



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

# CARACTERIZACIÓN DE VIENTOS PUELICHE EN EL VALLE DEL RÍO LAJA

TESIS PRESENTADA POR NATALIA CATALINA CARRERA ÁVILA  
PARA OBTENER EL GRADO DE GEOFÍSICA

2021

Departamento de Geofísica

---

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>14</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>15</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	15
1.1.1. Vientos diurnos de montaña . . . . .	15
1.1.2. Vientos forzados dinámicamente . . . . .	19
1.1.3. Fuertes flujos valle-abajo en Chile . . . . .	21
1.2. Objetivos . . . . .	27
1.2.1. Objetivos específicos . . . . .	27
<b>2. Zona de estudio y datos disponibles</b>	<b>28</b>
2.1. Terreno . . . . .	28
2.2. Climatología general . . . . .	29
2.2.1. Configuración típica de vientos Puelche . . . . .	32
2.3. Estaciones meteorológicas . . . . .	34
<b>3. Metodología</b>	<b>37</b>
3.1. Creación de base de datos . . . . .	37
3.2. Climatología . . . . .	40
3.2.1. Cálculo de radiación incidente . . . . .	40
3.3. Caracterización . . . . .	41
3.3.1. Definición de vientos Puelche . . . . .	41
3.3.2. Caracterización de eventos Puelche . . . . .	44
<b>4. Resultados</b>	<b>45</b>
4.1. Creación de base de datos . . . . .	45
4.1.1. Consolidación de archivos crudos . . . . .	45
4.1.2. Homogeneización . . . . .	48
4.1.3. Variables derivadas y coordenada temporal . . . . .	56

4.2. Climatología de la estación Antuco . . . . .	57
4.3. Caracterización de vientos Puelche . . . . .	64
4.3.1. Definición de Horas y Eventos Puelche . . . . .	65
4.3.2. Análisis de saltos iniciales y finales de EP . . . . .	76
4.3.3. Definición de episodios Puelche . . . . .	92
4.3.4. Ejemplos de EP de verano e invierno . . . . .	94
<b>5. Conclusión y discusiones</b>	<b>99</b>
<b>A.</b>	<b>105</b>
A.1. Glosario . . . . .	105
<b>B.</b>	<b>106</b>
B.1. Estaciones meteorológicas y base de datos . . . . .	106
B.1.1. Información complementaria sobre la red de estaciones . . . . .	106
B.1.2. Cambios en la dirección de vientos . . . . .	107
B.1.3. Estructura de bases de datos creadas . . . . .	114
<b>C.</b>	<b>115</b>
C.1. Alcance espacial a lo largo del valle . . . . .	115
C.1.1. Ejemplo de verano . . . . .	115
C.1.2. Ejemplo de invierno . . . . .	116
<b>Bibliografía</b>	<b>122</b>

---

# Índice de figuras

1.1. Esquema de fuerzas involucradas en el flujo de viento ( $\mathbf{V}$ ) anabático (a) y catabático (b), correspondiendo a los flujos de la fase diurna y nocturna, respectivamente. PGF corresponde a la fuerza de gradiente de presión. La temperatura de las columnas de aire encerradas en rectángulos determina su densidad $\rho$ . Imagen extraída de Barry (1992). . . . .	17
1.2. Esquema simple de la configuración de un flujo hidráulico en un canal, dirigiéndose de izquierda a derecha como indica la flecha. La configuración asimétrica del flujo es común en tormentas de viento pendiente-abajo y en vientos de paso montañoso. Figura extraída y modificada de Jackson et al. (2013). . . . .	20
1.3. Mapa contextual de la región de estudio. En ella se indica con flechas amarillas la latitud en que se desarrollan los vientos Terral y Raco. En el rectángulo morado se encierra la región donde se desarrollan vientos Puelche. En ella, se encuentra además un rectángulo rojo, que indica la ubicación de la zona de estudio, correspondiente al valle del río Laja. En gris claro se representan las alturas entre 2000 y 4000 m s.n.m.. En gris oscuro, aquellas entre 4000 y 6000 m s.n.m.. Figura modificada de (Montecinos et al., 2017). . . . .	22
2.1. Mapa topográfico de la zona alrededor al valle del río Laja. Los colores implican aumento de altura respecto del nivel del mar, avanzando desde el color azul hacia el amarillo. Las líneas de contornos se ubican cada 100 m s.n.m., desde los 100 m hasta los 900 m. Los contornos rellenos marcan las alturas desde los 1000 m hasta los 3000 m cada 250 m. Los puntos rojos indican la ubicación de las estaciones meteorológicas instaladas en la zona de estudio y las letras negras indican el código que denota a cada una. La estrella naranja marca la ubicación de la estación principal utilizada en este estudio. . . . .	29

2.2.	Promedio de largo plazo de precipitación (sombreado) en todos los paneles, vectores de viento a 925 hPa en (a) y (b) (flechas), y líneas de corriente a 300 hPa en (c) y (d) (curvas). Los paneles superiores ((a) y (c)) corresponden a promedios de enero y los inferiores ((b) y (d)) a julio. Figura extraída de <a href="#">Garreaud et al. (2009)</a> . . . . .	30
2.3.	Sección transversal de presión respecto a la latitud, del promedio de largo plazo de velocidad zonal, promediada entre los $80^{\circ} - 60^{\circ}\text{O}$ . Los contornos verdes corresponden a vientos del oeste y se muestran cada 5 m/s. Los contornos rojos se muestran cada 10 m/s y representan al viento del este. El área café denota la altura promedio de la cordillera de los Andes. El panel (a) corresponde a verano (diciembre, enero y febrero) y el panel (b) a invierno (junio, julio y agosto). Figura extraída de <a href="#">Garreaud (2009)</a> . . . . .	31
2.4.	Presión superficial (contornos negros), anomalía de la presión superficial (colores) y altura geopotencial a 500 hPa (contornos azules), de los compuestos de eventos Puelche de dos días de duración. Los paneles (a) y (d) corresponden al día previo, paneles (b) y (e) al día de inicio, y paneles (c) y (f) al día posterior. Los paneles superiores corresponden a los compuestos de verano (diciembre, enero y febrero) y los inferiores a invierno (junio, julio y agosto). Figura extraída de <a href="#">Montecinos et al. (2017)</a> . . . . .	33
2.5.	Cobertura temporal de los datos tomados cada 1 (líneas moradas) y cada 15 minutos (líneas celestes), según estación meteorológica (ordenada). . . . .	35
3.1.	Comparación de semejanza entre datos tomados con frecuencia de 15 minutos y 1 minuto (extraídos cada 15 minutos). La información corresponde a la estación ANT2. Cada panel muestra una de las principales variables meteorológicas incluidas en las bases de datos creadas. . . . .	38
3.2.	Comparación de promedios calculados a partir de los datos tomados con frecuencia de 15 minutos y 1 minuto. La información corresponde a la estación ANT2. Cada panel muestra una de las principales variables meteorológicas incluidas en las bases de datos creadas. . . . .	39
4.1.	Series de tiempo crudas de presión [hPa] en ANT1 ((a) y (b)) y ANT2 ((c) y (d)). Las curvas azules corresponden a datos tomados cada 1 minuto y las rojas a datos tomados cada 15 minutos. . . . .	48
4.2.	Comparación entre ANT1 (curva roja) y ANT2 (curva negra) durante el periodo de toma de datos coincidente entre ambas estaciones meteorológicas. En (a) se compara la humedad relativa [%] y en (b) la temperatura [°C]. . . . .	49

- 4.3. Comparación entre ANT1 y ANT2 durante el periodo de toma de datos coincidente entre ambas estaciones meteorológicas. En los paneles (a) y (b) se tienen diagramas de dispersión de  $U$  [m/s] respecto a  $V$  [m/s] para ANT1 y ANT2, respectivamente. (c) y (d) son como la figura 4.2 pero para  $U$  y  $V$ , respectivamente. 50
- 4.4. Contornos de promedios de humedad relativa [%] (cada 5%), temperatura [ $^{\circ}C$ ] (cada  $2^{\circ}C$ ) y presión [hPa] (cada 1 hPa) en el tiempo (panel (a), (b) y (c), respectivamente). La abscisa corresponde a años y la ordenada a horas en UTC. La línea roja vertical discontinua indica la fecha a partir de la cual los datos corresponden a ANT2. . . . . 51
- 4.5. Como figura 4.4, pero para la velocidad del viento [m/s] (contornos cada 0.5 m/s) y frecuencia de dirección del viento [%] (contornos cada 5%), correspondiente a los paneles (a) y (b), respectivamente. La línea horizontal roja en el panel (b) está alineada con la dirección del viento ( $90^{\circ}$ ) en la que se tiene la mayor frecuencia de vientos entre el 2018 y el 2020. . . . . 51
- 4.6. Diagramas de dispersión de la dirección del viento [ $^{\circ}$ ] respecto a la magnitud del mismo [m/s]. Los paneles (a), (b) y (c) corresponden a los periodos ANTa, ANTb y ANTc, sin manipular. Los paneles (d), (e) y (f) corresponden a los mismos periodos respectivamente pero arreglados de acuerdo a ANTc. Las líneas verticales se ubican como referencia de las direcciones de los máximos locales de magnitud del viento de ANTc. . . . . 53
- 4.7. Como la figura 4.3 pero para las componentes  $U$  y  $V$  del viento en ANT1 (ANTa) rotado en  $26^{\circ}$  y ANT2 (ANTb) rotado en  $350^{\circ}$ . . . . . 54
- 4.8. Como la figura 4.5, pero para el viento corregido de acuerdo al último periodo de toma de datos (entre 2018-2020). . . . . 55
- 4.9. Periodos de tiempo que el producto final de datos horarios arreglados de ANT cubre por año. . . . . 55
- 4.10. Serie de tiempo de la razón de mezcla  $q$  [g/kg], calculada a partir de los datos de presión y a partir del promedio de presión del periodo completo de toma de datos (paneles (a) y (b), respectivamente). El panel (c) muestra el diagrama de dispersión entre la razón de mezcla calculada por ambos métodos, donde aquella obtenida a partir de los datos de presión se encuentra en la abscisa y en la ordenada,  $q$  calculada a partir de la presión media. . . . . 56
- 4.11. Variación estacional del ciclo diario de radiación solar incidente [ $W/m^2$ ] en superficie, calculada para la ubicación de la estación meteorológica ANT, bajo condiciones de cielos despejados (e.g. Stull, 2016, p. 44). Los contornos se muestran cada  $100 W/m^2$ . . . . . 58

4.12. Variabilidad estacional del ciclo diurno de temperatura [ $^{\circ}C$ ] y presión atmosférica [hPa] (paneles (a) y (b), respectivamente). Los contornos de la temperatura se muestran cada $1,5^{\circ}C$ y los de presión, cada 1 hPa. Los tonos amarillos corresponden a valores altos y los azules a bajos. . . . .	59
4.13. Como figura 4.12 pero para la humedad relativa [%] y razón de mezcla [g/kg] en paneles (a) y (b), respectivamente. Los contornos de humedad se muestran cada 5% y los de q, cada 0.3 g/kg. . . . .	60
4.14. Climatología de la frecuencia de dirección del viento mensual [%] y velocidad del viento [m/s] en paneles (a) y (b), respectivamente. Los contornos de frecuencia son mostrados cada 3% y los de velocidad cada 0.5 m/s. . . . .	60
4.15. Como figura 4.12 pero para las componentes del viento U y V [m/s] en paneles (a) y (b), respectivamente. Ambos contornos se muestran cada 0.5 m/s. . . . .	62
4.16. Ciclo diurno de la distribución del promedio horario de frecuencia [%] de dirección del viento en verano (a), correspondiendo a los meses entre octubre y marzo, e invierno (b), el cual contiene los meses entre abril y septiembre. . . . .	64
4.17. Histograma de la distribución de la dirección del viento [ $^{\circ}$ ] en la estación ANT. . . . .	65
4.18. Como en 4.17, para los meses de octubre-marzo (verano) en (a) y los meses de abril-septiembre (invierno) en (b). Notar que el eje de las ordenadas muestra un rango distinto al de la figura 4.17. . . . .	65
4.19. Diagrama de dispersión en (a) y distribución de frecuencias en (b) de la dirección del viento [ $^{\circ}$ ] (abscisa) respecto a la velocidad del mismo [m/s] (ordenada). En el panel (b) los colores amarillos (azules) indican donde la mayor (menor) cantidad de datos se concentran. . . . .	66
4.20. Como el panel (b) de la figura 4.19, para los meses de octubre-marzo (verano) en (a) y los meses de abril-septiembre (invierno) en (b). Notar que el rango de frecuencias es distinto al de la figura 4.19. . . . .	67
4.21. Contornos de frecuencia mensual de dirección de vientos [ $^{\circ}$ ] por sobre 4 m/s durante todo el periodo de toma de datos (panel (a)). El panel (b) corresponde a la climatología del panel (a). El panel (c) muestra un acercamiento de (b) alrededor de los $90^{\circ}$ , entre los $45^{\circ}$ y $135^{\circ}$ . Los contornos se muestran desde el 1% en los 3 paneles. . . . .	68
4.22. Evolución temporal de la variable $V_p$ [m/s] durante el año 2019, donde se tienen los días en el eje de las abscisas y las horas en el eje de las ordenadas. Los tonos rojo oscuro indicarían la presencia de viento Puelche. Los vientos máximos alcanzan los 13 m/s, sin embargo la escala se saturó hasta los 10 m/s con el objetivo de que los eventos Puelche fueran notorios. . . . .	69

- 4.23. Distribución de la velocidad del viento proyectado en los  $95^\circ$  ( $V_p$ ). El panel (a) contiene los meses de verano y el (b) los de invierno. La abscisa corresponde a la velocidad y la ordenada a la cantidad de datos respecto a un total de 17976 datos en verano y 18133 en invierno. . . . . 70
- 4.24. Duración en días de los intervalos entre HP (abscisa), respecto a  $V_p$  [m/s] mínima dentro del intervalo (ordenada), en el panel (a). En (b) se tiene un acercamiento del panel (a) de las primeras 24 horas de duración. Las líneas segmentadas rojas delimitan los umbrales de  $V_p=1$  m/s y  $t=4$  horas. . . . . 71
- 4.25. Distribución de la cantidad [%] de HP respecto a la hora en la que se desarrollan. Las barras color naranja corresponden a eventos de verano y aquellas color morado a eventos de invierno. El porcentaje fue calculado respecto al total de cada hora con datos para verano e invierno dependiendo del caso. . . . . 72
- 4.26. Distribución de la duración en horas de los eventos de verano (barras naranjas) e invierno (barras moradas). La frecuencia se expresa en [%] y se calcula respecto al total de eventos de invierno y verano para cada caso. Un 5% de frecuencia equivale a 7 eventos para el verano y 13 para invierno. La barra más pequeña morada (ejemplo 18 h) y naranja (ejemplo 48 h) corresponden a un evento. . . . 73
- 4.27. Distribución de frecuencia [%] de eventos de acuerdo a su hora de inicio (barras celestes) y final (barras moradas). El panel (a) corresponde a eventos de verano y el panel (b) a eventos de invierno. Los porcentajes se calcularon respecto al total respectivo de eventos por estación, . . . . . 74
- 4.28. Diagrama de dispersión de la duración en horas de los eventos (abscisa), respecto del valor máximo de  $V_p$  [m/s] desarrollado en el mismo (ordenada). Los paneles (a) y (b) corresponden a eventos de verano e invierno respectivamente. . . . . 75
- 4.29. Saltos iniciales de temperatura [°] (ordenada) respecto a la hora de inicio (abscisa) del evento respectivo para verano (panel (a)) e invierno (panel (b)). La línea segmentada roja indica donde  $\Delta T_i$  es igual a cero. A los valores del eje x se les agregó un número aleatorio entre el 0 y 1 para visualizar mejor la información. . . 77
- 4.30. Igual que en la figura 4.29 pero para los saltos iniciales de  $\Delta q_i$ . . . . . 78
- 4.31. Igual que en la figura 4.34 pero para los saltos iniciales de  $V_p$ . . . . . 78
- 4.32. Diagrama de dispersión del valor de  $V_p$  de todas las horas Puelche, respecto a la hora del día a la que corresponde. En el panel (a) se tienen las horas Puelche encontradas en verano y en el panel (b) aquellas encontradas en invierno. . . . . 79
- 4.33. Diagrama de dispersión del salto inicial de temperatura [°] (abscisa) y salto inicial de razón de mezcla inicial [g/kg] (ordenada), para eventos de verano (a) y eventos de invierno (b). Las líneas segmentadas indican donde ambas variables valen cero. 80

4.34. Diagrama de dispersión del salto inicial de $V_p$ [m/s] (abscisa), respecto al salto inicial de la razón de mezcla [g/kg] (ordenada), para eventos de verano e invierno en los paneles (a) y (b), respectivamente. . . . .	80
4.35. Como en la figura 4.35, pero para el salto inicial de temperatura [°] en la ordenada. La línea segmentada indica donde $\Delta T$ es cero. . . . .	81
4.36. Como la figura 4.28, pero con el salto inicial de razón de mezcla [g/kg] en la abscisa. La línea segmentada roja indica donde $\Delta q$ es cero. . . . .	81
4.37. Como la figura 4.28, pero con el salto inicial de temperatura [°] en la abscisa. La línea segmentada roja indica donde $\Delta T$ es cero. . . . .	82
4.38. Como la figura 4.28, pero con el salto inicial de $V_p$ [m/s] en la abscisa. . . . .	83
4.39. Saltos finales de temperatura [°] (ordenada) respecto a la hora de término (abscisa) del evento respectivo para verano (panel (a)) e invierno (panel (b)). La línea segmentada roja indica donde $\Delta T_f$ es igual a cero. A los valores del eje x se les agregó un número aleatorio entre el 0 y 1 para visualizar mejor la información. . . . .	84
4.40. Como la figura 4.39, pero para los saltos finales de razón de mezcla [g/kg] en la ordenada. La línea segmentada roja indica donde $\Delta q_f$ es igual a cero. . . . .	85
4.41. Como la figura 4.39, pero para los saltos finales de $V_p$ [m/s] en la ordenada. . . . .	85
4.42. Relación entre saltos finales de $V_p$ y el valor que esta variable toma una vez finalizado el EP. La columna izquierda corresponde a los EP de verano y la derecha, a aquellos de invierno. Los paneles (a) y (b) muestra en el eje de las abscisas el valor de $V_p$ una hora después de finalizado el evento, los paneles (c) y (d) 2 horas después y los paneles (e) y (f) 3 horas más tarde. Valores negativos de $V_p$ corresponden a vientos valle-arriba. . . . .	87
4.43. Diagrama de dispersión del salto final de temperatura [°] (abscisa) y salto final de razón de mezcla [g/kg] (ordenada), para eventos de verano en el panel (a) y eventos de invierno en el panel (b). Las líneas segmentadas indican donde ambas variables valen cero. . . . .	88
4.44. Diagrama de dispersión del salto final de $V_p$ [m/s] (abscisa) y salto final de razón de mezcla [g/kg] (ordenada), para eventos de verano en el panel (a) y eventos de invierno en el panel (b). La línea segmentada indica donde $\Delta q_f = 0$ g/kg. . . . .	88
4.45. Como figura 4.44, pero para el salto final de temperatura [°C] en la ordenada. La línea segmentada indica donde $\Delta T_f = 0^\circ C$ . . . . .	89
4.46. Diagrama de dispersión entre el salto final de temperatura [°C] en la abscisa y $V_{pmax}$ [m/s] en la ordenada. La línea segmentada indica donde $\Delta T_f = 0^\circ C$ . . . . .	89
4.47. Como figura 4.46, pero para el salto final de q [g/kg] en la abscisa. La línea segmentada indica donde $\Delta q_f = 0$ g/kg. . . . .	90

4.48. Como figura 4.46, pero para el salto final de $V_p$ [m/s] en la abscisa. . . . .	90
4.49. Cantidad de horas Puelche entre las 00 y 11 HL respecto al total de días en verano (barras naranjas) o invierno (barras moradas) con datos en todo el intervalo escogido. . . . .	93
4.50. Distribución en porcentaje de la duración en días de los episodios Puelche para verano e invierno (barras naranjas y moradas respectivamente). . . . .	94
4.51. Serie de tiempo de un EP percibido en ANT en verano del año 2019. Los círculos se ubican cada una hora, donde el color magenta representa al EP y el color negro a condiciones sin EP. En (a) se tiene a $V_p$ [m/s], en (b) la temperatura [°C], y en (c) la razón de mezcla [g/kg]. La curva segmentada magenta (panel (a)) indica el umbral a partir del cual los vientos son considerados vientos Puelche. La curva naranja de cada panel corresponde al promedio del ciclo diurno de febrero del periodo entre el 2014 y el 2020, de la variable respectiva. El área gris representa un aproximado de horas nocturnas. . . . .	95
4.52. Serie de tiempo de un EP percibido en la estación ANT en invierno del año 2015. Los círculos marcan los datos horarios, donde el color celeste representa al EP y el color negro a condiciones sin EP. En (a) se tiene a $V_p$ [m/s], en (b) la temperatura [°C], y en (c) la razón de mezcla [g/kg]. La curva segmentada celeste (panel (a)) indica el umbral a partir del cual los vientos son considerados vientos Puelche. La curva naranja de cada panel corresponde al promedio del ciclo diurno de junio del periodo entre el 2014 y el 2020, de la variable respectiva. El área gris representa un aproximado de horas nocturnas. . . . .	98
B.1. Cobertura temporal de los datos de la base horaria creada de las 8 estaciones meteorológicas ubicadas en el valle del río Laja. Estas se muestran según su posición de este (VOL) a oeste (CHA). Los símbolos rojos indican el punto a partir del cual se observa un cambio en la dirección de los vientos. Para complementar la información, ver cuadro B.2. . . . .	108
B.2. Contornos de promedios mensuales de frecuencia [%] de dirección del viento en las estaciones VOL (a) y CON (b), obtenida con los datos horarios previos a la homogeneización de vientos. Las líneas rojas punteadas están alineadas con la dirección de máxima frecuencia del último periodo de toma de datos. Los contornos se muestran cada 7%. . . . .	110
B.3. Como la figura B.2, pero para las estaciones END (a) y ANT (b). . . . .	110
B.4. Como la figura B.2, pero para las estaciones RUC (a) y CAR (b). . . . .	111
B.5. Como la figura B.2, pero para las estaciones LEC (a) y CHA (b). . . . .	111

B.6. Como la figura B.2, pero para la dirección del viento homogeneizada según el último periodo de datos. . . . .	112
B.7. Como la figura B.6, pero para las estaciones END (a) y ANT (b). . . . .	112
B.8. Como la figura B.6, pero para las estaciones RUC (a) y CAR (b). . . . .	113
B.9. Como la figura B.6, pero para las estaciones LEC (a) y CHA (b). . . . .	113
C.1. Serie de tiempo de las condiciones en la estación CON durante un EP percibido en ANT en verano del año 2019. Los círculos se ubican cada una hora, donde el color magenta representa al EP, según la duración, inicio y final detectados en ANT. En (a) se tiene la magnitud del viento [m/s], en (b) su dirección [°], en (c) la temperatura [°C], y en (d) la razón de mezcla [g/kg]. La curva naranja de cada panel corresponde al promedio del ciclo diurno de febrero del periodo entre el 2014 y el 2020, de la variable respectiva. El área gris representa un aproximado de horas nocturnas. . . . .	117
C.2. Como la figura C.1, pero para las condiciones en la estación END. . . . .	118
C.3. Como la figura C.1, pero para las condiciones en la estación CAR. . . . .	118
C.4. Serie de tiempo de las condiciones en la estación CON durante un EP percibido en ANT en invierno del año 2018. Los círculos se ubican cada una hora, donde el color magenta representa al EP, según la duración, inicio y final detectados en ANT. En (a) se tiene la magnitud del viento [m/s], en (b) su dirección [°], en (c) la temperatura [°C], y en (d) la razón de mezcla [g/kg]. La curva naranja de cada panel corresponde al promedio del ciclo diurno de febrero del periodo entre el 2014 y el 2020, de la variable respectiva. El área gris representa un aproximado de horas nocturnas. . . . .	120
C.5. Como la figura C.4, pero para las condiciones en la estación END. . . . .	121
C.6. Como la figura C.5, pero para las condiciones en la estación CAR. . . . .	121

---

# Índice de cuadros

2.1.	Características de las estaciones meteorológicas instaladas en el Valle del río Laja.	35
2.2.	Posibles tipos de variables contenidas en los archivos de datos. . . . .	36
4.1.	Tipos de archivos de almacenamiento de datos de la red de estaciones meteorológicas del Valle del río Laja. La primera columna agrupa los tipos de archivos de acuerdo a la frecuencia de toma de datos. La segunda columna denota los distintos tipos con una letra, la tercera explica el formato de cada archivo. Las dos últimas columnas enlistan las variables contenidas, donde la penúltima corresponde a las variables meteorológicas y la última a otras variables. Ver cuadro 2.2 para conocer variable correspondiente a cada nombre abreviado. . . . .	46
4.2.	Periodos de tiempo de datos de ANT con distinta orientación de vientos. Se destaca que los periodos de traslape de ANT1 y ANT2 son contenidos por ANTa y ANTb, respectivamente. . . . .	52
4.3.	Fases de vientos diurnos de montaña reconocidos en el ciclo diurno de la componente zonal del viento U (figura 4.15). Las horas se expresan en HL. . . . .	72
4.4.	Porcentaje de resultados obtenidos con valores esperados para el inicio y final de los EP de verano e invierno. . . . .	91
4.5.	Indicadores asociados al ejemplo de evento de verano e invierno. $H_i$ y $H_f$ corresponden a las horas de inicio y final de cada EP. $Dur.$ corresponde a la duración en horas y en la columna que dice $EpP$ se indica la duración del episodio Puelche en días. El resto de variables son conocidas. . . . .	94
B.1.	Fechas de las visitas a terreno realizadas en el periodo de toma de datos, y las respectivas estaciones que fueron manipuladas. Con un signo de interrogación se denota la falta de información sobre que estaciones se visitaron. La primera fecha registrada corresponde a la instalación de la red de estaciones. Los símbolos indican las fechas con las cuales coinciden cambios en la dirección del viento de algunas estaciones. . . . .	107

B.2. Fechas a partir de las cuales se observa un cambio de la dirección del viento en cada estación meteorológica. ~ denota fechas que debieron ser aproximadas. Los símbolos se utilizaron para indicar aquellos cambios que sucedieron en la misma fecha. Además, las fechas que coinciden con visitas a terreno fueron marcadas con su símbolo correspondiente en el cuadro B.1. Las casillas moradas no poseen información, ya que las estaciones correspondientes poseen menos de 3 cambios en su periodo de toma de datos. . . . .	109
B.3. Ángulos de corrección aplicados al periodo previo al cambio de dirección de vientos en cada estación meteorológica. Las casillas moradas no poseen información, ya que las estaciones correspondientes poseen menos de 3 cambios en su periodo de toma de datos. . . . .	109
B.4. Estructura del archivo de datos crudos nombrado valleLaja_BDB.mat. . . . .	114
B.5. Estructura del archivo de datos crudos nombrada valleLaja_BDL.mat. . . . .	114

---

# Agradecimientos

Agradezco formalmente a los siguientes proyectos Fondecyt:  $N^\circ$  1170214, titulado “Mesoscale dynamics of Raco winds in Central Chile”, y  $N^\circ$  1131092, titulado “Downslope andean winds in southern-Central Chile”. Gracias a estos proyectos fue posible este trabajo.

Luego agradezco informalmente en primer lugar a mi familia, por el apoyo permanente que me han brindado. En segundo lugar, la paciencia que los profesores involucrados han tenido conmigo a lo largo de los años que tomó estar lista para finiquitar este proceso en mi vida. Claro, también agradezco a los amigos que hice en la Udec. Nunca en el colegio pensé que podría ser tan afortunada de conocer a gente tan linda. Y la verdad, aun pensando eso mientras estudiaba allá, me parece que no dimensioné la magnitud de lo afortunada que fui y soy.

Tengo que admitir que me negaba a escribir este párrafo, pero aquí voy. Gracias a las vickys bellas, una que me banca cuando los nervios o felicidad me desbordan. Otra que acompañó muchas tardes de niñxs de región, solxs en la metropoli de Conce. Bueno, ambas hacen ambas cosas... A mickey, quien me dio los insumos para comenzar a materializar el presente trabajo. A la feña, que cuando hablamos cada un año, se le nota que tiene fe en mí. Al amigo potro, quien debe estar escribiendo su propio párrafo en estos momentos. A la NaN y a más gente que en su momento fueron aporte en el proceso. Todos ustedes hicieron bello mi paso por esta carrera. También agradezco a los amigos hechos en Santiago, quienes están ahí siempre que necesito consejo y apoyo: Tomás y Jose. Al Álvaro y la Mary, con quienes compartimos las ñoñeses. Al perro, guille, mati y daniel: gracias por permitirme ser parte de su grupete tan bello. Son parte del combustible necesario para hacer andar la vida. En penúltimo e importantísimo lugar, agradezco a mi parejo, quien está siempre disponible cuando necesito apoyo, consejos y ser escuchada. Lo que me das es indescriptible!

Por último me agradezco a mí, por continuar luchando.

---

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes

La topografía tiene una importante incidencia en el flujo atmosférico, dando como resultado una gran variedad de fenómenos en distintas escalas temporales y espaciales. La influencia que las montañas tienen sobre el viento puede ser categorizada en dos tipos: flujos forzados por el terreno producto de la respuesta dinámica de la interacción entre la atmósfera y la topografía, y vientos diurnos de montaña, producidos por circulación generada debido a calentamiento diferenciado (Montecinos et al., 2017). Fuertes vientos ladera abajo producidos como respuesta dinámica han sido ampliamente estudiados en todo el mundo, donde también se han encontrado variados efectos negativos sobre la población, tales como destrozos debido a fuertes ráfagas, generación de eventos de intensa contaminación (Rutllant y Garreaud, 2004), eutrofización de lagos (Meruane, 2005), impactos sobre la agricultura (Montes et al., 2016), y levantamiento de polvo (Arriagada, 2019). Sin embargo, para realizar estudios de estos flujos, es importante poder distinguir a cuál categoría estos vientos pertenecen. A continuación, se hará una descripción de los vientos diurnos de montaña, para luego dar paso a una revisión de fuertes flujos ladera abajo en el mundo y el país.

#### 1.1.1. Vientos diurnos de montaña

Estos vientos se pueden desarrollar en todo tipo de tamaños de montañas, y se caracterizan por revertir su dirección dos veces al día. Durante el día se dirigen ladera o valle arriba y ladera o valle abajo durante la noche. Son producidos por el calentamiento diferenciado horizontal de una parcela de aire justo sobre la topografía elevada y otra parcela de aire a la misma altura, sobre el valle o planicie adyacente. El gradiente de temperatura resulta en un gradiente de presión que provoca que los vientos soplen desde la zona de mayor presión y menor temperatura, hacia la de

menor presión y mayor temperatura. Las circulaciones de los vientos mencionados son cerradas por flujos en altura (Whiteman, 2000, capítulo 11, figura 11.1). Según Whiteman, estos vientos se pueden diferenciar en distintos sistemas:

- Vientos de ladera
- Vientos de valle
- Vientos de montaña-planicie

Respecto a la nomenclatura, serán llamados vientos anabáticos y catabáticos los vientos ladera-arriba y ladera-abajo, respectivamente. Respecto a los vientos de valle, se seguirán citando como valle-arriba/abajo, según hacia donde se dirijan.

### Mecanismos de formación

El balance de energía superficial es afectado por cambios en la radiación neta, el flujo de calor en el suelo, la disponibilidad de humedad en el suelo y su influencia en la partición de energía entre los flujos de calor sensible y latente, por cambios en el tipo de suelo, cobertura de nubes, la incursión de vientos o episodios turbulentos, advección, entre otros (Zardi y Whiteman, 2013). Debido a esto, la explicación que se desarrollará a continuación se hará bajo el supuesto de condiciones atmosféricas ideales sobre un valle, es decir, cuando la atmósfera libre presenta vientos leves o moderados y sin tener en cuenta la posible presencia de nubes, nieve y/o climas extremos. De acuerdo con la explicación realizada por Whiteman en su libro de meteorología de montaña (capítulo 11.1), el mecanismo de formación de los vientos diurnos de ladera y valle se puede dividir en 4 fases, de forma que la explicación de su desarrollo sea más comprensible.

#### ▪ Fase de transición del atardecer

Inicia cuando la pérdida radiativa de onda larga supera a la ganancia radiativa de onda corta. La superficie del valle y laderas se enfría, invirtiendo así el gradiente de temperatura entre la superficie y el aire sobre ella, lo cual invierte también la dirección del flujo de calor sensible, dirigiéndose ahora desde la atmósfera hacia el suelo (Whiteman, 2000). El flujo de calor sensible está relacionado al calentamiento y enfriamiento de la atmósfera contigua a la superficie (Markowski y Richardson, 2011), razón por la que se genera una capa superficial de aire frío y estable sobre el suelo del valle y sus laderas. Luego, el aire sobre las laderas se encuentra más frío que el aire a la misma altura sobre el valle ( $T_1 < T_2$ , panel (b) de la figura 1.1). Este gradiente horizontal de temperatura genera un flujo de aire frío desde las laderas hacia el centro del valle, siguiendo el camino de máxima pendiente.

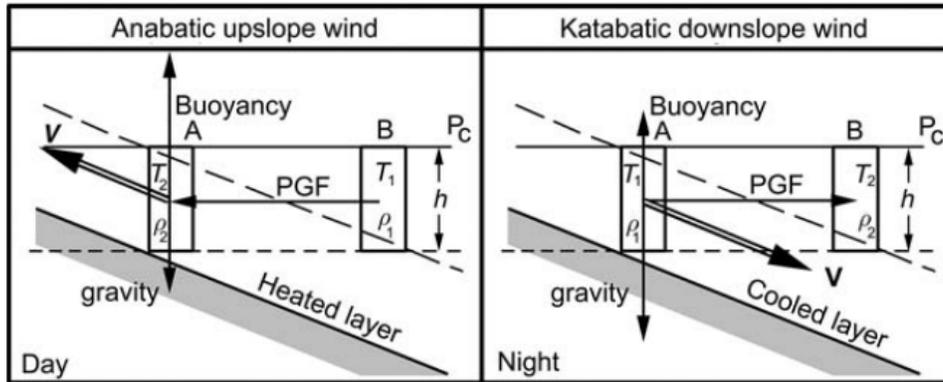


Figura 1.1: Esquema de fuerzas involucradas en el flujo de viento ( $V$ ) anabático (a) y catabático (b), correspondiendo a los flujos de la fase diurna y nocturna, respectivamente. PGF corresponde a la fuerza de gradiente de presión. La temperatura de las columnas de aire encerradas en rectángulos determina su densidad  $\rho$ . Imagen extraída de Barry (1992).

En la figura 1.1, panel (b), se observa un esquema de fuerzas involucradas en el flujo de viento catabático. La fuerza gradiente de presión horizontal se dirige desde la ladera hacia el centro del valle. Por otro lado, el peso extra de la capa estable, en relación con el aire circundante a la misma altura, provoca que la fuerza peso dirigida hacia abajo supere a la fuerza boyante (Barry, 1992). Por lo tanto, los vientos catabáticos en sentido estricto corresponden a flujos locales de gravedad que descienden por la pendiente, causados por un enfriamiento radiativo superficial bajo condiciones de cielos despejados (Barry, 1992). El aire frío transportado por estos flujos dirigidos hacia el centro del valle comienza a construir una capa de inversión térmica en él. Dentro de esta capa estable fluyen vientos valle-abajo debido al gradiente horizontal de temperatura entre el aire del valle y de la planicie contigua a este. A medida que los flujos de ladera transportan más y más aire frío, la capa estable se profundiza, junto al fortalecimiento de los vientos valle-abajo (Whiteman, 2000).

#### ■ Fase nocturna o período desacoplado

Esta fase inicia una vez que la capa de inversión térmica está completamente desarrollada y los vientos valle-abajo prevalecen dentro de ella. La atmósfera del valle se encuentra desacoplada del aire sobre él. Whiteman propone dos razones que provocarían esto. Por un lado, la capa estable suprime el intercambio vertical de aire con la atmósfera libre. Por otro, el valle en sí protege su atmósfera de vientos suaves a moderados que fluyen sobre él.

## ■ Fase de transición de la mañana

Poco después del amanecer, la ganancia de radiación de onda corta comienza a superar a la pérdida de radiación de onda larga. Es decir, se revierte el balance de energía superficial en el valle, y por lo tanto también la dirección del flujo turbulento de calor sensible. Como la superficie se encuentra ganando energía, su temperatura es mayor a la del aire justo sobre ella, por lo que el gradiente de temperatura apunta hacia la superficie, y la transferencia de calor sensible se lleva a cabo desde esta hacia la atmósfera, calentando así la atmósfera contigua al suelo. El aire sobre las laderas, ahora a mayor temperatura que el aire sobre el centro del valle, genera una fuerza de gradiente de presión con dirección hacia las laderas, como se observa en el esquema de la figura 1.1, panel (a). El flujo generado remueve el aire sobre la pendiente. La fuerza boyante inducida por el calentamiento en las laderas (Barry, 1992), supera a la fuerza peso, por lo que la suma de fuerzas da como resultado un flujo de aire ladera arriba que, a su vez, remueve aire del valle. Por otro lado, corrientes convectivas de aire provenientes del suelo calentado del valle y laderas se elevan y arrastran aire desde la base de la capa de inversión, erosionándola y creando una creciente capa límite convectiva (Whiteman, 2000). El remanente de la capa estable sobre el valle se hunde por continuidad a medida que el aire de su base es removido. Según Whiteman, esta subsidencia compensa el flujo anabático y genera un calentamiento, debido a compresión adiabática, que distribuye efectivamente en la atmósfera del valle la energía recibida por la superficie. Es el calentamiento el que finalmente revierte el gradiente de presión establecido en la noche entre el valle y la superficie adyacente, dando pie al inicio de los vientos valle-arriba.

## ■ Fase diurna o acoplada

Inicia cuando la capa estable ha sido completamente destruida y reemplazada por una capa límite convectiva. Durante esta fase, las corrientes turbulentas se desarrollan en todo el valle. Otro proceso responsable de las corrientes mencionadas correspondería a la producción de cizalle, ya que la turbulencia en valles es rara vez causada únicamente por convección (Weigel et al. (2007); De Franceschi et al. (2009)). Sin embargo, la máxima producción de cizalle no se produce en superficie, sino que en altura, lo cual sugiere que es más bien producido por la interacción del viento valle-arriba con el flujo de la atmósfera libre sobre él, más que por la fricción superficial (Zardi y Whiteman, 2013). Luego, esta interacción genera arrastre entre la atmósfera del valle y la atmósfera libre, acoplándose así ambas. La velocidad de los vientos valle-arriba suele ser máxima cerca del atardecer, cuando la capa límite convectiva alcanza su máxima profundidad (Whiteman, 2000).

### 1.1.2. Vientos forzados dinámicamente

Un flujo aproximándose a una barrera topográfica puede responder de diversas formas a la interacción mecánica entre ambos. Esta interacción depende de ciertas características que el flujo y la topografía posean. Son 3 los factores principales:

- Velocidad del flujo.
- Estabilidad del flujo.
- Características de la barrera topográfica.

De esta forma, el flujo puede pasar fácilmente por sobre la barrera si es inestable o posee una estabilidad neutra (Whiteman, 2000). Si el flujo es fuertemente estable, este puede ser bloqueado o forzado a través de pasos y valles. En el caso de la cordillera de los Andes (CA) como barrera topográfica, se tiene la presencia de varios de estos casos. Un ejemplo de esto es el chorro de vientos del norte ubicado al oeste de la CA, entre los 2000 y 5000 m s.n.m., como resultado del bloqueo mecánico generado por los Andes sobre el prevaleciente flujo del oeste de la tropósfera media (Garreaud, 2009). Kalthoff et al. (2002) calcularon el número de Froude ( $F$ ) del viento bloqueado por los Andes. El número de Froude permite dilucidar cómo responde un flujo al encontrarse con un obstáculo topográfico, y corresponde a la razón entre la fuerza de inercia y la fuerza boyante:

$$F = \frac{\pi U}{NH} \quad (1.1)$$

En la ecuación,  $U$  y  $H$  corresponden a la velocidad media del flujo y la altura de la barrera, respectivamente.  $N$  representa la frecuencia de Brunt-Väisälä, la cual da cuenta de la estabilidad del flujo aproximándose a la barrera topográfica. En el caso señalado, los autores obtuvieron un valor de  $F \approx 0.35$ , lo que significaría que el flujo no es capaz de pasar sobre la barrera, sino que probablemente es bloqueado por esta.

En regiones montañosas, fuertes gradientes de presión de escala sinóptica suelen ir acompañados por diversas respuestas de forzamiento dinámico de escalas más pequeñas, tales como vientos de pasos montañosos, ondas de montaña y saltos hidráulicos, entre otros (Wallace y Hobbs, 2006). Las respuestas mencionadas se han utilizado para explicar fuertes flujos descendentes por montañas alrededor del mundo, usualmente caracterizados como cálidos y secos. Este tipo de vientos han sido estudiados con mayor profundidad en los Alpes europeos y en la costa oeste de Estados Unidos, donde son llamados Foehn y Chinook, respectivamente (Brinkmann, 1971). Muchos de estos flujos son también caracterizados por ser vientos ladera abajo por la pendiente sotavento, es decir, son vientos que pasan por sobre la barrera montañosa, por lo que deben tener una baja estabilidad ( $N \downarrow$ ) o una gran inercia ( $U \uparrow$ ). Son denominados “tormentas de viento pendiente-abajo” en la literatura de meteorología de montaña. Algunos ingredientes

necesarios para estas tormentas incluyen barreras montañosas de gran tamaño, así como también fuertes flujos acercándose al tope de la barrera y una atmósfera estable, también en el tope (Jackson et al., 2013). Diversos estudios han sido realizados con la finalidad de desentrañar los mecanismos detrás de las mencionadas tormentas. Jackson et al. (2013) nos explican que estas corresponden a ondas de montaña (también llamadas ondas de gravedad) de gran amplitud que experimentan una transición hidráulica, desencadenando un flujo supercrítico ( $F > 1$ ) intenso en la ladera sotavento. Su dinámica principal es explicada como un análogo al flujo hidráulico de agua pasando por un obstáculo. Como se ve en el esquema simple de la figura 1.2, el flujo de aire realiza una transición de subcrítico ( $F < 1$ ) previo al obstáculo, a crítico ( $F=1$ ) sobre la montaña y supercrítico ( $F > 1$ ) en la pendiente de la misma. En esta fase, el flujo se vuelve rápido, lo cual conlleva a un salto hidráulico turbulento. Luego, al disipar energía cinética en el salto hidráulico, el flujo se vuelve subcrítico nuevamente.

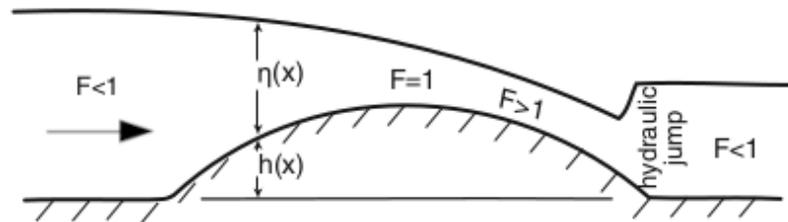


Figura 1.2: Esquema simple de la configuración de un flujo hidráulico en un canal, dirigiéndose de izquierda a derecha como indica la flecha. La configuración asimétrica del flujo es común en tormentas de viento pendiente-abajo y en vientos de paso montañoso. Figura extraída y modificada de Jackson et al. (2013).

Klemp y Durran (1987), utilizaron la modelación numérica para determinar si la teoría hidráulica era aplicable para explicar las tormentas de ladera sotavento, de lo cual obtuvieron resultados fundamentalmente similares a las tormentas observadas en las montañas Rocosas, ubicadas en Estados Unidos. También existen estudios que postulan la amplificación de ondas de gravedad propagándose verticalmente debido a interferencia constructiva al ser reflejadas por una capa crítica pre-existente (Klemp y Lilly, 1975), o por una capa crítica inducida por el rompimiento de ondas (Peltier y Clark, 1979).

Por otra parte, existe el desarrollo de tormentas pendiente-abajo que no se desarrollan ante el paso de un flujo por sobre la barrera topográfica, como sería el caso del viento Raco en Chile. La altura de la CA en la latitud de desarrollo de estos vientos ( $\sim 5$  km), no permite que los gradientes de presión generados por las configuraciones sinópticas desarrolladas durante los mismos, generen un flujo de vientos del este que cruce la cordillera. Es por esto que el reciente trabajo de Muñoz et al. (2020), postula la teoría de vientos de pasos montañosos (gap winds en inglés).

Los gap winds también son descritos exitosamente mediante la teoría hidráulica. La canalización de los vientos a través de constricciones dentro de canales, valles o pasos montañosos, son usualmente derivadas por gradientes de presión horizontales a lo largo de las mismas (Whiteman, 2000). Cuando esto sucede, el aire se acelera hacia la zona con menor presión. Si se asume conservación de masa del flujo que pasa a través del canal, la velocidad aumentaría cuando el canal experimenta una constricción. Una característica distintiva de la mayoría de estos flujos es la asimetría entre la región flujo-arriba y flujo-abajo del canal. En la porción flujo-arriba la capa que atraviesa el canal se mueve relativamente lento, correspondiendo a un flujo subcrítico. Al aproximarse a la zona de la constricción topográfica, el flujo se acelera y se vuelve supercrítico flujo-abajo del canal (Jackson et al., 2013). Algunos de los gap winds se desarrollan cuando hay fuertes vientos a mayor altura (chorros), bajo condiciones neutras o inestables, los cuales son canalizados por estos valles (Whiteman, 2000). A esto se le denomina “canalización forzada” en la teoría de vientos de montaña. De esta forma, es necesario el transporte de momentum desde el chorro en altura hacia abajo. Debido a que estos vientos requieren de inestabilidad, suelen ocurrir durante el día, alterando el ciclo diurno de vientos. Gap winds generados por gradientes de presión, también pueden alterar el ciclo diurno de vientos de montaña al ser derivados por configuraciones sinópticas, es decir, al poseer una escala temporal y espacial mayor al ciclo diurno.

### 1.1.3. Fuertes flujos valle-abajo en Chile

En Chile se ha documentado la existencia de fuertes vientos del este que descienden por la ladera oeste de la CA, los cuales reciben distintos nombres dependiendo de la región donde se desarrollan. Los principales corresponden al Terral ( $\sim 30^\circ\text{S}$ ), Raco ( $\sim 33^\circ\text{S}$ ) y Puelche ( $34^\circ - 40^\circ\text{S}$ ) (figura 1.3). Estos vientos en particular han sido estudiados durante los últimos años; inicialmente se puso especial énfasis en la configuración sinóptica bajo la cual se desarrollan, para luego enfocarse algunos estudios en describir las principales características de los eventos en sí. A continuación, se hará una revisión de los estudios realizados sobre estos vientos, con mayor énfasis en sus características.

#### Viento Raco

Los vientos Raco se desarrollan en el valle del río Maipo, ubicado al este de la ciudad de Santiago, entre los  $33^\circ\text{S} - 34^\circ\text{S}$ . Corresponden a un fenómeno de invierno, que se observa principalmente durante las noches, hasta las primeras horas de sol.

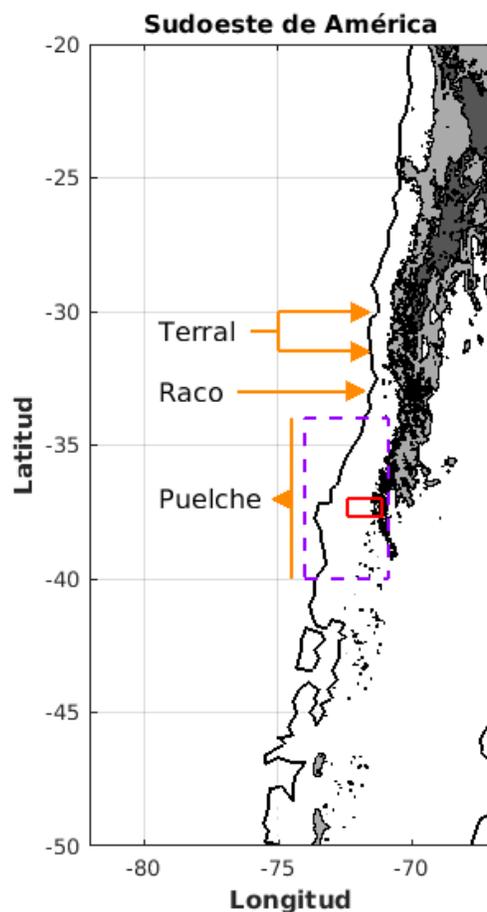


Figura 1.3: Mapa contextual de la región de estudio. En ella se indica con flechas amarillas la latitud en que se desarrollan los vientos Terral y Raco. En el rectángulo morado se encierra la región donde se desarrollan vientos Puelche. En ella, se encuentra además un rectángulo rojo, que indica la ubicación de la zona de estudio, correspondiente al valle del río Laja. En gris claro se representan las alturas entre 2000 y 4000 m s.n.m.. En gris oscuro, aquellas entre 4000 y 6000 m s.n.m.. Figura modificada de (Montecinos et al., 2017).

Rutllant y Garreaud (2004) caracterizaron la circulación media regional y de escala sinóptica de los eventos de este tipo. Definieron **vientos Raco** a partir de promedios horarios de velocidad del viento. El criterio utilizado fue que vientos en dirección valle-abajo superen el umbral de 5 m/s entre las 04-07 HL. Debido a que durante los meses de verano la intensidad de los vientos valle-abajo es muy baja, los autores definen los **episodios de Raco** como un día o más consecutivos de vientos Raco desarrollados en invierno. Se encontró que un 80% de los episodios encontrados duran entre 1 y 2 días, pudiendo el porcentaje restante alcanzar una duración de hasta 4 días. Además, obtuvieron una frecuencia de ocurrencia de 1 episodio por semana en invierno, aproximadamente. Por otra parte, al realizar compuestos de anomalías del

viento durante episodios Raco, encontraron que los vientos ladera-abajo se restringen entre el anochecer y la mañana, por lo que el ciclo diurno típico de flujos de montaña no se pierde. Respecto a la configuración sinóptica, análisis de compuestos revelaron que un 80 % de los eventos se desarrollaron bajo condiciones post-frontales, correspondiente a la presencia de una predorsal en altura y un anticiclón migratorio cruzando la CA en el sur de Chile. El 20 % restante se desarrollaron bajo situaciones pre-frontales. Ambas configuraciones suceden generalmente bajo vientos del oeste en altura. Por otro lado, se tiene que la transición de vientos del oeste a vientos del este ocurre por debajo de la cresta de la montaña, por lo que se descarta que los vientos Raco correspondan a un típico viento Foehn descendiente por la ladera sotavento. Finalmente, los autores debaten acerca de los forzantes dinámicos responsables del 80 % de los casos estudiados, donde concluyen que vientos del este superficiales y de escala regional en la zona costera y depresión intermedia, se desarrollarían como respuesta geostrófica al gradiente meridional de presión, desencadenando y sosteniendo por continuidad, vientos Raco en el cajón del río Maipo.

Un estudio más reciente, realizado por Muñoz et al. (2020), se enfoca en la climatología de los vientos Raco en invierno, además de la discusión acerca del mecanismo de formación de estos. Para ello, los autores se enfocaron en primer lugar en la estación meteorológica La Obra, ubicada poco antes de la salida del valle. Estudiaron los vientos proyectados sobre la dirección del flujo del este más intenso ( $\sim 57^\circ$ ), a lo cual denominaron VRACO. Definieron **horas Raco** como aquellas horas con  $VRACO \geq 4$  m/s. Luego definieron **eventos Raco** como la concatenación de horas Raco, si entre ellas se desarrollan menos de 3 horas no-Raco entre sí, o si en estas horas no-Raco la velocidad mínima es de 2 m/s. Los resultados mostraron que los eventos Raco tienden a iniciar durante la noche, sin una hora de preferencia, lo cual indica que no serían gatillados por el ciclo diurno de calentamiento y enfriamiento típico de los valles. Las horas de término se concentraron entre las 09 y 12 HL, lo que sugiere que los vientos diurnos valle arriba suprimen los vientos Raco de forma efectiva. Para estudiar la temperatura y humedad asociada a los inicios (finales), calcularon la diferencia entre la primera (última) hora del evento y el mínimo/máximo valor de las 3 horas previas (siguientes). Se encontraron magnitudes típicas de los saltos iniciales entre  $0-10^\circ\text{C}$  en el caso de la temperatura, y entre  $0-3$  g/kg para la humedad. Los resultados no indicaron relación entre los saltos iniciales de estas variables y la hora a la que se desarrollan. Respecto a los saltos finales, estos son menos fuertes que los iniciales. Al relacionar los saltos iniciales de temperatura y humedad, obtuvieron una correlación de  $\sim -0,57$ , sugiriendo que los vientos Raco corresponden a parcelas de aire que descienden desde mayores alturas, secas y potencialmente cálidas. Para estudiar la intensidad de los eventos, utilizaron como indicador la velocidad VRACO máxima desarrollada durante cada evento. Esta fue comparada con la duración de los mismos, encontrando que la mayoría dura

menos de 18 horas y presentan una correlación positiva con la intensidad, la cual está limitada hasta los  $\sim 8$  m/s. Por otra parte, no se encontró relación entre intensidad y saltos iniciales de temperatura y humedad. Respecto a la recurrencia de estos vientos, los autores encontraron que aproximadamente la mitad de los días del periodo estudiado desarrolla al menos una hora Raco durante la noche, y un 25 % de los días presenta más de 6 horas Raco entre las 01 y 12 HL. Definieron **episodios Raco** como aquellos días con más de 5 horas Raco en el intervalo de horas recién mencionado. Encontraron en promedio el desarrollo de entre 5 y 6 episodios por mes, los cuales duran típicamente entre 1 y 2 días, con un máximo de duración de 7 días. Por otra parte, los autores encontraron una relación directa entre la intensidad del viento Raco y el gradiente de presión a lo largo del valle, como también una preferencia de los eventos por ocurrir durante patrones de rápidas caídas de presión regionales y condiciones de cielos despejados. Además, mediante radiosondeos, notaron un chorro del este con una intensidad máxima de hasta 12 m/s. Los eventos Raco corresponderían, por lo tanto, al rápido descenso de este chorro hasta la superficie. Por último, Muñoz et al. (2020) especulan acerca del mecanismo que genera estos vientos intensos, teniendo en cuenta que en la estación ubicada dentro del valle no se observan vientos Raco con tanta frecuencia como en La Obra. Los autores se inclinan por un mecanismo de paso montañoso (gap winds), actuando similar al fenómeno de Foehn somero descrito en los Alpes por Armi y Mayr (2007). Este mecanismo estaría modulado por una constricción topográfica ubicada entre las estaciones cerca de la salida del valle (al oeste) y dentro del mismo (al este), controlando el descenso del chorro del este y la aceleración del flujo que sale del cajón.

## Viento Terral

Los vientos Terral se desarrollan en diversos valles de la zona norte del país, a diferencia del viento Raco, aunque no se ha determinado la extensión latitudinal específica de la ocurrencia de ellos. En la actualidad existen dos estudios realizados en distintos valles: valle del Elqui y el valle Pelambres. Se define como un viento que sopla preferentemente durante la noche y madrugada y ocurre principalmente durante los meses de invierno.

El viento Terral de Vicuña, ubicado a  $\sim 30^\circ\text{S}$  en el valle del Elqui, fue estudiado por Montes et al. (2016). El objetivo fue identificar si las cálidas temperaturas nocturnas durante invierno pueden ser dañinas para la agricultura local. Para esto utilizó promedios horarios de invierno, mediante los cuales definió en primer lugar **horas Terral**, para lo cual se debía cumplir con los siguientes criterios:  $0^\circ < W_d < 180^\circ$ ;  $W_s > 2$  m/s;  $T > 11^\circ\text{C}$ ;  $\text{RH} < 30\%$ . Luego definieron **días de Terral** como aquellos en que se desarrollan una o más horas seguidas de Terral, entre las 00 y 08 HL. Para estudiar la intensidad de los días Terral, se utilizó su duración. Se clasificaron en débiles (18 %), moderados (55 %) e intensos (27 %). Finalmente, se definieron **eventos de**

**Terral** como aquellos donde se desarrollan uno o más días de Terral consecutivos. Encontraron que un 6% de los eventos duran 3 días y un 76%, 1 día, lo cual, según el autor, se debería a que las perturbaciones sinópticas de latitudes medias ocasionalmente alcanzan estas latitudes, donde representan más bien un fenómeno corto transiente. Por otra parte, en la figura 3 de su trabajo se muestra el ciclo diurno medio de la dirección del viento para los días Terral de distintas intensidades. De ella se puede decir que durante eventos de Terral, los vientos diurnos ladera arriba no son anulados. Respecto a la configuración sinóptica, se encontró que un mayor porcentaje de eventos intensos (65%) se desarrollaron bajo la misma configuración dominante que se obtuvo para vientos Raco, esto es el paso de un anticiclón superficial por la CA, junto a la formación de una baja costera al norte de este.

El año 2019, [Arriagada](#) realizó su tesis para optar al grado de Magíster en Meteorología y Climatología, titulada “Caracterización observacional de eventos de Terral en el valle del río Pelambres”. Para esto, el autor utilizó la velocidad proyectada en la dirección de flujos del este más intensos ( $V_d$ ), similar a lo realizado por [Muñoz et al. \(2020\)](#). Definió **horas Terral**, como aquellas horas en que  $V_d$  supera los 5 m/s en invierno. Estas serán consideradas solo si se desarrollan un mínimo de 3 horas Terral consecutivas. Luego definió un **caso Terral** como el conjunto de horas Terral, con un máximo de 2 horas no-Terral entre sí. Por último, define como **episodio Terral** a todo el periodo de caso Terral que se desarrolle en noches consecutivas. A partir de esto, encontró que un 8% del total de horas comprendidas en el periodo estudiado, corresponden a horas Terral, desarrollándose el 91% de estas entre las 20 y 10 HL. Además, el autor obtuvo una duración típica menor a 21 horas. En cambio, un 61% de los episodios Terral duran entre 1 y 2 días, aunque existen casos extremos con duraciones de hasta 15 días. Respecto a las horas de inicio y finalización de casos Terral, tienden a iniciar en la noche y madrugada, con una frecuencia relativamente mayor de inicios entre las 18 y 01 HL. Las horas típicas en que los casos tienden a finalizar, son entre las 08 y 11 HL, lo cual coincide con el cambio de dirección de los vientos diurnos de montaña. De esta forma, al igual que los vientos Raco, aparentemente, suelen disiparse ante el inicio del calentamiento radiativo. Por otro lado, los saltos iniciales (finales) de temperatura, humedad y  $V_d$ , se calcularon como la diferencia entre la primera (última) hora y el valor previo (posterior). En el caso de la temperatura, el cálculo se realizó para la anomalía, obtenida a partir de la tendencia horaria climatológica (para mayores detalles respecto a esta variable, revisar [Arriagada \(2019\)](#), p. 65). Se encontraron relaciones esperadas entre todas las variables, es decir, saltos iniciales positivos de temperatura con saltos negativos de humedad y positivos de  $V_d$ . Sin embargo, estas relaciones no son lineales. Sobre los saltos finales, hay una asociación entre saltos intensos de disminución de la temperatura con el aumento de la humedad. Además se encontró una relación entre los saltos negativos de velocidad y el aumento de la humedad.

## Viento Puelche

Vientos intensos que bajan por la ladera oeste de la zona centro-sur de la CA ocurren durante todo el año, y son denominados vientos Puelche. Este fenómeno, en particular, no se asocia a valles específicos, sino que comprende un dominio de 600 km de extensión latitudinal (ver figura 1.3).

Montecinos et al. (2017) realizó una caracterización climatológica de este fenómeno basándose en datos diarios de 36 años del reanálisis CFSR-NCEP. Los autores adaptaron la metodología utilizada por Plavcan et al. (2014) para definir **vientos Puelche**. Se basaron en la componente zonal del viento y en la diferencia de la temperatura potencial entre dos estaciones ubicadas en el valle del río Laja. Consiste en analizar la diferencia de  $\theta$  de una estación ubicada valle-arriba menos otra estación ubicada valle-abajo. Las diferencias de temperatura potencial deben ser negativas o cercanas a cero para el caso de un viento tipo Foehn (Plavcan et al., 2014, figura 1), es decir, presentar condiciones de inestabilidad. Escogieron el umbral de viento como el valor de  $U$  en que las distribuciones condicionadas de  $\Delta\theta$  se centraba en cero. Para  $\Delta\theta$  utilizaron un umbral de 1 K, de tal forma que se filtren los eventos con estabilidad significativa. Según este método, obtuvieron en promedio un evento por mes con duración de un día ( $\sim 67\%$ ), dos días ( $\sim 22\%$ ), tres días ( $\sim 10\%$ ) y cuatro días ( $\sim 1\%$ ). Además realizaron un análisis de compuestos para eventos de dos días de duración, a partir de lo cual encontraron, para todas las estaciones del año, una configuración sinóptica similar entre sí. Esta corresponde a la misma configuración predominante obtenida para los eventos de Raco y Terral. Por otra parte, los autores observaron vientos con componente del este no solo en la ladera oeste, sino que también en la cima y ladera este de la CA. A partir de esto, describen los posibles forzantes que desencadenan la ocurrencia de Puelches. Debido a que observaron la misma configuración sinóptica que para los vientos Raco, consideraron los gradientes de presión meridional y zonal en la región. Los autores calcularon la correlación entre ambos gradientes y la componente zonal del viento, obteniendo un valor de  $\sim 0,7$  con el gradiente meridional y de  $\sim -0,7$  con el gradiente zonal, en la zona de desarrollo de vientos Puelche. De esta forma, concluyen que para este fenómeno ambos gradientes de presión pueden ser forzantes. Debido a la baja altura de la CA a estas latitudes y al desarrollo de vientos con componente del este, se tendría que los fuertes flujos ladera abajo se establecen desde el este de la cordillera. Es decir, los vientos Puelche corresponderían a un flujo que cruza la CA desde Argentina, a diferencia de los vientos Terral y Puelche. Respecto a las condiciones de temperatura y humedad durante eventos de viento Puelche, la subsidencia de escala sinóptica debido a la presencia de una predorsal en altura explicaría, según los autores, el patrón regional de calentamientos y secamiento de la atmósfera libre sobre la zona centro-sur de Chile. Por otra parte, el calentamiento se extiende lejos de donde el viento Puelche es observado.

Esto es explicado debido a los cielos despejados y una atmósfera más seca, lo cual permitiría un aumento de la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre.

Otros estudios realizados sobre vientos Puelche corresponden a Paredes (2016) y Beusch et al. (2018). En esta revisión no se profundizará en estos estudios, ya que se basan en eventos particulares de la estación de verano. El primero realiza un análisis de 3 eventos de vientos Puelche en el valle del río Laja. Para esto utilizó datos observados y realizó una simulación en el modelo atmosférico WRF (Weather Research and Forecasting). El segundo se enfoca en el estudio de la dinámica detrás de un evento ocurrido en marzo, utilizando datos del reanálisis ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), además de realizar una simulación con el modelo de predicción atmosférica COSMO (Consortium for Small-scale Modeling).

## 1.2. Objetivos

En la sección anterior se realizó una revisión de los estudios realizados en Chile sobre los principales vientos fuertes valle-abajo por la ladera oeste de la CA. Respecto al viento Puelche, se tiene que solo el estudio realizado por Montecinos et al. (2017) realiza una caracterización de estos. Sin embargo, para este estudio se utilizaron datos diarios de un reanálisis. La poca resolución temporal de estos datos no permite realizar una caracterización exhaustiva de las principales cualidades de estos vientos. Es debido a esto que el objetivo principal de esta tesis, es caracterizar los vientos Puelche desarrollados en el valle del río Laja, respecto a características tales como duración, intensidad, frecuencia, saltos iniciales y finales de temperatura, humedad y velocidad, entre otros.

### 1.2.1. Objetivos específicos

- Recuperar los datos disponibles de las estaciones meteorológicas en el valle del río Laja.
- Crear una base de datos tanto cruda como horaria de los datos recuperados.
- Realizar una caracterización climatológica del valle del río Laja.
- Identificar principales características de los vientos Puelche de verano e invierno, en la estación Antuco, y compararlas.
- Comparar eventos y episodios de Puelche con aquellos de Raco y Terral.

---

# Capítulo 2

## Zona de estudio y datos disponibles

### 2.1. Terreno

El valle del río Laja es un valle relativamente zonal, ubicado en la ladera oeste de la cordillera de los Andes alrededor de los  $37,3^{\circ}S$  (figura 2.1). En términos de divisiones administrativas, el valle se ubica en la región del Bio Bio, Chile, zona donde la altura media de la cordillera es de 2000 m s.n.m.. Entendiéndose un valle como una depresión entre topografía elevada, su largo estimado desde la ubicación de la estación meteorológica CON (ver sección 2.3) es de  $\sim 35$  km. Respecto a la topografía circundante a esta depresión, sus alturas máximas se suelen encontrar entre los 1500-2000 m s.n.m.. Dos cimas ubicadas al final del valle superan estos rangos, correspondiendo al volcán Antuco, con  $\sim 2800$  m de altura y a la Sierra Velluda, con una elevación aproximada de 3100 m, ambos respecto al nivel del mar. A partir de los pies del volcán Antuco, nace el valle del río Laja. En este punto, el fondo del valle se encuentra a  $\sim 1000$  m s.n.m.. A medida que se avanza hacia la salida, este presenta una leve orientación SE-NO y se ensancha de a poco. En esa dirección, a unos 10 km de CON, se encuentra un valle aledaño en la ladera norte del valle principal, con una dirección SO-NE. Justo a la salida del mismo, se encuentra la estación END. Poco antes de este valle aledaño, el ancho del valle principal llega a ser de  $\sim 2$  km, zona que posee una altura aproximada de 700 m s.n.m.. Luego del punto de encuentro entre ambos valles, el principal alcanza una ancho de casi 6 km, además de tomar una dirección más zonal que la primera porción del mismo. Previo a la estación ANT, el valle se enangosta levemente, para luego ensancharse de nuevo a la salida del mismo, alcanzando nuevamente un ancho de alrededor de 6 km. La última porción del valle se encuentra a una elevación de  $\sim 500$  m s.n.m..

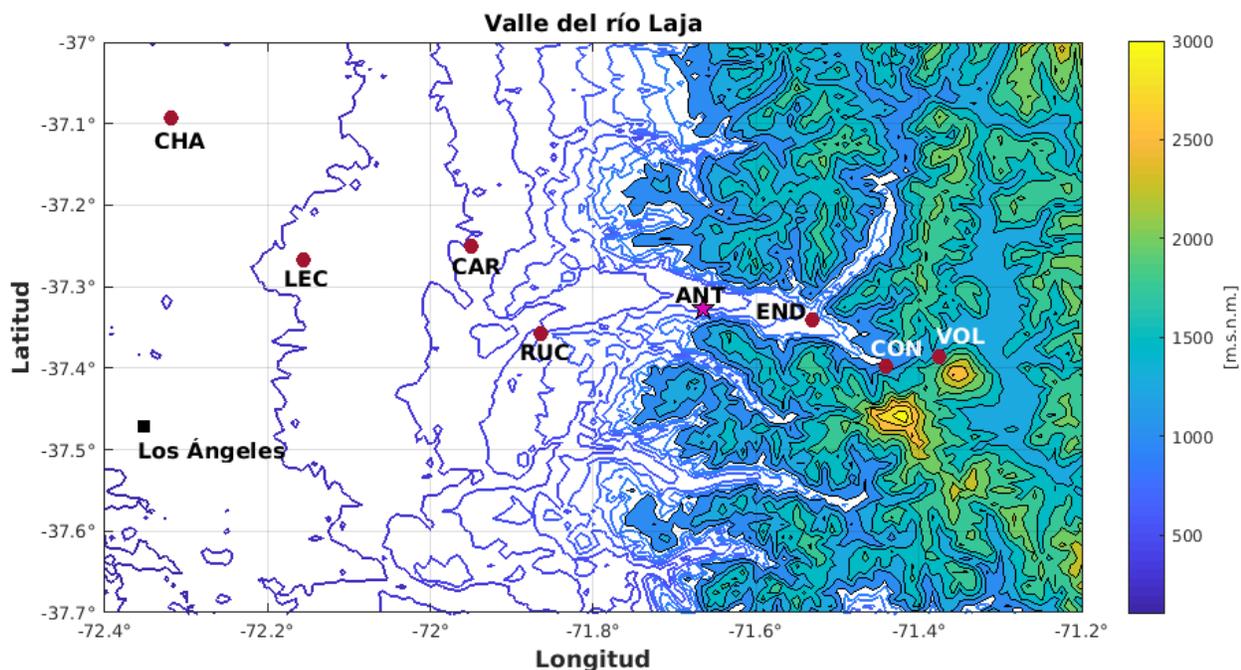


Figura 2.1: Mapa topográfico de la zona alrededor al valle del río Laja. Los colores implican aumento de altura respecto del nivel del mar, avanzando desde el color azul hacia el amarillo. Las líneas de contornos se ubican cada 100 m s.n.m., desde los 100 m hasta los 900 m. Los contornos rellenos marcan las alturas desde los 1000 m hasta los 3000 m cada 250 m. Los puntos rojos indican la ubicación de las estaciones meteorológicas instaladas en la zona de estudio y las letras negras indican el código que denota a cada una. La estrella naranja marca la ubicación de la estación principal utilizada en este estudio.

## 2.2. Climatología general

Chile es un extenso y delgado país ubicado entre los 17°S y 56°S de la zona occidental de América del Sur. Su topografía cuenta con una depresión intermedia ubicada entre montañas costeras al oeste y la Cordillera de los Andes (CA) al este. Esta última corresponde a una barrera topográfica que juega un importante rol como obstáculo para el flujo troposférico, separando condiciones áridas al oeste y húmedas al este sobre los 30°S, condiciones que se invierten al sur de esta latitud. Su altura disminuye de norte a sur con un valor medio que supera los 4 km al norte de los 35°S, y valores máximos de hasta 6 km, sin pasos de alturas menores a los 3 km. Al sur, la altura media de la CA disminuye a 4 km, e incluso a aproximadamente 2 km de altura a los 37°S.

Con el fin de describir el flujo medio cercano a la superficie y en altura, se adjunta la figura 2.2 tomada de Garreaud et al. (2009), donde se muestra la media de largo plazo de precipitación, vientos a 925 hPa y líneas de corriente a 300 hPa. Las estaciones de verano e invierno son repre-

sentadas en la figura por enero y julio respectivamente. En (a) y (b) se observa el denominado anticiclón del Pacífico sur, el cual se centra a aproximadamente  $95^{\circ}\text{O}$ . Su posición latitudinal varía estacionalmente, centrándose alrededor de los  $35^{\circ}\text{S}$  en verano y de los  $27^{\circ}\text{S}$  en invierno (Rahn y Garreaud, 2014). Luego, la fuerte subsidencia de gran escala generada por este anticiclón de bajo nivel, actuando en conjunto con factores regionales, corresponde a la explicación primordial de las condiciones desérticas entre los  $5^{\circ}\text{S}$  y  $\sim 30^{\circ}\text{S}$  (Garreaud et al., 2009).

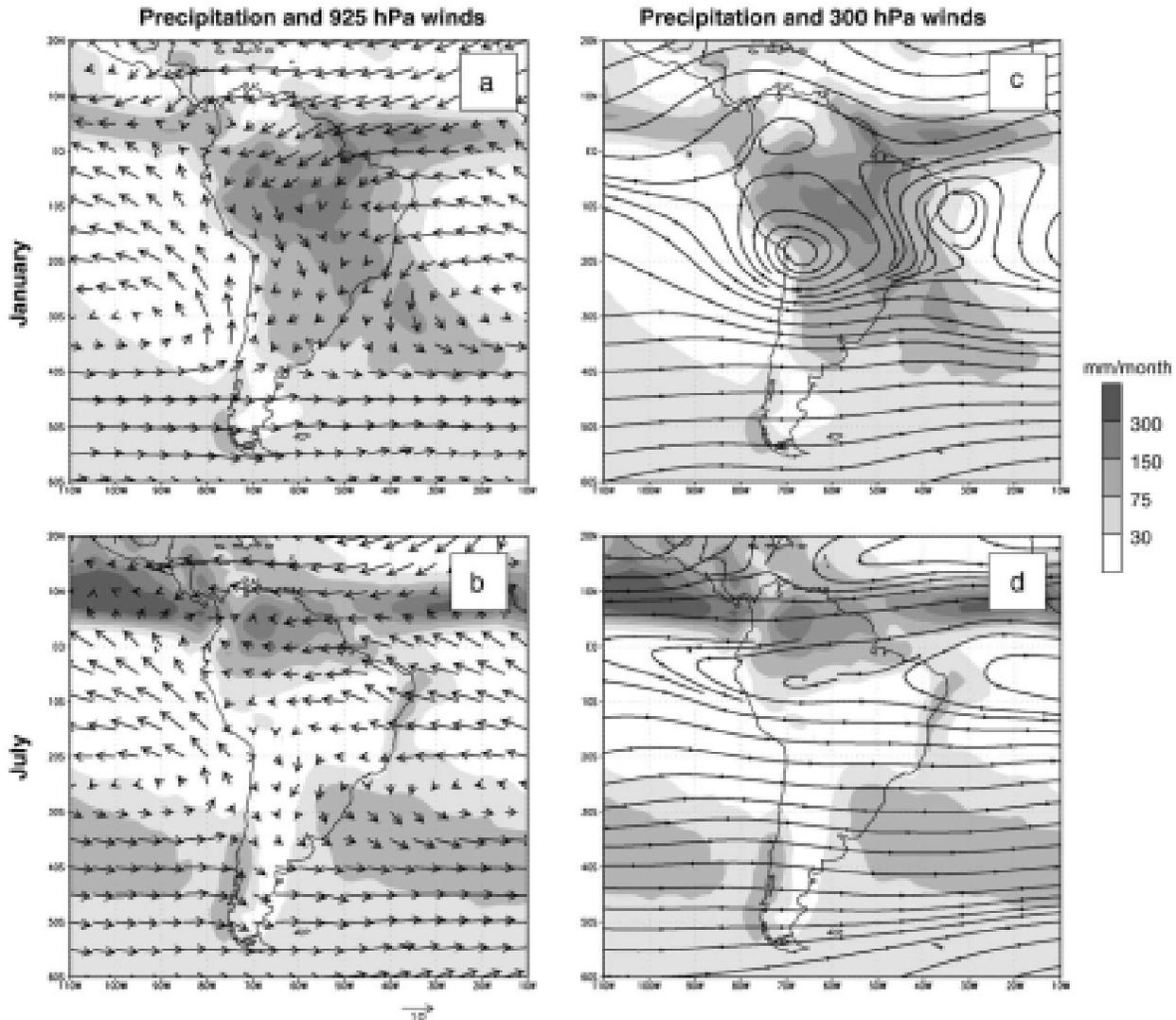


Figura 2.2: Promedio de largo plazo de precipitación (sombreado) en todos los paneles, vectores de viento a 925 hPa en (a) y (b) (flechas), y líneas de corriente a 300 hPa en (c) y (d) (curvas). Los paneles superiores ((a) y (c)) corresponden a promedios de enero y los inferiores ((b) y (d)) a julio. Figura extraída de Garreaud et al. (2009).

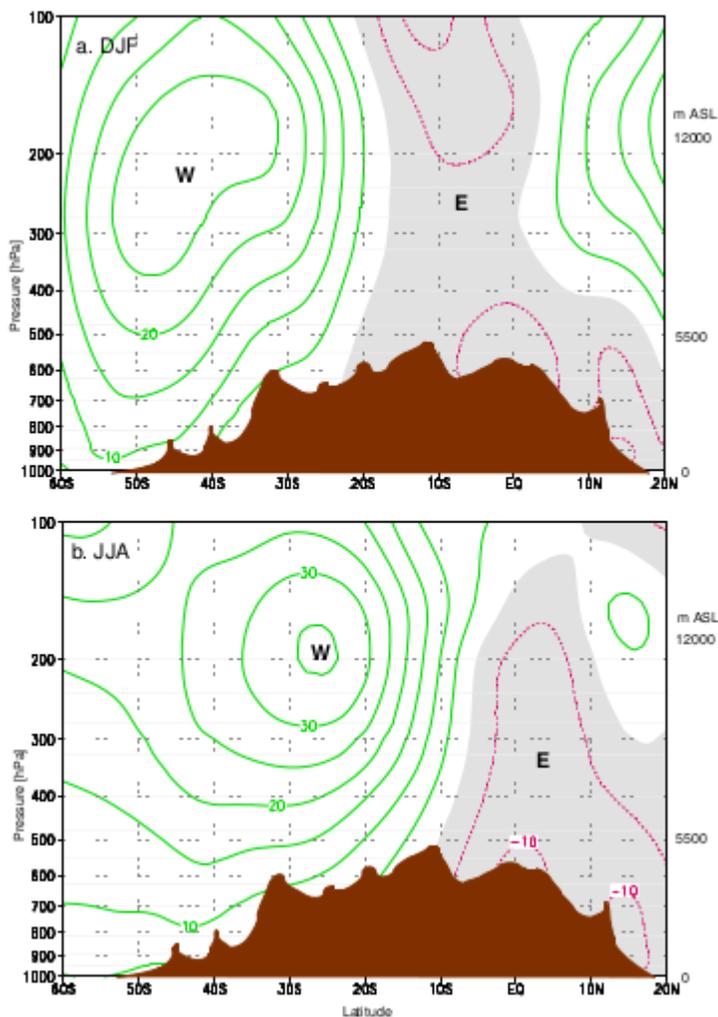


Figura 2.3: Sección transversal de presión respecto a la latitud, del promedio de largo plazo de velocidad zonal, promediada entre los  $80^{\circ} - 60^{\circ}\text{O}$ . Los contornos verdes corresponden a vientos del oeste y se muestran cada 5 m/s. Los contornos rojos se muestran cada 10 m/s y representan al viento del este. El área café denota la altura promedio de la cordillera de los Andes. El panel (a) corresponde a verano (diciembre, enero y febrero) y el panel (b) a invierno (junio, julio y agosto). Figura extraída de Garreaud (2009).

Al sur de los  $30^{\circ}\text{S}$  se identifica una banda de precipitación sobre Chile, la cual se debe a sistemas frontales asociados a ciclones migratorios superficiales. A la precipitación frontal se le suma la precipitación orográfica debido al ascenso de vientos de bajo nivel sobre la ladera oeste de la CA. Estas perturbaciones de escala sinóptica (ciclones y anticiclones migratorios) viajan junto al flujo del oeste por dos “caminos preferentes” de ondas baroclínicas, denominados corredor de tormentas: uno alineado con el chorro subpolar ( $\sim 60^{\circ}\text{S}$ ), y el otro con el chorro subtropical ( $30^{\circ}\text{S}-45^{\circ}\text{S}$ ) que cruza los Andes (Garreaud y Aceituno, 2007). Sin embargo, las perturbaciones

mencionadas no se aprecian en la figura 2.2, debido a que en medias estacionales no se refleja la alta variabilidad diaria del viento y presión. En cambio, se observa cómo al sur de los 40°S prevalece un flujo del oeste en niveles bajos (paneles (a) y (b)) a lo largo de todo el año. Estos vientos del oeste de latitudes medias se extienden a través de toda la tropósfera (paneles (c) y (d)), alcanzando máximas velocidades en la tropósfera alta (Garreaud et al., 2009). Esto también se puede observar en la figura 2.3 tomada de Garreaud (2009), donde se tiene la sección transversal del promedio de largo plazo del viento zonal. En ella se observa el chorro subtropical centrado alrededor de los 200 hPa, y parte del chorro subpolar (panel inferior) en la esquina superior izquierda. El flujo del oeste se extiende desde el sur hasta los 10°S en invierno, mientras que en verano éste se ve restringido hasta aproximadamente los 21°S debido al fortalecimiento de la denominada Alta de Bolivia en altura, cuyo centro se encuentra a 17°S – 70°O (Garreaud, 2009). Al norte de estas latitudes prevalecen débiles vientos del este. Por lo tanto, se tiene una estacionalidad de la posición latitudinal de los chorros en altura, y junto con ellos, también de los corredores de tormentas en superficie.

### 2.2.1. Configuración típica de vientos Puelche

Como se mencionó en la sección 1.1.3, en el estudio de Montecinos et al. (2017) se encontró que la configuración sinóptica típica para el desarrollo de vientos Puelche resultó ser similar a aquella encontrada para los vientos Terral y Raco ((Montes et al., 2016) y (Rutllant y Garreaud, 2004), respectivamente). Esta corresponde a la de un anticiclón migratorio cruzando la CA en latitudes medias, junto a una predorsal en altura. Para llegar a esta conclusión, Montecinos et al. estudiaron los compuestos de eventos Puelche de dos días de duración. La figura 2.4 muestra la presión superficial (curva negra), su anomalía (colores), y la altura geopotencial a 500 hPa (curvas azules) de los compuestos para el día previo (d-1), de inicio de los eventos (d0) y posterior (d+1). Los paneles superiores muestran los compuestos para verano y los inferiores para invierno. Ambos son bastante similares, por lo que en general serán descritos como una misma configuración sinóptica. Los contornos negros muestran un anticiclón centrado alrededor de los 40°S y 85°O, el día previo al inicio del evento (paneles (a) y (d)). Su desplazamiento hacia el este en d0 y d+1 se observa mejor a partir de las anomalías de presión, ya que el anticiclón del Pacífico sur oriental altera la señal de la presión superficial absoluta. En d0 las altas presiones se extienden hacia el norte por el lado este de la CA. Para d+1 el anticiclón ya se encuentra ubicado casi en su totalidad sobre Argentina. Por otro lado, en d0 y d+1 se observa la presencia de una baja costera en las costas de Chile, entre los 30°S-35°S, la cual encuentra su punto cúlmine, es decir, de presión superficial mínima, en el día d+1. En altura se tiene una predorsal (d-1) frente a las costas chilenas, la cual se ubica sobre el país durante el día d0, para luego dar paso al eje de la dorsal para el día d+1. De esta forma, los autores afirman

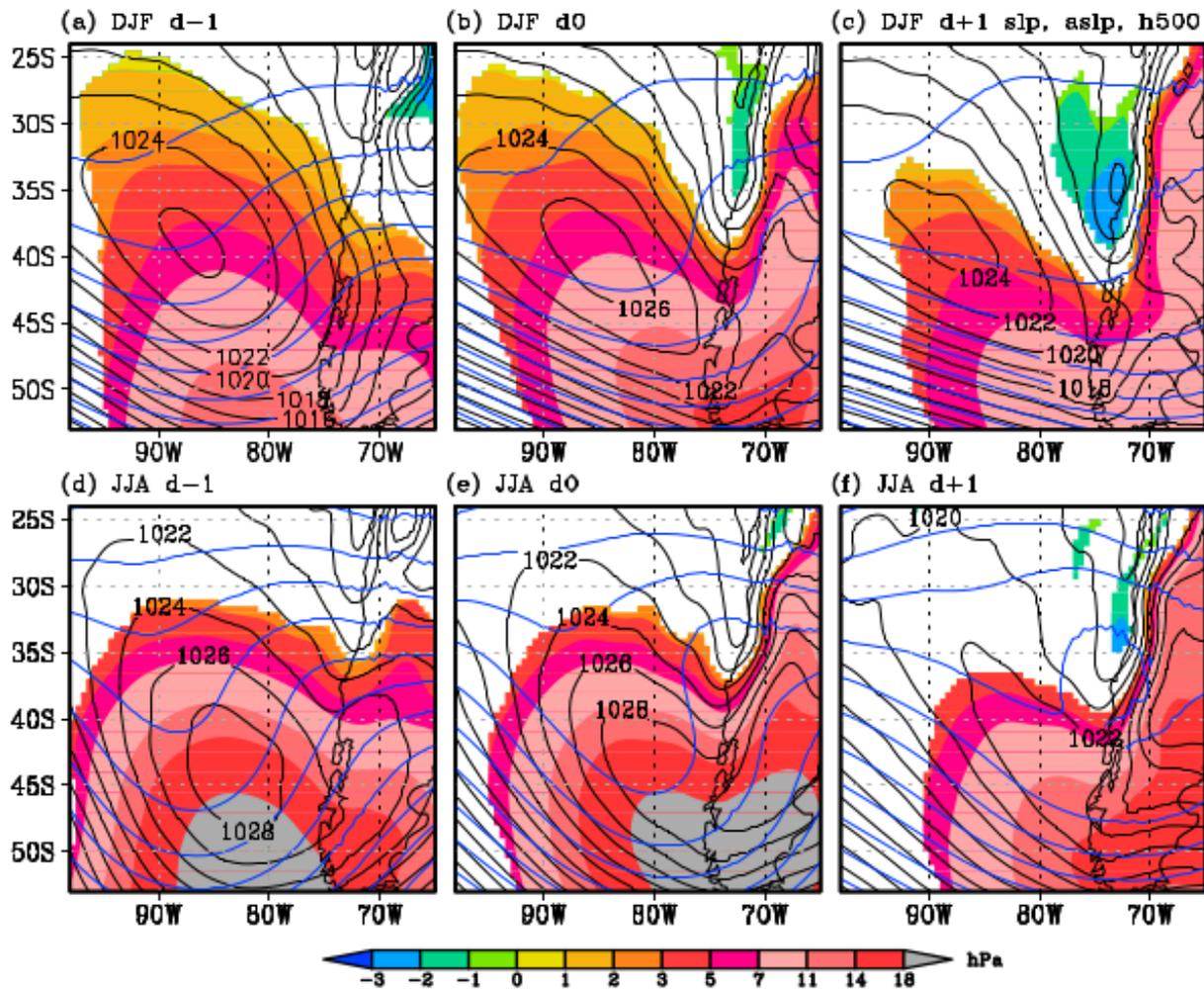


Figura 2.4: Presión superficial (contornos negros), anomalía de la presión superficial (colores) y altura geopotencial a 500 hPa (contornos azules), de los compuestos de eventos Puelche de dos días de duración. Los paneles (a) y (d) corresponden al día previo, paneles (b) y (e) al día de inicio, y paneles (c) y (f) al día posterior. Los paneles superiores corresponden a los compuestos de verano (diciembre, enero y febrero) y los inferiores a invierno (junio, julio y agosto). Figura extraída de Montecinos et al. (2017)

que el gradiente meridional de presión ya establecido en d-1 al oeste de los Andes, gracias al paso del anticiclón migratorio, forzaría vientos del este como una respuesta geostrófica. Estos vientos del este reemplazarían el aire húmedo marino, por parcelas de aire continental, lo que conllevaría por continuidad a un flujo del este en las laderas de la CA, implicando por lo tanto calentamiento por subsidencia. Este factor más la subsidencia generada por la presencia de la predorsal en altura el día d0, fomentaría la formación de la baja costera mencionada, generando a su vez un gradiente zonal de presión. En el estudio de los vientos Raco realizado por Rutllant y Garreaud (2004), analizaron la posible respuesta ageostrófica que el gradiente zonal (bajas

presiones en la costa, al oeste de la CA, y altas presiones al este de la misma) podría forzar sobre el flujo, generando vientos del este. Se encontraron con que el gradiente no se mantiene por sobre el nivel de la cordillera ( $> 3,5$  km s.n.m.) a los  $\sim 33^\circ\text{S}$ , concluyendo de esta forma que el flujo no cruza la cordillera desde Argentina, y por lo tanto el gradiente zonal no influye en la generación de vientos Raco. En el caso de los vientos Puelche, y teniendo en cuenta que en el área geográfica donde se desarrollan, la cordillera no suele superar los 3 km de altura, el gradiente zonal sí podría jugar un papel en el desarrollo de vientos del este. La asociación entre el flujo zonal y los gradientes de presión fue analizada por Montecinos et al. (2017) mediante correlaciones. Los autores obtuvieron una correlación positiva entre el gradiente meridional y U, del orden de 0.7 en la zona de desarrollo de viento Puelche. En el caso de la relación entre U y el gradiente zonal, las correlaciones fueron negativas, también del orden de 0.7. Por lo tanto, ambos resultados indican una relación entre los gradientes de presión y vientos del este, sugiriendo la posibilidad tanto de una respuesta geostrófica, como ageostrófica por parte de U (respectivamente).

## 2.3. Estaciones meteorológicas

En la zona de estudio descrita en el capítulo 2.1, fue instalada en el año 2014 una red compuesta por 8 estaciones meteorológicas automáticas (ver figura 2.1), con la finalidad de estudiar los vientos valle-abajo. La red se extiende a lo largo de 90 km, partiendo por la estación VOL, ubicada a 1396 m s.n.m. en la falda del volcán Antuco. La estación más lejana a VOL corresponde a CHA, ubicada a 50 km de la salida del valle, a una altura de 153 m s.n.m.. La altura de los sensores respecto al suelo es entre 2,0 y 2,5 m, a excepción de la estación END, cuyos instrumentos se encuentran a 7 m de altura. Mayor detalle respecto al diseño e implementación de la red de estaciones se detallan en el trabajo de Villagrán et al. (2017). Especificaciones respecto a la ubicación en coordenadas, altura respecto al nivel del mar y fecha de instalación, se muestran en el cuadro 2.1. En él se puede observar que existen dos estaciones llamadas “ANT”: ANT1 y ANT2. Ambas se ubican aproximadamente en el mismo punto, el cual fue denotado tan solo como ANT en el mapa topográfico de la figura 2.1. Esto se debe a que la estación ubicada originalmente en esa localización (ANT1), presentó problemas en su sensor de presión, razón por la cual se llevó otra estación meteorológica al sitio. De esta forma, el 28 de enero del 2016 se cambió la estación LEC a la posición correspondiente a ANT, transformándose así LEC en ANT2. Por 8 días, ANT1 y ANT2 tomaron datos a la par, instaladas en el mismo sitio. Luego se removió la estación ANT1 de forma definitiva. Es debido a esto que en la figura 2.5 se observa que LEC solo tiene datos hasta inicios del 2016. En el cuadro 2.2 se tiene una lista de variables almacenadas por las estaciones, su nombre abreviado y la unidad de medida utilizada.

La información fue almacenada cada 1 y 15 minutos en diferentes formatos de archivos (ver cuadro 4.1), cubriendo rangos temporales distintos. Es importante tener en cuenta que existe una importante pérdida de información. Estos dos últimos puntos se pueden ver gráficamente en la figura 2.5, la cual muestra la cobertura temporal de los datos tomados por las distintas estaciones, con frecuencia de toma cada 1 y 15 minutos. Por lo tanto, un set más completo de datos correspondería a la concatenación de la información tomada con ambas frecuencias de muestreo.

Nombre	Código	Ubicación [lat S - lon O]	[m s.n.m.]	Fecha de instalación
Volcán	VOL	37,3857° - 71,3763°	1396	febrero 2014
Conaf	CON	37,3979° - 71,4404°	958	febrero 2014
Endesa	END	37,3405° - 71,5310°	733	febrero 2014
Antuco1	ANT1	37,3405° - 71,5310°	560	agosto 2014
Antuco2	ANT2	37,3405° - 71,5310°	560	enero 2016
Rucue	RUC	37,3580° - 71,8653°	396	febrero 2014
Carmen	CAR	37,2510° - 71,9496°	304	febrero 2014
Lechería	LEC	37,2673° - 72,1560°	240	febrero 2014
Charrúa	CHA	37,0927° - 72,3184°	153	febrero 2014

Cuadro 2.1: Características de las estaciones meteorológicas instaladas en el Valle del río Laja.

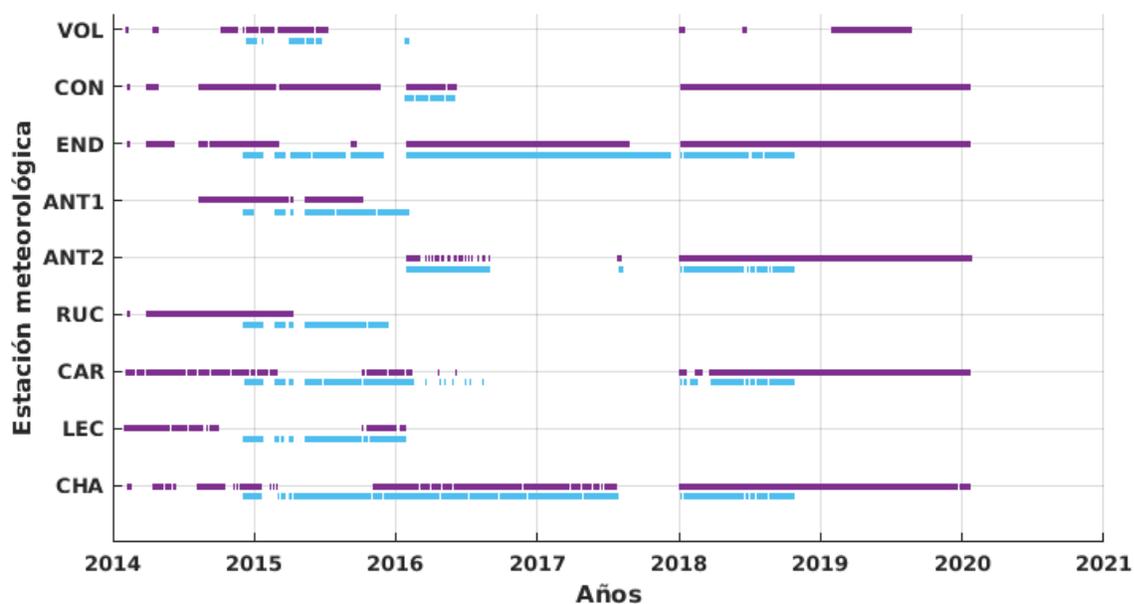


Figura 2.5: Cobertura temporal de los datos tomados cada 1 (líneas moradas) y cada 15 minutos (líneas celestes), según estación meteorológica (ordenada).

<b>Variables meteorológicas</b>	<b>Unidad</b>
<b>Dn:</b> dirección del viento mínima	°
<b>Dm:</b> dirección del viento media	°
<b>Dx:</b> dirección del viento máxima	°
<b>Sn:</b> rapidez del viento mínima	m/s
<b>Sm:</b> rapidez media del viento	m/s
<b>Sx:</b> rapidez máxima del viento	m/s
<b>Ta:</b> temperatura del aire	°C
<b>Ua:</b> humedad relativa	%
<b>Pa:</b> presión atmosférica	hPa
<b>Rc:</b> precipitación acumulada	mm
<b>Rd:</b> duración de la precipitación	s
<b>Ri:</b> intensidad de la precipitación	mm/h
<b>Hc:</b> granizo acumulado	mm
<b>Hd:</b> duración del granizo	s
<b>Hi:</b> intensidad del granizo	<i>impacto/cm<sup>2</sup>h</i>
<b>Variables del sistema</b>	<b>Unidad</b>
<b>Th:</b> temperatura de calentamiento	°C
<b>Vh:</b> voltaje de calentamiento	V
<b>Vs:</b> voltaje de suministro	V
<b>Vr:</b> voltaje de referencia 3.5 V	V

Cuadro 2.2: Posibles tipos de variables contenidas en los archivos de datos.

---

# Capítulo 3

## Metodología

El estudio se realizó mediante el análisis de datos observados por las estaciones meteorológicas ANT1 y ANT2, representando ambas al mismo sitio (ANT). Estas estaciones fueron escogidas debido tanto a su ubicación dentro del valle, como a la cobertura de datos en el tiempo. Por una parte, CON, END y ANT son las 3 locaciones con estaciones meteorológicas ubicadas en el valle (ubicadas de este a oeste respectivamente). Estas contienen un 54 %, 75 % y 59 % de los datos en el periodo entre el 2014 y 2020, respectivamente. Debido a esto, END hubiese sido la estación de preferencia para el análisis, sin embargo, se encuentra ubicada a la salida de un valle aledaño de orientación SO-NE, lo cual dificulta el estudio de vientos intensos del este. Luego, tanto el porcentaje de datos, como la ubicación en el valle, convirtieron a ANT en la estación principal del estudio, siendo utilizada para describir la climatología principal del valle y para la caracterización de eventos de vientos Puelche. Para los cálculos y creación de figuras se utilizó el sistema de cómputo numérico MATLAB.

### 3.1. Creación de base de datos

A partir de la información obtenida de la red de estaciones meteorológicas, se decidió crear una base de datos cruda y una de promedios horarios. Ambas contienen las principales variables meteorológicas de interés. Estas corresponden a humedad relativa [%], temperatura [°C], presión atmosférica [hPa], dirección del viento [°], rapidez del viento [m/s] y precipitación acumulada [mm]. Respecto a la precipitación, finalmente esta no fue utilizada en el presente trabajo, ya que se encuentra fuera del objetivo de estudio.

Para la base de datos horaria, se planteó concatenar los datos con frecuencia de toma cada 1 minuto (d1m) y cada 15 minutos (d15m). Previo a esto, se revisaron todas las variables meteorológicas, a excepción de la precipitación, para buscar y corregir errores claros de magnitud en la información tomada por las estaciones. Luego se realizó para cada estación meteorológica un

control de calidad en el que se revisó la similitud entre periodos de tiempo en que los dos set de datos tuviesen información. Se encontró que los datos d15m no corresponden a ningún tipo de promedio de los d1m, sino que al dato exacto tomado del tiempo respectivo. Por lo tanto, corresponden a la extracción de datos cada 15 minutos de los archivos d1m. La comparación dio como resultado una correlación perfecta igual a 1 en todas las variables y estaciones. Como ejemplo, se muestra en la figura 3.1 el resultado de la comparación realizada para la estación ANT2. Se observa la perfecta relación, que genera una recta con pendiente 1 en todas las variables principales.

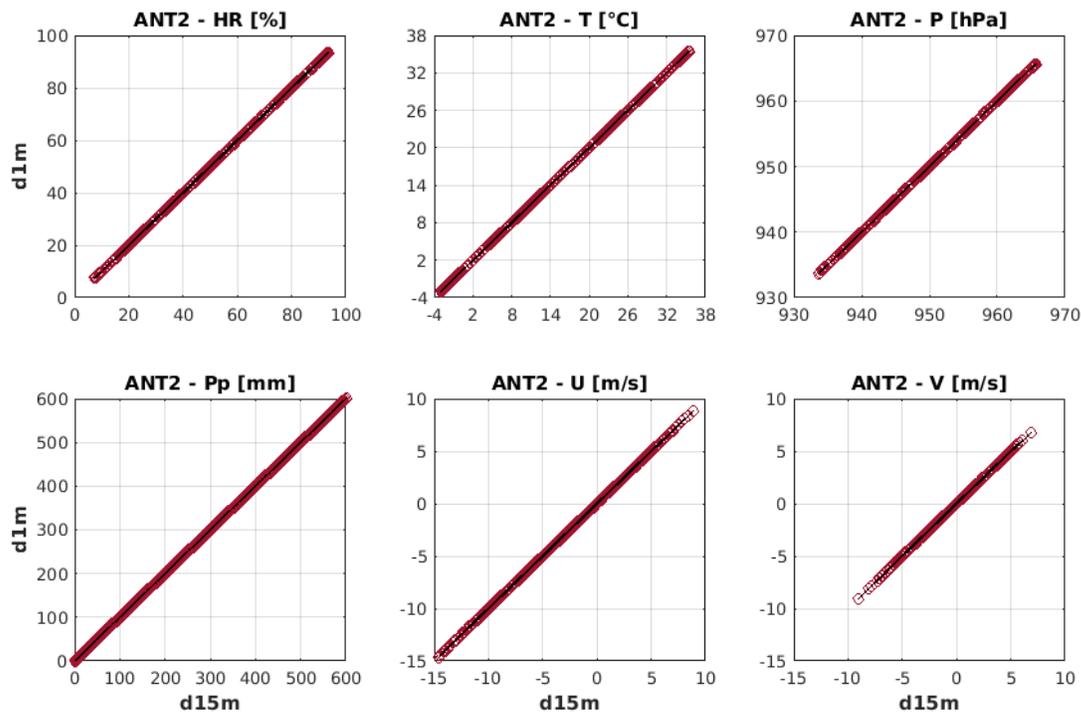


Figura 3.1: Comparación de semejanza entre datos tomados con frecuencia de 15 minutos y 1 minuto (extraídos cada 15 minutos). La información corresponde a la estación ANT2. Cada panel muestra una de las principales variables meteorológicas incluidas en las bases de datos creadas.

Ya habiendo corroborado la similitud entre d1m y d15m, se decidió usar ambos set de datos para la creación de la base de datos horaria, de forma que se pueda rescatar la mayor cantidad de información. Para corroborar que los promedios horarios de los datos d15m fuesen capaces de representar el estado de la atmósfera en el sitio con similar precisión a los datos tomados cada 1 minuto, se calculó el promedio horario con ambos datos de cada variable, para cada estación meteorológica. Es necesario tener en cuenta que en el caso del viento, el promedio que debe

realizarse es vectorial. Es decir, se descompone en sus componentes zonal y meridional y estas se promedian por separado. La comparación se realizó en aquellos periodos de tiempo en que ambos set tuviesen información. La figura 3.2 muestra como ejemplo nuevamente el resultado de ANT2. La pendiente obtenida fue de 1 en todas las variables a excepción de U y V, donde se obtuvieron pendientes con valor de 0.9. Se observa cierta dispersión respecto a la curva ajustada a la nube (curva negra), especialmente en las componentes del viento y la humedad relativa. Sin embargo, esta se consideró poco significativa, siendo prioridad rescatar la mayor cantidad de información posible de cada estación. Resultados similares se obtuvieron en todas las estaciones, donde tanto la correlación como la pendiente nunca bajaron de 0.9. De esta forma se decidió que la concatenación de los promedios horarios no conlleva a problemas de precisión significativos. Por lo tanto, se creó la base de datos a partir de los promedios horarios de d1m y d15m, dando prioridad a aquellos promedios calculados con datos con frecuencia cada 1 minuto, rellenando con los promedios d15m aquellos periodos sin información en los promedios d1m.

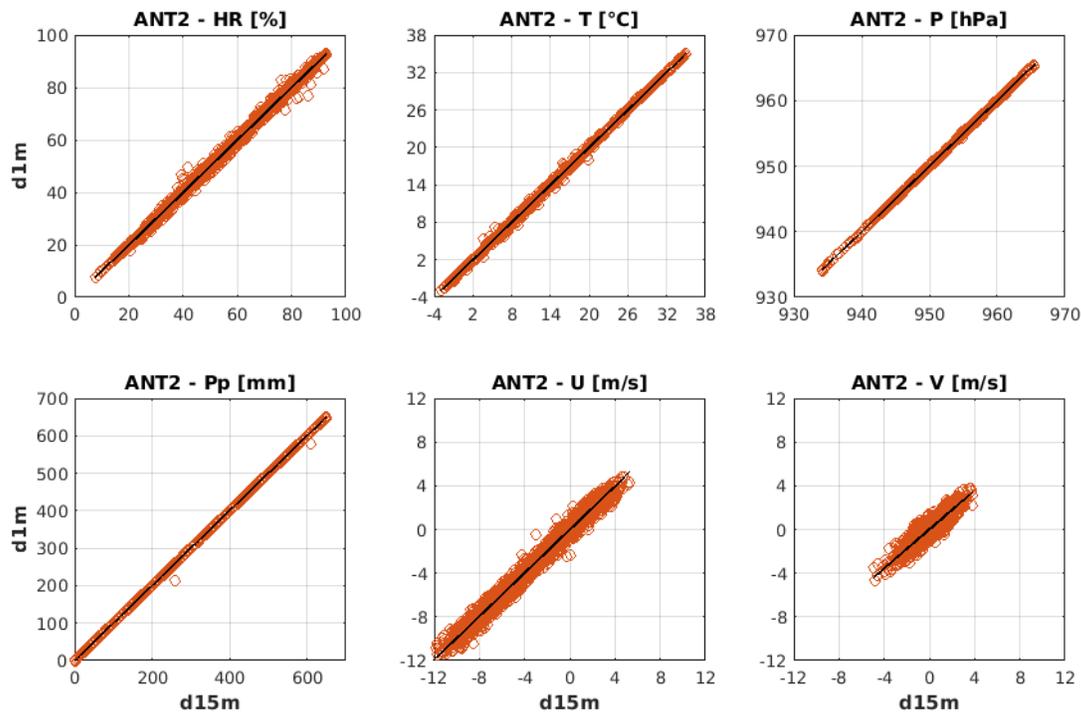


Figura 3.2: Comparación de promedios calculados a partir de los datos tomados con frecuencia de 15 minutos y 1 minuto. La información corresponde a la estación ANT2. Cada panel muestra una de las principales variables meteorológicas incluidas en las bases de datos creadas.

Una vez finalizada la concatenación, se realizó un control de calidad de las estaciones ANT1 y ANT2, a partir de su periodo de traslape. Se encontraron problemas en la dirección del viento, lo que llevó a realizar una revisión visual de homogeneidad de las variables meteorológicas de interés de todas las estaciones. Las variables presentaron continuidad temporal, a excepción de la frecuencia de dirección del viento, la cual mostró cambios en el tiempo en todas las estaciones, exceptuando a RUC y LEC. Para más información sobre cómo se afrontó el problema, revisar sección 4.1.

Hasta este punto se trabajó con los datos en horas UTC. A partir de aquí, la climatología y caracterización se realizaron en hora local (HL), correspondiendo a UTC-4.

## 3.2. Climatología

Los cálculos de promedios para la climatología se realizaron a partir de 4.1 años de datos (figura 4.9). Por lo tanto, es necesario tener en cuenta que debido a la limitada cantidad de datos, las figuras del capítulo 4.2 pueden no ser del todo representativas de la climatología general del valle.

### 3.2.1. Cálculo de radiación incidente

Los análisis que se deben hacer requieren del conocimiento de tanto la cantidad de horas de sol, como de la hora de salida y puesta del mismo. Debido a que la red de estaciones ubicadas en el valle no posee sensores de radiación, se decidió calcular la radiación incidente  $K_{\downarrow}$  perpendicular a una superficie plana ideal (Stull, 2016, p. 44) con la fórmula:

$$K_{\downarrow} = S_0 \cdot T_r \cdot \sin(\Psi) \quad (3.1)$$

$S_0$  corresponde a la constante solar, y se utilizó un valor de  $1366 \text{ W/m}^2$ .  $\Psi$  corresponde al ángulo de elevación del sol, y el cálculo del seno depende del día juliano, hora UTC, latitud y longitud de la ubicación de interés. Respecto a la transmisividad neta del cielo  $T_r$ , se tiene que depende del ángulo de elevación del sol, las características de absorción de las componentes presentes en la atmósfera y la cobertura de nubes. Stull (2016) propone la siguiente parametrización:

$$T_r = (0,6 + 0,2 \sin \Psi)(1 - 0,4\sigma_H)(1 - 0,7\sigma_M)(1 - 0,4\sigma_L) \quad (3.2)$$

La ecuación 3.2 corresponde a una aproximación del valor de  $T_r$ , donde  $\sigma$  representa la fracción de cobertura de nubes. Los subíndices indican si la ubicación de la nubosidad es alta (H), media

(M) o baja (L) en la vertical. Se asumieron cielos despejados, simplificando la ecuación a

$$T_r = (0,6 + 0,2 \sin \Psi) \quad (3.3)$$

Por lo tanto, las principales simplificaciones hechas para calcular la radiación incidente corresponden a:

- Cielos despejados ( $\sigma_H = \sigma_M = \sigma_L = 0$ ).
- Superficie plana, ausencia de topografía compleja.

este último punto se aleja bastante de la realidad de un punto ubicado dentro de un valle. Por una parte, se tiene que la superficie del valle se encuentra inclinada, ya que a medida que nos adentramos hacia el este, mayor es la altura s.n.m.. Por otro lado, tenemos el factor de sombra generada por la ladera norte. Ambos puntos afectan al ciclo diurno y estacional de la magnitud y del inicio y final de la incidencia de radiación solar. Sin embargo, para el objetivo que cumple el cálculo de la radiación en este trabajo, como referencia para el análisis de los ciclos diarios de las variables meteorológicas, las horas de inicio y final de  $K_{\downarrow}$  incidente corresponden a la información de mayor relevancia. Se asume que acudir a las simplificaciones mencionadas conllevan a leves desfases en el resultado de la figura 4.11, los cuales no interfieren en el objetivo de la misma. Una vez calculado  $K_{\downarrow}$ , se realizó la conversión de UTC a HL=UTC-4.

### 3.3. Caracterización

Previo a la caracterización de eventos de vientos Puelche, es necesario desarrollar un método que identifique adecuadamente su inicio y finalización. Existen varios estudios de eventos de fuertes flujos de vientos valle-abajo alrededor de todo el mundo y, por lo tanto, también diferentes métodos de detección.

#### 3.3.1. Definición de vientos Puelche

Como ya se ha mencionado previamente (ver sección 1.1.3), los fuertes flujos valle-abajo son caracterizados como cálidos y secos. Por lo tanto, para poder definir sus principales características se suelen estudiar las siguientes variables:

- Vientos
- Temperatura
- Humedad

- Nubosidad

Sin embargo, estas no siempre son evidencia concluyente de su ocurrencia (Brinkmann, 1971). Por ejemplo, la rapidez del viento depende de la ubicación dentro del valle y tipo de topografía circundante. Por otra parte, la topografía particular del valle y la circulación atmosférica general de la zona, también influyen en las características principales nombradas. Debido a esto, diversos métodos de identificación han sido aplicados en los flujos estudiados en distintas locaciones. Además, existe el factor subjetivo de cada autor al determinar qué variables serán incluidas en su método.

Para reducir el problema que la subjetividad puede acarrear en los estudios, Plavcan et al. (2014) presentó un modelo estadístico de diagnóstico de vientos tipo Foehn a partir de datos horarios, ya sea solo utilizando la velocidad del viento o usando además diferencias humedad y/o temperatura entre una estación ubicada en el valle y otra ubicada valle-arriba. En el estudio de vientos Puelche, Montecinos et al. (2017) adaptaron el método definido por Plavcan et al. para utilizarlo a partir de datos diarios del reanálisis CFSR-NCEP. Se utilizaron dos puntos de grilla, uno ubicado valle-abajo y otro valle-arriba, para calcular diferencias de temperatura potencial ( $\Delta\theta$ ). Respecto a la velocidad, utilizaron la componente zonal U (debido a la orientación del valle) en el punto valle-abajo. Estudiaron las distribuciones de  $\Delta\theta$  condicionadas a valores de U menores a distintos umbrales, encontrando que la distribución se centraba cada vez alrededor de valores más bajos, a medida que el umbral de U disminuía. Finalmente, el umbral de viento se escogió como el valor de U en que las distribuciones condicionadas de  $\Delta\theta$  se centraran en cero, variando entre -2 m/s y -5 m/s en las 4 estaciones del año. Para  $\Delta\theta$  se escogió que el umbral fuese  $\Delta\theta < 1^\circ C$ , de tal forma que se filtren los eventos con estabilidad significativa.

En el caso de los vientos Terral en el norte (Montes et al., 2016), el método definido para encontrar horas Terral correspondió a una serie de condiciones que debían cumplirse simultáneamente: vientos del este, con rapidez mayor a 2 m/s, humedad relativa bajo el 30 % y temperaturas por sobre los  $11^\circ C$ . También fueron definidos días Terral como aquellos con una o más horas Terral consecutivas, y eventos Terral, como aquellos días Terral consecutivos (ya sea uno o más).

En cuanto a los vientos Raco, dos estudios se han llevado a cabo hasta el momento, enfocándose en los meses de invierno. Rutllant y Garreaud (2004) determinaron como días Raco, aquellos con promedios horarios de velocidad proyectada en el eje del valle, menores a -5 m/s entre las 04 y 07 HL. Este método lo desarrollaron a partir del estudio de la distribución de frecuencias de la velocidad proyectada. Además definieron los episodios Raco, como aquellos días Raco consecutivos.

En el estudio realizado por Muñoz et al. (2020), también se estudió la distribución de frecuencias de la velocidad proyectada en la dirección de vientos ladera-abajo más intensos ( $\sim 57^\circ$ ). Entre las 06 y 08 HL, la distribución muestra una clara bimodalidad, similar a lo que se observó en

Rutllant y Garreaud (2004). A partir de esta información escogieron un umbral de 4 m/s para definir horas Raco. Los eventos Raco, por otra parte, se definieron como horas Raco sucesivas. Además, se concatenaron como un evento aquellos separados por un máximo de 3 horas o con velocidades mínimas en el intervalo entre eventos que no bajasen de los 2 m/s. Por último, se definieron como días Raco, aquellos con más de 4 horas Raco desarrolladas entre las 01 y 12 HL y episodios Raco como aquellos días Raco consecutivos.

En el presente trabajo se utilizó un método de identificación de horas Puelche similar al empleado por Muñoz et al. en el estudio del viento Raco. Se definieron horas, eventos, días y episodios Puelche. El método se basó en la velocidad del viento proyectada ( $V_p$ ) en la dirección de viento Puelche. Esta se escogió como la dirección preferencial de los vientos con rapidez por sobre un umbral transitorio, que permitiese filtrar principalmente los vientos valle-abajo del ciclo diurno de vientos de montaña. Para explicar la proyección realizada, usaremos como ejemplo el vector  $\vec{A}$ , cuyo ángulo de dirección es  $\theta_A$ . Este vector representa cualquier viento que deseemos proyectar sobre la dirección Puelche **escogida**, la cual será denotada momentáneamente como  $\theta_P$ . Ambas direcciones están separadas por un ángulo  $\theta$ . La proyección que se desea hacer, por lo tanto, es de  $\vec{A}$  sobre la dirección  $\theta_P$ . Esto se realizó a partir de la siguiente ecuación de Marsden et al. (1991) (p. 27):

$$V_p = \text{proy}(A_P) = |\vec{A}|\cos(\theta) \quad (3.4)$$

donde el ángulo  $\theta$  debe ser calculado en sentido horario desde el vector  $\vec{A}$  hacia la dirección  $\theta_P$ , por lo que si  $\theta_P \geq \theta_A$ , entonces  $\theta = \theta_P - \theta_A$ . En caso contrario, es decir, en que  $\theta_P < \theta_A$ , entonces  $\theta = 360^\circ - \theta_A + \theta_P$ .

A partir de la búsqueda de esta dirección preferencial, se encontró que la distribución de frecuencias de dirección del viento “fuerte” existe durante todo el año, presentando una transición entre estación cálida y fría (ver figura 4.21, panel (c)). De esta forma se decidió estudiar dos estaciones: cálida o verano extendido, y fría o invierno extendido. La primera comprende desde octubre hasta marzo y la segunda desde abril hasta septiembre. Por lo tanto, cada vez que se mencione verano/invierno en la sección 4, se refiere a las estaciones de 6 meses cada una.

Se estudió la distribución de  $V_p$ , de forma que se pudiese escoger el umbral definitivo que permita identificar las **horas Puelche (HP)**. Luego se definieron los **eventos Puelche (EP)** como la concatenación de conjuntos de HP, con intervalos entre sí menores a cierta cantidad de horas o con velocidades mínimas por sobre un umbral (ver capítulo 4.3.1).

A diferencia del estudio de vientos Puelche realizado por Montecinos et al., no se utilizaron otras variables meteorológicas para identificar HP, ya que se encontró que el umbral de  $V_P$  encontraba satisfactoriamente las características típicas del inicio y final de lo que se podría denominar como eventos Puelche. Para definir **días Puelche**, se determinó el rango horario típico en que

se desarrollan las HP. Se clasificaron en 4 categorías los días Puelche, de acuerdo a la cantidad de HP que se desarrollasen en el intervalo definido. Por último, se definieron como **episodios Puelche**, aquellos días Puelche consecutivos de categoría 3 y 4, los que corresponden a días con desarrollo de 5 o más HP entre las 00 y 11 HL.

### 3.3.2. Caracterización de eventos Puelche

La caracterización desarrollada en este estudio se generó para verano e invierno extendido (llamados simplemente verano e invierno de aquí en adelante), en base a la variable  $V_p$  y se enfocó en los EP. Se estudiaron diversas características de estos, tales como horas de inicio y final, duración,  $V_P$  máxima desarrollada dentro del evento, así como saltos iniciales y finales de temperatura, humedad y  $V_P$ . También se revisó la variación conjunta de estas características estudiadas, en histogramas y diagramas de dispersión.

#### Definición de saltos iniciales y finales

Para calcular los “saltos” o diferencias, en primer lugar se necesita la hora de inicio (final) del evento Puelche. En segundo lugar, se estudian las 3 horas previas (posteriores) a este inicio (final). En el caso del salto inicial (final) temperatura y  $V_P$ , se busca el valor máximo (mínimo) dentro de esas 3 horas, y en el caso de la humedad, el valor mínimo (máximo). Por lo tanto, en el caso de T la diferencia se calcula como:

$$\Delta T_i = \max(T_i - T_{i-n}) \quad (3.5)$$

$$\Delta T_f = \min(T_f - T_{f-n}) \quad (3.6)$$

donde i corresponde al inicio, f al final y n tiene valores entre 1 y 3. De esta forma, los resultados esperados para un típico evento tipo Foehn, corresponden a:

#### ■ Inicio

$\Delta T_i > 0^\circ C$	calentamiento
$\Delta q_i < 0 \text{ g/kg}$	secamiento
$\Delta V_{pi} > 0 \text{ m/s}$	aumento de la velocidad

#### ■ Final

$\Delta T_f < 0^\circ C$	enfriamiento
$\Delta q_f > 0 \text{ g/kg}$	humidificación
$\Delta V_{pf} < 0 \text{ m/s}$	disminución de la velocidad

---

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Creación de base de datos

#### 4.1.1. Consolidación de archivos crudos

Para la creación de la base de datos horaria, fue necesario primero recopilar todos los archivos de datos que fueron recuperados en el tiempo, de cada una de las 8 estaciones meteorológicas. Se identificaron tres tipos de archivos distintos para los datos tomados con frecuencia de 1 minuto (d1m) y dos para aquellos con frecuencia de 15 minutos (d15m). En el cuadro 4.1 se encuentran especificadas las principales características de estos, tales como su formato, variables meteorológicas contenidas, además de otras variables como fecha, hora y variables del sistema. Cabe destacar que los datos d1m y d15m cubren periodos de tiempo independientes entre sí (como referencia, ver figura 4.1). En la sección 2.3 se puede ver en el cuadro 2.2 el glosario de variables meteorológicas y de sistema mencionadas en el cuadro 4.1.

El archivo clase A corresponde a una estructura preprocesada guardada en formato MATLAB y es aquel que almacena data más antigua (del año 2014). En la estructura contiene todas las estaciones meteorológicas, además de los datos d1m promediados cada 15, y datos cada 15 minutos recopilados por otro alumno. Estos últimos dos sets no fueron utilizados en este trabajo. El resto de clases (B, C, D y E) son archivos de texto separados por estación y por periodos de tiempo definidos mayormente por las visitas de rescate de datos. Los archivos clases B y C parecen ser iguales según las características que se muestran en el cuadro 4.1, pero las variables que contienen están dispuestas de forma distinta. En el caso de los archivos C, cada celda correspondiente a una variable, ya sea meteorológica o de sistema, contiene el nombre de la misma y su unidad de medida. Debido a esto, las letras y símbolos deben ser eliminados previo al procesamiento. Los archivos clase D se encuentran codificados en sistema hexadecimal y contienen las 4 tomas de datos por hora en una fila, donde se indica la hora UTC a la que corresponden. Algunos

Frec.	Clase	Formato	Var. met.	Otras var.
<b>1m</b>	A	estructura, archivo en formato MATLAB	Dm, Sm, Ta, Ua, Pa, Rc, u, v	fecha + hora UTC en formato serial
	B	archivo de texto en columnas	Dn, Dm, Dx, Sn, Sm, Sx, Ta, Ua, Pa, Rc, Rd, Ri, Hc, Hd, Hi	fecha, hora UTC, minuto, segundo y variables del sistema (Th, Vh, Vs, Vr)
	C	archivo de texto en columnas	Dn, Dm, Dx, Sn, Sm, Sx, Ta, Ua, Pa, Rc, Rd, Ri, Hc, Hd, Hi	fecha, hora UTC, minuto, segundo y variables del sistema (Th, Vh, Vs, Vr )
<b>15m</b>	D	sistema hexadecimal en archivo de texto	Dm, Sm, Ta, Ua Pa, Rc, Hc	día juliano, año, hora UTC y variables del sistema (Vh, Vs)
	E	archivo de texto en columnas + encabezado	Dm, Sm, Ta, Ua, Pa, Rc, Hc	-

Cuadro 4.1: Tipos de archivos de almacenamiento de datos de la red de estaciones meteorológicas del Valle del río Laja. La primera columna agrupa los tipos de archivos de acuerdo a la frecuencia de toma de datos. La segunda columna denota los distintos tipos con una letra, la tercera explica el formato de cada archivo. Las dos últimas columnas enlistan las variables contenidas, donde la penúltima corresponde a las variables meteorológicas y la última a otras variables. Ver cuadro 2.2 para conocer variable correspondiente a cada nombre abreviado.

de estos archivos hexadecimales vienen con columnas iniciales indicando la fecha y hora UTC, de forma adicional, ya que en ocasiones las fechas y horas contenidas en el código hexadecimal están erróneas, por lo que esta información adjunta resulta útil. Por último, el archivo clase E es un archivo de texto simple con encabezado que contiene información respecto al mismo, tal como la estación meteorológica a la que corresponde, las variables incluidas y la fecha y hora de inicio y término del periodo comprendido por los datos contenidos en el texto. Esta última información es también indicada en los nombres de cada archivo, y es de suma importancia ya que no es añadida en el cuerpo de texto. Más información sobre los archivos B, C y D se puede obtener del trabajo realizado por Villagrán et al. (2017), donde se describe la red de estaciones meteorológicas instaladas a lo largo del Valle del río Laja.

Al tratar los datos con la finalidad de ordenar y concatenar la información, se enfrentaron dos problemas en particular. El primero fue la presencia de archivos corruptos por caracteres alea-

torios en las estaciones CAR y CHA, los cuales alteraban las columnas de fechas y variables, no permitiendo que el archivo se pudiese leer en MATLAB. Este tipo de problema afectó a archivos tipo B, C y D. Se procedió a remover las filas alteradas tanto de forma manual como de forma automática mediante un código en MATLAB. Debido a este problema se perdió un porcentaje de datos distinto para cada archivo, resultando en pérdidas del 67% o 6% en diferentes casos. El segundo problema enfrentado corresponde a la ausencia de datos en algunas filas, para lo cual se utilizó un filtro automático de filas incompletas. La corrección conllevó una pérdida significativamente menor de datos en comparación al mencionado anteriormente. Este tipo de problema es recurrente en los archivos de clase B, C, y D. Los archivos clase A y E no presentaron problemas previos al procesamiento.

Una vez que se ordenó la información por estaciones y clases de archivos, se procedió a concatenar según clase y según frecuencia de toma de datos. Luego se concatenaron las distintas clases de archivos, para cada frecuencia, y se ordenaron cronológicamente, removiendo datos repetidos (en el sentido temporal). Se guardaron solo las variables meteorológicas de interés y se creó una base de datos brutos cada 1 y 15 minutos en una estructura en formato MATLAB. De esta forma, se obtuvieron 2 sets de datos por estación meteorológica, comprendiendo el periodo general desde el año 2014 hasta el 2020.

Previo a calcular los promedios horarios como producto final, se realizó una limpieza de las variables meteorológicas, eliminando errores comunes, tales como magnitudes fuera de rango o datos repetidos en extensos periodos de tiempo. Este tipo de errores se observaron en todas las variables. La limpieza se realizó a través de evaluación visual y corrección manual. En la figura 4.1 se muestra como ejemplo las series de tiempo crudas de presión en ANT1 y ANT2, tanto la de d1m como de d15m. Se observa que en ANT1 (paneles (a) y (b)) la presión varía dentro de un rango de 150 hPa, lo cual es muy alto, por lo que se determinó que el sensor de presión se encontraba averiado. Además se observa otro error. Un corto periodo de tiempo en la primera mitad del 2015 posee valores cercanos a los 480 hPa. Por otra parte, en el panel (a) se tiene que un periodo a fines del 2014 varía entre magnitudes de presión esperadas por lo cual se conservó. El resto de la serie se eliminó, junto con toda la serie del panel (b). En el caso de ANT2 (paneles (c) y (d)) la presión varía entre rangos normales y esperados para la ubicación de la estación. Esto se evidencia de forma notoria en el panel (c). No tanto así en el panel (d), ya que se tienen valores con magnitudes muy por sobre lo esperado en la segunda mitad del año 2016. Estos errores se eliminaron, obteniendo como resultado una serie similar a la del panel (c).

Luego de limpiar las series de tiempo, se calcularon los promedios horarios de cada set de datos. En el caso del viento, debido a que es un vector, se debió realizar un promedio vectorial. Se descompuso en sus componentes zonal (U) y meridional (V) y se promediaron separadamente para luego volver a calcular la magnitud y dirección del vector de viento. De esta forma se

obtuvieron dos set horarios por estación, uno producto de los datos d1m y otro de los datos d15m. A continuación se procedió a concatenar la información de cada estación, privilegiando los promedios horarios calculados a partir de los datos tomados cada un minuto.

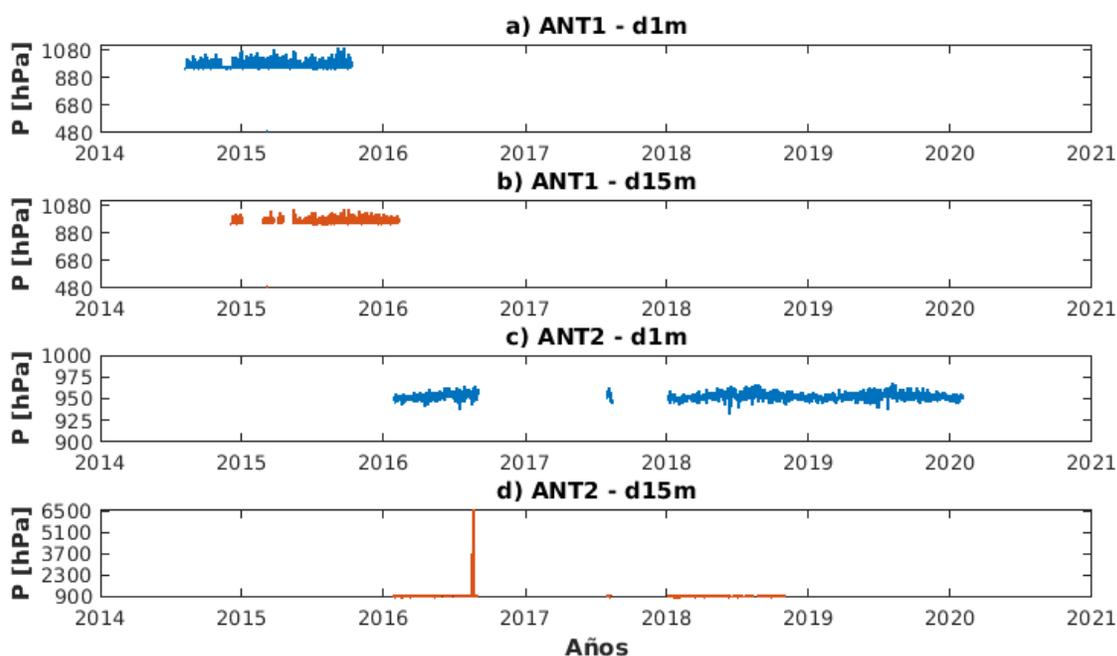


Figura 4.1: Series de tiempo crudas de presión [hPa] en ANT1 ((a) y (b)) y ANT2 ((c) y (d)). Las curvas azules corresponden a datos tomados cada 1 minuto y las rojas a datos tomados cada 15 minutos.

#### 4.1.2. Homogeneización

En el caso de ANT, la estación principal en este estudio, se tiene que además debe ser concatenada la información de ANT1 y ANT2, de forma que se obtenga una serie de tiempo más completa. Para esto, es necesario revisar la homogeneidad de los datos tomados por ambas estaciones. Lo primero que se hace es analizar la similitud de las variables tomadas en un periodo de 8 días en que ambas estaciones registraron datos simultáneamente, entre el 28 de enero y el 6 de febrero del año 2016. este periodo es denominado “periodo de traslape”. En la figura 4.2 se muestran las series de tiempo de humedad relativa y temperatura en este periodo. Se hace notar que por ahora se está trabajando con la hora en UTC. Se observa una gran similitud entre ambas curvas, donde la correlación obtenida tanto para la humedad como para la temperatura fue de 0.99. Este tipo de análisis no se puede llevar a cabo con la presión, ya que en el periodo de traslape no hubo toma de datos de presión correctos en ANT1.

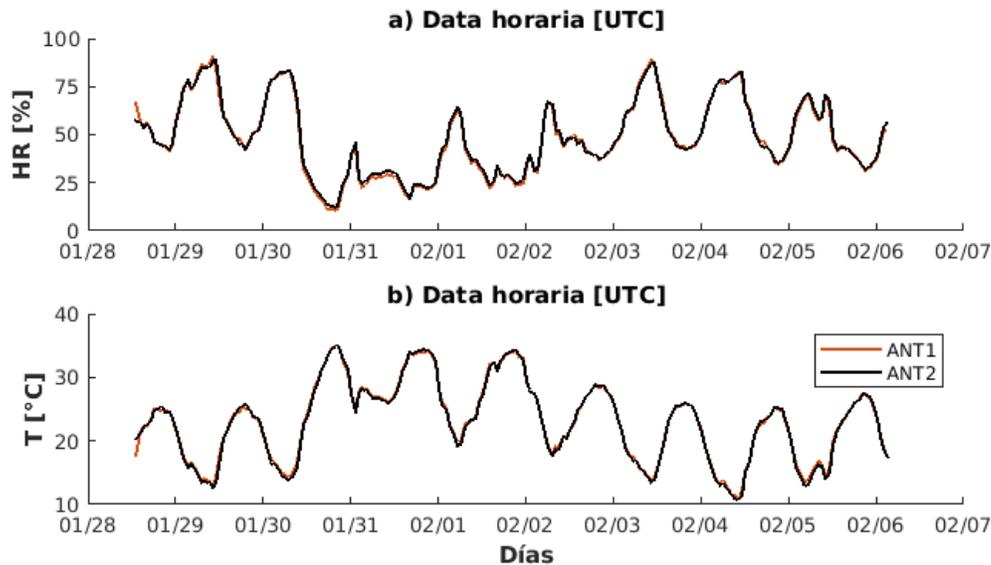


Figura 4.2: Comparación entre ANT1 (curva roja) y ANT2 (curva negra) durante el periodo de toma de datos coincidente entre ambas estaciones meteorológicas. En (a) se compara la humedad relativa [%] y en (b) la temperatura [°C].

La figura 4.3 muestra la comparación de las componentes del viento en el mismo periodo. Los paneles (c) y (d) muestran lo mismo que la figura 4.2 pero para U y V. Se observa similitud para la componente zonal, donde se tiene una correlación positiva de 0.97. La componente meridional, por otra parte, muestra poca concordancia entre ANT1 y ANT2. La correlación calculada fue de -0.006. Los paneles (a) y (b) muestran los diagramas de dispersión entre U y V para ANT1 y ANT2, respectivamente. En ellos se puede dar cuenta de la similitud de la forma de la nube de puntos, donde la diferencia parece radicar en su orientación. Por lo tanto, se estima que el origen del problema se encuentra en la orientación del sensor de viento, por lo que una rotación de las componentes solucionaría la diferencia entre ANT1 y ANT2.

Antes de arreglar este problema, se propone revisar la homogeneidad de cada variable en el periodo completo de toma de datos, para lo cual se concatenaron los promedios horarios de ANT1 y ANT2. La figura 4.4 muestra los contornos de los promedios mensuales del ciclo diurno entre el 2014 y 2020 de humedad relativa, temperatura y presión atmosférica (paneles (a), (b) y (c) respectivamente). La línea roja vertical segmentada separa el periodo entre ANT1 a la izquierda y ANT2 a la derecha. En el caso de la humedad y temperatura, se aprecia una homogeneidad satisfactoria en el periodo completo, con magnitudes máximas y mínimas consistentes en el tiempo, al igual que sus ciclos diurnos. En el caso de la presión, se pueden obtener las mismas conclusiones que para los paneles (a) y (b), pero hay dos puntos que destacar. Por una parte, se verifica que el corto periodo de toma de datos correctos en ANT1 (finales de 2014) tiene valores

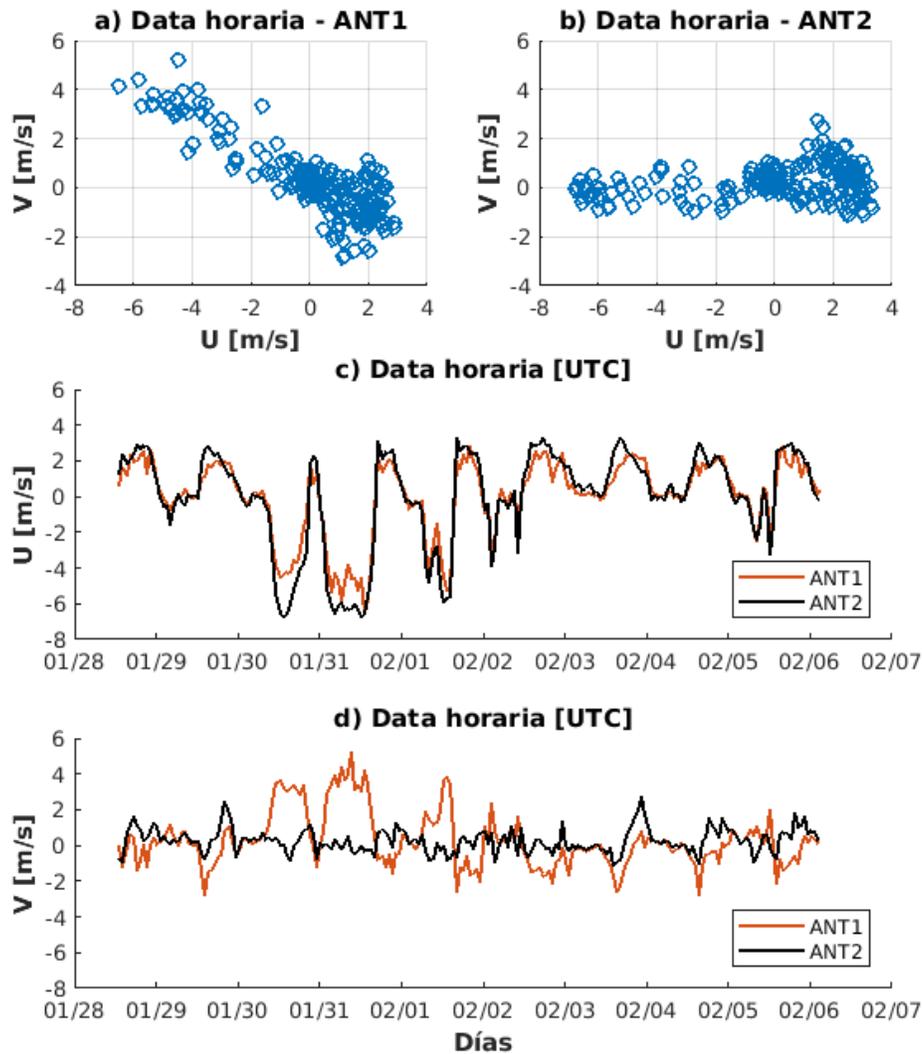


Figura 4.3: Comparación entre ANT1 y ANT2 durante el periodo de toma de datos coincidente entre ambas estaciones meteorológicas. En los paneles (a) y (b) se tienen diagramas de dispersión de  $U$  [m/s] respecto a  $V$  [m/s] para ANT1 y ANT2, respectivamente. (c) y (d) son como la figura 4.2 pero para  $U$  y  $V$ , respectivamente.

que concuerdan con los datos de ANT2 para los meses de diciembre, con valores entre los 948 y 954 hPa. Por otra parte, llama la atención la alta magnitud de la presión en la segunda mitad del año 2016 (tonos amarillos). Esto se debe a la baja cantidad de datos disponibles para calcular el promedio del último mes de ese año que se grafica. En la figura 4.5 se tiene lo mismo que en la figura 4.4 pero para variables del viento. En el panel (a) se muestra la velocidad del viento, la cual se puede observar que es relativamente consistente en su ciclo diurno y estacional en el

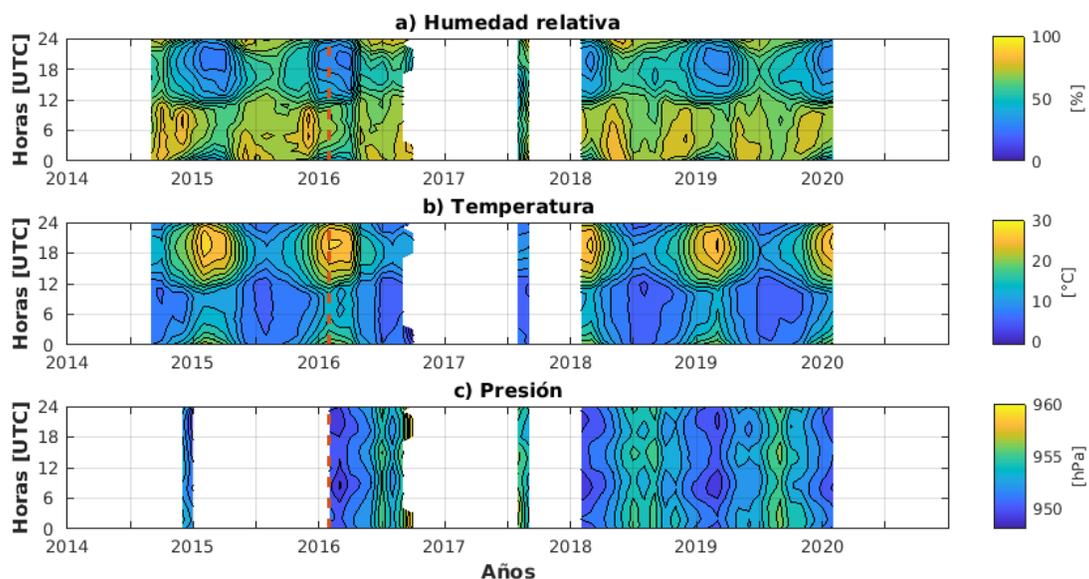


Figura 4.4: Contornos de promedios de humedad relativa [%] (cada 5%), temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ] (cada  $2^{\circ}\text{C}$ ) y presión [hPa] (cada 1 hPa) en el tiempo (panel (a), (b) y (c), respectivamente). La abscisa corresponde a años y la ordenada a horas en UTC. La línea roja vertical discontinua indica la fecha a partir de la cual los datos corresponden a ANT2.

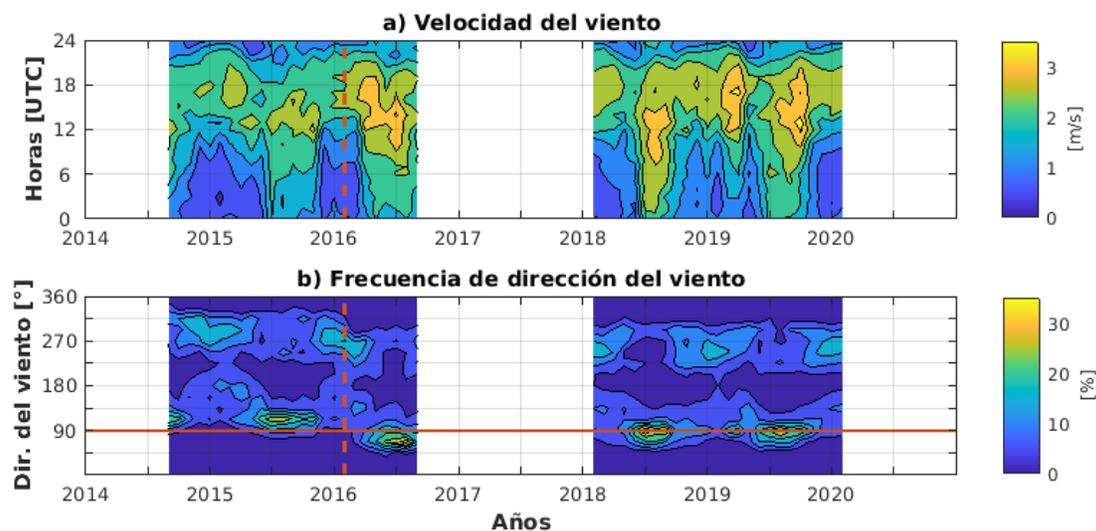


Figura 4.5: Como figura 4.4, pero para la velocidad del viento [m/s] (contornos cada 0.5 m/s) y frecuencia de dirección del viento [%] (contornos cada 5%), correspondiente a los paneles (a) y (b), respectivamente. La línea horizontal roja en el panel (b) está alineada don la dirección del viento ( $90^{\circ}$ ) en la que se tiene la mayor frecuencia de vientos entre el 2018 y el 2020.

periodo completo. En el panel (b) se muestran los contornos de la frecuencia de dirección del viento por mes en porcentaje. Para este cálculo se utilizaron 16 rangos de dirección del viento. La línea continua horizontal se ubica en el eje de mayor frecuencia del periodo 2018-2020. Se puede observar a simple vista cómo el eje de mayor frecuencia cambia en el tiempo y, por lo tanto, los contornos de frecuencia en general. Se identifican tres periodos en que el ángulo de dirección de los vientos cambia. Por lo tanto, y como se estimó en la figura 4.3, se asume que el origen del problema de homogeneidad de vientos se debe a la orientación del sensor de viento. Para solucionar el problema y homogeneizar el periodo completo de toma de datos, se decidió rotar las componentes del viento de forma que los dos primeros periodos calcen con el último, ya que debido a problemas técnicos no se pudieron realizar salidas a terreno que permitan verificar la orientación de los sensores. Se procedió a definir los 3 periodos individualizados en el cuadro 4.2. Decidir el comienzo y final de cada periodo no fue difícil ya que ANTa corresponde a todo ANT1 y ANTb corresponde al inicio de ANT2, hasta su interrupción en 2016.

Nombre designado	Periodo	Datos de procedencia
ANTa	2014/08/08 - 2016/02/06	ANT1
ANTb	2016/01/28 - 2016/09/01	ANT2
ANTc	2018/01/03 - 2020/01/30	ANT2

Cuadro 4.2: Periodos de tiempo de datos de ANT con distinta orientación de vientos. Se destaca que los periodos de traslape de ANT1 y ANT2 son contenidos por ANTa y ANTb, respectivamente.

Una vez definidos los 3 periodos, se estudian los diagramas de dispersión entre magnitud y dirección del viento en la figura 4.6, de forma que a través de un examen visual se decida los grados en los cuales se realizarán las rotaciones. Los paneles superiores muestran los periodos originales y los inferiores, los periodos corregidos. Como se dijo anteriormente, el periodo ANTc se utilizó como referencia para corregir los periodos a y b. Para ello se usaron como ayuda visual líneas negras verticales, las cuales delimitan los ejes de los máximos locales de este periodo. Todos los paneles poseen éstas líneas, las cuales se ubican en los 80°, 100°, 120°, 240° y 300° de izquierda a derecha. A través de ensayo y error, rotando los vientos hasta que los máximos de su distribución se ajusten a las referencias, se encontró que el ángulo más apropiado para rotar ANTb es el de 350°. Para decidir el ángulo de rotación de ANTa, se usó el traslape de toma de datos en común entre ANT1 y ANT2 (es decir, ANTa y ANTb). Se calculó la correlación de U y de V entre ANTb corregido y ANTa rotado en todos los ángulos. Se encontró una maximización de la correlación al rotar ANTa en 26° (figura 4.7).

Para corroborar la homogeneización de los vientos en el periodo completo, se decidió recrear las figuras 4.3 y 4.5 en las figuras 4.7 y 4.8, respectivamente. En la figura 4.7 se compara el

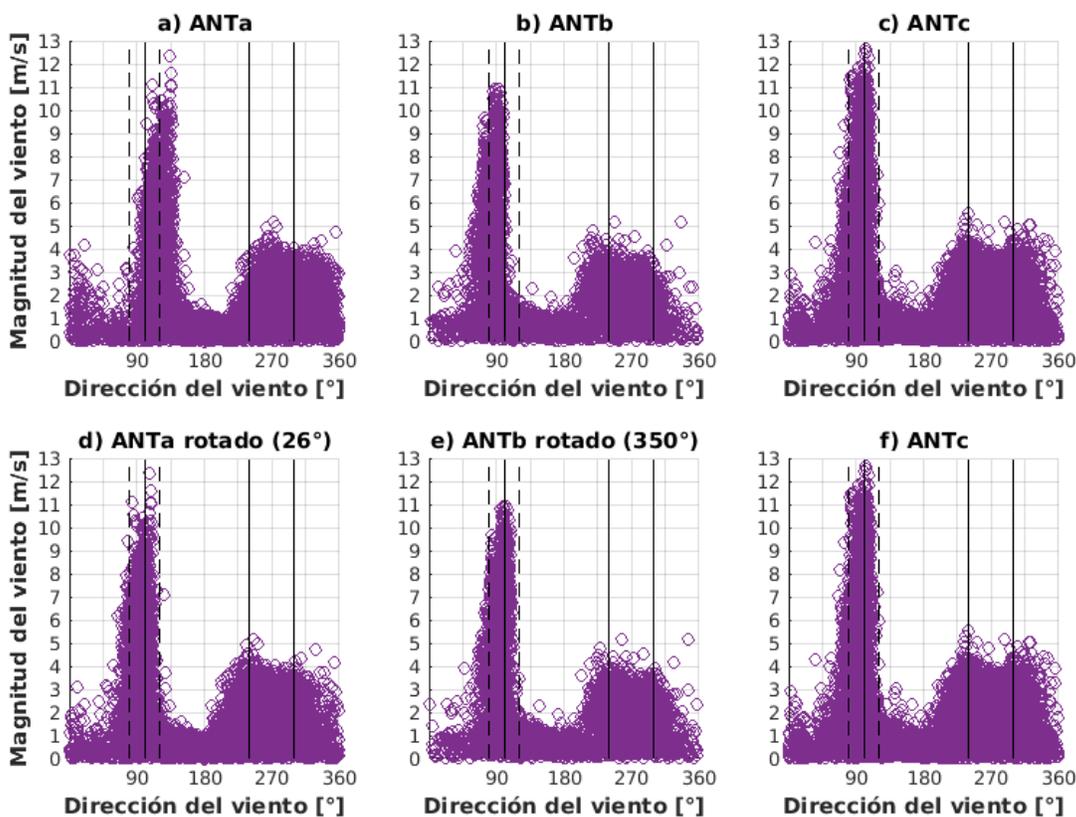


Figura 4.6: Diagramas de dispersión de la dirección del viento [°] respecto a la magnitud del mismo [m/s]. Los paneles (a), (b) y (c) corresponden a los periodos ANTa, AN Tb y AN Tc, sin manipular. Los paneles (d), (e) y (f) corresponden a los mismos periodos respectivamente pero arreglados de acuerdo a AN Tc. Las líneas verticales se ubican como referencia de las direcciones de los máximos locales de magnitud del viento de AN Tc.

periodo de traslape temporal entre ANTa y AN Tb una vez ya rotados. Se observa en los paneles (a) y (b) como la orientación y forma de la nube de puntos concuerda entre sí, aunque los valores de cada punto no parecen ser exactamente iguales. Esto último también se observa en las series de tiempo de los paneles (c) y (d), donde algunos máximos y mínimos no concuerdan con exactitud. Sin embargo, a simple vista se observa la mejora en la correlación entre ANTa y AN Tb, con valores de 0.99 y 0.82 para U y V, respectivamente. Respecto a esto, no se puede esperar que las mediciones de AN T1 y AN T2 sean exactamente iguales, ya que corresponden a dos estaciones meteorológicas distintas ubicadas cerca, pero no en el mismo lugar.

La figura 4.8 muestra los contornos de magnitud de vientos una vez ya corregidos. Al calcular la velocidad del viento a partir de U y V rotados, la magnitud no se ve alterada, pero sí la dirección. Debido a esto, el panel (a) se mantiene igual que en la figura 4.5. En cambio, en

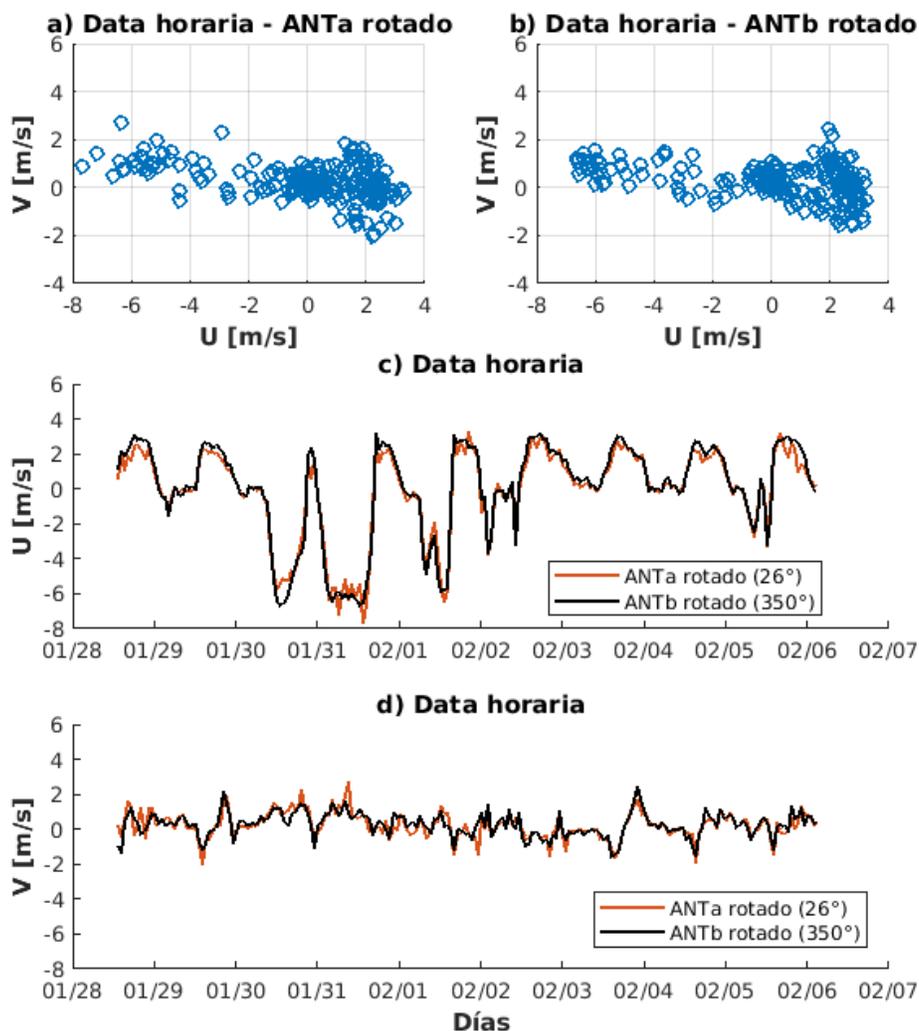


Figura 4.7: Como la figura 4.3 pero para las componentes U y V del viento en ANT1 (ANTa) rotado en  $26^\circ$  y ANT2 (ANTb) rotado en  $350^\circ$ .

el panel (b) se evidencian los cambios obtenidos a partir de la rotación. Se pueden observar como tanto el máximo centrado en  $90^\circ$  como aquel entre los  $225^\circ$  y  $270^\circ$  se encuentran alineados durante todo el periodo de toma de datos.

En el resto de estaciones meteorológicas, a excepción de RUC y LEC, se debieron realizar correcciones similares de la orientación de los vientos, para lo cual también se usó como referencia el periodo final de toma de datos de la respectiva estación.

Una vez que se homogeneizaron los vientos en ANT, se procedió a concatenar ANT1 y ANT2, priorizando este último. En la figura 4.9 se observa la cobertura temporal del producto final

horario. De acuerdo a esta, la climatología del presente estudio contiene aproximadamente 4 años.

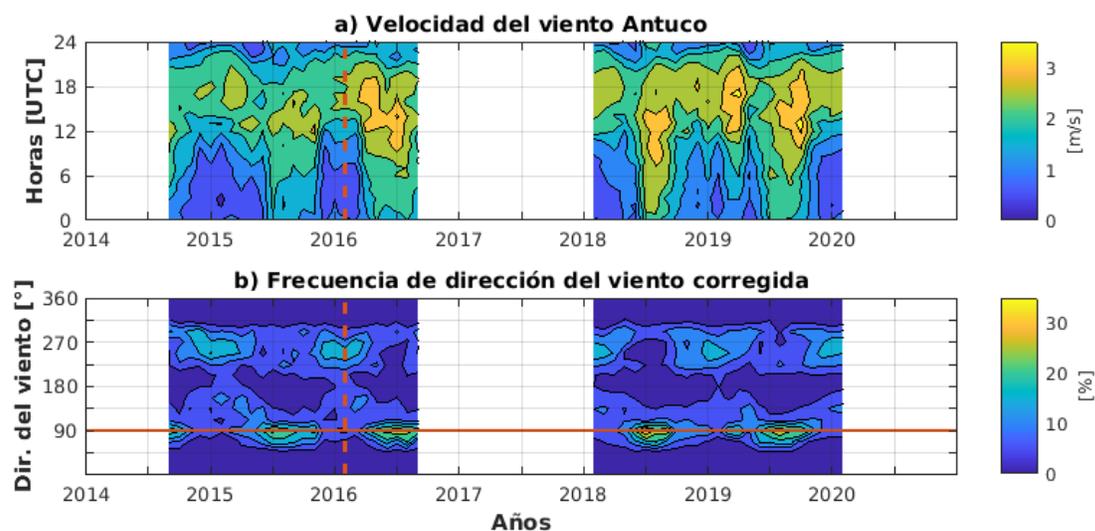


Figura 4.8: Como la figura 4.5, pero para el viento corregido de acuerdo al último periodo de toma de datos (entre 2018-2020).

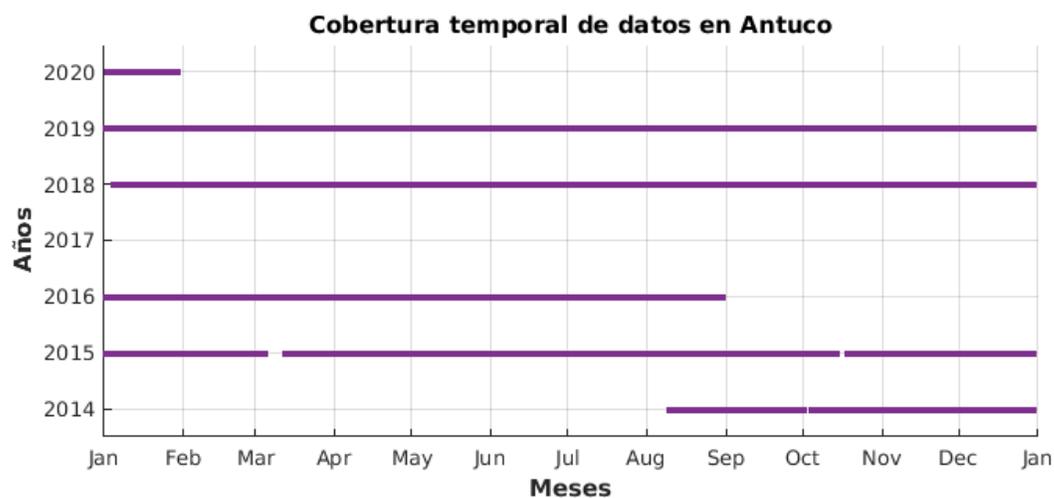


Figura 4.9: Periodos de tiempo que el producto final de datos horarios arreglados de ANT cubre por año.

### 4.1.3. Variables derivadas y coordenada temporal

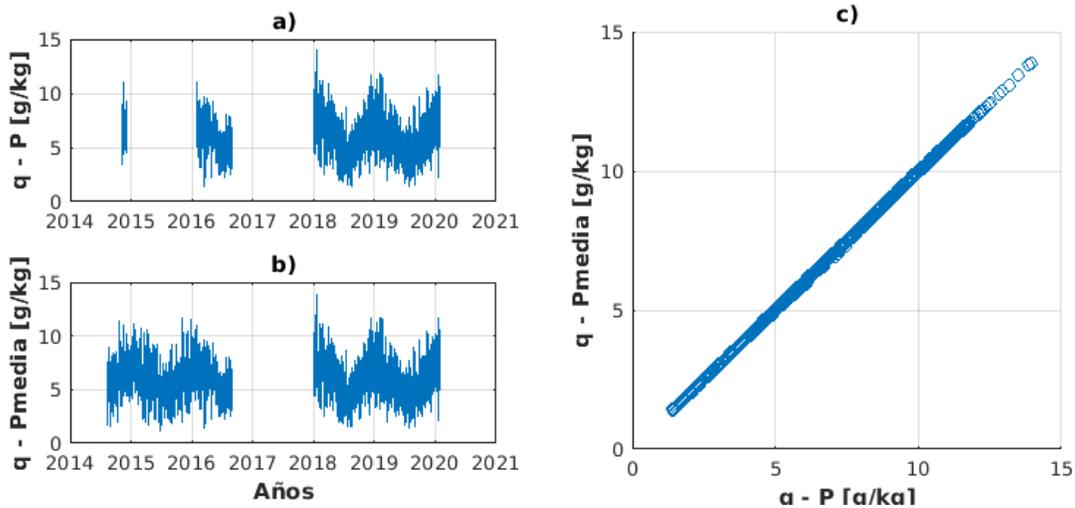


Figura 4.10: Serie de tiempo de la razón de mezcla  $q$  [g/kg], calculada a partir de los datos de presión y a partir del promedio de presión del periodo completo de toma de datos (paneles (a) y (b), respectivamente). El panel (c) muestra el diagrama de dispersión entre la razón de mezcla calculada por ambos métodos, donde aquella obtenida a partir de los datos de presión se encuentra en la abscisa y en la ordenada,  $q$  calculada a partir de la presión media.

Se calculó la razón de mezcla ( $q$ ) de vapor de agua en el aire a partir de la humedad relativa (HR), temperatura ( $T$ ) y presión ( $P$ ). Para esto se implementaron las siguientes ecuaciones obtenidas de Stull (2016) (p. 88-92):

$$e_s = e_0 \cdot \exp \left[ \frac{L}{\mathfrak{R}_v} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad [hPa] \quad (4.1)$$

donde  $e_s$  corresponde a la presión parcial de vapor de agua saturado,  $e_0 = 6,11$  [hPa],  $T_0 = 273,15$  [K] y  $L/\mathfrak{R}_v = 5,42 \cdot 10^3$  [K]. Luego, a partir de  $e_s$  se calcula al razón de mezcla saturada:

$$q_s = \varepsilon \frac{e_s}{P - e_s} \quad [g/kg] \quad (4.2)$$

donde  $\varepsilon = 622$  g/kg. Finalmente se puede calcular la razón de mezcla a partir de  $q_s$  y la humedad relativa, usando la siguiente aproximación:

$$q \approx q_s \frac{HR}{100} \quad [g/kg] \quad (4.3)$$

Debido a que se tienen pocos datos de presión atmosférica previo al 2016, se planteó la posibilidad de calcular  $q$  utilizando la presión promedio entre el 2014 y 2020, de forma que se tengan

más datos de  $q$  en ese periodo. Antes de hacerlo, se estudió el posible impacto que podría tener esto en el resultado. En la figura 4.10 los paneles (a) y (b) muestran las series de  $q$  calculadas a partir de la serie de tiempo de presión y de su promedio, respectivamente. A primera vista las curvas se ven iguales, pero para tener mayor certeza, el panel (c) muestra el diagrama de dispersión entre ambas formas de calcular  $q$ , para los periodos coincidentes de tiempo que poseen datos. Se puede observar una relación perfecta entre ambos cálculos de  $q$ , con una correlación de 1. De esta forma se decidió calcular  $q$  a partir del promedio de presión, y utilizarla como variable de humedad principal en el estudio.

Por último, se cambiaron todos los datos de hora UTC a hora local de la forma UTC-4. Por lo tanto, de ahora en adelante todas las figuras y análisis se realizarán en hora local.

## 4.2. Climatología de la estación Antuco

La climatología general del valle será descrita en base a la estación meteorológica principal ANT, a partir de figuras de contornos de la variación estacional de las variables meteorológicas respecto a su ciclo diurno (figuras 4.12 a 4.15). Además, cabe recordar que son dos las estaciones principales en las que se enfocará el estudio: verano e invierno extendido. De esta forma, cada vez que se mencione verano/invierno o estación cálida/fría, se refiere a estaciones compuestas por 6 meses, como se define en la sección 3.3.1.

Primero que todo, para ayudar al análisis subsecuente, se calculó la radiación incidente en ANT, bajo condiciones ideales de cielos despejados (e.g. Stull, 2016, p. 44). Se muestra la información como contornos de promedios mensuales del ciclo diurno (figura 4.11). Es necesario tener en cuenta que el cálculo realizado de radiación incidente sobre la superficie terrestre no considera la sombra provocada por topografía circundante, por lo que puede haber una diferencia en el inicio y final de las horas de Sol, así como de la magnitud de la radiación. Como era de esperarse, la radiación incidente posee un marcado ciclo diurno y estacional, ya que estos corresponden a ciclos forzados por la posición del Sol respecto a la Tierra. En la figura 4.11 se observa que los valores de máxima y mínima radiación incidente se desarrollan en diciembre y junio respectivamente, correspondiendo los demás meses a una transición entre estos. Las magnitudes máximas de ambos meses se desarrollan a las 13 HL con valores por sobre los  $900 \text{ W/m}^2$  en diciembre y alrededor de los  $470 \text{ W/m}^2$  en julio. El inicio de las horas de Sol ocurre entre las 06-07 HL durante el verano extendido, terminando estas entre las 18-19 HL. Durante el invierno extendido, las horas de Sol comienzan entre las 08-09 HL, terminando entre las 17-18 HL. Por lo tanto, la duración de las horas de día varía entre 13 y 8 horas de verano a invierno, respectivamente.

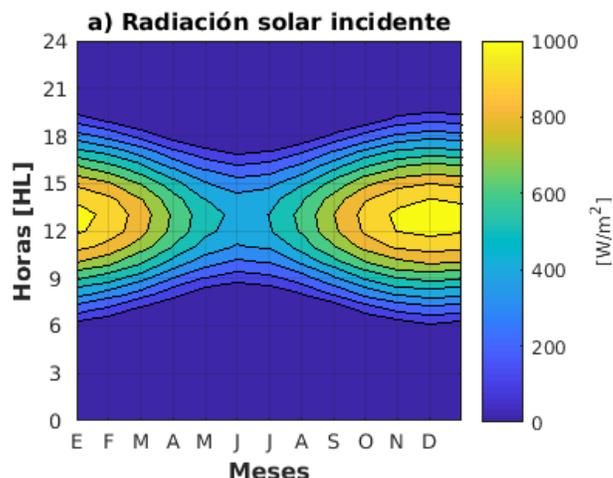


Figura 4.11: Variación estacional del ciclo diurno de radiación solar incidente [ $W/m^2$ ] en superficie, calculada para la ubicación de la estación meteorológica ANT, bajo condiciones de cielos despejados (e.g. Stull, 2016, p. 44). Los contornos se muestran cada  $100 W/m^2$ .

Los ciclos diurnos y estacional de la temperatura están directamente relacionados con la radiación incidente (panel (a), figura 4.12). Los meses en que se alcanzan los valores más altos y más bajos de temperaturas corresponden a febrero y julio, respectivamente. La temperatura media máxima diurna corresponde a  $27^{\circ}C$  a las 16 HL en febrero y a  $15^{\circ}C$  a las 15 HL en julio. Por lo tanto, se tiene que la temperatura del aire presenta un desfase tanto en el ciclo diurno como el estacional respecto a la climatología de la radiación incidente. Por otro lado, la temperatura promedio mínima diurna en febrero es de  $13^{\circ}C$  a las 06 HL y de  $6^{\circ}C$  a las 08 HL en julio. De esta forma se tiene que la amplitud térmica diaria media es mayor en verano, siendo su máximo valor de  $14^{\circ}C$ . En invierno, en cambio, la amplitud térmica puede ser menor a la mitad de la amplitud de verano, llegando a ser de  $6^{\circ}C$  en el promedio de julio. Esta diferencia estacional en la amplitud térmica es denotada en la figura 4.12 por el gradiente de colores en verano e invierno extendido.

En el panel (b) de la figura 4.12, se tiene la climatología de la presión atmosférica. Se debe tener en cuenta que debido a los problemas presentados en el sensor de presión de la estación ANT1, se tuvieron menos datos para calcular la climatología. Los datos utilizados equivalen a aproximadamente 3 años de información. En la figura se puede observar con claridad el ciclo semidiurno de la presión alrededor de todo el año, cuyos valores máximos se centran a las 11 y 22 HL y sus valores mínimos aproximadamente a las 04-05 y 17 HL durante el día. Respecto al comportamiento de la presión a lo largo del año, se tiene que presiones bajo los 953 hPa se desarrollan típicamente durante el verano, centrándose los valores mínimos mayormente en febrero. En cambio, durante el invierno extendido se desarrollan presiones por sobre el umbral

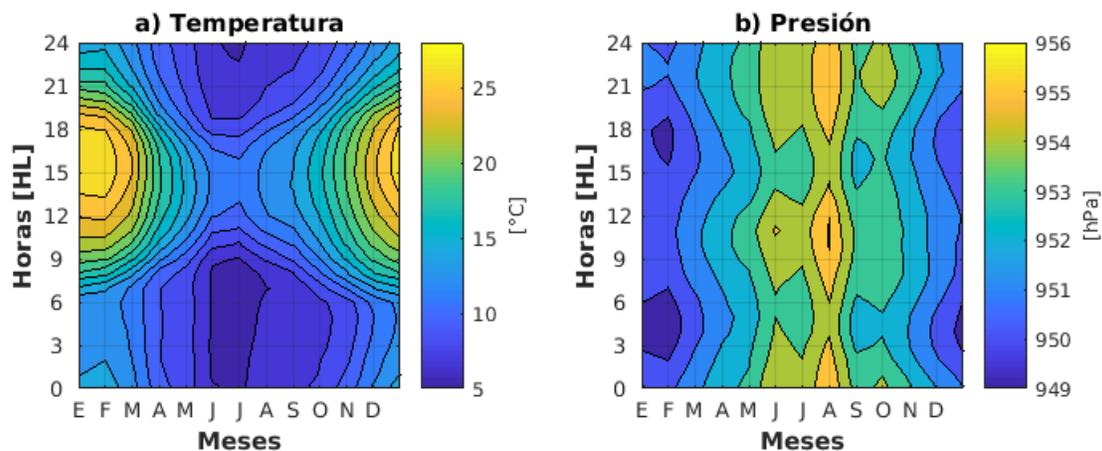


Figura 4.12: Variabilidad estacional del ciclo diario de temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ] y presión atmosférica [hPa] (paneles (a) y (b), respectivamente). Los contornos de la temperatura se muestran cada  $1,5^{\circ}\text{C}$  y los de presión, cada 1 hPa. Los tonos amarillos corresponden a valores altos y los azules a bajos.

mencionado, donde el máximo de 956 hPa se centra en agosto. Sin embargo, se observan dos máximos locales adicionales de menor magnitud en junio y octubre. Cabe destacar que la amplitud en que varía la presión promediada es de  $\sim 4$  hPa entre estaciones, y de  $\sim 2$  hPa durante el día.

Respecto a la humedad del aire, se decidió mostrar la climatología tanto de la humedad relativa como de la razón de mezcla de vapor de agua (panel (a) y (b) de la figura 4.13). La humedad relativa depende fuertemente de la temperatura, razón por la cual posee una fuerte relación con los ciclos de esta variable (figura 4.12, panel (a)). Los mínimos diarios se desarrollan durante todo el año entre las 11 y las 19, centrándose en febrero a las 16 HL y en julio a las 13 HL, con valores de 31 % y 56 % respectivamente. Este patrón concuerda con las horas de magnitudes altas en el ciclo diario de temperatura. Asimismo, los máximos diarios se relacionan a bajas temperaturas durante la noche y madrugada. A lo largo del año se observan dos máximos nocturnos. Uno de estos se ubica alrededor de abril y el otro a finales de octubre y comienzos de noviembre entre las 21 y 06 HL.

La climatología de la razón de mezcla muestra una llamativa particularidad en cuanto a la variación del ciclo diario a lo largo del año (panel (b), figura 4.13). En primer lugar, respecto al ciclo estacional, se puede observar que  $q$  es mayor en verano, oscilando sus valores aproximadamente entre los 6-8 g/kg y entre 4-6 g/kg en invierno. Por lo tanto, se tiene además que la amplitud de variación de  $q$  es baja a lo largo de todo el año. Respecto al ciclo diario, por un lado se tiene que los meses cálidos presentan un doble máximo (ciclo semidiurno), con valores de 7-8 g/kg centrados a las 12 HL y 21 HL. Este ciclo podría ser más bien descrito como un máximo

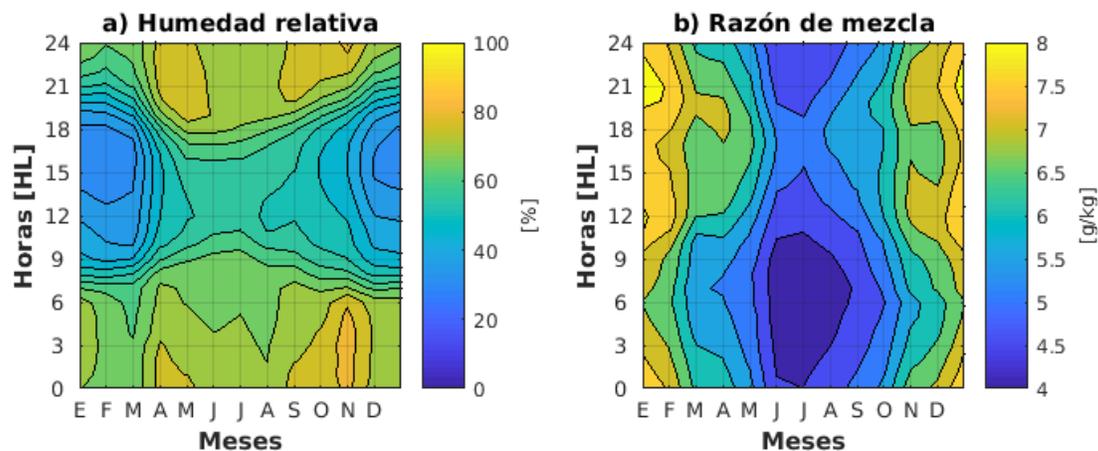


Figura 4.13: Como figura 4.12 pero para la humedad relativa [%] y razón de mezcla [g/kg] en paneles (a) y (b), respectivamente. Los contornos de humedad se muestran cada 5% y los de  $q$ , cada 0.3 g/kg.

interrumpido por un mínimo local a alrededor de las 16-17 HL, centrado aproximadamente a la misma hora que el máximo de invierno. El resto del año en cambio, se observa un único máximo diurno, con valores de hasta 5 g/kg entre las 14 y 21 HL. Se tiene, además, que el mínimo más bajo se alcanza durante todo el año alrededor de las 06 HL. Respecto al ciclo diurno, este puede ser explicado por el ciclo de temperatura, ya que a mayor temperatura, mayor cantidad de vapor de agua puede contener una parcela de aire. Esto podría explicar a su vez el ciclo estacional, el cual muestra a verano como la estación con mayor razón de mezcla de vapor de agua.

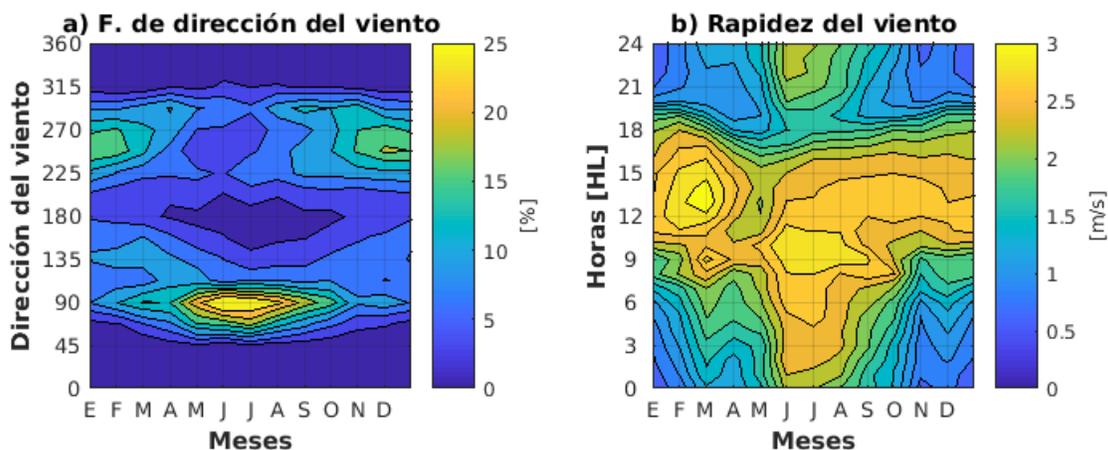


Figura 4.14: Climatología de la frecuencia de dirección del viento mensual [%] y velocidad del viento [m/s] en paneles (a) y (b), respectivamente. Los contornos de frecuencia son mostrados cada 3% y los de velocidad cada 0.5 m/s.

La figura 4.14, panel (a), muestra la climatología del ciclo estacional de la frecuencia de dirección del viento. Se observa que hay una mayor frecuencia de vientos alrededor de dos direcciones principales a lo largo del año, correspondiendo a vientos principalmente del este en invierno y del oeste en verano. Durante la estación fría, la dirección de preferencia corresponde al rango en torno a los  $90^\circ$ . Más del 15% de los vientos de ese periodo se desarrollan en el rango entre  $50^\circ$  y  $115^\circ$ . Además, se observan vientos alrededor de los  $135^\circ$  con una frecuencia mayor entre enero y marzo en comparación al resto del año. Durante la estación cálida, más del 10% del viento posee una dirección mayormente entre los  $225^\circ$  y  $290^\circ$ , cuyo valor máximo se centra cerca de los  $250^\circ$  durante diciembre, con frecuencias de hasta 18%. Esta dirección de preferencia parece cambiar en invierno, centrándose con frecuencias más bajas alrededor de los  $225^\circ$  y  $290^\circ$  por separado. Por lo tanto, los vientos parecen provenir especialmente del este en invierno y del oeste en verano. Esto se explica debido a la orientación del valle, donde se encuentra la estación meteorológica ANT, la cual es mayormente zonal. Además, existe una estacionalidad en las frecuencias máximas de vientos, donde se tiene que en verano dominan los vientos valle-arriba y en invierno los vientos valle abajo, lo cual se verá también en el panel (a) de la figura 4.15. Esto está relacionado con el ciclo del forzante radiativo de los vientos diurnos de montaña. También se concluye que existe una estacionalidad en la dirección en la que se centran la mayor frecuencia estos vientos del este y del oeste.

En el panel (b) de la figura 4.14 se muestran tanto el ciclo diurno como estacional de la rapidez media del viento. Lo primero que se puede observar, es que el rango de la magnitud es bajo, con vientos promedio entre los 0 y 3 m/s. Como se verá más adelante, los vientos típicamente tienen valores dentro de ese rango, con eventos particulares de magnitudes mayores que son filtrados al calcular la climatología. Respecto al ciclo diurno, se tiene que en verano hay una mayor amplitud de la magnitud de los vientos durante el día, con intensidades máximas entre las 10 y 18 HL. El pico se desarrolla a las 13 HL, siendo este mayor en marzo. Por las noches los vientos son más calmos, con valores mínimos de hasta 0.6 m/s. En invierno el promedio de las intensidades se encuentra por sobre 1 m/s. El ciclo diurno cambia respecto al verano. Entre las 01 y 16 HL aproximadamente, se desarrollan las intensidades máximas del viento. El centro de este máximo se desarrolla a las 10 HL, con valores de hasta 3 m/s. Por otra parte, los mínimos se centran a alrededor de las 19 HL. La estacionalidad del ciclo diurno de la magnitud del viento está probablemente relacionada al ciclo diurno de vientos de montaña, ya que, como se dijo anteriormente, los vientos valle-arriba dominan en verano (durante el día) y los vientos valle abajo en invierno (especialmente durante la noche). En el análisis que viene a continuación complementará lo recién descrito.

Además de la dirección y magnitud del viento, también se calcularon las climatologías de las componentes zonal (U) y meridional (V) del viento, lo cual se puede observar en la figura 4.15.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la dirección del valle en la estación principal es zonal, razón por la cual la componente U domina por sobre V (panel (a) y (b) respectivamente). La comparación del rango de magnitudes de ambas componentes da cuenta de esto (ver los colores de las figuras). El intervalo en que varía U es  $-2.5$  m/s a  $2.5$  m/s, en cambio, V varía entre  $-0.4$  m/s y  $0.6$  m/s. Respecto a U, en el panel (a) se visualiza con claridad el ciclo de los vientos diurnos de montaña y sus cuatro fases principales descritas por Whiteman (2000). Al ser estos vientos forzados por calentamiento horizontal diferenciado, se tiene que el patrón de la climatología de U se asemeja tanto al de la climatología de temperatura como la de radiación incidente. Por lo tanto, los vientos diurnos poseen una fuerte estacionalidad.

En el caso del valle del río Laja, o más específicamente, de la zona de Antuco, la fase de transición

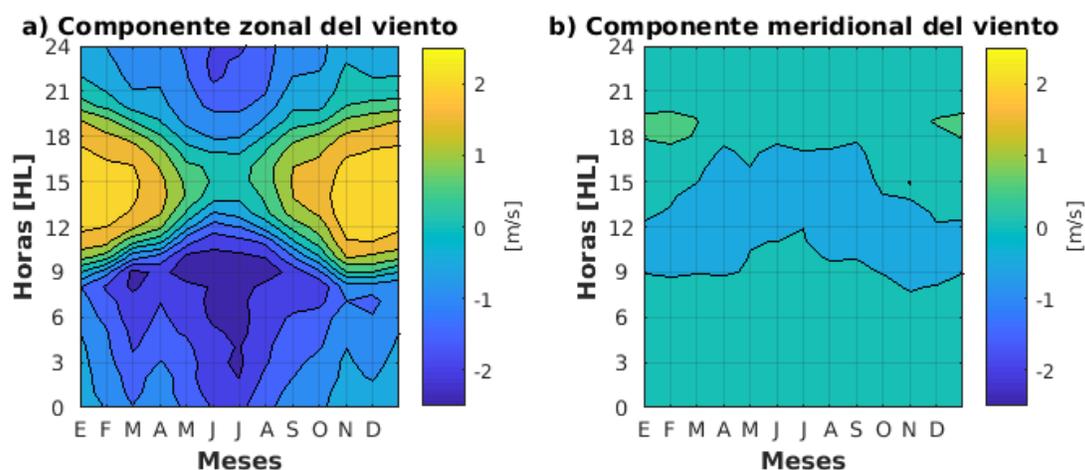


Figura 4.15: Como figura 4.12 pero para las componentes del viento U y V [m/s] en paneles (a) y (b), respectivamente. Ambos contornos se muestran cada  $0.5$  m/s.

de la tarde ocurre alrededor de las 20 y 23 HL en la estación cálida, y alrededor de las 16 y 20 HL en la estación fría. En esta fase, los vientos revierten su signo, pasando de dirigirse valle-arriba (+) a dirigirse valle-abajo (-). En la fase nocturna, los vientos se mantienen en dirección valle-abajo, con valores relativamente bajos durante el verano, llegando a un máximo de  $-1$  m/s. En los meses de invierno en cambio, los vientos valle-abajo son más intensos que su contraparte, llegando a valores promedio de hasta  $-2.5$  m/s. El pico de la intensidad durante esta fase se logra en la madrugada (07 HL en verano y 09 HL en invierno), cuando la pérdida de calor por parte de la superficie llega a su punto cúlmine. La fase de transición de la mañana corresponde al cambio de dirección de los vientos, donde estos pasan de ir en dirección valle-abajo (-) a dirigirse valle-arriba (+). Se desarrolla alrededor de las 08-10 HL en verano, y alrededor de las 10-14 HL en invierno. En la fase diurna los vientos mantienen su dirección valle-arriba. Esta fase tiene mayor duración durante los meses de verano, durando hasta 12 horas y llegando a intensidades

de hasta 2.5 m/s. En invierno este periodo se ve restringido en promedio a alrededor de 3 horas, alcanzando valores máximos más bajos que en verano ( 0.4 m/s). Por lo tanto, como se vio en el panel (a) de la figura 4.14, los vientos del este dominan en invierno y los del oeste en verano. Respecto a esto, la figura 4.15 nos proporciona nueva información. En verano, los vientos del oeste dominan en cuanto a intensidad, por sobre los vientos valle-abajo nocturnos. En cambio en invierno, los vientos del este dominan en cuanto a intensidad y duración.

Respecto a la componente meridional, se puede observar en el panel (b) que esta posee un ciclo diurno y estacional muy débil. Durante todo el año dominan los vientos con una débil componente sur alrededor de todo el día, a excepción de un periodo con una, también débil, componente norte que se desarrolla en invierno entre las 11 y 17 HL. En verano, en cambio, este periodo se desarrolla más temprano, entre las 09 y 13 HL aproximadamente. Además, en verano se tiene un máximo de  $V$  positivo a las 19 HL. Debido a las características descritas de las componente  $U$  y  $V$ , se puede explicar el ciclo diurno y estacional de la rapidez del viento (figura 4.14, panel (b)), cuyo patrón de valores máximos (color amarillo) se asemeja al patrón de magnitudes máximas de  $U$  (color amarillo y azul oscuro).

En la figura 4.16 se muestra la climatología del ciclo diurno de la frecuencia de dirección del viento. Se observa concordancia con la figura 4.15, respecto a los ciclos de vientos de montaña. Esto se puede corroborar más rápido mediante el cuadro 4.3. Las direcciones principales se denotan por las altas frecuencias, las cuales llegan a superar el 40% de vientos en las horas respectivas. En verano se tiene que dominan vientos del oeste (valle-arriba) entre las 08 y 21 HL aproximadamente. Entre las 21 y 10 HL se observan vientos principalmente del este, es decir, valle-abajo. En invierno, el periodo de vientos del oeste es más corto que su contraparte, desarrollándose entre las 10 y 19 HL. Entre las 18 y 13 HL se observan vientos del oeste. Las horas de transición entre ambas direcciones de vientos corresponderían aproximadamente a aquellas donde se superponen las distribuciones de mayores frecuencias. Respecto a las direcciones, en verano se tiene que durante el día la dirección principal de los vientos del oeste corresponde a aproximadamente los  $\sim 250^\circ$ . Previa y posteriormente a eso, la dirección es distinta por un par de horas, probablemente debido a la fase de transición del ciclo diurno. En la mañana esta dirección corresponde a  $\sim 225^\circ$  y antes del anochecer a  $\sim 290^\circ$ . Durante la noche parecen haber dos direcciones principales que se desarrollan también en distintos horarios. En la madrugada se tiene principalmente vientos de  $\sim 90^\circ$  de dirección, y previo a esto parecen dominar aquellos de  $\sim 135^\circ$ , en cuya dirección se ubica una montaña. Esto se puede deber a que al anochecer, se establecen en primer lugar los vientos ladera-abajo, para luego en la madrugada establecerse los vientos valle-abajo. En invierno se tiene que durante el día la dirección principal corresponde a  $\sim 290^\circ$ , con frecuencias menores entre los  $220^\circ - 270^\circ$ . Incluso frecuencias de hasta 6% se alcanzan alrededor de los  $225^\circ$  durante prácticamente todo el día. Durante la noche los vientos

se centran principalmente cerca de los  $90^\circ$ , con frecuencias menores en torno a los  $135^\circ$  hasta las 09 HL. Esto puede tener la misma explicación que en verano, pero en este caso dominan los vientos alrededor los  $90^\circ$  toda la noche, probablemente debido a la intensidad que los vientos valle-abajo toman en invierno (figura 4.15). De esta forma, se observa en la figura 4.16 cierta estacionalidad en las direcciones principales del viento, lo cual también se pudo notar en la figura 4.14.

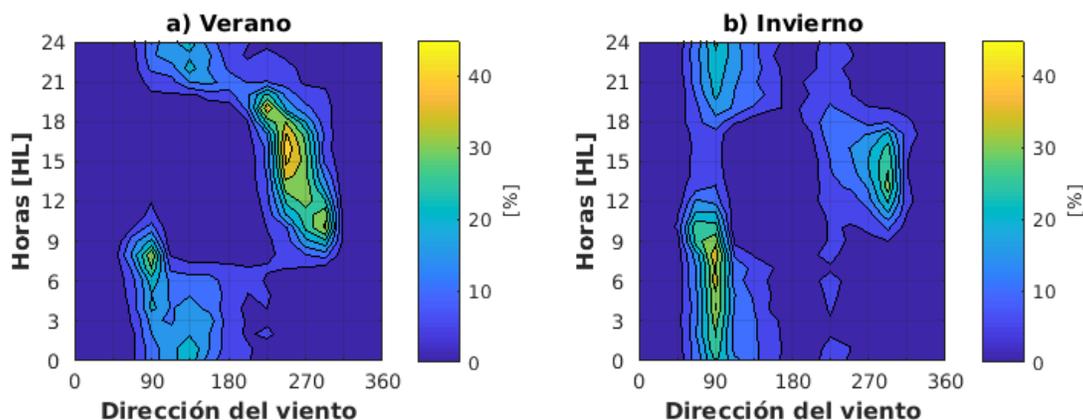


Figura 4.16: Ciclo diurno de la distribución del promedio horario de frecuencia [%] de dirección del viento en verano (a), correspondiendo a los meses entre octubre y marzo, e invierno (b), el cual contiene los meses entre abril y septiembre.

### 4.3. Caracterización de vientos Puelche

Para realizar una caracterización de eventos de vientos fuertes valle-abajo, es necesario primero determinar un método capaz de filtrarlos del ciclo diurno de vientos de montaña, descrito en la sección anterior (figura 4.15). La variable principal que se suele usar para la creación de métodos de identificación de este tipo de eventos es la velocidad del viento. Por una parte, se tiene que estos poseen una dirección particular determinada por la orientación del valle, de forma que el flujo se dirija hacia la dirección descendente del valle. Otra cualidad de importancia que poseen estos eventos, es la magnitud de su velocidad, usualmente alta en relación al ciclo diurno. Por lo tanto, los filtros básicos comúnmente usados corresponden a dirección y magnitud del viento. Otros estudios utilizan también la temperatura y humedad como indicadores ya que, como se describe en el 1.1.3, estos flujos de vientos suelen ser cálidos y secos, por lo que se esperan saltos de ambas variables al inicio y final de los eventos.

### 4.3.1. Definición de Horas y Eventos Puelche

En el presente estudio se utilizó como referencia el trabajo realizado por Muñoz et al. (2020), por lo que la búsqueda del método se concentró en la dirección y magnitud del viento. Para esto, fue necesario estudiar la distribución general de los vientos con la finalidad de escoger una dirección principal de vientos Puelche y realizar una proyección de los vientos en esta dirección.

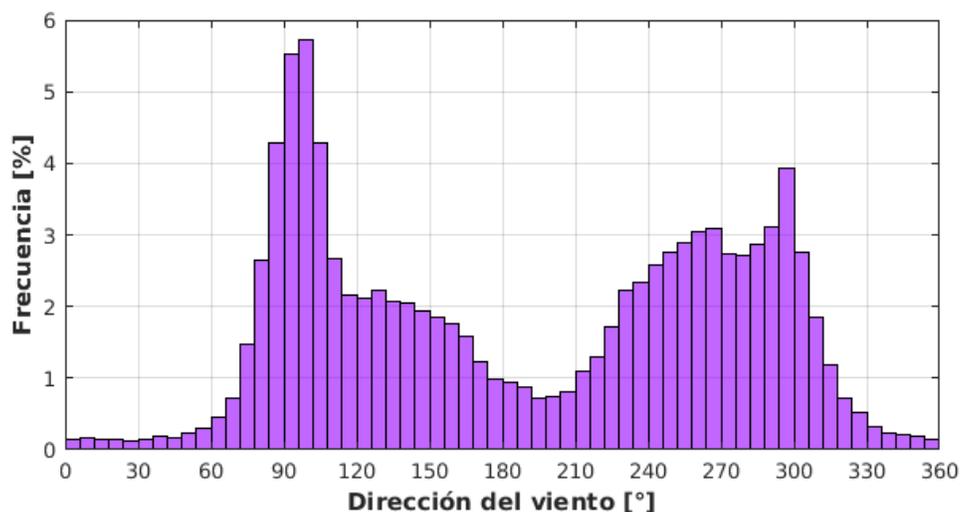


Figura 4.17: Histograma de la distribución de la dirección del viento [°] en la estación ANT.

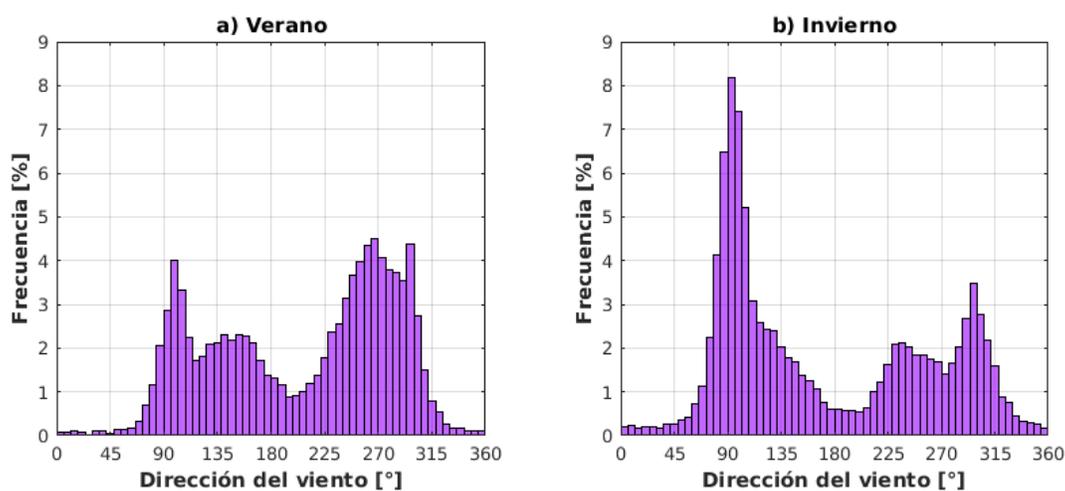


Figura 4.18: Como en 4.17, para los meses de octubre-marzo (verano) en (a) y los meses de abril-septiembre (invierno) en (b). Notar que el eje de las ordenadas muestra un rango distinto al de la figura 4.17.

En la figura 4.17 se observa la distribución de la dirección del viento en ANT. En ella se distinguen 3 modos de vientos principales. El modo con mayor frecuencia se centra en los  $90^\circ$ . Junto a este se tiene un segundo modo, con una frecuencia de aproximadamente la mitad del primero. Se centra alrededor de los  $\sim 135^\circ$  y posee un rango de dirección mayor al modo uno. Los dos modos ya descritos corresponden a vientos principalmente del este. Por último, se tiene un modo de vientos del oeste alrededor de los  $270^\circ$ , con frecuencias levemente mayores a las del modo dos. Este abarca un rango de dirección entre los  $220^\circ$  y los  $315^\circ$  aproximadamente, con un mínimo local aparente alrededor de los  $270^\circ$ . Las direcciones principales identificadas se relacionan con la orientación aproximadamente zonal del valle. En la figura 4.18 se observa la distribución de la dirección del viento en ANT para verano e invierno. Respecto al mínimo local mencionado, se observa que parece ser una característica de los meses de invierno, ya que este se pierde en verano. En la estación fría, el modo 3 presenta dos picos de frecuencia. Uno cerca de los  $225^\circ$  con una frecuencia de 2% y otro alrededor de los  $290^\circ$  con una frecuencia mayor al anterior ( $\sim 3\%$ ). Por otra parte, se ve que los vientos del modo 1 son más frecuentes en invierno, estación en la cual además el modo 2 parece mezclarse con el modo 1. Estas características ya se habían podido observar en las figuras 4.14 y 4.16.

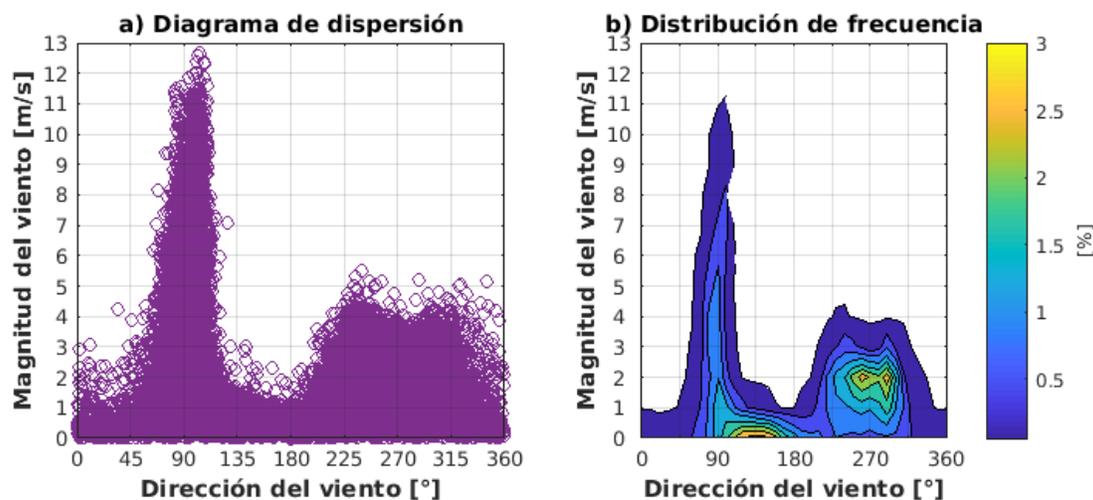


Figura 4.19: Diagrama de dispersión en (a) y distribución de frecuencias en (b) de la dirección del viento  $[\circ]$  (abscisa) respecto a la velocidad del mismo  $[\text{m/s}]$  (ordenada). En el panel (b) los colores amarillos (azules) indican donde la mayor (menor) cantidad de datos se concentran.

El panel (a) de la figura 4.19 muestra el diagrama de dispersión de la dirección del viento respecto a la magnitud del mismo. En ella podemos reconocer fácilmente el primer y tercer modos identificados en la figura 4.17. Se observa que los vientos más fuertes, alcanzan magnitudes por sobre los 12 m/s y corresponden a vientos del modo 1. El tercer modo alcanza magnitudes de hasta aproximadamente 4 m/s, considerablemente menores al primero descrito.

El panel (b), similar al panel (a), muestra la distribución de frecuencia de la dirección respecto a la magnitud del viento. Se observan 3 máximos locales de frecuencia. Por una parte, se tiene un máximo en el modo dos con magnitudes por debajo de los 1 m/s. En la dirección de este modo se ubica una montaña cercana, cuya altura máxima es de  $\sim 1900$  m. Estos vientos son más frecuentes en verano (figura 4.14 y 4.16) y pueden corresponder a vientos nocturnos ladera-abajo, como parte del ciclo de vientos de montaña. En verano estos vientos suelen ser débiles (figura 4.15). Los otros dos máximos locales se ubican en el tercer modo descrito, centrados alrededor de los 2 m/s. Ambos máximos se encuentran separados cerca de los  $270^\circ$ . Respecto al primer modo, se tiene que no presenta un centro de alta frecuencia, sino que aumenta levemente a medida que la magnitud del viento disminuye. Por lo tanto, los vientos Puelche corresponderían a los vientos intensos del modo 1, los cuales se podrían describir como relativamente poco frecuentes. La figura 4.20 muestra lo mismo que el panel (b) de la figura previa, pero para verano e invierno. Nuevamente, podemos corroborar que el mínimo local alrededor de los  $270^\circ$  corresponde a una característica principalmente de los meses de invierno, ya que en la estación cálida se observa solo un máximo en el modo 3. Por otra parte, se observa en invierno que el máximo de frecuencia del modo 2 se fusiona en parte con el modo 1. Este último presenta una mayor frecuencia en invierno que en verano, especialmente para vientos bajo lo 7 m/s.

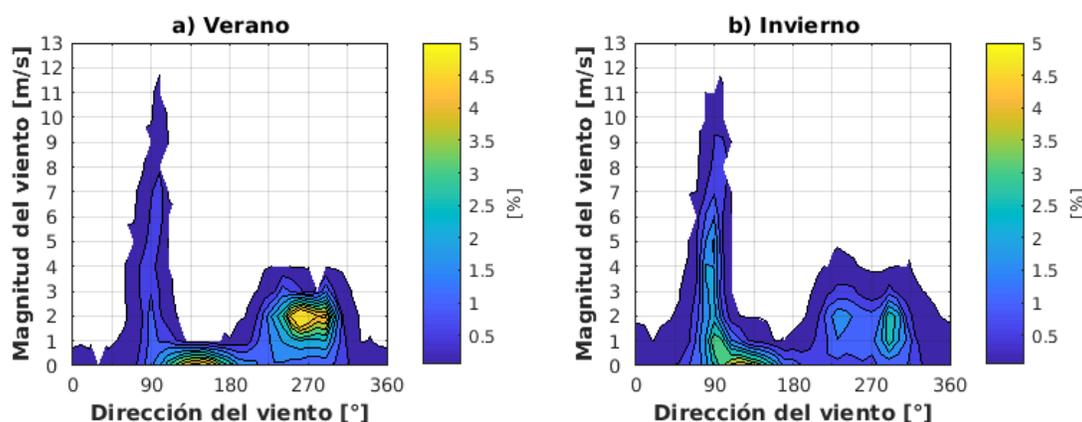


Figura 4.20: Como el panel (b) de la figura 4.19, para los meses de octubre-marzo (verano) en (a) y los meses de abril-septiembre (invierno) en (b). Notar que el rango de frecuencias es distinto al de la figura 4.19.

A partir de esta información y para estudiar la dirección principal de los vientos Puelche, se decidió escoger un umbral transitorio de velocidad del viento de 4 m/s, de forma que se filtren la mayor parte de los vientos a excepción de la porción de mayor magnitud del primer modo descrito en la distribución de la figura 4.19. El panel (a) de la figura 4.21 muestra la frecuencia mensual de dirección de vientos por sobre el umbral transitorio. Como era de esperarse a partir

del diagrama anterior, al no considerar los vientos bajo 4 m/s, se obtiene que la dirección dominante parece ser de  $90^\circ$  durante todo el periodo de toma de datos, con algunos valores en el rango del tercer modo de la distribución de los vientos. Al examinar detalladamente la figura, pareciera que las frecuencias más altas tuviesen un ciclo estacional en los distintos años. Debido a esto se calculó la climatología de 4 años de (a), lo cual se observa en el panel (b). De esta forma se filtra la información y se puede observar la distribución típica de las frecuencias más altas ( $\geq 20\%$ ) del viento sobre 4 m/s a lo largo del año. Para observar mejor, se hizo un acercamiento (panel (c)) entre los  $45^\circ$  y  $135^\circ$ . Se puede observar en él, cómo la dirección en que las frecuencias más altas se centran cambia levemente durante el año, posicionándose entre los  $95^\circ$  y  $100^\circ$  entre octubre y marzo, para pasar a un rango entre los  $90^\circ$  y  $95^\circ$  entre abril y septiembre. Esta estacionalidad encontrada da cuenta de la decisión de estudiar separadamente tanto verano como invierno extendido. Debido a esto se escogió como dirección Puelche los  $95^\circ$ , de forma que fuese una media de ambos periodos. Se procedió a proyectar los vientos en esta dirección, lo cual fue denotado como  $V_p$ . Se considera entonces que  $V_p < 0$  corresponde a vientos valle-arriba y  $V_p > 0$  a vientos valle-abajo.

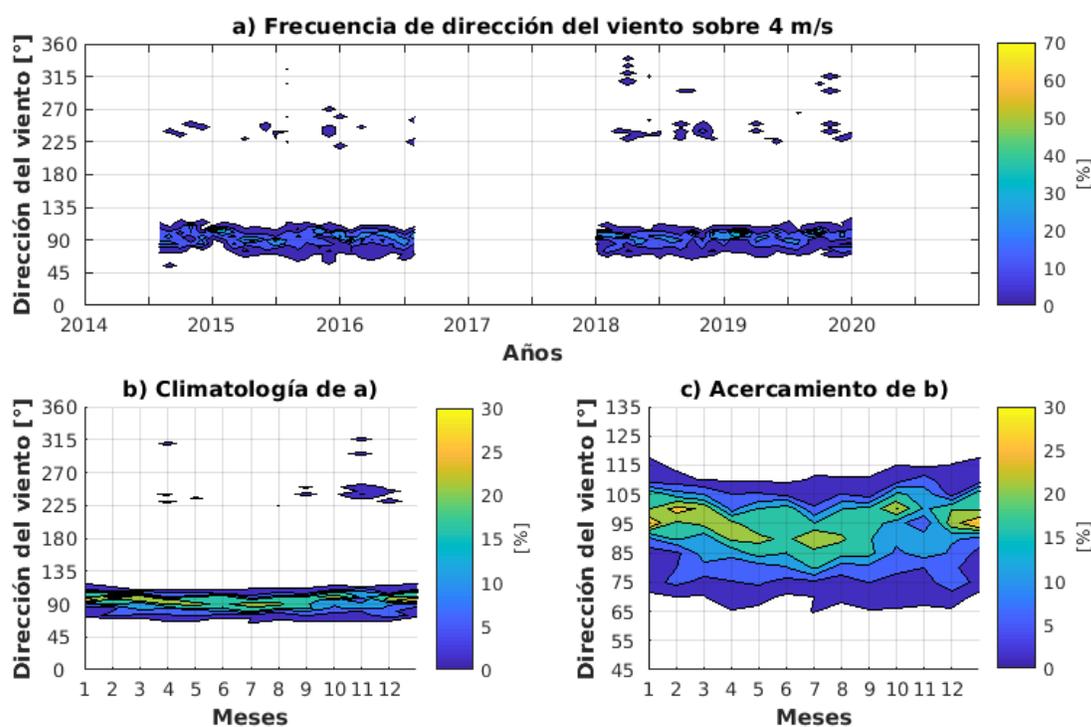


Figura 4.21: Contornos de frecuencia mensual de dirección de vientos  $[\circ]$  por sobre 4 m/s durante todo el periodo de toma de datos (panel (a)). El panel (b) corresponde a la climatología del panel (a). El panel (c) muestra un acercamiento de (b) alrededor de los  $90^\circ$ , entre los  $45^\circ$  y  $135^\circ$ . Los contornos se muestran desde el 1% en los 3 paneles.

Para asegurarse de que esté correcta la decisión de estudiar las estación de verano además de invierno, se decidió graficar la variable  $V_p$  durante el año 2019, con la finalidad de verificar si se observan días con desarrollo de vientos fuertes durante todo el año (figura 4.22). En colores rojos se muestran vientos por sobre los 4 m/s, donde los tonos más oscuros indican vientos entre los 9 y 13 m/s. Se observan eventos durante todo el año, con mayor frecuencia entre junio y octubre. En enero, noviembre y diciembre se desarrollan eventos que no abarcan días completos, en cambio entre febrero y mayo se observan eventos más largos. De hecho, el segundo evento del año que abarca un día completo fue asociado por el medio de comunicaciones elDesconcierto (12/02/19) con la propagación de incendios forestales en los cerros urbanos de Penco, San Pedro de La Paz, Florida, Coronel y Talcahuano, región del Bío Bío. Por lo tanto, la figura respalda la decisión de estudiar vientos Puelche en verano e invierno.

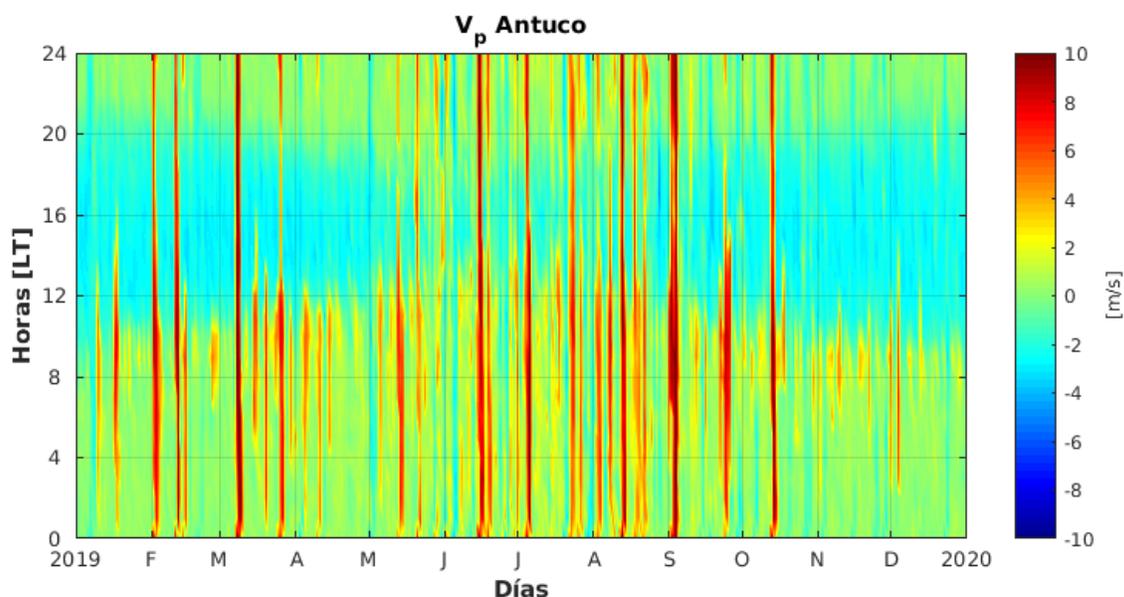


Figura 4.22: Evolución temporal de la variable  $V_p$  [m/s] durante el año 2019, donde se tienen los días en el eje de las abscisas y las horas en el eje de las ordenadas. Los tonos rojo oscuro indicarían la presencia de viento Puelche. Los vientos máximos alcanzan los 13 m/s, sin embargo la escala se saturó hasta los 10 m/s con el objetivo de que los eventos Puelche fueran notorios.

A continuación se graficó la distribución de  $V_p$  tanto en verano como en invierno (figura 4.23, paneles (a) y (b), respectivamente), de forma que se pudiese estudiar el umbral de vientos que determine las horas Puelche. En ambas estaciones se observa una clara bimodalidad. El primer modo se ubica entre los -4 m/s y  $\sim$ -1 m/s, correspondiendo por lo tanto a vientos valle-arriba. En verano esta se centra alrededor de los -2.5 m/s, llegando hasta los 600 datos (ordenada), y en invierno se centra cerca de los -1.8 m/s con una cantidad máxima de 400 datos. Lo mencionado concuerda con el ciclo diario de  $U$  (figura 4.15), el cual muestra que los vientos valle-arriba son

más intensos en verano que en invierno. El segundo modo corresponde a vientos valle-abajo, los cuales se centran en ambas estaciones por debajo de los 0.5 m/s. Este modo posee mayor cantidad de datos entre los 0-1 m/s sin embargo, se observa una cola con valores de hasta 11 m/s en los dos paneles, aunque con mayor cantidad de horas en invierno. Al no presentar cola el primer modo descrito, es decir, los vientos valle-arriba, y al encontrarse la cola separada del segundo modo, se asocia este último a los vientos valle-abajo nocturnos del ciclo diurno y la cola a vientos Puelche. Se consideró que 4 m/s es un umbral apropiado para filtrar el ciclo diurno y considerar sólo los eventos intensos del mismo. Además se determinó usar el mismo umbral para ambas estaciones del año, favoreciendo la homogeneidad del análisis.

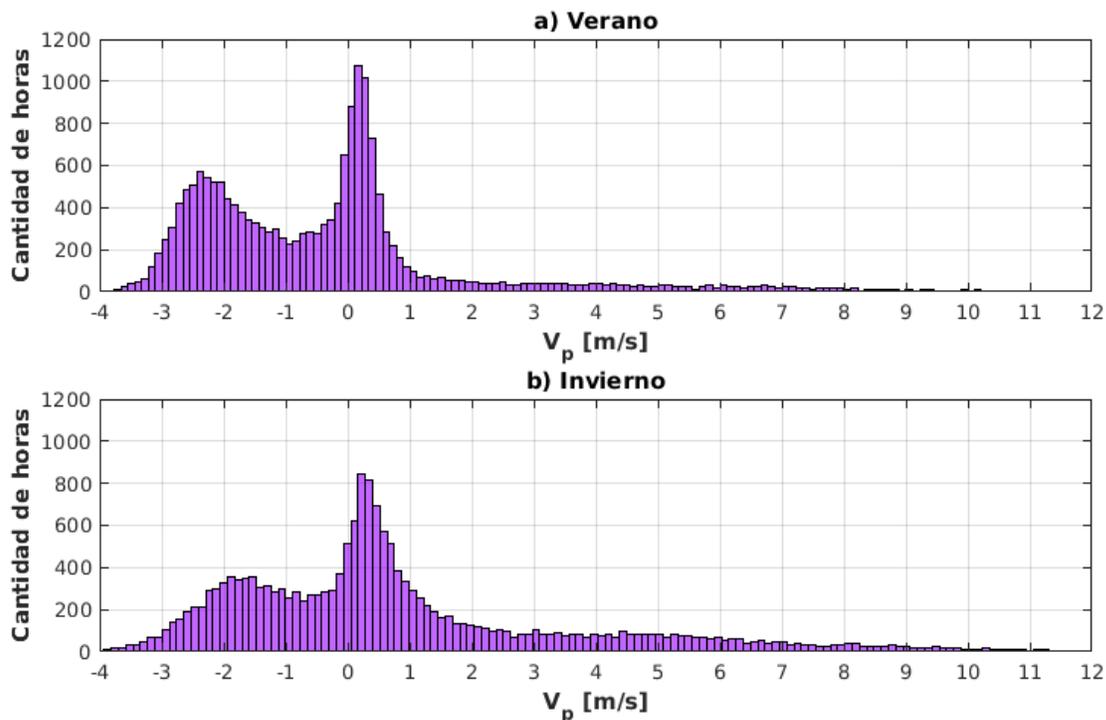


Figura 4.23: Distribución de la velocidad del viento proyectado en los  $95^\circ$  ( $V_p$ ). El panel (a) contiene los meses de verano y el (b) los de invierno. La abscisa corresponde a la velocidad y la ordenada a la cantidad de datos respecto a un total de 17976 datos en verano y 18133 en invierno.

Una vez con los vientos proyectados y el umbral de velocidad escogido, se procedió a buscar las denominadas horas Puelche (HP), las cuales se definen como  $V_p > 4$  m/s. Se encontraron 3658 HP en total, de las cuales 29.5 % corresponden a verano y 70.5 % a invierno. Estas horas corresponden a un total de 516 conjuntos de HP consecutivas, desarrollándose un 31 % en verano y un 69 % en invierno. También se definieron los eventos Puelche (EP), como la concatenación de conjuntos de HP originadas bajo el mismo forzante. Para esto, se parte de la base de que

no debe pasar mucho tiempo entre las HP a concatenar, y  $V_p$  del intervalo entre ellas no debe diferir mucho del umbral de vientos escogido. En la figura 4.24 (panel (a)) se graficó la duración de los intervalos entre HP, respecto a la velocidad mínima presentada durante los mismos. Se observa que los intervalos que duran más de un día poseen  $V_p$  mínima menor a -1 m/s. En cambio, aquellos intervalos con duración menor a 24 horas pueden tener un valor mínimo de hasta 4 m/s. En el panel (b) se hace un acercamiento de la zona de interés del panel (a). A partir de esta figura se definen dos umbrales alternativos para realizar la concatenación. Como guía se usa el espacio vacío ente los 0-1.7 m/s y 4-9 horas. Como  $V_p$  mínimo se escoge 1 m/s y una duración del intervalo de 4 horas. Por lo tanto, los intervalos deben cumplir una de las dos condiciones dadas, de forma que, todos los intervalos (puntos en el panel (b)) por sobre los umbrales indicados con las líneas rojas (sobre línea horizontal y a la izquierda de la línea vertical) pasan a ser parte de un EP. Con este método, se encontraron 396 EP, donde 35 % se desarrollaron en verano y 65 % en invierno.

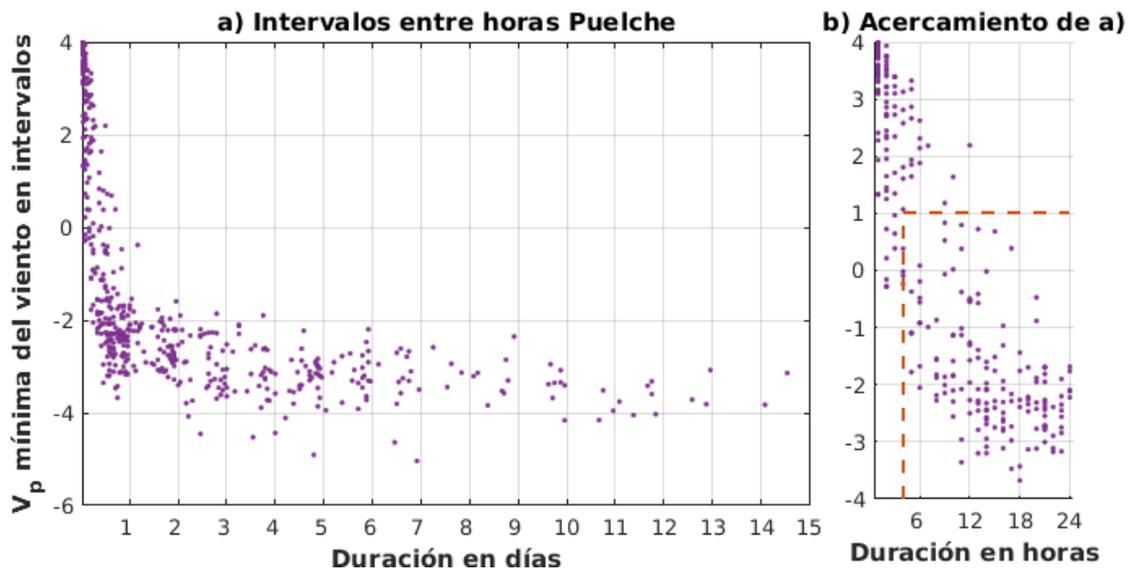


Figura 4.24: Duración en días de los intervalos entre HP (abscisa), respecto a  $V_p$  [m/s] mínima dentro del intervalo (ordenada), en el panel (a). En (b) se tiene un acercamiento del panel (a) de las primeras 24 horas de duración. Las líneas segmentadas rojas delimitan los umbrales de  $V_p=1$  m/s y  $t=4$  horas.

Antes de estudiar los eventos, se consideró de interés revisar las horas típicas del día en que se desarrollan HP. La figura 4.25 muestra el porcentaje de HP según la hora en que se desarrollaron. Este porcentaje se calcula respecto del total de horas con datos en la estación respectiva. Lo primero que se observa en el gráfico es que las frecuencias más altas se ubican en la madrugada y mañana, y las frecuencias más bajas durante la tarde. Además, se observa

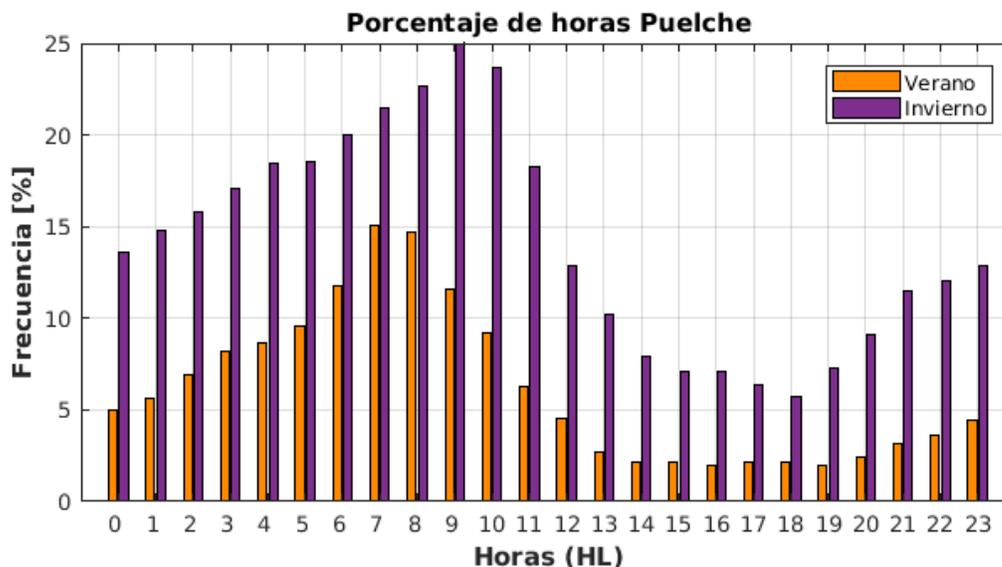


Figura 4.25: Distribución de la cantidad [%] de HP respecto a la hora en la que se desarrollan. Las barras color naranja corresponden a eventos de verano y aquellas color morado a eventos de invierno. El porcentaje fue calculado respecto al total de cada hora con datos para verano e invierno dependiendo del caso.

un desfase en el ciclo diurno entre las dos estaciones estudiadas. En verano e invierno se tiene el máximo porcentaje a las 07-09 HL, con valores de 15 % y 25 %, respectivamente. Respecto a los porcentajes mínimos, se tiene que en verano entre las 12-23 HL existe una baja frecuencia de HP, con valores por debajo del 5 % y con una media de 3 % en el intervalo de tiempo. En invierno, el intervalo de baja frecuencia de HP ocurre entre las 14-20 HL, donde los valores de cada hora se encuentran por debajo del 10 %, con una media de 7 % en el intervalo.

Estos máximos y mínimos parecen tener una fuerte relación con el ciclo diurno de U, y por lo tanto con los vientos diurnos de montaña. Para facilitar el análisis se creó un cuadro con las horas de las fases de transición de los vientos de montaña y las horas en que se desarrollan las magnitudes máximas de la fase diurna y nocturna (cuadro 4.3). Cabe notar que los inicios y finales de los intervalos de las fases de transición dan cuenta de las horas de finalización e inicio de los vientos valle-arriba y valle-abajo, respectivamente (capítulo 1.1.1).

Ciclo de U				
Fase Estación	Transición mañana	Máximo diurno	Transición tarde	Mínimo nocturno
Verano	08 - 10	15	20 - 23	07-08
Invierno	10 - 14	15	16 - 20	09

Cuadro 4.3: Fases de vientos diurnos de montaña reconocidos en el ciclo diurno de la componente zonal del viento U (figura 4.15). Las horas se expresan en HL.

Al observar el cuadro y la figura, se encuentra una relación entre la disminución de los porcentajes de desarrollo de HP con las horas donde se desarrollan vientos valle-arriba. Además, las horas con máximo desarrollo de HP coincide con las horas de mayor magnitud de vientos valle-abajo. Por lo tanto, pareciera a primera vista haber una relación entre los vientos Puelche y los vientos diurnos, donde estos últimos refuerzan la ocurrencia de las HP durante su fase valle-abajo. Lo opuesto ocurriría con la fase valle-arriba. A pesar de esto último, los intervalos definidos anteriormente como de baja frecuencia de HP, contienen un 14 % y un 23 % del total de HP de verano e invierno, respectivamente.

Respecto a los EP, la figura 4.26 muestra la frecuencia de eventos según su duración en horas. Los eventos en ambas estaciones duran típicamente menos de 18 horas. Un 33 % de los eventos de verano duran 1 o 2 horas, siendo esto un 31 % en el caso de invierno. Entre 3 y 8 horas duran un 37 % y un 31 %, de los EP de verano e invierno, respectivamente, y entre 9 y 18 horas un 22 % de los eventos de verano y un 23 % de los de invierno. Sin embargo, también ocurren eventos que superan las 18 horas de duración. Estos corresponden a un 8 % y 15 % en verano e invierno, respectivamente. Los EP más largos llegaron a durar 55 horas en la estación cálida y 79 horas en la fría.

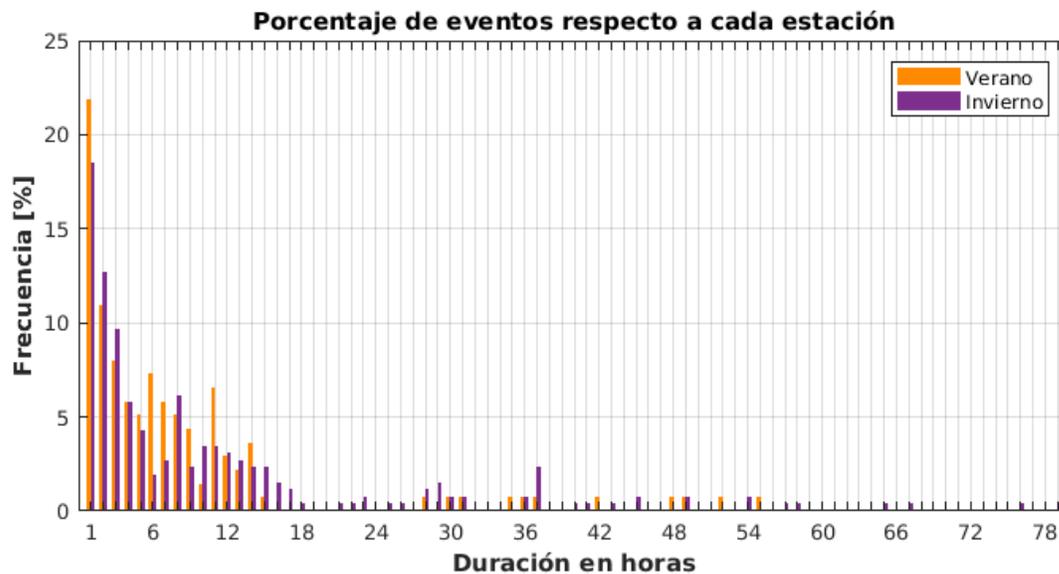


Figura 4.26: Distribución de la duración en horas de los eventos de verano (barras naranjas) e invierno (barras moradas). La frecuencia se expresa en [%] y se calcula respecto al total de eventos de invierno y verano para cada caso. Un 5 % de frecuencia equivale a 7 eventos para el verano y 13 para invierno. La barra más pequeña morada (ejemplo 18 h) y naranja (ejemplo 48 h) corresponden a un evento.

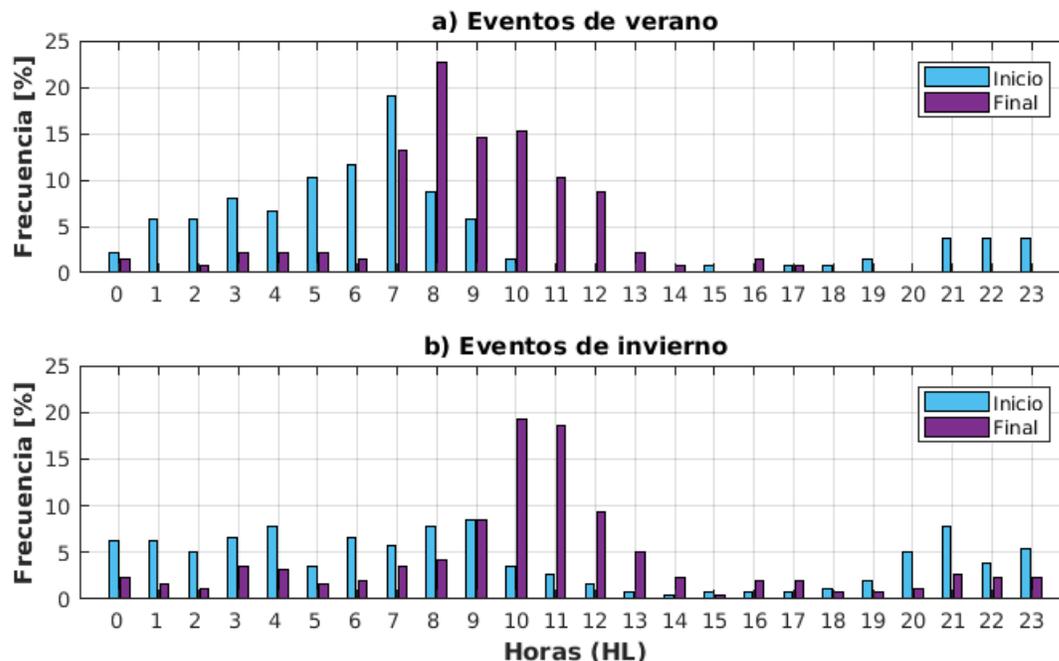


Figura 4.27: Distribución de frecuencia [%] de eventos de acuerdo a su hora de inicio (barras celestes) y final (barras moradas). El panel (a) corresponde a eventos de verano y el panel (b) a eventos de invierno. Los porcentajes se calcularon respecto al total respectivo de eventos por estación,

Los inicios y finales de los eventos son de suma importancia, ya que saltos tanto de temperatura, humedad, como de la velocidad misma, se esperan en ambos puntos de un evento. Las horas típicas de inicio se observan en las barras celestes de la figura 4.27. En las dos estaciones estudiadas se tiene que los inicios se dan principalmente durante la noche. En verano, estos ocurren entre las 21-09 HL, incrementando la frecuencia a las 05 HL hasta encontrar un mayor porcentaje alrededor de las 07 HL, para luego decaer rápidamente. En invierno, entre las 20-09 HL los porcentajes se mantienen casi constantes, con valores típicamente de entre 5% y 10%. Como en la figura 4.25, estos comportamientos podrían relacionarse con los vientos diurnos de montaña. En verano el pico de magnitud nocturno de  $U$  (cuadro 4.3) coincide con la máxima frecuencia de inicios de EP. En invierno, las frecuencias casi constantes podrían relacionarse con el largo intervalo de vientos relativamente fuertes como parte del régimen nocturno de vientos valle-abajo, reforzando por igual el inicio de los EP durante el mismo. Esta relación abre la pregunta respecto a la posibilidad de confusión entre EP y vientos diurnos de montaña intensos, especialmente en verano. Durante las horas de sol, la ocurrencia de inicios ( $\sim 15$  HL), es sumamente baja en comparación al resto del día, aunque sí existen algunos casos. Respecto a las horas de finalización (barras moradas), frecuencias que superen el 5% suelen ocurrir durante

la mañana, previo a las 13 HL, es decir, antes del establecimiento de los vientos valle-arriba (cuadro 4.3). En verano, las horas típicas de finalización ocurren entre la 07-12 HL, donde un 85 % de la finalización de eventos de esa estación ocurre. En invierno, entre las 09-12 HL se concentra el 56 % de finalización de eventos. Este porcentaje es menor, ya que entre las 21-08 HL se observa ocurrencia de finalización de EP mayor a aquella ocurrida en la estación cálida. Respecto a los intervalos de mayor frecuencia de finalización mencionados, se estima que cuando el forzante principal de los EP se encuentra débil en relación al forzante diurno, los vientos Puelche se atenúan, provocando un cambio de dirección del viento valle-abajo debido al inicio de los vientos valle-arriba diurnos, disipando de esta forma los EP. Cabe destacar que el intervalo de verano abarca hasta después de la fase de transición, lo cual podría indicar que el forzante de los EP en verano sea difícil de ser contrarrestado por el forzante de vientos térmicos de montaña, al menos hasta que este último alcance su pico diurno, y por lo tanto, alcance también magnitudes más altas del flujo valle-arriba.

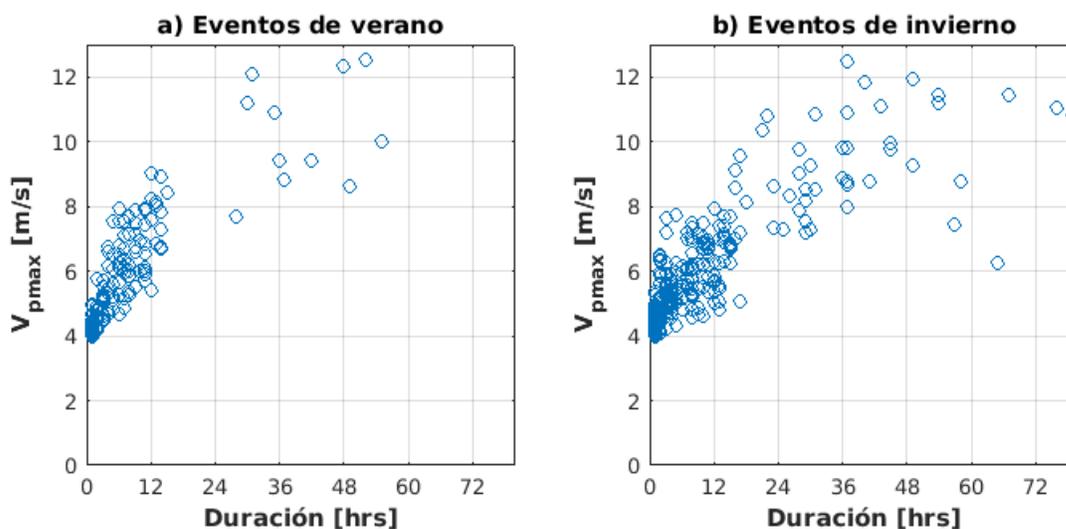


Figura 4.28: Diagrama de dispersión de la duración en horas de los eventos (abscisa), respecto del valor máximo de  $V_p$  [m/s] desarrollado en el mismo (ordenada). Los paneles (a) y (b) corresponden a eventos de verano e invierno respectivamente.

Como forma de estudiar la intensidad de los EP, se decidió revisar la relación de  $V_p$  máximo (denotado como  $V_{pmax}$ ) con la duración de los eventos. En la figura 4.28 se observa la relación positiva entre ambas variables, con una correlación de  $\sim 0,8$  en ambas estaciones. Se tiene una clara asociación, donde la nube de puntos crece similar a una curva de  $x$  con exponente positivo menor a 1. Es decir,  $V_{pmax}$  crece rápidamente a medida que la duración aumenta, hasta alrededor de las  $\sim 18$  horas, a partir de la cual el máximo de velocidad comienza a crecer de forma lenta. Esto ocurre tanto en verano como en invierno. Para duraciones entre 0-18 horas,  $V_{pmax}$  posee

valores entre los 4-9 m/s. A partir de las 18 horas de duración, el rango de valores corresponde a 6-13 m/s durante todo el año.

### 4.3.2. Análisis de saltos iniciales y finales de EP

#### Saltos iniciales

A continuación se estudian los saltos iniciales de temperatura ( $T$ ), razón de mezcla y  $V_p$  en verano e invierno respecto a la hora a la que ocurren, de forma que se pueda revisar si las variables presentan un comportamiento típico de eventos tipo Foehn durante los EP. Lo esperado al inicio de este tipo de eventos, es un aumento de  $T$  ( $\Delta T_i > 0^\circ\text{C}$ ), una disminución de  $q$  ( $\Delta q_i < 0$  g/kg) y un aumento de  $V_p$  ( $\Delta V_{pi} > 0$  m/s).

En el caso de la temperatura (figura 4.29), el rango en el que varía  $\Delta T_i$  es principalmente entre  $0-10^\circ\text{C}$ , el cual contiene 80 % y un 87 % de los casos en la estación cálida y fría, respectivamente. En verano se observa que entre las 11-21 HL los saltos presentan valores menores a  $5^\circ\text{C}$  e incluso valores negativos a partir de las 17 HL. El intervalo dado se asocia a las horas del día en que la temperatura se encuentra próxima a su valor máximo (figura 4.11). Otro punto llamativo son los  $\Delta T_i$  que sobrepasan los  $10^\circ\text{C}$ . Esto pasa mayormente entre las 06-10 HL, cuando el calentamiento radiativo se suma al calentamiento del evento Puelche. En invierno se observan 4 casos con  $\Delta T_i$  por sobre el rango típico, llegando hasta aproximadamente los  $12^\circ\text{C}$  entre las 01-11 HL. Durante el día, entre las 12-19 HL,  $\Delta T_i$  se restringe entre los  $-3 - 3^\circ\text{C}$ , momentos en que, como también se dijo para verano, la temperatura es más alta dentro del día. Por lo tanto, parece ser que el ciclo diurno de  $T$  tiene incidencia en el ciclo diurno del valor de los saltos iniciales de temperatura que experimentan los EP, teniendo magnitudes bajas durante la tarde y alcanzando magnitudes altas durante la noche y especialmente en la mañana. Respecto a la comparación estacional, a simple vista se observa que se logran máximos más intensos en verano que en invierno y una menor cantidad de eventos con saltos negativos.

En cuanto a la razón de mezcla (figura 4.30), se tiene que un 69 % de los eventos de verano y un 83 % de los de invierno tienen valores de  $\Delta q_i$  entre  $-2-0$  g/kg, por lo que se podría decir que los EP poseen caídas de humedad típicamente en ese rango durante todo el año. Ambas estaciones presentan caídas mayores al rango típico durante la noche, cuando el ciclo diurno promedio de  $q$ , muestra una disminución de esta. Sin embargo, como se observa en la figura 4.30, y según el porcentaje dado anteriormente, verano en comparación a invierno suele tener más valores extremos de  $\Delta q_i$ , donde entre las 21-05 HL 6 eventos tienen una caída mayor a los 4 g/kg. Un evento en particular tuvo un secamiento de hasta 7 g/kg a las 22 HL. En invierno el secamiento parece ser menor, probablemente debido a la condición promedio de la estación, que suele ser seca de por sí (figura 4.13). Sin embargo, entre las 09-18 HL los valores se mantienen

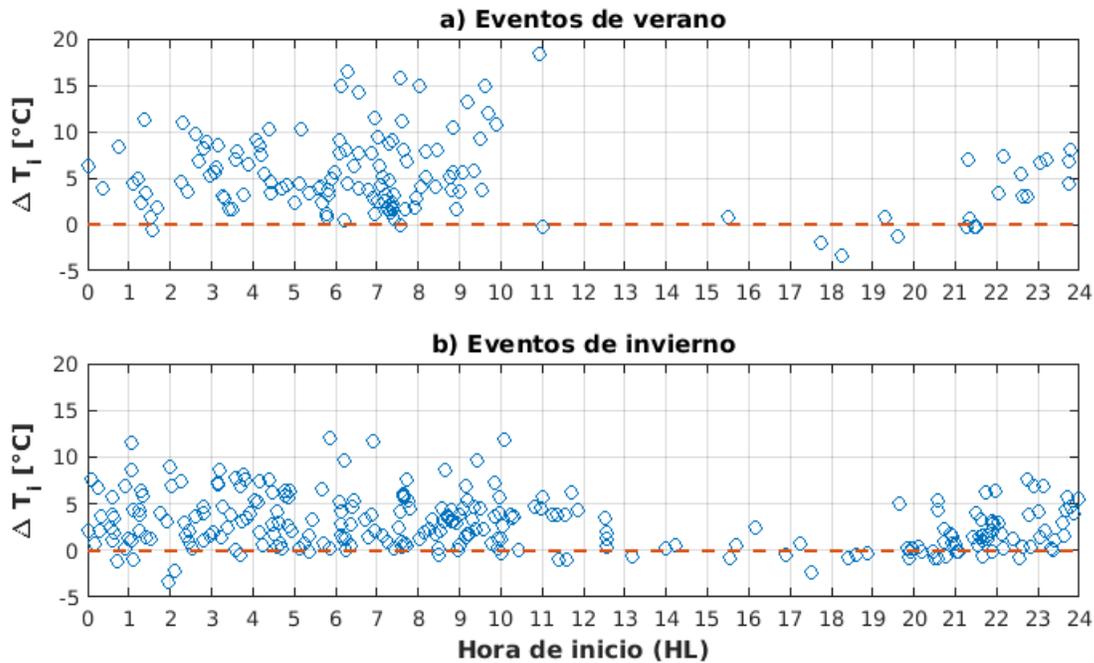


Figura 4.29: Saltos iniciales de temperatura [°] (ordenada) respecto a la hora de inicio (abscisa) del evento respectivo para verano (panel (a)) e invierno (panel (b)). La línea segmentada roja indica donde  $\Delta T_i$  es igual a cero. A los valores del eje x se les agregó un numero aleatorio entre el 0 y 1 para visualizar mejor la información.

mayormente por sobre los  $-1$  g/kg, horas en que el ciclo diurno de  $q$  en invierno, muestra que la humedad es alta o está aumentando.

Por último, se estudian los saltos iniciales de  $V_p$  (figura 4.31). A simple vista, el intervalo típico durante todo el año parece ser entre  $0-6$  m/s, con un 89% y un 93% de eventos contenidos en verano e invierno, respectivamente. Los máximos valores desarrollados durante el año, son de alrededor de  $9$  m/s. Respecto a alguna tendencia de ciclo diurno de  $\Delta V_{pi}$ , al observar la figura pareciera que la magnitud del salto inicial no dependiese del ciclo diurno de  $U$ , ya que la nube de puntos se encuentra bien dispersa en todas las horas de inicio. Sin embargo, los pocos EP que inician durante la fase diurna de vientos de montaña presentan principalmente valores de  $\Delta V_{pi} \geq 4$  m/s. Para estudiar el comportamiento durante el día de la velocidad proyectada, se creó la figura 4.32. Esta presenta los valores de  $V_p$  desarrollados en todas las HP, en función de la hora a la que se midieron. Se muestra que no hay una fuerte relación entre la magnitud de  $V_p$  durante HP, respecto del ciclo diurno de vientos de montaña. Sí se ve que los valores desarrollados entre las  $12-02$  HL ( $12-20$  HL) en verano (invierno), no superan en su mayoría el umbral de  $11$  m/s ( $10$  m/s). Fuera de esto,  $V_p$  no muestra una restricción fuerte en su magnitud durante las horas de sol, debido a los vientos diurnos valle-arriba.

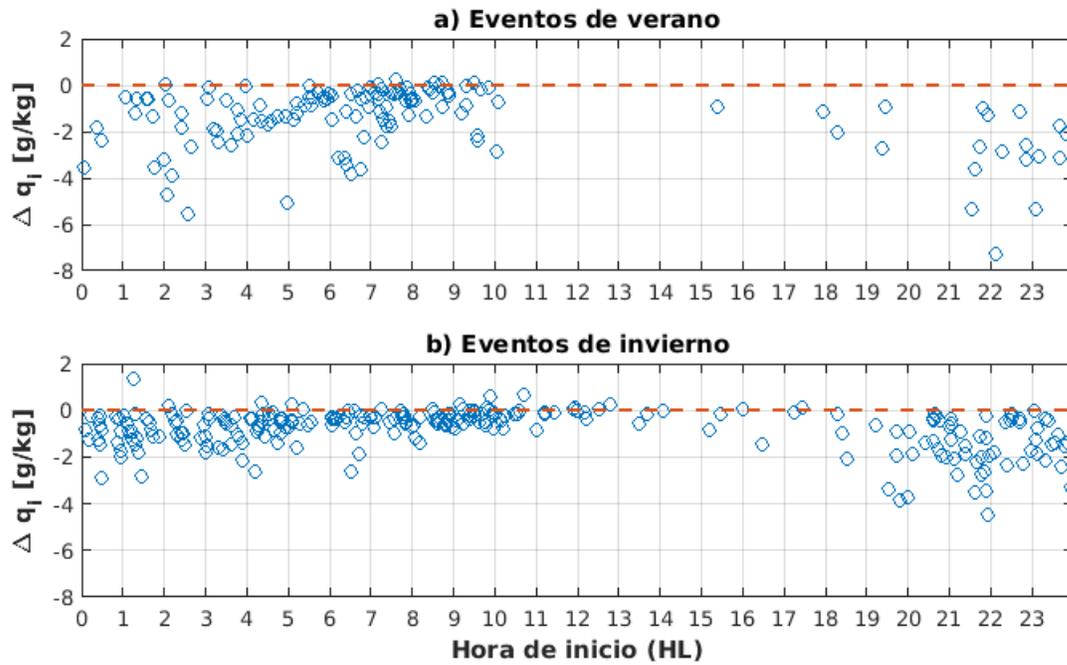


Figura 4.30: Igual que en la figura 4.29 pero para los saltos iniciales de  $\Delta q_i$ .

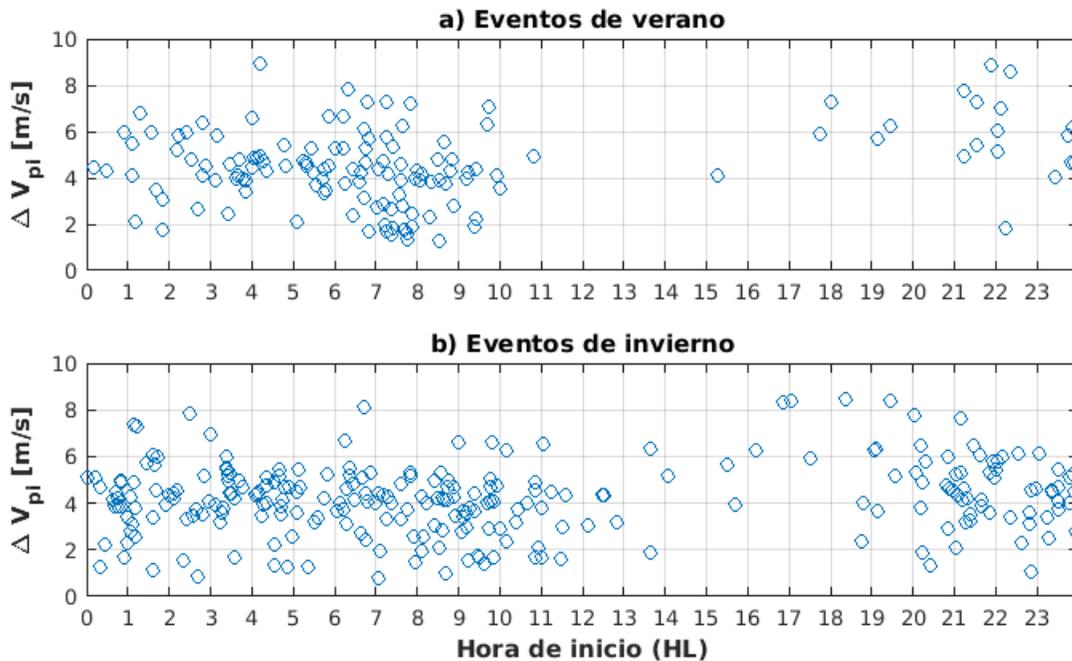


Figura 4.31: Igual que en la figura 4.34 pero para los saltos iniciales de  $V_p$ .

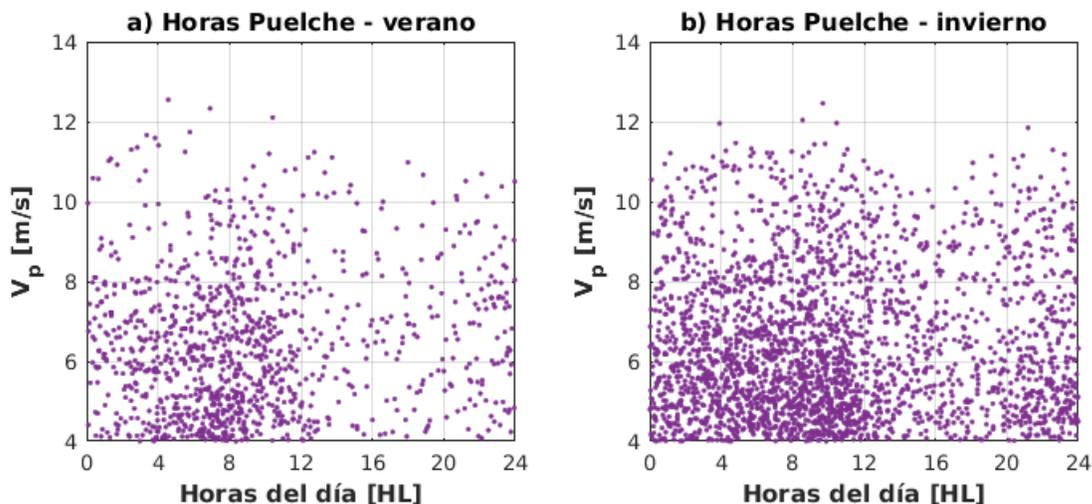


Figura 4.32: Diagrama de dispersión del valor de  $V_p$  de todas las horas Puelche, respecto a la hora del día a la que corresponde. En el panel (a) se tienen las horas Puelche encontradas en verano y en el panel (b) aquellas encontradas en invierno.

También se estudió si existe una relación entre los saltos iniciales de las distintas variables. Respecto a  $\Delta T_i$  y  $\Delta q_i$ , se tiene en la figura 4.33 que la nube de círculos en ambas estaciones presenta una forma de abanico en torno al cero de ambas variables. Cerca del origen (cero) se concentra la mayor cantidad de valores. En verano, se observa que para saltos de temperatura sobre los  $5^\circ\text{C}$ , mayor es el rango de valores de saltos de humedad, superando la caída de humedad de  $4 \text{ g/kg}$  y llegando hasta los  $7.3 \text{ g/kg}$ . Sin embargo, solo un 5% de los saltos de  $T$  mayores a  $5^\circ\text{C}$  superan una caída de  $4 \text{ g/kg}$ , por lo que no se puede afirmar que exista una relación entre ambos saltos iniciales. Por otra parte, existen casos con caídas de temperatura y/o aumento de humedad en ambas estaciones. Estos representan un 11% del total en verano y un 17% en invierno. Cabe destacar que en la estación cálida no se dan ambos casos simultáneamente, y en invierno solo se encontraron 5 eventos (2% del total de eventos de la estación) con caída y aumento inicial de  $T$  y  $q$ , respectivamente.

En la figura 4.34 se observa cierta relación entre  $\Delta V_{pi}$  y  $\Delta q_i$ , donde para valores de salto de  $V_p$  mayores, el rango de valores que puede tomar la caída de  $q$  aumenta. Esto se da especialmente a partir de un incremento de la rapidez del viento de  $\sim 4 \text{ m/s}$  en ambas estaciones. Previo a este umbral, más del 83% de las caídas de  $q$  son menores a  $1 \text{ g/kg}$ . La relación se aprecia mejor en verano. En invierno, las caídas iniciales de humedad aumentan su magnitud de forma menos abrupta que en verano, e incluso presenta algunos valores positivos para saltos de  $V_{pi}$  por sobre el umbral mencionado. Si se utiliza como condición  $\Delta V_{pi} \geq 4 \text{ m/s}$ , la probabilidad de que  $\Delta q_i > -1 \text{ g/kg}$  es de 70% en verano y 44% en invierno. Al igual que en la figura 4.34, al estudiar

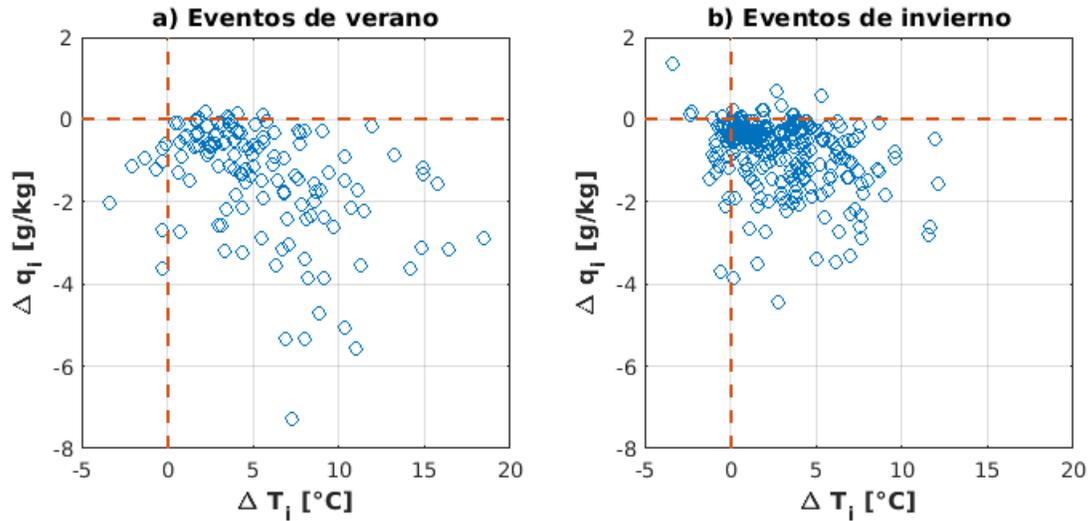


Figura 4.33: Diagrama de dispersión del salto inicial de temperatura [°] (abscisa) y salto inicial de razón de mezcla inicial [g/kg] (ordenada), para eventos de verano (a) y eventos de invierno (b). Las líneas segmentadas indican donde ambas variables valen cero.

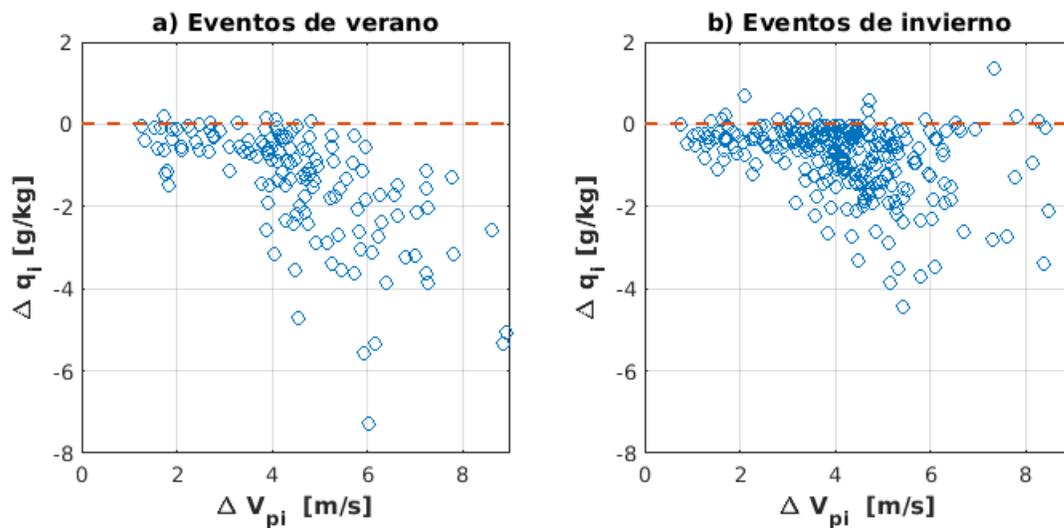


Figura 4.34: Diagrama de dispersión del salto inicial de  $V_p$  [m/s] (abscisa), respecto al salto inicial de la razón de mezcla [g/kg] (ordenada), para eventos de verano e invierno en los paneles (a) y (b), respectivamente.

la relación entre  $\Delta V_{pi}$  y  $\Delta T_i$  (figura 4.35), se observa un aumento del rango de valores de los saltos iniciales de temperatura para  $\Delta V_{pi} > 4$  m/s en ambas estaciones. A partir de este umbral, existen saltos iniciales de temperatura que superan los 5°C. Nuevamente, se obtuvo que previo a  $\Delta V_{pi} = 4$  m/s, más de un 83 % de los saltos son menores a 5°C en ambas estaciones. También se obtienen algunas caídas iniciales de temperatura levemente más intensas a partir del mismo

umbral de  $\Delta V_{pi}$  tanto en verano como en invierno. Al calcular la probabilidad condicional de que se supere un salto inicial de T de  $5^{\circ}\text{C}$  para saltos de  $V_p \geq 4 \text{ m/s}$ , se obtuvo un 63 % en verano y 33 % en invierno. Por lo tanto, para valores altos  $\Delta V_{pi}$ , el rango de valores de saltos iniciales de T y q aumenta, existiendo la posibilidad de que estos últimos sean bajos (incluso con signo distinto al esperado), o altos. Especialmente en verano, se encontró una probabilidad mayor al 60 % de obtener saltos esperados de T y q de magnitud relativamente alta para  $\Delta V_{pi} \geq 4 \text{ m/s}$ .

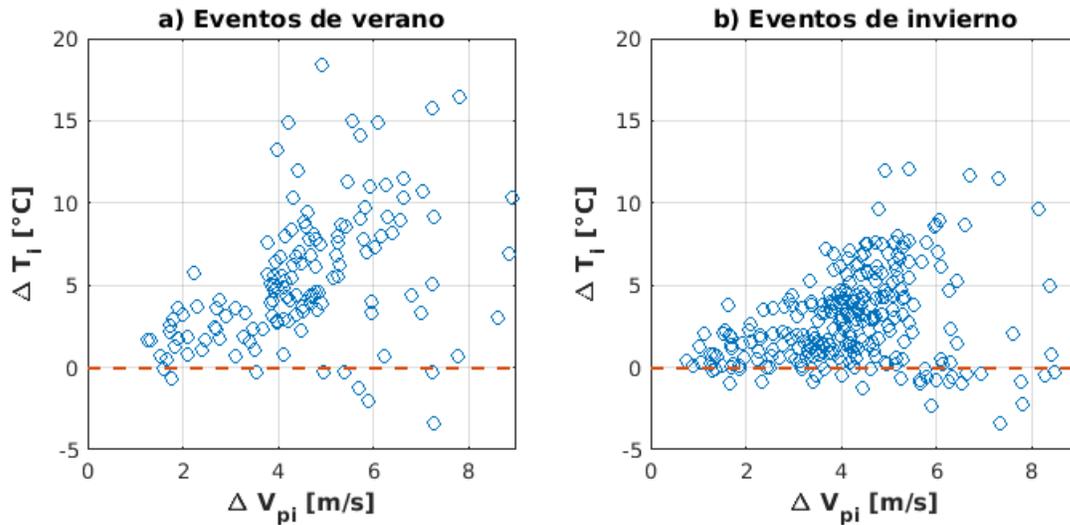


Figura 4.35: Como en la figura 4.35, pero para el salto inicial de temperatura [ $^{\circ}$ ] en la ordenada. La línea segmentada indica donde  $\Delta T$  es cero.

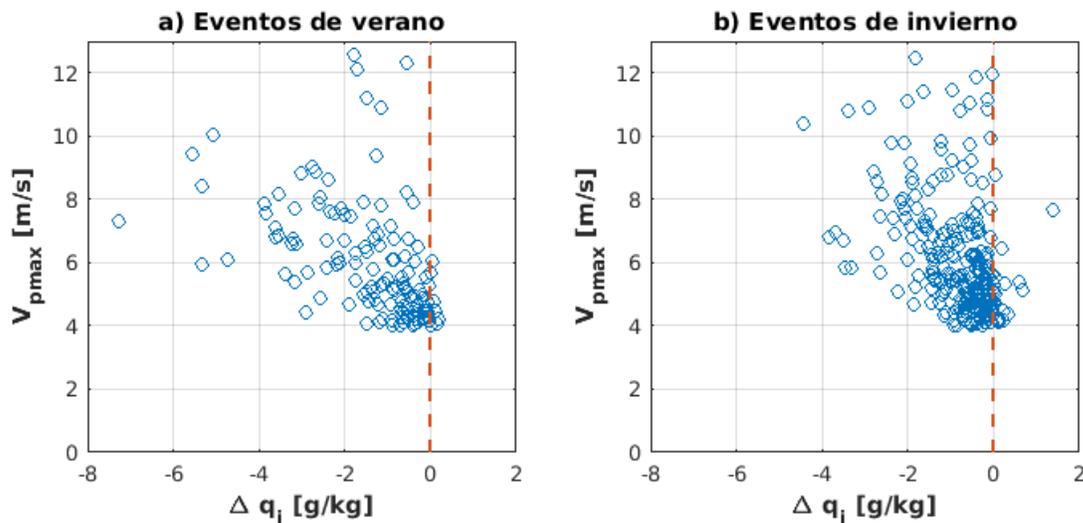


Figura 4.36: Como la figura 4.28, pero con el salto inicial de razón de mezcla [ $\text{g/kg}$ ] en la abscisa. La línea segmentada roja indica donde  $\Delta q$  es cero.

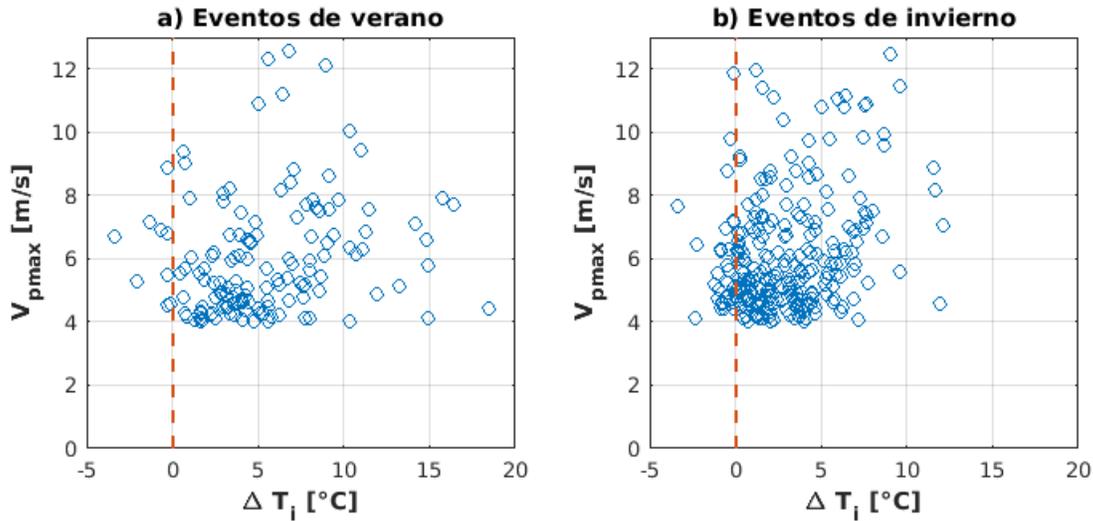


Figura 4.37: Como la figura 4.28, pero con el salto inicial de temperatura [ $^{\circ}$ ] en la abscisa. La línea segmentada roja indica donde  $\Delta T$  es cero.

Respecto a las relaciones entre la máxima velocidad de cada evento y sus saltos iniciales de  $T$  y  $q$ , no existe una asociación clara (figuras 4.36 y 4.37). La nube de círculos se encuentra bastante dispersa en ambos casos. La mayor cantidad se centran cerca del valor mínimo posible de  $V_{pmax}$  y los ceros de  $\Delta q_i$  y  $\Delta T_i$ . Sin embargo, en el caso de la relación entre  $V_{pmax}$  y  $\Delta q_i$  durante la estación de verano (panel (a), figura 4.36), sí se observa cierta tendencia al aumento de la magnitud de la caída de  $q$ , al crecer los valores de  $V_{pmax}$ . La correlación entre ambas variables es de -0.46, lo que aumenta a -0.6 al no considerar valores extremos, es decir, al restringir la nube de círculos por  $\Delta q_i > -4$  g/kg y  $V_{pmax} < 10$  m/s. Los eventos considerados para el último cálculo de correlación corresponden a el 91 % de los EP de verano. Por lo tanto, a excepción de algunos casos, se podría esperar una relación inversa entre las dos variables.

Por otra parte, la figura 4.38 muestra cierta relación entre  $V_{pmax}$  y  $\Delta V_{pi}$ . Se observa una tendencia al aumento conjunto de ambas variables en eventos con  $\Delta V_{pi} \geq 4$  m/s, aunque presentando  $V_{pmax}$  un aumento más rápido. Previo a este umbral, es decir, con saltos iniciales relativamente pequeños, se puede ver que la  $V_{pmax}$  se restringe principalmente entre los 4-7 m/s, encontrándose en ese rango el 90 % de los valores de  $V_{pmax}$  de cada estación.

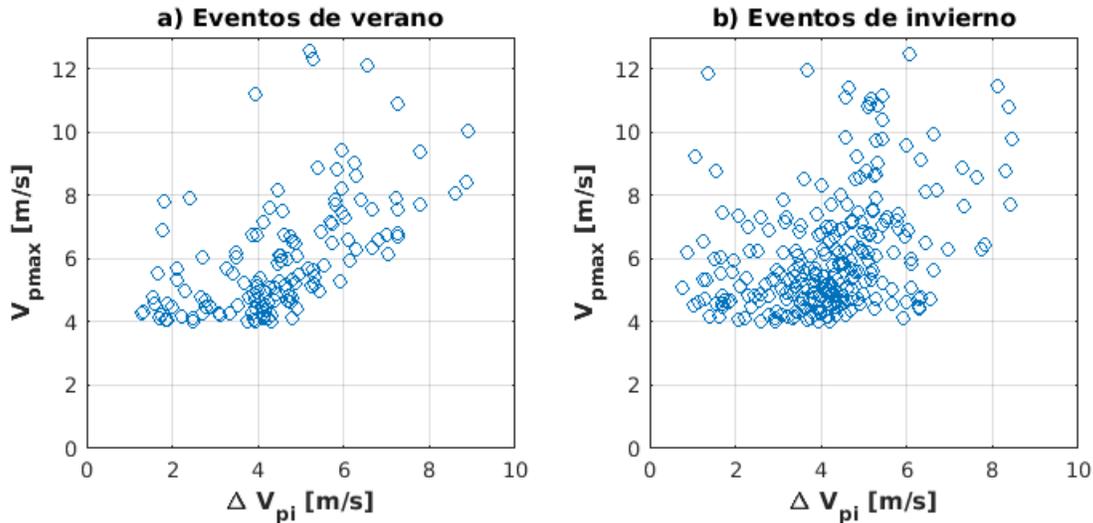


Figura 4.38: Como la figura 4.28, pero con el salto inicial de  $V_p$  [m/s] en la abscisa.

### Saltos finales

Una vez que los eventos tipo Foehn finalizan, se espera que haya un cambio abrupto de las condiciones de temperatura, humedad y viento. Por lo tanto, el cálculo de los saltos finales de estas variables debiese revelar un enfriamiento ( $\Delta T_f < 0^\circ\text{C}$ ), humidificación ( $\Delta q_f > 0 \text{ g/kg}$ ) y disminución de la velocidad del viento ( $\Delta V_{pf} < 0 \text{ m/s}$ ).

La figura 4.39 muestra una gran cantidad de eventos que al finalizar presentan un aumento de la temperatura. En verano esto sucede en un 76 % de los EP y en invierno en un 58 %. Estos aumentos, se concentran principalmente entre las 07 y 14 HL. Es decir, al finalizar un evento en el intervalo de horas del día en que la temperatura se encuentra aumentando (panel (a), figura 4.12), no se suele percibir un enfriamiento, sino un calentamiento de entre 0 y  $5^\circ\text{C}$ . Sin embargo, en el rango horario mencionado también se observan algunos EP con  $\Delta T_f < 0^\circ\text{C}$ . En la tarde, noche y madrugada, se obtienen mayormente EP con finales que implican un enfriamiento, donde el caso más extremo fue de una disminución de  $10^\circ\text{C}$  a las 22 HL en invierno. Por lo tanto, y teniendo en cuenta la hora a la que se desarrollan, pareciese que la mayor parte de los EP presentan  $\Delta T_f$  alterados por el ciclo diurno de temperatura, presentando saltos positivos cuando la temperatura se encuentra aumentando dentro del ciclo, y saltos negativos cuando esta está disminuyendo. Sin embargo, existen casos que se escapan de la influencia del ciclo diurno de T, logrando saltos negativos, según lo esperado.

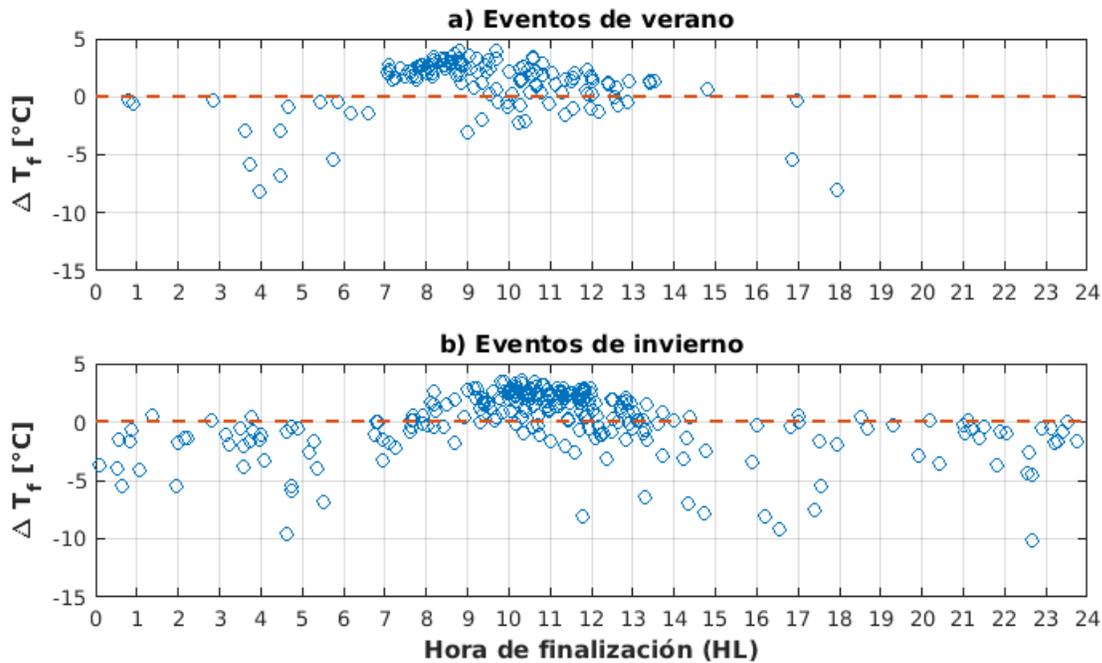


Figura 4.39: Saltos finales de temperatura [ $^{\circ}$ ] (ordenada) respecto a la hora de término (abscisa) del evento respectivo para verano (panel (a)) e invierno (panel (b)). La línea segmentada roja indica donde  $\Delta T_f$  es igual a cero. A los valores del eje x se les agregó un numero aleatorio entre el 0 y 1 para visualizar mejor la información.

En cuanto a la humedad,  $\Delta q_f$  presenta mayormente valores positivos a toda hora en ambas estaciones (figura 4.40). Un 7% de los EP de verano e invierno presentan un secamiento al finalizar, pero estos solo alcanzan valores de hasta  $-0.5$  g/kg. Invierno presenta un 63% de sus saltos finales dentro del rango de 0 y 1 g/kg, a diferencia de verano, con solo el 34% de sus valores dentro de ese rango. Saltos finales mayores a 1 g/kg se concentran aproximadamente entre las 07 y 18 HL durante todo el año. Por lo tanto, verano posee mayor fracción de eventos con saltos finales intensos. Como se dijo anteriormente, según la climatología de  $q$  (figura 4.13), en promedio verano suele ser la estación más húmeda. Debido a esto, al finalizar los EP, el paso de las condiciones secas inducidas por los mismos, a la relativamente alta humedad promedio podría implicar un  $\Delta q$  de mayor amplitud. Además, el rango horario con saltos más intensos en ambas estaciones (07-18 HL) corresponde a horas en que la humedad se encuentra aumentando, lo cual podría resaltar o intensificar la humidificación que ocurre al finalizar un EP.

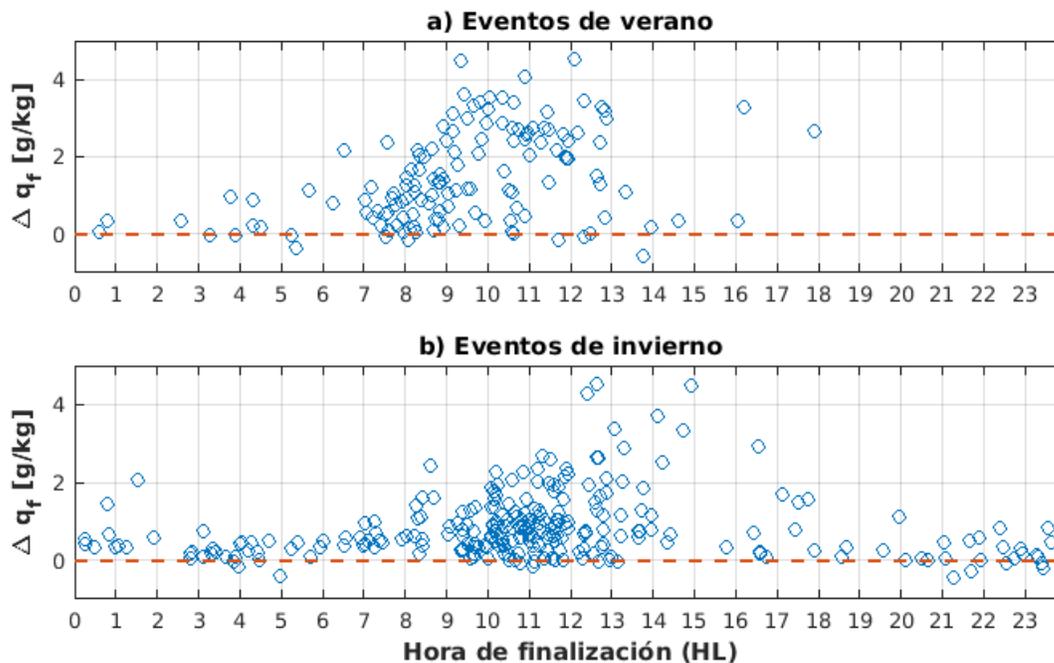


Figura 4.40: Como la figura 4.39, pero para los saltos finales de razón de mezcla [g/kg] en la ordenada. La línea segmentada roja indica donde  $\Delta q_f$  es igual a cero.

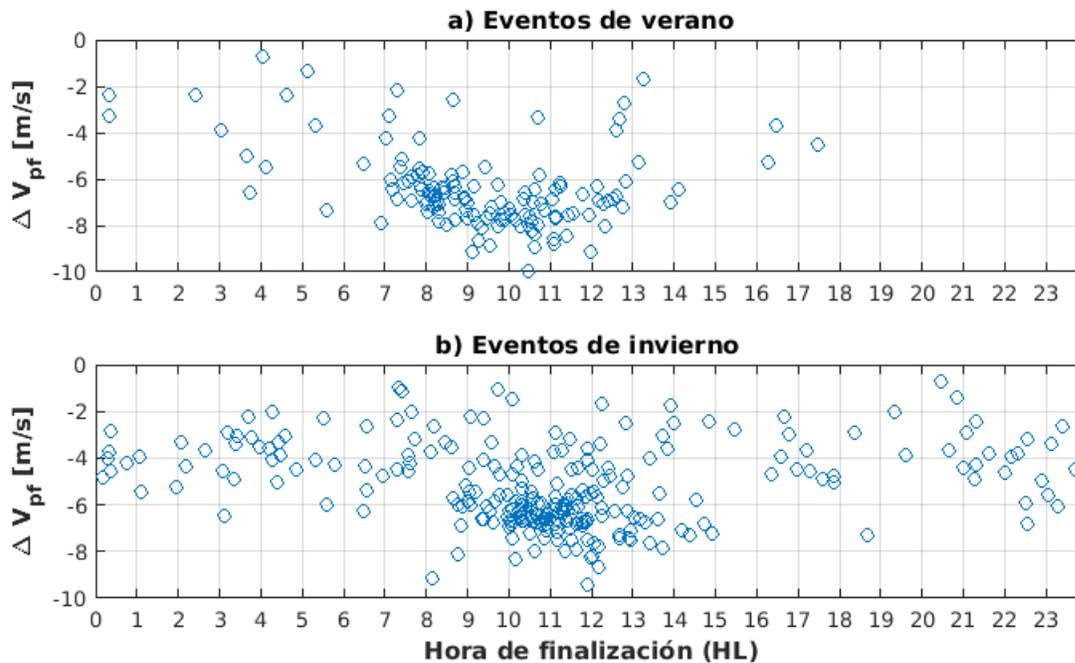


Figura 4.41: Como la figura 4.39, pero para los saltos finales de  $V_p$  [m/s] en la ordenada.

Los saltos finales de  $V_p$  son todos negativos, ya que el método de detección de HP no permite lo contrario (figura 4.41). En verano se tiene que un 74 % de los saltos finales son menores a -6 m/s, cuyos valores se centran principalmente en la mañana, entre las 7 y 13 HL. En el caso de invierno, un 41 % son menores al umbral dado (-6 m/s) y se centran entre las 8 y 15 HL. El rango horario en el que se desarrollan estas magnitudes máximas coincide con el debilitamiento y cambio de dirección de los vientos valle-abajo, es decir, a la fase de transición de la mañana y parte de la fase diurna del ciclo de vientos de montaña (cuadro 4.3), los cuales probablemente se superponen a los vientos Puelche, intensificando de esta forma los saltos finales. Por otra parte, valores de  $\Delta V_{pf}$  entre 0 y -6 m/s se desarrollan a toda hora.

Para corroborar la hipótesis anterior, se creó la figura 4.42. Esta muestra una comparación entre  $\Delta V_{pf}$  (eje de las ordenadas) y el valor de  $V_p$  luego de finalizar los eventos (eje de las abscisas). Una hora después de terminados los eventos (paneles (a) y (b)), según el algoritmo utilizado, se observa que solo un 9 % y 7 % de los EP de verano e invierno, respectivamente, presentaron vientos valle-arriba. Estos además tuvieron valores intensos de salto final. Dos horas después (paneles (c) y (d)), se puede ver como se establecen vientos del este posterior a una mayor cantidad de eventos, correspondientes a un 65 % en verano y 43 % en invierno. Luego de 3 horas (paneles (e) y (f)), ya un 86 % y 59 % de los eventos de verano e invierno, respectivamente, presenciaron el establecimiento de vientos del este, presentando todos valores de  $\Delta V_{pf} < -4$  m/s. Además se calcularon correlaciones de 0.9 en ambas estaciones, entre  $\Delta V_{pf}$  y  $V_{p(f+3)}$ . Por lo tanto, se puede decir que los saltos finales más intensos de  $V_p$  se desarrollan ante el relativamente pronto establecimiento de los vientos valle-arriba. Respecto a esto último, también se puede concluir que el establecimiento de los vientos del este es progresivo, debido al cambio que se observó en cada fila de la figura. En relación a los valores positivos de  $V_{p(f+3)}$ , estos pueden deberse a dos razones. En el caso de haber finalizado estos EP durante la fase nocturna del ciclo de vientos de montaña, al finalizar el evento se establecerían vientos valle-abajo de rapidez menor a aquella desarrollada durante el EP. Otra razón puede ser problemas del algoritmo para detectar la finalización de eventos débiles en términos de  $V_p$ .

Respecto a la relación entre saltos finales de diferentes variables, en el caso de la humedad y la temperatura (figura 4.43), no parece haber una relación aparente entre sus valores. Tanto verano como invierno presentan nubes de círculos dispersos.

Al igual que con los saltos iniciales, nuevamente se tiene una relación entre la razón de mezcla y  $V_p$ , esta vez en los saltos finales. En la figura 4.44 se observa que  $\Delta q_f$  posee un rango mayor de valores para disminuciones más drásticas de  $V_p$ . Esto se ve especialmente para  $\Delta V_{pf} \leq -5$  m/s en ambas estaciones. Al calcular la probabilidad condicional de que  $\Delta q_f > 1$  g/kg si  $\Delta V_{pf} \leq -5$  m/s, se obtiene un 68 % y 49 % en verano e invierno, respectivamente.

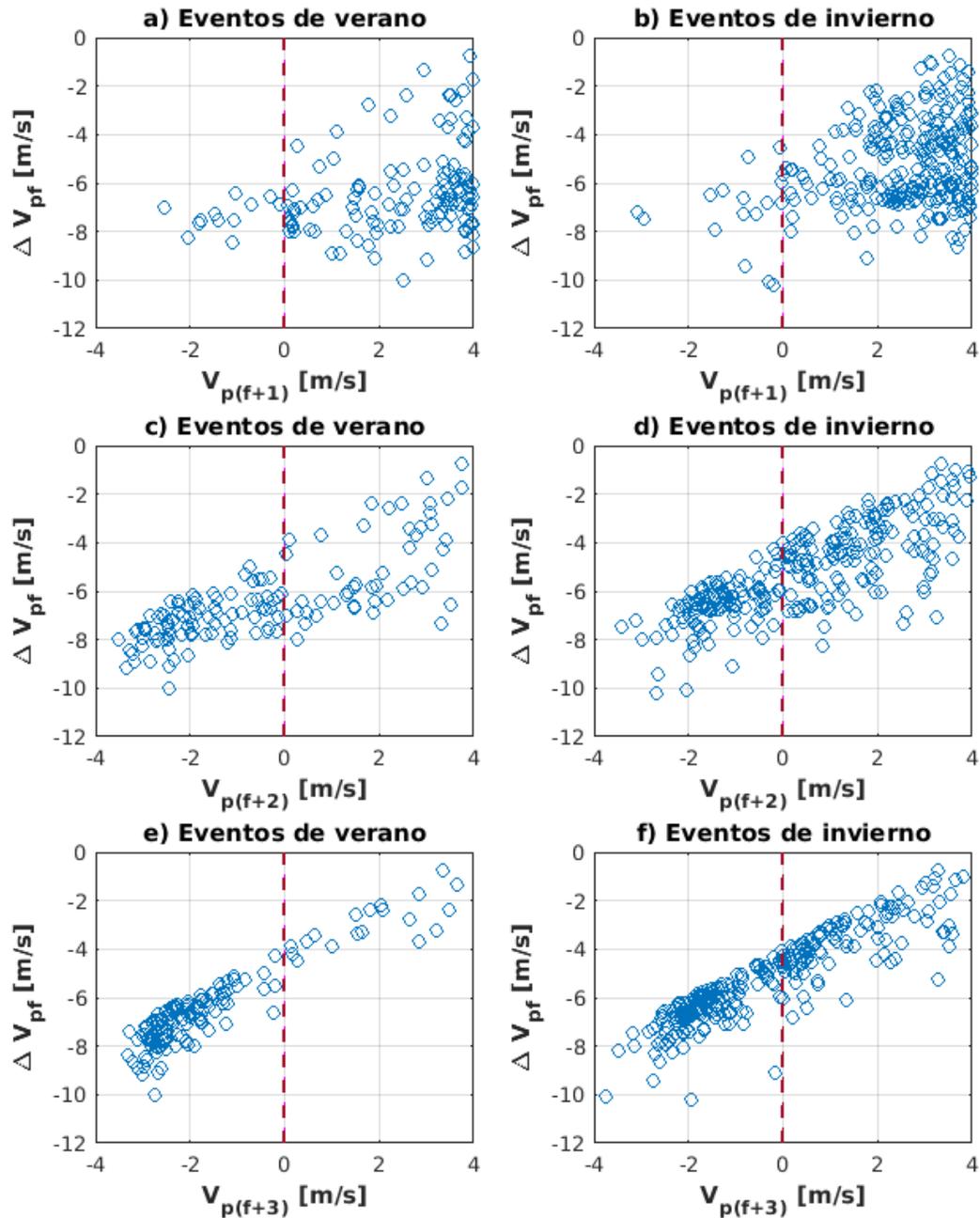


Figura 4.42: Relación entre saltos finales de  $V_p$  y el valor que esta variable toma una vez finalizado el EP. La columna izquierda corresponde a los EP de verano y la derecha, a aquellos de invierno. Los paneles (a) y (b) muestra en el eje de las abscisas el valor de  $V_p$  una hora después de finalizado el evento, los paneles (c) y (d) 2 horas después y los paneles (e) y (f) 3 horas más tarde. Valores negativos de  $V_p$  corresponden a vientos valle-arriba.

En el caso de la relación de saltos finales de temperatura y  $V_p$  (figura 4.45), se tiene que las distribuciones de círculos, tanto en verano como invierno, tienen una forma similar. Ambos saltos no parecen tener una asociación clara.

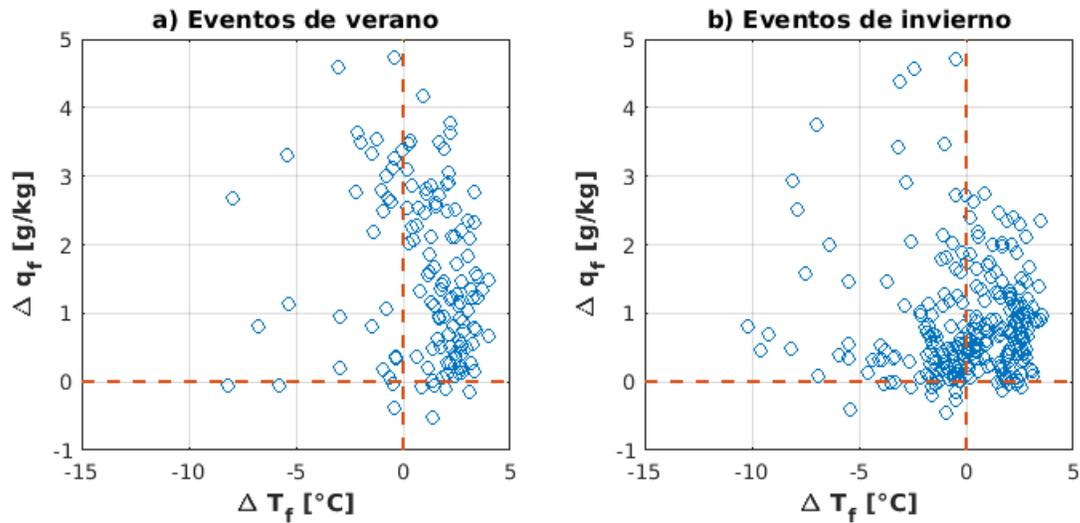


Figura 4.43: Diagrama de dispersión del salto final de temperatura [ $^{\circ}$ ] (abscisa) y salto final de razón de mezcla [ $\text{g/kg}$ ] (ordenada), para eventos de verano en el panel (a) y eventos de invierno en el panel (b). Las líneas segmentadas indican donde ambas variables valen cero.

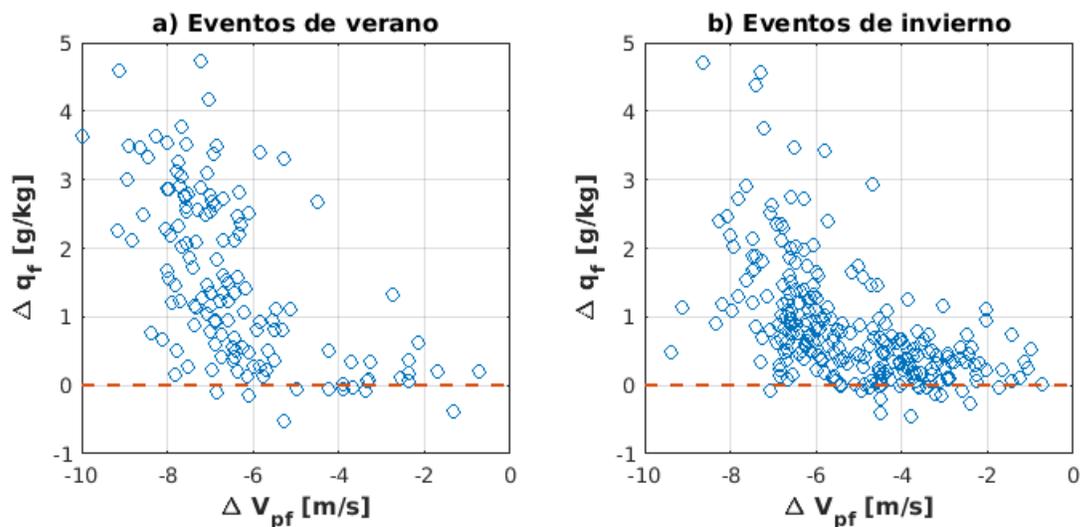


Figura 4.44: Diagrama de dispersión del salto final de  $V_p$  [ $\text{m/s}$ ] (abscisa) y salto final de razón de mezcla [ $\text{g/kg}$ ] (ordenada), para eventos de verano en el panel (a) y eventos de invierno en el panel (b). La línea segmentada indica donde  $\Delta q_f = 0$   $\text{g/kg}$ .

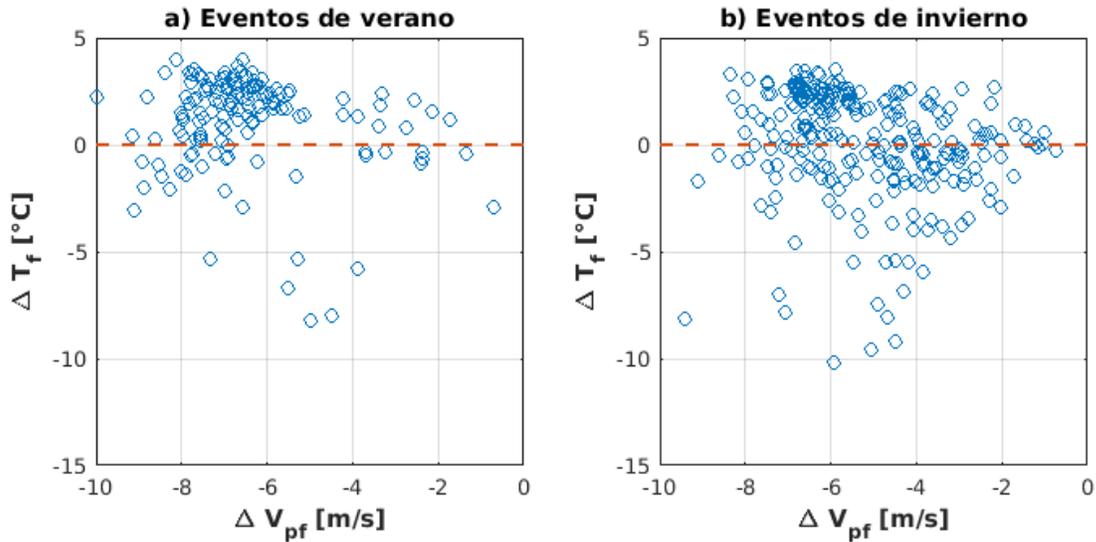


Figura 4.45: Como figura 4.44, pero para el salto final de temperatura [°C] en la ordenada. La línea segmentada indica donde  $\Delta T_f = 0^\circ C$

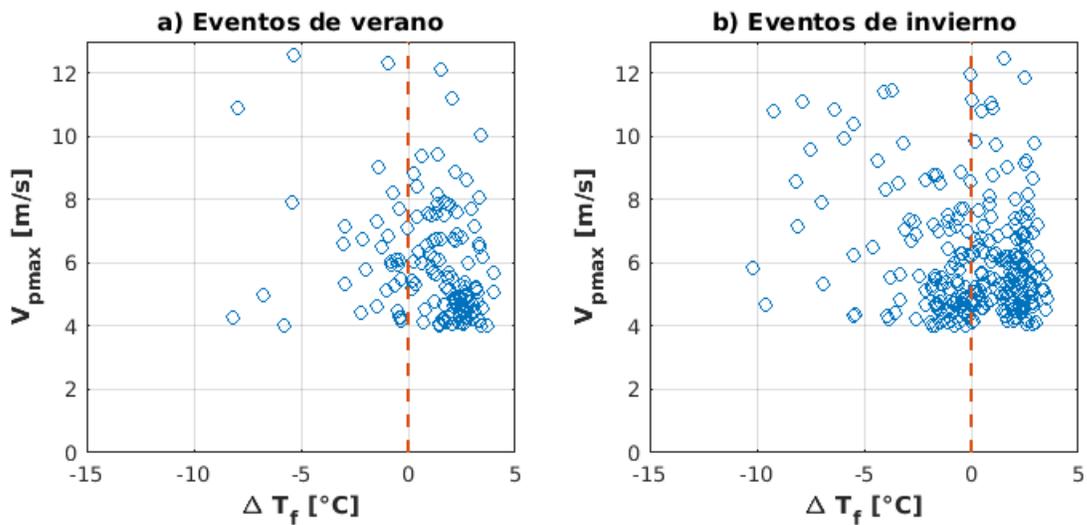


Figura 4.46: Diagrama de dispersión entre el salto final de temperatura [°C] en la abscisa y  $V_{pmax}$  [m/s] en la ordenada. La línea segmentada indica donde  $\Delta T_f = 0^\circ C$ .

Por último, se revisó la relación entre  $V_{pmax}$  y los saltos finales de T, q y  $V_p$  (figuras 4.46, 4.47 y 4.48, respectivamente). Ninguna de las variables presentó una asociación con  $V_{pmax}$ , ya que las tres figuras mostraron nubes de puntos bien dispersos.

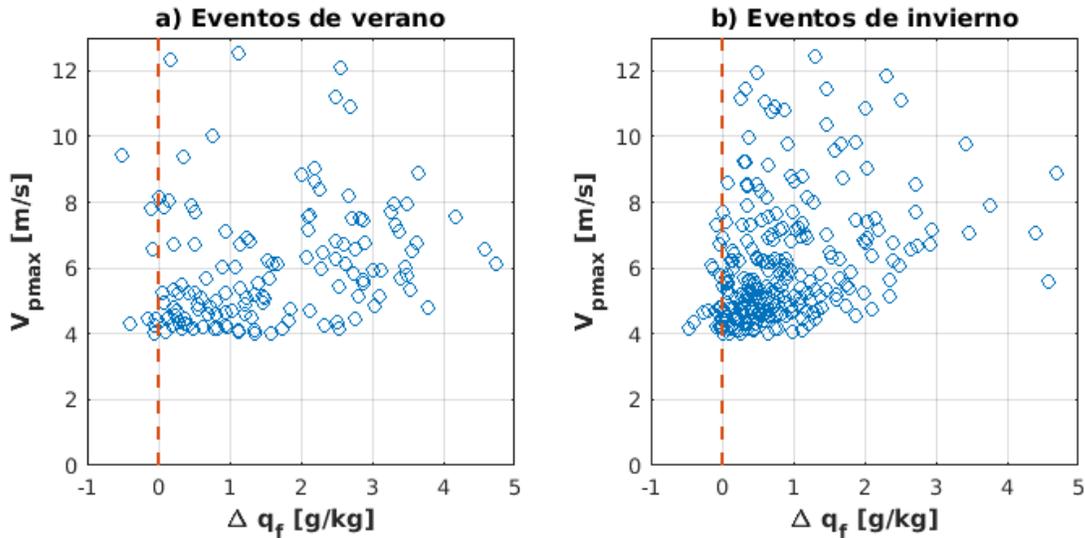


Figura 4.47: Como figura 4.46, pero para el salto final de  $q$  [g/kg] en la abscisa. La línea segmentada indica donde  $\Delta q_f = 0$  g/kg.

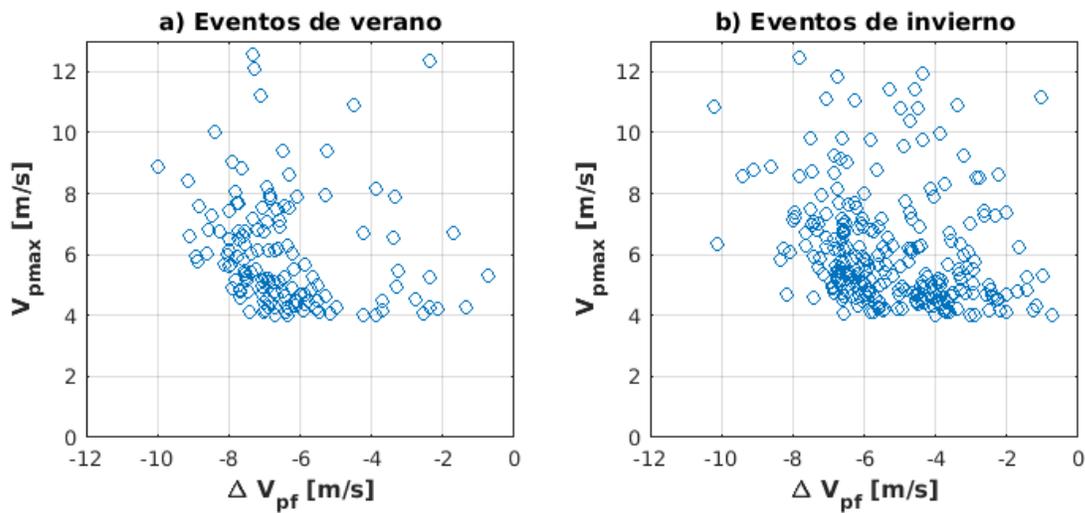


Figura 4.48: Como figura 4.46, pero para el salto final de  $V_p$  [m/s] en la abscisa.

## Resumen

A continuación se hará un resumen de los análisis hechos respecto a los saltos iniciales y finales. Primero que todo, los resultados mostraron que los saltos iniciales de  $T$  y  $q$  cumplen con lo esperado para eventos de este tipo, es decir, denotan un calentamiento y secamiento del aire al iniciar los EP. El cuadro 4.4 indica los porcentajes de resultados esperados obtenidos, el cual muestra que más del 80% de eventos encontrados cumplen con lo esperado para  $T$  y  $q$  durante todo el año. Respecto a los saltos finales, se obtuvo que un 93% de los eventos de

verano e invierno dan cuenta de una recuperación de la razón de mezcla de humedad del aire al acabar el evento. No así la temperatura, la cual mostró que menos de un 50 % de los eventos de ambas estaciones logran reflejar una disminución de T, ya que el calentamiento diurno suprime el enfriamiento esperado. El cuadro no muestra los resultados obtenidos para  $\Delta V_p$ , ya que el algoritmo de detección de HP no permite que los saltos sean distinto a los esperado (en signo, no magnitud).

<b>Estación</b>	<b>% obtenido</b>	
	<b>verano</b>	<b>invierno</b>
$\Delta T_i > 0^\circ\text{C}$	93 %	88 %
$\Delta q_i < 0 \text{ g/kg}$	95 %	93 %
$\Delta T_f < 0^\circ\text{C}$	24 %	42 %
$\Delta q_f > 0 \text{ g/kg}$	93 %	94 %

Cuadro 4.4: Porcentaje de resultados obtenidos con valores esperados para el inicio y final de los EP de verano e invierno.

Por otra parte, los resultados indican que los saltos iniciales de T, q y  $V_p$  más intensos desarrollados en verano, tienen magnitudes mayores a aquellos de invierno.  $\Delta T_i$  y  $\Delta q_i$  muestran dependencia con sus respectivos ciclos diurnos, presentando cierta tendencia a la intensificación y/o disminución de su intensidad en distintas horas del día. Además mostraron tener saltos típicamente entre los 0 – 10°C en el caso de T y entre los -2-0 g/kg en el caso de q. Los valores extremos de ambas variables suelen ocurrir en la noche y mañana. En cambio,  $\Delta V_{pi}$  no mostró tener una dependencia clara con el ciclo diurno de la velocidad, sino que mostró valores típicos dentro del rango de 0-6 m/s, con máximos que superan estos valores a toda hora del día. Sí se observa cierta tendencia a obtener valores relativamente altos durante la fase diurna de vientos de montaña, donde los pocos EP que inician a esas horas mostraron saltos típicamente sobre los 4 m/s. Por lo tanto, al iniciar estos eventos el forzante de viento Puelche es capaz de contrarrestar al forzante de vientos diurnos valle-arriba, los cuales a su vez resaltarían el valor del salto inicial de  $V_{pi}$ . Respecto a la relación entre saltos iniciales de las distintas variables,  $\Delta T_i$  y  $\Delta q_i$  no mostraron una relación aparente, por lo que, por ejemplo, si una de ambas variables tiene valores altos, no necesariamente se debe esperar lo mismo de la otra. En cambio, al relacionar  $\Delta V_{pi}$  con el salto de temperatura y humedad, se obtuvo que el rango de valores de saltos iniciales de éstas aumenta, con tendencia a obtener saltos más intensos, a partir de  $\Delta V_{pi} \geq 4 \text{ m/s}$ , especialmente en verano. También se analizaron relaciones con  $V_{pmax}$  obtenida en los EP. Nuevamente, no se encontró una relación aparente con  $\Delta T_i$  y  $\Delta q_i$ . Sin embargo, al estudiar la relación con el salto inicial de  $V_p$ , se encontró cierta relación no-lineal positiva, donde para valores de  $\Delta V_{pi} \geq 4 \text{ m/s}$  se tienen  $V_{pmax}$  más intensos. Esta relación es más clara en la estación cálida. Por otro lado, también se encontró una relación positiva entre la duración de

los EP y  $V_{pmax}$ , donde para eventos más largos, la magnitud máxima alcanzada por  $V_p$  aumenta.

Los saltos finales de T, q y  $V_p$ , presentan cierta tendencia asociado al ciclo diurno de las respectivas variables.  $\Delta T_f$  muestra calentamiento en la mañana y tarde temprana, y enfriamiento en la tarde, noche y madrugada. Por lo tanto el signo del salto final de T muestra una fuerte asociación al ciclo de temperatura. En el caso de q, se observa principalmente aumento de la humedad, con saltos positivos más intensos alrededor de las  $\sim 11$  HL, cuando la razón de mezcla se encuentra aumentando dentro del día. Además se observan mayor fracción de casos con valores intensos en verano que en invierno.  $\Delta V_{pf}$  muestra una mayor concentración de saltos intensos alrededor de las 11 HL, justo cuando los vientos diurnos de montaña cambian a dirección valle-arriba, de forma que el ciclo diurno de  $V_p$  intensifica el salto final de la misma. Respecto a la relación entre  $\Delta T_f$  y los saltos finales de q y  $V_p$ , no se encontró una relación clara. En el caso de  $\Delta q_f$  y  $\Delta V_{pf}$ , se encontró una relación no-lineal en la que se observó que  $\Delta V_{pf} \leq 5$  m/s, aumenta la posibilidad de saltos intensos de q.

### 4.3.3. Definición de episodios Puelche

Una vez que se han estudiado las características de los eventos, se procede a definir episodios Puelche, denotados como **EpP**. Para esto se estudian primero las clases de días Puelche. Cabe destacar que la definición de EpP no tiene una estrecha relación con la definición de EP. Se define como intervalo horario típico de desarrollo de HP entre las 00 y 11 HL, a partir de la figura 4.25. Durante el este, las frecuencias obtenidas en la estación cálida y fría superan el 5 % y 13 %, respectivamente.

A partir de esta decisión, se creó la figura 4.49. Corresponde a la cantidad de horas Puelche desarrolladas en el intervalo horario típico (total de 12 horas), respecto al total de días en cada estación, que posean el 100 % de datos en el intervalo escogido. De esta forma, se utilizó aproximadamente un 58 % de los días de todo el periodo de datos en ambas estaciones. Se encontró que un 20 % y un 36 % del total de días usados en el cálculo, desarrollaron HP entre las 0 y 11 HL, en verano e invierno, respectivamente. Al observar la imagen, lo primero que llama la atención es que en invierno, la frecuencia máxima corresponde a un 9 % de días con 100 % de HP en el intervalo escogido. En verano esto corresponde a poco más de un 2 %, siendo el segundo máximo. El primer máximo (y segundo de invierno) corresponde a alrededor de un 4 % de los días, con 1 HP en el intervalo (más de 4.5 % en invierno). En el resto de cantidad de horas (entre 2 y 11), los porcentajes oscilan entre 1-3 %.

Siguiendo con el método desarrollado en Muñoz et al. (2020), se definieron clases de días según la cantidad de HP observadas en el intervalo típico escogido de desarrollo de estas (figura 4.49). Las clases corresponden a las siguientes cantidades de horas:

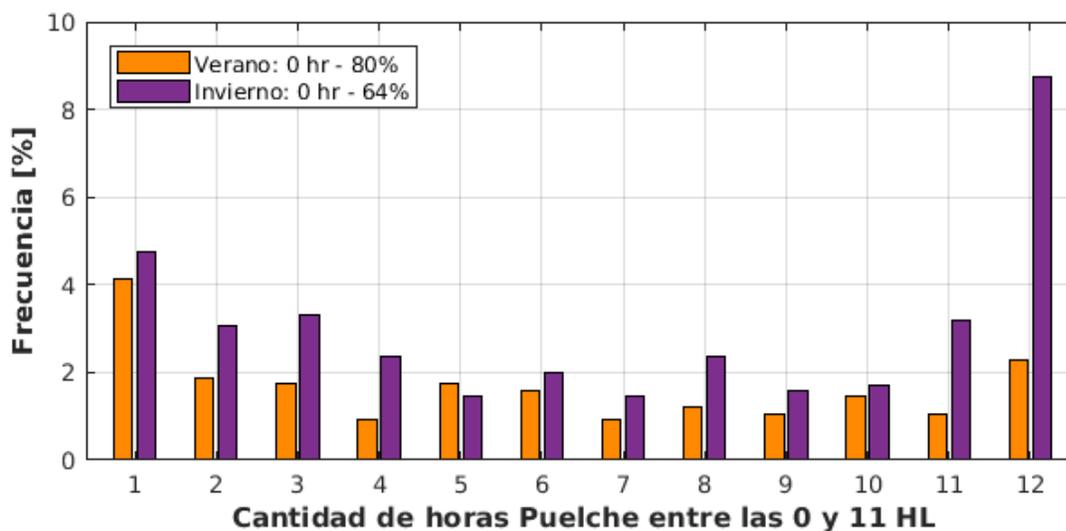


Figura 4.49: Cantidad de horas Puelche entre las 00 y 11 HL respecto al total de días en verano (barras naranjas) o invierno (barras moradas) con datos en todo el intervalo escogido.

1. 0 hrs
2. 1-4 hrs
3. 5-8 hrs
4. 9-12 hrs

De esta forma, se definen como episodios Puelche, denotados como **EpP**, a aquellos días clase 3 y 4 consecutivos. Es decir, los EpP son compuestos por días con 5 o más HP entre las 0 y 11 HL. Se encontraron 151 EpP en los aproximadamente 4 años de datos de la estación ANT. De estos, 54 corresponden a la estación cálida y 97 a la fría. Teniendo en cuenta que en los datos se posee información de 4.1 veranos e inviernos, se desarrollarían 13.2 episodios por verano y 23.7 por invierno en promedio, recordando que las estaciones estudiadas poseen 6 meses cada una.

Respecto a la duración de los episodios encontrados (ver figura 4.50), se obtiene que cerca de un 54% de los EpP de ambas estaciones duran un día y cerca de un 30%, 2 días, siendo ambos porcentajes levemente mayor para el verano. Los EpP de verano duran máximo 3 días, en cambio, en invierno un 9% duran 4 días, además de 1 episodio que dura 5 días y otro 6. De esta forma, los episodios de invierno tienen la posibilidad de ser más largos que los de verano, aunque su ocurrencia no es tan frecuente.

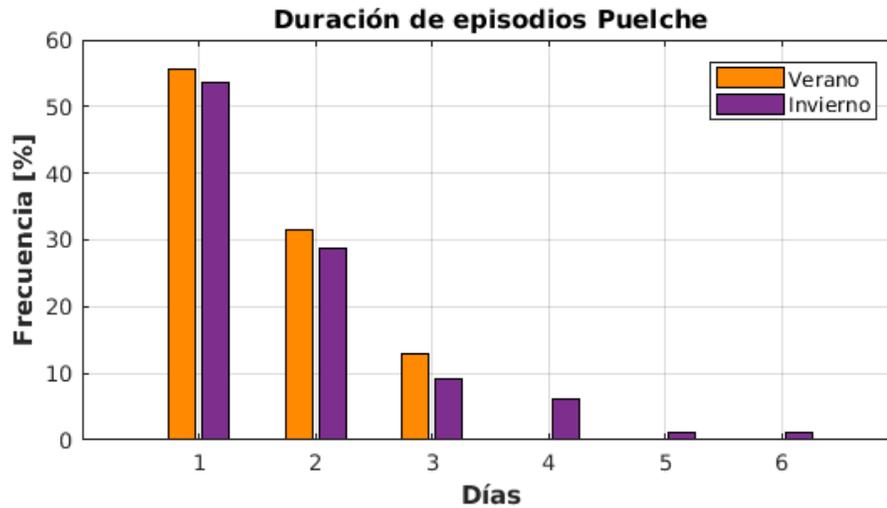


Figura 4.50: Distribución en porcentaje de la duración en días de los episodios Puelche para verano e invierno (barras naranjas y moradas respectivamente).

#### 4.3.4. Ejemplos de EP de verano e invierno

De forma que las características analizadas anteriormente se puedan ver reflejadas en eventos de viento Puelche observados, se decidió mostrar un caso de ejemplo de EP ocurrido en verano y otro, en invierno.

	$H_i$	$H_f$	Dur.	EpP	$\Delta V_{pi}$	$\Delta T_i$	$\Delta q_i$	$\Delta V_{pmax}$	$\Delta V_{pf}$	$\Delta T_f$	$\Delta q_f$
<b>Ver</b>	22	11	14 h	1 d	$6 \frac{m}{s}$	$7^\circ C$	$-7 \frac{g}{kg}$	$\sim 7 \frac{m}{s}$	$-9 \frac{m}{s}$	$-2^\circ C$	$3 \frac{g}{kg}$
<b>Inv</b>	07	10	76 h	4 d	$5 \frac{m}{s}$	$6^\circ C$	$-0.5 \frac{g}{kg}$	$\sim 11 \frac{m}{s}$	$-6 \frac{m}{s}$	$1^\circ C$	$0.6 \frac{g}{kg}$

Cuadro 4.5: Indicadores asociados al ejemplo de evento de verano e invierno.  $H_i$  y  $H_f$  corresponden a las horas de inicio y final de cada EP. *Dur.* corresponde a la duración en horas y en la columna que dice *EpP* se indica la duración del episodio Puelche en días. El resto de variables son conocidas.

#### Verano

En la figura 4.51 se observan las variables principales analizadas en este trabajo durante el desarrollo de un EP de verano, iniciado el día 14 de febrero del año 2019. En el cuadro 4.5 se pueden ver los indicadores principales del evento. Este además corresponde a un EpP de 1 día de duración. Se puede ver en la tarde del día 13 y madrugada del 14, los datos observados de  $V_p$ ,  $T$  y  $q$  poseen valores cercanos al ciclo diurno promedio del mes de febrero. A las 08 HL del día 14 se observó viento por sobre los 4 m/s, correspondiendo a un EP de una hora de duración. Esto se reflejó solo en la velocidad, no así en la temperatura y humedad. Luego las

condiciones del viento siguieron su ciclo diurno, con vientos valle-arriba durante el día. Además se desarrollaron temperaturas por sobre el promedio climatológico y condiciones más húmedas de lo normal. A las 22 HL se observó el inicio de un evento de 14 horas de duración, finalizando a las 11 HL del día siguiente. El inicio es denotado por un notorio salto de  $V_p$ , temperatura y humedad. Respecto a la hora de inicio de este evento, se tiene que es parte del bajo porcentaje de eventos de verano que inician previo a las 00 HL (panel (a), figura 4.27), durante el periodo de transición de vientos diurnos a vientos valle-abajo. Teniendo en cuenta que el EP dura menos de 20 horas, se espera que el valor de  $V_{pmax}$  sea menor a 8 m/s, según la figura 4.28 (panel (a)). En concordancia con estos resultados, se tiene que la velocidad máxima durante el evento fue de  $\sim 7$  m/s, desarrollada a las 08 HL, 3 horas previo al término del EP.

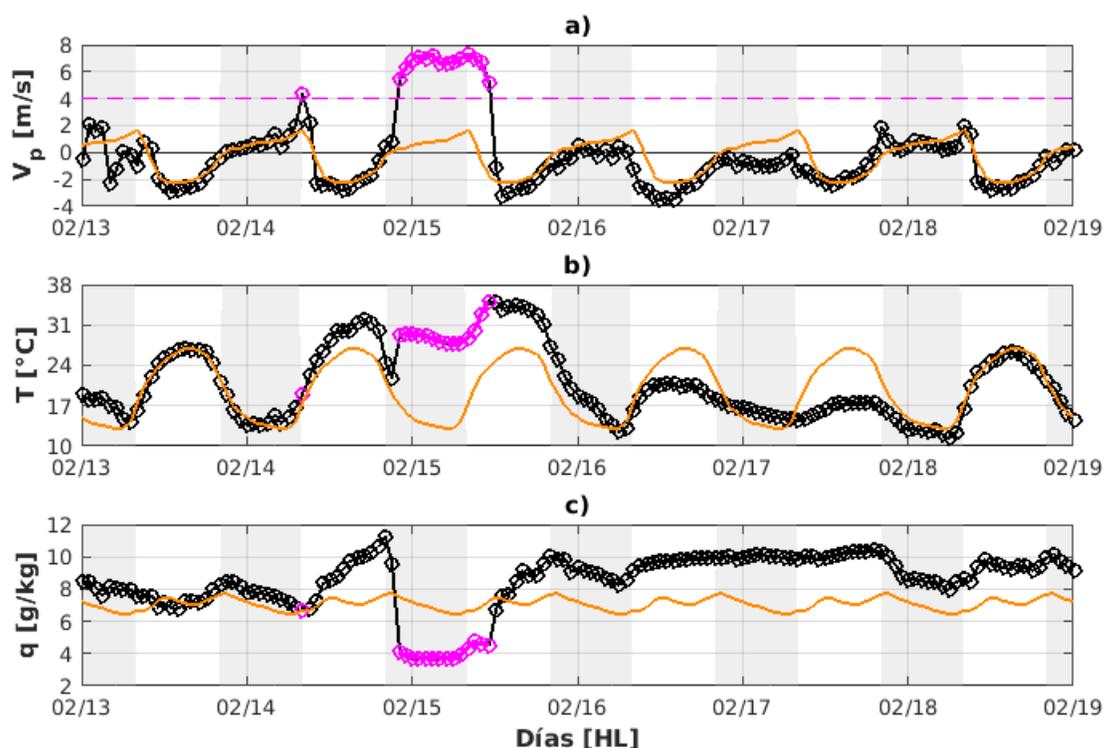


Figura 4.51: Serie de tiempo de un EP percibido en ANT en verano del año 2019. Los círculos se ubican cada una hora, donde el color magenta representa al EP y el color negro a condiciones sin EP. En (a) se tiene a  $V_p$  [m/s], en (b) la temperatura [°C], y en (c) la razón de mezcla [g/kg]. La curva segmentada magenta (panel (a)) indica el umbral a partir del cual los vientos son considerados vientos Puelche. La curva naranja de cada panel corresponde al promedio del ciclo diurno de febrero del periodo entre el 2014 y el 2020, de la variable respectiva. El área gris representa un aproximado de horas nocturnas.

Respecto a los saltos iniciales, se tiene un valor de  $\Delta V_{pi}$  de aproximadamente 6 m/s en 3 horas (panel (a)), es decir, una magnitud en el margen alto del rango de valores típicos de saltos iniciales de  $V_p$  (figura 4.28, panel (a)). En el caso de la temperatura y la humedad (paneles (b) y (c)), se obtuvieron saltos de  $7^\circ\text{C}$  en 1 hora y  $-7$  g/kg en 2 horas, respectivamente. El valor de  $\Delta T_i$  se encuentra dentro del rango típico de valores, lo cual va en acorde con su hora de inicio (figura 4.31, panel (a)). En el caso de  $\Delta q_i$ , se tiene que justamente este evento corresponde a aquel con el secamiento más intenso registrado en el periodo de estudio. Durante el evento,  $V_p$  se mantiene muy por sobre el promedio, al igual que la temperatura. Esta última llega a tener  $28^\circ\text{C}$  a las 06 HL,  $15^\circ\text{C}$  más alto que el valor promedio. En el caso de la humedad, es notoria la condición seca presente durante el evento. En relación a los saltos finales,  $\Delta V_{pf}$  tuvo un valor de  $-9$  m/s. Esta alta magnitud concuerda con la hora de finalización del EP, ya que aquellos eventos que terminan alrededor de las 11 HL suelen presentar una disminución de  $V_p$  más intensa (panel (a), figura 4.41). Asimismo, la intensidad del salto final de  $V_p$  implica un posible salto intenso de  $q$ , según la figura 4.44 (panel (a)). Este tuvo un valor de 3 g/kg. En cambio,  $\Delta T_f$  presentó una disminución de  $2^\circ\text{C}$ . Este bajo valor se debe a la hora de finalización del evento, ya que a las 11 HL el ciclo diurno de temperatura muestra un aumento de esta, la cual suprime parte del enfriamiento esperado al finalizar un EP. Una vez finalizado el evento, la intensidad y dirección de los vientos se recupera rápidamente, al igual que la humedad. Sin embargo, la temperatura se mantiene por sobre el promedio del ciclo diurno varias horas luego de que el EP finalice.

## Invierno

En la figura 4.52 se observa un EP desarrollado en invierno a partir del día 31 de mayo del año 2018. Nuevamente, en el cuadro 4.5 se muestran los valores de los indicadores principales del evento. Previo al inicio del EP se observan magnitudes de viento bajo los 4 m/s, tanto para la dirección valle-arriba como para la valle-abajo. Se ve un ciclo diurno levemente alterado, con algunos vientos débiles en dirección contraria a su fase correspondiente al ciclo diurno de vientos de montaña. Esto se nota al contrastar la curva naranja con la curva negra. Por otra parte, se tiene que previo al EP, la temperatura se encuentra por debajo de su promedio climatológico, mientras que la humedad muestra valores bastante cercanos a su promedio de junio. El día 31 a las 07 HL, previo al máximo climatológico de vientos valle-abajo (fase nocturna), el algoritmo detecta el inicio del evento de 76 horas de duración, es decir, de poco más de 3 días. Sin embargo, este evento corresponde a un EpP de 4 días de duración, con 5 HP desarrolladas el día 31, 12 HP los días 1 y 2, y 11 el día 3 de junio. este evento corresponde al más largo detectado por el algoritmo. Al iniciar, se tiene un salto de  $V_p$  de 5 m/s en 3 horas. Esta además se mantiene por sobre los 6 m/s prácticamente durante todo el evento, logrando un máximo de 11 m/s, 14 horas previo al término del EP. La temperatura también mostró un salto positivo prominente al inicio,

de alrededor de  $6^{\circ}\text{C}$  en 3 horas. Sin embargo, debido a que previo al evento las temperaturas se encontraban bajas, el aumento de esta debido al viento Puelche conllevó a que durante el evento tuviese magnitudes similares a su climatología. La noche del 1 de junio se observó un aumento de la temperatura respecto al promedio, la cual se mantuvo alta durante el mismo día y las noches siguientes. Debido a la hora de inicio del evento, se espera que  $\Delta q_i$  tenga magnitud baja (figura 4.30, panel (b)). En acorde con esto,  $q$  mostró una disminución de  $0.5 \text{ g/kg}$  en 2 horas, separándose de esta forma de su ciclo diurno. Aunque este salto negativo no es notorio en magnitud, en la serie de tiempo se puede notar un secamiento inicial y su profundización paulatina, llegando a un valor de  $2 \text{ g/kg}$  a las 07 HL del 1 de junio. Así,  $q$  se mantiene por debajo de su promedio climatológico durante todo el EP. De esta forma, se tiene que el evento presenta saltos iniciales notorios de  $V_p$  y  $T$ , no así de  $q$ . Por lo tanto, este caso representa un ejemplo en que se obtiene un  $\Delta T_i$  relativamente alto para un valor de  $\Delta V_{pi} > 3 \text{ m/s}$ , no implicando necesariamente un salto prominente de  $q$ .

El evento finalizó a las 10 HL del día 3 de junio. Respecto a los saltos finales,  $\Delta V_{pf}$  mostró una disminución notoria, de  $6 \text{ m/s}$  en 3 horas. A diferencia de  $V_p$ , la temperatura y humedad no presentaron un salto notorio. El valor obtenido de  $\Delta T_f$  fue de  $1^{\circ}\text{C}$ , lo cual corresponde a un aumento de temperatura. Esto se justifica con el ciclo diurno de la misma, el cual presenta un aumento de  $T$  entre las 09 y 15 HL, suprimiendo un posible enfriamiento. Luego, la temperatura mantiene su ciclo diurno, sin embargo, presenta un enfriamiento en la tarde del día 3, el cual se intensifica en la tarde del día 4. Respecto a  $q$ , se tiene que al finalizar el EP, esta presenta un salto de  $0.6 \text{ g/kg}$ . Aunque este salto es bajo, se observa en la serie de tiempo una recuperación del ciclo diurno, sin embargo, con magnitudes por debajo del promedio climatológico. Luego de que el evento finalizase, el ciclo diurno de  $V_p$  se recupera. Sin embargo, a las 06 HL del día 4 de junio se detectó un evento de 4 horas de duración. Este no presentó saltos iniciales/finales notorios de  $T$  y  $q$ , así como tampoco aumento/disminución paulatina durante el mismo.

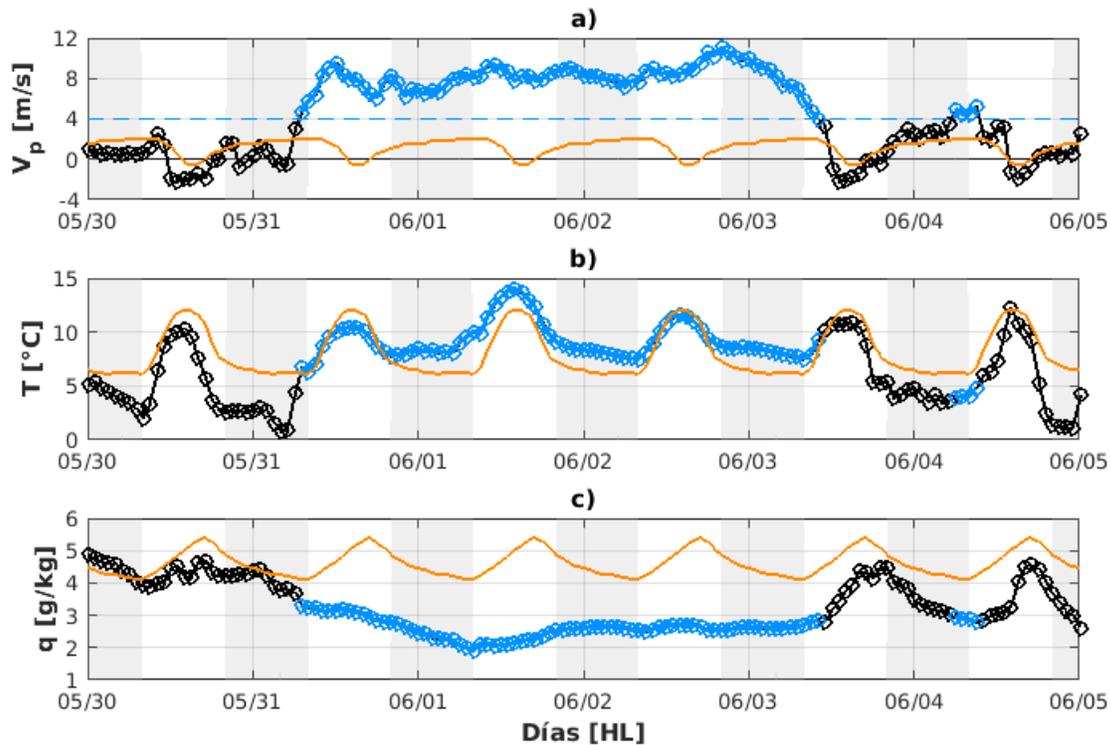


Figura 4.52: Serie de tiempo de un EP percibido en la estación ANT en invierno del año 2015. Los círculos marcan los datos horarios, donde el color celeste representa al EP y el color negro a condiciones sin EP. En (a) se tiene a  $V_p$  [m/s], en (b) la temperatura [°C], y en (c) la razón de mezcla [g/kg]. La curva segmentada celeste (panel (a)) indica el umbral a partir del cual los vientos son considerados vientos Puelche. La curva naranja de cada panel corresponde al promedio del ciclo diurno de junio del periodo entre el 2014 y el 2020, de la variable respectiva. El área gris representa un aproximado de horas nocturnas.

---

# Capítulo 5

## Conclusión y discusiones

El presente trabajo se dividió en 3 partes principales, con el objetivo final de caracterizar el viento Puelche desarrollado en el valle del río Laja. Para lograrlo, en primer lugar se trabajó en la creación de una base de datos cruda y otra promediada cada una hora. Esto se realizó a partir de la información obtenida de la red de 8 estaciones meteorológicas entre el año 2014-2020, ubicadas a lo largo del valle. Se debió recopilar la información obtenida para cada estación y tratarla de acuerdo a sus distintos formatos, de datos cada 1 minuto y datos cada 15 minutos, para luego almacenarla en la base de datos cruda. A partir de esta base de datos, se corroboró la concordancia entre los datos cada 1 y 15 minutos, de forma que se pudiesen promediar cada una hora y concatenar, para así crear una base más completa. Finalmente, se corrigieron errores de magnitud en las variables. Además se debieron realizar correcciones de vientos, debido a problemas presentados en las direcciones predominantes de los vientos en 6 de las 8 estaciones meteorológicas. Este error se atribuyó a problemas con la orientación de los sensores de viento.

Una vez creada la base de datos horarios, se da paso a la segunda parte de este trabajo: la caracterización climatológica del valle. Para esto se escogió la estación Antuco (ANT) como estación principal del estudio de viento Puelche, debido tanto a su ubicación dentro del valle, como a la cobertura temporal de datos en el periodo completo de mediciones. Esta corresponde a 4.1 veranos e inviernos en total. A partir de estos datos se estudió la variación diurna y estacional de las variables meteorológicas principales. Respecto a los vientos, se observó que la circulación general es descrita principalmente por U, debido a la dirección zonal de la porción del valle donde se ubica ANT. La velocidad zonal mostró un marcado ciclo diurno típico de vientos de montaña, con flujos valle-abajo durante la noche y flujos valle-arriba durante el día. Estos últimos poseen una intensidad máxima ( $\sim 2,5$  m/s) y duración ( $\sim 12$  h) promedios mayor durante el verano. Durante esta estación, los vientos valle-abajo poseen una intensidad máxima de 1 m/s, en cambio, en invierno se observaron valores de hasta 2.5 m/s, mientras

que los vientos del régimen diurno alcanzan velocidades máximas promedio de 0.4 m/s y duran aproximadamente 3 horas. Por lo tanto, se tiene que los vientos valle-arriba dominan en cuanto a intensidad en verano y los vientos valle-abajo dominan en cuanto a intensidad y duración en invierno. Respecto a las horas de transición entre fases del ciclo diurno, se tiene que la transición de la mañana se desarrolla entre las 08-10 HL y entre las 10-14 HL en verano e invierno, respectivamente. La transición de la tarde ocurre entre las 20-23 HL en la estación cálida y entre las 16-20 HL en la estación fría. El máximo diurno de  $U$  promedio se desarrolla a las 15 HL en las dos estaciones estudiadas. El mínimo nocturno se desarrolla entre las 07-08 en verano y a las 09 en invierno. Se observaron algunas variaciones interesantes en los ciclos estacionales de la presión y razón de mezcla, las cuales se dejan planteadas como interrogantes para una discusión futura.

En tercer lugar, se dio paso al estudio de la frecuencia de dirección del viento respecto a su intensidad, con la intención de luego dar paso a la caracterización del viento Puelche. Se identificaron 3 modos principales: vientos valle-arriba que no superan los 4 m/s; vientos valle-abajo débiles ( $< 1$  m/s); y vientos valle-abajo con magnitudes de hasta 12 m/s. El último modo correspondería a los vientos Puelche. Se decidió proyectar los vientos en la dirección de viento Puelche, para lo cual se observó la frecuencia de ocurrencia de direcciones de vientos por sobre los 4 m/s, encontrando cierta estacionalidad en la dirección de preferencia de los vientos, a partir de lo cual se escogió como dirección los  $95^\circ$ . Se llamó a la velocidad del viento proyectada como  $V_p$ . Debido a la estacionalidad observada, se decidió estudiar dos estaciones del año: verano (octubre-marzo), e invierno (abril-agosto). Como umbral para encontrar horas Puelche (HP) se utilizó  $V_p > 4$  m/s. Mediante otros criterios se definieron además eventos Puelche (EP) y episodios Puelche (EPp).

A partir de los resultados obtenidos, se encontró que el viento Puelche se desarrolla mayormente en invierno, sin embargo, también en verano, a diferencia de los vientos Raco y Terral. Ignorando la posible variabilidad interanual y estacional, se tendría en promedio el desarrollo de 6 eventos al mes en verano y el doble al mes en invierno. Las HP mostraron tener mayor frecuencia de ocurrencia durante la noche y mañana, aunque también se obtuvieron porcentajes significativos de ocurrencia durante el día, lo cual da cuenta de la capacidad del viento Puelche de romper con el ciclo diurno de vientos de montaña, logrando suprimir en ocasiones al flujo valle-arriba durante el día. Además, las horas de mayor frecuencia de ocurrencia coinciden con las horas de magnitud máxima de vientos valle-abajo del régimen nocturno del ciclo diurno medio. Se observa lo mismo para verano e invierno. Los EP mostraron tener una duración típica menor a 18 horas, aunque se observa un 8% y 15% de eventos con una duración mayor en la estación cálida y fría, respectivamente. Se alcanza un máximo de duración de 55 horas en verano y 79 en invierno. Los inicios de los EP suelen ocurrir durante la noche y mañana en ambas

estaciones presentando, sin embargo, una diferencia entre sí. En verano, las máximas frecuencias de inicio ocurren alrededor de las 07 HL, coincidente nuevamente con el pico nocturno de vientos valle-abajo. Esto podría implicar que el método de detección de HP no filtre adecuadamente vientos nocturnos intensos. En invierno, en cambio, se tiene que durante la noche y mañana las frecuencias de inicio tienen valores relativamente constantes, sin preferencia de inicio a una hora específica. Las horas de finalizaciones se concentran en la mañana durante todo el año, alrededor de las horas correspondientes a la fase de transición de régimen nocturno a diurno de cada estación. Esto implicaría que los vientos Puelche tienden a cesar una vez que comienzan a revertirse las condiciones que fuerzan el flujo valle-abajo, dando paso a los vientos valle-arriba, que disiparían los EP.

La intensidad de los eventos se estudió a partir de su duración y velocidad máxima alcanzada. Los resultados mostraron una clara relación positiva entre ambas variables, con valores típicamente entre los 4-9 m/s para eventos con duración menor a 18 horas, y  $V_{pmax}$  de hasta  $\sim 13$  m/s para eventos más largos. De esta forma, se espera que eventos más largos alcancen velocidades mayores.

Respecto a los saltos iniciales de T y q, se tiene que estos son principalmente positivos y negativos, respectivamente, característica típica atribuida a este tipo de vientos. Se observó que pueden alcanzar magnitudes mayores en verano que en invierno. Tanto los valores máximos de  $\Delta q_i$  como  $\Delta T_i$ , parecen ser intensificados por sus ciclos diurnos respectivos. Sin embargo, ambas variables no muestran una relación aparente entre sí. Por otro lado,  $\Delta V_{pi}$  no muestra relación con el ciclo diurno. Es más, se observó que los vientos desarrollados durante los EP no ven su intensidad fuertemente modulada dependiendo de la hora del día. Es decir, el forzante diurno de vientos valle-arriba no es capaz de contrarrestar al viento Puelche. Además, parece haber una relación no-lineal entre  $\Delta V_{pi}$  y  $\Delta T_i/\Delta q_i$ , donde para  $\Delta V_{pi} \geq 4$  m/s, mayor es el rango de valores que los saltos de T y q pueden tomar. Respecto a los saltos finales, T, q y  $V_p$  se ven modulados por el ciclo diurno. La humedad presenta principalmente salto finales esperados, no así la temperatura, la cual se ve más afectada por su ciclo diurno, obteniendo saltos positivos durante la mañana, cuando el calentamiento radiativo provoca un aumento de la temperatura. Debido a lo mismo, los saltos de  $V_p$  tienden a ser mayores cerca de las 11 HL, una vez que los vientos valle-arriba comienzan a establecerse.  $\Delta V_{pf}$  y  $\Delta q_f$  muestran una mayor fracción de saltos intensos en verano que en invierno, y además presentan una relación interesante entre sí en ambas estaciones, donde para saltos menores a -5 m/s, los saltos de humedad tienen mayor probabilidad de superar el aumento de q de 1 g/kg, especialmente en verano.

La relación que los resultados han dejado entrever entre los vientos Puelche y los vientos diurnos de montaña, sugieren que el forzante termodinámico de los vientos diurnos influye en el inicio y término de los vientos Puelche. Sin embargo, como indica Muñoz et al. (2020), en la estación de invierno la falta de preferencia por una hora en específico para iniciar los EP y la ausencia de una dependencia fuerte entre  $V_p$  (durante EP) y el ciclo diurno, indicarían que el forzante termodinámico no es el único modulando los vientos Puelche.

Por otra parte y como se mencionó anteriormente, no existe una relación clara entre los saltos iniciales de T y q, sin embargo, ambas variables muestran una relación no-lineal similar con  $\Delta V_{pi}$ , es decir, con cambios intensos en la velocidad del viento al iniciar un EP. Montecinos et al. (2017) propone que el calentamiento y secamiento de la atmósfera libre en la zona centro-sur de Chile se explicaría por la subsidencia generada ante la presencia de una predorsal sobre el país, donde el calentamiento en lo alto se debería a compresión adiabática y el secamiento a advección de condiciones secas. Ante los resultados obtenidos, la relación entre los saltos de  $V_p$  y q tanto al inicio como al final de los EP, da indicios sobre cambios de humedad generados por advección, en acuerdo con el estudio de Montecinos et al. (2017). Esto permitiría asumir la existencia de un gradiente de humedad suficiente para sostener la advección señalada. Respecto a T, se observó cómo los saltos de esta variable parecen ser más afectados por su ciclo diurno, en comparación con la humedad, especialmente en los saltos finales. Debido a esto, y a la revisión visual de casos particulares, se considera inoportuno sacar conclusiones de su comportamiento, sin previamente analizar los saltos como un cálculo a partir de las anomalías de la variable.

En cuanto al estudio de viento Puelche en episodios, se obtuvo que cerca de un 80 % de los EpP duran 2 días o menos en ambas estaciones, siendo este porcentaje levemente mayor en verano. En la estación cálida, los EpP duran máximo 3 días, en cambio en la estación fría se tiene un 15 % de episodios que duran entre 3 y 4 días, además de un episodio que dura 5 y otro 6 días consecutivos.

Al comparar los resultados de este estudio con el viento Terral y Raco, se destacan diferencias y similitudes. Tanto el Terral como el Raco son vientos que no se suelen observar en verano y durante las tardes. Esta estacionalidad y marcada dependencia del viento con el ciclo diurno no se observan en el caso del Puelche. Aunque los resultados sí muestran un menor porcentaje de HP durante las tardes, y menos casos de eventos en verano, su desarrollo sí se observa, al menos aparentemente con mayor frecuencia que en el caso del Terral y Raco. Respecto a los saltos iniciales, los vientos Raco mostraron tener una correlación de  $\sim -0,57$  entre los saltos de T y q, dando cuenta de la relación entre el incremento y disminución de ambas variables. En el caso del viento Puelche no se observó una relación clara entre los  $\Delta T_i$  y  $\Delta q_i$ . Cabe destacar que los saltos fueron calculados de igual forma en ambos casos. En cuanto a la intensidad de eventos, se tiene que los tres vientos tienen una duración típica menor a 18 horas (21 horas en el caso

del Terral). En el caso del Raco, al igual que el Puelche, se tiene que hay una relación positiva entre la duración y la velocidad máxima desarrollada durante el evento. Además, la velocidad máxima suele ser de hasta  $\sim 9$  m/s en ambos vientos, aunque los EP mostraron alcanzar velocidades máximas de hasta 13 m/s, a diferencia de los eventos de viento Raco. El viento Terral, por su parte, alcanza velocidades de hasta 15 m/s. En el caso de los episodios, los tres vientos mostraron una duración típica de 1-2 días, sin embargo, las duraciones máximas difieren. En el caso del viento Raco y Puelche, sus duraciones máximas son de 7 y 6 días, respectivamente. En el caso del viento Terral, se tiene que sus episodios pueden durar hasta 15 días consecutivos.

Las diferencias entre los tres vientos se pueden deber a diversas razones:

- Las distintas metodologías de identificación de eventos que se pueden aplicar a un mismo viento generan distintos resultados. Por lo tanto, al comparar caracterizaciones hechas a este tipo de fenómenos, es necesario tener en cuenta los distintos umbrales y algoritmos usados.
- La ubicación dentro del valle donde se localizan las estaciones principales estudiadas. Tanto la altura, como si estas se encuentran a la salida, centro o entrada del valle, pueden modular los resultados obtenidos de las distintas características estudiadas.
- Las características topográficas del valle en el que se desarrolla el viento bajo estudio son de suma importancia. Por una parte, la altura de la CA no permite el paso de vientos desde el este para los vientos Terral y Raco, en cambio esto sí es posible en el caso del viento Puelche. Esto podría significar diferencias fundamentales en los vientos, debido a su diferente mecanismo de formación. Por otro lado, la forma del valle, las constricciones que estos puedan poseer son de suma importancia, ya que pueden conllevar una aceleración o disminución de la velocidad del viento.
- La latitud a la que se ubican los valles, en relación a la estacionalidad de la posición latitudinal del corredor de tormentas, y por lo tanto, del anticiclón migratorio que da formación a la configuración sinóptica de preferencia para el desarrollo de los eventos estudiados.
- La latitud donde se encuentra el valle bajo estudio, en relación a la altura de la CA y por lo tanto del valle completo. El valle Pelambres estudiado por [Arriagada \(2019\)](#), por ejemplo, se ubica entre los 2000-3000 m s.n.m., la porción del cajón del Maipo estudiada por [Muñoz et al. \(2020\)](#) entre los 800-1000 m s.n.m. y el valle del río Laja se sitúa entre los 480 y 1400 m s.n.m.. Esto podría determinar la interacción de la circulación dentro

del valle con el flujo de la atmósfera libre, aunque esto depende también de la topografía y elevación de las montañas circundantes.

---

# Apéndice A

## A.1. Glosario

CA: cordillera de los Andes.

m.s.n: metros sobre el nivel del mar.

$V_p$ : velocidad proyectada en la dirección de viento Puelche ( $95^\circ$ ).

d1m: datos tomados con frecuencia de 1 minuto.

d15m: datos tomados con frecuencia de 15 minutos.

HP: hora Puelche.

EP: evento Puelche.

EpP: episodio Puelche.

HL: hora local.

U: componente zonal del viento.

V: componente meridional del viento.

T: temperatura.

q: razón de mezcla.

$V_{pmax}$ :  $V_p$  máximo desarrollado durante un EP.

$\Delta T_i$ : cálculo del salto de T desarrollado al inicio de un EP.

$\Delta q_i$ : cálculo del salto de q desarrollado al inicio de un EP.

$\Delta V_{pi}$ : cálculo del salto de  $V_p$  desarrollado al inicio de un EP.

$\Delta T_f$ : cálculo del salto de T desarrollado al final de un EP.

$\Delta q_f$ : cálculo del salto de q desarrollado al final de un EP.

$\Delta V_{pf}$ : cálculo del salto de  $V_p$  desarrollado al final de un EP.

---

# Apéndice B

## B.1. Estaciones meteorológicas y base de datos

### B.1.1. Información complementaria sobre la red de estaciones

A continuación se brindará información extra acerca de la ubicación de las 8 estaciones meteorológicas que forman parte de la red del valle del río Laja. Además, el cuadro B.1 indica las fechas en que fueron realizadas visitas a terreno durante el periodo entre los años 2014 y 2020. Esta también indica las estaciones meteorológicas que fueron manipuladas durante las visitas. La información brindada en esta sección fue aportada por Victor Villagrán, docente de la Universidad de Concepción.

- VOL: ubicada a  $\sim 30$  m al casino del centro de ski del volcán Antuco.
- CON: próxima a la cabina de control de CONAF.
- END: ubicada a  $\sim 100$  m de la garita de acceso de la central hidroeléctrica Abanico de Endesa, sobre un monte.
- ANT: ubicada en la propiedad del Eco Hotel Antuco.
- RUC: se encuentra al interior de la central hidroeléctrica Rucue, propiedad de Colbún S.A.
- CAR: se ubica en el patio de una casa particular.
- LEC: - sin información adicional -
- CHA: ubicada en el terreno de la Subestación Eléctrica Charrúa de Transelec.

<b>Año</b>	<b>Fecha</b>	<b>Estación revisada</b>
<b>2014</b>	6/feb	VOL, CON, END, RUC, CAR, LEC, CHA
	27/mar	VOL, CON, END, RUC, CAR, LEC
	11/abr	CHA
	15/abr	VOL
	13/may	VOL
<b>2015</b>	11/mar	END, ANT
	15/may	RUC
	26/may	VOL, CON
	5/sep	END, ANT
	7/oct	VOL, CON, CAR, LEC, CHA
	6/nov	RUC, CHA
<b>2016</b>	27/ene *	cambio entre ANT1 y ANT2
<b>2017</b>	2do semestre *	VOL, CON, END, ?
<b>2018</b>	13/jun	CAR
	12/dic	?
<b>2019</b>	31/ene ◦	VOL
	18/oct	VOL
<b>2020</b>	23/ene	ANT
	30/ene	CON, END, CAR, CHA

Cuadro B.1: Fechas de las visitas a terreno realizadas en el periodo de toma de datos, y las respectivas estaciones que fueron manipuladas. Con un signo de interrogación se denota la falta de información sobre que estaciones se visitaron. La primera fecha registrada corresponde a la instalación de la red de estaciones. Los símbolos indican las fechas con las cuales coinciden cambios en la dirección del viento de algunas estaciones.

### **B.1.2. Cambios en la dirección de vientos**

En la sección 4.1.2 se dio cuenta de arreglos en la dirección de viento que debieron ser aplicadas a 6 de las 8 estaciones meteorológicas instaladas en el valle del río Laja. En el capítulo se puso especial énfasis en la estación principal ANT. A continuación se brindará más información respecto a este problema en la red completa de estaciones.

En la figura B.1 se observa la cobertura temporal de los datos de las 8 estaciones, una vez creada la base de datos horarios. Los símbolos rojos indican la fecha a partir de la cual se observa un cambio en la dirección de los vientos. Las fechas se indican en el cuadro B.2. Este y el cuadro B.3 muestran en las columnas los cambios de dirección de viento enumerados (C1, C2 y C3). Las casillas moradas no poseen información, ya que las estaciones correspondientes poseen menos de 3 cambios en su periodo de toma de datos. En el cuadro B.2 se observa que las estaciones VOL y END poseen “~” previo a algunas fechas, ya que los cambios se observaron en medio de un periodo continuo de toma de datos, lo cual dificulta encontrar la fecha exacta en que el cambio inició. Respecto al posible origen del problema de homogeneidad de vientos, como se dijo

en el capítulo 4.1.2, corresponderían a cambios en la orientación del sensor de vientos. Esto se puede originar por la manipulación de la estación al realizar mantenencias durante las visitas a terreno, o por vandalismo por parte de terceros. Los símbolos de la figura B.1 (ordenados en el cuadro B.2) denotan el intento por estimar el origen de los cambios en el viento. La estrella (★) indica el primer cambio sufrido en CON y ANT. Ocurrió el día 27/01/16, fecha en que se llevó la estación meteorológica ANT2 (LEC) a la ubicación de Antuco para luego reemplazar ANT1 (cuadro B.1). El asterisco (\*) denota el segundo cambio de CON y ANT, y el primero en CHA, ocurridos el 03/01/18. Debido a que las 3 estaciones comienzan a grabar información a partir de esta fecha, se estima que estos cambios se podrían asociar a un terreno ocurrido a principios del 2018, sin embargo no se puede asegurar con exactitud, ya que no se cuenta con información al respecto. El único cambio que sufrió END (denotado por ◇) pudo ocurrir durante alguno de los terrenos llevados a cabo en el segundo semestre del año 2017. En el caso de VOL, su primer cambio coincide con la visita a terreno ocurrida el día 31/01/19, momento en el que se incorporó un panel solar a esta estación. Previamente esta estación había sufrido el robo de su panel solar, momento en el que también pudo sufrir una alteración en su orientación el sensor de vientos. Respecto al cambio ocurrido en CAR y los últimos dos, en VOL, estos no pueden ser asociados a una visita a terreno, por lo cual se atribuyen a vandalismo, especialmente en el caso de VOL, estación que se ubica en una locación con tránsito de personas (sección B.1.1).

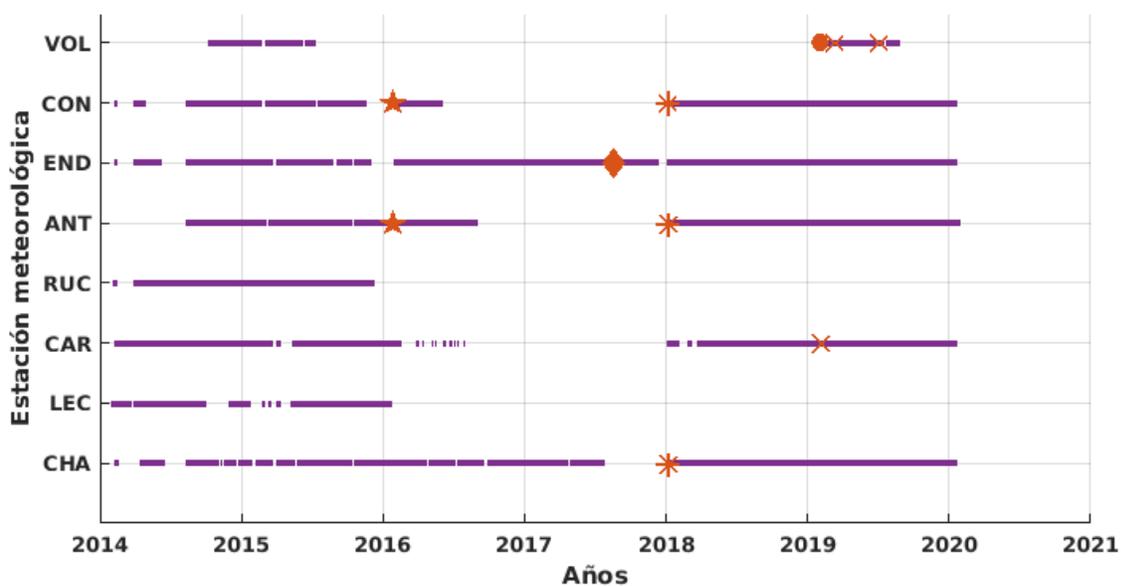


Figura B.1: Cobertura temporal de los datos de la base horaria creada de las 8 estaciones meteorológicas ubicadas en el valle del río Laja. Estas se muestran según su posición de este (VOL) a oeste (CHA). Los símbolos rojos indican el punto a partir del cual se observa un cambio en la dirección de los vientos. Para complementar la información, ver cuadro B.2.

	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
<b>VOL</b>	31/01/19 ◦	~10/03/19 x	~02/07/19 x
<b>CON</b>	27/01/16 *	03/01/18 *	
<b>END</b>	~20/08/17 ◇		
<b>ANT</b>	27/01/16 *	03/01/18 *	
<b>RUC</b>			
<b>CAR</b>	~04/02/19 x		
<b>LEC</b>			
<b>CHA</b>	03/01/18 *		

Cuadro B.2: Fechas a partir de las cuales se observa un cambio de la dirección del viento en cada estación meteorológica. ~ denota fechas que debieron ser aproximadas. Los símbolos se utilizaron para indicar aquellos cambios que sucedieron en la misma fecha. Además, las fechas que coinciden con visitas a terreno fueron marcadas con su símbolo correspondiente en el cuadro B.1. Las casillas moradas no poseen información, ya que las estaciones correspondientes poseen menos de 3 cambios en su periodo de toma de datos.

Una vez identificados los periodos de cambio de dirección de vientos, se realizó una rotación de vientos. Los ángulos utilizados se decidieron a partir de revisión visual de diagramas de dispersión de dirección respecto a magnitud del viento. Estos se pueden revisar en el cuadro B.3. Además, en las figuras B.2, B.3, B.4 y B.5 se muestra en contornos, promedios mensuales de la frecuencia de dirección del viento, calculada con los datos horarios, previo a la homogeneización de los vientos. La línea punteada roja se alinea con la dirección de máxima frecuencia del último periodo de toma de datos de cada estación, permitiendo notar así los cambios sufridos en el tiempo. Por otra parte, las figuras B.6, B.6, B.7 y B.8 muestran lo mismo que en las figuras anteriores, pero para los vientos ya homogeneizados mediante la rotación. Con estos datos corregidos se creó la base de datos limpios.

	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
<b>VOL</b>	50°	25°	15°
<b>CON</b>	50°	28°	
<b>END</b>	340°		
<b>ANT</b>	26°	350°	
<b>RUC</b>			
<b>CAR</b>	45°		
<b>LEC</b>			
<b>CHA</b>	7°		

Cuadro B.3: Ángulos de corrección aplicados al periodo previo al cambio de dirección de vientos en cada estación meteorológica. Las casillas moradas no poseen información, ya que las estaciones correspondientes poseen menos de 3 cambios en su periodo de toma de datos.

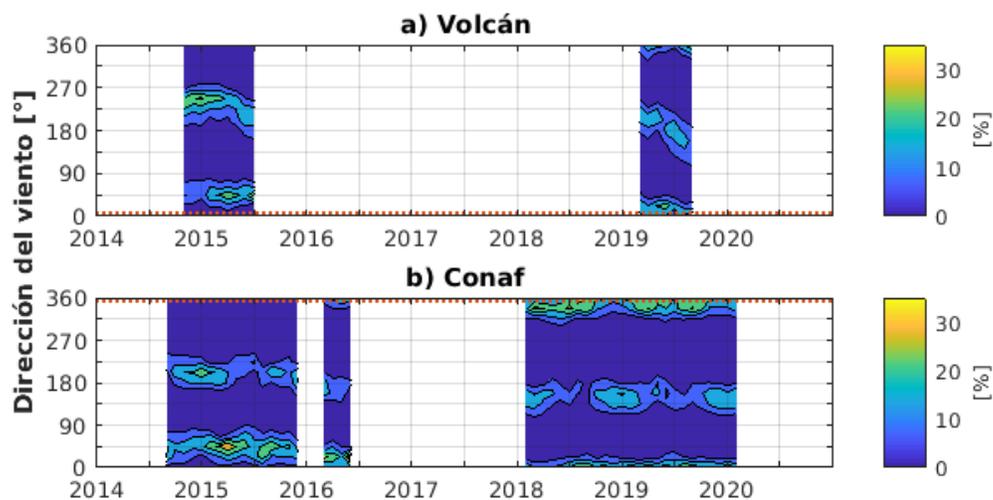


Figura B.2: Contornos de promedios mensuales de frecuencia [%] de dirección del viento en las estaciones VOL (a) y CON (b), obtenida con los datos horarios previos a la homogeneización de vientos. Las líneas rojas punteadas están alineadas con la dirección de máxima frecuencia del último periodo de toma de datos. Los contornos se muestran cada 7%.

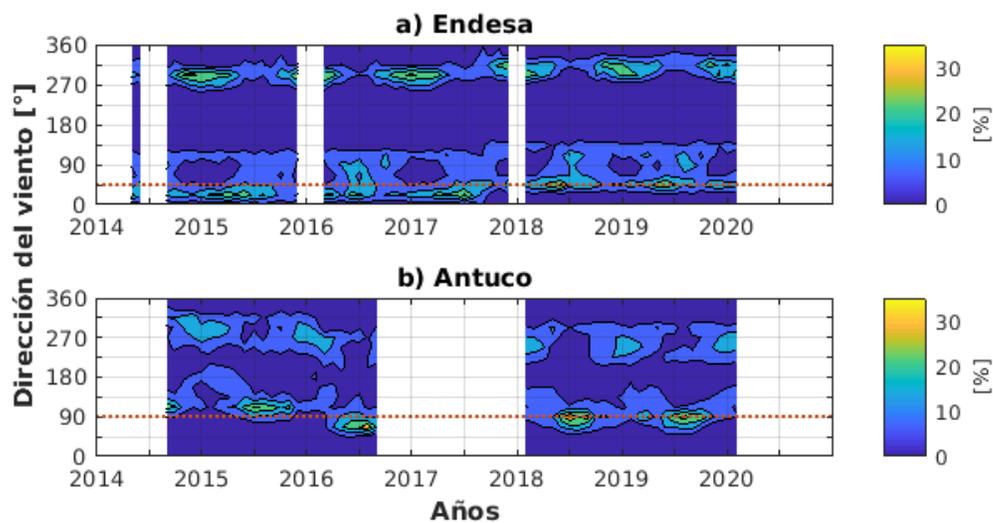


Figura B.3: Como la figura B.2, pero para las estaciones END (a) y ANT (b).

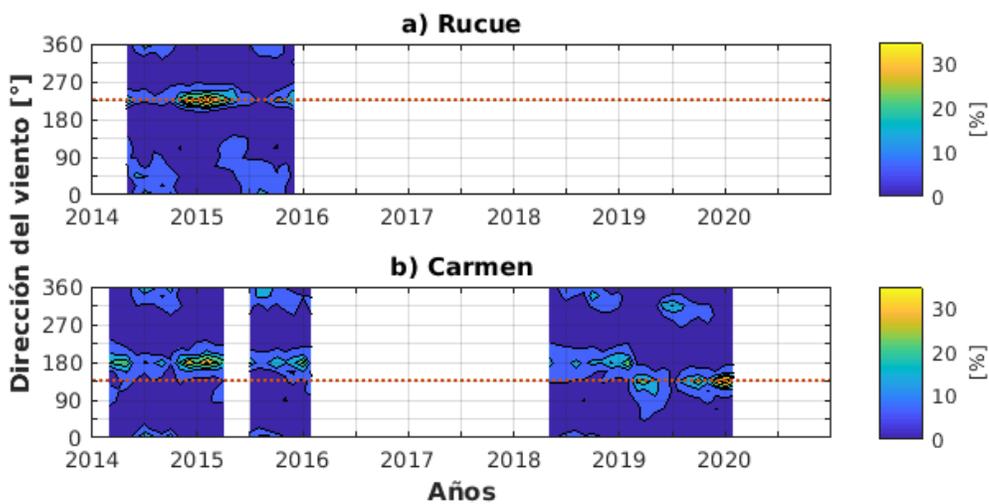


Figura B.4: Como la figura B.2, pero para las estaciones RUC (a) y CAR (b).

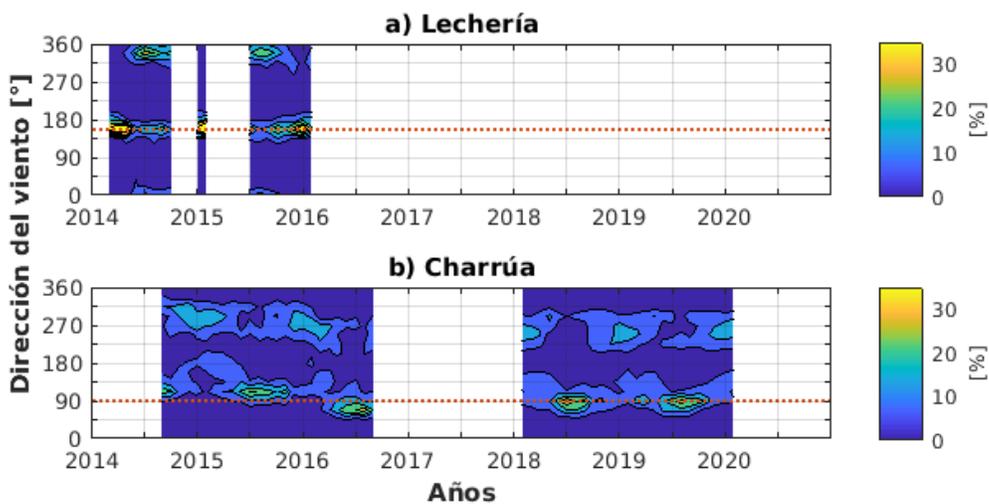


Figura B.5: Como la figura B.2, pero para las estaciones LEC (a) y CHA (b).

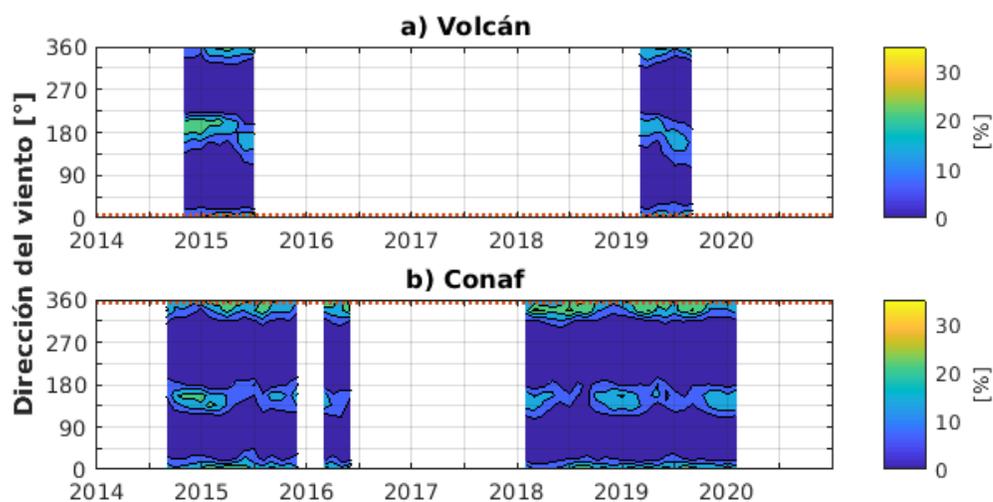


Figura B.6: Como la figura B.2, pero para la dirección del viento homogeneizada según el último periodo de datos.

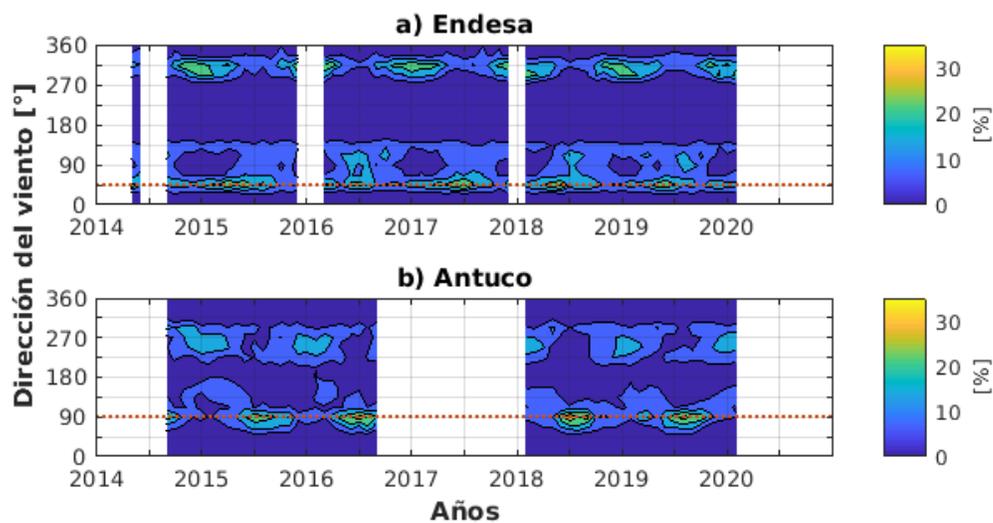


Figura B.7: Como la figura B.6, pero para las estaciones END (a) y ANT (b).

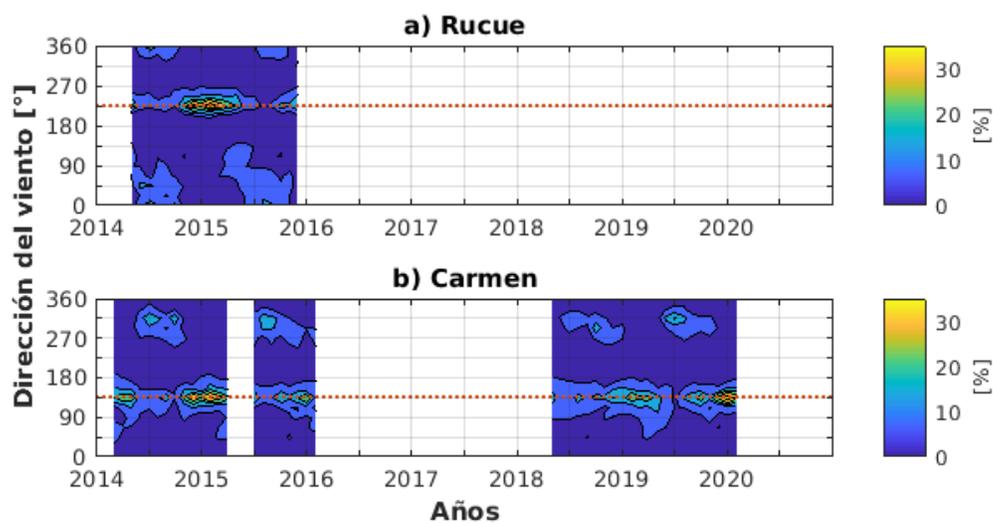


Figura B.8: Como la figura B.6, pero para las estaciones RUC (a) y CAR (b).

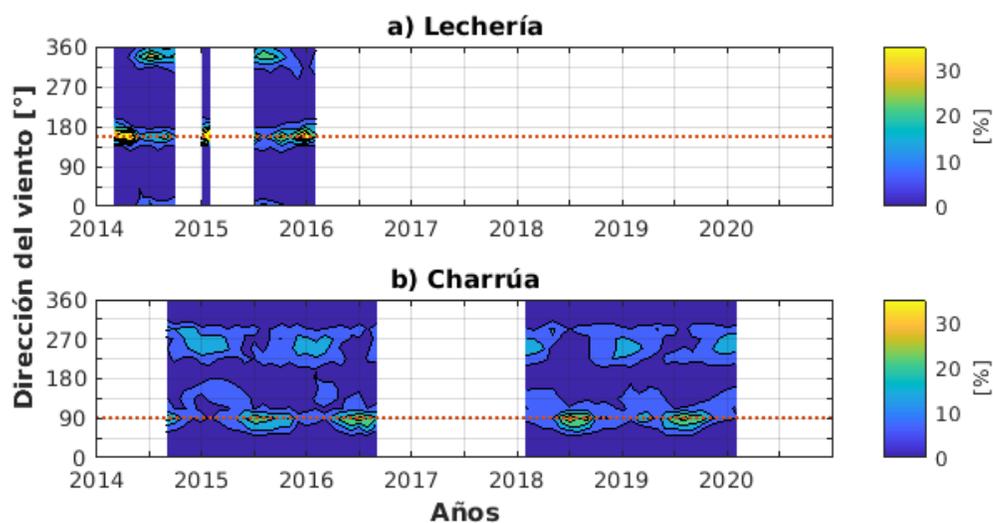


Figura B.9: Como la figura B.6, pero para las estaciones LEC (a) y CHA (b).

### B.1.3. Estructura de bases de datos creadas

Las bases de datos se guardaron como archivos en formato MATLAB, los cuales poseen estructuras organizadas como muestran los cuadros B.4 y B.5.

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Tipo	Estación	Frecuencia	Variables
<b>BDB</b>	VOL	data1m	fecha date HR T P Pp WD WS
	CON		
	END		
	ANT		
	RUC	data15m	
	CAR		
	LEC		
	CHA		

Cuadro B.4: Estructura del archivo de datos crudos nombrado valleLaja\_BDB.mat.

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Tipo	Estación	Frecuencia	Variables
<b>BDL</b>	VOL	data1h	fecha date HR T P Pp WD WS
	CON		
	END		
	ANT		
	RUC		
	CAR		
	LEC		
	CHA		

Cuadro B.5: Estructura del archivo de datos crudos nombrada valleLaja\_BDL.mat.

---

# Apéndice C

## C.1. Alcance espacial a lo largo del valle

Debido a falta de tiempo, no se pudo hacer una revisión respecto al alcance espacial que tienen los EP a lo largo del valle estudiado. Debido a esto, se decidió revisar el alcance espacial de el ejemplo de verano e invierno estudiados en la sección 4.3.4. Para ambos ejemplos, se mostrarán figuras similares a la figura 4.51, pero para las estaciones CON, END y CAR. Debido a que no se cuenta con la variable  $V_p$ , se graficaron tanto la magnitud (paneles (a)), como la dirección del viento (paneles (b)). Esta revisión será somera, ya que no se analizarán cartas sinópticas, ni se hará un análisis muy detallado.

### C.1.1. Ejemplo de verano

La estación CON se ubica a aproximadamente 20 km al sureste de ANT, a una altura de 958 m s.n.m.. Para el evento iniciado en la noche del 14 de febrero del año 2019, se puede observar en el panel (a) de la figura C.1 que se desarrollan vientos por sobre los 4 m/s, los cuales inician dos horas antes que en ANT, con un salto de 3 m/s. Además se observa que los vientos son altos en comparación al promedio diurno (curva naranja). Respecto a la dirección del viento, se observa que estos tienen una dirección norte. Esta dirección difiere de lo esperado (vientos del este), sin embargo se atribuye a los problemas observados en la dirección del viento. Respecto a la temperatura, no se observa un salto al inicio ni al final del EP, sin embargo si se tiene que las temperaturas se mantienen por sobre el promedio diurnos mensual. Estas comenzaron a aumentar luego del EP de un hora, ocurrido más temprano durante el mismo día. Una vez que el evento termina, la temperatura comienza a recuperarse. La humedad, en cambio, sí presenta saltos prominentes, desarrollados 2 horas previo y posterior al inicio y final del EP, respectivamente. El salto inicial fue de 5 g/kg y el final de 2 g/kg. En el caso de END (figura C.2), estación ubicada a 733 m s.n.m. a 12 km al noreste de ANT, se observan vientos de hasta 10 m/s en los dos EP registrados el día 14 de febrero. Respecto al evento más largo, este tuvo un salto de velocidad de 9 m/s en dos horas. Además el evento

parece iniciar y terminar a la misma hora que en ANT. La dirección del viento muestra ser este-noreste en los dos eventos, ante lo cual cabe recordar que al noreste de la estación se ubica la salida de un valle aledaño. En la serie de temperatura, se observa un calentamiento paulatino posterior al primer EP, además de un salto de  $5^{\circ}\text{C}$  en dos horas al inicio del evento principal. La temperatura se mantuvo por sobre el promedio diurno durante los días 14 y 15 de febrero. Nuevamente la serie de  $q$  mostró prominentes saltos al inicio y final del EP, con valores de 6 y 3 g/kg, respectivamente.

Por último, revisamos la estación CAR (figura C.3), ubicada fuera del valle a 304 m s.n.m. y a una distancia de ANT de 27 km. En la figura se observa la ausencia de vientos fuertes en los dos EP en esta locación. La dirección del viento parece cambiar constantemente durante el EP principal. Respecto a la temperatura, a partir del primer EP se observan tardes cálidas el día 14 y 15, con un lento enfriamiento nocturno entre ambos días, el cual se consolida en la madrugada, para luego aumentar rápidamente ante la salida del sol. Por otra parte, la humedad no muestra una respuesta evidente al EP.

Por lo tanto, en el ejemplo estudiado de verano, se tiene que el EP es percibido en las estaciones CON y END aparte de ANT. Se observaron comportamientos similares en magnitud del viento y humedad en CON, con una pequeña diferencia en las horas de inicio y término del EP. END mostró similitudes tanto en el comportamiento de la temperatura y la humedad. Respecto al viento, este desarrolló magnitudes mayores que CON y ANT. La diferencia presentada puede estar relacionada con la ubicación de la estación, en la cual se intersecta el valle aledaño con el valle principal del río Laja. Por último, en CAR no se observan los vientos Puelche, sin embargo existe un aumento en los máximos diurnos de los días 14 y 15, lo cual se puede relacionar a las condiciones sinópticas que propician gran parte de estos vientos. El desarrollo de una baja costera suele estar acompañado de cielos despejados y subsidencia de aire, lo que conlleva a el desarrollo de temperaturas altas durante el día.

### C.1.2. Ejemplo de invierno

Para el evento iniciado en la madrugada del 31 de mayo del 2018, se observa en el panel (a) de la figura C.4 que este inicia por lo menos 4 horas antes que en ANT, lo cual se confirma al observar la temperatura. Se desarrollan vientos por sobre los 4 m/s, sin embargo en ocasiones su magnitud disminuye, dando cuenta de un comportamiento más errático del viento en esta estación meteorológica. Nuevamente se observan vientos del norte durante el desarrollo del evento, pero como se dijo anteriormente, esto se atribuye al problema detectado en la orientación del sensor de vientos. La temperatura muestra un salto inicial de  $\sim 4^{\circ}\text{C}$  en dos horas. Esta se mantiene muy cercana a su promedio mensual durante el evento, presentando su máximo durante el día 01 de junio, al igual que en ANT. Respecto a la razón de mezcla, esta se mantuvo

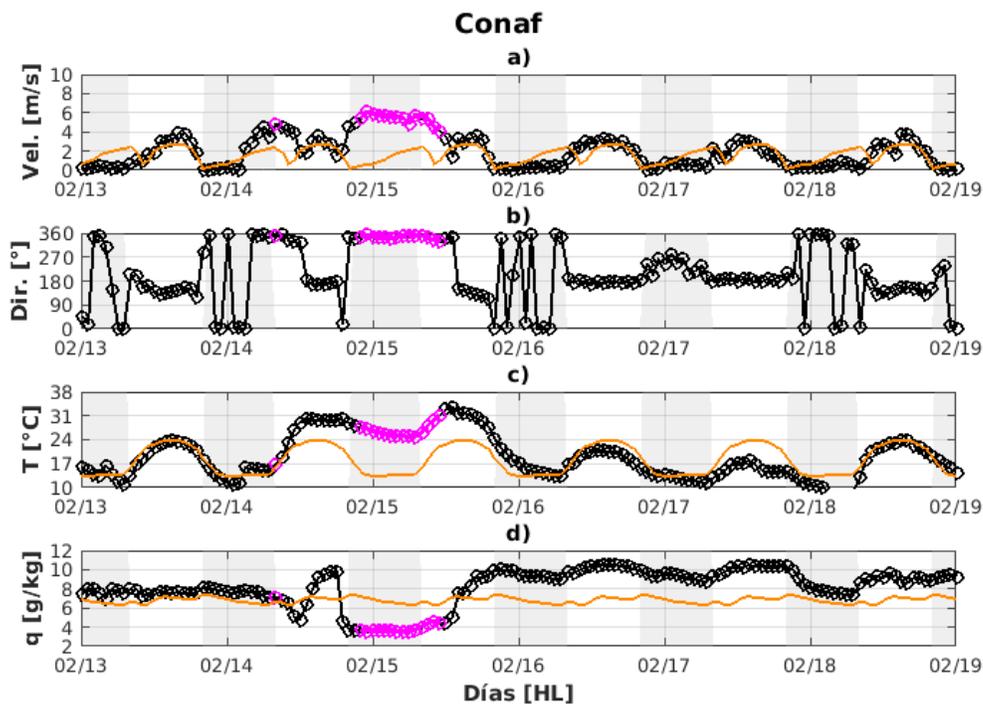


Figura C.1: Serie de tiempo de las condiciones en la estación CON durante un EP percibido en ANT en verano del año 2019. Los círculos se ubican cada una hora, donde el color magenta representa al EP, según la duración, inicio y final detectados en ANT. En (a) se tiene la magnitud del viento [m/s], en (b) su dirección [°], en (c) la temperatura [°C], y en (d) la razón de mezcla [g/kg]. La curva naranja de cada panel corresponde al promedio del ciclo diurno de febrero del periodo entre el 2014 y el 2020, de la variable respectiva. El área gris representa un aproximado de horas nocturnas.

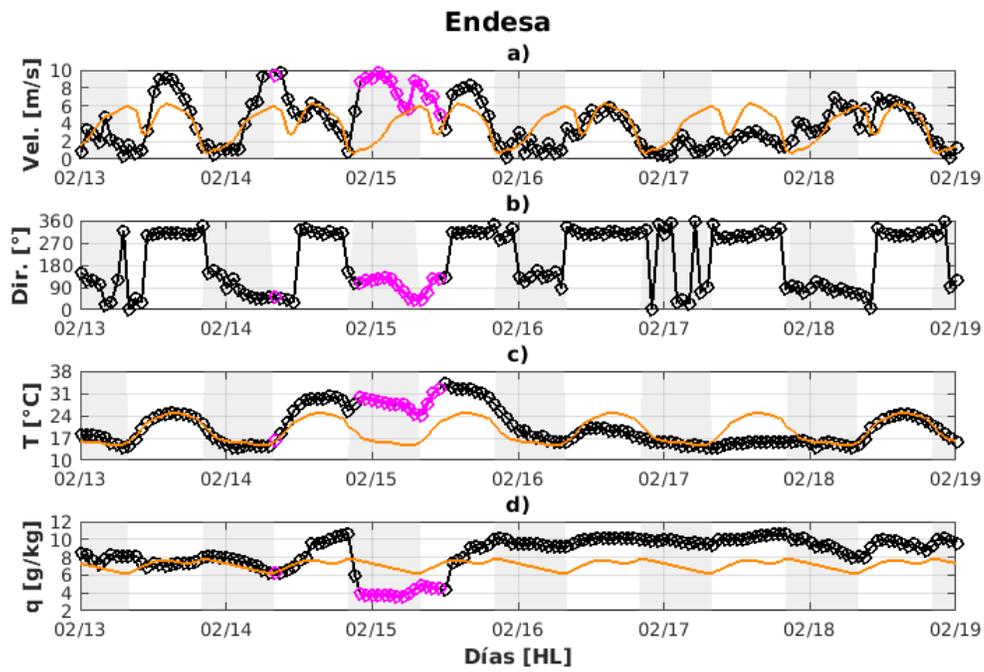


Figura C.2: Como la figura C.1, pero para las condiciones en la estación END.

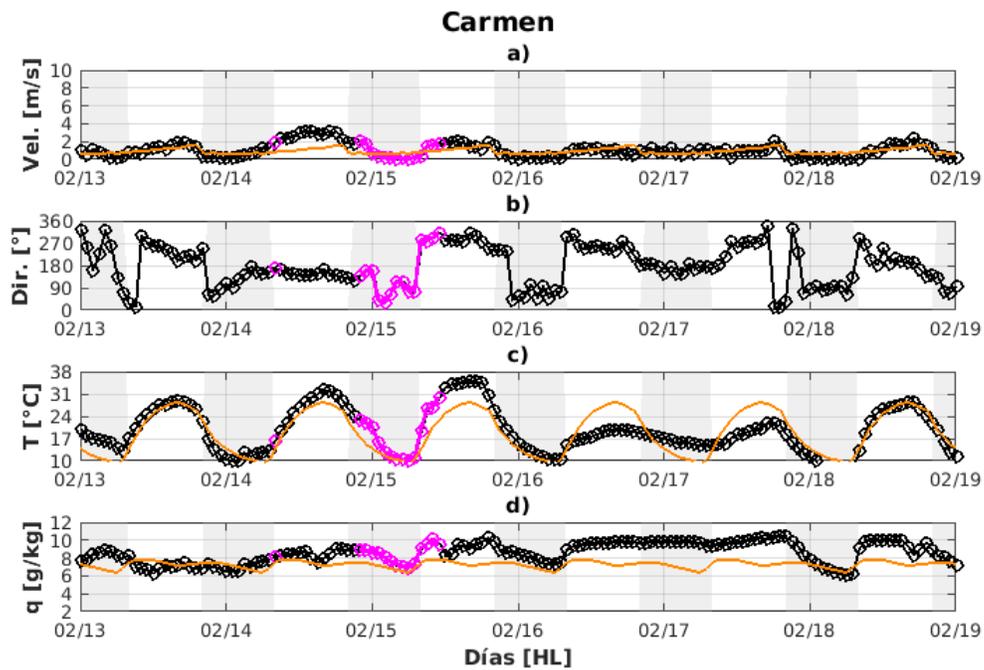


Figura C.3: Como la figura C.1, pero para las condiciones en la estación CAR.

por debajo de su promedio diurno mensual durante el EP. Además esta desarrolló un pequeño salto inicial de 1 g/kg.

En END (figura C.5) la magnitud del viento no presenta magnitudes mayores a las percibidas en ANT como sucedió en el ejemplo de verano, pero sí se observa nuevamente su comportamiento errático, teniendo valores menores a 4 m/s en las madrugadas de los días 01, 02 y 03 de junio. La dirección del viento muestra ser principalmente del este, sur-este. En esta estación, el EP parece iniciar dos horas antes que en ANT. La temperatura presenta un salto inicial de aproximadamente 5°C y se mantiene muy cercana al promedio diurno, a excepción del día 01, donde nuevamente se desarrollan las máximas temperaturas. La humedad no presenta un salto marcado al inicio del evento, aunque sí presenta una recuperación 5 horas después del término del evento en ANT, de 2 g/kg en dos horas.

En estación CAR (figura C.6) se desarrollaron vientos por sobre el promedio diurno, llegando en ocasiones incluso a superar los 4 m/s, sin embargo, esto ocurrió de forma episódica, es decir, por periodos de tiempo interrumpidos por vientos débiles. El panel (b) muestra cuando se desarrollan vientos con magnitud cercana o mayor a los 4 m/s, la dirección tiende a ser del este-noreste. Por otro lado, la temperatura muestra un salto inicial de 7°C y un calentamiento que se mantiene en la noche del 31 de mayo y madrugada del 01 de junio. Se observa en las noches del 02 y 03 un enfriamiento considerable respecto a su media diurna, con temperaturas menores a los 0°C, para luego presentar saltos mayores a los 6°C a la salida del sol. Se puede observar como en el día 02 se presentan tres máximos de temperatura, los cuales coinciden con picos en la magnitud del viento y mínimos en la razón de mezcla (panel (d)). La humedad presenta un salto inicial de 2 g/kg 7 horas después del inicio del evento en ANT. Esta se mantiene por debajo del promedio durante todo el evento.

Por lo tanto, se percibió en todas las estaciones la presencia de viento Puelche, especialmente en CON y END. Se observaron ciertas similitudes entre estas dos estaciones. Ambas presentan magnitudes del viento similares a ANT, pero con un comportamiento más errático, presentando disminuciones de velocidad en ocasiones. La serie de T también se muestra similar en las 3 estaciones, presentando todas un salto inicial y ausencia de salto final. Además en las tres locaciones la humedad se mantuvo por debajo del promedio diurno mensual. Respecto a CAR, se observó en ocasiones vientos del este con magnitudes cercanas a los 4 m/s, direcciones del este y aumento(disminución) de la temperatura (humedad) simultáneos. De esta forma, se puede decir que el viento Puelche puede alcanzar ocasionalmente esta locación ubicada a  $\sim 16$  km de la salida del valle. No se descarta que existan más eventos con esta característica. Sería interesante estudiar si esta pertenece únicamente a eventos de invierno, o también puede ocurrir en EP de verano.

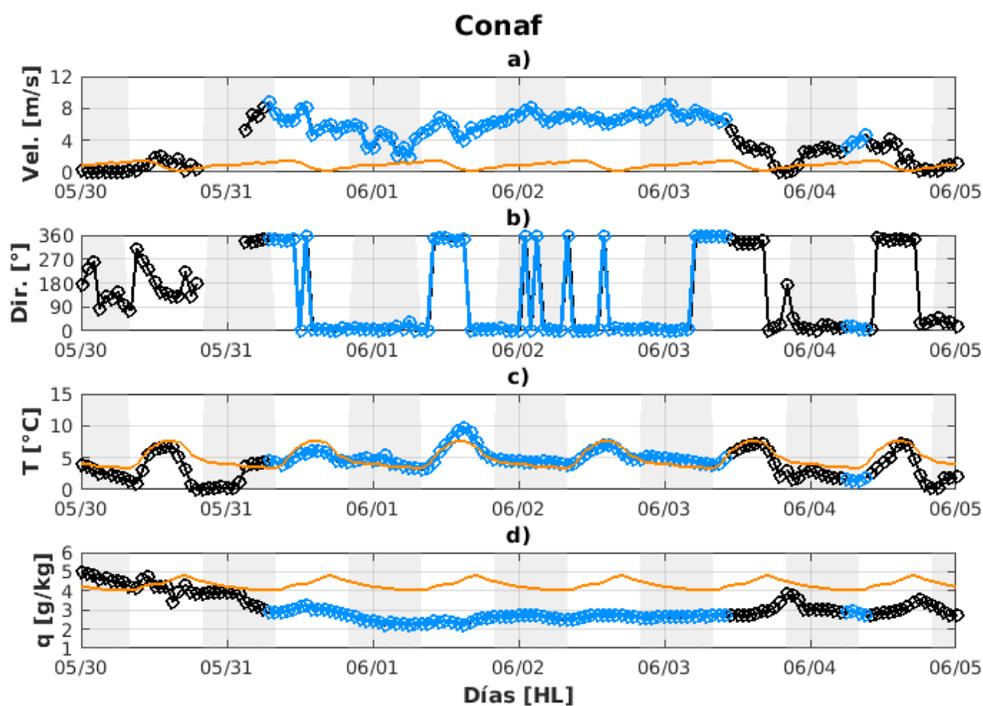


Figura C.4: Serie de tiempo de las condiciones en la estación CON durante un EP percibido en ANT en invierno del año 2018. Los círculos se ubican cada una hora, donde el color magenta representa al EP, según la duración, inicio y final detectados en ANT. En (a) se tiene la magnitud del viento [m/s], en (b) su dirección [°], en (c) la temperatura [°C], y en (d) la razón de mezcla [g/kg]. La curva naranja de cada panel corresponde al promedio del ciclo diurno de febrero del 2014 y el 2020, de la variable respectiva. El área gris representa un aproximado de horas nocturnas.

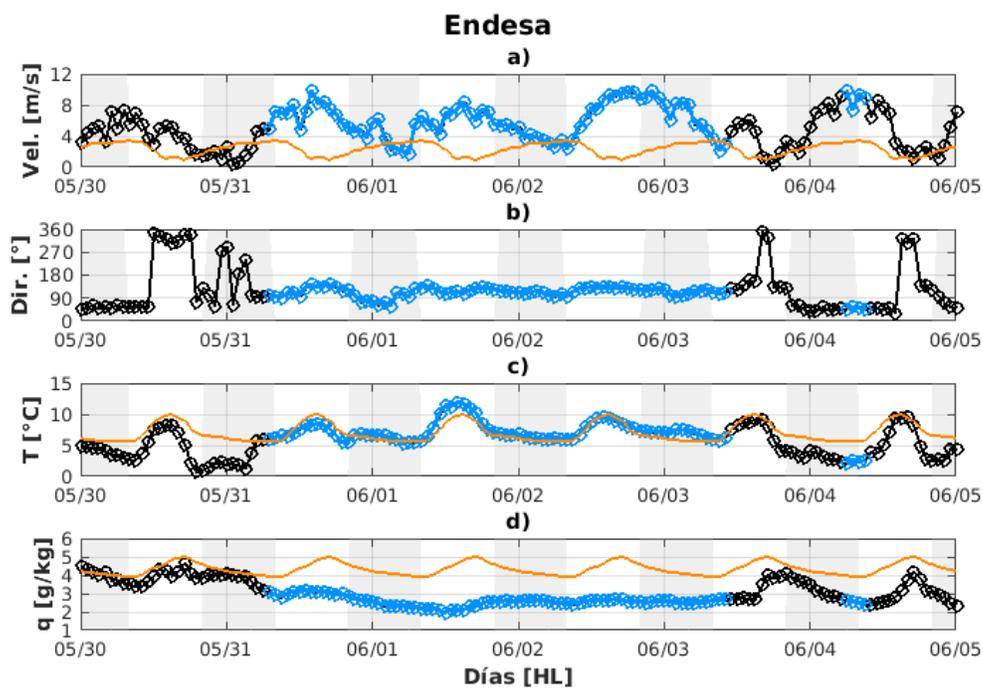


Figura C.5: Como la figura C.4, pero para las condiciones en la estación END.

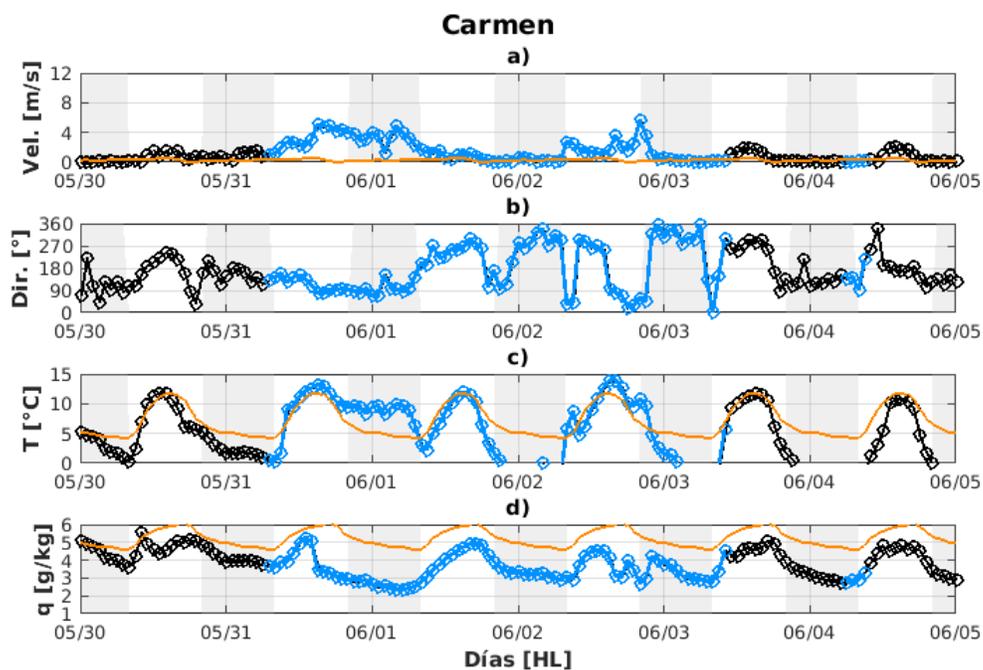


Figura C.6: Como la figura C.5, pero para las condiciones en la estación CAR.

---

# Bibliografía

- Armi , L. y Mayr , G. 2007, Continuously stratified flows across an alpine crest with a pass: Shallow and deep föhn. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, 133(623):459–477.
- Arriagada , A. 2019, Caracterización observacional de eventos de terral en el valle del río pelambres. *Tesis para optar al máster de Meteorología y Climatología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.*
- Barry , R. 1992, *Mountain weather and climate*. Psychology Press.
- Beusch , L., Raveh-Rubin , S., Sprenger , M., y Papritz , L. 2018, Dynamics of a puelche foehn event in the andes. *Meteorologische Zeitschrift*, 27(1):67–80.
- Brinkmann , W. 1971, What is a foehn? *Weather*, 26(6):230–240.
- De Franceschi , M., Zardi , D., Tagliazucca , M., y Tampieri , F. 2009, Analysis of second-order moments in surface layer turbulence in an alpine valley. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, 135(644):1750–1765.
- elDesconcierto . 12/02/19, Viento puelche: La fuerte brisa veraniega que ha facilitado la propagación de los incendios forestales en el bío bío. <https://www.eldesconcierto.cl/>.
- Garreaud , R. 2009, The andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 22:3.
- Garreaud , R. D. y Aceituno , P. 2007, Atmospheric circulation over south america: mean features and variability. *The physical geography of South America. Oxford University Press, Oxford, England.*
- Garreaud , R., Vuille , M., Compagnucci , R., y Marengo , J. 2009, Present-day south american climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4):180–195.
- Jackson , P., Mayr , G., y Vosper , S. 2013, *Dynamically-driven winds*. Springer.

- Kalthoff , N., Bischoff-Gauß , I., Fiebig-Wittmaack , M., Fiedler , F., Thürauf , J., Novoa , E., Pizarro , C., Castillo , R., Gallardo , L., Rondanelli , R., et al. 2002, Mesoscale wind regimes in chile at 30°s. *Journal of Applied Meteorology*, 41(9):953–970.
- Klemp , J. y Durran , D. 1987, Numerical modelling of bora winds. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 36(1-4):215–227.
- Klemp , J. y Lilly , D. 1975, The dynamics of wave-induced downslope winds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32(2):320–339.
- Markowski , P. y Richardson , Y. 2011, *Mesoscale meteorology in midlatitudes*, tomo 2. John Wiley & Sons.
- Marsden , J. E., Tromba , A. J., y Mateos , M. L. 1991, *Cálculo vectorial*, tomo 69. Addison-Wesley Iberoamericana.
- Meruane , C. 2005, El efecto del viento puelche sobre la hidrodinámica y calidad de aguas del lago villarrica. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.*
- Montecinos , A., Muñoz , R. C., Oviedo , S., Martínez , A., y 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., y 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., Armi , L., Rutllant , J., Falvey , M., Whiteman , D., Garreaud , R., Arriagada , A., Flores , F., y Donoso , N. 2020, Raco wind at the exit of the maipo canyon in central chile: climatology, special observations, and possible mechanisms. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(4):725–749.
- Paredes , P. 2016, Análisis del desarrollo a nivel local de tres eventos de viento puelche de verano en el valle del río laja. *Tesis para optar al grado de Geofísico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.*
- Peltier , W. y Clark , T. 1979, The evolution and stability of finite-amplitude mountain waves. part ii: Surface wave drag and severe downslope windstorms. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 36(8):1498–1529.

- Plavcan , D., Mayr , G., y Zeileis , A. 2014, Automatic and probabilistic foehn diagnosis with a statistical mixture model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(3):652–659.
- Rahn , D. y Garreaud , R. 2014, A synoptic climatology of the near-surface wind along the west coast of south america. *International Journal of Climatology*, 34(3):780–792.
- Rutllant , J. y Garreaud , R. 2004, Episodes of strong flow down the western slope of the subtropical andes. *Monthly Weather Review*, 132(2):611–622.
- Stull , R. 2016, *Practical Meteorology: An Algebra-Based Survey of Atmospheric Science*. University of British Columbia.
- Villagrán , V., Montecinos , A., Franco , C., y Muñoz , R. C. 2017, Environmental monitoring network along a mountain valley using embedded controllers. *Measurement*, 106:221–235.
- Wallace , J. y Hobbs , P. 2006, *Atmospheric science: an introductory survey*, tomo 92. Elsevier.
- Weigel , A., Chow , F., y Rotach , M. 2007, On the nature of turbulent kinetic energy in a steep and narrow alpine valley. *Boundary-layer meteorology*, 123(1):177–199.
- Whiteman , D. 2000, *Mountain meteorology: fundamentals and applications*. Oxford University Press.
- Zardi , D. y Whiteman , D. 2013, *Diurnal mountain wind systems*. In *Mountain weather research and forecasting*. Springer.