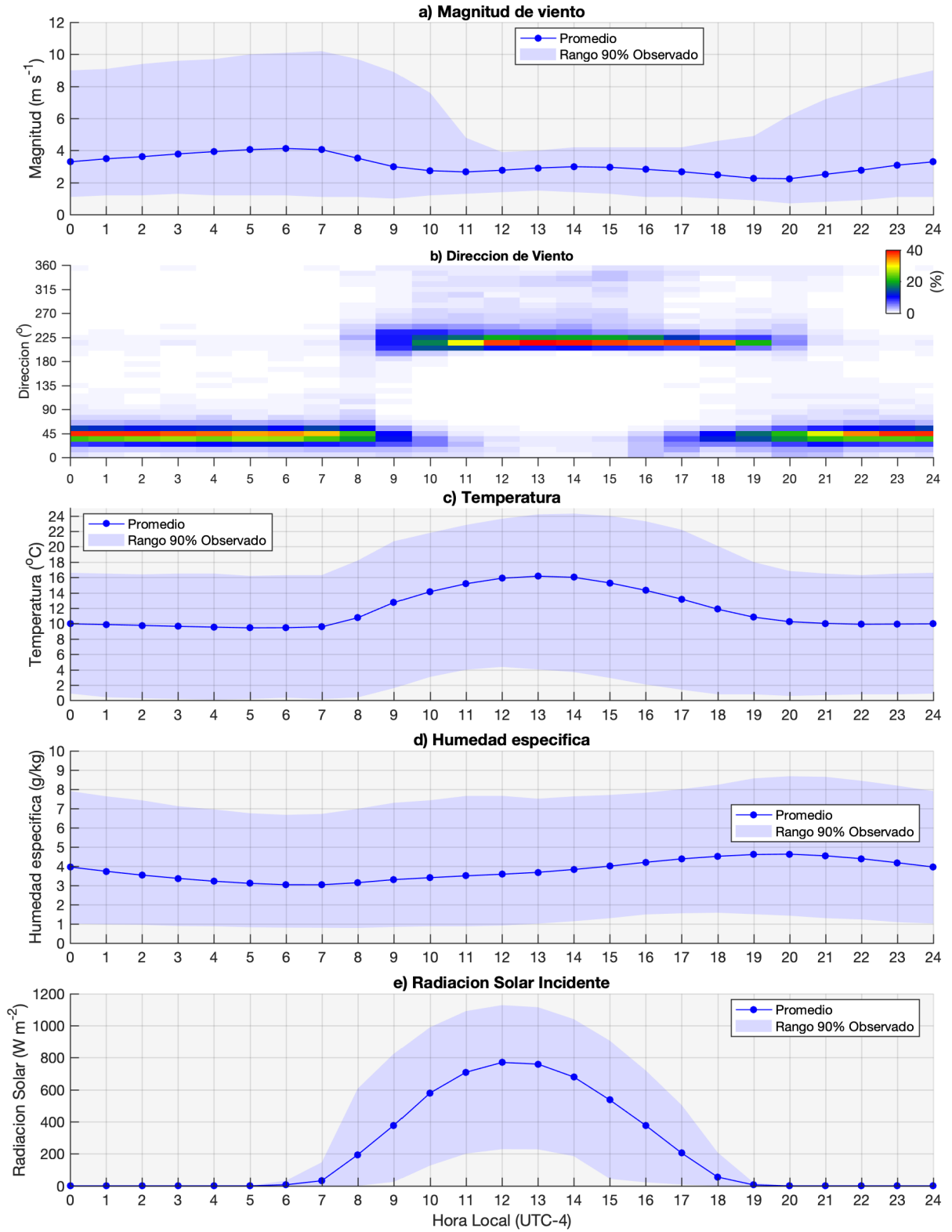


Figura 4.1: Ciclos diarios en estación HM. a) magnitud de viento, b) dirección de viento , c) temperatura, d) humedad específica y e) radiación solar incidente. Periodo 2010-2015.

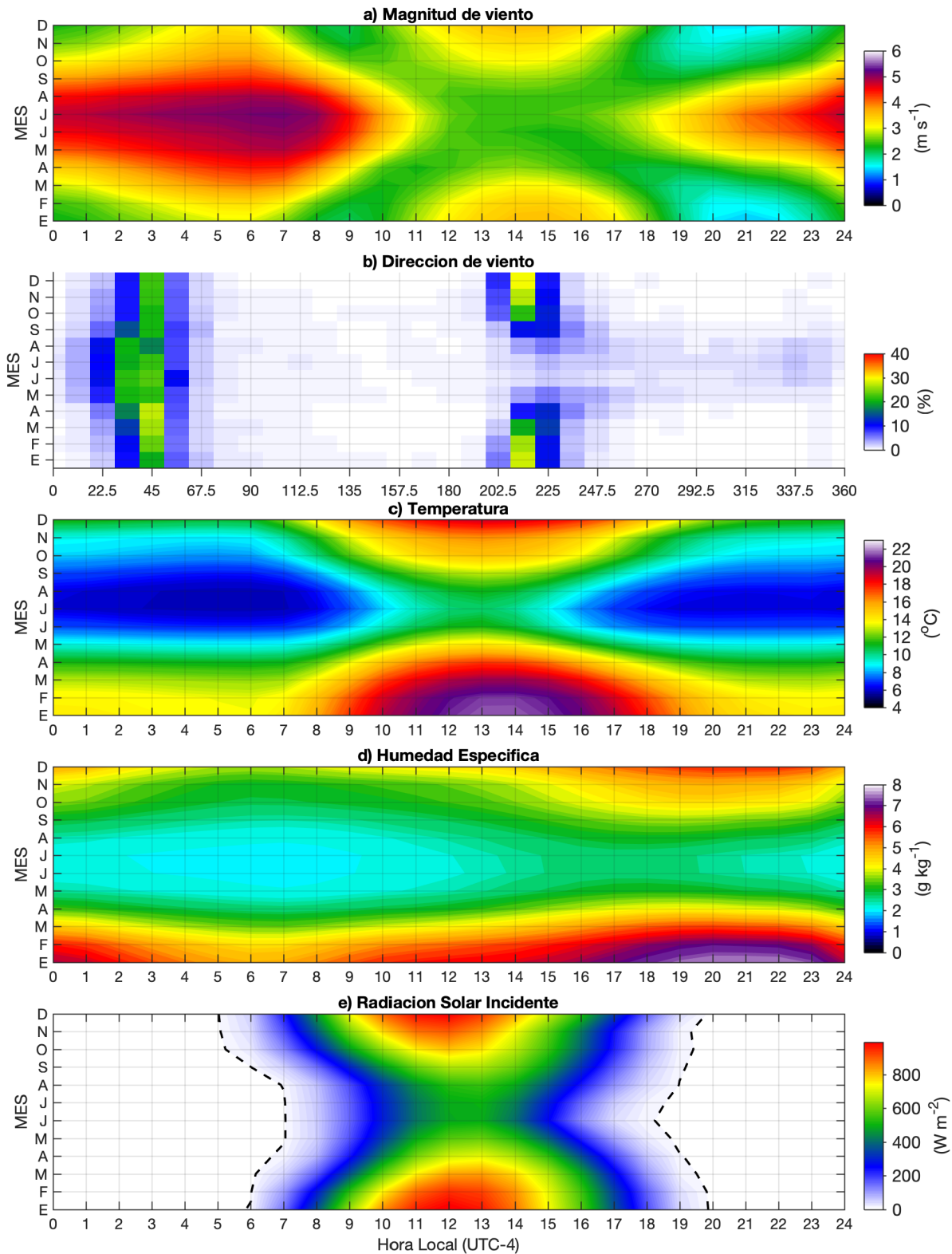


Figura 4.2: Variación estacional de los ciclos diarios en estación HM. a) magnitud de viento, b) dirección de viento , c) temperatura, d) humedad específica y e) radiación solar incidente (línea segmentada negra representa la curva de nivel de $10 W/m^2$). Periodo 2010-2015.

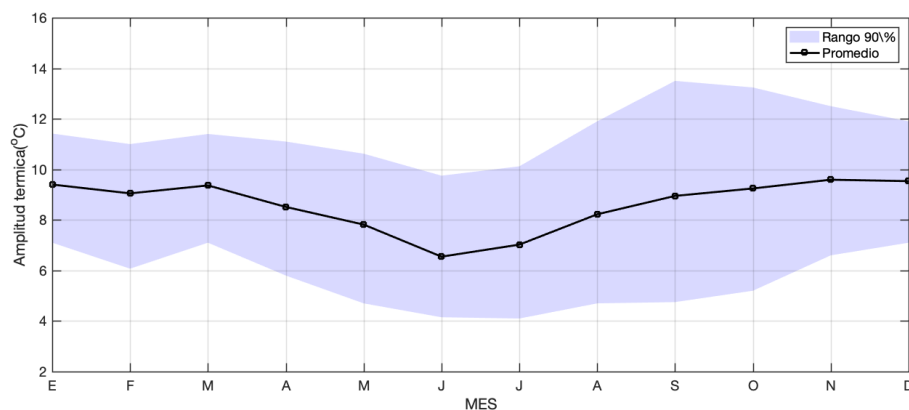


Figura 4.3: Ciclo anual de la amplitud térmica ($T_{max} - T_{min}$) en estación HM. Promedio (línea negra) y el rango del 90 % de las observaciones (sombreado). Periodo 2010-2015.

4.2.1. Definición del Terral

En general, cuando se habla de eventos tipo Foehn, la definición juega un papel importante en el análisis, ya que el criterio adoptado determinará la frecuencia de ocurrencia de estos eventos. De acuerdo a la literatura, dada la dependencia espacial (ubicación geográfica) y estacionalidad de estos vientos, no es posible formular una definición general de vientos Foehn aceptable (Brinkmann (1971)), por lo cual es necesario hacer una definición particular para el lugar de estudio. Barry (2008) (p173) expone diversos ejemplos con definiciones de vientos tipo Foehn usados para estudios climatológicos en diferentes partes del mundo. Las definiciones pueden ser simples, como el caso de Longley (1967) en su estudio de los vientos Chinook en Alberta, Canadá, donde el criterio se basa en una temperatura máxima diaria mayor o igual a 4.4°C (40°F) en los meses de invierno (diciembre a febrero). Es común se usen tres criterios meteorológicos en sotavento: i) viento en dirección desde la montaña ii) aumentos abruptos de temperatura y iii) caída de la humedad relativa. También se han usado criterios sinópticos, como en el estudio de Raphael (2003) para determinar la frecuencia de ocurrencia de los vientos Santa Ana en California, USA, donde se usaron mapas sinópticos diarios para buscar la configuración sinóptica de una alta presión sobre la Great Basin simultáneamente con un sistema de baja presión en superficie fuera de la costa de California.

En el caso de Chile, el trabajo de Rutllant and Garreaud (2004) define el viento Raco cuando el promedio horario de viento observado valle abajo supera los 5 ms^{-1} entre las 04 y 07 HL. El estudio de Montes et al. (2016) define al Terral de Vicuña como todas las horas con viento del este con intensidad superior a 2 ms^{-1} , temperatura mayor a 11°C y humedad relativa menor al 30 %, entre las 01 y 07 AM. Por otro lado, la definición de viento Puelche de Montecinos et al. (2017) depende solo del viento y la estación del año, con viento del este sobre 2 ms^{-1} , 3 ms^{-1} , 5 ms^{-1} y 5 ms^{-1} para la temporada de verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente.

En términos de viento, el Terral se refiere a un viento intenso valle abajo en el lado oeste de los Andes. Tal como se vio en la sección 4.1, en el interior del VP existe un ciclo diurno, con vientos descendentes durante la noche y ascendentes durante el día, por lo tanto,

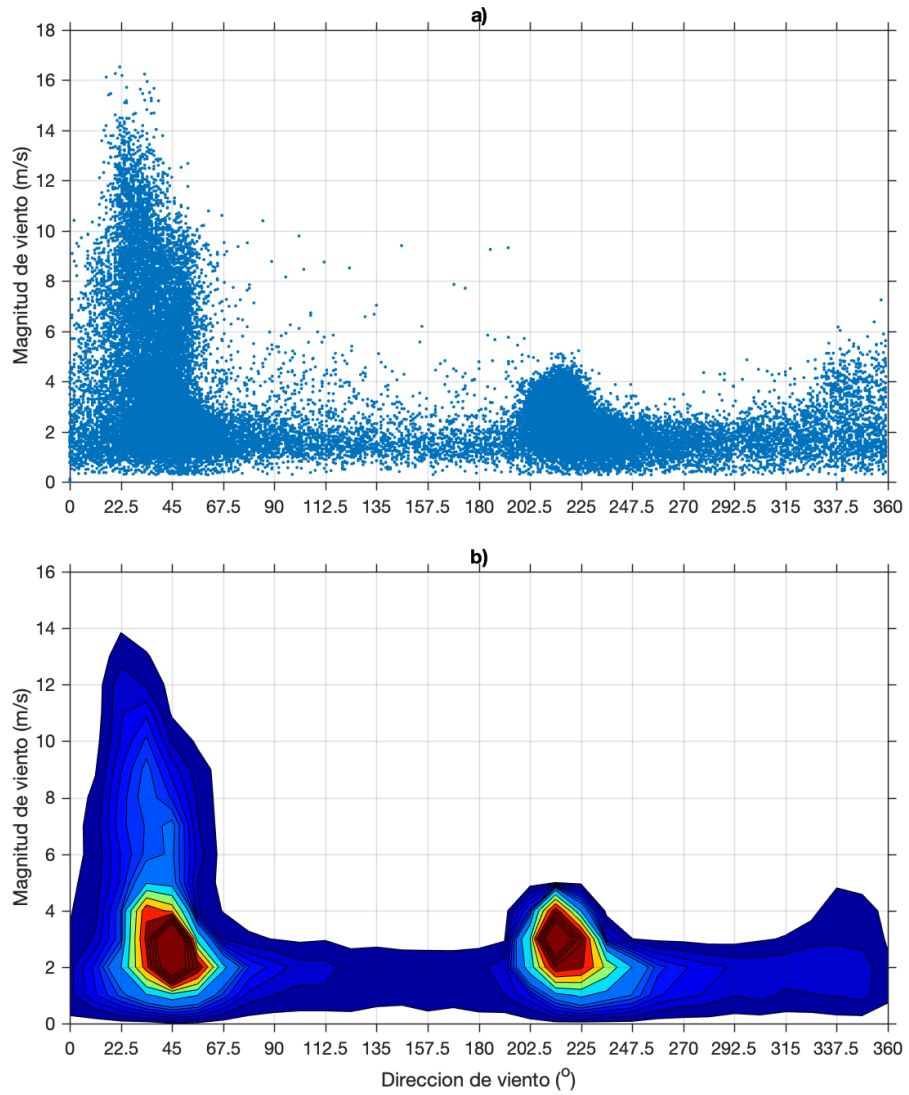


Figura 4.4: a) Diagrama de dispersión y b) distribución de frecuencia bivariada entre magnitud y dirección de viento a nivel horario en estación HM. Periodo 2010-2015.

la definición de Terral debe ser capaz de separar los flujos nocturnos típicos de los vientos intensos asociados al Terral. Dado que los flujos medios en el valle se alinean de acuerdo a la orientación del valle, para la definición de Terral se utiliza la variable derivada V_d , la cual representa la componente de viento a lo largo del eje del valle, derivada a partir de la magnitud y dirección de viento horario en la estación HM.

$$V_d = -(u + v)/\sqrt{2}$$

donde u y v representan la componente zonal y meridional del viento, respectivamente. Dada su definición, $V_d > 0$ representa flujo valle abajo y $V_d < 0$ el flujo valle arriba.

A partir de un análisis exploratorio de datos, se nota que la distribución de frecuencias de V_d (figura 4.5a) posee una distribución bi-modal, asociada al ciclo diurno con ascenso durante el día ($V_d < 0$) y descenso durante la noche ($V_d > 0$) y ya visto en la sección 4.1. Las intensidades más frecuentes varían entre 0 y 5 m s^{-1} para el flujo diurno y nocturno. Sin embargo, en la distribución de la componente valle abajo (positiva de V_d) se observa una cola hacia los valores extremos y menos frecuentes (intensidades por sobre 5 m s^{-1}). Es importante destacar que esta cola de valores extremos no se observa en la componente negativa (ascenso), por lo tanto, es válido relacionar esta parte de la distribución con el fenómeno de Terral. En la figura 4.5b, donde se muestra la variación estacional de la distribución de V_d , se observa que la cola de valores intensos de viento mencionada anteriormente es más frecuente durante el periodo de invierno (mayo-septiembre).

De lo anterior, hasta ahora se ha definido Terral como las horas donde el promedio horario de V_d es superior a 5 m s^{-1} (positivo, valle abajo), lo que de ahora en adelante se hará referencia como **Hora Terral (HT)**. A su vez, el conjunto de HT consecutivas forma un **Caso Terral (CT)**. Para evitar que horas aisladas sean clasificadas como Terral, se define arbitrariamente que un CT debe estar compuesto por 3 o más HT consecutivas. Cuando existen 2 CT consecutivos y el lapso entre el fin del primer CT y el inicio del segundo CT es menor a 3 horas, se consideran ambos periodos como solo 1 CT. Por último se define un **Episodio Terral (ET)**, correspondiente a todo el periodo con CT que se desarrollan en noches consecutivas. De esta forma un ET puede estar compuesto por 1 o más CT, y 1 CT está compuesto por 3 o más HT consecutivas. Para evitar problemas relacionados a la estacionalidad (Brinkmann (1971)), se consideran solo los meses de mayo a septiembre.

Para la caracterización del Terral (sección 4.2.2) se realiza una caracterización del inicio, desarrollo y fin del CT. Para esto, es importante definir a qué se refiere inicio, desarrollo y fin del CT. A continuación se describe cada una de las definiciones:

- Inicio (Ht_i): Primera hora con $V_d > 5 \text{ m/s}$.
- Fin (Ht_f): Última hora con $V_d > 5 \text{ m/s}$.
- Desarrollo (Ht_{if}): Todas las horas entre Ht_i y Ht_f , con las mismas inclusive.

En la figura (4.6) se muestra un periodo de ejemplo. La serie de tiempo en color azul representa promedios horarios de V_d , los periodos sombreados en color rojo indican las HT

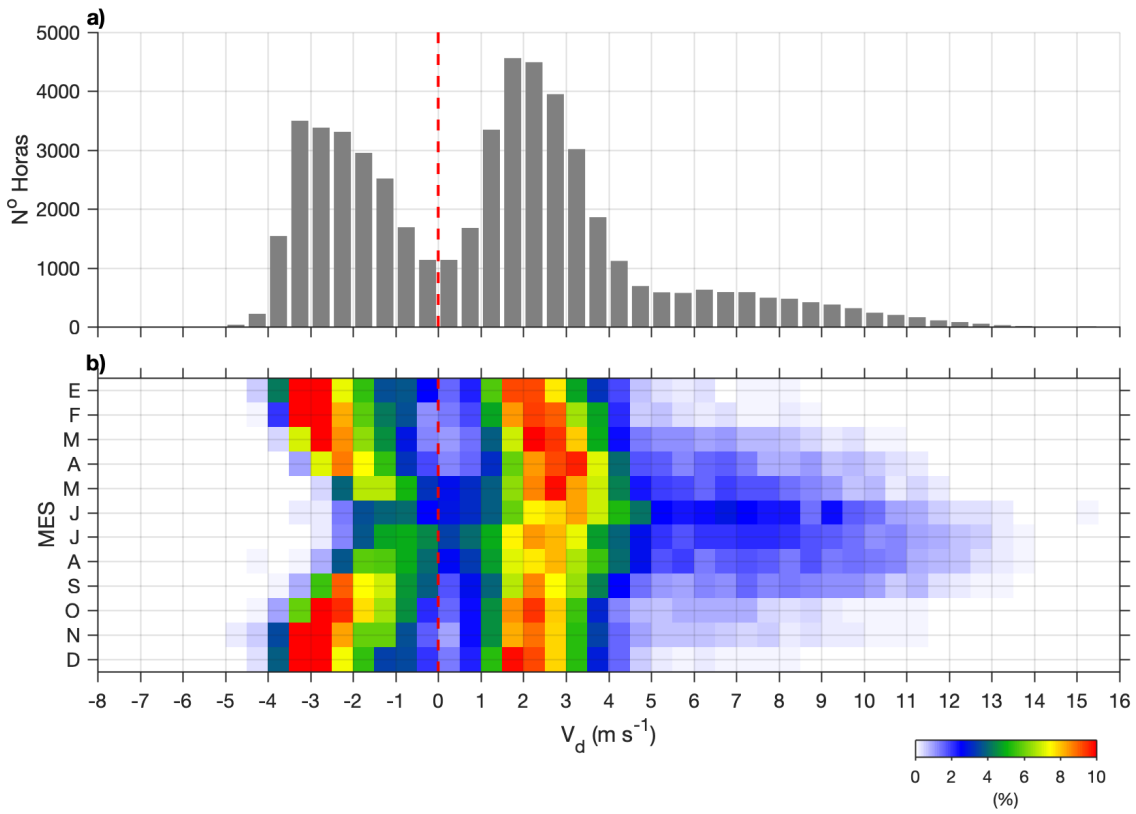


Figura 4.5: Distribución de frecuencia de V_d en HM, periodo 2010-2015. (a) Distribución horaria para todos los meses del año. (b) Distribución horaria mensual.

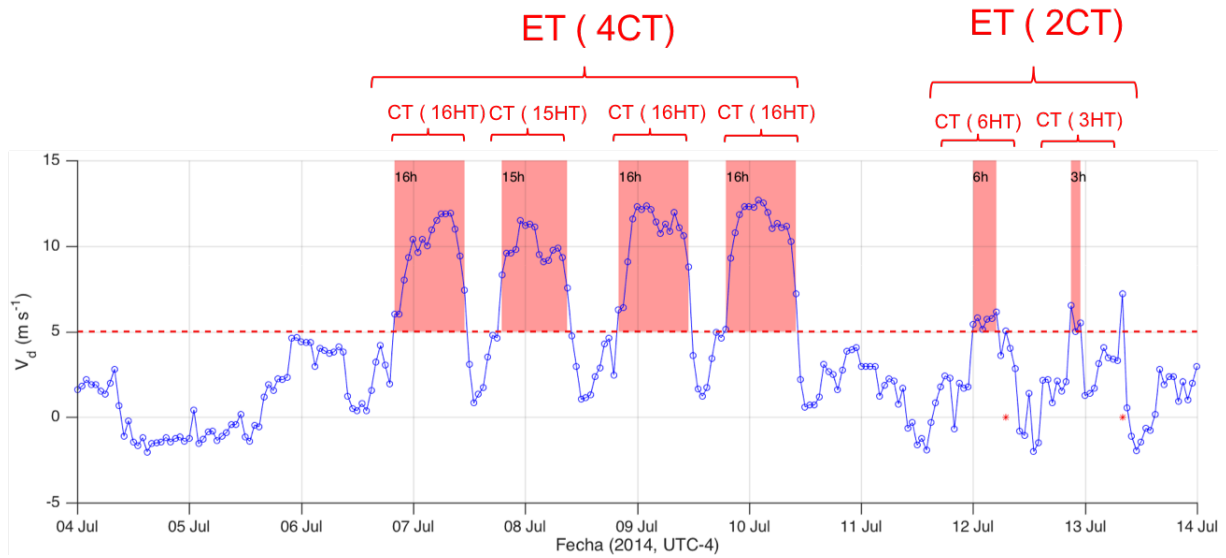


Figura 4.6: Periodo de ejemplo de detección de Terral.

que componen los CT. Aplicando el método descrito se puede identificar 2ET, de 4CT y 2CT, respectivamente. A su vez, cada CT está compuesto por 16, 15, 16, 16, 6 y 3 HT.

Es importante mencionar que se desestima la aplicación de un método automático como el propuesto por [Plavcan et al. \(2014\)](#), ya que supone la existencia de más de una distribución de frecuencia en los datos y, opcionalmente, otra estación. Para el caso del Terral, el método puede distinguir las 3 distribuciones asociadas a V_d (viento valle arriba, valle abajo y terral), con lo cual se puede clasificar las horas que se ajustan a la distribución de vientos intensos valle abajo. Sin embargo, al no contar con una variable de estabilidad (diferencia de temperatura potencial entre 2 estaciones), la clasificación en base a solo una variable (V_d) es poco robusta en la clasificación de las observaciones que se encuentran en la intersección de las dos distribuciones, produciendo, por ejemplo, que vientos débiles valle abajo sean clasificados como Terral o que vientos relativamente intensos valle abajo no sean clasificados como Terral.

4.2.2. Características del Terral

Frecuencia de ocurrencia

Las HT ocurren mayormente durante el periodo nocturno y parte de la mañana (Figura 4.7a), con el 91 % de las HT entre las 20 y 10HL, mientras que las HT durante el día (11 - 19 HL) corresponden solo al 9 % de las horas. Respecto del global de horas (Terral y No Terral, Figura 4.7b), se observa que las HT alcanzan a lo más un 17 % del total de las horas a las 6HL, mientras que durante el día el porcentaje es muy bajo, menor al 1 %. En general, las HT corresponden a un 8 % del total de las horas del periodo entre mayo y septiembre.

En cuanto a los Casos Terral (CT), su duración está determinada por el número de horas

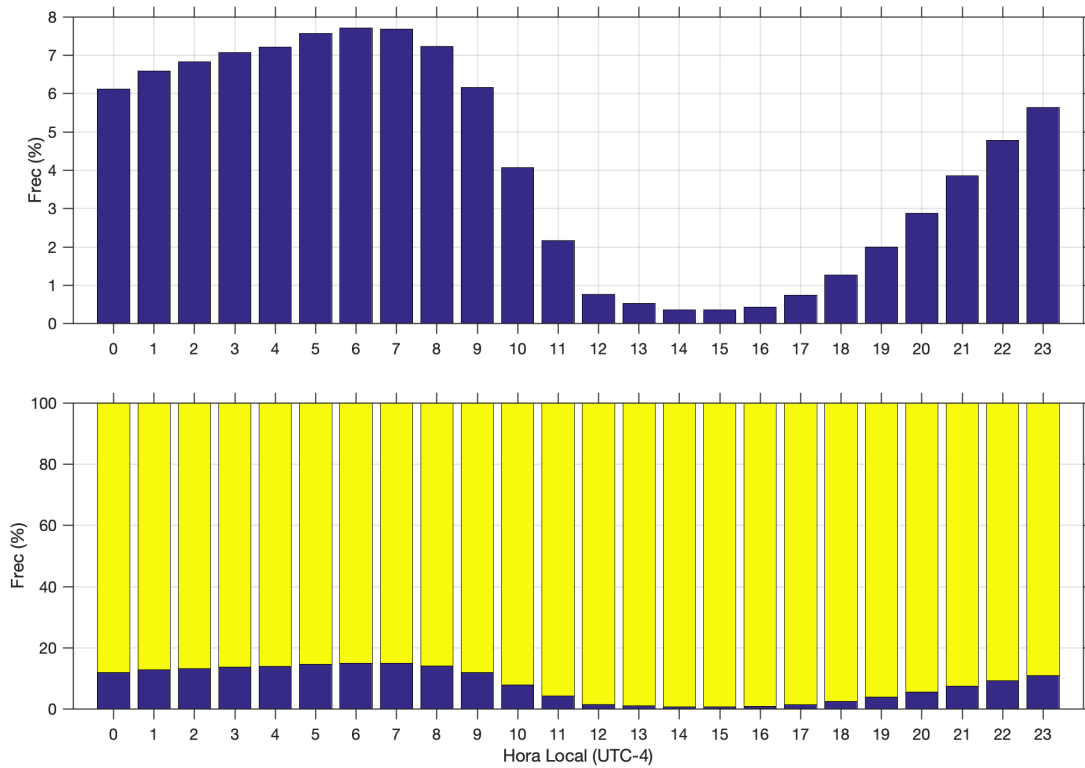


Figura 4.7: a) Frecuencia de ocurrencia horaria de Terral (suma de todas las horas es 100%).
 b) Frecuencia de ocurrencia horaria de Terral (azul) respecto de las horas no-Terral (amarillo).
 Periodo considerado es 2010 a 2015 para meses de mayo a septiembre.

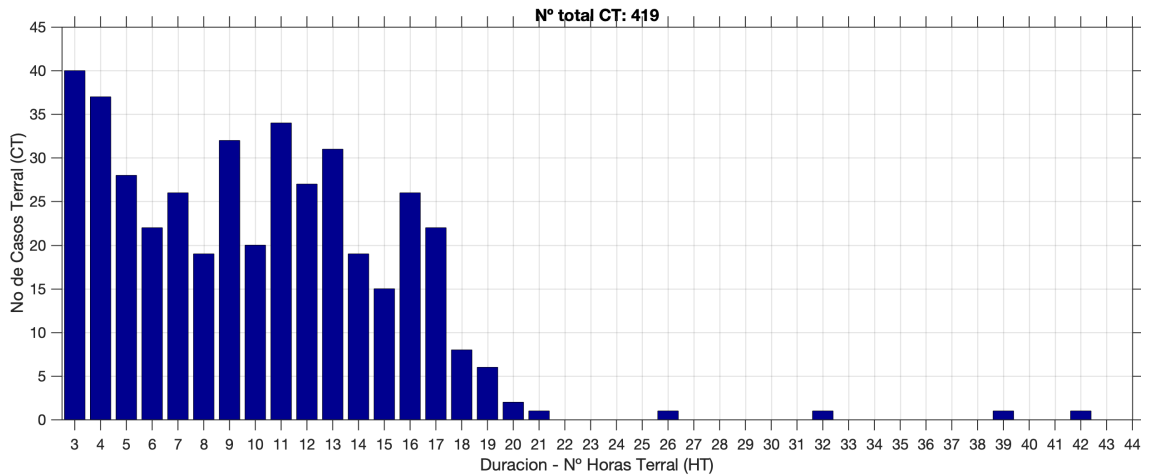


Figura 4.8: Distribución de frecuencia de la duración de los Casos Terral.

con HT consecutivos. De esta forma, cada CT tiene asociado una hora de inicio, fin y una duración en HT (figuras 4.8 y 4.9). Por definición un CT debe estar compuesto por al menos 3 HT. Para todo el periodo de estudio se contabilizan un total de 419 CT en el periodo mayo-septiembre (Figura 4.8). En general la mayor parte de los CT posee una duración menor a 21 HT, con excepción de 4 CT en la que la duración excede las 24 HT. Se observa una tendencia a que los CT de mayor duración son menos frecuentes, mientras que los de menor duración son más frecuentes. Por ejemplo, se observan 40 CT con la duración mínima de 3 HT y 7 CT con 18 HT.

Respecto de los inicios y fin de los CT, de acuerdo a la figura 4.9a, donde se muestra la distribución de frecuencia horaria del inicio y fin de los CT, se tiene que en general los eventos tienden a iniciarse con mayor frecuencia entre la tarde y madrugada (barras color azul), entre las 06PM y 07 AM. Por otro lado, el fin de los eventos ocurre con mayor frecuencia durante la mañana (barras color rojo), entre las 08 AM y 11 AM, coincidente con el horario donde comienza el calentamiento radiativo y el cambio de dirección de viento típico.

Una característica que se obtiene del cruce de información entre el horario de inicio/fin y la duración de los CT (Figura 4.9a y b), es que en general los eventos de mayor duración tienden a iniciarse más temprano durante la tarde. De esta forma, se puede asociar que los CT que se inician durante la tarde son casos con una duración, en la mayoría de las veces, superior a 10HT. Por otra parte, para los finales de los CT se observan 2 situaciones: i) Casos de baja duración finalizan en general durante la noche (10 PM a 11 AM) ii) Casos con mayor duración tienden a finalizar en su mayoría durante la mañana (08 AM a 11 AM).

Para describir los Episodios Terral (ET), según lo visto anteriormente, se puede considerar que en general un CT se desarrolla durante el periodo nocturno y que con algunas excepciones no dura más de 21 HT. Así, cuando se habla de CT consecutivos se refiere a cuantos días consecutivos se manifestó el Terral. En la Figura 4.10 se muestra la distribución de frecuencias de los ET en función de los CT consecutivos. Se observa que gran parte de los ET están compuestos por 1 o 2 CT (67% de los episodios), mientras que los ET que se manifiestan durante más días consecutivos son menos frecuentes.

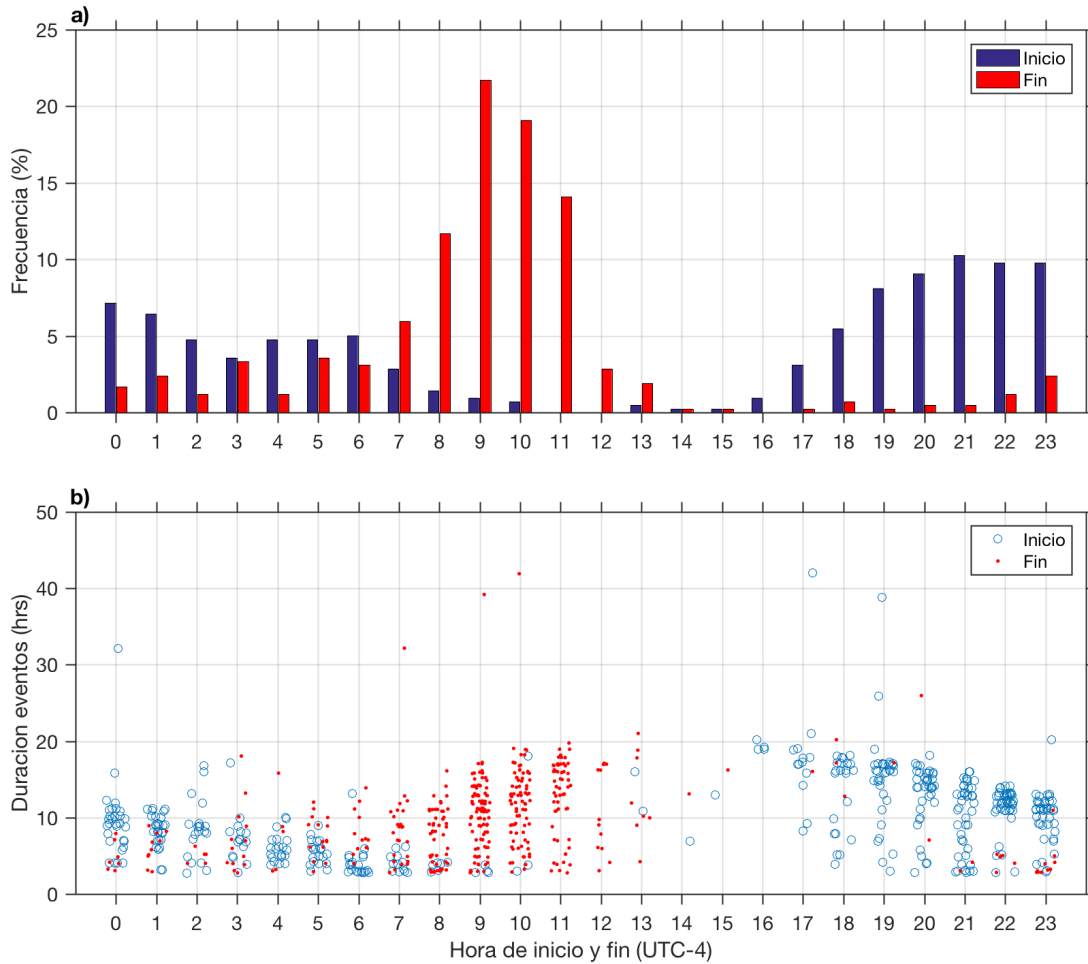


Figura 4.9: a) Distribución horaria de los inicios (azul) y fin (rojo) de los eventos de Terral. b) Diagrama de dispersión entre la hora de inicio (azul) y fin (rojo) del evento v/s la duración del evento.

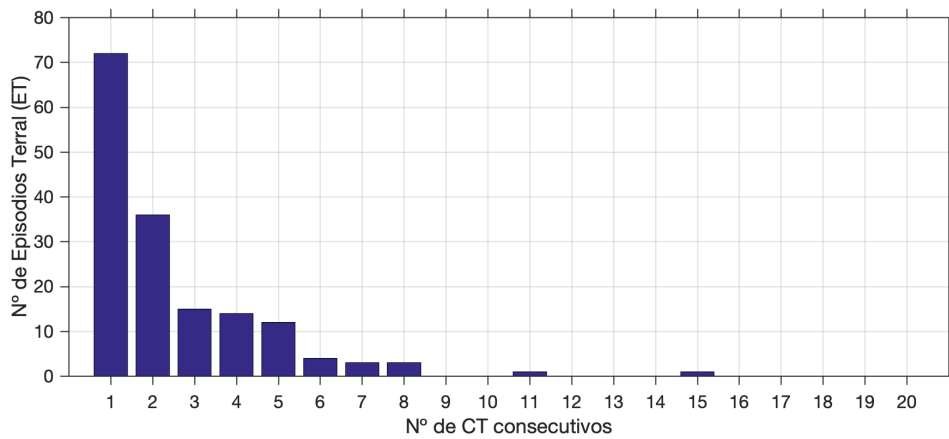


Figura 4.10: Distribución de frecuencia de duración de los ET en función del número de CT consecutivos.

Saltos al inicio de los CT

Para caracterizar los inicios de los CT se han definido índices que representan saltos(Δ_i) de distintas variables al inicio del CT. En la figura 4.11 se muestran las distribuciones de frecuencia de los saltos en los inicios de las variables de a) componente valle abajo del viento, b) temperatura, c) material particulado y d) humedad específica. A continuación se describe la definición del índice y el respectivo análisis.

- Salto de viento inicial ($\Delta_i V_d$)

Definición:

$$\Delta_i V_d = V_d(Ht_{i+1h}) - V_d(Ht_{i-1h})$$

donde V_d representa la componente valle abajo del viento, Ht_i la hora inicial y +1h (-1h) un hora después (antes).

La componente valle abajo del viento, por definición de Terral, es positiva, por lo cual siempre en el inicio de un evento el salto es positivo. De su distribución (Figura 4.11a) se tiene que en la mayoría de los casos se observan saltos de viento inferiores a 7 m/s, sin embargo, existen unos pocos casos donde el salto inicial supera los 10 m/s.

- Salto inicial de temperatura ($\Delta_i T_a$)

Definición:

$$\Delta_i T_a = T_a(Ht_{i+1h}) - T_a(Ht_{i-1h})$$

donde T_a representa la anomalía de temperatura respecto de la tendencia horaria climatológica (ver Anexo 6.2), Ht_i la hora inicial y +1h (-1h) un hora después (antes).

Se aprecia que durante los inicios, en un 86 % de los casos, existe un aumento relativo de la temperatura(Figura 4.11b). Este salto de temperatura puede llegar a los 5°C, sin embargo, es más frecuente entre 0 y 2°C. Es importante recalcar que en términos absolutos, este salto de temperatura no significa que exista necesariamente un aumento de la temperatura, ya que con el fin de eliminar la variación diurna típica de la temperatura, se ha extraído la tendencia horaria climatológica para cada hora en que ocurren los inicios de los eventos. Así, si en términos absolutos la temperatura se mantiene constante durante el inicio de un evento, mientras que según la climatología a esa hora la temperatura disminuye (supongamos durante la madrugada), se entiende que en términos relativos existe un aumento de la temperatura (ver Anexo 6.2).

- Salto inicial de MP10 ($\Delta_i MP10$)

Definición:

$$\Delta_i MP10 = MP10(Ht_{i+1h}) - MP10(Ht_{i-1h})$$

donde $MP10$ representa las concentraciones de material particulado, Ht_i la hora inicial y +1h (-1h) un hora después (antes).

Para el MP10 en un 85 % de los CT se observa un aumento en las concentraciones en su fase inicial (Figura 4.11c), con la mayoría de saltos bajo los 200 $\mu g/m^3$.

- Salto inicial de humedad ($\Delta_i q$)

Definición:

$$\Delta_i q = q(Ht_{i+1h}) - q(Ht_{i-1h})$$

donde q representa la humedad específica, Ht_i la hora inicial y $+1h$ ($-1h$) un hora después (antes).

Se observa que en un 81% de los casos hubo una disminución en el contenido de humedad del aire (figura 4.11d).

En cuanto a la relación entre los saltos de las distintas variables en el inicio de los CT (Figura 4.12), se tiene que existe una cierta relación entre alguna de ellas:

- Saltos positivos de anomalías de temperatura se relacionan con saltos de viento, aunque con excepciones. No se aprecia una relación lineal.
- Saltos positivos de MP10 se relacionan con saltos de viento. No se aprecia una relación lineal.
- Saltos negativos (disminución) de humedad están relacionados con saltos de viento. No se aprecia una relación lineal.
- Saltos positivos de anomalías de temperatura están relacionados con saltos negativos de humedad.

De los puntos anteriores, se puede establecer de manera preliminar que durante los inicios de los CT existe (por definición) saltos de viento relativamente intensos en comparación al flujo promedio. Junto con estos saltos se observa generalmente un aumento relativo de la temperatura, disminución del contenido de humedad y aumento del MP10. Esta relación entre viento y temperatura, humedad y MP10 se observa de manera simultánea en un 60% de los CT (253 casos).

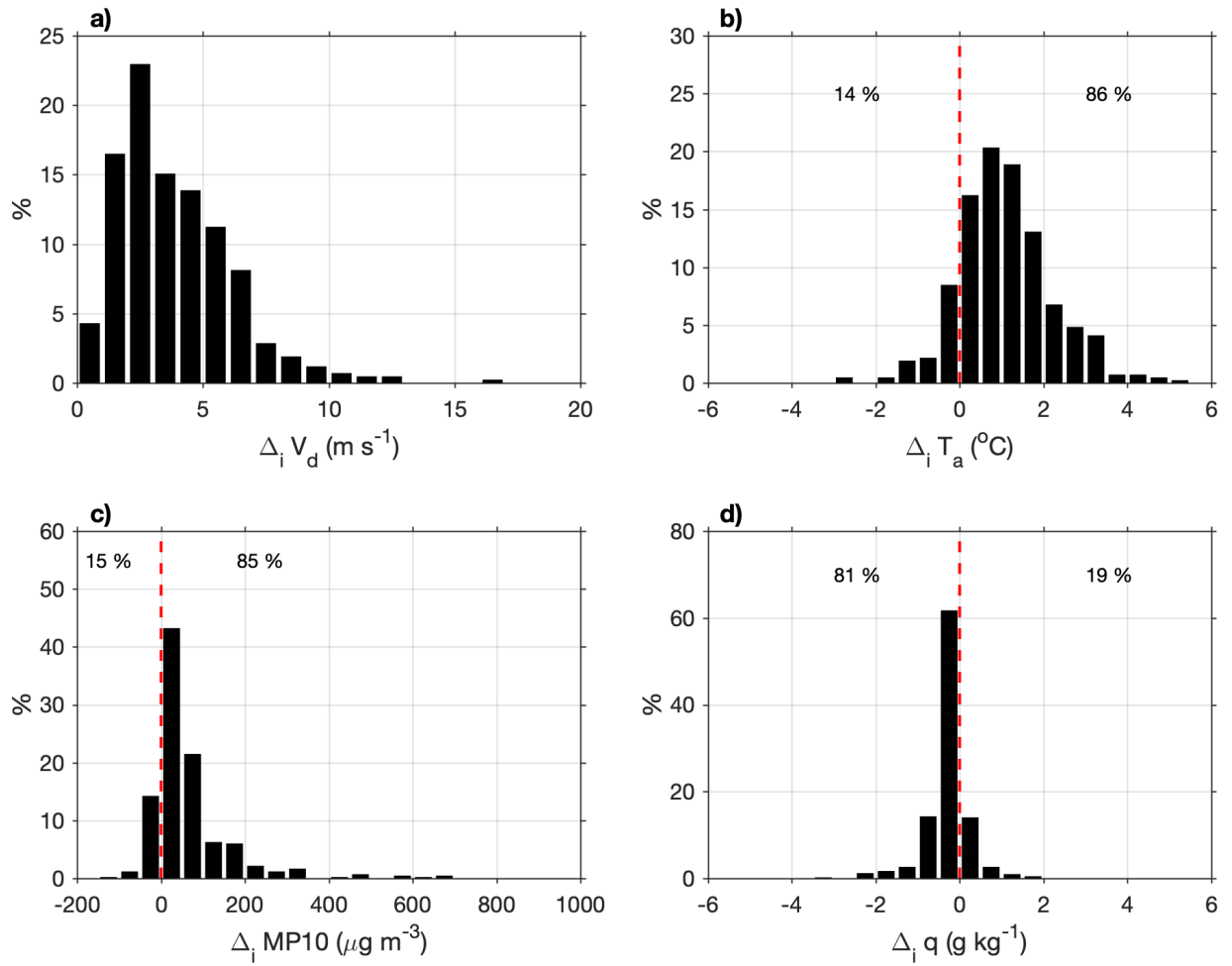


Figura 4.11: Características de los inicios de los eventos durante mayo-septiembre. Distribución de los saltos iniciales de a) componente valle abajo del viento, b) anomalía de temperatura, c) material particulado MP10 y d) humedad específica.

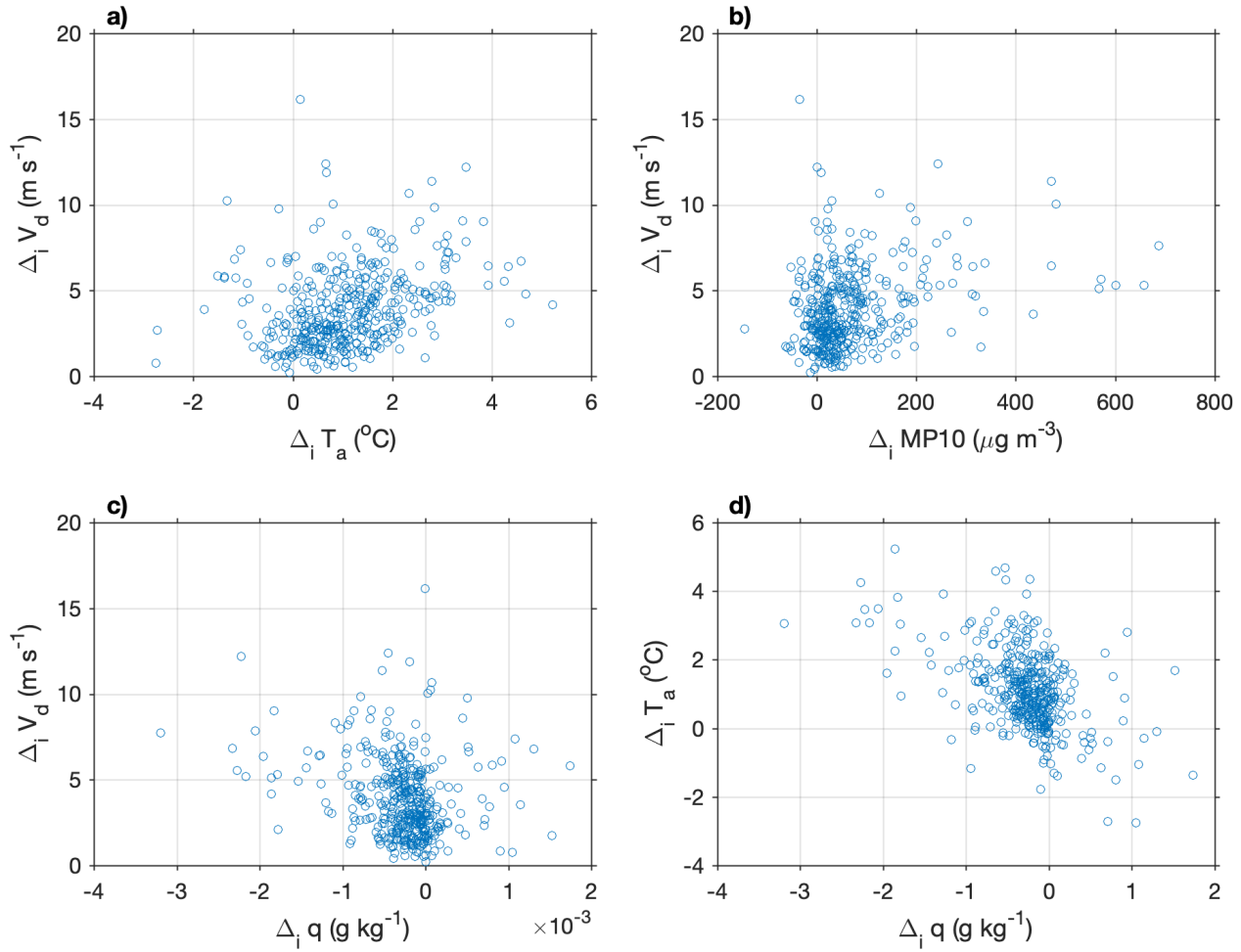


Figura 4.12: Diagrama de dispersión entre índices de saltos en los inicios de los CT. Dispersión entre (a) salto de anomalías de temperatura y salto de viento, (b) salto de MP10 v/s salto de viento, (c) salto de humedad específica y salto de viento y (d) salto de humedad específica y salto de anomalías de temperatura.

Saltos al final de los CT

Para caracterizar los finales de los CT, al igual que en los inicios de los CT, se han definido índices que representan saltos(Δ_f) de distintas variables al fin del CT. En la figura 4.13 se muestran las distribuciones de frecuencia de los saltos finales de las variables de a) componente valle abajo del viento, b) temperatura, c) material particulado MP10 y d) humedad específica. A continuación se describe la definición del índice y el respectivo análisis.

- Saltos de Viento ($\Delta_f V_d$)

Definición:

$$\Delta_f V_d = V_d(Ht_{f+1h}) - V_d(Ht_{f-1h})$$

donde V_d representa la componente valle abajo del viento, Ht_f la hora final y +1h (-1h) un hora después (antes).

$\Delta_f V_d$ por definición de Terral debe ser negativa (Figura 4.13a), es decir, debe existir una disminución en la intensidad de V_d o un cambio de signo (viento valle arriba). En promedio la tendencia es a una disminución en 5 m/s, esperable por la definición de Terral, sin embargo, también hay casos donde existe una disminución sobre los 10 m/s.

- Saltos de Temperatura ($\Delta_f T_a$)

Definición:

$$\Delta_f T_a = T_a(Ht_{f+1h}) - T_a(Ht_{f-1h})$$

donde T_a representa la anomalía de temperatura, Ht_f la hora final y +1h (-1h) un hora después (antes).

La temperatura, a diferencia del inicio de los eventos, no muestra una preferencia hacia saltos positivos (56 %) o negativos (43 %). Los casos más extremos son del orden de 5°C (figura 4.13b).

- Saltos de MP10 ($\Delta_f MP10$)

Definición:

$$\Delta_f MP10 = MP10(Ht_{f+1h}) - MP10(Ht_{f-1h})$$

donde $MP10$ representa las concentraciones de material particulado, Ht_f la hora final y +1h (-1h) un hora después (antes). El MP10 disminuye en el 77 % de los casos. El porcentaje restante podría estar asociado a algún proceso de recirculación (el remanente MP10 valle abajo se devuelve)(figura 4.13c).

- Saltos de humedad ($\Delta_f q$)

Definición:

$$\Delta_f q = q(Ht_{f+1h}) - q(Ht_{f-1h})$$

donde q representa la humedad específica, Ht_f la hora final y +1h (-1h) un hora después (antes). La humedad específica, al contrario que al inicio, en el 78 % de los casos muestra un aumento, en general inferior a 2 g/kg (figura 4.13c).

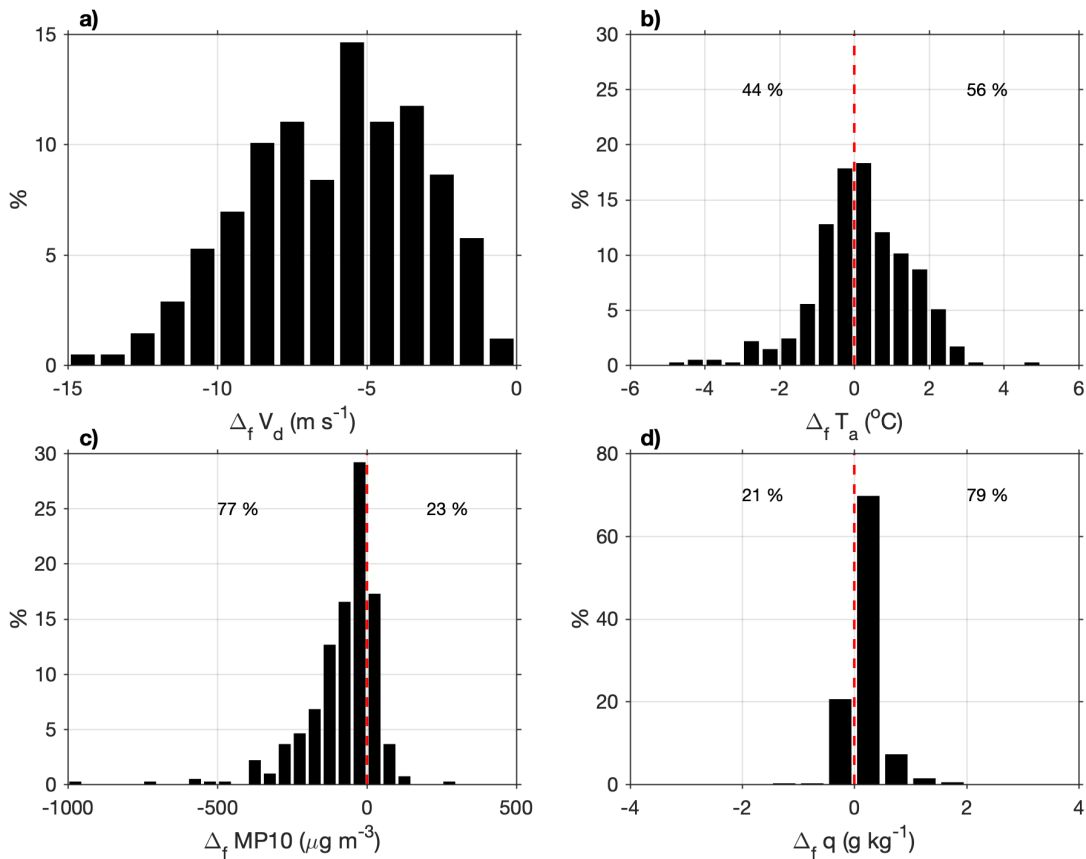


Figura 4.13: Características del fin de los eventos durante mayo-septiembre. Distribución de frecuencia de los saltos finales de (a) componente valle abajo del viento, (b) anomalía de temperatura, (c) material particulado MP10 y (d) humedad específica.

En cuanto a la relación entre variables en el fin de los CT (Figura 4.14), se tiene que existe una cierta relación entre alguna de ellas:

- Saltos negativos de viento (disminución de intensidad y/o cambio de sentido) no tienen una relación clara con saltos de temperatura.
- Saltos negativos de viento (disminución de intensidad y/o cambio de sentido) tienen relación con una disminución del MP10.
- Saltos negativos de viento (disminución de intensidad y/o cambio de sentido) tienen relación con un aumento del contenido de humedad.
- Para los casos más extremos, saltos negativos de temperatura se relacionan con saltos positivos del contenido de humedad.

De los puntos anteriores, se puede establecer que en general durante el fin de los CT existe un salto negativo de viento (por definición). Junto con este salto negativo de viento se observa una disminución del MP10 y aumento de la humedad específica. Esta relación entre viento, humedad específica y MP10 se observa de manera simultánea en un 60% de los CT (250 casos).

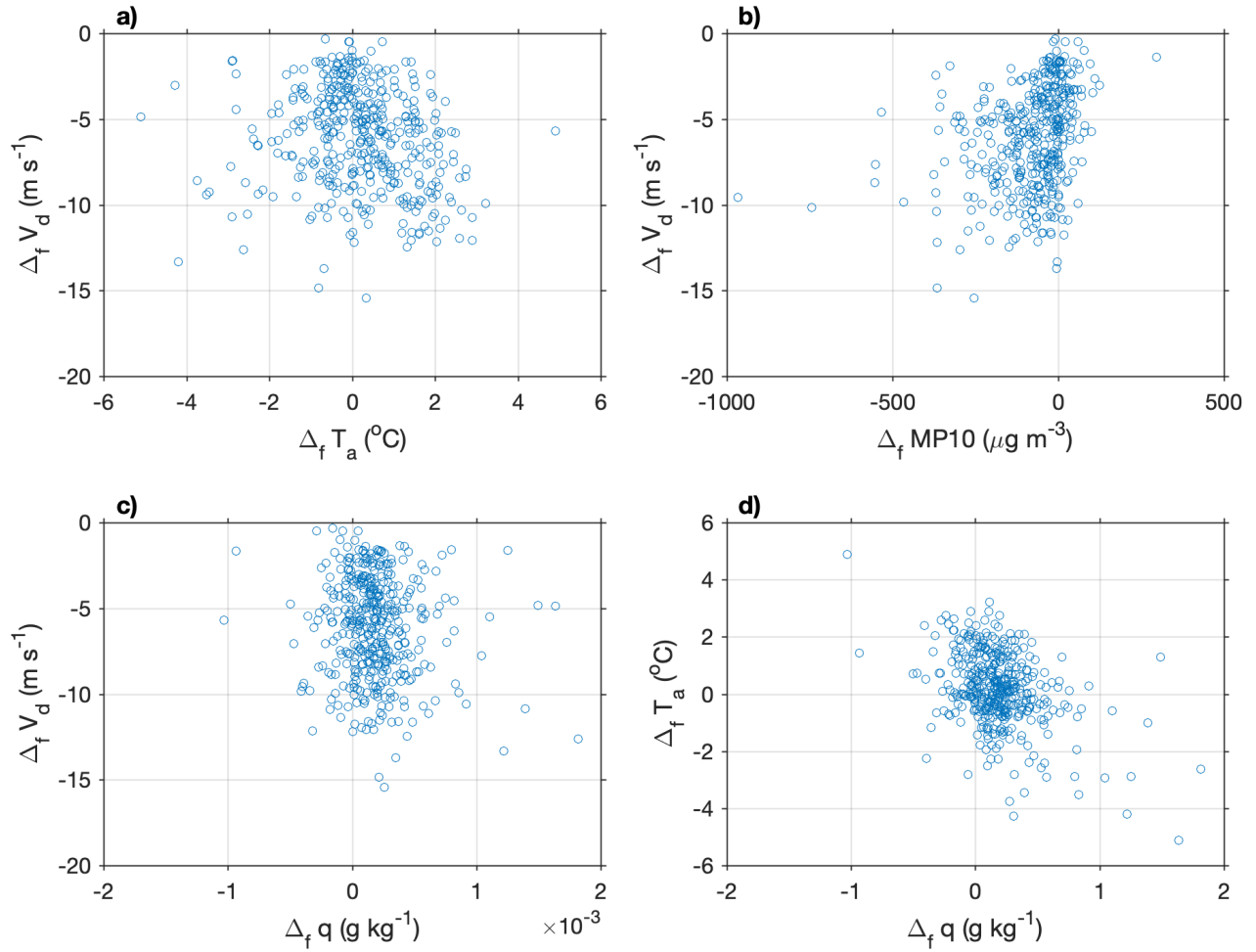


Figura 4.14: Diagrama de dispersión entre índices de saltos en el fin de los CT. Dispersión entre (a) salto de anomalías de temperatura y salto de viento, (b) salto de MP10 y salto de viento, (c) salto de humedad específica y salto de viento y (d) salto de humedad específica y salto de anomalías de temperatura.

Otros Índices

- Temperatura Promedio ($\overline{T_{ev}}$)

Definición:

$$\overline{T_{ev}} = \text{promedio}(T(Ht_{if}))$$

$\overline{T_{ev}}$ representa a la temperatura promedio entre el inicio y final de los CT. Se observan CT con un promedio entre -4°C a 20°C (Figura 4.15a), sin embargo, la mayoría de los casos están entre 5 y 15°C .

- Salto de temperatura máxima (ΔT_{max})

Definición:

$$\Delta T_{max} = \text{max}[T(Ht_{if})] - T(Ht_{i-1h})$$

ΔT_{max} representa a la diferencia entre la temperatura máxima durante el CT y la temperatura una hora antes del inicio del CT. Este índice representa el cambio de temperatura durante el desarrollo del CT. Se observa que en el 95.93% de los CT existe un calentamiento, en general no superior a los 10°C (Figura 4.15b). Es importante destacar que independiente de este salto máximo de temperatura, los CT pueden ser fríos o cálidos en el promedio (ver punto anterior), pero en su mayoría son cálidos respecto de la hora anterior a la ocurrencia del Terral.

- Humedad Promedio ($\overline{q_{ev}}$)

Definición:

$$\overline{q_{ev}} = \text{promedio}(q(Ht_{if}))$$

$\overline{q_{ev}}$ representa a la humedad específica promedio entre el inicio y final de los CT. La figura 4.15c muestra la distribución de frecuencias, donde se observa que en promedio los CT tienen una humedad menor a 5 g/kg, siendo las más frecuentes entre 0.5 y 2 g/kg.

- Secamiento Máximo (Δq_{max})

Definición:

$$\Delta q_{max} = \text{min}[q(Ht_{if})] - q(Ht_{i-1h})$$

Δq_{max} representa el secamiento máximo durante el evento. Como se vio con el salto inicial de humedad específica en la sección anterior, existe un secamiento al inicio del CT, sin embargo, este secamiento puede aumentar aún más en el transcurso de las horas en que se desarrolla el CT, por lo cual para el índice de secamiento se considera la diferencia entre la humedad específica mínima durante el CT y la humedad específica 1 hora antes del inicio del CT. Durante un CT se puede observar que en el 91.63% de los casos la humedad específica disminuyó respecto de la humedad observada justo antes del inicio del caso, por lo cual se puede decir que en la mayoría de

los casos de Terral existe una disminución de la humedad en el ambiente. (Figura 4.15d)

- MP10 Promedio ($\overline{MP10_{ev}}$)

Definición:

$$\overline{MP10_{ev}} = promedio(MP10(Ht_{if}))$$

$\overline{MP10_{ev}}$ representa al MP10 promedio entre el inicio y final de los CT. La figura 4.15e muestra la distribución de frecuencias, donde se observa que los CT se caracterizan por un MP10 promedio en el rango de 0 y 550 $\mu g/m^3$, siendo los más frecuentes entre 0 y 200 $\mu g/m^3$.

- Salto de MP10 máximo ($\Delta MP10_{max}$)

Definición:

$$\Delta MP10_{max} = max[MP10(Ht_{if})] - MP10(Ht_{i-1h})$$

Similar a la amplitud térmica, el índice de salto de material particulado máximo ($\Delta MP10_{max}$) representa la diferencia entre el máximo de MP10 durante el CT y el nivel de MP10 justo antes del inicio del CT. Para este indicador se tiene que en un 96% de los eventos hubo un aumento de los niveles de MP10 durante el evento, con la mayor parte con aumento en niveles inferiores a 500 $\mu g/m^3$. Hay unos pocos casos donde este aumento relativo de MP10 supera los 1000 $\mu g/m^3$. En general los aumentos más bajos de MP10 son más comunes (figura 4.15f).

- Intensidad promedio ($\overline{Vd_{ev}}$)

Definición:

$$\overline{Vd_{ev}} = promedio[V_d(Ht_{if})]$$

Dado que el Terral es un fenómeno definido en base al viento, un índice natural que representa su intensidad es por medio de la intensidad del viento promedio durante el CT. Así $\overline{Vd_{ev}}$ representa al promedio de viento de todas las HT que componen el CT. Se observa que en general los CT tienen una intensidad entre 5 y 12 m/s (Figura 4.15g). Al relacionar la intensidad del CT con su duración en HT (Figura 4.17a) se observa que existe una relación en que mientras mayor duración en HT, mayor es su intensidad.

- Salto de viento máximo (ΔVd_{max})

Definición:

$$\Delta Vd_{max} = max[V_d(Ht_{if})] - V_d(Ht_{i-1h})$$

ΔVd_{max} representa a la diferencia entre el máximo de viento durante el CT y su magnitud 1 hora antes del inicio del CT (componente valle abajo). Tal como se muestra en la figura 4.15f, se tiene que la mayoría de los casos los saltos se encuentran entre los 1 a 10 m/s, sin embargo, unos pocos casos superan los 10 m/s.

De los índices presentados en esta sección, se pueden establecer algunas relaciones. De los diagramas de dispersión presentados en la Figura 4.16 se tiene lo siguiente:

- A mayor salto de temperatura máxima existe un mayor secamiento.
- A mayor salto de temperatura máxima existe un mayor salto de MP10 máximo.
- A mayor salto de viento máximo se observa mayor salto de temperatura máxima.

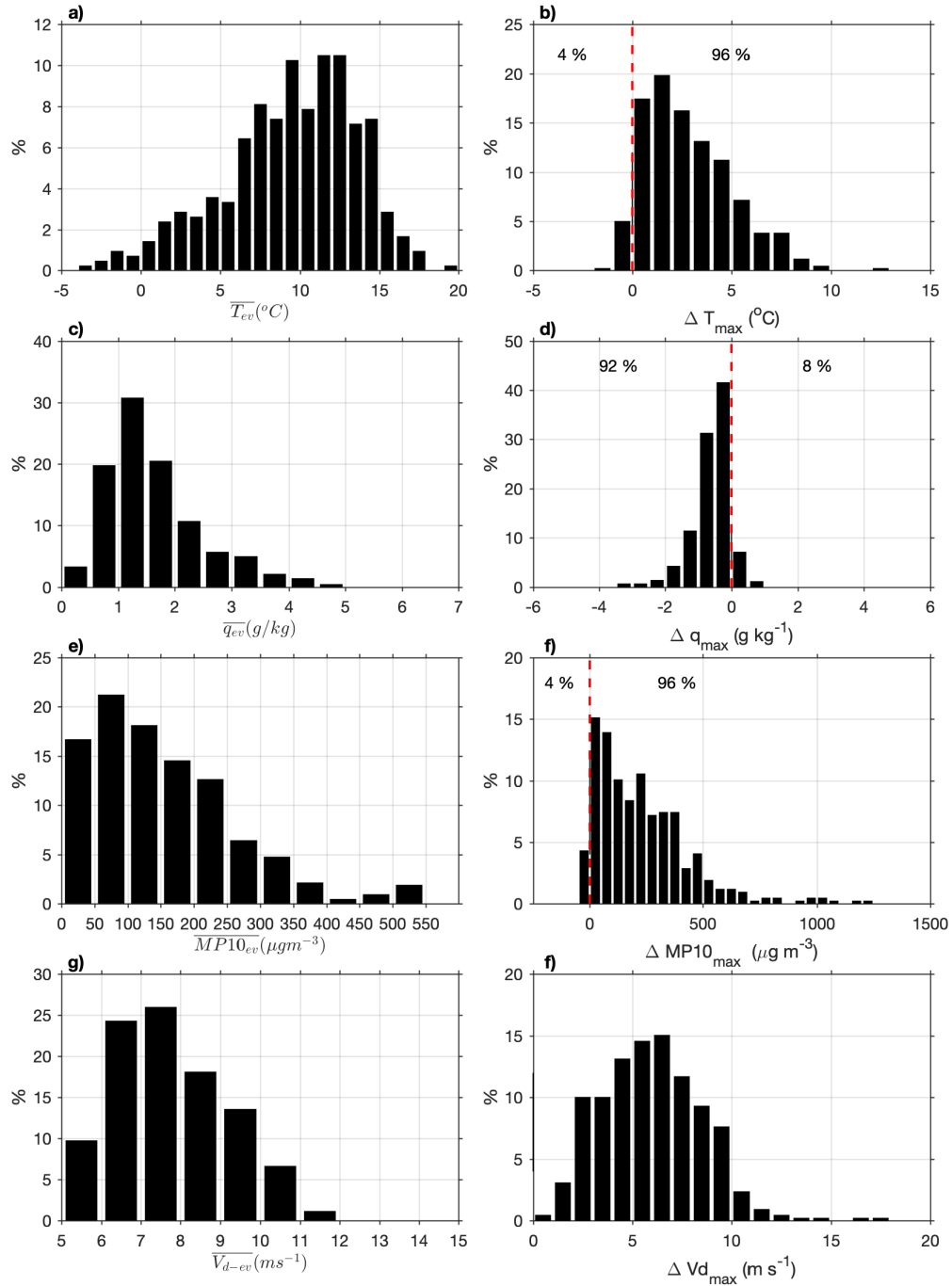


Figura 4.15: Otros índices del Terral. Distribución de frecuencias de a) temperatura promedio, b) amplitud térmica, c) humedad específica promedio, d) secamiento e) MP10 promedio, f) carga de material particulado, g) intensidad y h) amplitud de viento máxima.

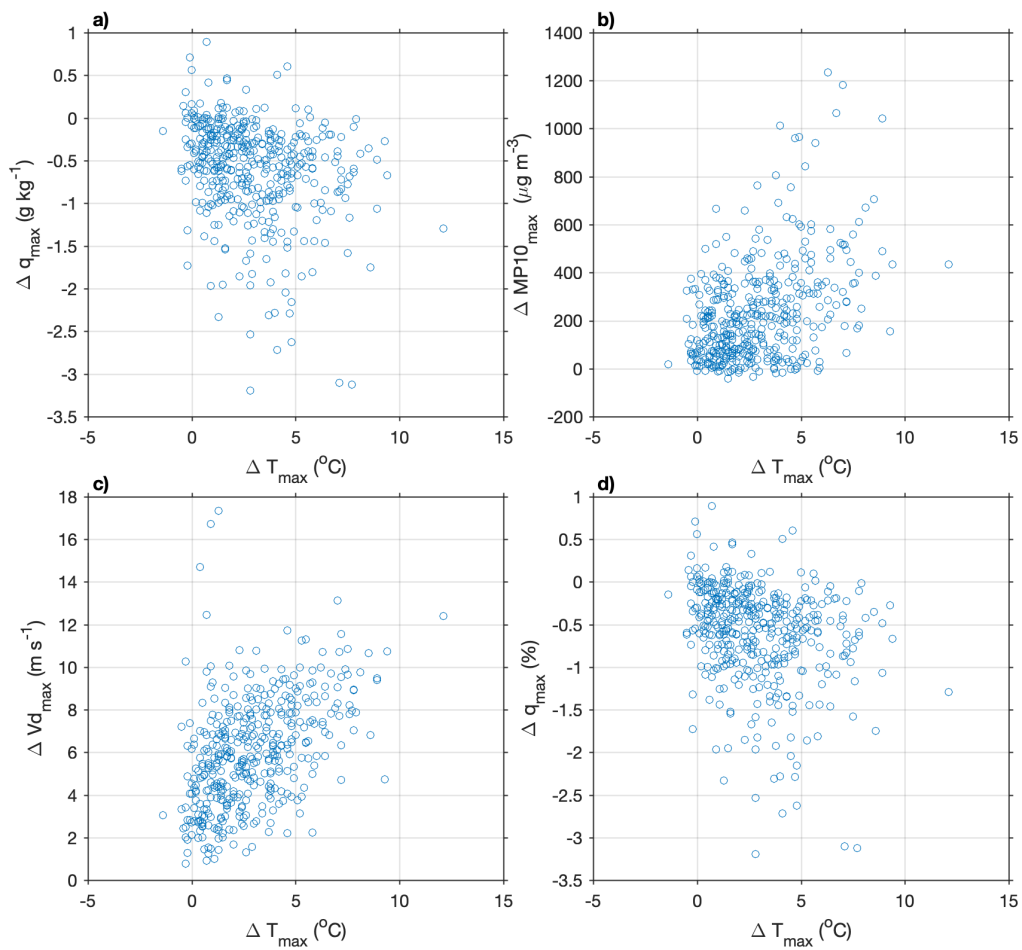


Figura 4.16: Diagramas de dispersión entre a) salto de temperatura máximo y secamiento máximo b) salto de temperatura máximo y salto de MP10 máximo, c) salto de temperatura máximo y salto de viento máximo, d) salto de temperatura máxima y secamiento máximo.

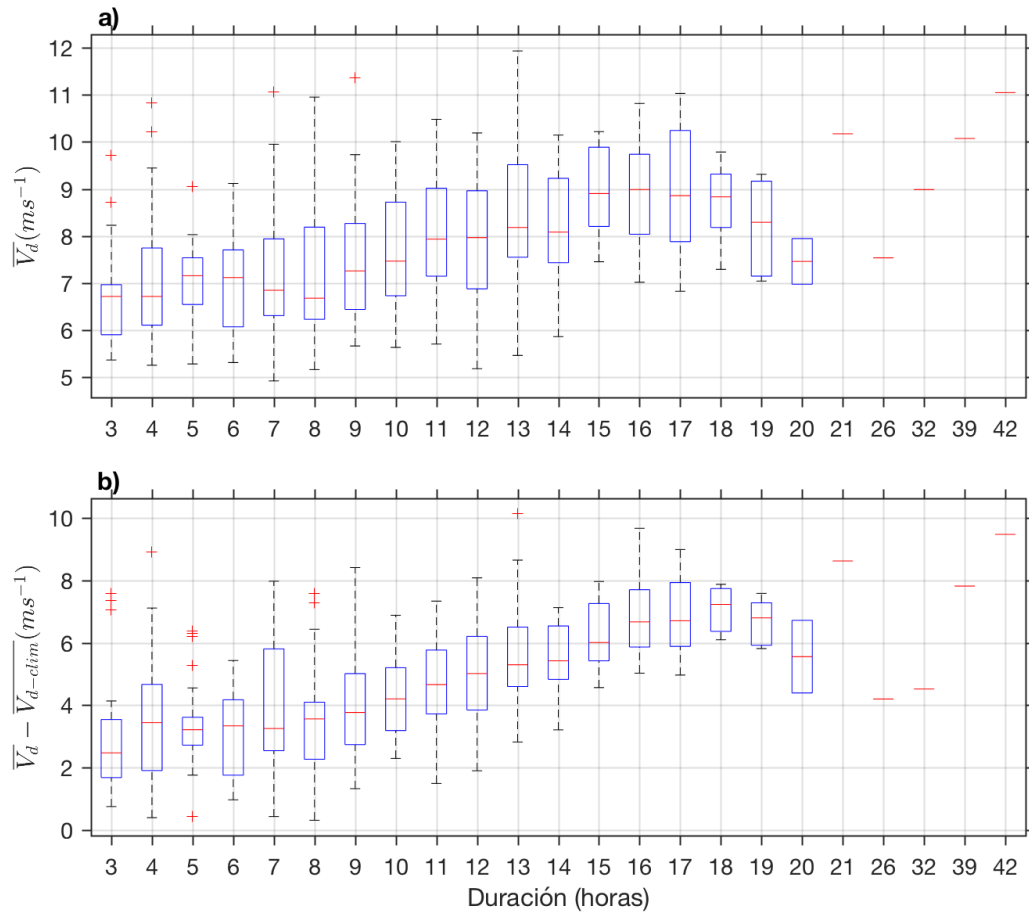


Figura 4.17: Diagramas de cajas de la (a) duración de los CT en horas v/s intensidad promedio del Terral. (b) duración de los CT en horas v/s anomalía de intensidad (se extrae el promedio climatológico).

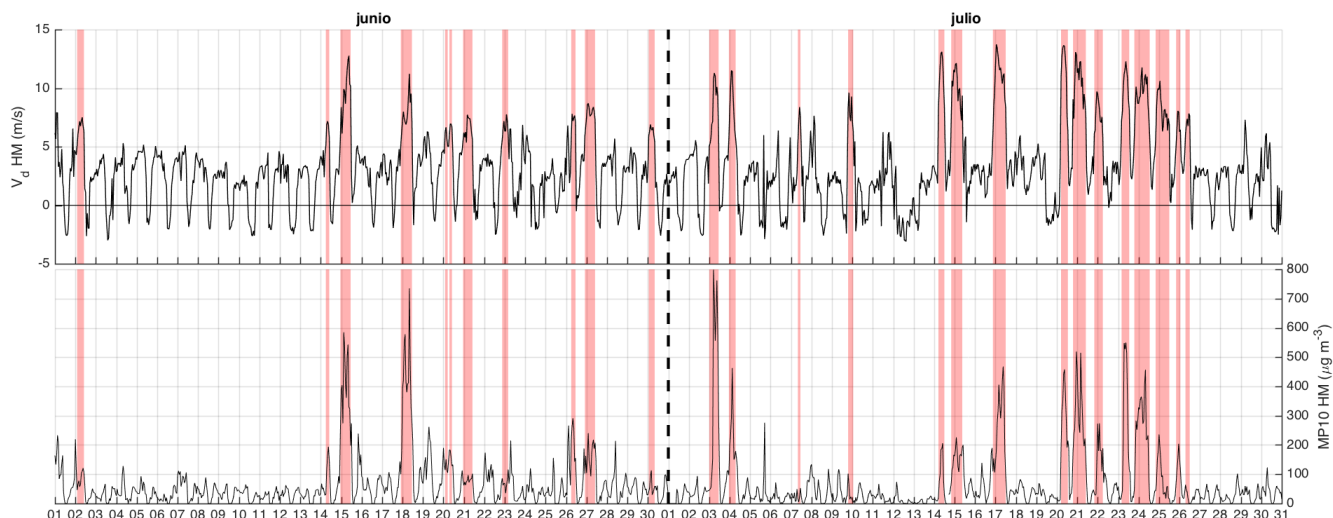


Figura 4.18: Series de tiempo de la componente valle abajo del viento (panel superior) y MP10 (panel inferior) en HM para todo el periodo de campaña LIDAR, junio-julio 2015. Las franjas de color rojo indican las horas consideradas como Terral según el criterio descrito en la sección 4.2.1. La línea segmentada color negro representa el día 1 de julio.

4.3. Caso de estudio

Como caso de estudio se selecciona un periodo de tiempo comprendido dentro de la campaña de medición LIDAR realizada durante junio-julio de 2015 (figura 4.18). Dado el número de CT en noches consecutivas, el periodo de estudio corresponde a los días 20 al 26 de julio de 2015 (Figura 4.19).

4.3.1. Observaciones en HM (superficie)

En la figura 4.19 se muestran las observaciones en estación HM en el periodo comprendido entre el 18 y 29 de julio de 2015, ventana de tiempo que cubre desde 2 días antes y 3 días después del Evento Terral (ET). Este ET está compuesto por 8 CT, 2 de los cuales ocurrieron durante la misma noche (26 de julio), pero al estar separados por más de 3 horas entre eventos, fueron clasificados como 2 CT distintos. En la tabla 4.1 y figura 4.19a (franja color rojo) se indica el periodo de cada CT. Se observa que los inicios se dan tanto en horas de la tarde como en la madrugada, y su duración varía entre 6 y 19 horas, lo cual está dentro de lo descrito en la climatología del Terral.

En términos de viento (figura 4.19a), el ET se caracteriza por CT con vientos nivel hora que superan los 10 m/s valle abajo en 5 de los 8 CT. El máximo de viento promedio horario se observa en el primer CT ocurrido durante la madrugada del 20 de julio, llegando a los 13.6 m/s .

Tabla 4.1: Fecha de inicio, fin y duración de Casos Terral en estudio.

| Fecha Inicio | Fecha Fin | Duración (h) |
|------------------|------------------|--------------|
| 2018-07-20 05:00 | 2018-07-20 13:00 | 9 |
| 2018-07-20 19:00 | 2018-07-21 10:00 | 16 |
| 2018-07-21 20:00 | 2018-07-22 06:00 | 11 |
| 2018-07-23 04:00 | 2018-07-23 13:00 | 10 |
| 2018-07-23 19:00 | 2018-07-24 13:00 | 19 |
| 2018-07-24 20:00 | 2018-07-25 12:00 | 17 |
| 2018-07-25 20:00 | 2018-07-26 01:00 | 6 |
| 2018-07-26 07:00 | 2018-07-26 12:00 | 6 |

La temperatura (figura 4.19b), en términos generales, se observa que se da en una fase de calentamiento, partiendo de una mínima temperatura de $-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a las 23 hrs del 19 de julio, hasta una máxima de $17.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ el día 26 de julio. Se aprecia que durante los CT existe un aumento de la temperatura o una temperatura relativamente constante, aún siendo de noche. Tal como fue visto en la climatología del Terral, esta es una característica que se da en la mayoría de los CT.

En cuanto a la humedad relativa (figura 4.19c), se observa que durante la tarde del día 19 de julio hubo un alto contenido de humedad asociada principalmente a nubosidad cerca de la superficie, tal como se puede corroborar por medio de la atenuación de la radiación de onda corta incidente en la estación (figura 4.24a, color negro). Horas antes del inicio del primer CT la humedad comienza a bajar considerablemente desde 95% al 20% en el inicio del CT. Durante los días posteriores, cuando se desarrolla el evento, la humedad relativa se mantiene bajo 30%, con leves aumentos durante horas del día cuando no hay Terral. La humedad específica (figura 4.19d) tiene el mismo comportamiento, en cuando a su variación temporal, que la humedad relativa. El valor más alto de humedad específica, justo antes del primer CT, fue de 5 g/kg, mientras que durante los CT se mantiene menor a 2 g/kg, en algunos momentos llegando a 1 g/kg.

Durante los CT se observa aumento en las concentraciones de MP10 en la estación. Es evidente que en los CT las concentraciones superan los $200\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que durante las noches que no hay Terral las concentraciones nivel hora se mantienen por debajo de los $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ (figura 4.18).

Es importante destacar que en el Evento Terral en estudio en las horas del día se suprimió la componente valle arriba del viento (figura 4.19a). Si bien la intensidad de la componente valle abajo del viento disminuyó durante el día, la dirección del viento no se revirtió. Esta situación se ha observado en otros eventos, asociado principalmente al cambio en la cobertura de nieve en el interior del valle. Al estar cubierto de nieve, el calentamiento de la superficie del valle durante el día no es capaz de generar el calentamiento diferencial temperatura suficiente para revertir el ciclo diario del viento, por lo cual posiblemente durante el día lo que se observa es un flujo catabático débil al interior del valle. En la figura 4.24b se muestra la altura de nieve entre el 10 y 30 de julio en estación HM, que demuestra que durante el Evento de Terral existía una cobertura de nieve de entre 40 y 50 cm de espesor. La imagen MODIS-Aqua del día 20 de julio (figura 4.21) muestra la cordillera de Los Andes cubierta

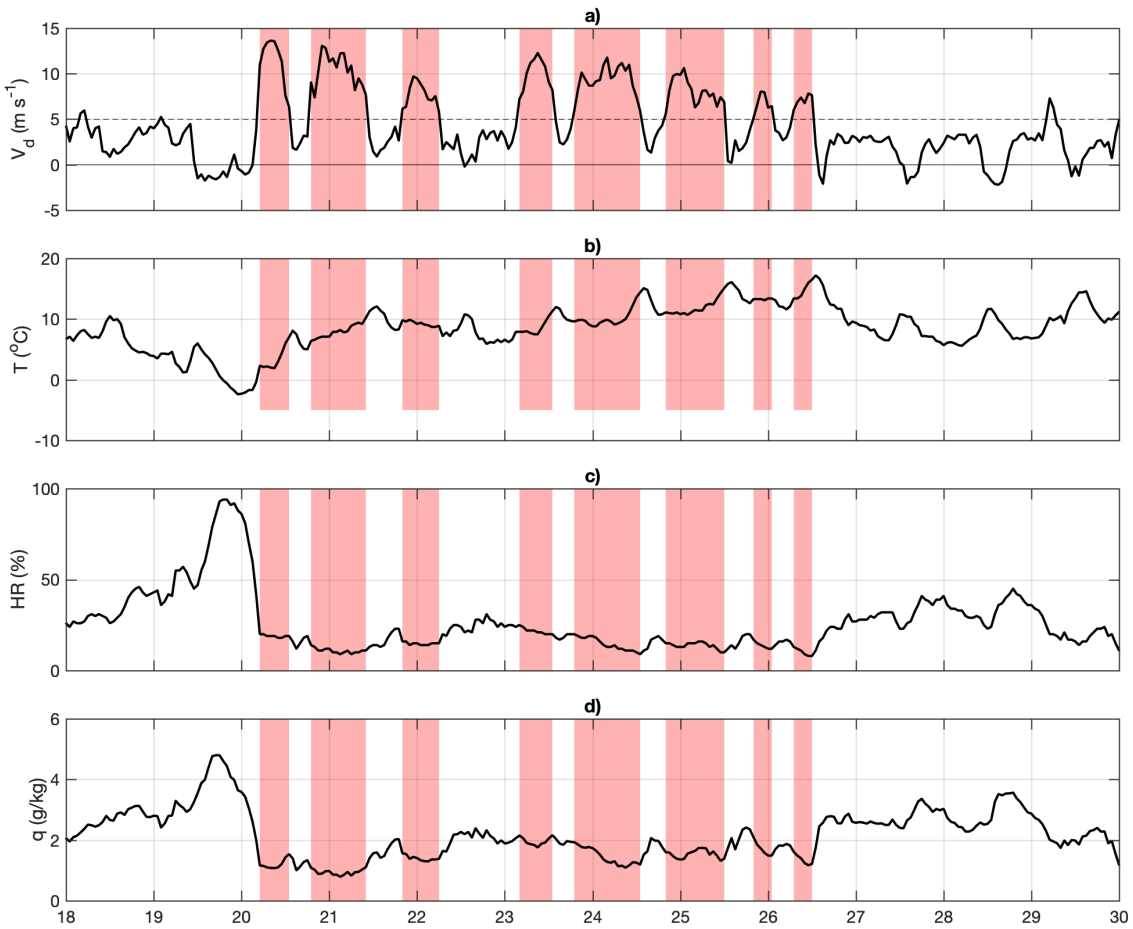


Figura 4.19: Periodo de caso de estudio. a) componente valle abajo del viento, b) temperatura c) humedad relativa y d) humedad específica. Las franjas color rojo indican los periodos clasificados como Terral.

por nieve desde la Región de Atacama al sur.

4.3.2. Mediciones en altura

Para el periodo del caso de estudio se cuenta con datos de 2 estaciones (NIM y HM) con equipos nefobasímetros. Esta instrumentación entrega información en altura de la distribución de aerosoles. Las estaciones NIM y HM se encuentran a 3000 msnm y 2340 msnm, respectivamente. NIM se encuentra en la salida superior del Valle Pelambres (ya fuera del valle), mientras que HM se encuentra en el interior del valle. Las figuras 4.20a y 4.20c muestran las observaciones para el periodo de estudio en los primeros 500m sobre el nivel de la estación. Las figuras 4.20b y 4.20d muestran las mediciones del nefobasímetro en el primer nivel (50m, puntos grises, mediciones cada 9 segundos) y las mediciones de MP10 (línea negra). Se puede apreciar la relación directa entre retrodispersión y MP10 en ambas estaciones, lo cual indica que las mediciones de retrodispersión en altura pueden ser asociadas a MP10, al menos en este estudio. Durante la tarde del día 19, tal como se ha comentado anteriormente, se observa nubosidad por medio de humedad alta y atenuación de la radiación de onda corta incidente. El nefobasímetro, equipo diseñado para la detección de nubes, también detecta nubosidad muy cercana a la superficie durante la tarde del día 19 de julio, evidenciado por los valores observados de retrodispersión que se escapan de la escala del gráfico y que no tienen relación con el MP10 observado en superficie (figura 4.20b y d).

De la figura de retrodispersión en altura en HM (figura 4.20c) se observa que los niveles de retrodispersión más altos durante los CT se dan entre la superficie (primer nivel 50 m) y los 200-300 m sobre el suelo. Se observa la relación entre la carga de aerosoles en altura y los niveles de MP10 observados en superficie, donde a mayor retrodispersión en altura se observan mayores concentraciones en superficie. Es importante destacar que la fuente principal de material particulado se encuentra a menos de 1km al norte de NIM, lo cual explica los mayores niveles de MP10 en NIM que en HM.

4.3.3. Situación Sinóptica

El ET en estudio se produce bajo condiciones sinópticas post-frontal y pre-frontal. Durante los días 17-19 de julio un sistema frontal se manifestó en la zona centro-sur del país, afectando principalmente desde la octava región hacia el sur. Sin embargo, no produjo precipitaciones en la zona de estudio. Durante la madrugada del día 20 se manifestó el primer CT. La figura 4.21 muestra la situación sinóptica para el día 20 de julio a las 17HL. Del campo de presión a nivel del mar (contornos color azul) se aprecia una vaguada costera en la zona norte de Chile y más al sur se nota la cuña del anticiclón (sinergia del anticiclón migratorio y subtropical) metiéndose por el sur (37°S) hacia el lado argentino. En altura se observa una condición de vaguada (contornos rojos) pasando a una condición de pre-dorsal. La misma condición sinóptica se observa por medio de los campos de reanálisis CFSR para el día 20 que se presenta en la figura 4.22.

La evolución sinóptica comienza el día 19 con una vaguada en altura sobre el continente

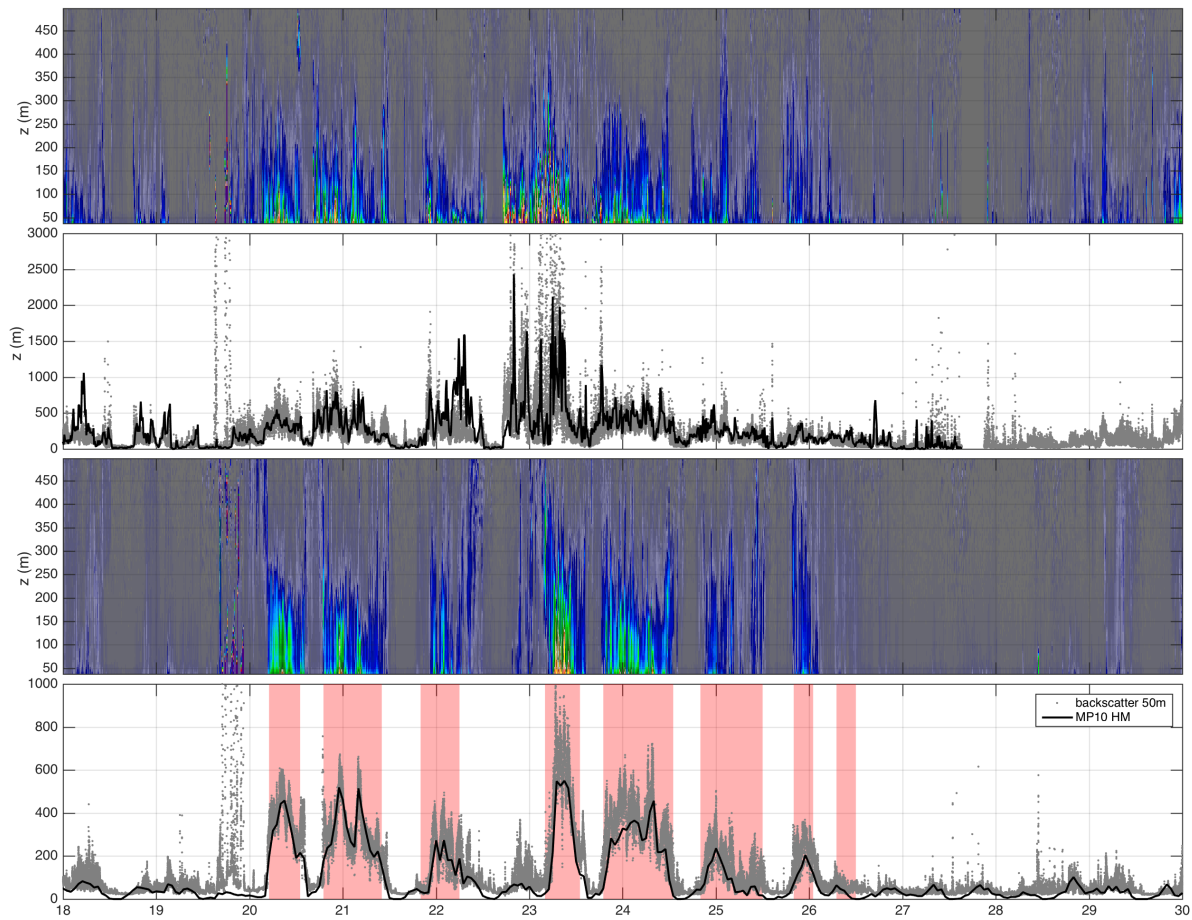


Figura 4.20: a) Backscatter nefo NIM. b) Backscatter nefo en 50 m (puntos grises) y MP10 en NIM (línea negra). c) Backscatter nefo en HM. d) Backscatter nefo en 50m (puntos grises) y MP10 en HM (línea negra). Las bandas color rojo indican los periodos clasificados como Terral.

asociada a la condición post-frontal antes mencionada. Sobre el Pacífico se observa el anticiclón subtropical fortalecido por la presencia de una alta presión migratoria, centrado en 35°S con 100°W , junto con una dorsal en altura. El día 20 de julio, cuando se manifiesta el primer CT, el anticiclón migratorio ha comenzado su paso por el sur hacia el este de Los Andes. Junto con esto el anticiclón subtropical se encuentra un poco más debilitado y la vaguada en altura se desplaza hacia el lado argentino. En términos absolutos esta característica está asociada al avance de la alta presión migratoria hacia el lado argentino del continente. Entre los días 21 y 24 se sigue debilitando el anticiclón subtropical asociado al avance de un ciclón extratropical (45°S), mientras que en el lado argentino se forma una alta presión en superficie. Los días 25 y 26 el ciclón extratropical se acerca hacia el continente junto con el sistema frontal asociado, lo que muestra que los 2 últimos días con CT se manifiestan bajo una condición sinóptica pre-frontal. Así, los primeros CT del ET se dan bajo una condición post-frontal y los últimos CT se dan bajo una condición pre-frontal. Una característica sinóptica interesante en este caso es que al observar los campos de anomalías de geopotencial (figura 4.23) del día 20, se aprecia una anomalía positiva en 1000 hpa en el lado argentino, generando un gradiente zonal de presión, lo que produce la depresión costera o vaguada costera en el lado Chileno. Esta condición anómala se observa durante los días siguientes en que se manifiesta el Terral.

De la imagen satelital MODIS-Aqua del mismo día (figura 4.21), se observa la presencia de estratos costeros asociados a la vaguada costera desde la Región de Atacama hacia norte. Por otro lado, se observa despejado entre la región de Coquimbo y la región del Maule, tanto en el interior como en la zona costera, asociado principalmente a los vientos del este cálidos y secos. También se observa la cobertura de nieve desde la región de Atacama hacia el sur. En particular, en la zona de estudio la nieve se acumuló durante el 11 y 13 de julio (figura 4.24b) debido a un gran sistema frontal que afectó desde la región de Antofagasta hasta la región de Aysen entre el 7 y 13 de julio.

De acuerdo al análisis sinóptico presentado en el trabajo de Montes et al. (2016), este caso de estudio presenta condiciones sinópticas tipo-A (post-frontal) los días 20 - 21 y tipo-B (pre-frontal) los días 24 a 26. Comparando visualmente los patrones sinópticos, no es clara su asociación a la condición tipo-T (fase de transición), sin embargo, por su definición, dado que los CT del día 22 y 23 se dan entre la condición post y pre-frontal, los días 22-23 se puede atribuir a la condición tipo-T.

4.3.4. Alcance Espacial

Para analizar el alcance espacial del fenómeno Terral, se han recopilado datos de estaciones meteorológicas existentes en la zona y estaciones instaladas durante la campaña de medición intensiva. La mayoría de las estaciones posee un periodo corto de datos, por lo cual solo se usan para este caso de estudio y no en el estudio de la climatología. En general se cuenta con estaciones valle arriba y valle abajo de estación HM, aunque no todas se encuentran ubicadas al interior del Valle Pelambres (solo HM y C2 se encuentran al interior del valle). Las variables presentadas dependerán de su disponibilidad en cada estación. Las figuras 4.25, 4.26, 4.27 y 4.28 muestran las series de tiempo de magnitud de viento, temperatura, humedad relativa y humedad específica, respectivamente. En todas las estaciones, excepto C2 y NIM (promedios de 10min), se muestran promedios horarios de las variables.

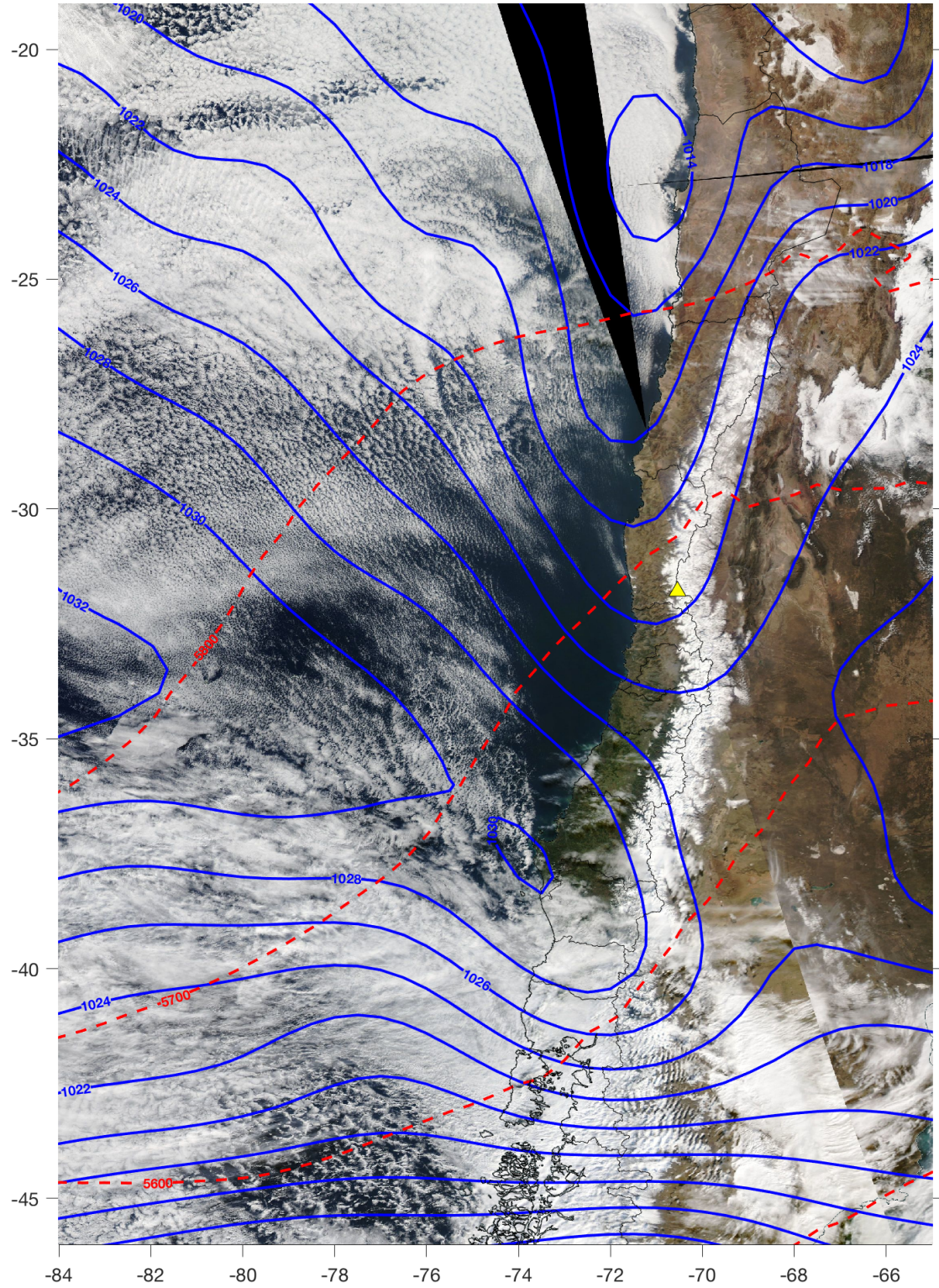


Figura 4.21: Mapa sinóptico para el día 20 de julio a las 17 HL. Se muestra imagen satelital MODIS-Aqua, presión a nivel del mar (GFS, contornos azules) y altura geopotencial en 500 hpa (GFS, contornos rojos). El triángulo amarillo indica la ubicación de la estación HM.

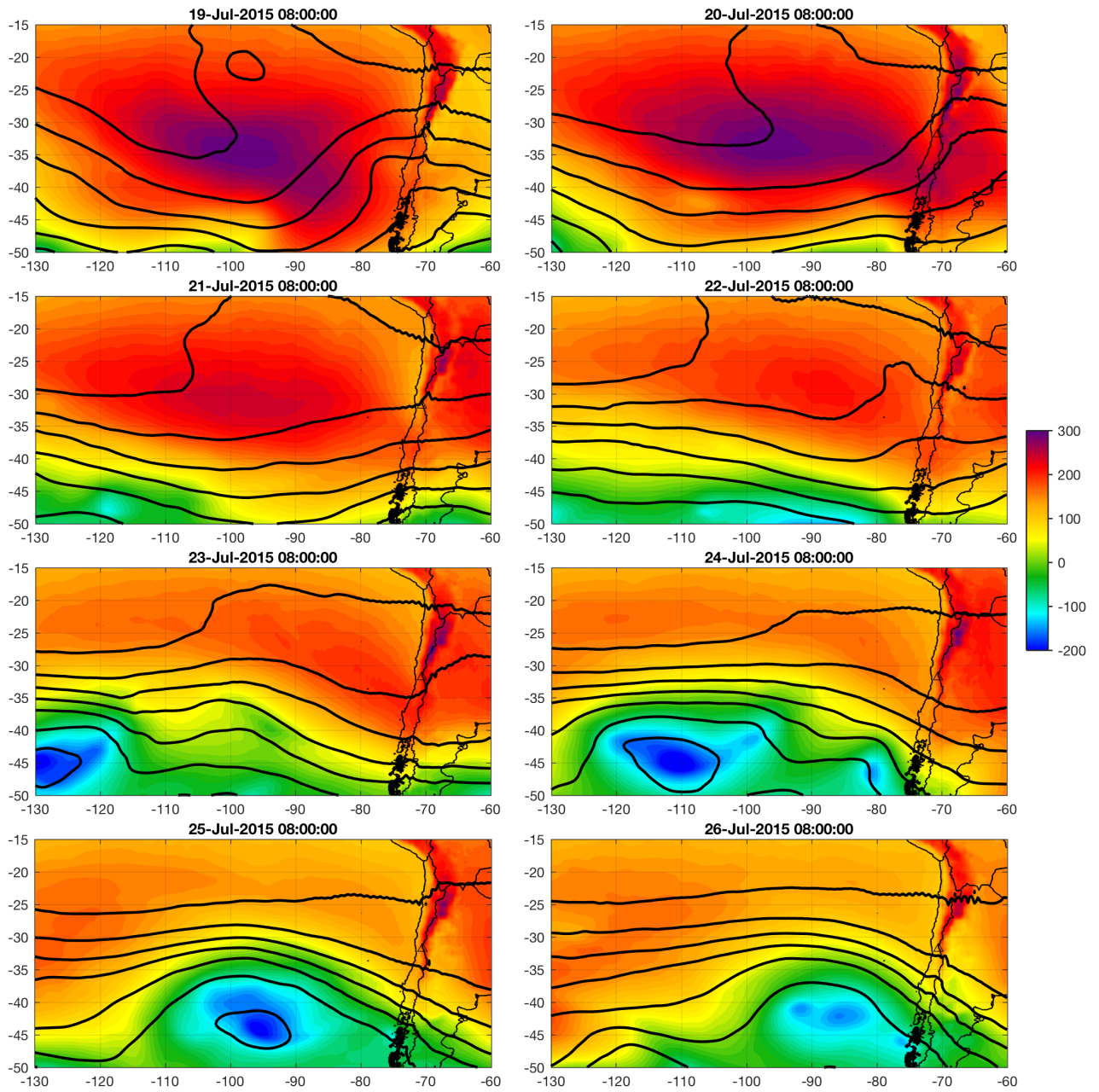


Figura 4.22: Evolución sinóptica entre el 19 y 26 de julio de 2015 en base al reanálisis CFSR. Los colores representan la altura geopotencial en 1000 hpa (proxy de presión a nivel del mar) y los contornos color negro representan la altura geopotencial en 500 hpa.

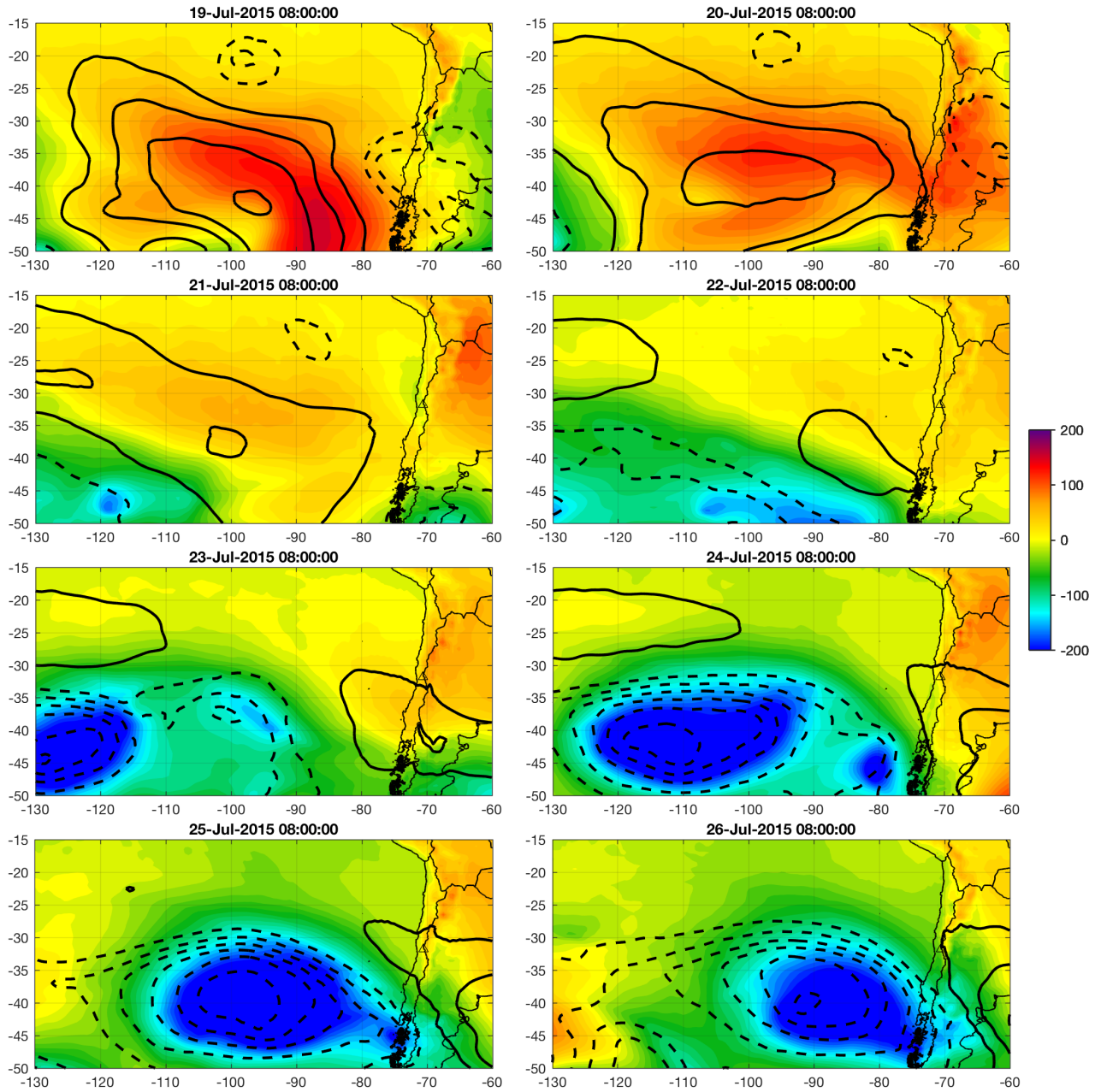


Figura 4.23: Igual que la figura 4.22, pero en términos de anomalía en base a la climatología de invierno CFSR 2010-2015.

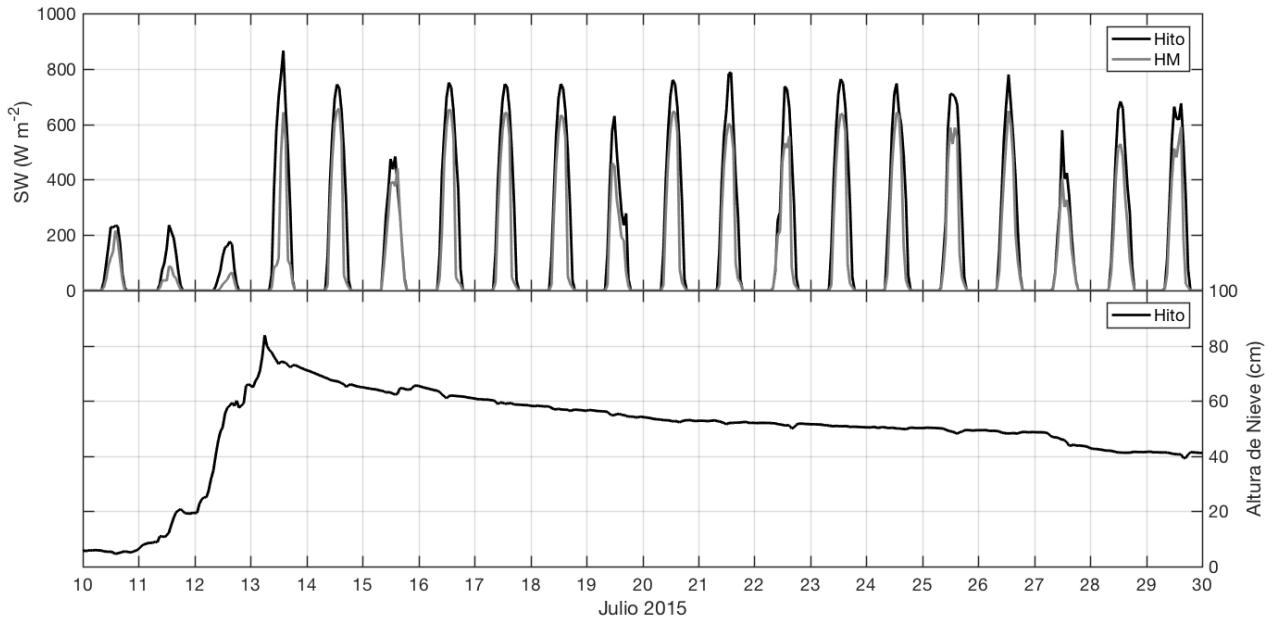


Figura 4.24: Panel superior: radiación de onda corta incidente en estación Hito (negro) y HM (gris). Panel inferior: altura de nieve en estación HM. Periodo 10 al 29 de julio de 2015.

Para el viento, hasta ahora se ha mostrado que el Terral es un fenómeno que se manifiesta en la estación HM, a 2340 msnm en el interior del Valle Pelambres. Durante el evento, de acuerdo a las observaciones de viento presentadas en la figura 4.25 en las diferentes estaciones, se tiene que en la estación C2 se observan vientos intensos coincidentes con los observados en HM, aunque relativamente más débiles. La estación C2 se encuentra 3km valle arriba de HM, a 2710 msnm, todavía en el interior del VP. La estación C2 mide viento a 3 m de altura, sin embargo, los datos han sido extrapolados a 10 m de altura, asumiendo un perfil logarítmico. La otra estación que muestra vientos relativamente intensos en periodos de Terral en HM es la estación Hualtatas. Esta estación se encuentra a 3400 msnm en la ladera oeste del rajo minero, por lo cual se puede decir que no está al interior del valle. La estación Hito, que está ubicada cerca de la frontera con Argentina a 3700 msnm, no muestra vientos anómalos durante los periodos de Terral. Entre la estación C2 y Hualtatas se encuentra NIM. En NIM tampoco se observa viento intenso cerca de la superficie, sin embargo, según observaciones de viento LIDAR en altura (figura 4.29) sí se observan vientos más intensos por sobre la superficie (50m sobre el nivel del suelo). Lo anterior sugiere que en este punto el Terral no llega a la superficie, posiblemente debido a que NIM se ubica en un sector bajo respecto al entorno del valle (una hondonada). Las estaciones que están valle abajo de HM (Chacay y Cuncumén) tampoco muestran vientos anómalos durante los periodos de Terral en HM. La figura 4.30 muestra pseudo-perfiles verticales de magnitud de viento obtenido de las observaciones en las distintas estaciones en superficie, para cada uno de los CT en estudio. En el caso de NIM, se muestra una barra horizontal color rojo que indica el rango del 80% de las mediciones de viento LIDAR en 50 m, del cual se puede observar que durante los CT la medición remota en altura, en general, muestra vientos más intensos que los observados en superficie, lo que podría indicar que si bien el Terral no se observa en superficie, sí pasa en altura en este punto. De lo anterior se puede determinar que el Terral es un fenómeno que se manifiesta al

interior del valle Pelambres, entre Hualtatas y HM, aun cuando Hualtatas se encuentra fuera del valle Pelambres.

En cuanto a la temperatura (figura 4.26), se observa un patrón general en todas las estaciones, con una mínima temperatura cerca de la medianoche del día 20 de julio. Luego se observa un aumento de las temperaturas, tanto mínimas como máximas, al menos hasta el 26 de julio. En las estaciones ubicadas desde HM hacia arriba se observa un leve aumento de la temperatura en los periodos nocturnos, aunque el caso más extremo es HM.

La humedad relativa (figura 4.27) muestra un patrón generalizado, con una alta humedad durante el día previo al primer CT, con humedades muy cercanas 100 %, mientras que ya durante el ET la humedad se mantiene entre un 10 % y 50 %. El día 27 de julio, un día después del último CT, se observa un aumento de la humedad desde la estación C2 hacia abajo. De esto se tiene que la humedad tiene un comportamiento más bien regional que local. Aún cuando no se observan vientos intensos en las estaciones, sí se observa la baja humedad específica (figura 4.28) durante el desarrollo del ET.

4.3.5. Estabilidad y humedad

Tal como fue presentado anteriormente, durante el caso de estudio se observa que el viento intenso asociado al Terral se manifiesta en el interior del valle Pelambres (estaciones HM y C2) y en la estación Hualtatas. Con el objetivo de relacionar el viento con otras variables, se estima la estabilidad estática por medio de los gradientes de temperatura potencial entre las diferentes estaciones donde se pudo estimar la temperatura potencial. Además se realiza un análisis análogo con la humedad específica. Es conocido que para procesos adiabáticos sin mezcla la temperatura potencial se conserva a lo largo de la trayectoria de la masa de aire, al igual que la humedad específica.

En la figura 4.31b se muestra la temperatura potencial θ en HM (negro) y Hualtatas (azul) para el periodo de estudio, junto con la diferencia de temperatura potencial entre ambas (figura 4.31c). Bajo condiciones normales o estables se espera que la temperatura potencial aumente con la altura, es decir, que la diferencia de temperatura potencial Hualtatas-HM sea mayor a 0 K. No obstante, se observa que durante los CT (franjas color rojo en figura 4.31c) la diferencia de temperatura potencial tiende a ser cercana a 0 K, lo que indica que las temperaturas potenciales tienden a igualarse, mientras que durante las horas de no-Terral se dan las condiciones normales con temperatura potencial mayor en Hualtatas que HM, tal como se aprecia en el diagrama de dispersión entre la diferencia de temperatura potencial entre Hito-HM y la componente valle abajo del viento (figura 4.32).

En la figura 4.33 se muestran los perfiles verticales de temperatura potencial para todos los CT del periodo en estudio, derivados de las estaciones disponibles en superficie entre Cuncumén (1000 msnm) e Hito (3700 msnm). La figura 4.34 muestra los perfiles para los periodos entre eventos. De los perfiles se pueden destacar los siguientes puntos:

- Existe una clara diferencia entre los perfiles medios durante los CT, en general en la noche-mañana, y los perfiles entre eventos (no-Terral) en general durante el día, a

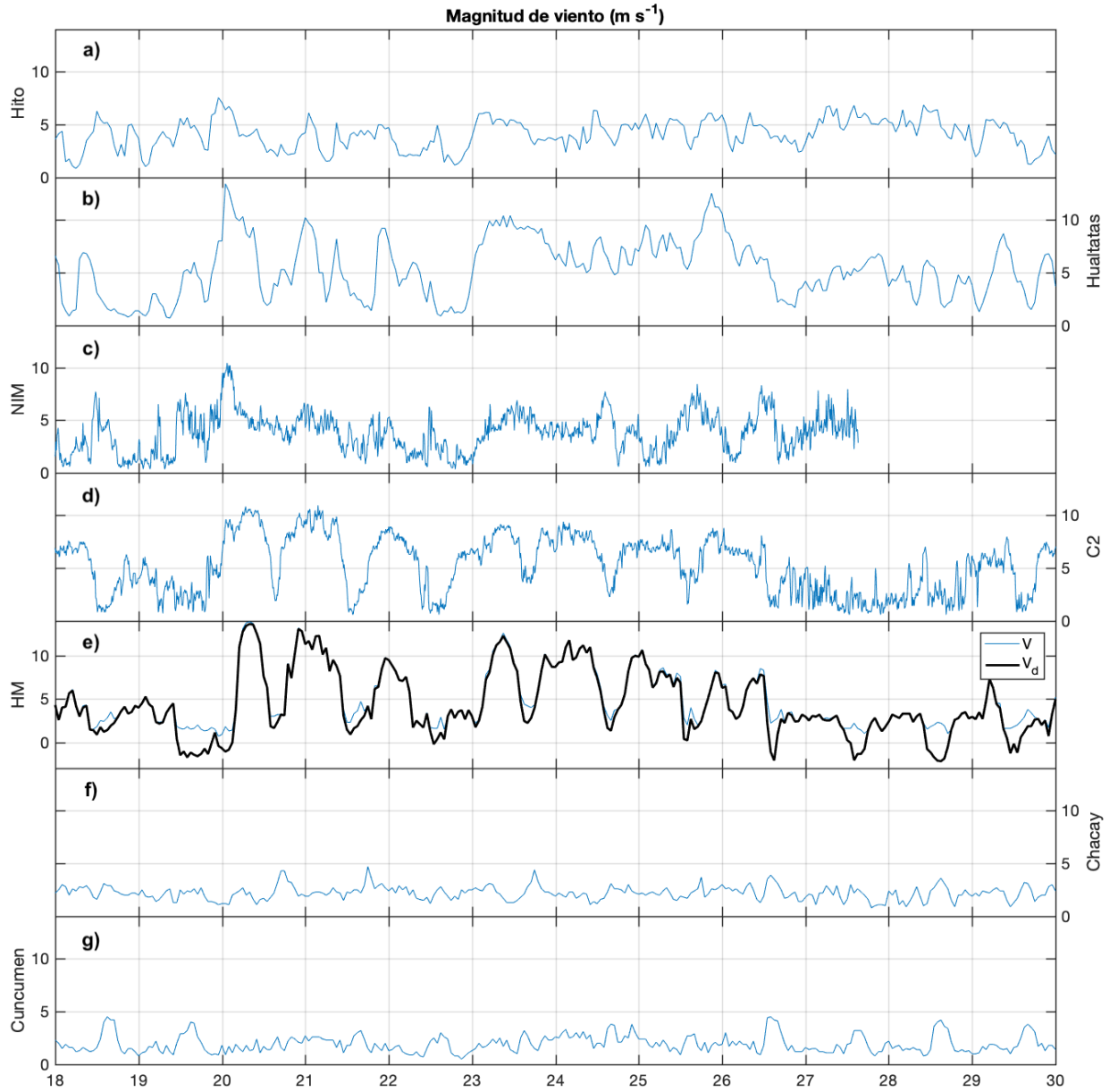


Figura 4.25: Series de tiempo de magnitud del viento (m/s) para el caso de estudio en a) Hito, b) Hualtatas c) NIM, d) C2, e) HM, f) Chacay y g) Cuncumén.

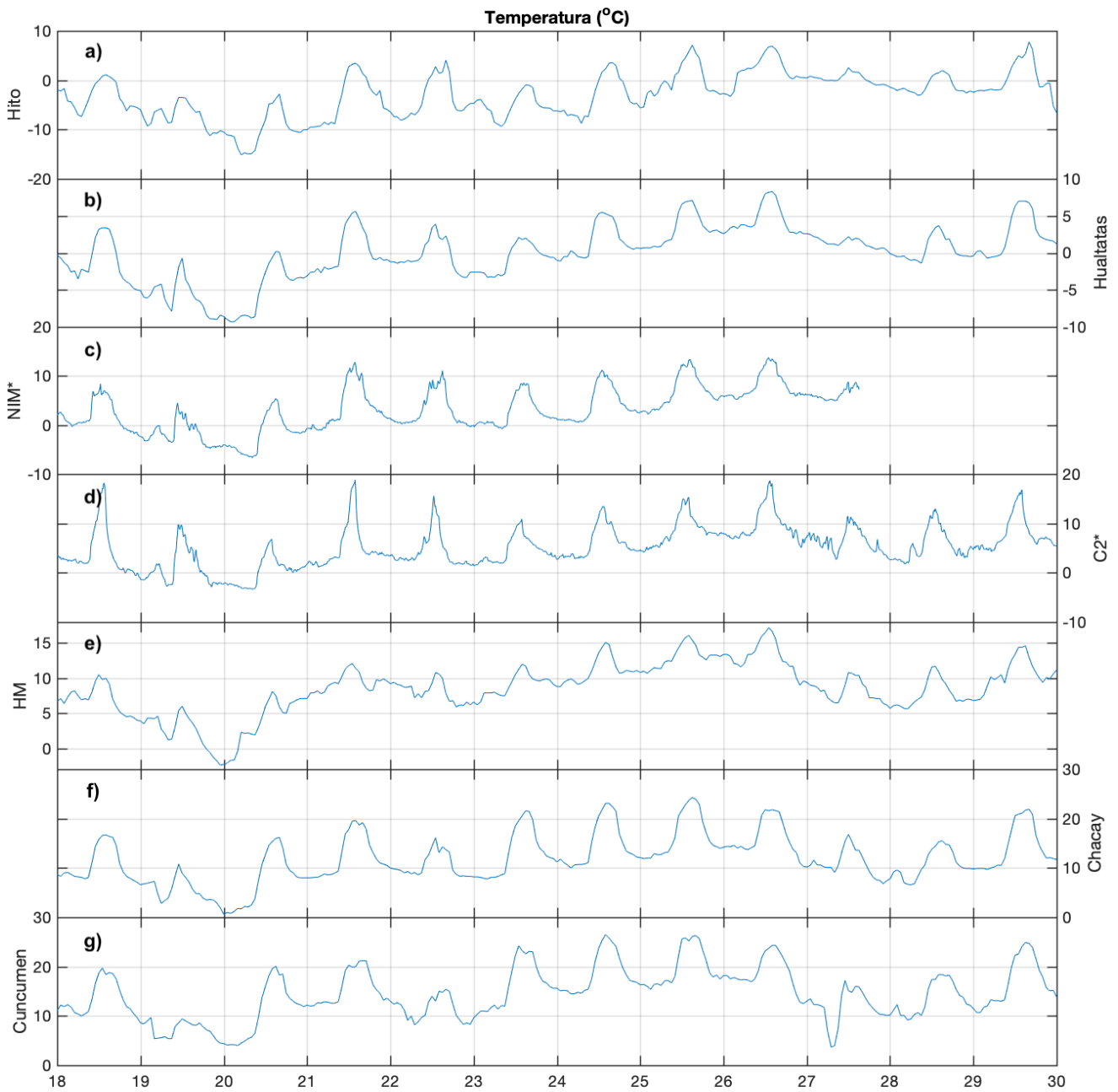


Figura 4.26: Lo mismo que en la figura 4.25, pero para temperatura. *Las estaciones C2 y NIM no miden la temperatura de forma adecuada, en particular durante las horas del día.

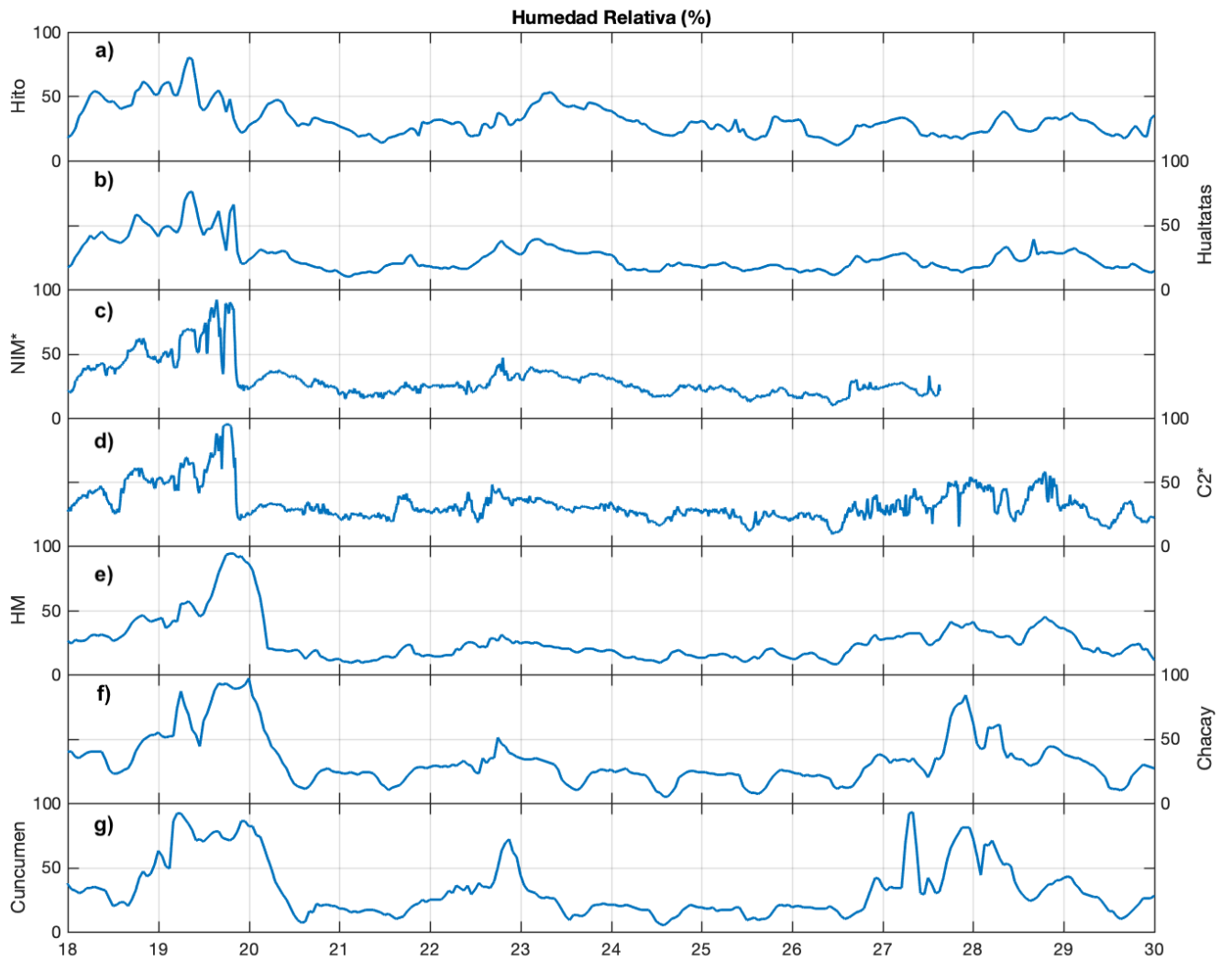


Figura 4.27: Lo mismo que en la figura 4.25, pero para humedad relativa.

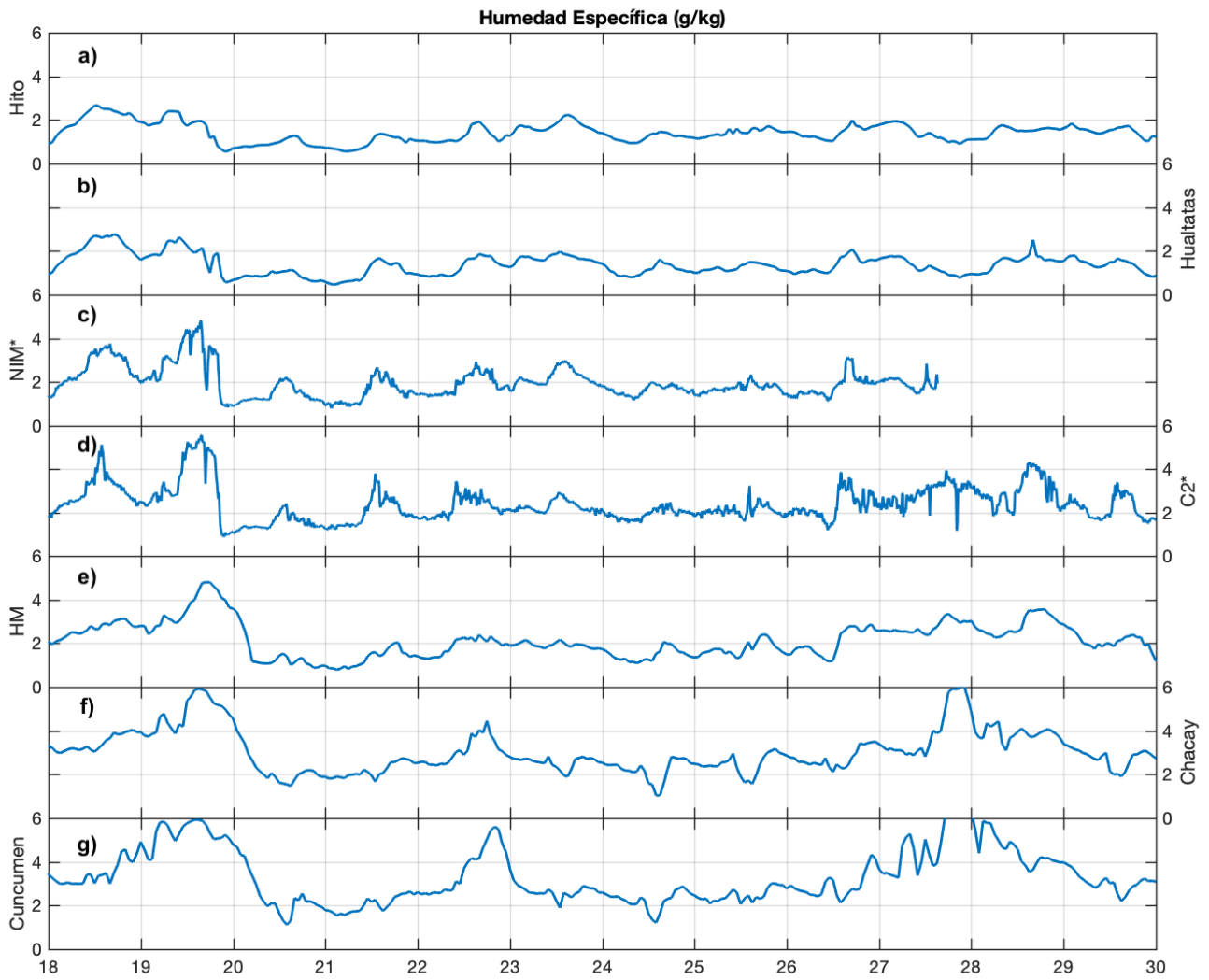


Figura 4.28: Lo mismo que en la figura 4.25, pero para humedad específica.

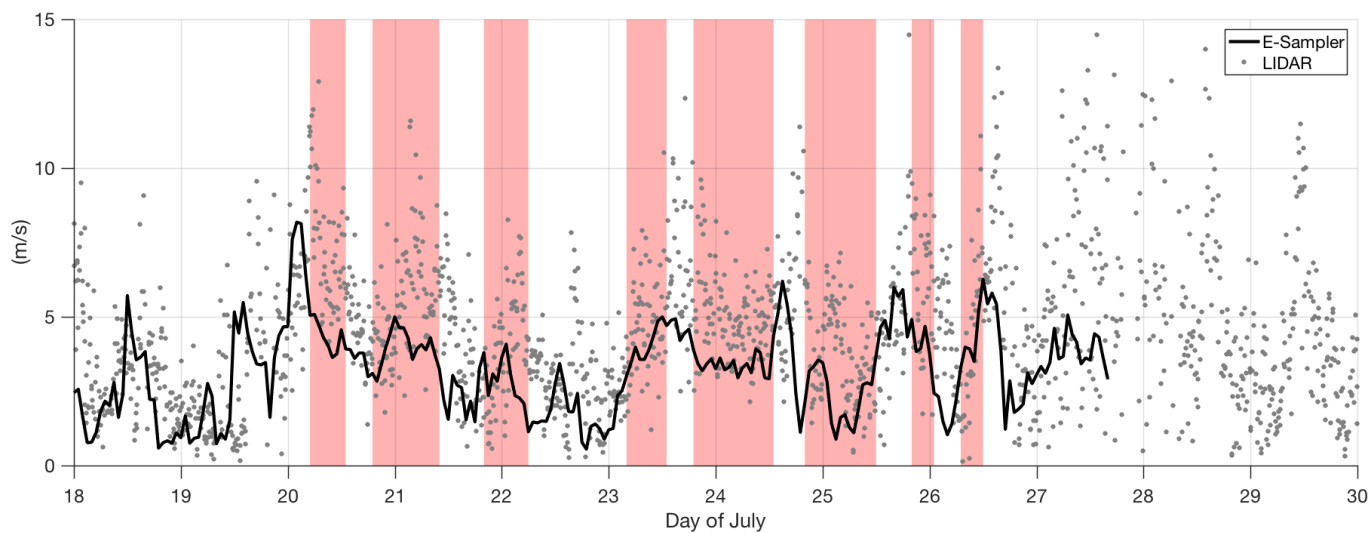


Figura 4.29: Serie de tiempo de magnitud de viento en NIM a 4 m de altura (línea negra), y magnitud de viento horizontal LIDAR en 50 m de altura (puntos color gris).

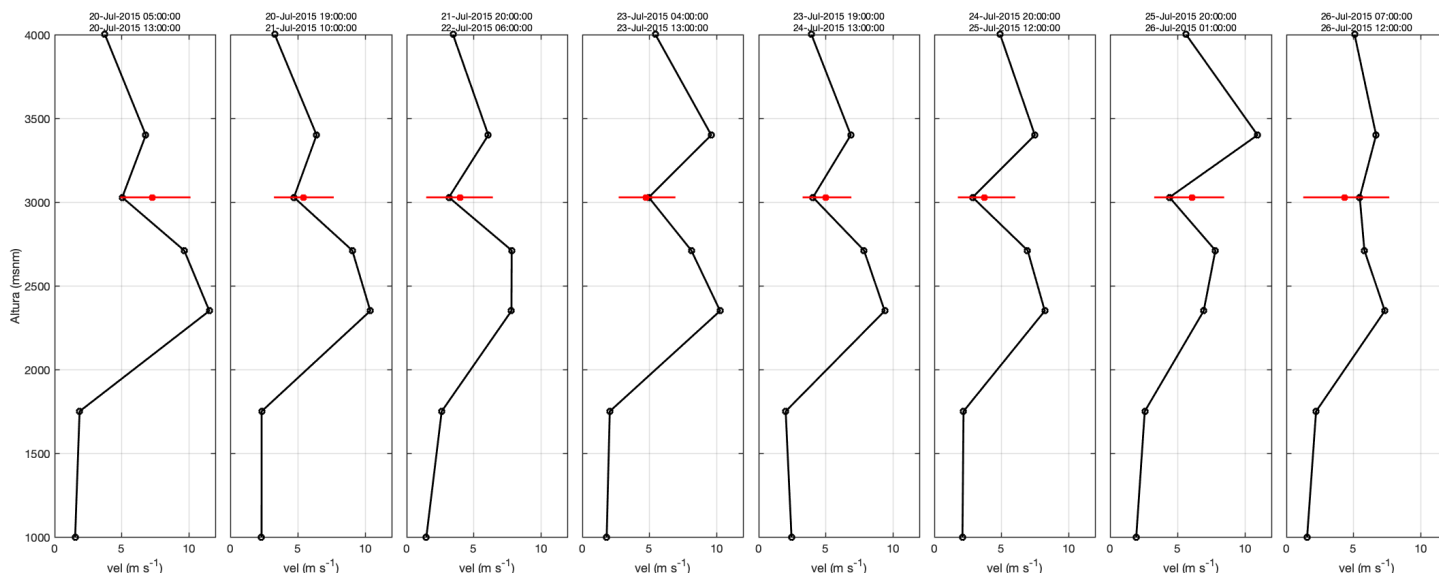


Figura 4.30: Perfil de viento promedio durante los casos Terral a lo largo del Valle Pelambres, entre Hito (4000 m) y Cuncumén (1000 msnm). Las barras horizontales en la estación NIM representan el rango de magnitud de viento medido por el equipo LIDAR a 50 m de altura.

excepción del último perfil no-Terral que se da durante la madrugada.

- Se aprecia un calentamiento entre el primer(madrugada del 20 de julio) y último CT (mañana del 26 de julio), de aproximadamente 10°C . Sin embargo, la forma de perfil se mantiene.
- En un primer tramo, entre Cuncumén (1000 msnm) y HM(2340 msnm) se observa en general un perfil estable. Es importante destacar que tanto la estación Cuncumén y Chacay se encuentran fuera del valle Pelambres.
- En un segundo tramo, entre HM, C2, NIM y Hualtatas (3400 msnm) se observa un perfil neutro, es decir, con más o menos la misma temperatura en todas las estaciones.
- La estación Hito en general presenta una temperatura potencial menor a las otras estaciones que están más abajo al interior del valle Pelambres.

Al igual como se hizo con la temperatura potencial, en la figura 4.35 se muestran los perfiles de humedad específica q para los CT y en la figura 4.36 para los periodos de no-Terral entre CT. Como fue descrito anteriormente, durante los días del caso de estudio se observó una menor humedad comparada con los días anteriores al 20 de julio y posteriores al 26 de julio. De acuerdo a los perfiles de humedad específica q se pueden destacar los siguientes puntos:

- Durante los CT en todos los casos se observa que la forma del perfil es similar, con mayor humedad en las estaciones más bajas (Cuncumén y Chacay), con valores de entre 2 y 3 g/kg, y menor humedad desde las estaciones HM hasta Hito con valores de entre 0.5 a 1.5 g/kg, con un mínimo relativo en estación HM. En general se observa que el perfil va aumentando de humedad con el pasar del los días.
- Durante los periodos de no-Terral se observa un perfil más homogéneo y relativamente más húmedo, con excepción del último periodo de no-Terral que se da durante la madrugada entre 2 CT.

De los perfiles anteriormente vistos de viento, temperatura potencial y humedad específica se puede estimar un perfil promedio de cada una de las variables, los que se muestran en la figura 4.37. Se mantienen las características mencionadas anteriormente para cada una de las variables. De acuerdo a los tipos de perfiles de temperatura potencial θ para Foehn presentados en la figura 1.3, se tiene que considerando todas las estaciones menos Hito, la forma del perfil medio de θ observado (figura 4.37a) tiene la forma de Foehn que no llega a la superficie del valle (Cuncumén) en la mañana. Se observa que durante los CT las estaciones ubicadas entre HM y Hualtatas se caracterizan por un perfil relativamente neutro con temperaturas potenciales parecidas, baja humedad relativa y vientos relativamente intensos en superficie y en altura en NIM. Dado el perfil estable entre Cuncumén y HM, se deduce el desarrollo de una poza fría en las zonas más bajas. Aun cuando el perfil de estabilidad se asocia teóricamente al de un Foehn que llega a superficie, solo se puede decir que el Terral llega solo hasta HM (o a un punto intermedio entre Chacay y HM) a causa de la poza fría. También un factor importante a considerar es que un poco más abajo de la estación HM es donde la geografía del lugar cambia de un valle muy cerrado a una valle más abierto, lo cual podría hacer que la no manifestación del Terral aguas abajo de HM pueda estar asociado a un factor geográfico y no a una factor meteorológico como la poza fría.

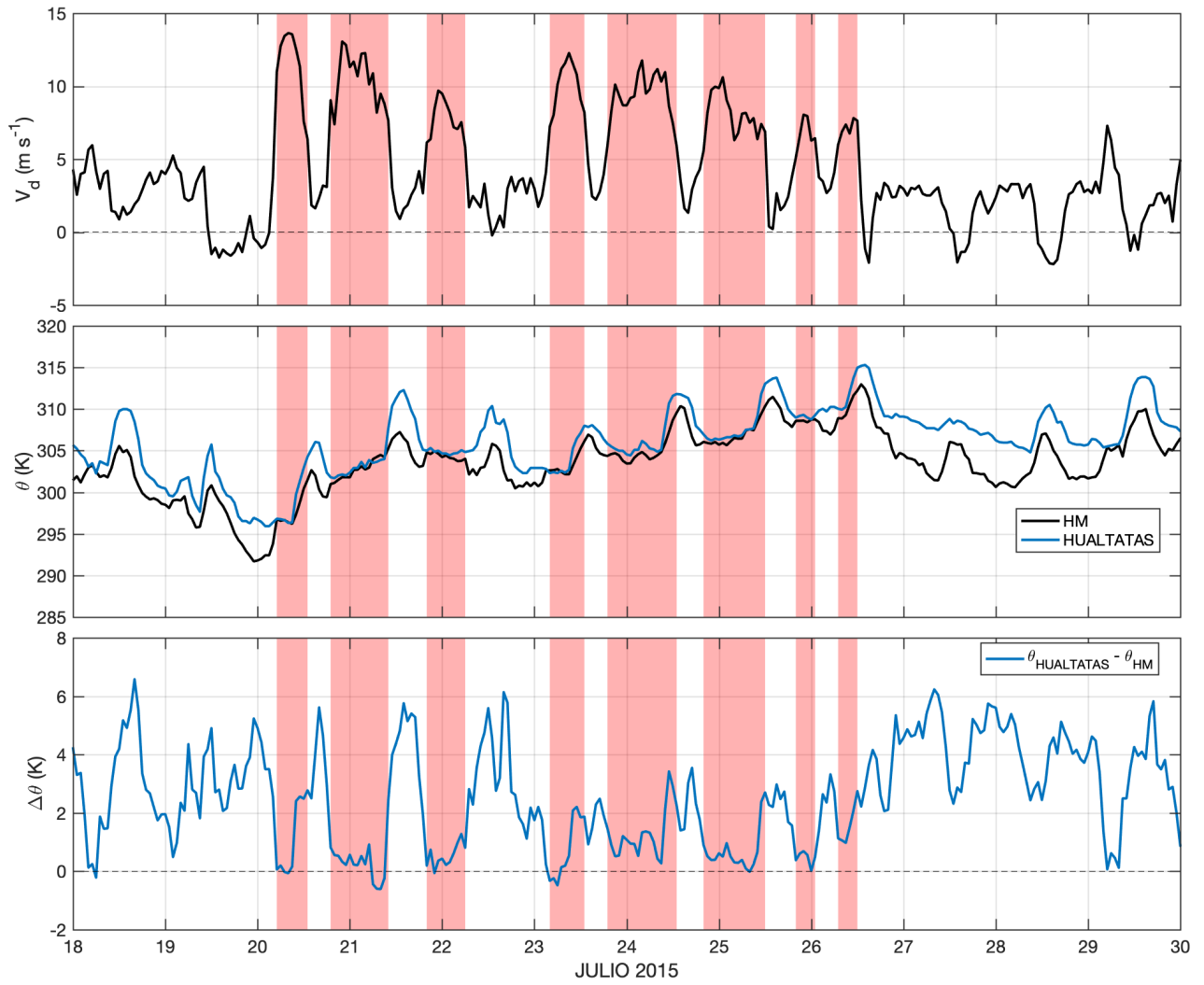


Figura 4.31: a) Componente de viento valle abajo en HM. b) Temperatura potencial en HM (negro) y Hualtatas (azul). c) Diferencia de temperatura potencial entre Hualtatas y HM.

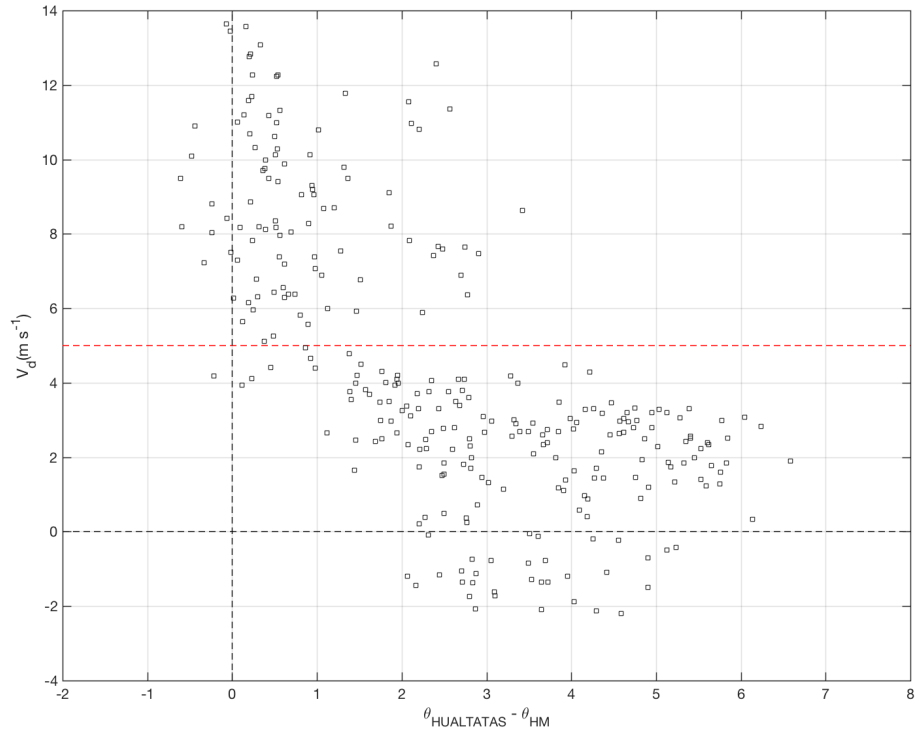


Figura 4.32: Digrama de dispersión entre la diferencia de temperatura potencial Hualtatas-HM y la componente valle abajo del viento. Promedios horarios.

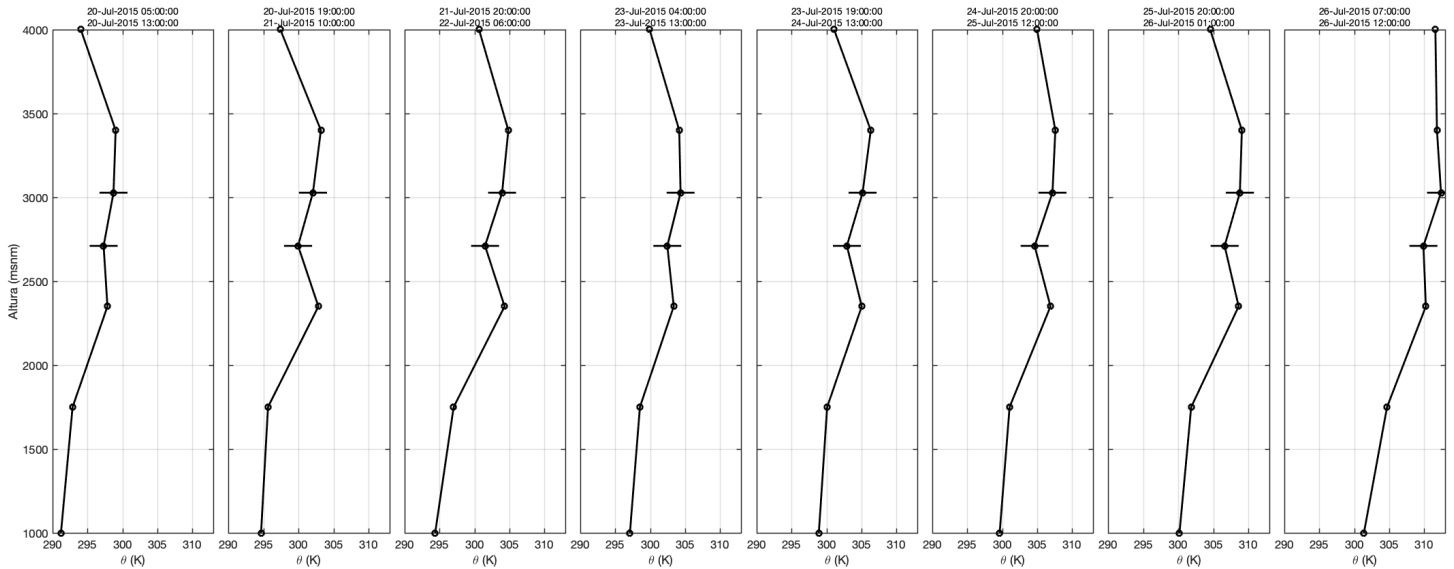


Figura 4.33: Perfil de estabilidad promedio durante los casos Terral a lo largo del Valle Pelambres, entre Hito (4000m) y Cuncumén (1000 msnm). Las barras horizontales en las estaciones C2 y NIM representan el error en la medición de temperatura (+2°C).

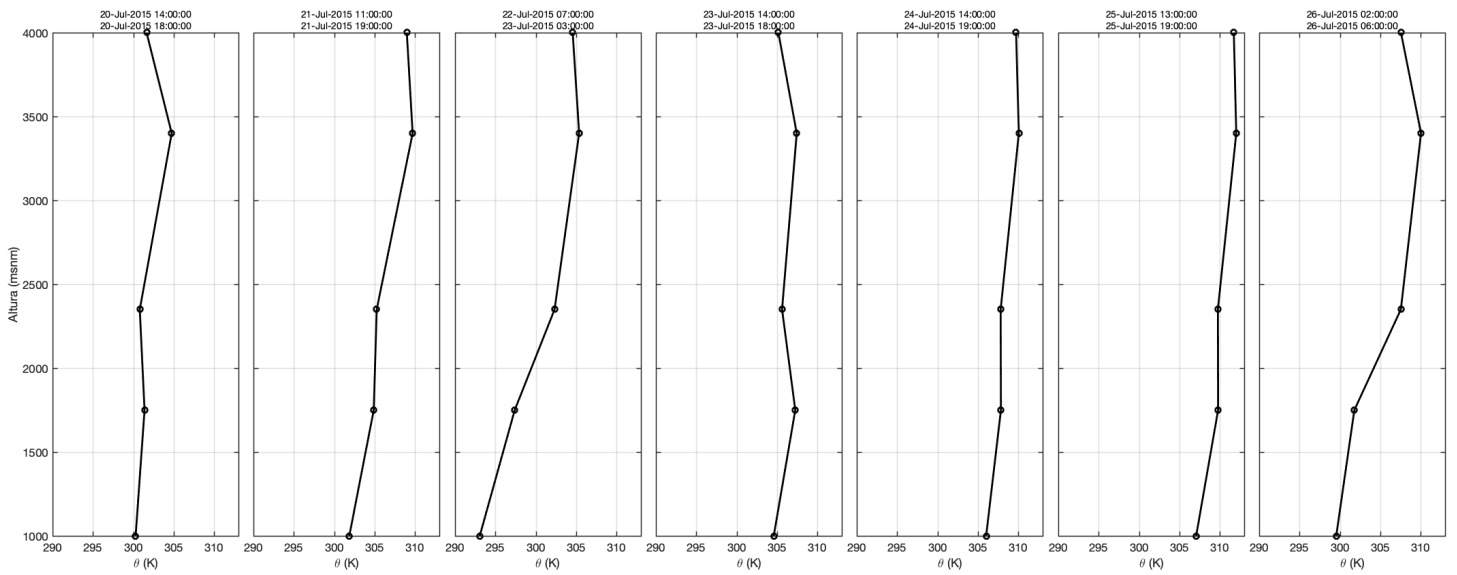


Figura 4.34: Igual que en la Figura 4.33 pero para los periodos de no-Terral. No se muestran las estaciones NIM y C2 debido a las malas mediciones de temperatura durante el día.

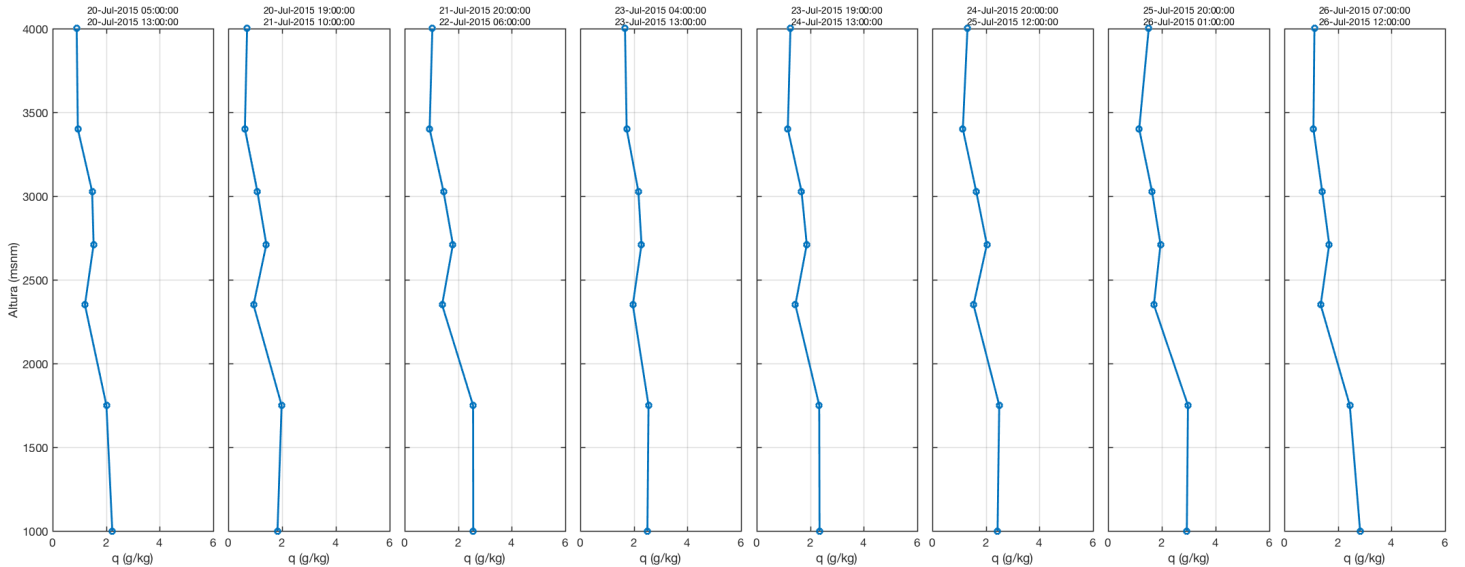


Figura 4.35: Perfil de humedad específica promedio durante los casos Terral a lo largo del Valle Pelambres , entre Hito (4000m) y Cuncumén (1000 msnm).

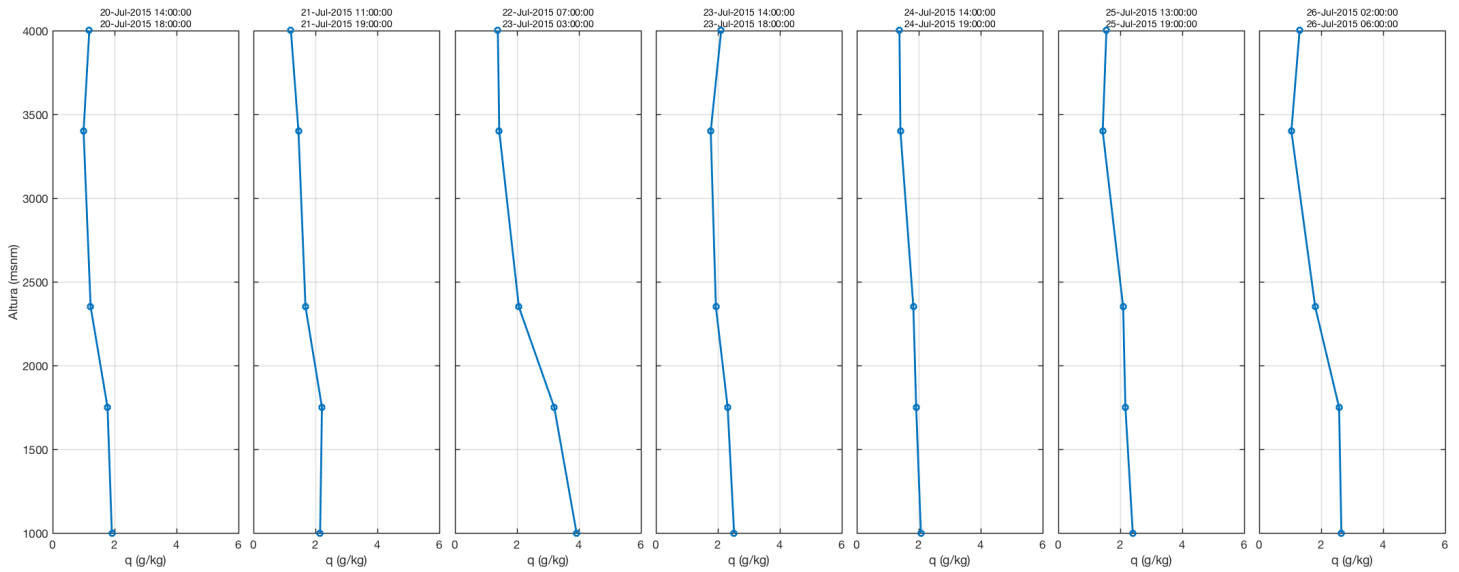


Figura 4.36: Igual que en la Figura 4.35 pero para los periodos de no Terral. No se muestran las estaciones NIM y C2 debido a las malas mediciones de temperatura durante el día.

4.3.6. Gradientes de presión

Otra variable meteorológica que puede explicar el desarrollo de vientos es la presión. Para el caso de estudio se cuenta con datos de presión en superficie en 4 estaciones: HM(2340 msnm), C2 (2710 msnm), NIM(3000 msnm) e HITO(3700 msnm). Debido a que las estaciones se encuentran a diferentes alturas, para efectos de comparación se utiliza la anomalía de presión (se le resta el promedio). En la figura 4.38a se presentan las anomalías de presión en HM (negro), C2 (naranja), NIM (azul) e Hito (rojo), para el periodo 18 a 29 de julio de 2015. Se aprecia una variabilidad sinóptica en las series en todas las estaciones y una diferencia de anomalías de presión entre las estaciones. Cuando no hay CT, por ejemplo el 19 de julio, la anomalía de presión es menor en Hito y aumenta a medida que más baja es la estación, mientras que cuando hubo CT la diferencia se invierte, con mayor presión en Hito y menor presión hacia las estaciones que están más abajo. La figura 4.38b muestra la diferencia de presión entre Hito y HM, estaciones más alta y más baja, respectivamente. Se observa que en particular durante los 3 primeros CT la diferencia de presión se invierte justo en las horas donde se manifiestan los CT, con diferencias de anomalías de presión entre +1hpa y +2hpa. Durante los días siguientes el gradiente se mantiene revertido aún en las horas de no-Terral. La relación entre las estaciones HITO-HM se repite en las estaciones intermedias.

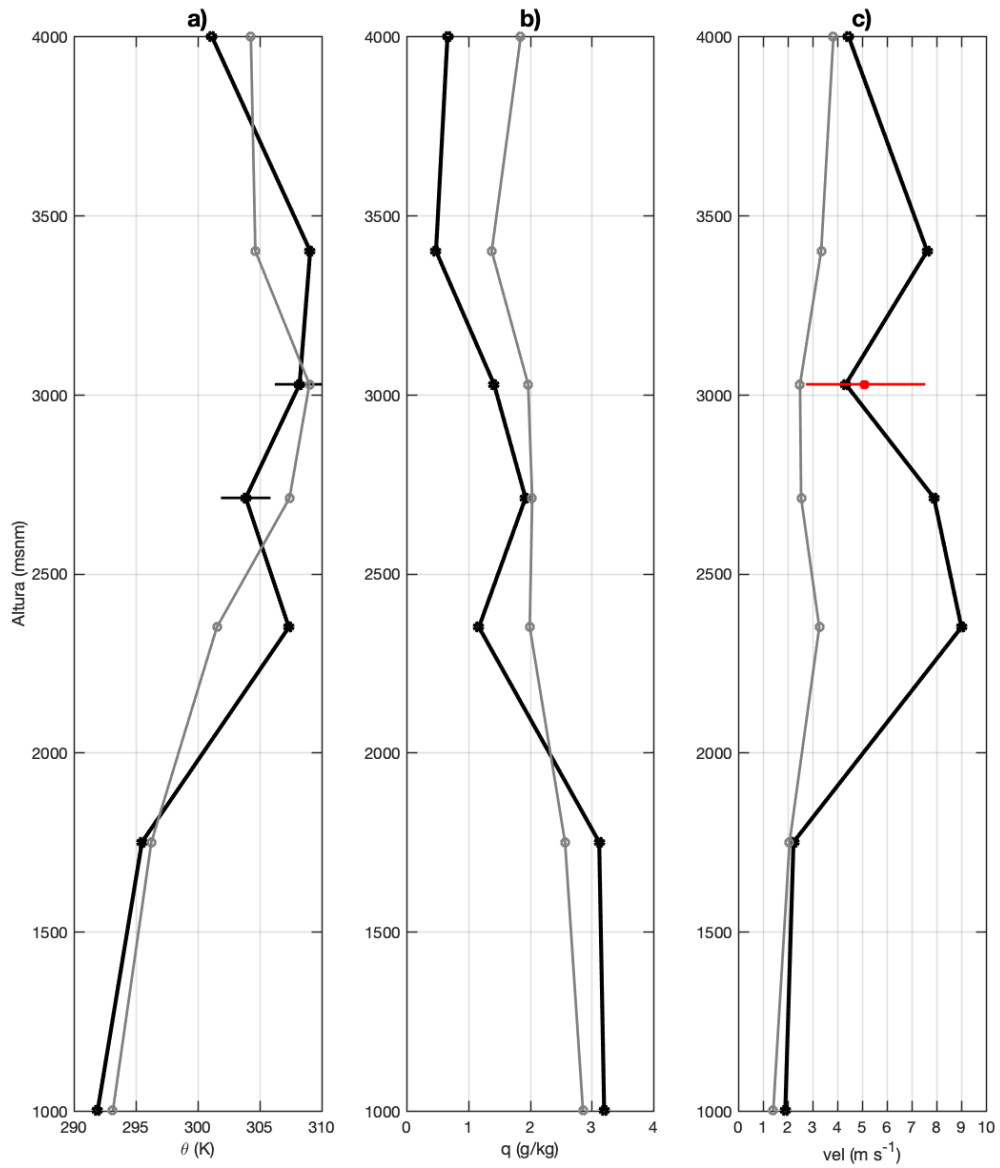


Figura 4.37: Perfil medio durante los CT en estudio en términos de anomalías para (a) temperatura potencial, (b) humedad específica y (c) magnitud del viento. Las líneas horizontales en (a) indican la incertidumbre en la medición de temperatura. La línea horizontal color rojo en (c) muestra el rango del 80 % de las mediciones de magnitud de viento LIDAR. Los perfiles en color gris representa el perfil promedio en el periodo nocturno (00-10 AM) de los días de no-Terral, para los meses junio y julio de 2015.

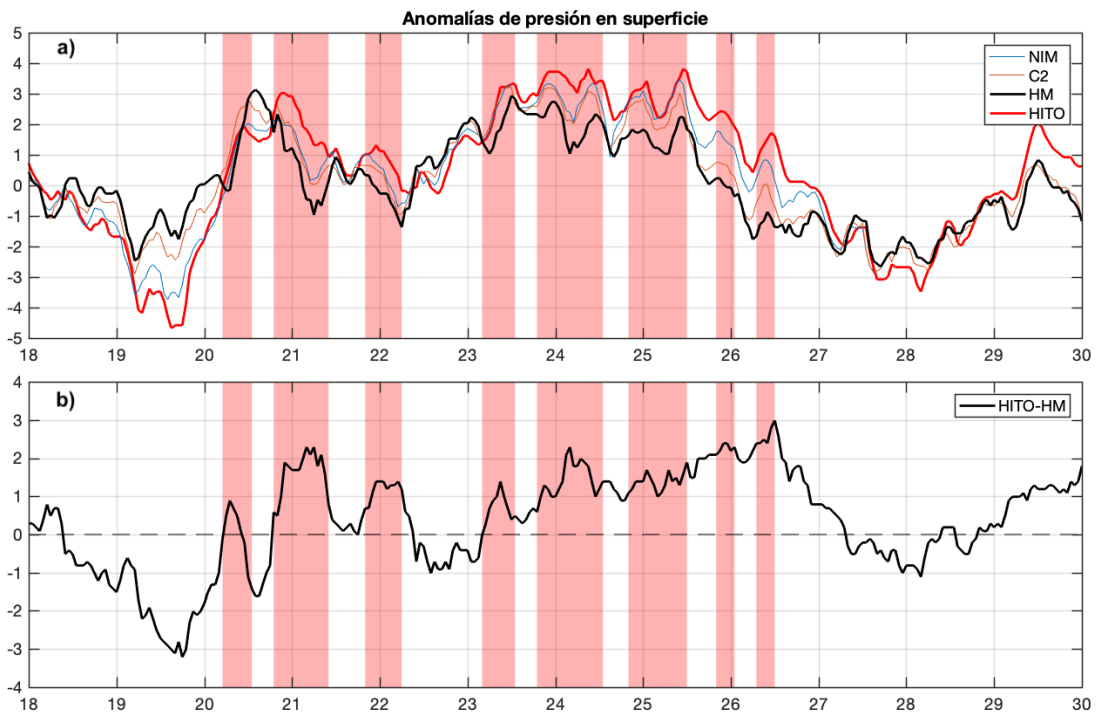


Figura 4.38: a) Serie de tiempo de anomalías de presión en superficie en estación HM (negro), C2 (naranja), NIM (azul) e Hito (rojo). b) Diferencias de anomalías de presión entre estación HITO y HM. Periodo 18 al 29 de julio de 2015.

Capítulo 5

Conclusiones

Como primera parte de este trabajo, se han estudiado climatológicamente las condiciones meteorológicas promedio en el interior del valle del Río Pelambres, específicamente en estación HM (2340 msnm). Este valle en términos generales presenta características de viento de valle-montaña típicos, con un destacado ciclo diurno y variación estacional, con direcciones de viento predominantes alineadas con la orientación del valle (45°). Durante la noche el viento valle abajo es en promedio de 4 ms^{-1} y durante el día el promedio es de 3 ms^{-1} . Los periodos de transición en la mañana y tarde ocurren entre las 07-09AM y 06-08PM HL, respectivamente. En invierno, el viento valle abajo alcanza intensidades de viento mucho más altas que el promedio, que varían entre 5 ms^{-1} y 14 ms^{-1} . Esta parte de la distribución es en la que se ha centrado la mayor parte de este trabajo, ya que representa al viento Terral.

El viento Terral del valle del Río Pelambres presenta características de viento intenso valle abajo que se manifiesta principalmente durante el periodo de invierno (mayo a septiembre), generalmente en horas de la noche y primeras horas de la mañana. La hora de inicio del CT, en general, puede ocurrir entre las 06 PM y 07 AM HL, sin una preferencia definida. Por otro lado, la hora de término de los eventos, mayormente ocurre entre las 08 AM y 11 AM HL, asociado principalmente a la fase de transición de la mañana del viento de valle-montaña. Los CT tienen una duración, en su mayoría, menor a 20 hrs, aunque existen casos extremos hasta 42 hrs. Su intensidad promedio, durante el CT, varía entre 5 y 12 ms^{-1} , con máximos promedios horarios de 15 ms^{-1} . Los inicios de los CT, en general, se caracterizan por un salto positivo (aumento) de temperatura, un salto negativo (disminución) de la humedad específica y un salto positivo de MP10. Este último asociado al transporte de MP10 desde la zona más alta del valle. Durante las horas posteriores al inicio del CT, las características que se dan al inicio en general se intensifican. Por último, al final de CT los saltos iniciales se invierten, con una disminución de MP10 y humedad específica. Para el caso de la temperatura al final del CT, dado que en general los finales ocurren durante las primeras horas de la mañana, cuando existe un calentamiento de la superficie, no existe una preferencia al aumento o disminución de la temperatura, por lo cual puede ser un aumento de la temperatura dado el calentamiento superficial, o una disminución por el salto negativo de viento. Un resumen de las características climatológicas del viento Terral es presentado en la tabla 5.1.

| Variable | Inicio | Durante | Final |
|----------------|-------------|-------------|-------------|
| T | ↑ | ↑↑ | ↑↓ |
| V _d | ↑ | ↑↑ | ↓ |
| q | ↓ | ↓↓ | ↑ |
| MP10 | ↑ | ↑↑ | ↓ |
| Horario | 06PM a 07AM | 06PM a 11AM | 08AM a 11AM |

Tabla 5.1: Tabla resumen de las características del viento Terral al inicio, durante y final de los CT en estación HM. Los símbolos ↓, ↑, ↑↓ representan un salto negativo, positivo y no preferente, respectivamente.

En cuanto a la manifestación del viento Terral en episodios, es decir, en su manifestación en noches consecutivas, se tienen que la mayor parte de los episodios tiene una duración menor o igual a 2 días (67%), aunque en menor frecuencia se han observado hasta 8 días consecutivos con CT. Se registran 2 episodios extremos en la climatología, con una duración de 11 y 15 días, respectivamente.

El caso de estudio, ocurrido entre el 20 y 26 de julio de 2015, revela algunas características adicionales a lo obtenido por medio del análisis climatológico. El caso de estudio corresponde a un episodio Terral de 7 días consecutivos, donde los CT que componen el ET tienen una duración entre 6 y 19 hrs. Las horas de inicio de los CT de este caso de estudio varían entre las 07PM y 07AM, mientras que el final de los CT ocurren entre las 06AM y 01PM. Lo anterior muestra que este caso de estudio está dentro de la climatología del viento Terral. En términos de gran escala, los primeros días del episodio se dan bajo condición sinóptica post-frontal y los últimos bajo una condición pre-frontal, donde ambas condiciones regionales producen la formación de la vaguada costera en Chile centro-norte. De acuerdo a los campos de anomalía de geopotencial en 1000 hpa, durante todo el episodio existió un gradiente zonal de presión en la región de la zona de estudio. Estos patrones sinópticos están de acuerdo a lo descrito por [Rutllant and Garreaud \(2004\)](#) y [Montes et al. \(2016\)](#) para el caso del viento Raco en el Cajón del Maipo y el viento Terral de Vicuña, respectivamente. Desde una perspectiva más local del viento Terral, en base a observaciones meteorológicas ubicadas valle arriba y valle abajo de la estación HM, se concluye que el viento Terral es un fenómeno muy localizado al interior del valle Pelambres, no observándose viento abajo de la estación HM. Viento arriba, se observa en 5 estaciones, la más alta a 3400 msnm, mientras que en la estación que se encuentra en la frontera con Argentina (4000 msnm), no se observa el Terral. De lo anterior, podemos determinar que el fenómeno se manifiesta al interior del valle en superficie, en un tramo no mayor a 10 km de longitud, entre los 2340 msnm y 3400 msnm. Regionalmente se observa una baja humedad durante los periodos en que se manifiesta el Terral en HM, la cual es una característica que se observa en todas las estaciones. El salto de temperatura es una característica notoria solo en HM, mientras que en las demás estaciones, tanto valle arriba como valle abajo, no parece evidente. Diferencias de anomalías de presión a lo largo del valle Pelambres son observadas en el caso de estudio, donde en los periodos en que se manifiesta el Terral hay una diferencia positiva entre estación HITO (4000 msnm) y estación HM (2340 msnm), mientras que durante los no-eventos esta relación se invierte. La estabilidad atmosférica, obtenida del pseudo-perfil de temperatura potencial derivada de las estaciones en superficie a distintas alturas, muestra que durante la manifestación del Terral existe un

perfil neutro a las alturas (o estaciones) donde se observa el viento Terral.

En comparación al Terral de Vicuña estudiado en el trabajo de [Montes et al. \(2016\)](#), se tiene que el Terral del valle del Río Pelambres es más intenso, aspecto que podría ser explicado por las diferencias en las características geográficas, dentro de las que se pueden destacar las siguientes:

- La estación usada para el estudio del Terral de Vicuña se encuentra a 620 msnm, mientras que la del valle Pelambres se encuentra a 2340 msnm.
- Vicuña se encuentra a 70 km aprox. de la frontera con Argentina, mientras que la estación HM del valle Pelambres se ubica a 12 km. Lo anterior como referencia de la altura máxima de los Andes.
- Vicuña está fuera de la Cordillera de los Andes, mientras que HM se encuentra ya en la zona cordillerana de los Andes.
- Vicuña se encuentra ubicado 200 km al norte del valle del Río Pelambres.
- El valle de Vicuña es mucho más extenso y abierto que el valle de Pelambres.

No obstante lo anterior, ambos fenómenos de Terral comparten la preferencia estacional de invierno, horarios de ocurrencia nocturnos y patrones sinópticos similares, aunque en el caso del Terral de Pelambres esta última conclusión viene solo desde el caso de estudio. El Terral de Vicuña es por definición mayor a $11^{\circ}C$, como una característica de eventos cálidos, sin embargo, el Terral de Pelambres, si bien se caracteriza por ser cálido durante la manifestación del viento Terral en comparación a la hora previa, la temperatura promedio durante el evento puede variar entre -4 y $20^{\circ}C$.

Capítulo 6

ANEXOS

6.1. Glosario

- V_d : Componente valle abajo del viento
- HT: Hora Terral
- CT: Caso Terral
- ET: Episodio Terral
- θ : Temperatura potencial
- VP: Valle Pelambres
- HM: Estación meteorológica de referencia al interior del VP

6.2. Saltos horarios climatológicos

Se define el salto a como cambia una variable en el tiempo, pudiendo ser este de valor positivo o negativo. Así, el salto horario representa la tendencia en una hora específica, calculada como la diferencia de la variable entre 1 hora después y 1 hora antes de la hora determinada. Por ejemplo, para el caso de la temperatura, el cálculo queda así:

$$\Delta T_h = T_{h+1} - T_{h-1}$$

De esta forma teniendo una serie de tiempo horaria, se puede determinar la tendencia horaria para cada instante de tiempo. Con esta nueva serie de tiempo de saltos horarios, se calcula el ciclo diario de las saltos horarios de temperatura, componente valle abajo del viento, humedad relativa y humedad específica, tal como se puede ver en la figura 6.1 para el periodo mayo a septiembre, entre los años 2010-2015. Valores positivos indican que hay un aumento de la variable y valores negativos indican que hay una disminución de la variable.

Para el caso de la temperatura, tal como se muestra en la figura 6.1a, se tiene que entre las 06 y 13HL hay un aumento de temperatura, con un peak a las 09 HL. En el caso de la temperatura es importante determinar cuál es el aumento de temperatura "normal" determinada por la climatología y el aumento de la temperatura asociado a otros factores, por ejemplo, al Terral. Así, para el inicio del un CT se puede comparar la tendencia horaria observada con la tendencia horaria climatológica, para así atribuir la diferencia de las tendencias al Terral.

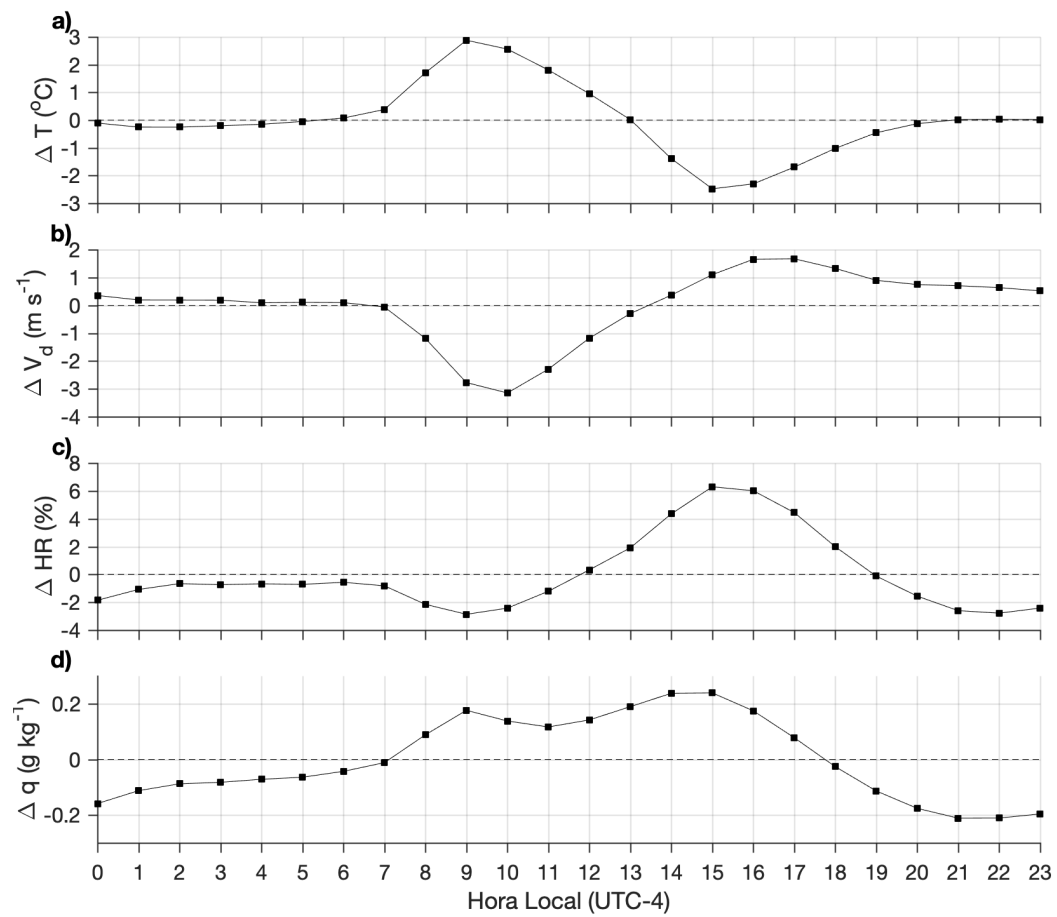


Figura 6.1: Tendencia horaria climatológica de invierno (mayo - septiembre) en estación HM

Bibliografía

- Barry, R. G. (2008). *Mountain Weather and Climate*. Cambridge University Press, 3 edition.
- Bischoff-Gauß, I., Kalthoff, N., Khodayar, S., Montecinos, S., and Melitta (2008). Model Simulations of the Boundary-Layer Evolution over an Arid Andes Valley.
- Brinkmann, W. A. R. (1971). What is a Foehn? *Weather*, 26(6):230–240.
- Chow, F. K., De Wekker, S. F., and Snyder, B. J., editors (2013). *Mountain Weather Research and Forecasting*. Springer Atmospheric Sciences. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Drechsel, S. and Mayr, G. J. (2008). Objective Forecasting of Foehn Winds for a Subgrid-Scale Alpine Valley. *Weather and Forecasting*, 23(2):205–218.
- Khodayar, S., Kalthoff, N., Fiebig-Wittmaack, M., and Kohler, M. (2007). Evolution of the atmospheric boundary-layer structure of an arid Andes Valley.
- Longley, R. W. (1967). The frequency of winter Chinooks in Alberta. *Atmosphere*, 5(4):4–16.
- Miltenberger, A. K., Reynolds, S., and Sprenger, M. (2016). Revisiting the latent heating contribution to foehn warming: Lagrangian analysis of two foehn events over the Swiss Alps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(698):2194–2204.
- Montecinos, A., Muñoz, R. C., Oviedo, S., Martínez, A., and Villagrán, V. (2017). Climatological Characterization of Puelche Winds down the Western Slope of the Extratropical Andes Mountains Using the NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(3):677–696.
- Montes, C., Rutllant, J. A., Aguirre, A., Bascuñán-Godoy, L., and Juliá, C. (2016). Terral de Vicuña, a Foehnlike Wind in Semiarid Northern Chile: Meteorological Aspects and Implications for the Fulfillment of Chill Requirements in Deciduous Fruit Trees. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(5):1183–1196.
- Muñoz, R. C. and Alcañuz, R. I. (2012). Variability of Urban Aerosols over Santiago, Chile: Comparison of Surface PM10 Concentrations and Remote Sensing with Ceilometer and Lidar. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(1):8–19.
- Plavcan, D., Mayr, G. J., and Zeileis, A. (2014). Automatic and Probabilistic Foehn Diagnosis with a Statistical Mixture Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,

53(3):652–659.

- Raphael, M. N. (2003). The Santa Ana Winds of California. *Earth Interactions*, 7(8):1–13.
- Rutllant, J. and Garreaud, R. (2004). Episodes of Strong Flow down the Western Slope of the Subtropical Andes. *Monthly Weather Review*, 132(2):611–622.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y.-T., Chuang, H.-y., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., and Becker, E. (2014). The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, 27(6):2185–2208.
- Tilmann, F., Zhang, Y., Moreno, M., Saul, J., Eckelmann, F., Palo, M., Deng, Z., Babeyko, A., Chen, K., Baez, J. C., Schurr, B., Wang, R., and Dahm, T. (2016). The 2015 Illapel earthquake, central Chile: A type case for a characteristic earthquake? *Geophysical Research Letters*, 43(2):574–583. 2015GL066963.
- Whiteman, C. (2000). *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. Oxford University Press.
- Wiegner, M., Madonna, F., Biniotoglou, I., Forkel, R., Gasteiger, J., Geiß, A., Pappalardo, G., Schäfer, K., and Thomas, W. (2014). What is the benefit of ceilometers for aerosol remote sensing? An answer from EARLINET. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(7):1979–1997.