

**UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO
SÁNCHEZ CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA, INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS Y AMBIENTAL**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“ESTIMACIÓN DE FLUJOS DE ENERGÍA SUPERFICIAL
UTILIZANDO SENSORES METEOROLÓGICOS DURANTE LOS
EVENTOS DE HELADAS (MAYO – SETIEMBRE DEL 2018), EN EL
OBSERVATORIO DE HUANCAYO.”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

MANUEL ROMÁN PIÑAS LAURA

**HUACHO – PERÚ
2021**

**UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO
SÁNCHEZ CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA, INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS Y AMBIENTAL**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA AMBIENTAL**

**“ESTIMACIÓN DE FLUJOS DE ENERGÍA SUPERFICIAL
UTILIZANDO SENSORES METEOROLÓGICOS DURANTE LOS
EVENTOS DE HELADAS (MAYO – SETIEMBRE DEL 2018), EN EL
OBSERVATORIO DE HUANCAYO.”**

Sustentado y aprobado ante el jurado evaluador

Dr. Dionicio Belisario Luis Olivas

PRESIDENTE

Mg. Teodosio Celso Quispe Ojeda

SECRETARIO

Mg. Cristina Karina Andrade Alvarado

VOCAL

Dr. Sergio Eduardo Contreras Liza

ASESOR

HUACHO – PERÚ

2021



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión
Facultad de Ingeniería Agraria, Industrias Alimentarias y Ambiental

ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL N°032-2021-FIAIAyA

ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

En la ciudad de Huacho, el día 21 de mayo del 2021, siendo las 14:00 horas en la sala virtual de la Facultad de Ingeniería Agraria, Industrias Alimentarias y Ambiental, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador integrado por:

Presidente	Dr. DIONICIO BELISARIO LUIS OLIVAS	DNI N°15651224
Secretario	Mg. Sc. TEODOSIO CELSO QUISPE OJEDA	DNI N°20022994
Vocal	Mg. Sc. CRISTINA KARINA ANDRADE ALVARADO	DNI N°40231658
Asesor	Dr. SERGIO EDUARDO CONTRERAS LIZA	DNI N°08787108

Para evaluar la sustentación virtual de la tesis titulada: **"ESTIMACIÓN DE FLUJOS DE ENERGÍA SUPERFICIAL UTILIZANDO SENSORES METEOROLÓGICOS DURANTE LOS EVENTOS DE HELADAS (MAYO-SETIEMBRE DEL 2018) EN EL OBSERVATORIO DE HUANCAYO"**.

El postulante al Título Profesional de **Ingeniero Ambiental** don: **MANUEL ROMAN PIÑAS LAURA**, identificado con DNI N°71928504, procedió a la sustentación virtual de Tesis, autorizada mediante Resolución de Decanato N°0241-2021-FIAIAyA de fecha 20/05/2021, de conformidad con las disposiciones vigentes. el postulante sí absolvió las interrogantes que le formularon los miembros del Jurado.

Concluida la sustentación virtual de Tesis, se procedió a la votación correspondiente resultando el candidato aprobado por unanimidad con la nota de:

CALIFICACIÓN		EQUIVALENCIA	CONDICIÓN
NÚMERO	LETRAS		
20	Veinte	Excelente	Aprobado

Siendo las 15:20 horas del día 21 de mayo del 2021, se dio por concluido el ACTO DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL, de la Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental, inscrito en el folio N°178 del Libro de Actas.



Dr. DIONICIO BELISARIO LUIS OLIVAS
Presidente



Mg. Sc. TEODOSIO CELSO QUISPE OJEDA
Secretario



Mg.Sc. CRISTINA KARINA ANDRADE ALVARADO
Vocal



Dr. SERGIO EDUARDO CONTRERAS LIZA
Asesor

DEDICATORIA

Dedicado a todos los amigos
que hice en el camino,
de esta aventura
que llamamos ciencia.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a la Dra. Fey Yamina Silva Vidal por brindarme la oportunidad de colaborar con el proyecto MAGNET y al Dr. José Luis Flores Rojas, investigador postdoctoral del proyecto quien me recibió en su equipo de investigación sobre la temática “Estudio de la capa límite superficial y balance energético durante eventos de extremos de mínima temperatura”, por su asesoramiento académico, informático y por los ánimos que siempre me brindó para continuar más estudios relacionados a la micrometeorología.

También mis agradecimientos al Dr. Sergio Eduardo Contreras Liza, que a pesar de sus múltiples ocupaciones aceptó la responsabilidad de ser mi asesor académico por parte de la universidad, por sus consejos y apoyo en la redacción y revisión del presente trabajo.

Al Dr. René Estevan Arredondo y al Ing. Luis Fernando Suárez Salas, quienes me orientaron, enseñaron y animaron a adquirir nuevos conocimientos durante mi estadía en el Observatorio de Huancayo del Instituto Geofísico del Perú - IGP.

El presente trabajo de investigación fue posible gracias al apoyo económico y logístico del proyecto MAGNET “Fortalecimiento de la línea de investigación en física y microfísica de la atmósfera”, financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica - FONDECYT de CONCYTEC (contrato N° 10-2017/FONDECYT) y que fue ejecutado por el Instituto Geofísico del Perú.

ÍNDICE

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
ÍNDICE.....	VI
RESUMEN	XIX
ABSTRACT	XX
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Descripción de la realidad problemática	3
1.2. Formulación del problema	5
1.2.1. Problema general.....	5
1.2.2. Problemas específicos	5
1.3. Objetivos de la investigación.....	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. Justificación de la investigación.....	6
1.5. Delimitación del estudio	6
1.5.1. Delimitación temporal	6
1.5.2. Delimitación espacial.....	6
1.6. Viabilidad del estudio	6
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes.....	7
2.2. Bases teóricas.....	8
2.2.1 Atmósfera estándar	8
2.2.1.1. Estructura de la capa límite superficial de la atmósfera	8
2.2.1.2. Ecuación de gases ideales	9
2.2.1.3. Ley de Ohm	9
2.2.1.4. Humedad relativa.....	10
2.2.1.5. Perfil logarítmico del viento	10

2.2.1.6. Dirección del viento (estadísticas circulares)	12
2.2.1.7. Propiedades físicas de superficies naturales	13
2.2.2. Transferencia radiativa en la superficie	13
2.2.2.1. Radiación	13
2.2.2.2. Cuerpo negro.....	14
2.2.2.3. Ley de Stefan Boltzmann.....	14
2.2.2.4. Radiación de onda corta.....	15
2.2.2.5. Radiación de onda larga.....	15
2.2.2.6. Radiación neta de onda completa	15
2.2.3. Transferencia de energía y balance energético en la atmósfera superficial.....	16
2.2.3.1. Momento.....	16
2.2.3.2. Calor sensible.....	16
2.2.3.3. Calor latente	17
2.2.3.4. Flujo de calor transferido hacia o desde el suelo	17
2.2.3.5. Balance de flujos energéticos en la superficie	18
2.3. Definiciones conceptuales.....	19
2.3.1. Heladas.....	19
2.3.2. Helada radiativa	19
2.3.3. Helada convectiva.....	20
2.4. Formulación de la hipótesis	20
2.4.1. Hipótesis general.....	20
2.4.2. Hipótesis específicas alternativas (H_1).....	20
2.4.3. Hipótesis específicas nulas (H_0)	21
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	22
3.1. Diseño metodológico	22
3.1.1. Ubicación.....	22
3.1.2. Área, sector y programa según los códigos del Plan Nacional de CTI.....	23
3.1.3. Instrumentos utilizados para la obtención de datos	23
3.1.3.1. Torre de gradiente meteorológica	24
3.1.3.1.A. Anemómetro	25
3.1.3.1.B. Sensor de dirección de viento	27
3.1.3.1.C. Sensor de temperatura y humedad relativa	28

3.1.3.1.D. Placa sensor para la medición de calor transferido al suelo.....	29
3.1.3.2. Estación de radiación BSRN.....	31
3.1.3.2.A. Piranómetro.....	32
3.1.3.2.B. Pirgeómetro.....	35
3.1.3.2.C. Pirheliómetro.....	37
3.1.3.3. Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS)	38
3.1.3.4. Tensiómetros.....	41
3.1.4. Variables a evaluar.....	42
3.1.4.1. Variables independientes	42
3.1.4.2. Variables dependientes	42
3.1.5. Métodos numéricos utilizados para la estimación de flujos turbulentos	42
3.1.5.1. Método de perfil aerodinámico no modificado.....	42
3.1.5.2. Método de perfil aerodinámico modificado.....	43
3.1.5.3. Método de relación de balance de energía de Bowen.....	46
3.2. Población y muestra.....	47
3.2.1. Población	47
3.2.2. Muestra	47
3.3. Técnicas para la obtención de datos.....	48
3.4. Programas utilizados para el procesamiento y análisis estadístico de datos....	48
3.4.1. PC400 (Ver. 4.5).....	48
3.4.2. MATLAB (Ver. 2017a).....	48
3.5. Operacionalización de variables e indicadores	49
CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....	50
4.1. Ciclo diario de los promedios horarios de las variables meteorológicas	50
4.1.1. Temperatura	50
4.1.2. Humedad relativa.....	53
4.1.3. Velocidad y dirección del viento	55
4.1.4. Calor transferido al suelo	58
4.1.5. Valores de radiación de la estación BSRN	60
4.2. Ciclo diario de los promedios horarios de los flujos turbulentos estimados ...	64
4.2.1. Método de perfil aerodinámico modificado.....	64
4.2.2. Método de relación del balance de energía de Bowen.....	67

4.3. Eventos más intensos de heladas identificados.....	68
4.3.1. Evento de helada del 30 de mayo del 2018 (-2,227 °C)	69
4.3.2. Evento de helada del 21 de junio del 2018 (-2,995 °C)	75
4.3.3. Evento de helada del 08 de julio del 2018 (-5,144 °C).....	81
4.3.4. Evento de helada del 17 de julio del 2018 (-3,814 °C).....	87
4.3.5. Evento de helada del 29 de agosto del 2018 (-1,183 °C).....	93
4.3.6. Evento de helada del 07 de setiembre del 2018 (-2,278 °C).....	99
4.4. Comparación entre los métodos (Aerodinámico – Bowen)	105
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
5.1. Discusión de resultados	108
5.2. Conclusiones	110
5.3. Recomendaciones	112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
ANEXOS.....	118
ANEXO 1. Registros de precipitación desde mayo a setiembre del 2018	118
ANEXO 2. Valores de cobertura de nubes estimados por el sensor MODIS	120
ANEXO 3. Control de calidad de los datos de la torre de gradiente	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Propiedades térmicas de los materiales naturales.</i>	13
Tabla 2. <i>Especificaciones técnicas del anemómetro 03101 – Campbell Scientific.</i>	26
Tabla 3 <i>Especificaciones técnicas del sensor de dirección de viento 024A – Met One.</i>	27
Tabla 4. <i>Especificaciones técnicas del sensor HMP60 – Campbell Scientific.</i>	28
Tabla 5. <i>Especificaciones técnicas del sensor HMP60 (temp.) – Campbell Scientific.</i>	29
Tabla 6. <i>Especificaciones técnicas del sensor HMP60 (% HR) - Campbell Scientific.</i>	29
Tabla 7. <i>Especificaciones técnicas de la placa sensor HFP01 – Campbell Scientific.</i>	30
Tabla 8. <i>Especificaciones técnicas del piranómetro CMP21 – Kipp & Zonen.</i>	33
Tabla 9. <i>Especificaciones técnicas del pirgeómetro CGR4 – Kipp & Zonen.</i>	36
Tabla 10. <i>Especificaciones técnicas del pirheliómetro CHP1 – Kipp & Zonen.</i>	38
Tabla 11. <i>Lista de las 36 bandas de medición del sensor MODIS.</i>	40
Tabla 12 <i>Especificaciones técnicas. (Pessl Instruments)</i>	41
Tabla 13. <i>Matriz de operacionalización de variables.</i>	49
Tabla 14. <i>Valores promedio horario mensual de las variables meteorológicas a las 05, 06 y 07 HL desde mayo a setiembre del 2018.</i>	62
Tabla 15. <i>Valores promedio horarios mensual de las variables radiativas a las 05, 06 y 07 HL desde mayo a setiembre del 2018.</i>	63
Tabla 16. <i>Resumen de eventos extremos de mínima de temperatura registrados desde el 15 de mayo al 30 de setiembre del 2018.</i>	68
Tabla 17. <i>Valores de cobertura de nubes estimados por el sensor MODIS instalado en los satélites Terra y Aqua, desde el 25 de mayo al 01 de junio del 2018.</i>	73
Tabla 18. <i>Valores de cobertura de nubes estimados por el sensor MODIS instalado en los satélites Terra y Aqua, desde el 18 al 23 de junio del 2018.</i>	79
Tabla 19. <i>Valores de cobertura de nubes estimados por el sensor MODIS instalado en los satélites Terra y Aqua, desde el 05 al 10 de julio del 2018.</i>	85
Tabla 20. <i>Valores de cobertura de nubes estimados por el sensor MODIS instalado en los satélites Terra y Aqua, desde el 13 al 19 de julio del 2018.</i>	91
Tabla 21. <i>Valores de cobertura de nubes estimados por el sensor MODIS instalado en los satélites Terra y Aqua, desde el 27 al 31 de agosto del 2018.</i>	97
Tabla 22. <i>Valores de cobertura de nubes estimados por el sensor MODIS instalado en los satélites Terra y Aqua, desde el 03 al 09 de setiembre del 2018.</i>	103

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Estructura vertical de la atmósfera. (Oke T., 2006)	9
<i>Figura 2.</i> Comportamiento de la velocidad del viento en diferentes condiciones atmosféricas. a) Perfil logarítmico del viento en condiciones de estabilidad, b) Perfil logarítmico del viento en condiciones de turbulencia.	11
<i>Figura 3.</i> El espectro electromagnético. (Yela, 2016)	14
<i>Figura 4.</i> Esquema de los flujos involucrados en un sitio "ideal". (Oke, 2006).....	19
<i>Figura 5.</i> Torre de gradiente meteorológica de 30 m de altura, Obs. de Huancayo.	24
<i>Figura 6.</i> Anemómetro 03101, Campbell Scientific, Inc.....	25
<i>Figura 7.</i> Sensor de dirección de viento 024A – Met One, Campbell Scientific, Inc.....	27
<i>Figura 8.</i> Sensor de temperatura y humedad HMP60, Campbell Scientific, Inc.....	28
<i>Figura 9.</i> Placa sensor de flujo de calor HFP01, Campbell Scientific, Inc.....	29
<i>Figura 10.</i> Estación de radiación BSRN en el Observatorio de Huancayo.....	31
<i>Figura 11.</i> Piranómetro CMP21, Kipp & Zonen.....	32
<i>Figura 12.</i> Componentes principales del piranómetro, Kipp & Zonen.....	33
<i>Figura 13.</i> Sistema del seguidor solar con piranómetro de sombra, Kipp & Zonen.....	34
<i>Figura 14.</i> Pirgeómetro CGR4, Kipp & Zonen.....	35
<i>Figura 15.</i> Componentes principales del pirgeómetro CGR4, Kipp & Zonen.....	37
<i>Figura 16.</i> Pirheliómetro CHP1, Kipp & Zonen.....	37
<i>Figura 17.</i> Sistema de grillado sinusoidal que utiliza el sensor MODIS para la ubicación de sus productos. (NASA, 2018).....	39
<i>Figura 18.</i> Sensor de contenido de agua y temperatura, Decagon 5TM.	41
<i>Figura 19.</i> Ciclo diario de la temperatura del aire (°C) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.	51
<i>Figura 20.</i> Perfil vertical de los valores de temperatura del aire (°C) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.	52
<i>Figura 21.</i> Ciclo diario de humedad relativa (%) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.	53
<i>Figura 22.</i> Perfil vertical de los valores de humedad relativa (%) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.....	54
<i>Figura 23.</i> Ciclo diario de la velocidad del viento (ms ⁻¹) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.	55
<i>Figura 24.</i> Perfil vertical de la velocidad del viento (ms ⁻¹) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.	56

<i>Figura 25.</i> Ciclo diurno de la dirección del viento (0° - 360°) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.....	57
<i>Figura 26.</i> Ciclo diurno del flujo de calor transferido al suelo (Wm^{-2}) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.	59
<i>Figura 27.</i> Ciclo diurno de los valores de radiación, estación BSRN para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.	61
<i>Figura 28.</i> Ciclo diurno de los flujos turbulentos de energía superficial estimados mediante el método de perfil aerodinámico modificado para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.....	65
<i>Figura 29.</i> Ciclo diurno de los valores de estabilidad atmosférica para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.....	66
<i>Figura 30.</i> Ciclo diurno de los flujos turbulentos de energía superficial estimados mediante el método de balance de energía de Bowen para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.....	67
<i>Figura 31.</i> Variación de la temperatura dos días antes y dos días después del evento de helada del 30 de mayo del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	69
<i>Figura 32.</i> Variación de humedad relativa dos días antes y dos días después del evento de helada del 30 de mayo del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	70
<i>Figura 33.</i> Variación de la razón de mezcla de vapor de agua dos días antes y dos días después del evento de helada del 30 de mayo del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	70
<i>Figura 34.</i> Variación del calor transferido al suelo dos días antes y dos días después del evento de helada del 30 de mayo del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	71
<i>Figura 35.</i> Variación del flujo de momento y el número de Richardson dos días antes y dos días después del evento de helada del 30 de mayo del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.....	71
<i>Figura 36.</i> Variación del flujo de calor sensible y calor latente por el método de perfil aerodinámico modificado, dos días antes y dos días después del evento de helada del 30 de mayo del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	72

<i>Figura 37.</i> Producto de fracción de nubes (MODIS) para el evento de helada del 30 de mayo del 2018. a) Satélite Aqua, 29 de mayo a las 14:05 HL, b) Satélite Aqua, 30 de mayo a las 00:55 HL, c) Satélite Terra, 30 de mayo a las 10:20 HL. El círculo negro representa la ubicación del Observatorio de Huancayo. ...	74
<i>Figura 38.</i> Variación de la temperatura dos días antes y dos días después del evento de helada del 21 de junio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	75
<i>Figura 39.</i> Variación de humedad relativa dos días antes y dos días después del evento de helada del 21 de junio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	76
<i>Figura 40.</i> Variación de la mezcla de vapor de agua dos días antes y dos días después del evento helada del 21 de junio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	76
<i>Figura 41.</i> Variación del calor transferido al suelo dos días antes y dos días después del evento de helada del 21 de junio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	77
<i>Figura 42.</i> Variación del flujo de momento y el número de Richardson dos días antes y dos días después del evento de helada del 21 de junio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	77
<i>Figura 43.</i> Variación del flujo de calor sensible y calor latente por el método de perfil aerodinámico modificado, dos días antes y dos días después del evento de helada del 21 de junio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	78
<i>Figura 44.</i> Producto de fracción de nubes (MODIS) para el evento de helada del 21 de junio del 2018. a) Satélite Terra, 20 de junio a las 22:55 HL, b) Satélite Aqua, 21 de junio a la 01:55 HL y c) Satélite Terra, 21 de junio a las 09:45 HL. El círculo negro representa la ubicación del Observatorio de Huancayo.	80
<i>Figura 45.</i> Variación de la temperatura dos días antes y dos días después del evento de helada del 8 de julio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	81
<i>Figura 46.</i> Variación de humedad relativa dos días antes y dos días después del evento de helada del 8 de julio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	82

<i>Figura 47.</i> Variación de la razón de mezcla de vapor de agua dos días antes y dos días después del evento de helada del 08 de julio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	82
<i>Figura 48.</i> Variación del calor transferido al suelo dos días antes y dos días después del evento de helada del 8 de julio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	83
<i>Figura 49.</i> Variación del flujo de momento y el número de Richardson dos días antes y dos días después del evento de helada del 08 de julio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.....	83
<i>Figura 50.</i> Variación del flujo de calor sensible y calor latente por el método de perfil aerodinámico modificado, dos días antes y dos días después del evento de helada del 08 de julio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	84
<i>Figura 51.</i> Producto fracción de nubes (MODIS) para el evento de helada del 08 de julio del 2018. a) Satélite Terra, 07 de julio a las 22:00 HL, b) Satélite Aqua, 08 de julio a la 01:00 HL y c) Satélite Terra, 08 de julio a las 10:30 HL. El círculo negro representa la ubicación del Observatorio de Huancayo.	86
<i>Figura 52.</i> Variación de la temperatura dos días antes y dos días después del evento de helada del 17 de julio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	87
<i>Figura 53.</i> Variación de humedad relativa dos días antes y dos días después del evento de helada del 17 de julio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	88
<i>Figura 54.</i> Variación de la razón de mezcla de vapor de agua dos días antes y dos días después del evento de helada del 17 de julio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	88
<i>Figura 55.</i> Variación del calor transferido al suelo dos días antes y dos días después del evento de helada del 17 de julio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	89
<i>Figura 56.</i> Variación del flujo de momento y el número de Richardson dos días antes y dos días después del evento de helada del 17 de julio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.....	90
<i>Figura 57.</i> Variación del flujo de calor sensible y calor latente por el método de perfil aerodinámico modificado, dos días antes y dos días después del evento de	

helada del 17 de julio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	90
<i>Figura 58.</i> Producto de fracción de nubes (MODIS) para el evento de helada del 17 de julio del 2018. a) Satélite Aqua, 17 de julio a las 00:55 HL y b) Satélite Terra, 17 de julio a las 10:20 HL. El círculo negro representa la ubicación del Observatorio de Huancayo.	92
<i>Figura 59.</i> Variación de la temperatura dos días antes y dos días después del evento de helada del 29 de agosto del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	93
<i>Figura 60.</i> Variación de humedad relativa dos días antes y dos días después del evento de helada del 29 de agosto del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	94
<i>Figura 61.</i> Variación de la razón de mezcla de vapor de agua dos días antes y dos días después del evento de helada del 29 de agosto del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	94
<i>Figura 62.</i> Variación del calor transferido al suelo dos días antes y dos días después del evento de helada del 29 de agosto del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	95
<i>Figura 63.</i> Variación del flujo de momento y el número de Richardson dos días antes y dos días después del evento de helada del 29 de agosto del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	95
<i>Figura 64.</i> Variación del flujo de calor sensible y calor latente por el método de perfil aerodinámico modificado, dos días antes y dos días después del evento de helada del 29 de agosto del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	96
<i>Figura 65.</i> Producto de fracción de nubes (MODIS) para el evento de helada del 29 de agosto del 2018. a) Satélite Terra, 28 de agosto a las 23:15 HL y b) Satélite Terra, 29 de agosto a las 10:05 HL. El círculo negro representa la ubicación el Observatorio de Huancayo.	98
<i>Figura 66.</i> Variación de la temperatura dos días antes y dos días después del evento de helada del 7 de setiembre del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	99

<i>Figura 67.</i> Variación de humedad relativa dos días antes y dos días después del evento de helada del 7 de setiembre del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	100
<i>Figura 68.</i> Variación de la razón de mezcla de vapor de agua dos días antes y dos días después del evento de helada del 07 de setiembre del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	100
<i>Figura 69.</i> Variación del calor transferido al suelo dos días antes y dos días después del evento de helada del 07 de setiembre del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	101
<i>Figura 70.</i> Variación del flujo de momento y el número de Richardson dos días antes y dos días después del evento de helada del 07 de setiembre del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	101
<i>Figura 71.</i> Variación del flujo de calor sensible y calor latente por el método de perfil aerodinámico modificado, dos días antes y dos días después del evento de helada del 07 de setiembre del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.	102
<i>Figura 72.</i> Producto de fracción de nubes (MODIS) para el evento de helada del 07 de setiembre del 2018. a) Satélite Terra, 06 de setiembre a las 23:05 HL y b) Satélite Terra, 07 de setiembre a las 09:55 HL. El círculo negro representa la ubicación del Observatorio de Huancayo.	104
<i>Figura 73.</i> Comparación entre los flujos turbulentos de energía superficial del balance de energía superficial.	105
<i>Figura 74.</i> Comparación entre los valores de calor sensible calculados por el método de perfil aerodinámico modificado y el método del balance de energía de Bowen, mayo a setiembre del 2018.	106
<i>Figura 75.</i> Comparación entre los valores de calor latente calculados por el método de perfil aerodinámico modificado y el método del balance de energía de Bowen, mayo a setiembre del 2018.	106
<i>Figura 76.</i> Registros de precipitación de la estación meteorológica automática del Observatorio de Huancayo, a) mayo del 2018 y b) junio del 2018. Los puntos azules representan los eventos más intensos de heladas.	118
<i>Figura 77.</i> Registros de precipitación de la estación meteorológica automática del Observatorio de Huancayo, a) julio del 2018, b) agosto del 2018 y c)	

setiembre del 2018. Los puntos azules representan los eventos más intensos de heladas.	119
<i>Figura 78.</i> Variación del producto de cobertura de nubes (líneas rojas) estimada por el sensor MODIS (0 = cielo despejado, 1 = cielo totalmente cubierto), durante los eventos de mínima temperatura (círculos azules) para los meses de (a) mayo a setiembre 2018, (b) mayo 2018.	120
<i>Figura 79.</i> Variación del producto de cobertura de nubes (líneas rojas) estimada por el sensor MODIS (0 = cielo despejado, 1 = cielo totalmente cubierto), durante los eventos de mínima temperatura (círculos azules) para los meses de (a) junio 2018, (b) julio 2018.	121
<i>Figura 80.</i> Variación del producto de cobertura de nubes (líneas rojas) estimada por el sensor MODIS (0 = cielo despejado, 1 = cielo totalmente cubierto), durante los eventos de mínima temperatura (círculos azules) para los meses de (a) agosto 2018 y (b) setiembre 2018.	122
<i>Figura 81.</i> (a) Promedios horarios del ciclo diurno de temperatura sin corregir, (b) Valores de los promedios horarios del ciclo diurno de temperatura sin corregir entre las 14 y 18 horas, durante el período del 25 de febrero al 15 de marzo del 2018.	124
<i>Figura 82.</i> Perfiles verticales de temperatura sin corregir, entre el 25 de febrero y el 15 de marzo del 2018.	125
<i>Figura 83.</i> (a) Promedios horarios del ciclo diurno de humedad relativa sin corregir, (b) Valores del ciclo diurno de humedad relativa sin corregir entre las 02 y 08 horas, durante el período del 25 de febrero al 15 de marzo del 2018.	126
<i>Figura 84.</i> Perfiles verticales de humedad relativa sin corregir, entre el 25 de febrero y el 15 de marzo del 2018.	127
<i>Figura 85.</i> Termohigrómetros desplazados hasta el nivel 1 para su intercomparación. ...	128
<i>Figura 86.</i> Factores de corrección calculados de la intercomparación de los 6 sensores de (a) temperatura y (b) humedad relativa de la torre de gradiente meteorológica con los sensores estación automática de Huayao, durante el período del 25 de febrero al 15 de marzo del 2018.	129
<i>Figura 87.</i> (a) Promedios horarios del ciclo diurno de temperatura corregida, (b) Valores del ciclo diurno de temperatura corregida entre las 14 y 18 horas, durante el período del 25 de febrero al 15 de marzo del 2018.	130

<i>Figura 88.</i> Perfiles verticales de temperatura corregida, entre el 25 de febrero y el 15 de marzo del 2018.	131
<i>Figura 89.</i> a) Promedios horarios del ciclo diurno de humedad relativa corregida, (b) Valores del ciclo diurno de humedad relativa corregida entre las 02 y 08 horas, durante el período del 25 de febrero al 15 de marzo del 2018.....	132
<i>Figura 90.</i> Perfiles verticales de humedad relativa corregida, entre el 25 de febrero y el 15 de marzo del 2018.	133

“Estimación de flujos de energía superficial utilizando sensores meteorológicos durante los eventos de heladas (mayo – setiembre del 2018), en el Observatorio de Huancayo.”

Manuel Román Piñas Laura¹, Sergio Eduardo Contreras Liza¹, Luis Olivas Dionisio Belisario¹, Teodosio Celso Quispe Ojeda¹, Pedro Martin Ríos Salazar¹.

RESUMEN

Objetivos: Estimar y analizar los flujos de calor latente y calor sensible dentro de la capa límite superficial durante los eventos más intensos de heladas ocurridos en la temporada otoño–invierno del 2018 en el Observatorio de Huancayo (12,05° S, 75,32° O, 3313 m.s.n.m.) dentro del valle del Mantaro. **Metodología:** Se utilizó una torre de gradiente meteorológica, una placa sensor de flujo de calor transferido en la superficie, tensiómetros y una estación completa de radiación miembro de la red BSRN para medir todos los componentes de irradiancia (onda corta y onda larga), también se utilizaron los productos de fracción de nubes de los satélites Terra (MOD06_L2) y Aqua (MYD06_L2) de la NASA. Los métodos utilizados para estimar los flujos de energía superficial fueron el de gradiente de flujo de perfil aerodinámico modificado y el de la relación de balance de energía de Bowen. **Resultados:** En el mes de julio se registró el promedio mensual más bajo de temperatura media mínima (1,81 °C) y proporción de mezcla de agua (<4,6 gkg⁻¹) durante las primeras horas de la mañana en el nivel de 2 m; también baja humedad (<3,4 gkg⁻¹) y ausencia de precipitaciones. **Conclusiones:** Horas previas y durante los eventos más intensos de heladas identificados (08 y 17 de julio), los valores estimados de calor sensible y calor latente fueron negativos o cercanos a cero, lo cual evidencia que durante estos eventos existió una transferencia de calor y humedad desde los niveles altos hacia los niveles más bajos de la atmósfera, debido al enfriamiento continuo de la superficie y a que los eventos de heladas se encuentran precedidos por hasta tres días con muy poca cobertura de nubes (<0,01).

Palabras clave: Capa límite superficial, flujos turbulentos, Observatorio de Huancayo.

¹Facultad de Ingeniería Agraria, Industrias Alimentarias y Ambiental, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho – Perú.

**"Estimation of surface energy flows using meteorological sensors
during frost events (May - September 2018),
at the Huancayo Observatory."**

Manuel Román Piñas Laura¹, Sergio Eduardo Contreras Liza¹, Luis Olivas Dionisio
Belisario¹, Teodosio Celso Quispe Ojeda¹, Pedro Martin Ríos Salazar¹.

ABSTRACT

Objectives: To estimate and analyze latent heat and sensible heat fluxes within the surface boundary layer during the most intense frost events occurred in the 2018 at the Huancayo Observatory (12,05° S, 75,32° W, 3313 m.a.s.l.) within the Mantaro valley. **Methodology:** A weather gradient tower, a surface-transferred heat flux sensor plate, tensiometers and a complete BSRN member radiation station was used to measure all irradiance components (short wave and long wave), cloud fraction products from NASA's Terra (MOD06_L2) and Aqua (MYD06_L2) satellites were also used. The methods used to estimate surface energy flows were the modified aerodynamic profile flow gradient and the Bowen energy balance ratio. **Results:** In the month of July the lowest monthly average of minimum average temperature (1,81 °C) and water mixing ratio (<4,6 gkg⁻¹) was recorded during the early morning hours at the level of 2 m; also low humidity (<3,4 gkg⁻¹) and absence of precipitation. **Conclusions:** Hours before and during the most intense frost events identified (July 08 and 17), the estimated values of sensible heat and latent heat were negative or close to zero, which is evidence that during these events there was a transfer of heat and moisture from the upper levels to the lower levels of the atmosphere, due to the continuous cooling of the surface and the fact that frost events are preceded by up to three days with very little cloud cover (<0,01).

Keywords: Surface boundary layer, turbulent flows, Huancayo Observatory.

¹Faculty of Agricultural Engineering, Food Industries and Environmental, National University José Faustino Sánchez Carrión, Huacho - Peru.

INTRODUCCIÓN

Los flujos de energía superficial son unos de los factores que determinan el comportamiento de la atmósfera superficial, permiten describir el comportamiento del tiempo atmosférico dentro del estudio de la micrometeorología y actualmente el estudio de estos flujos turbulentos no está muy desarrollado en la región. Una de las pocas investigaciones de este tipo realizada en el Observatorio de Huancayo propuso aumentar los registros verticales de las diferentes variables atmosféricas a mayor altura para describir mejor la atmósfera superficial. Saavedra (2013), registró datos de temperatura desde la superficie hasta 50 cm de profundidad y de radiación de onda larga incidente sobre la superficie en la que se determinó que el factor más importante que modula la temperatura en la superficie es la radiación de onda larga, la cual está influenciada por la presencia de humedad en la capa límite y la nubosidad.

La presente investigación estimó los flujos de energía superficial durante los eventos de heladas mediante los métodos de perfil aerodinámico modificado (Prueger y Kustas, 2005) y el balance de energía de Bowen (Bowen, 1926) que se basan ambos en el principio de similitud, propuesto por Monin y Obukhov (Monin y Obukhov, 1954) con los registros meteorológicos generados por la instrumentación que el Instituto Geofísico del Perú recientemente adquirió para el estudio de la capa límite superficial. La información generada en la presente investigación, pionera en su tipo en el lugar de interés, permite cuantificar el comportamiento de los flujos de energía turbulentos, comprender la ocurrencia de heladas radiativas con instrumentación sofisticada y servirá, más adelante, para el diseño de sistemas de alerta de ocurrencia de fenómenos meteorológicos de mínima temperatura con la inclusión de las variables de flujos turbulentos estimados por instrumentación de alta precisión en el valle del Mantaro.

Las heladas causan mucho más daño a los cultivos en la temporada de siembra y antes de la cosecha, también considerada temporada de lluvias. Para la presente investigación, se estudiaron los eventos de heladas durante la temporada de ausencia de lluvias, también considerada temporada seca que comprende aproximadamente entre los meses de mayo y setiembre del año 2018, ya que es la temporada en la cual las heladas son mucho más

intensas y ocurren con mayor frecuencia, y de la cual pudimos obtener un mayor número de casos de estudio.

Para la identificación de los eventos de heladas, bastaron los registros de temperatura y humedad relativa a 2 m de altura de la torre de gradiente meteorológica. Saavedra (2013) determinó que la nubosidad antes y durante un evento de helada juega un papel importante, siendo un cielo despejado una condición que puede generar una mayor pérdida de energía radiativa de la superficie. Por tal motivo fue que también se procesó los productos de cobertura de nubes del sensor MODIS – NASA (con una grilla de 10 km.) alrededor del Observatorio de Huancayo, para verificar la incidencia de poca cobertura de nubes de algunos días antes y durante la ocurrencia de eventos de heladas.

El método de perfil aerodinámico modificado propone la obtención de los valores de flujo energético (calor latente y calor sensible), mediante los registros verticales de las variables meteorológicas de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Este cálculo permite cuantificar los flujos de energía superficial analizando la turbulencia entre los niveles asumiendo la similitud entre los coeficientes de difusión de momento, calor y vapor de agua.

El método de balance de energía de Bowen necesita de la cuantificación de la energía radiativa que interactúa en la superficie. Es un método también basado en el principio de similitud que no se encuentra limitado por el coeficiente de difusión de momento, ya que sólo requiere de valores de radiación solar, difusión del calor y de vapor de agua para su cálculo. Se utilizó el método de balance de energía de Bowen por la disponibilidad operativa de la estación completa de radiación BSRN en el Observatorio de Huancayo y la disponibilidad bibliográfica de artículos referentes al tema también conocido como el método de Bowen.

CAPÍTULO I.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

En el informe de “Escenarios de riesgos por heladas y friajes en el marco del Plan Multisectorial Multianual 2019 – 2021” (CENEPRED, 2018), en el apartado de análisis de susceptibilidad por heladas se ubicó temporalmente al mes de julio como el de mayor incidencia del eventos extremos de mínima temperatura y se indicó que en el sector de la sierra central del Perú, en la región Junín (provincias de Jauja, Chupaca, Yauli, Huancayo y Concepción) se alcanzó valores de temperatura mínima del percentil 10 por debajo de los 0 °C y en algunas zonas valores de -15 °C aproximadamente. Así mismo en la Tabla 4 del mismo informe se ubicó a Junín en el quinto lugar de los departamentos expuestos a nivel muy alto de susceptibilidad por heladas (6 867 habitantes y 3 171 viviendas) y en el tercer lugar de los departamentos expuestos a nivel alto de susceptibilidad por heladas (112 206 habitantes y 47 520 viviendas).

Se identificó a las heladas como uno de los principales fenómenos naturales que afectan al valle del Mantaro, siendo la actividad agrícola una de las más afectadas por este tipo de fenómeno (IGP, 2005). Por más que se realicen controles agronómicos muy rigurosos a los cultivos, la ocurrencia de algún tipo de helada puede ocasionar la pérdida del mismo, al igual que el desempleo de los jornaleros que se requieren para la cosecha, la pérdida económica de los comercializadores de dicho cultivo y por lo tanto la falta del mismo en el mercado local para su consumo.

Existen pocos estudios registrados sobre el comportamiento de los flujos turbulentos de energía superficial durante la ocurrencia de eventos de heladas. Entre las pocas investigaciones acerca del comportamiento de las variables físicas durante la ocurrencia de heladas en el valle del Mantaro, específicamente en el Observatorio de Huancayo, Saavedra (2013) recomendó realizar mediciones más sostenidas de los flujos energéticos superficiales (radiativos y turbulentos), de las propiedades de la capa límite y de las nubes, para comprender los procesos que actúan durante la ocurrencia de heladas, también para poder validar y corregir adecuadamente los

modelos de cambio climático. Cabe mencionar que, en dicho estudio los flujos de calor latente y calor sensible se asumieron nulos debido a la falta de instrumentación para la estimación.

Para el presente trabajo de investigación, se requirió de equipos específicos para la medición de la temperatura, humedad relativa, velocidad de viento, dirección del viento instalados a diferentes alturas y la medición de flujo de calor transferido al suelo (Oke, 2006). En el Perú, no existían estaciones meteorológicas implementadas con los instrumentos adecuados para la medición de flujos de energía superficial a diferentes niveles de altura.

En concordancia con el proyecto MAGNET del Instituto Geofísico del Perú - IGP, fue necesario implementar dichos sensores en el Observatorio de Huancayo, para la medición de estas variables meteorológicas, en una torre de gradiente meteorológica de 30 metros de altura con 06 niveles de medición ubicados a distancias logarítmicas entre niveles. Los mismos que para este caso permitieron comprender el comportamiento de la capa límite superficial durante los eventos de heladas mediante la estimación de los flujos turbulentos de energía superficial (calor latente, calor sensible) en el valle del Mantaro, por el método de perfil aerodinámico modificado, entre los meses de mayo y setiembre del año 2018.

Los datos que se utilizaron para el método de la relación de balance de energía de Bowen, fueron generados por los sensores meteorológicos de la estación completa de radiación miembro de la red BSRN (Baseline Surface Radiation Network) y por la placa sensor de medición de flujo de calor transferido al suelo que es parte de la torre de gradiente meteorológica antes mencionada, dichos instrumentos también se encontraron ubicados en el Observatorio de Huancayo, entre los meses de mayo y setiembre del año 2018.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo estimar los flujos turbulentos de energía superficial utilizando sensores meteorológicos durante los eventos de heladas en el período mayo – setiembre del 2018, en el Observatorio de Huancayo?

1.2.2. Problemas específicos

¿Cómo identificar los eventos de heladas en el período mayo – setiembre del 2018, utilizando los sensores meteorológicos de la torre de gradiente y el sensor MODIS - NASA en el Observatorio de Huancayo?

¿Cómo estimar los flujos turbulentos de energía superficial mediante el método de perfil aerodinámico modificado, durante los eventos de heladas identificados en el período mayo – setiembre del 2018, en el Observatorio de Huancayo?

¿Cómo estimar los flujos turbulentos de energía superficial mediante el método de balance de energía de Bowen, durante los eventos de heladas identificados en el período mayo – setiembre del 2018, en el Observatorio de Huancayo?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Estimar los flujos turbulentos de energía superficial utilizando sensores meteorológicos, durante los eventos de heladas en el período mayo – setiembre del 2018, en el Observatorio de Huancayo.

1.3.2. Objetivos específicos

Identificar los eventos de heladas en el período mayo – setiembre del 2018, utilizando los sensores meteorológicos de la torre de gradiente y el sensor MODIS – NASA, en el Observatorio de Huancayo.

Estimar los flujos turbulentos de energía superficial mediante el método de perfil aerodinámico modificado, durante los eventos de heladas identificados en el período mayo – setiembre del 2018, en el Observatorio de Huancayo.

Estimar los flujos turbulentos de energía superficial mediante el método de balance de energía de Bowen, durante los eventos de heladas identificados en el período mayo – setiembre del 2018, en el Observatorio de Huancayo.

1.4. Justificación de la investigación

La ocurrencia de los eventos de heladas trae consigo la pérdida completa de extensos cultivos estacionales en el valle del Mantaro, el presente estudio realizará el levantamiento de información con instrumentación única hasta el momento en la zona de estudio para describir el comportamiento de los flujos turbulentos de energía superficial durante la ocurrencia de los eventos de heladas en el valle del Mantaro, con la ayuda instrumental de una torre de gradiente meteorológica y de la estación de radiación (BSRN), desde la ubicación del Observatorio de Huancayo.

Es la primera investigación que realiza el levantamiento de información de este tipo sobre el comportamiento de la capa límite superficial hasta una altura de 30 metros en el Perú.

1.5. Delimitación del estudio

1.5.1. Delimitación temporal

Los registros de datos que se utilizaron comprendieron el período conocido como temporada seca en el Valle del Mantaro, desde el 15 de mayo hasta el 30 de setiembre del año 2018.

1.5.2. Delimitación espacial

Los datos meteorológicos utilizados son generados por la torre de gradiente meteorológica ubicada en el Observatorio de Huancayo, que representan sólo un punto de muestreo dentro del plano, pero posee una representatividad de hasta 30 km² por la forma del valle y la ubicación del Observatorio de Huancayo.

1.6. Viabilidad del estudio

El presente trabajo contó con la ayuda instrumental necesaria para la implementación de los métodos numéricos propuestos durante todos los eventos de heladas registrados en el Observatorio de Huancayo entre los meses mayo – setiembre del 2018. También se contó con el financiamiento necesario para el desarrollo de la tesis como fueron bibliografía digital, transporte, alimentación y vivienda en la ciudad de Huancayo a cargo del proyecto MAGNET.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se expone la teoría que se utilizó para estimar los flujos turbulentos de energía superficial en el Observatorio de Huancayo. Se subdivide en cuatro apartados, en el primer apartado se presentan antecedentes referentes a la composición de la atmósfera, en el segundo apartado se explica el comportamiento de la atmósfera estándar durante la transferencia radiativa, las formulaciones necesarias para su comprensión incluidas las variables que interactúan en la ecuación de balance de flujos energéticos en superficie, en el tercer apartado se exponen los conceptos de heladas según su formación y en el cuarto apartado se formulan las hipótesis que definen la presente investigación.

2.1. Antecedentes

Saavedra (2013), durante 3 noches de trabajo de campo en el Observatorio de Huancayo se registraron datos de temperatura superficial y hasta 50 cm de profundidad, datos de radiación y satelitales. Se determinó que el factor más importante que modula la temperatura en la superficie es la radiación de onda larga incidente, la cual está más influenciada por la humedad del aire en la capa límite y en la nubosidad presente. Sin embargo, la humedad del aire está influenciada también por la estacionalidad hidrológica del valle del Mantaro ya que, entre los meses de noviembre y marzo el suelo presenta altos valores de humedad debido a la incidencia de lluvias en comparación con el período entre los meses de julio y setiembre por la ausencia de lluvias. También se aplicó un modelo de difusión de calor unidimensional, con los datos obtenidos por el termómetro de superficie y geotermómetros hasta una profundidad de 50 cm, donde el modelo logró simular con una buena aproximación las temperaturas mínimas en superficie, pero asumiendo nulos los flujos de energía turbulenta de calor latente y calor sensible, debido a la falta de instrumentación adecuada para la estimación de dichos flujos.

Saavedra y Takahashi (2017) seleccionaron 4 casos de eventos de heladas excepcionales que produjeron daños importantes en los cultivos de la región durante la estación húmeda (octubre – febrero), donde la temperatura mínima en los días

seleccionados osciló entre 0,3 °C y 1,4 °C. Dos días previos a los eventos de heladas la precipitación fue nula o cercana a cero, lo cual es una indicación de la reducción de la humedad del suelo durante los eventos de heladas. Durante cada una de esas noches, la humedad estuvo por debajo de 5 g kg⁻¹, en el percentil 2%, en todos los casos excepto el 17 de enero de 2005, que tuvo menos de 7 g kg⁻¹ (percentil 10%) pero también presentó la temperatura mínima más alta. En general, las condiciones comunes antes de estos eventos de mínima temperatura incluyeron la reducción de humedad, la ausencia de nubes bajas y la falta de precipitaciones en los dos días anteriores.

2.2. Bases teóricas

2.2.1 Atmósfera estándar

En este apartado se describen conceptos importantes para la comprensión de la magnitud de la atmósfera y se muestran algunas ecuaciones sobre el comportamiento de esta.

2.2.1.1. Estructura de la capa límite superficial de la atmósfera

Los movimientos atmosféricos están caracterizados por una amplia variedad de escalas espaciales que en la dirección horizontal pueden abarcar desde el orden de los milímetros hasta la longitud de la circunferencia terrestre y en la dirección vertical la profundidad total de la atmósfera. Las escalas temporales pueden abarcar desde una fracción de segundo hasta varios meses o años. Estas escalas de movimiento están generalmente clasificadas en tres amplias categorías, llamadas micro-, meso- y macro escalas. (Arya, 1988)

En este contexto, se conoce que el alcance de la micrometeorología está limitado a aquellos fenómenos que se originan en la capa superficial atmosférica, la misma que sufre la influencia de la fricción contigua a la superficie de la tierra, comúnmente conocida como la capa límite atmosférica (CLA) o la capa límite planetaria (CLP) (Arya, 1988), ahora en adelante sólo se menciona como capa límite planetaria (CLP).

La micrometeorología se encarga del estudio de los intercambios de energía, masa y momento que ocurren continuamente entre la atmósfera y la superficie terrestre. La CLP, es la parte inferior de la atmósfera donde vive la mayoría de los seres humanos, animales y vegetación; también es donde los

seres humanos nos relacionamos, realizamos actividades económicas, sociales y de desarrollo. Las variaciones más notorias de diversas variables meteorológicas (viento, temperatura, humedad, concentración de gases y partículas) con respecto a la altura se realizan dentro de la CLP, siendo la capa más fácilmente susceptible a observaciones con la ayuda de torres meteorológicas de gradiente. (Arya, 1988)

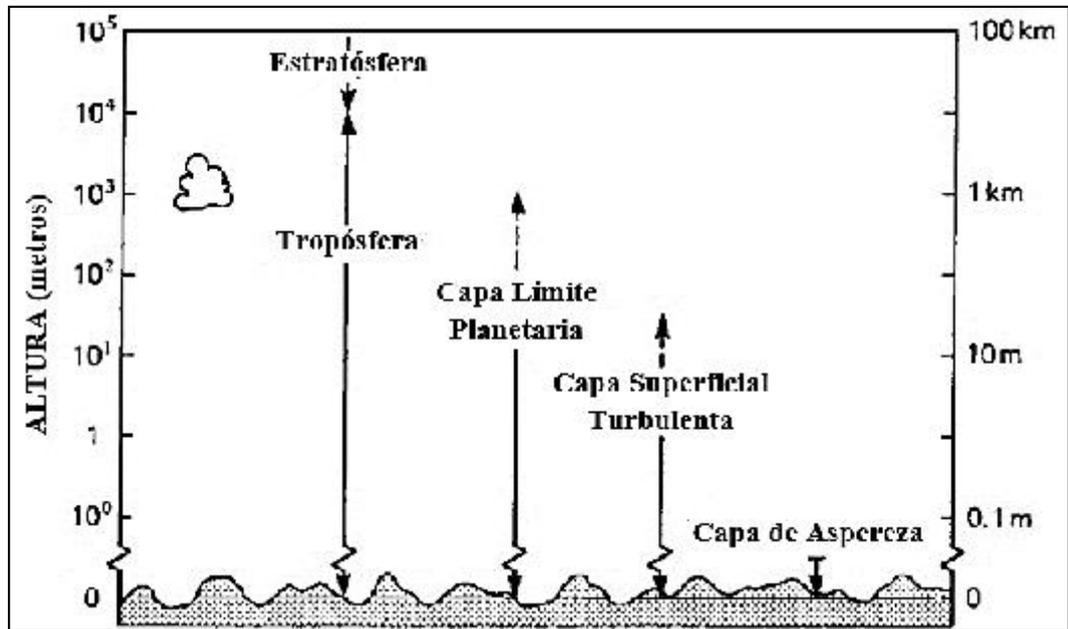


Figura 1. Estructura vertical de la atmósfera. (Oke T., 2006)

2.2.1.2. Ecuación de gases ideales

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (1)$$

La presión de vapor de agua existente () es igual a la densidad del vapor () multiplicado por la constante de vapor de los gases (= 461,5) y la temperatura expresada en grados Kelvin (()). Para fines prácticos se despejará la densidad de vapor de agua () para obtener la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} \quad (2)$$

2.2.1.3. Ley de Ohm

$$I = \frac{V}{R} \quad (3)$$

Establece que la diferencia de potencial que se aplica a los extremos de un conductor () es proporcional a la intensidad de corriente eléctrica () multiplicada por la resistencia eléctrica (), para el presente estudio se utilizó el mismo concepto en la transferencia de energía considerando como conductor al aire presente entre los niveles de la torre de gradiente meteorológica.

2.2.1.4. Humedad relativa

$$= \left(\frac{\quad}{\quad} \right) \cdot \% \quad (4)$$

La humedad relativa se expresa como el cociente entre la presión de vapor de agua existente () y la presión de vapor de saturación () multiplicado por 100%.

2.2.1.5. Perfil logarítmico del viento

Al considerar conceptos teóricos como la velocidad de fricción (), la altura de rugosidad (z_0), y la constante de Von Karman (0,40), se tiene la formulación que Geiger (1971) denominó modelo de Prandtl (Guevara, 2013). El modelo logarítmico del viento describe con precisión la variación de la velocidad horizontal del viento con respecto a la altura, en estabilidad neutral.

$$\bar{u}(z) = \frac{\bar{u}_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (5)$$

El flujo de momento se calcula mediante la división de la velocidad de fricción () entre la constante de Von Kármán (0,40) multiplicado por el logaritmo neperiano de la división de la media logarítmica de las alturas de los niveles ($\bar{u} = [(\bar{u}_2 - \bar{u}_1) / (z_2' - z_1)]$) y la altura de la longitud de la rugosidad de la superficie ($z_0 = \text{cte.}$). La velocidad media horizontal del viento se encuentra forzada por la resistencia de fricción de la superficie de estudio, también conocida como rugosidad de la superficie.

$$\bar{u}(z) = \frac{\bar{u}_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (6)$$

$$\bar{u}(z) = \frac{\bar{u}_*}{k} [\ln(\bar{u}) - \ln(z_0)]$$

$$\tau(z) = -\rho g (z - z_0)$$

Derivamos:

$$\frac{d\tau(z)}{dz} = -\rho g$$

$$\tau(z) = -\rho g z + C$$

Despejamos la velocidad de fricción:

$$u_* = \frac{\tau(z)}{\rho z}$$

$$u_* = \frac{-\rho g z + C}{\rho z} \tag{7}$$

$$u_* = \frac{-g z + C/\rho}{z} \tag{8}$$

La Figura 2a muestra que en condiciones de estabilidad la diferencia de velocidad de viento entre los niveles es mínima y en condiciones de turbulencia es mayor registrando los valores más altos en los niveles superiores, (Figura 2b).

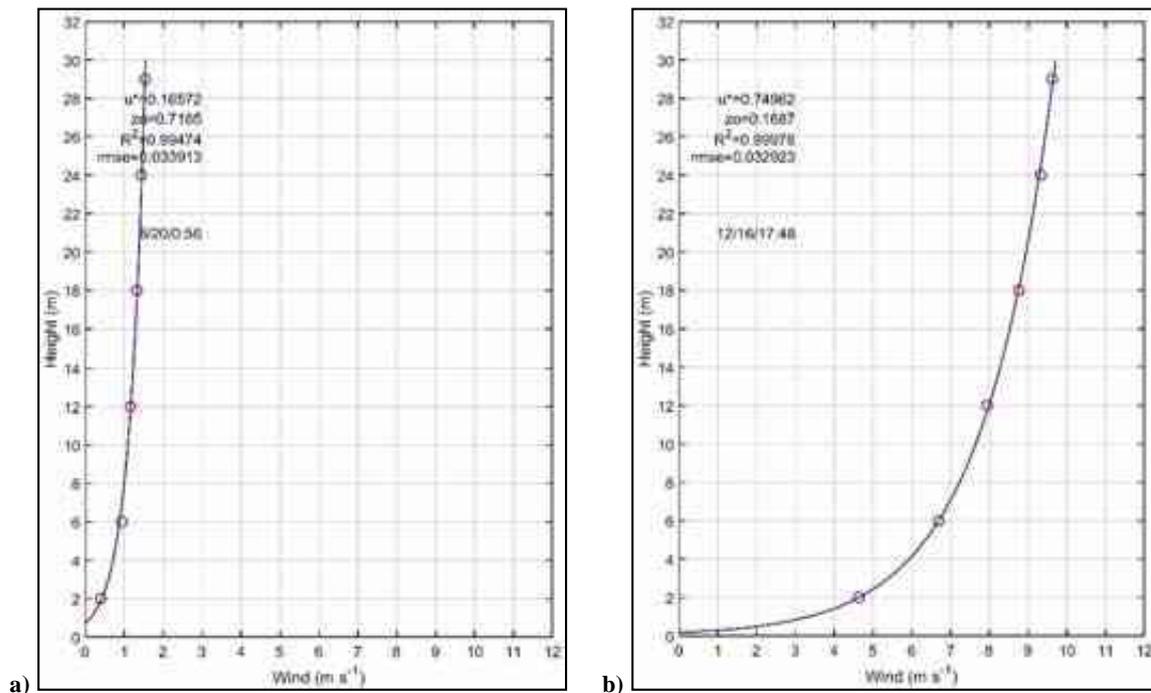


Figura 2. Comportamiento de la velocidad del viento en diferentes condiciones atmosféricas. a) Perfil logarítmico del viento en condiciones de estabilidad, b) Perfil logarítmico del viento en condiciones de turbulencia.

2.2.1.6. Dirección del viento (estadísticas circulares)

Los valores de dirección del viento no pueden ser analizados con técnicas comunes de estadística debido a su naturaleza circular. Por ejemplo, el promedio aritmético de una muestra de datos cercanos a 0° y 360° (norte) sería un valor cercano a 180° (sur), lo cual no tiene sentido ya que el valor promedio de la dirección del viento durante esos momentos debería estar cerca de 0° y 360° (norte). Por lo tanto, para calcular la media y la desviación estándar utilizamos estadísticas circulares, que sirven para el uso de datos a escala angular (Jammalamadaka y Sengupta, 2001). Las direcciones deben transformarse en vectores unitarios en el plano bidimensional por:

$$= \left[\frac{\begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{pmatrix}} \right] \tag{9}$$

Donde $\begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{pmatrix}$ es el vector unitario y θ es el ángulo del vector. Esta transformación se realiza utilizando la identidad de Euler:

$$= \cos(\theta) + j \sin(\theta) \tag{10}$$

Donde j es la unidad imaginaria. Después de esta transformación, los vectores $\begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{pmatrix}$ son promediados por la siguiente ecuación:

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) \end{pmatrix} \tag{11}$$

Donde \bar{r} es el vector resultante, que se transforma utilizando la función de tangente inversa de cuatro cuadrantes para obtener la dirección angular media $\bar{\theta}$, para el presente trabajo se utilizó algoritmos desarrollados en dos contribuciones recientes (Yin y Porporato, 2017) y (Berens, 2009), y como resultado se generaron las planillas de la *Figura 25* que describen el comportamiento del ciclo diurno de los promedios horarios mensuales de los valores de dirección del viento sobre el Observatorio de Huancayo.

2.2.1.7. Propiedades físicas de superficies naturales

Tabla 1.
Propiedades térmicas de los materiales naturales.

Material	Obs	Densidad ($\text{kg m}^{-3} \times 10^3$)	Calor específico ($\text{J kg K}^{-1} \times 10^3$)	Capac. calorífica ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1} \times 10^{-6}$)	Conduct térmica ($\text{W m}^{-1} \times \text{K}^{-1}$)	Difusiv. térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1} \times 10^{-6}$)	Admitancia térmica ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \times \text{K}^{-1}$)
Suelo arenoso (40% de espacio poroso)	Seco	1,60	0,80	1,28	0,30	0,24	620
	Saturado	2,00	1,48	2,96	2,20	0,74	2550
Suelo de arcilla (40% de espacio poroso)	Seco	1,60	0,89	1,42	0,25	0,18	600
	Saturado	2,00	1,55	3,10	1,58	0,51	22100
Suelo de turba (80% de espacio poroso)	Seco	0,30	1,92	0,58	0,06	0,10	190
	Saturado	1,10	3,65	4,02	0,50	0,12	1420
Nieve	Fresca	0,10	2,09	0,21	0,08	0,10	130
	Antigua	0,48	2,09	0,84	0,42	0,40	595
Hielo	0°C puro	0,92	2,10	1,93	2,24	1,16	2080
Agua	Hasta 4°C	1,00	4,18	4,18	0,57	0,14	1545
Aire	Hasta 10°C	0,0012	1,01	0,0012	0,025	21,50	5
	Turbulento	0,0012	0,01	0,0012	~125	~10 x 10 ⁶	390

Nota: Recuperado del libro Boundary Layer Climates, segunda edición. (Oke, 2006)

2.2.2. Transferencia radiativa en la superficie

La energía emitida por el sol es la fuente principal del flujo de energía sobre todo en la atmósfera superficial. A continuación, se presentan conceptos fundamentales para comprender el balance energético y el flujo neto de radiación de onda completa.

2.2.2.1. Radiación

La radiación es una forma de energía debido a las rápidas oscilaciones de los campos electromagnéticos. Se transfiere por fotones o haces de energía que tienen propiedades similares a las partículas y las ondas (dualidad onda-partícula) caracterizados por su longitud de onda (distancia entre crestas de olas sucesivas). En la mayoría de las aplicaciones en las ciencias atmosféricas nos interesan las longitudes de onda que comprenden un rango aproximado de 0,1 a 100 μm ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$), una porción muy pequeña del espectro electromagnético total (Figura 3). La porción visible del espectro, a la cual el

ojo humano es sensible, es una fracción aún más pequeña que se extiende desde 0,36 μm (ultravioleta) a 0,75 μm (infrarrojo). La radiación es capaz de viajar en el vacío, toda la radiación se mueve a la velocidad de la luz (aprox. $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$) y en una trayectoria recta, cuando no existe distorsión del espacio por una fuerza de gravedad mayor.

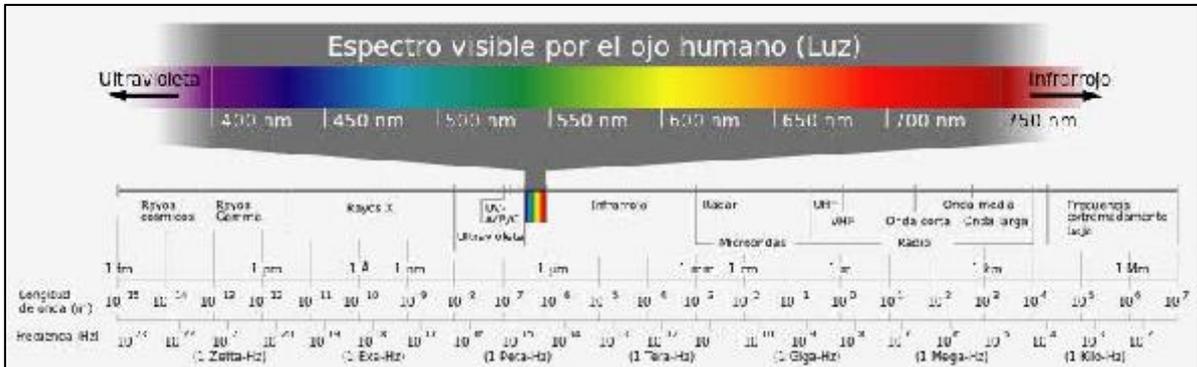


Figura 3. El espectro electromagnético. (Yela, 2016)

2.2.2.2. *Cuerpo negro*

Todos los cuerpos que poseen energía; es decir, cuyas temperaturas están por encima del cero absoluto ($0 \text{ K} = -273,2 \text{ }^\circ\text{C}$); emiten radiación. Si un cuerpo hipotético a una temperatura determinada emite la máxima cantidad posible de radiación por unidad de su área superficial por unidad de tiempo entonces se llama un cuerpo negro o un radiador completo.

Tal cuerpo hipotético tiene una emisividad superficial () igual a la unidad.

2.2.2.3. *Ley de Stefan Boltzmann*

Establece que un cuerpo negro hipotético emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total (W/m^2) proporcional a la cuarta potencia de su temperatura:

$$j = \sigma T^4 \quad (12)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{K}^{-4}$, y multiplicada por la cuarta potencia de la temperatura absoluta (K) es igual a la densidad de flujo de energía emitida por un cuerpo negro.

Si el cuerpo no es un radiador completo, la Ecuación 12 puede volverse a escribir para incluir el valor de ϵ que es una propiedad radiactiva de la superficie denominada emisividad, la cual puede variar entre 0 y 1:

$$j = \epsilon \sigma T^4 \quad (13)$$

2.2.2.4. Radiación de onda corta

La radiación de onda corta reflejada por la superficie (K_r) depende de la cantidad de radiación de onda corta incidente (K_i), ambas expresadas en W/m^2 y del albedo (α) de la superficie que puede variar entre 0 y 1. (Oke, 2006)

$$K_r = \alpha K_i \quad (14)$$

La diferencia entre los flujos de onda corta incidente y reflejada es igual a la radiación de onda corta absorbida por la superficie, también llamada radiación neta de onda corta (K_n^*). (Oke, 2006)

$$K_n^* = K_i - K_r \quad (15)$$

$$K_n^* = K_i (1 - \alpha) \quad (16)$$

2.2.2.5. Radiación de onda larga

La radiación de onda larga emitida desde la superficie (L_o) se rige por la temperatura y la emisividad. Si la superficie es un radiador completo ($\epsilon_o = 1$), la salida está dada por la Ecuación 12, pero siendo ϵ_o inferior a la unidad y puede variar entre 0 y 1. (Oke, 2006), la nueva ecuación sería la siguiente:

$$L_o = \epsilon_o \sigma T_0^4 + (1 - \epsilon_o) L_i \quad (17)$$

Donde T_0^4 es la temperatura absoluta de la superficie expresada en la cuarta potencia de dicho valor en grados Kelvin (K), L_i es la radiación de onda larga incidente y L_o es la radiación de onda larga reflejada por la superficie. (Oke, 2006)

T_0 varía considerablemente a lo largo del día, el valor de L_o es a la vez mayor en magnitud y más variable que L_i . (Oke, 2006)

La diferencia entre los flujos de onda larga incidente y reflejada es el presupuesto de radiación de onda larga (L_n^*) o también conocido como radiación neta de onda larga expresado en W/m^2 . (Oke, 2006)

$$L_n^* = L_i - L_o \quad (18)$$

2.2.2.6. Radiación neta de onda completa

Es el intercambio de energía más importante porque para la mayoría de los sistemas representa el límite de la fuente o sumidero de energía disponible. El

presupuesto de energía en superficie diurna es la suma de las corrientes netas de onda corta y larga individuales expresadas en W/ m². (Oke, 2006)

$$= - + -$$

$$= +$$
(19)

Y, por la noche la radiación solar está ausente de manera que:

$$= -$$

$$=$$
(20)

2.2.3. Transferencia de energía y balance energético en la atmósfera superficial

En este apartado, se exponen los conceptos y formulaciones de las principales variables físicas y meteorológicas que se utilizaron en la presente investigación.

2.2.3.1. Momento

El esfuerzo del aire sobre la superficie () que es función de u*.

$$= \frac{\rho \cdot u_*^2}{K}$$
(21)

El momento se expresa como el negativo de la densidad del aire (- ρ), multiplicado por la diferencia de velocidad del viento entre niveles (Δu) dividido entre la resistencia aerodinámica del momento (K).

2.2.3.2. Calor sensible

Es la cantidad de energía requerida (W/m²), por el vapor de agua contenido en el aire para aumentar su temperatura sin generar un cambio de fase o estado.

$$= \frac{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{K}$$
(22)

El calor sensible se expresa como la multiplicación de la capacidad calorífica del aire (c_p) y la diferencia de temperatura entre niveles (ΔT) dividido entre la resistencia aerodinámica del calor sensible (K).

Está asociado a la diferencia de temperatura existente entre la temperatura a nivel de superficie y la temperatura del aire. Cuyo valor es positivo si la energía fluye desde al aire hacia la superficie y negativo cuando fluye en sentido contrario.

2.2.3.3. Calor latente

Es la cantidad de energía requerida (W/m^2), por el vapor de agua contenido en el aire para poder cambiar de fase o estado.

$$= \frac{\dots}{\dots} \quad (23)$$

El calor latente se expresa como la variación de la densidad del vapor de agua (ρ) (calculado a partir de la humedad relativa) multiplicado por el calor latente de vaporización del agua (L) dividido entre la resistencia aerodinámica del calor latente (R_L). Cuando exista evaporación el valor de Q_E será positivo y cuando exista condensación será negativo.

2.2.3.4. Flujo de calor transferido hacia o desde el suelo

La influencia de la superficie activa se extiende hacia una capa relativamente poco profunda de la superficie. Durante las noches de invierno la energía fluye desde el subsuelo hacia la superficie, siendo así el flujo positivo debido a que el subsuelo está más caliente que la superficie; mientras que durante las tardes con cielo despejado Q_G es negativo ya que hay transporte de energía hacia el subsuelo porque la superficie presenta mayor temperatura que el subsuelo. (Oke, 2006)

$$= - \frac{\dots}{\dots} \quad (24)$$

La magnitud del flujo será proporcional al gradiente de concentración de calor promedio $C_s(\bar{T}_s/z)$ y a la constante de proporcionalidad (k_{Hs}) llamada coeficiente de difusividad térmica del suelo (m^2s^{-1}). El signo negativo indica que el flujo está en la dirección de concentración decreciente. (Oke, 2006)

Esta transferencia de calor molecular es tan débil que durante el día sólo se calienta cerca de dos decímetros. Para la estimación del flujo de calor del suelo en la superficie, se utilizó la suma del flujo de calor del suelo medido a 8 cm por la placa de flujo de calor del suelo y el almacenamiento de calor en la capa entre la superficie y la placa. (Foken y Nappo, 2008)

$$(\dots) = (- \dots) + \dots (\dots) (\dots) \quad (25)$$

Donde C_G es la capacidad calorífica volumétrica $C_G(z) = a_G / v_T$ (v_T es la difusividad térmica molecular) que puede ser asumida constante como la profundidad siendo el caso del suelo presente de humedad uniforme. Para implementar la Ecuación 26 utilizamos dos sensores de temperatura integrados en la capa del suelo, que está situados a 2 cm y 5 cm entre la superficie y la placa de flujo de calor (8 cm). Para el flujo de calor del suelo cerca de la superficie, se deduce que:

$$C_G(z) = C_G(z_0) + \frac{\rho_w C_w (T(z) - T(z_0))}{\Delta z} \quad (26)$$

Además, el C_G del suelo húmedo a diferentes niveles de suelo se calculó añadiendo la capacidad calorífica del suelo seco a la del agua del suelo de la siguiente manera

$$C_G(z) = C_d + v C_w \rho_w \quad (27)$$

Donde C_d es la capacidad calorífica del suelo seco, v es el contenido de agua del suelo en volumen, ρ_w es la densidad del agua (1000 kg m^{-3}) y C_w es el calor específico del agua ($4,18 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Un valor de $1,25 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ para la capacidad calorífica del suelo seco es un valor razonable para un suelo arcilloso de acuerdo con las características del suelo del Observatorio de Huancayo. (Garay y Ochoa, 2010)

2.2.3.5. Balance de flujos energéticos en la superficie

Las condiciones de contorno en la interfaz suelo-atmósfera, dependen del equilibrio entre los flujos de energía que tienen lugar en la superficie. Estudiar los flujos de energía superficial se enmarca en cuantificar la energía que atraviesa una unidad de área en una unidad de tiempo ($\text{Js}^{-1} \text{m}^{-2}$ o Wm^{-2}) ya sea como calor sensible (Q_H), calor latente (Q_E), conducción de calor hacia o desde el suelo subyacente (Q_G) y para así obtener el flujo de radiación neta de onda completa (Q^*). Por lo tanto, el balance energético de la superficie que se propone es el siguiente:

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G \quad (28)$$

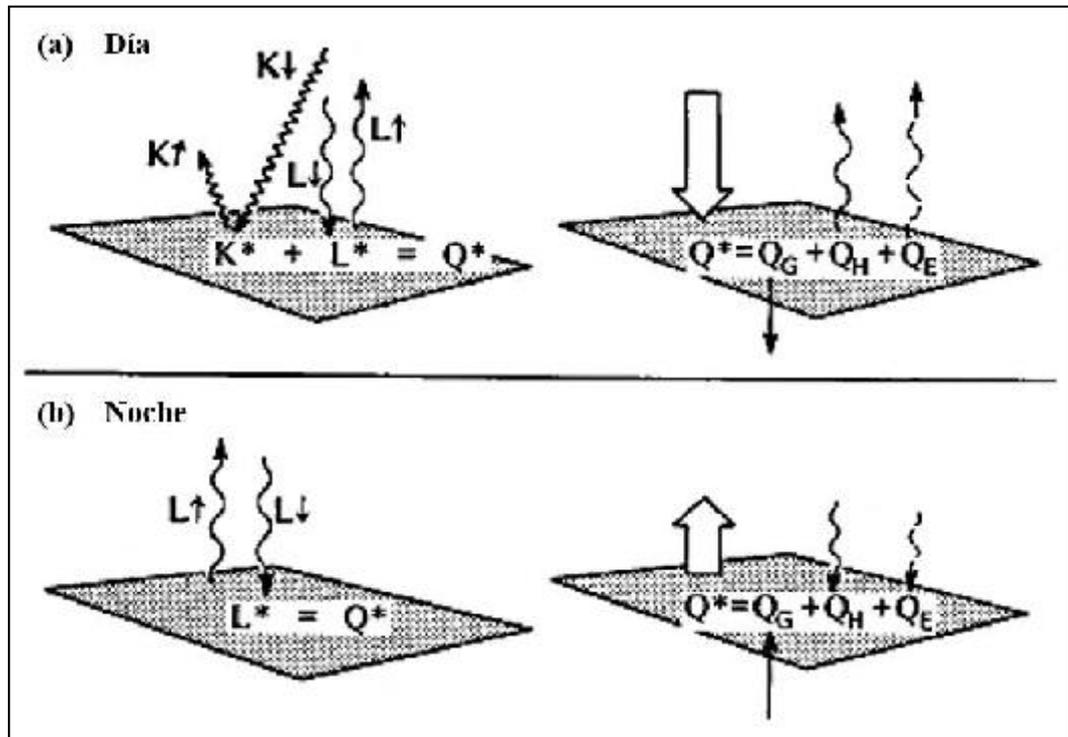


Figura 4. Esquema de los flujos involucrados en un sitio "ideal". (Oke, 2006)

2.3. Definiciones conceptuales

2.3.1. Heladas

La ocurrencia de un evento de helada se describe como un registro de temperatura inferior o igual a 0 °C reportado en una garita "tipo Stevenson" a una altura entre 1,25 y 2,0 m. (Snyder, R. L. ; De Melo-Abreu, J. P; Matulich, S., 2005)

Su comportamiento está sujeto a diversos factores como la altitud, latitud, transparencia atmosférica, estacionalidad, entre otras. Por lo que sus valores difieren significativamente desde registros positivos a registros por debajo de 0 °C en el territorio peruano. (CENEPRED, 2018)

2.3.2. Helada radiativa

Se produce cuando la temperatura superficial cae por debajo de los 0 °C con cielo despejado, en calma (poca intensidad de la velocidad de viento), inversión de temperatura y punto de rocío por debajo de cero (FAO, 2010). Debido a la poca cobertura de nubes se produce una mayor pérdida radiativa de onda larga, ya que las nubes bajas ejercen un efecto invernadero sobre la superficie. Los registros de temperatura por debajo de cero se reportan comúnmente previos al amanecer y son las heladas más comunes.

2.3.3. Helada convectiva

Se produce cuando el aire frío fluye en un área para reemplazar el aire más caliente que estaba presente antes del cambio meteorológico. Está asociada a condiciones de elevada nubosidad, vientos moderados a fuertes, sin inversión de temperatura y baja humedad (FAO, 2010). Los registros de temperatura durante el día son cercanos a cero y durante la noche se mantienen bajo cero durante más horas y no sólo previo al amanecer, son las heladas menos comunes pero que causan más daño a los cultivos de la zona.

2.4. Formulación de la hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Hipótesis alternativa (H_1): Los datos de los sensores meteorológicos son suficientes para estimar los flujos turbulentos de energía superficial, durante los eventos de heladas en el período mayo – setiembre del 2018, en el Observatorio de Huancayo.

Hipótesis nula (H_0): Los datos de los sensores meteorológicos no son suficientes para estimar los flujos turbulentos de energía superficial, durante los eventos de heladas en el período mayo – setiembre del 2018, en el Observatorio de Huancayo.

2.4.2. Hipótesis específicas alternativas (H_1)

Los eventos de heladas en el período mayo – setiembre del 2018, pueden ser identificados utilizando los sensores meteorológicos de la torre de gradiente y el sensor MODIS – NASA, en el Observatorio de Huancayo.

Los flujos turbulentos de energía superficial, pueden ser estimados mediante el método de perfil aerodinámico modificado, utilizando sensores meteorológicos durante los eventos de heladas identificados en el período mayo – setiembre del 2018, en el Observatorio de Huancayo.

Los flujos turbulentos de energía superficial, pueden ser estimados mediante el método de balance de energía de Bowen, utilizando sensores meteorológicos durante los eventos de heladas identificados en el período mayo – setiembre del 2018, en el Observatorio de Huancayo.

2.4.3. Hipótesis específicas nulas (H_0)

Los eventos de heladas en el período mayo – setiembre del 2018, no pueden ser identificados utilizando los sensores meteorológicos de la torre de gradiente ni con el sensor MODIS – NASA, en el Observatorio de Huancayo.

Los flujos turbulentos de energía superficial, no pueden ser estimados mediante el método de perfil aerodinámico modificado, utilizando sensores meteorológicos durante los eventos de heladas identificados en el período mayo – setiembre del 2018, en el Observatorio de Huancayo.

Los flujos turbulentos de energía superficial, no pueden ser estimados mediante el método de balance de energía de Bowen, utilizando sensores meteorológicos durante los eventos de heladas identificados en el período mayo – setiembre del 2018, en el Observatorio de Huancayo.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

El presente capítulo se subdivide en 10 apartados, el primero expone el lugar de ejecución de las actividades de investigación, en el segundo apartado se categoriza el área, sector y programa en el que se encuentra el presente trabajo, según los Códigos de Plan Nacional de CTI. En el tercer apartado se justifica el tipo y nivel de investigación con el que se trabajó, en el cuarto apartado se identifica la población y la muestra, en el quinto apartado se identificó la variable independiente y dependiente, en el sexto apartado se presenta la tabla de operacionalización de variables, en el séptimo apartado se expone la técnica de obtención de datos que se utilizó. En el octavo apartado se describen los sensores meteorológicos, diferenciados entre los que se implementaron en la torre de gradiente meteorológica y en la estación BSRN, los mismos que sirvieron para estimar los flujos turbulentos de calor latente y sensible, en el noveno apartado se describen los programas informáticos que fueron utilizados para procesar la información meteorológica y en el décimo apartado se expone a detalle los métodos numéricos utilizados para estimar los flujos turbulentos de energía superficial.

3.1. Diseño metodológico

3.1.1. Ubicación

El presente proyecto de investigación denominado “ESTIMACIÓN DE FLUJOS DE ENERGÍA SUPERFICIAL UTILIZANDO SENSORES METEOROLÓGICOS DURANTE LOS EVENTOS DE HELADAS (MAYO – SETIEMBRE DEL 2018), EN EL OBSERVATORIO DE HUANCAYO.” se desarrolló dentro de las instalaciones del Observatorio de Huancayo del INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ ($12,05^{\circ}$ S, $75,32^{\circ}$ O, 3313 m.s.n.m.), en el anexo de Huayao del distrito de Huáchac, en la provincia de Chupaca de la región Junín.

3.1.2. Área, sector y programa según los códigos del Plan Nacional de CTI

Área:	03 AMBIENTAL
Sector:	0304 CAMBIO CLIMÁTICO Y DESASTRES
Programa:	0304 0003 Monitoreo y pronóstico de fenómenos hidrometeorológicos: cambio climático, fenómenos del niño, heladas, nevadas, precipitaciones intensas, sequías.
Proyecto:	MAGNET “Fortalecimiento de la línea de investigación en física y microfísica de la atmósfera”, contrato N° 10-2017/FONDECYT, financiado por el FONDECYT de CONCYTEC, ejecutado por el Instituto Geofísico del Perú.

3.1.3. Instrumentos utilizados para la obtención de datos

Se utilizó una torre de gradiente meteorológica con 06 niveles de medición de la cual se obtuvieron registros calibrados desde el 15 de mayo al 30 de setiembre del 2018 (Figura 5), los mismos que me sirvieron para estimación de flujos turbulentos de energía superficial.

Para los valores de radiación solar se utilizaron los registros de la estación completa de radiación (*Figura 10*) ubicada también en el Observatorio de Huancayo, habilitada desde el 19 de julio del 2017, la misma que se encuentra en proceso de incorporación a la Red de Radiación de Superficie de Línea de Base (BSRN por sus siglas en inglés), la cual es muy exigente en el control de calidad de sus mediciones. Los datos meteorológicos generados por la torre de gradiente meteorológica y la estación de radiación BSRN generaron registros por minuto de manera ininterrumpida durante la ocurrencia de los eventos más intensos de heladas en el período de estudio establecido.

Para los valores de cobertura de nubes se utilizó el producto de fracción de nubes del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS, por sus siglas en inglés) que se encuentra instalado en los satélites Terra y Aqua de la NASA.

3.1.3.1. Torre de gradiente meteorológica

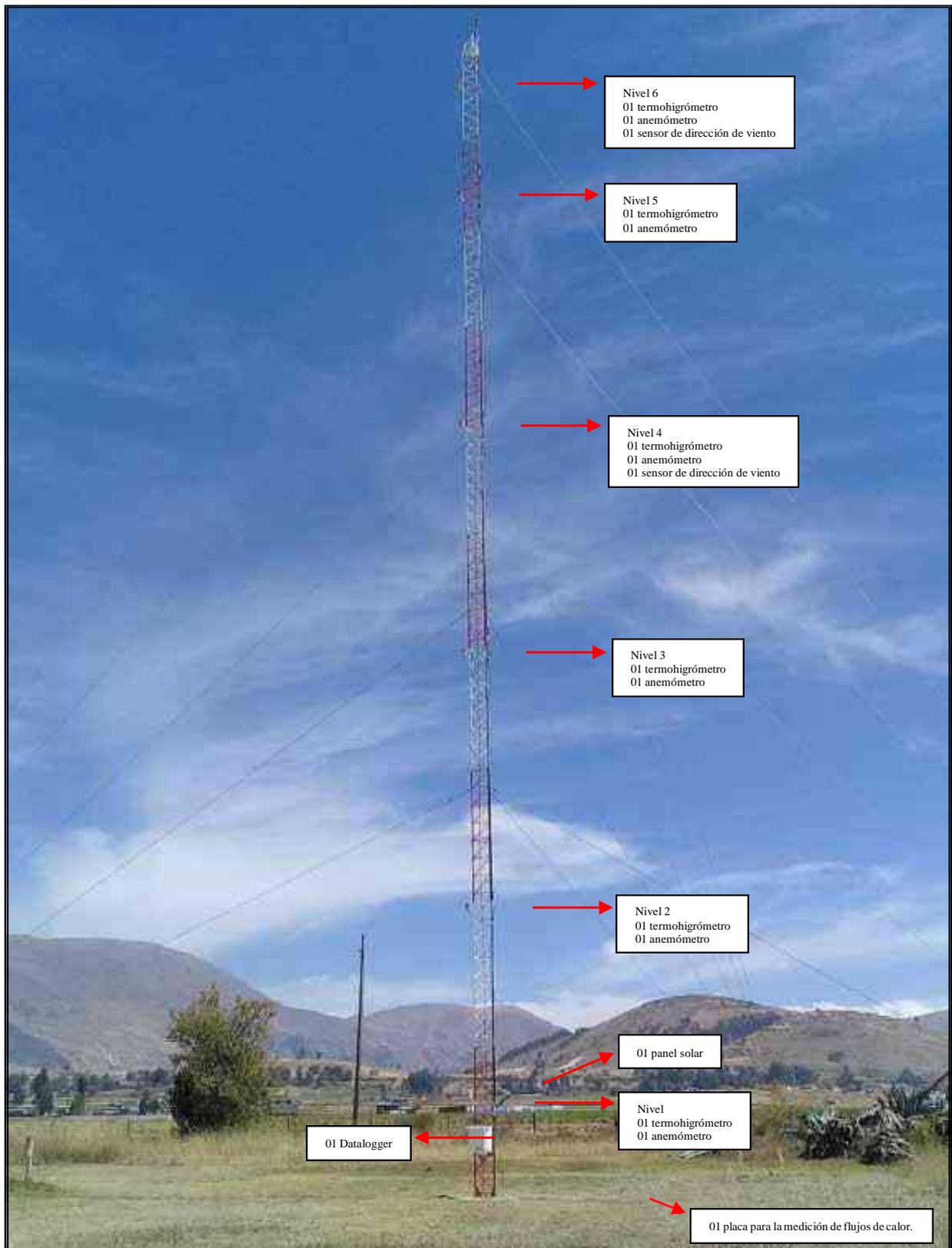


Figura 5. Torre de gradiente meteorológica de 30 m de altura, Obs. de Huancayo.

Los siguientes sensores conforman la parte operativa de la torre de gradiente meteorológica:

06 termohigrómetros, (HMP60 – Campbell Scientific Inc.).

06 anemómetros (03101 – Campbell Scientific, Inc.).

02 sensores de dirección de viento (024A – MET ONE).

01 placa sensor de flujo de calor (HFP01 – Campbell Scientific, Inc.).

3.1.3.1.A. Anemómetro



Figura 6. Anemómetro 03101, Campbell Scientific, Inc.

La velocidad del viento se midió con el anemómetro 03101 de tres cazoletas de la marca Campbell Scientific. El sistema de funcionamiento del anemómetro consiste en la rotación de la rueda del eje de las cazoletas produciendo una tensión de onda senoidal con frecuencia proporcional a la velocidad del viento. Este modelo utiliza rodamientos blindados, lo que reduce el umbral de inicio del anemómetro es decir poseen mayor sensibilidad ante la ocurrencia de vientos más suaves. (Campbell Scientific, Inc., 2018)

Características:

Diseñado para operación continua, a largo plazo y sin supervisión en condiciones adversas.

Ideal para estudios de perfil eólico.

La versión Campbell Scientific utiliza rodamientos blindados, lo que reduce el umbral de inicio de lectura del anemómetro. Compatible con registradores de datos Campbell Scientific CRBasic: series CR200 (X), serie CR300, serie CR6, serie CR800, serie CR1000, serie CR1000X, CR3000, CR5000 y CR9000X.

Tabla 2.

Especificaciones técnicas del anemómetro 03101 – Campbell Scientific.

Especificación	Observación
Rango	0 a 50 ms ⁻¹ (112 mph), Resiste ráfagas de viento de hasta 60 ms ⁻¹ (134 mph)
Sensor	Conjunto de rueda de copa de 12 cm de diámetro, vasos hemisféricos de 40 mm de diámetro
Precisión	± 0,5 ms ⁻¹ (1,1 mph)
Umbral	0,5 ms ⁻¹ (1,1 mph)
Transductor	Bobina estacionaria, resistencia nominal de 1300 ohmios
Salida	Señal de onda sinusoidal CA inducida por un imán giratorio en el eje de la rueda de copa 100 mV de pico a pico a 60 rpm; 6 V pico a pico a 3600 rpm
Diámetro de la rueda de copa	12 cm (4,7 pulg)
Peso	113 g (4 oz)

Nota: Recuperado del Manual de instrucciones del anemómetro 03101. (Campbell Scientific, Inc., 2018)

Para el presente estudio se utilizaron 06 anemómetros instalados en los 06 niveles de la torre de gradiente meteorológica (2 m, 6m, 12 m, 18m, 24m y 29 m de altura).

3.1.3.1.B. Sensor de dirección de viento

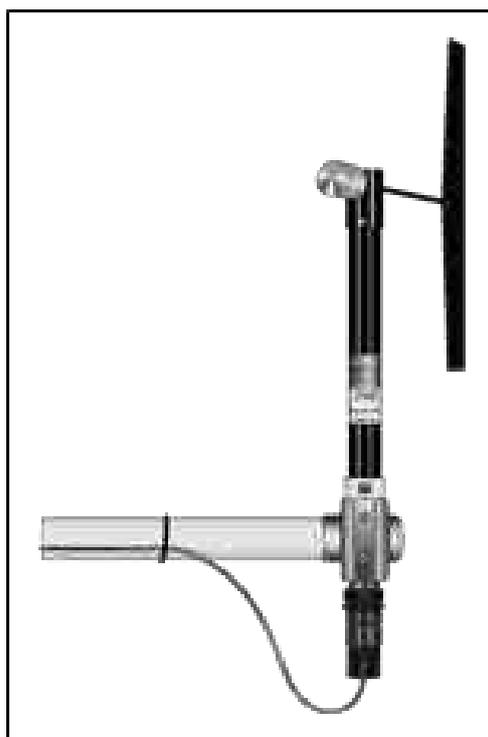


Figura 7. Sensor de dirección de viento 024A – Met One, Campbell Scientific, Inc.

El sensor de dirección de viento 024A es una veleta cuya función es medir la dirección del viento de 0° a 360° con una precisión de 5°. Utiliza un potenciómetro de 10 kW para percibir la dirección del viento. Un registrador de datos aplica una tensión de excitación de precisión para el potenciómetro, lo que resulta en una salida de tensión analógica que es directamente proporcional al acimut de la dirección del viento. (Campbell Scientific, Inc., 2017)

Tabla 3

Especificaciones técnicas del sensor de dirección de viento 024A – Met One.

Especificaciones	Observación
Rango	0 a 360 grados
Umbral	0,447 ms ⁻¹ (1,0 mph)
Precisión	± 5 grados
Rango de temperatura	-50 °C a 70 °C
Resistencia	0 a 10 000
Peso	450 g (1 lb)
Altura total	33,8 cm (13,3 pulg)
Longitud total	44,7 cm (17,6 pulg)
Altura de la cola	30,5 cm (12 pulg)
Anchura de la cola	7,6 cm (3 pulg)

Nota: Recuperado del Manual de instrucciones del sensor de dirección de viento 024A Met One. (Campbell Scientific, Inc., 2017)

Para el presente estudio se utilizaron 02 sensores de dirección de viento instalados en los niveles 04 y 06 de la torre de gradiente meteorológica (18m y 29 m de altura).

3.1.3.1.C. Sensor de temperatura y humedad relativa



Figura 8. Sensor de temperatura y humedad HMP60, Campbell Scientific, Inc.

La sonda de temperatura y humedad relativa HMP60 de la marca Campbell Scientific consiste en un detector de temperatura de resistencia de platino (PRT) para el rango de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un sensor capacitivo de humedad relativa INTERCAP® de Vaisala para el rango de 0 a 100%. El cable de la sonda tiene un conector de rosca para facilitar su rápida instalación. Es adecuado para el monitoreo a largo plazo por su muy bajo consumo de energía alimentada por batería y sin supervisión. El chip de humedad es reemplazable en campo, eliminando el tiempo de inactividad por la recalibración. El HMP60 debe manipularse como un instrumento científico de precisión. (Campbell Scientific, Inc., 2017)

Tabla 4.

Especificaciones técnicas del sensor HMP60 – Campbell Scientific.

Especificaciones	Observación
Temperatura de funcionamiento	-40 a 60 °C
Longitud de la sonda	7,1 cm (2,8 pulg) sonda
Diámetro del cuerpo de la sonda	1,2 cm (0,47 pulg)
Filtro	0,2 µm membrana de teflón
Diámetro del filtro	1,2 cm (0,47 pulg)
Material del cuerpo	Acero inoxidable AISI 316
Material del filtro de rejilla	Plástico ABS revestido con cromo
Voltaje de operación	5 a 28 Vcc
Rango de la señal de salida	0 a 1 Vcc

Nota: Recuperado del Manual de instrucciones del sensor de temperatura y humedad HMP60. (Campbell Scientific, Inc., 2017)

Tabla 5.
Especificaciones técnicas del sensor HMP60 (temp.) – Campbell Scientific.

Especificaciones	Observaciones
Sensor	1000 PRT, DIN 43760B
Rango de medición de temperatura	-40 a 60 °C
Precisión de temperatura	± 0,6 °C (-40 a 60 °C)

Nota: Recuperado del Manual de instrucciones del sensor de temperatura y humedad HMP60. (Campbell Scientific, Inc., 2017)

Tabla 6.
Especificaciones técnicas del sensor HMP60 (% HR) - Campbell Scientific.

Especificaciones	Observaciones
Sensor	INTERCAP®
Rango de medición de la HR	0 a 100% sin condensación
La precisión típica de 0 a 40 °C	± 3% de HR por encima de 0 a 90%, ± 5% de HR de 90 a 100%
Exactitud típica de -40 a 0 °C y de 40 a 60 °C	± 5% de HR por encima de 0 a 90%, ± 7% de HR de 90 a 100%

Nota: Recuperado del Manual de instrucciones del sensor de temperatura y humedad HMP60. (Campbell Scientific, Inc., 2017)

Para el presente estudio se utilizaron 06 termohigrómetros instalados en los 06 niveles de la torre de gradiente meteorológica (2 m, 6m, 12 m, 18m, 24m y 29 m) con sus protectores de radiación solar.

3.1.3.1.D. Placa sensor para la medición de calor transferido al suelo



Figura 9. Placa sensor de flujo de calor HFP01, Campbell Scientific, Inc.

La placa sensor de flujo de calor HFP01 emite una señal de voltaje que es proporcional al flujo de calor del medio circundante (por lo general del suelo). Se utiliza típicamente para los sistemas de equilibrio de flujo de energía o de relación de Bowen. Aunque el sensor HFP01 es muy robusto y estable debe ser manejado como un instrumento científico de precisión. La placa de flujo de calor del suelo HFP01 utiliza una termopila para medir los gradientes de temperatura a través de ella. (Campbell Scientific, Inc., 2016)

Tabla 7.

Especificaciones técnicas de la placa sensor HFP01 – Campbell Scientific.

Especificaciones	Observaciones
Temperatura de funcionamiento	-30 a 70 °C
Grosor de la placa	5,0 mm (0,20 in)
Diámetro del plato	80,0 mm (3,15 in)
Peso (sin cable)	200 g (7,05 oz)
Sensor	Termopila
Rango de medición	$\pm 2,000 \text{ W m}^{-2}$
Sensibilidad (nominal)	$50 \mu\text{V W}^{-1} \text{ m}^{-2}$
Resistencia nominal	2 W
Sensor de resistencia térmica	$<6,25 \times 10^{-3} \text{ Km}^2\text{W}^{-1}$

Nota: Recuperado del Manual de instrucciones de la placa sensor de flujo de calor HFP01. (Campbell Scientific, Inc., 2016)

Para el presente estudio se utilizó 01 placa sensor de flujos de calor transmitido al suelo que fue instalada a 8 cm debajo de la superficie a 3 m de distancia de la torre de gradiente meteorológica.

3.1.3.2. Estación de radiación BSRN



Figura 10. Estación de radiación BSRN en el Observatorio de Huancayo.

La estación BSRN está compuesta por los siguientes instrumentos de medición de radiación:

03 piranómetros:

- Radiación de onda corta global recibida en la superficie.
- Radiación difusa de onda corta recibida en la superficie.
- Radiación de onda corta reflejada por la superficie.

01 pirheliómetros:

- Radiación directa de onda corta recibida en la superficie.

02 pirgeómetros:

- Radiación de onda larga recibida en la superficie.
- Radiación de onda larga emitida desde la superficie.

3.1.3.2.A. Piranómetro



Figura 11. Piranómetro CMP21, Kipp & Zonen.

De acuerdo con la Norma Internacional ISO 9060 y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) un piranómetro es el tipo de instrumento diseñado para medir la radiación solar global o difusa.

El CMP21 se caracterizan por utilizar una termopila como detector y una cúpula de cristal o cuarzo. Es un piranómetro de alto rendimiento utilizado para la investigación, y cumple plenamente con todos los criterios de rendimiento para instrumentos secundarios estándares de la ISO 9060:1990 (categoría más alta de rendimiento de piranómetros de la ISO) (Kipp & Zonen, 2018).

Está diseñado para medir la irradiancia, (flujo radiante, W/m^2) en una superficie plana, resultante de la radiación solar directa y la radiación difusa.

Posee un sensor termistor estándar instalado para monitorizar la temperatura de la carcasa. Está perfectamente adaptado para un uso científico y en redes de monitorización de radiación solar de alto nivel, tales como la BSRN (Baseline Surface Radiation Network) de la OMM (Kipp & Zonen, 2018).

El Piranómetro no requiere alimentación en absoluto, ya que él mismo genera una señal de 0-20 mV en relación con la cantidad de radiación entrante. (Kipp & Zonen, 2018)

Tabla 8.

Especificaciones técnicas del piranómetro CMP21 – Kipp & Zonen.

Especificación	Observación
Rango espectral	285 a 2800 nm
Sensibilidad	7 a 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Tiempo de respuesta	5 s
Offset cero A	$< 7 \text{ W}/\text{m}^2$
Offset cero B	$< 2 \text{ W}/\text{m}^2$
Error direccional (hasta 80 ° a 1000 W/m^2)	$< 10 \text{ W}/\text{m}^2$
Sensibilidad de dependencia a la temperatura (-20 °C a +50 °C)	$< 1\%$
Rango de temperatura de operación	-40 °C a +80 °C
Irradiancia solar máxima	4000 W/m^2
Campo de visión	180°

Nota: Recuperado del Manual de instrucciones del piranómetro CMP21. (Kipp & Zonen, 2018)

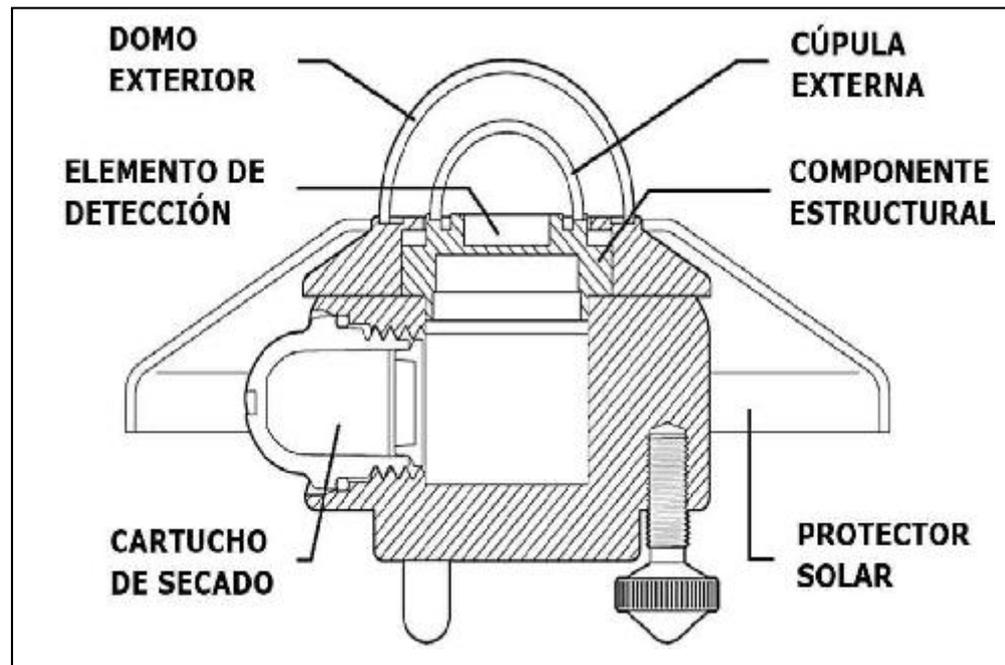


Figura 12. Componentes principales del piranómetro, Kipp & Zonen.

En la posición invertida el piranómetro mide la radiación global reflejada por la superficie. De acuerdo con la OMM la altura tiene que estar entre 1 m y 2 m por encima de una superficie uniforme cubierta con hierba corta.

El dispositivo de montaje no debe interferir de forma considerable con el campo de visión del instrumento. El plato superior evita el calentamiento excesivo del cuerpo del piranómetro por la radiación solar y, si es suficientemente grande, mantiene la pantalla inferior libre de precipitación. (Kipp & Zonen, 2018)

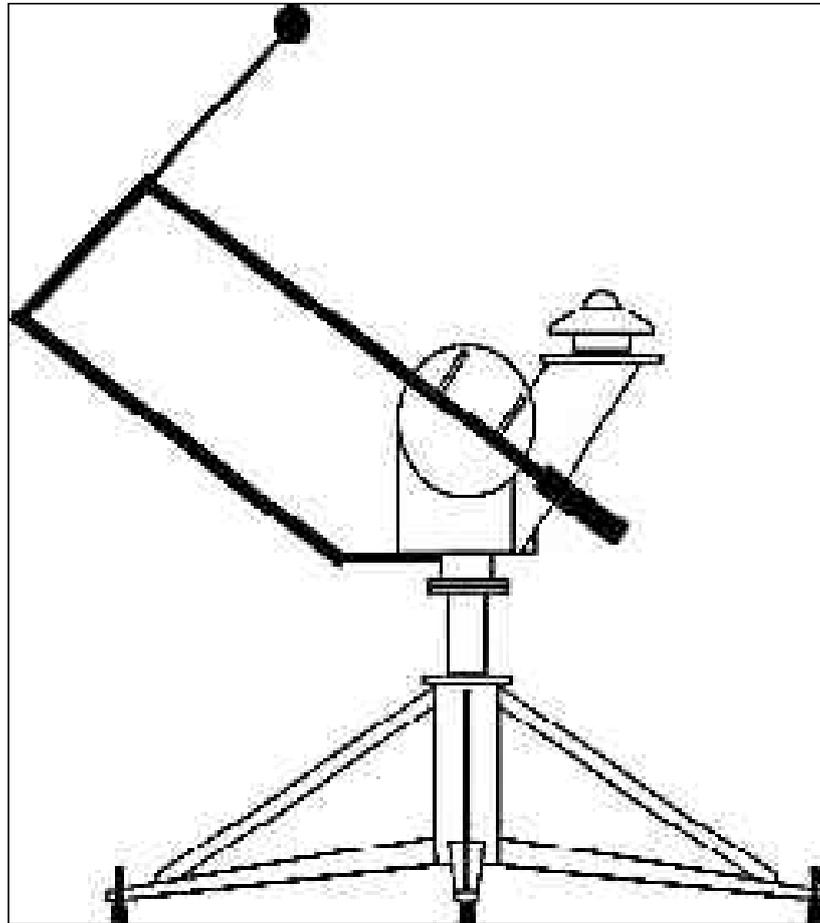


Figura 13. Sistema del seguidor solar con piranómetro de sombra, Kipp & Zonen.

Para medir la radiación solar, se intercepta la radiación solar directa por un disco o esfera pequeña. La sombra del disco tiene que cubrir completamente la cúpula del piranómetro y seguir el movimiento aparente del sol mediante un dispositivo de seguimiento motorizado (seguidor solar) bajo cualquier condición climatológica. (Kipp & Zonen, 2018)

3.1.3.2.B. Pirgeómetro



Figura 14. Pirgeómetro CGR4, Kipp & Zonen.

El pirgeómetro CGR4 es un instrumento capaz de producir medidas científicas de la más alta calidad. La cúpula con forma de menisco proporciona un campo de visión de 180°, con un error de respuesta direccional mínimo. (Kipp & Zonen, 2014)

En la estación BSRN del Observatorio de Huancayo también se instaló el ventilador CVF4, para mejorar su rendimiento.

Las características especiales son:

Sensible a radiación infrarroja de longitud de onda entre 4,5 y 42 μm .

Calentamiento de ventana extremadamente baja.

Campo de visión de 180° con buena respuesta al coseno.

Recubrimiento tipo diamante para una protección óptima contra influencias ambientales.

Tabla 9.
Especificaciones técnicas del pirgeómetro CGR4 – Kipp & Zonen.

Especificaciones	Unidades	Valor	Observación
Rango espectral		4,5 a 42	50% de punto de respuesta
Sensibilidad	/ ° ⁻²	5 a 10	
Impedancia	Ohm	40 a 200	
Tiempo de respuesta	S	< 18 < 6	95% de respuesta 63% de respuesta
No linealidad	%	< 1	Desde -250 a +250 / ° ² de irradiancia
Dependencia de la temperatura de la sensibilidad	%	< 5 < 1 < 10	-40 °C a -20 °C -20 °C a +50 °C +50 °C a +80 °C
Error de inclinación	%	< 1	Desviación cuando mira hacia abajo
Compensación de calefacción de ventana	/ ° ²	< 4	0 1000 / ° ²
Cero offset B	/ ° ²	< 2	A 5 K/h de cambio de temperatura
Temperatura de funcionamiento	°C	-40 a +80	
Campo de visión		180°	
Error direccional	/ ° ²	No definido	Irrelevante para la fuente de IR isotrópica
Irradiancia	/ ° ²	-250 a +250	
No estabilidad	%	< 1	
Selectividad espectral	%	< 5	8 – 14 rango espectral
Ambiental		0 – 100% HR	
Incertidumbre en el total por hora	%	No definido	95% de nivel de confianza
Incertidumbre en el total diario	%	< 3	95% de nivel de confianza

Nota: Recuperado del Manual de instrucciones del pirgeómetro CGR4. (Kipp & Zonen, 2014)

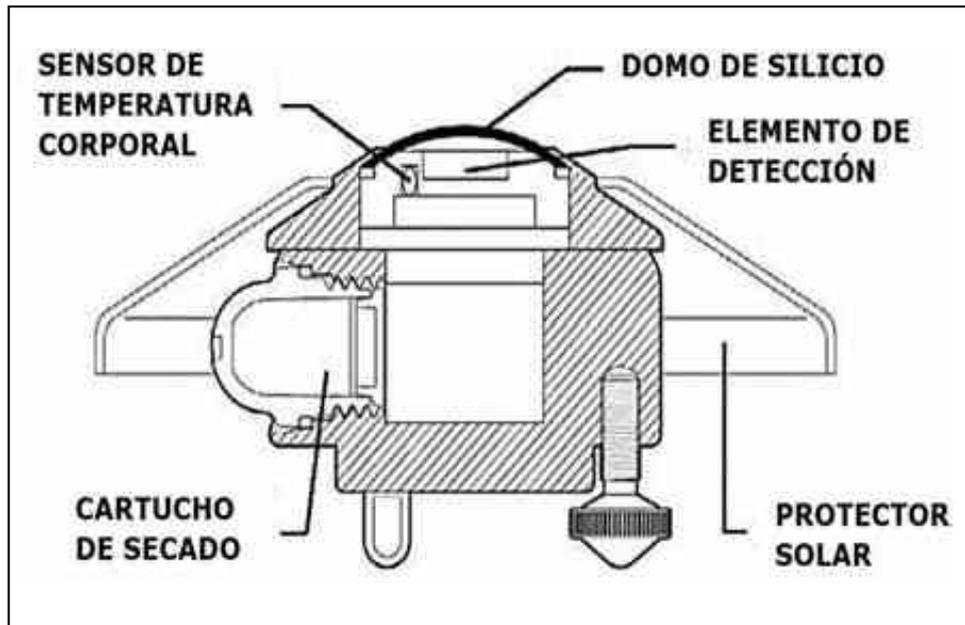


Figura 15. Componentes principales del pirgeómetro CGR4, Kipp & Zonen

3.1.3.2.C. Pirheliómetro



Figura 16. Pirheliómetro CHP1, Kipp & Zonen.

El pirheliómetro CHP1 cumple plenamente con los criterios de rendimiento más recientes de la ISO y la OMM para un pirheliómetro de primera clase de incidencia normal. Cada CHP1 está calibrado en el momento de su fabricación y posee un certificado de calibración trazable al WRR (World Radiometric Reference). (Kipp & Zonen, 2008)

El CHP1 está equipado de un conector de alta calidad para facilitar la instalación y el mantenimiento. El cartucho de secado enroscado es fácil de quitar y el desecante de repuesto está suministrado en paquetes cómodos y prácticos. (Kipp & Zonen, 2008)

Este instrumento abarca todo el espectro solar, entre 200 y 4000 nm pensado para ser usado con cualquier modelo de seguidor solar. (Kipp & Zonen, 2008)

Tabla 10.

Especificaciones técnicas del pirheliómetro CHP1 – Kipp & Zonen.

Especificaciones	Observación
Rango espectral	200 a 4000 nm
Sensibilidad	7 a 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Tiempo de respuesta	< 5 s
Offset cero B	< 1 W/m^2
Sensibilidad de dependencia a la temperatura (-20 °C a +50 °C)	< 0,5%
Campo de visión	$5 \pm 0,2^\circ$
Temperatura de funcionamiento	-40 a +80 s
Irradiancia solar máxima	4000 W/m^2
Normas internacionales (ISO)	Primera clase ISO

Nota: Recuperado del Manual de instrucciones del pirheliómetro CHP1 (Kipp & Zonen, 2008)

3.1.3.3. Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS)

Es un espectrorradiómetro de 36 bandas que mide la radiación visible e infrarroja y obtiene datos que se utilizan para obtener productos que van desde la vegetación, la cobertura de la superficie terrestre y la fluorescencia de la clorofila oceánica hasta las propiedades de las nubes y los aerosoles, cubierta de nieve en la tierra y cubierta de hielo marino en los océanos.

El primer sensor MODIS se lanzó a bordo del satélite Terra en diciembre de 1999, y el segundo se lanzó en Aqua en mayo de 2002 (NASA, 2018).

Los instrumentos MODIS adquieren datos en tres resoluciones espaciales nativas:

Bandas 1–2 - 250 metros.

Bandas 3–7 - 500 metros.

Bandas 8–36 - 1000 metros.

Los productos terrestres MODIS de alto nivel distribuidos desde LP-DAAC se producen en cuatro resoluciones espaciales nominales: 250 metros, 500 metros, 1000 metros y 5600 metros (0,05 grados).

El satélite Terra sobrevuela el Observatorio de Huancayo entre las 10:00 - 11:00 HL por la mañana, y entre las 22:00 - 23:00 HL por la noche, mientras que el satélite Aqua lo hace entre la 01:00 - 02:00 HL por la madrugada y 13:00 - 14:00 HL por la tarde. (NASA, 2018)

Los datos que fueron procesados para obtener la cobertura de nube utilizado en el presente trabajo fueron extraídos de la página web del Nivel 1 y Sistema de Archivo y Distribución de la Atmósfera (Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System - LAADS) del Centro de Archivo Activo Distribuido (Distributed Active Archive Center - DAAC) de la NASA que es parte del Laboratorio de Sistemas de Información Terrestre del Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA en Greenbelt, MD. (LAADS DAAC - NASA, 2018). Luego fueron procesados en el MATLAB 2017a.

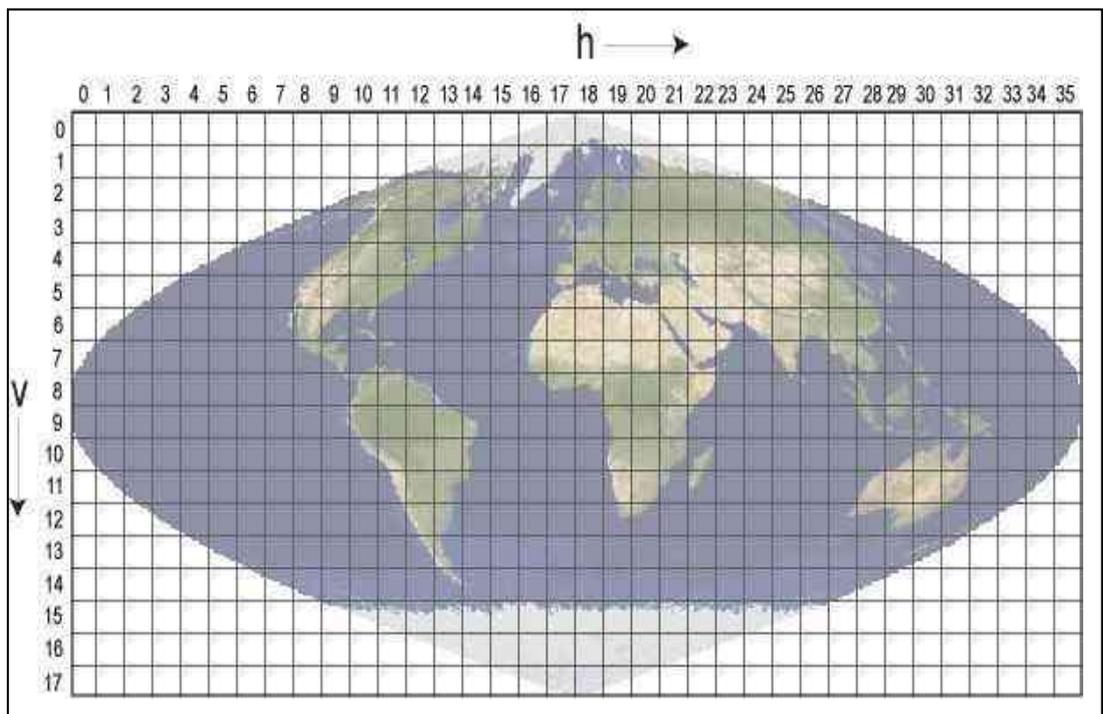


Figura 17. Sistema de grillado sinusoidal que utiliza el sensor MODIS para la ubicación de sus productos. (NASA, 2018)

Tabla 11.
Lista de las 36 bandas de medición del sensor MODIS.

Número de Banda	Rango nm Reflejada	Rango um Emitida	Tipo de medición
1	620–670		Transformación absoluta de la cubierta del suelo, clorofila de la vegetación
2	841–876		Cantidad de nubes, transformación de la cubierta vegetal de la vegetación
3	459–479		Diferencias suelo / vegetación
4	545–565		Vegetación verde
5	1230–1250		Diferencias hoja / dosel
6	1628–1652		Diferencias nieve / nube
7	2105–2155		Propiedades de la nube, propiedades de la tierra
8	405–420		Clorofila
9	438–448		Clorofila
10	483–493		Clorofila
11	526–536		Clorofila
12	546–556		Sedimentos
13h	662–672		Atmósfera, sedimentos
13l	662–672		Atmósfera, sedimentos
14h	673–683		Fluorescencia de la clorofila
14l	673–683		Fluorescencia de la clorofila
15	743–753		Propiedades del aerosol
16	862–877		Propiedades del aerosol, propiedades atmosféricas
17	890–920		Propiedades atmosféricas, propiedades nube
18	931–941		Propiedades atmosféricas, propiedades nube
19	915–965		Propiedades atmosféricas, propiedades nube
20		3,660–3,840	Temperatura de la superficie del mar
21		3,929–3,989	Incendios forestales y volcanes
22		3,929–3,989	Temperatura de la nube, temperatura de la superficie
23		4,020–4,080	Temperatura de la nube, temperatura de la superficie
24		4,433–4,498	Fracción de la nube, temperatura de la tropósfera
25		4,482–4,549	Fracción de la nube, temperatura de la tropósfera
26	1360–1390		Fracción de la nube (cirro fino), temperatura de la tropósfera
27		6,535–6,895	Humedad de la tropósfera media
28		7,175–7,475	Humedad de la tropósfera superior
29		8,400–8,700	Temperatura de la superficie
30		9,580–9,880	Ozono total
31		10,780–11,280	Temperatura de la nube, incendios forestales y volcanes, temperatura de la superficie.
32		11,770–12,270	Altura de la nube, incendios forestales y volcanes, temperatura de la superficie
33		13,185–13,485	Fracción de la nube, altura de la nube
34		13,485–13,785	Fracción de la nube, altura de la nube
35		13,785–14,085	Fracción de la nube, altura de la nube
36		14,085–14,385	Fracción de la nube, altura de la nube

Nota: Recuperado de la página web de la NASA (https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis), en la sección de información correspondiente al sensor MODIS.

3.1.3.4. Tensiómetros



Figura 18. Sensor de contenido de agua y temperatura, Decagon 5TM.

El sensor de contenido volumétrico de agua y temperatura Decagon 5TM es un sensor de humedad de suelo simple, fiable y económico, que combina en una única sonda la medida del contenido volumétrico de agua y la temperatura mediante un termistor.

El sensor Decagon 5TM tiene un volumen de influencia de 0,7 litros de suelo, y determina el contenido volumétrico de agua (VWC) midiendo la constante dieléctrica del suelo, utilizando para ello la técnica de capacitancia/reflectometría de dominio de frecuencias. El filtrado de la señal minimiza los efectos de salinidad y textura, lo que lo hace adecuado para la mayoría de suelos y sustratos. Su pequeño tamaño y diseño compacto hace que sea fácil de instalar y garantiza una elevada durabilidad. (Monitorización ambiental Efesaro, 2020)

Tabla 12
Especificaciones técnicas. (Pessl Instruments)

Precisión	
Permisividad Dieléctrica Aparente (a):	± 1 a de 1 - 40 (rango de suelo); $\pm 15\%$ de 40 - 80
Contenido volumétrico de agua en el suelo (VWC):	$\pm 0,03$ m ³ /m ³ ($\pm 3\%$ VWC) típico en suelos minerales que tienen solución eléctrica
Temperatura:	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
Resolución	
a:	0,1 a de 1-20, < 0,75 a de 20-80
VWC:	0,0008 m ³ /m ³ (0,08% CVA) de 0 a 50% CVA
Temperatura:	0,1 $^{\circ}\text{C}$
Rango	
Temperatura	-40 - 50 $^{\circ}\text{C}$
Dimensiones	10 cm x 3,2 cm x 0,7cm
Tiempo de medición	150 ms (milisegundos)
Alimentación	3,6 - 15 VDC, 0,3 mA en reposo, 10 mA durante 150 ms de medición

3.1.4. Variables a evaluar

3.1.4.1. Variables independientes

Los datos de los sensores meteorológicos.

3.1.4.2. Variables dependientes

Los flujos turbulentos de energía superficial estimados por métodos numéricos.

3.1.5. Métodos numéricos utilizados para la estimación de flujos turbulentos

Se analizaron dos métodos de gradiente de flujo, el método de perfil aerodinámico modificado (Prueger y Kustas, 2005) y el método de balance de energía de Bowen (Bowen, 1926). Ambos basados en el principio de similitud (Monin y Obukhov, 1954), el mismo que asume equivalentes los coeficientes de difusión para el momento (K_M), el calor (K_H) y el vapor de agua (K_V), es decir:

$$= = \quad (29)$$

Y por extensión las resistencias aerodinámicas de las ecuaciones 21, 22 y 23 también lo son:

$$= = \quad (30)$$

3.1.5.1. Método de perfil aerodinámico no modificado

El método aerodinámico no modificado sólo se aplica en las siguientes condiciones restringidas:

Estabilidad neutra: los efectos de flotabilidad están ausentes.

Estado estable: no hay cambios marcados en los campos de radiación o viento durante el período de observación.

Constancia de flujos con altura, sin divergencia vertical o convergencia.

Similitud de todos los coeficientes de transferencia.

Existen dos limitaciones principales para el uso de este enfoque que se derivan de los supuestos necesarios de estabilidad neutra y similitud de todos los coeficientes. El primero restringe su uso a un rango muy estrecho de condiciones naturales, y a períodos en los que los flujos son probablemente pequeños. Sin embargo, incluso dado un medio para extender estas ecuaciones para su uso en la estabilidad no neutral, existe la preocupación de

que el principio de similitud no se aplica, especialmente con respecto a K_M debido a la inestabilidad de la atmósfera en condiciones naturales de turbulencia.

3.1.5.2. Método de perfil aerodinámico modificado

La evaluación de los flujos a través de este método requiere la medición exacta de la diferencia de valores de intensidad de viento y la diferencia de una propiedad relacionada (por lo general durante el mismo intervalo de altura). Se requieren teóricamente sólo dos niveles de medición, pero en la práctica esto se encuentra abierto al error de un solo instrumento, por lo que es aconsejable usar más de dos en una serie de alturas y promediar las diferencias. El promedio de períodos de aproximadamente 30 minutos es apropiado. (Oke, 2006). Para la presente investigación se instaló una torre de gradiente meteorológica de 30 metros de altura con 6 niveles de medición que registró los datos de las variables meteorológicas cada minuto.

Por el principio de similaridad, se asume que las resistencias aerodinámicas del momento, el calor y el valor de agua son iguales, en tal sentido se pueden igualar las ecuaciones 21, 22 y 23.

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\overline{u^2}}{\overline{u}}; & &= \frac{\overline{u^2}}{\overline{u}}; & &= \frac{\overline{u^2}}{\overline{u}} & & (31) \\
 &= \frac{\overline{u^2}}{\overline{u}}; & &= \frac{\overline{u^2}}{\overline{u}}; & &= \frac{\overline{u^2}}{\overline{u}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= & &= \\
 &= & &= & &= & & (32)
 \end{aligned}$$

De acuerdo con la Ecuación 32, el valor del calor sensible se puede hallar en condiciones de variación de temperatura y variación de la velocidad del viento entre diferentes niveles.

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\overline{u^2}}{\overline{u}} = \frac{\overline{u^2}}{\overline{u}} \\
 &= \frac{\overline{u^2}}{\overline{u}} = \frac{\overline{u^2}}{\overline{u}}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{\overline{w' \theta'_{v'}}}{\overline{w' \theta'_{v'}}} \quad (33)$$

El calor latente también se puede hallar mediante la Ecuación 32, en condiciones de variación de densidad del agua y variación de la velocidad del viento entre diferentes niveles.

$$\begin{aligned} \overline{w' \theta'_{v'}} &= \overline{w' \theta'_{v'}} \\ \overline{w' \theta'_{v'}} &= \overline{w' \theta'_{v'}} \\ &= \overline{w' \theta'_{v'}} \end{aligned} \quad (34)$$

El método de perfil aerodinámico modificado propone considerar en el cálculo la función de estabilidad adimensional, simbolizada por M , que representa el comportamiento de la curvatura del perfil de viento logarítmico debido a los efectos de flotación cuando $M > 1$ en condiciones estables mientras que $M < 1$ en condiciones inestables.

Mientras que H , v son funciones de estabilidad adimensionales de calor y vapor de agua que pueden expresarse en función del número de Richardson (Ecuación 38 y Ecuación 39). El cálculo del calor sensible (Q_H) y el calor latente (Q_E) se realizó con las siguientes formulaciones:

$$= - \left(\frac{\overline{w' \theta'_{v'}}}{\overline{w' \theta'_{v'}}} \right) \left(\frac{\overline{w' \theta'_{v'}}}{\overline{w' \theta'_{v'}}} \right) \quad (35)$$

$$= - \left(\frac{\overline{w' \theta'_{v'}}}{\overline{w' \theta'_{v'}}} \right) \left(\frac{\overline{w' \theta'_{v'}}}{\overline{w' \theta'_{v'}}} \right) \quad (36)$$

Debido a las restricciones del método de perfil aerodinámico, es necesario incluir en el análisis al número de Richardson (Ri) ya que es un medio conveniente para categorizar la estabilidad atmosférica y el estado de turbulencia en la capa límite superficial. Es un número adimensional que expresa la relación entre la energía potencial y la energía cinética, cuya formulación es la siguiente:

$$= \frac{\overline{w' \theta'_{v'}}}{\overline{w' \theta'_{v'}}} \quad (37)$$

Donde el número de Richardson (Ri) puede variar entre $(-1 < Ri < +1)$, g representa la aceleración de la gravedad en (ms^{-2}) , \bar{T} es la temperatura media de la capa formada entre dos niveles de medición en grados Kelvin (K), z es la diferencia de alturas en metros y \bar{u} es la diferencia de velocidades de viento entre la altura superior e inferior de cada nivel de medición.

Donde $Ri < 0$ representa condiciones altamente inestables y un aumento del tamaño del gradiente de temperatura cuando el movimiento horizontal es débil, $Ri > 0$ representa condiciones estables donde la temperatura cercana a la superficie es más fría que lejos de la superficie asociado a períodos nocturnos, primeras horas de la mañana y días nublados cuando el flujo laminar y no hay mezcla vertical y $Ri = 0$ condiciones de estabilidad neutra normalmente asociados a períodos cercanos al amanecer y anochecer, y/o en días nublados con fuertes vientos horizontales.

Las modificaciones al método original de perfil aerodinámico recurren a operar con las funciones de estabilidad, para así poder representar el comportamiento de los flujos energéticos en la capa superficial.

La evidencia empírica adicional conduce a la siguiente descripción de las funciones de estabilidad utilizadas en las ecuaciones anteriores. (Oke, 2006)

$$\text{Caso estable} \\ \left(\frac{z}{z_0} \right)^{-1} = \left(\frac{z}{z_0} \right)^{-1} < \dots \quad (38)$$

$$\text{Caso inestable} \\ \left(\frac{z}{z_0} \right)^{-1} = \left(\frac{z}{z_0} \right)^{1/4} < \dots \quad (39)$$

Donde χ es la función de la estabilidad apropiada para la propiedad que se transfiere.

Las observaciones sugieren que en condiciones moderadamente estables se cumple que:

$$= = \quad (40)$$

Y para condiciones inestables:

$$= = \quad (41)$$

3.1.5.3. Método de relación de balance de energía de Bowen

La razón de Bowen (B) es la proporción entre la energía utilizada para calentar el aire y la que se emplea en la evapotranspiración. La partición de energía entre Q_H y Q_E tiene relevancia directa para los climas de la capa límite, dicho de otro modo, representa la relación entre la turbulencia térmica (calor sensible) y mecánica (calor latente) de un fluido.

$$B = \frac{Q_H}{Q_E} = \frac{h(T_s - T_a)}{L E} \quad (42)$$

Y basándonos en el balance de energía superficial de la Ecuación 28 los flujos turbulentos individuales se pueden expresar en términos de B .

$$\begin{aligned} Q_H &= B Q_E + Q_{net} \\ -Q_E &= B Q_E + Q_{net} \end{aligned} \quad (43)$$

Razón de Bowen:

$$\begin{aligned} B &= \frac{Q_H}{Q_E} \\ &= \frac{Q_{net}}{Q_E} \end{aligned} \quad (44)$$

$$B = \left(\frac{Q_{net}}{Q_E} \right) \left(\frac{Q_E}{Q_H} \right) \quad (45)$$

Hallando el calor sensible Q_H mediante el de balance de energía (Ecuación 43) y la razón de Bowen (Ecuación 44):

$$\begin{aligned} -Q_E &= B Q_E + Q_{net} \\ -Q_E &= B Q_E + \frac{Q_H}{B} \\ -Q_E &= \frac{B Q_H}{B} + \frac{Q_H}{B} \\ -Q_E &= \frac{B Q_H + Q_H}{B} \\ \frac{(-Q_E)(B)}{B + 1} &= \end{aligned} \quad (46)$$

Hallando el calor latente Q_E mediante el de balance de energía (Ecuación 43) y la razón de Bowen (Ecuación 45):

$$\begin{aligned}
 - &= + \\
 - &= () () + \\
 - &= (+) \\
 \frac{-}{(+)} &= \tag{47}
 \end{aligned}$$

Para realizar la estimación de calor sensible (Q_H) y calor latente (Q_E) mediante el método de Bowen se utilizó el piranómetro de la estación de radiación BSRN para la medición de la radiación neta (Q^*) y el flujo de calor transferido hacia o desde el suelo (Q_G) fue medido con la placa sensor de flujos ubicada a 8 cm, por debajo de la superficie.

Sólo se utilizó mediciones con una diferencia de velocidad del viento entre ambas alturas superior a $0,3 \text{ ms}^{-1}$ para garantizar la existencia de un régimen turbulento suficiente (Foken et al., 1997b). Además, los valores de la relación Bowen cercanos a -1 fueron rechazados para eliminar resultados inaceptables (Bowen, 1936).

Para reemplazar los datos faltantes, se utilizaron datos del período anterior y posterior para la interpolación (Malek y McCurdy, 1990). Varios estudios aplicaron la técnica de relación de Bowen para estimar los flujos turbulentos en diferentes tipos de regiones (Malek y Bingham, , 1997), (Malek et al., 1999), (Beringer y Tapper, 2000) y (Silva et al., 2016).

La desventaja más importante del método de la relación Bowen es que, debido al aparente equilibrio energético cerrado, el residuo o desequilibrio se añade a la radiación neta o se distribuye según la relación Bowen al flujo de calor sensible y latente (Foken y Nappo, 2008).

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población para la presente investigación consiste en los registros meteorológicos dentro de la capa límite superficial durante un año completo.

3.2.2. Muestra

Los meses desde mayo a setiembre del 2018, durante la temporada seca, que es cuando ocurren la mayor cantidad de heladas y sobre todo las más intensas.

3.3. Técnicas para la obtención de datos

Los datos de las estaciones fueron almacenados en cada registrador de datos automáticos CR1000 y se descargaron en una laptop del trabajo.

3.4. Programas utilizados para el procesamiento y análisis estadístico de datos

Los programas que se utilizaron para el procesamiento de datos son los siguientes:

3.4.1. PC400 (Ver. 4.5)

Software utilizado para el almacenamiento y descarga de datos generados por la torre de gradiente meteorológica y la estación de radiación BSRN. PC400 es un software soporte para PC de nivel intermedio para dataloggers Campbell Scientific.

Este versátil software admite variedad de opciones en telecomunicaciones, descarga de datos manual y visualización de datos del datalogger. Incluye el software ShortCut y los editores de lenguajes de programación (CRBasic, Edlog). (Campbell Scientific, 2018)

Ventajas y características:

Incluye asistente EZSetup para configurar fácilmente una estación.

Es compatible con dataloggers CR200(X)-series, CR300-series, CR510, CR800/850, CR10(X), CR1000(X), con sistemas operativos tipo mixed-array, table-data, o PakBus®.

Realiza la descarga de datos por conexión directa, módems telefónicos, Ethernet, radio (UHF, VHF o spread spectrum), o módems multidrop.

Permite la visualización de datos en tiempo real o históricos.

Genera gráficos de series temporales de ilimitadas variables de la base de datos.

3.4.2. MATLAB (Ver. 2017a)

MATLAB es la abreviatura de "matrix laboratory" (laboratorio de matrices). Aunque otros lenguajes de programación generalmente procesan los números de uno en uno, MATLAB® funciona principalmente con matrices y arreglos completos. Los aspectos fundamentales del lenguaje incluyen operaciones básicas, como la creación de variables, la indexación de arreglos, operaciones aritméticas y tipos de datos. (The MathWorks, Inc., 2019)

3.5. Operacionalización de variables e indicadores

Tabla 13.

Matriz de operacionalización de variables.

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADOR	INSTRUMENTO
Variable Independiente Datos de los sensores meteorológicos	Elementos medibles que permiten conocer cuál es la condición que presenta la atmósfera en el momento	Según el funcionamiento de cada sensor pueden ser un detector de temperatura de resistencia de platino, un sensor capacitivo de humedad relativa, el eje de las cazoletas o una termopila	Temperatura	°C	Sensor de temperatura
			Humedad relativa	% HR	Sensor de humedad
			Velocidad del viento	m/s	Anemómetro de cazoletas
			Flujo de calor transferido al suelo	Wm ⁻²	Placa sensor de flujos de calor
			Componentes de irradiancia (onda corta)	Wm ⁻²	Piranómetro
			Componentes de irradiancia (onda larga)	Wm ⁻²	Pirgeómetro
Variable dependiente Flujos turbulentos de energía superficial estimados por métodos numéricos	Flujos de energía encargados de distribuir la energía en la atmósfera baja	Variación de temperatura y cambio de estado del agua	Calor sensible	Wm ⁻²	Método numérico de perfil aerodinámico modificado y método numérico de balance de energía de Bowen
			Calor latente	Wm ⁻²	Método numérico de perfil aerodinámico modificado y método numérico de balance de energía de Bowen

CAPÍTULO IV.

RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos del comportamiento de las variables atmosféricas y los flujos turbulentos estimados que sirvieron para explicar los eventos extremos de mínima temperatura ocurridos entre el 15 de mayo y el 30 de setiembre del 2018. Se subdivide en cuatro apartados. En el primer apartado se describió el ciclo diurno de los promedios horarios para cada mes de las variables meteorológicas de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento obtenidas de la torre de gradiente meteorológica y los promedios horarios de radiación (onda corta y onda larga) obtenidos por la estación BSRN. En el segundo apartado se analizó el ciclo diurno de los promedios horarios para cada mes de los flujos de energía (calor latente y calor sensible) calculados por ambos métodos. En el tercer apartado se identificó los eventos extremos de mínima temperatura de cada grupo de datos, también se describieron los registros de las variables meteorológicas, radiativas y los flujos de energía dos días antes y dos días después de los eventos más intensos de heladas. Finalmente, en el cuarto apartado se realizó una comparación entre los flujos turbulentos de energía superficial (calor latente y calor sensible) estimados por ambos métodos numéricos.

4.1. Ciclo diurno de los promedios horarios de las variables meteorológicas

4.1.1. Temperatura

El ciclo diurno de los promedios horarios de temperatura (*Figura 19*) mostró que los promedios mínimos a 2 metros de altura se alcanzaron a las 06:00 HL en mayo (1,83 °C), agosto (3,73 °C) y setiembre (3,85 °C) mientras que en junio (2,17 °C) y julio (1,82 °C) fue alrededor de las 07:00 HL.

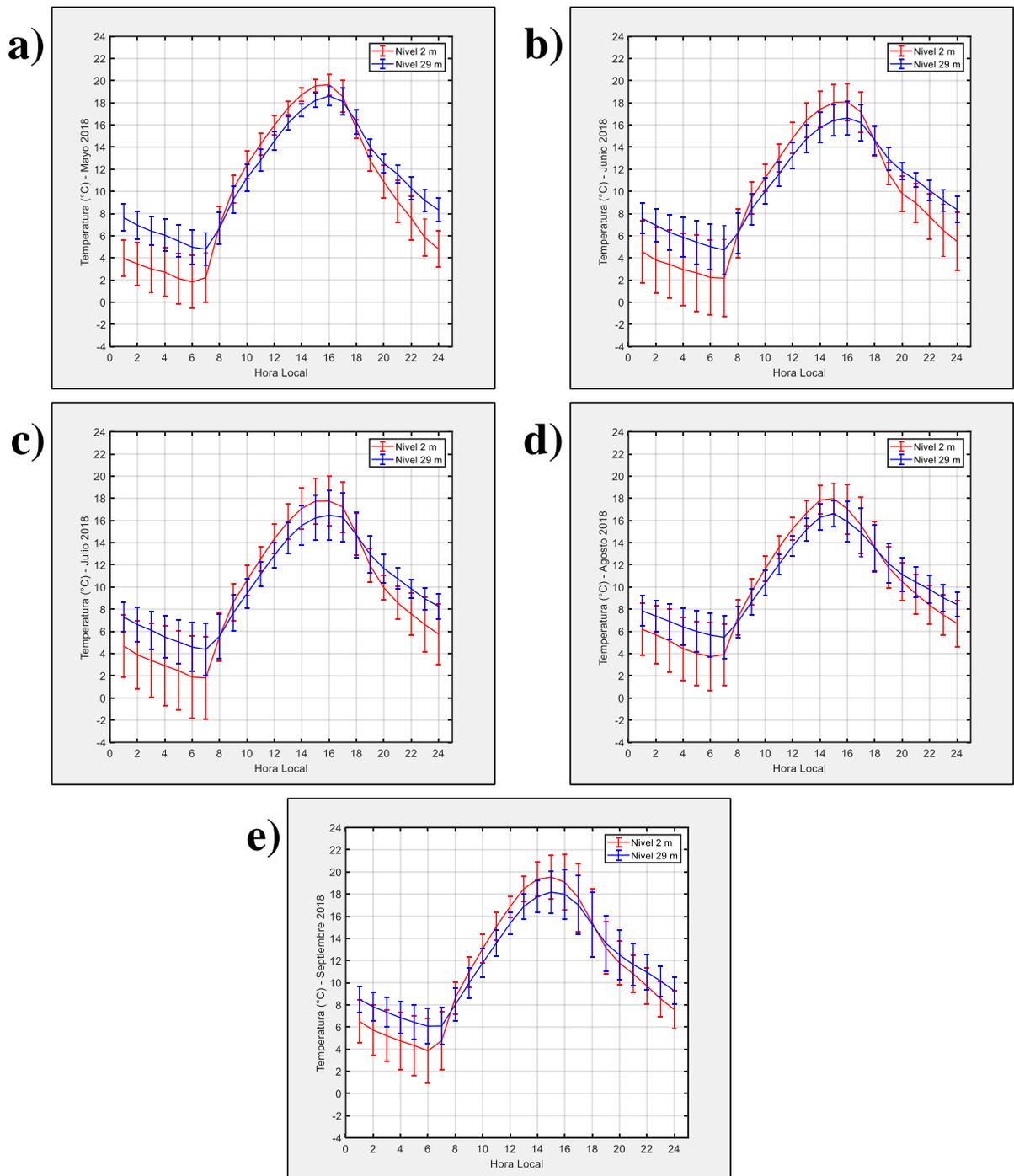


Figura 19. Ciclo diario de la temperatura del aire (°C) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.

Los promedios máximos de temperatura se alcanzaron a las 16:00 HL en mayo (19,63 °C), junio (18,07 °C) y julio (17,75 °C) mientras que en agosto (17,97 °C) y setiembre (19,53 °C) se alcanzaron a las 15:00 HL en el nivel más bajo de la torre a 2 metros de altura.

Durante las horas de la noche la mayor diferencia entre niveles fue en el mes de mayo de alrededor de 2,3 °C presentando el nivel más bajo (2 m.) también los

menores registros de temperatura. Para todos los meses alrededor de las 08:00 y 18:00 HL los promedios horarios de temperatura mostraron que el nivel más bajo (2 m) y el nivel más alto (29 m) registraron valores similares, lo cual representa la neutralidad atmosférica en la transición hacia condiciones de turbulencia y estabilidad respectivamente.

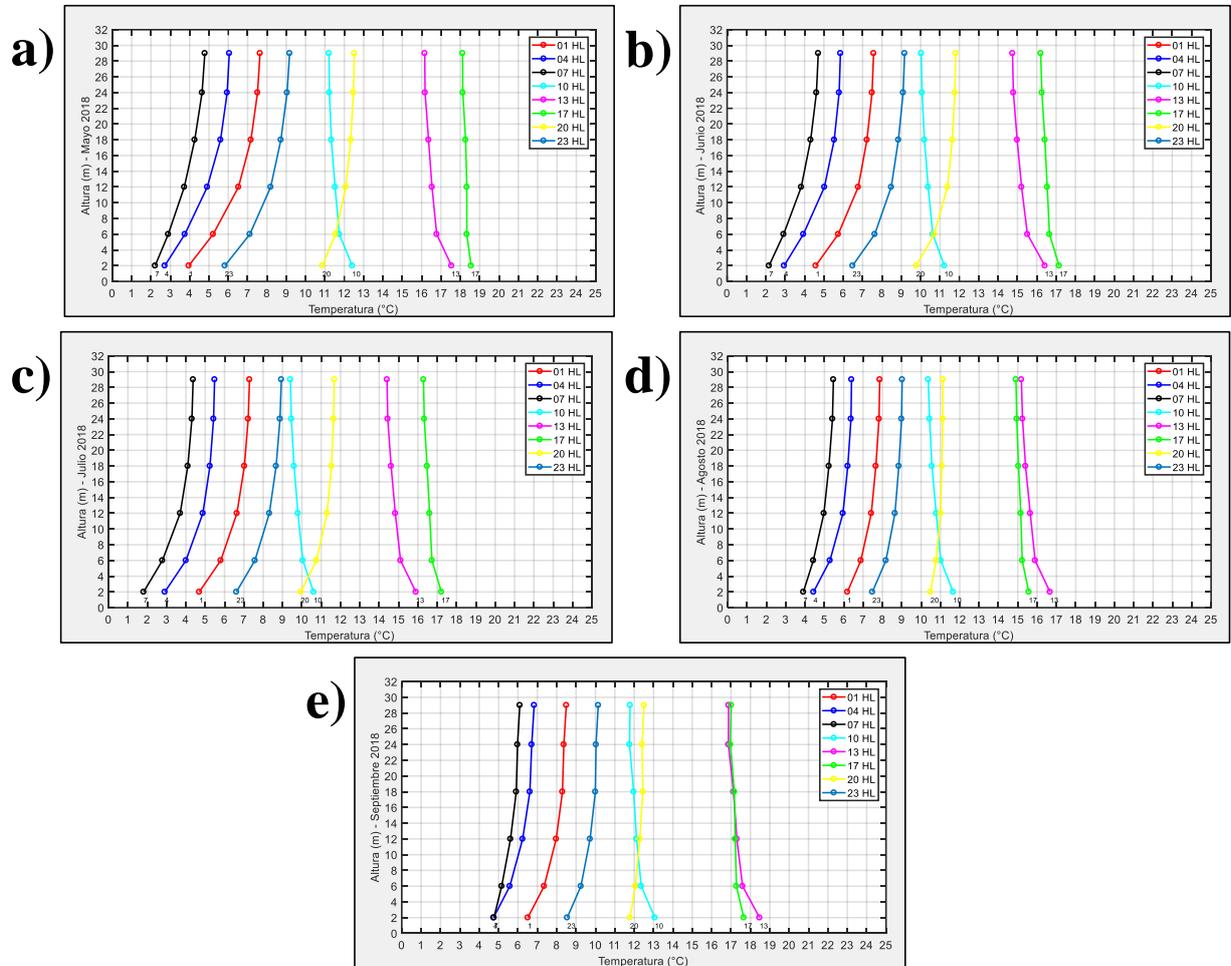


Figura 20. Perfil vertical de los valores de temperatura del aire (°C) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.

Los perfiles verticales de temperatura mostraron que durante las horas del día la pendiente negativa no fue tan fuerte debido a que, si bien la superficie se calienta no es tan diferente de las partes más altas. En cambio, durante la noche la pendiente positiva es más fuerte debido a que la superficie se enfría más rápido y las partes altas mantienen mayores valores de temperatura.

4.1.2. Humedad relativa

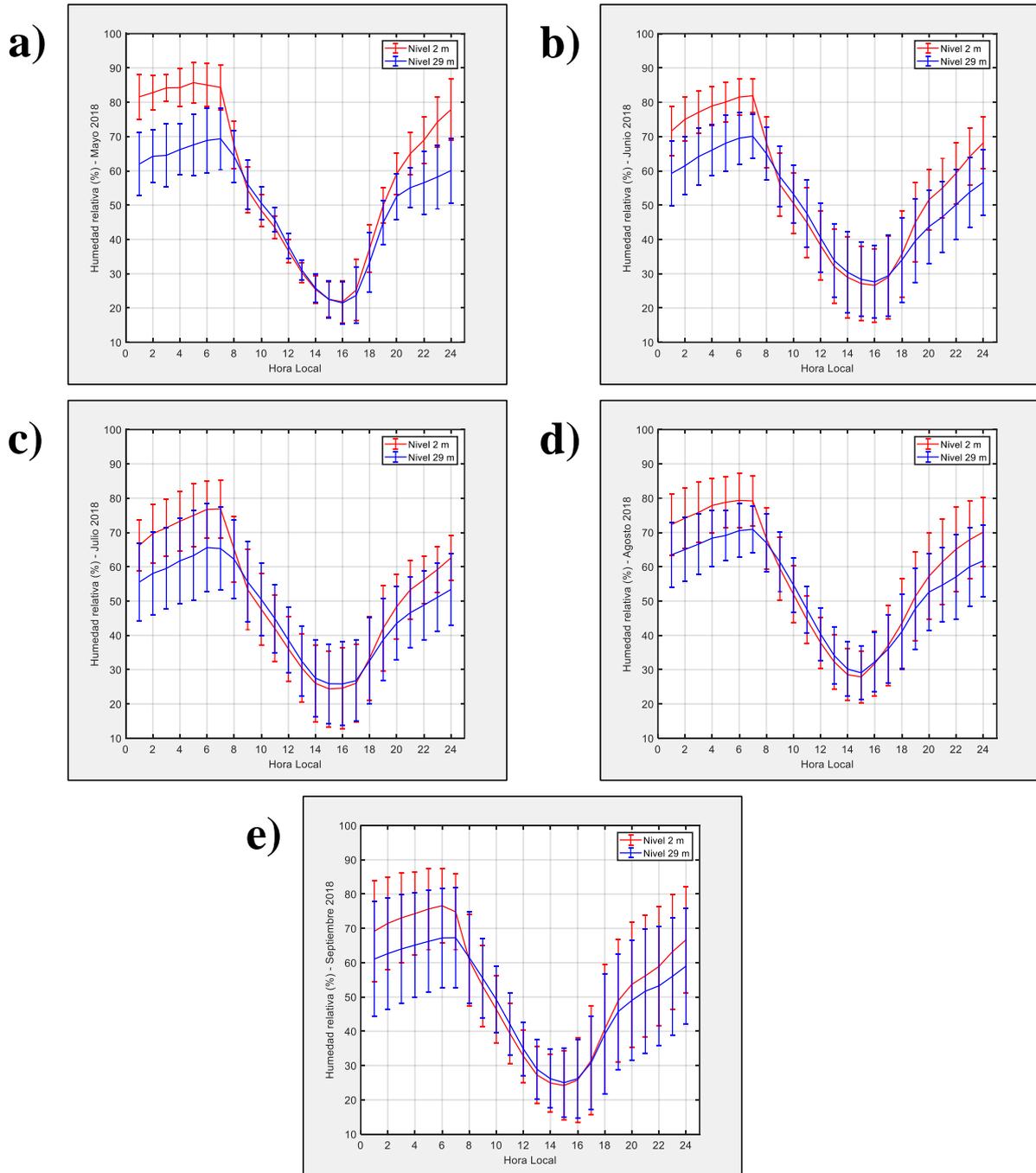


Figura 21. Ciclo diario de humedad relativa (%) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) septiembre del 2018.

El ciclo diario de los promedios horarios de humedad relativa (Figura 21) mostró una disminución continua desde las primeras horas de la mañana hasta alcanzar los valores mínimos por la tarde a las 16:00 HL en los meses de mayo (21,82%) y junio (26,61%), mientras que durante los meses de julio (24,40%), agosto (27,89%) y septiembre (24,20%) se reportaron los valores mínimos a las 15:00 HL, en el nivel de 2 metros de altura.

Durante la noche, los promedios horarios a 2 metros de altura mostraron un aumento continuo hasta alcanzar los valores máximos a las 05:00 HL en el mes de mayo (85,71%), a las 07:00 HL en los meses de junio (81,89%) y julio (76,88%), y a las 06:00 HL en los meses de agosto (79,35%) y setiembre (76,60%).

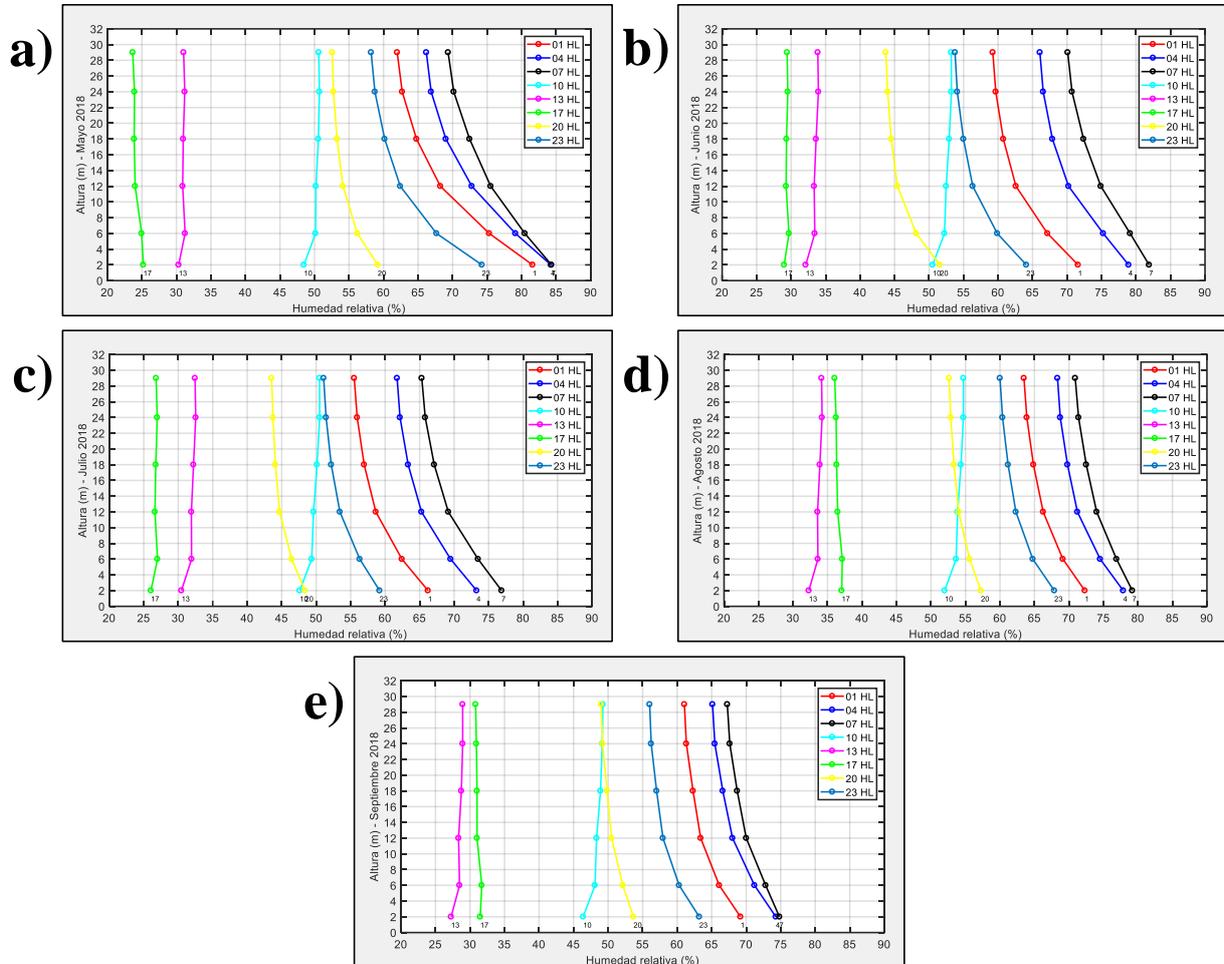


Figura 22. Perfil vertical de los valores de humedad relativa (%) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.

La variable de humedad relativa presentó una variación inversa con respecto a la temperatura, ya que durante la noche los niveles inferiores presentaron valores más altos con respecto a los niveles superiores. Durante el horario diurno entre las 09:00 y 17:00 HL aproximadamente, los valores de humedad relativa en los niveles superiores e inferiores descendieron por la incidencia de la radiación solar siendo siempre los niveles inferiores los que registraron los menores valores, por estar más cerca de la superficie que recibe la radiación solar y libera la humedad superficial hacia las partes más altas. Los perfiles verticales de humedad relativa (Figura 22) mostraron que durante las horas de la noche la pendiente negativa fue muy fuerte debido a que la humedad se almacenó en las partes bajas de la

atmósfera por la ausencia de actividad convectiva y durante el día la pendiente positiva no fue muy fuerte ya que la humedad ambiental se desplazó de manera más homogénea.

4.1.3. Velocidad y dirección del viento

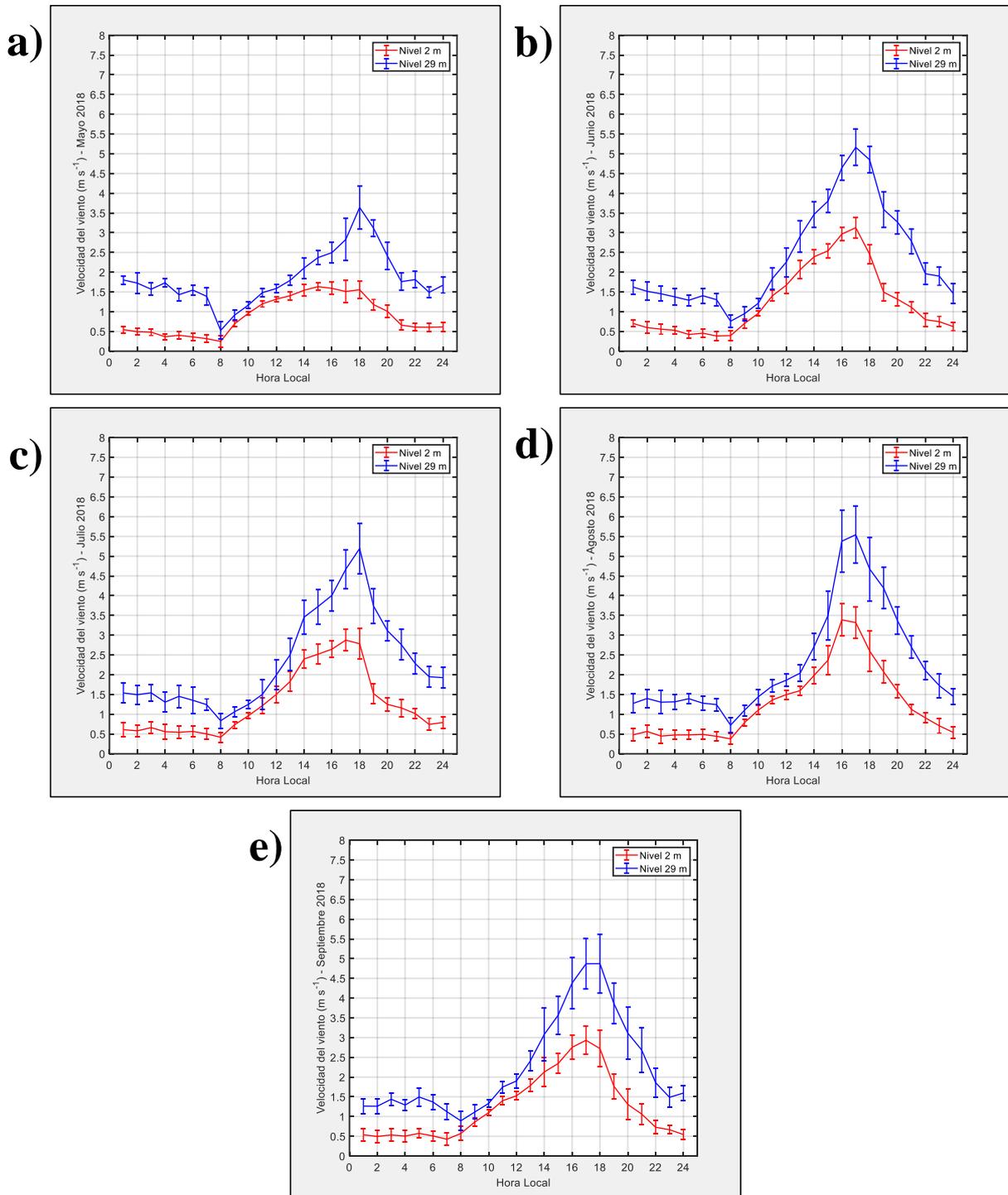


Figura 23. Ciclo diario de la velocidad del viento (m s^{-1}) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.

El ciclo diario de los promedios horarios de velocidad del viento (*Figura 23*) mostró que los valores mínimos a 2 metros de altura se alcanzó a las 08:00 HL en los meses de mayo (0,25 m/s), julio (0,42 m/s) y agosto (0,38 m/s), mientras que en los meses de junio (0,38 m/s) y setiembre (0,43 m/s) sucedió a las 07:00 HL.

Los promedios horarios de la velocidad del viento fueron mínimos para todos los meses cerca de las 08:00 HL. Registros similares a esa hora entre los niveles a 2 m y 29 metros de altura puede representar que la atmósfera se encontraba en condición de estabilidad, con excepción del mes de setiembre cuando los valores mínimos se registraron a las 07:00 HL.

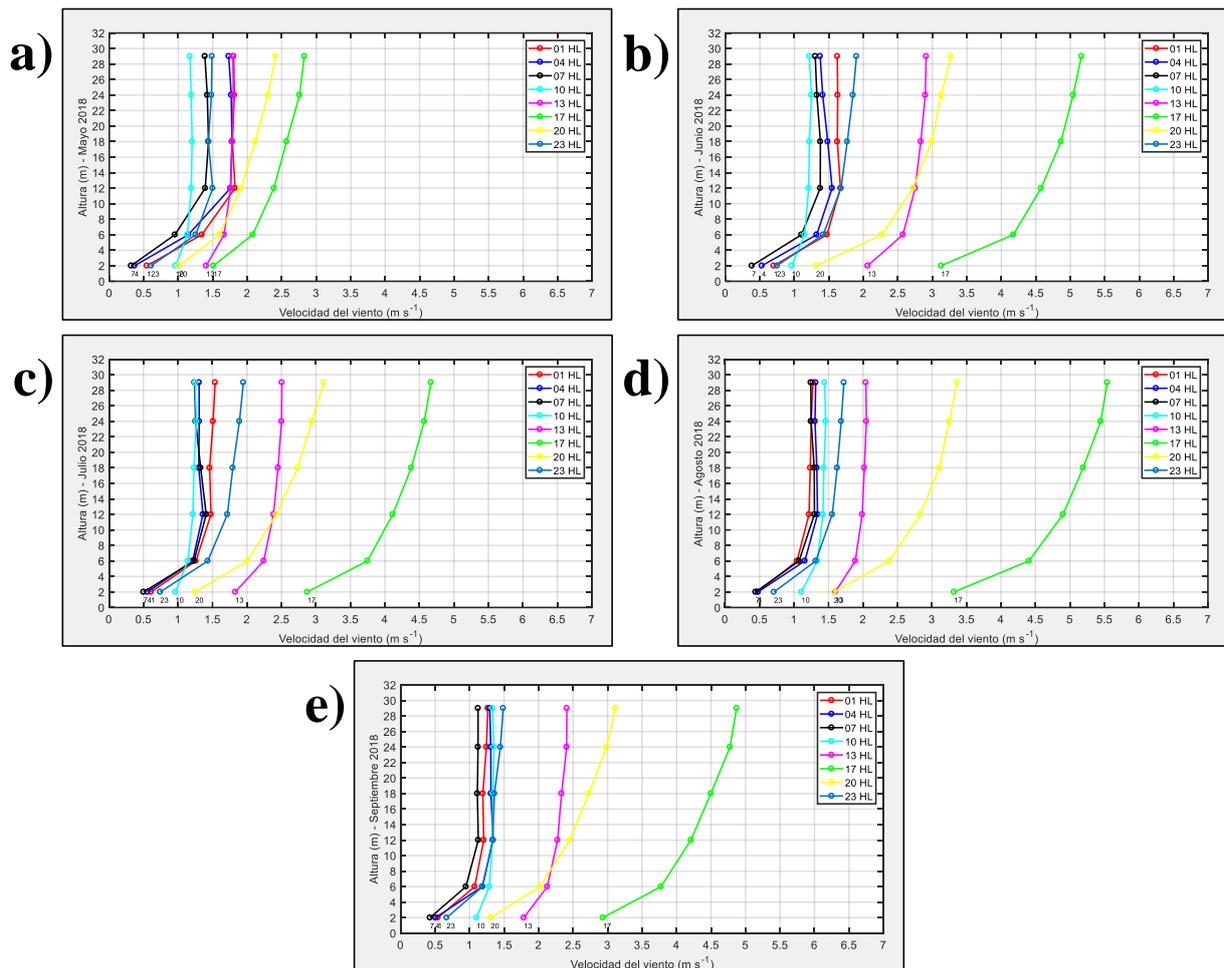


Figura 24. Perfil vertical de la velocidad del viento (ms^{-1}) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.

Los valores máximos de velocidad del viento se alcanzaron en el nivel más alto (29 metros) a las 18:00 HL en los meses de mayo (3,64 m/s) y julio (5,19 m/s), a las 17 :00 HL en los meses de junio (5,16 m/s) y agosto (5,54 m/s), mientras que setiembre (4,87 m/s) los valores máximos se reportaron en los promedios horarios de las 17:00 y 18:00 HL.

Los perfiles verticales de velocidad del viento mostraron que los valores del nivel superior (29 m) siempre son mayores a los del nivel inferior (2 m) debido a que responden a la curva de decaimiento casi logarítmica del viento (*Figura 2*) por la variación de velocidad horizontal natural con respecto a la altura.

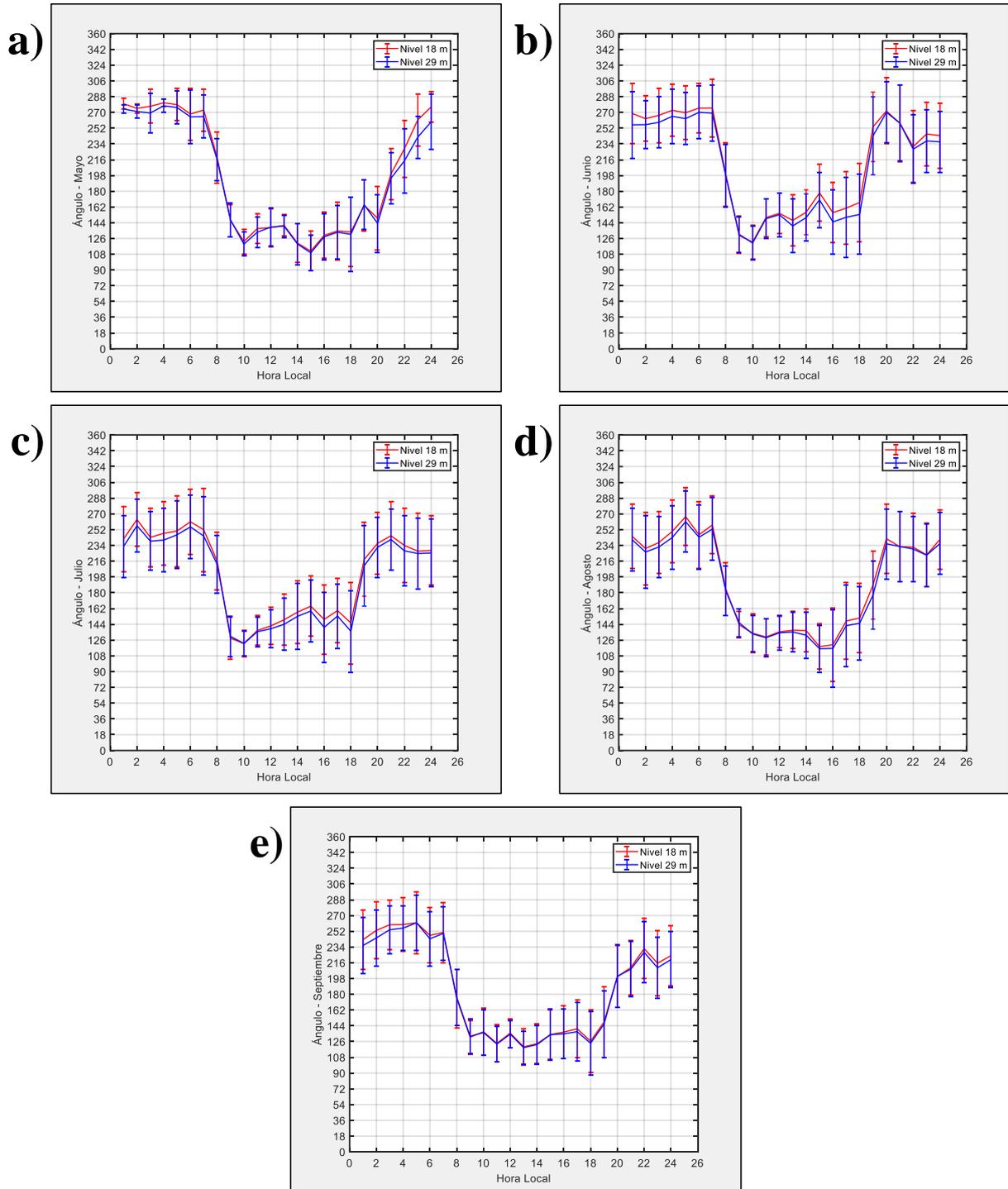


Figura 25. Ciclo diario de la dirección del viento (0° - 360°) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.

El ciclo diario de los valores de dirección del viento (*Figura 25*) para todos los meses durante las horas de la noche (20:00 – 07:00 HL) mostró una variación entre los 220° y 270°, los mismos que serían vientos provenientes del suroeste y oeste respectivamente, mientras que durante las horas del día (08:00 – 19:00 HL) la dirección del viento varía entre los 100° y 150°, representando vientos provenientes este y sureste respectivamente.

Este cambio de dirección del viento a lo largo del día se asoció los efectos de la circulación valle-montaña, debido a que los vientos durante el día se mueven de manera ascendente desde el valle hacia las laderas, y durante la noche desde las partes altas de las laderas hacia el valle.

Y según la ubicación del Observatorio de Huancayo dentro del valle, se puede ver los efectos de la circulación valle-montaña, al ubicarse al lado oeste de la cordillera de los Andes y presentar las condiciones orográficas para la ocurrencia de esta circulación.

4.1.4. Calor transferido al suelo

El ciclo diario de los promedios horarios de calor transferido al suelo (*Figura 26*) muestra que los valores máximos se registraron a las 14:00 HL durante todos los meses de estudio siendo en mayo de 57,12 Wm⁻², 49,50 Wm⁻² en junio, 48,2 Wm⁻² en julio, 68,75 Wm⁻² en agosto y 83,49 Wm⁻² en el mes de setiembre lo cual evidencia un desfase horario de hasta 2 horas con respecto a los valores máximos de radiación solar (*Figura 27*).

Si los valores positivos de calor transferido en la superficie representan ganancia de energía en la superficie por la incidencia de radiación solar, se entiende que los valores son negativos cuando la superficie pierde energía cediendo a la atmósfera superficial inmediata, proceso que ocurre durante las horas de la noche y se puede ver claramente reflejado en los promedios horarios del ciclo diario de la *Figura 26*.

El ciclo diario de los promedios horarios de calor transferido en la superficie describe una disminución progresiva desde las 15:00 HL y durante las horas de la noche hasta las primeras horas del amanecer cuando a las 07:00 HL se reportaron los valores más negativos de los meses de estudio como son mayo (-31,58 Wm⁻²), junio (-20,65 Wm⁻²), julio (-20,9 Wm⁻²) y en agosto (-31,58 Wm⁻²) mientras que en el mes de setiembre (-38,73 Wm⁻²) se reportó a las 06:00 HL.

El ciclo diario de calor transferido hacia y desde la superficie responde a características locales como el tipo de suelo, cobertura vegetal y albedo; pero también a la cantidad de energía radiante que incide sobre el área de muestreo.

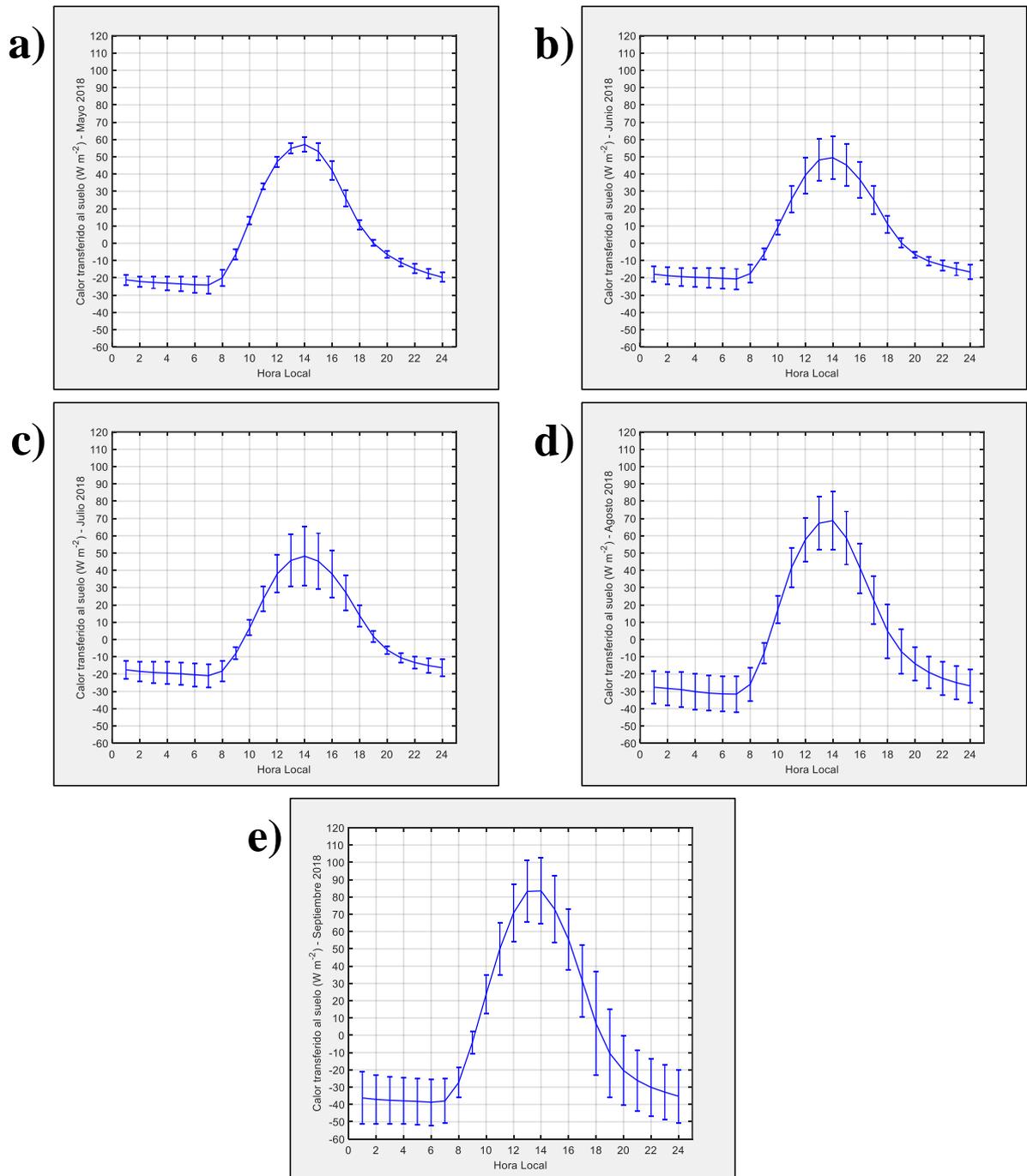


Figura 26. Ciclo diario del flujo de calor transferido al suelo (Wm^{-2}) para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.

Debido a esto, los valores más elevados de calor transferido al suelo que se reportaron en el mes de setiembre (Figura 26e), respondiendo también a los valores de radiación directa de onda corta incidente en la superficie y reflejada por

la misma en el mes de setiembre (*Figura 27e*), pues mostró mayores valores en comparación con los demás meses del período de estudio.

Otra característica a resaltar sobre las imágenes de la *Figura 26* es que el mes de julio presentó los menores valores de calor transferido en la superficie durante las horas del día, lo que representó una menor disposición de energía durante la noche, esto debe ser un factor importante que permite que la temperatura disminuya tanto durante ese mes.

4.1.5. Valores de radiación de la estación BSRN

El ciclo diurno de los valores de radiación global de onda corta (SW) de la *Figura 27* muestra que los valores máximos de los promedios horarios se alcanzaron al mediodía para todos los meses de estudio; mayo ($906,2 \text{ Wm}^{-2}$), junio ($822,2 \text{ Wm}^{-2}$), julio ($757,6 \text{ Wm}^{-2}$), agosto ($922,9 \text{ Wm}^{-2}$) y en el mes de setiembre (1034 Wm^{-2}).

Los valores mínimos o nulos de radiación de onda corta (SW) se produjeron, como es natural, durante las horas de la noche entre las 18:00 y 07:00 HL, debido a la ausencia de radiación solar que en su mayor proporción representa a la radiación de onda corta.

En la Tabla 14 y Tabla 15 se exponen los valores de los promedios horarios de las primeras horas de la mañana del ciclo diurno presentados en las figuras anteriores. Los eventos de heladas ocurren durante las primeras horas de la mañana tal como se puede apreciar en la columna 2 de la Tabla 14, donde los mínimos valores de promedio horario de temperatura 2 metros de altura se reportan hasta las 06:00 HL en los meses de mayo, agosto y setiembre; mientras que en junio y julio se registró hasta las 07:00 HL.

Los valores de velocidad del viento se reportaron mínimos hasta las 07:00 HL para todos los meses, lo cual indica menor advección durante ese período. Los valores de calor transferido en la superficie fueron mucho más negativos hasta las 07:00 HL desde mayo a agosto y sólo en setiembre se reportó menor hasta las 06:00 HL.

Los valores de radiación de onda corta en la Tabla 15 (columna 2 a 6) se reportaron nulos hasta durante la madrugada y los primeros registros inician recién a las 07:00 HL debido a la ubicación del punto de muestreo dentro de un

valle, lo que representa que el amanecer tarda un poco más en ocurrir considerando que no es un valle muy profundo y estrecho.

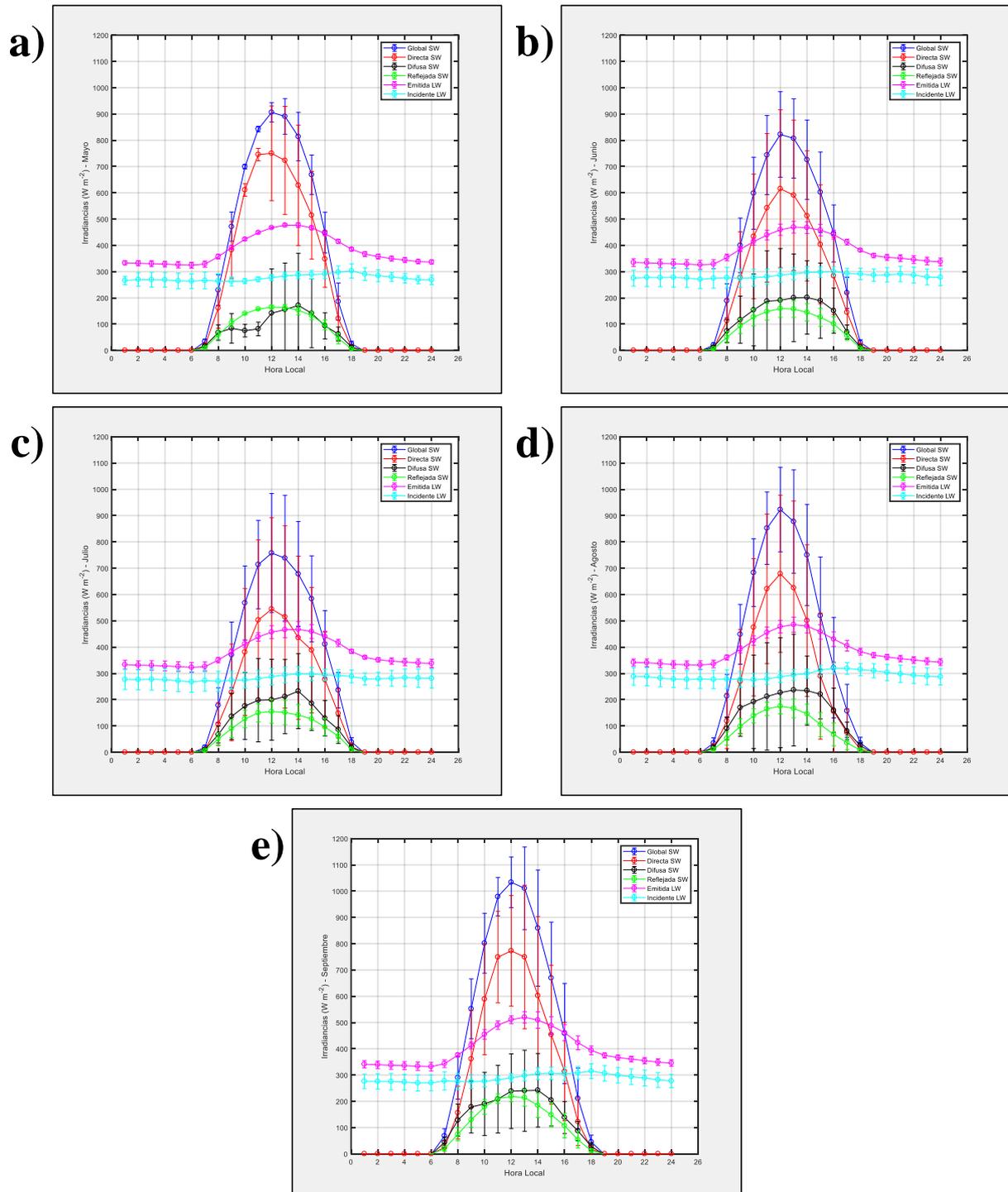


Figura 27. Ciclo diario de los valores de radiación, estación BSRN para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.

Tabla 14.

Valores promedio horario mensual de las variables meteorológicas a las 05, 06 y 07 HL desde mayo a setiembre del 2018.

Meses y horas	Temperatura del aire (C)		Humedad relativa (%)		Relación de mezcla de agua (g kg ⁻¹)		Velocidad del viento (ms ⁻¹)		Dirección del viento (grados)	Flujo de calor transferido al suelo (Wm ⁻²)
	(2 m)	(29 m)	(2 m)	(29 m)	(2 m)	(29 m)	(2 m)	(29 m)	(29 m)	(-8 cm superficie)
Mayo										
05 HL	2,13	5,51	85,71	67,57	4,98	4,19	0,40	1,43	275,62	-23,50
06 HL	1,82	4,97	85,02	68,86	4,85	4,19	0,36	1,55	264,91	-24,00
07 HL	2,21	4,79	84,32	69,35	4,92	4,24	0,32	1,39	265,26	-24,18
Junio										
05 HL	2,64	5,41	80,05	68,05	4,87	4,42	0,42	1,29	262,95	-19,93
06 HL	2,23	5,01	81,51	69,51	4,83	4,41	0,46	1,40	270,13	-20,28
07 HL	2,17	4,71	81,89	70,10	4,84	4,36	0,38	1,30	269,19	-20,66
Julio										
05 HL	2,46	5,05	74,96	63,24	4,55	4,17	0,54	1,45	246,12	-19,84
06 HL	1,88	4,59	76,72	65,58	4,48	4,14	0,57	1,35	255,15	-20,41
07 HL	1,81	4,37	76,88	65,31	4,47	4,07	0,50	1,24	244,62	-20,90
Agosto										
05 HL	4,02	5,99	78,80	69,12	5,20	4,83	0,48	1,39	261,05	-30,99
06 HL	3,73	5,66	79,35	70,54	5,13	4,82	0,49	1,28	243,36	-31,45
07 HL	3,91	5,46	79,18	70,91	5,18	4,81	0,44	1,24	252,62	-31,58
Setiembre										
05 HL	4,32	6,43	75,64	66,21	5,21	4,81	0,58	1,50	261,71	-38,24
06 HL	3,85	6,08	76,60	67,22	5,13	4,76	0,51	1,37	243,39	-38,73
07 HL	4,76	6,10	74,81	67,27	5,30	4,90	0,43	1,12	249,56	-38,02

Tabla 15.

Valores promedio horarios mensual de las variables radiativas a las 05, 06 y 07 HL desde mayo a setiembre del 2018.

Meses y horas	Global SW (Wm ⁻²)	Directa SW (Wm ⁻²)	Difusa SW (Wm ⁻²)	Reflejada SW (Wm ⁻²)	Neta SW (Wm ⁻²)	Emitida LW (Wm ⁻²)	Incidente LW (Wm ⁻²)	Neta LW (Wm ⁻²)
Mayo								
05 HL	0	0	0	0	0	-326,11	264,77	-61,34
06 HL	0	0	0	0	0	-324,69	263,69	-61,00
07 HL	33,64	17,61	16,86	-10,21	23,43	-328,73	266,29	-62,44
Junio								
05 HL	0	0	0	0	0	-328,56	275,72	-52,84
06 HL	0	0	0	0	0	-325,91	270,52	-55,39
07 HL	20,23	8,34	12,30	-6,19	14,04	-328,41	274,66	-53,75
Julio								
05 HL	0	0	0	0	0	-325,99	271,75	-54,24
06 HL	0	0	0	0	0	-322,77	267,68	-55,09
07 HL	18,77	8,40	10,75	-6,56	12,21	-325,77	272,66	-53,11
Agosto								
05 HL	0	0	0	0	0	-332,60	276,62	-55,98
06 HL	0	0	0	0	0	-331,90	278,51	-53,39
07 HL	35,18	16,37	19,09	-10,89	24,29	-335,64	276,78	-58,86
Setiembre								
05 HL	0	0	0	0	0	-333,25	269,76	-63,49
06 HL	0	0	0	0	0	-331,94	270,22	-61,72
07 HL	68,36	24,04	43,45	-19,57	48,79	-343,24	277,75	-65,49

4.2. Ciclo diurno de los promedios horarios de los flujos turbulentos estimados

A continuación, se presentan los ciclos diurnos de los promedios horarios de los flujos de energía turbulentos estimados por el método de perfil aerodinámico modificado con sus coeficientes de estabilidad y el método de relación del balance de energía de Bowen.

4.2.1. Método de perfil aerodinámico modificado

La hora de incidencia de valores promedios máximos de los flujos de calor latente y calor sensible durante el ciclo diurno mostraron un comportamiento similar entre ambos, al observar que para los meses de mayo ($225,6 \text{ Wm}^{-2}$), junio ($303,7 \text{ Wm}^{-2}$) y julio ($259,6 \text{ Wm}^{-2}$) el flujo de calor sensible máximo se reportó a las 14:00 HL mientras que en el mes de agosto ($264,9 \text{ Wm}^{-2}$) y en setiembre ($283,6 \text{ Wm}^{-2}$) se reportó a las 13:00 HL y los flujos de calor latente también reportaron los valores máximos a las 14:00 HL en el mes de mayo ($104,9 \text{ Wm}^{-2}$), junio ($72,92 \text{ Wm}^{-2}$) y julio ($30,7 \text{ Wm}^{-2}$) mientras que en el mes de agosto se mantuvo alrededor de $51,0 \text{ Wm}^{-2}$ desde las 11:00 HL hasta las 16:00 HL, un valor bastante inferior que representa estabilidad, por los bajos niveles de humedad alcanzados.

Los valores de flujo de momento representados en la *Figura 29* caracterizan el comportamiento del esfuerzo que ejerce el paso de la masa del viento sobre la superficie a diferentes horas del día y tal como se muestra cerca de las 16:00 HL se registraron los mayores promedios horarios ($0,2 \text{ Wm}^{-2}$) para todos los meses, con excepción del mes de mayo que se registró a las 14:00 HL y fue un valor cercano a $0,17 \text{ Wm}^{-2}$, lo cual puede permitirnos deducir que los registros de velocidad horizontal de viento fueron menores durante ese mes en comparación con los demás, tal como se muestra en la *Figura 23a*.

Los valores positivos del número de Richardson (Ri) ($0,05 - 0,13 \text{ Wm}^{-2}$ aprox.) registrados durante las horas de la noche (19:00 y 06:00 HL) representan la estabilidad que se describe comúnmente durante las noches del valle del Mantaro, pero en los meses de julio y agosto se encuentran más cercanos a cero lo cual representa neutralidad en la atmósfera superficial hasta el nivel más alto de medición.

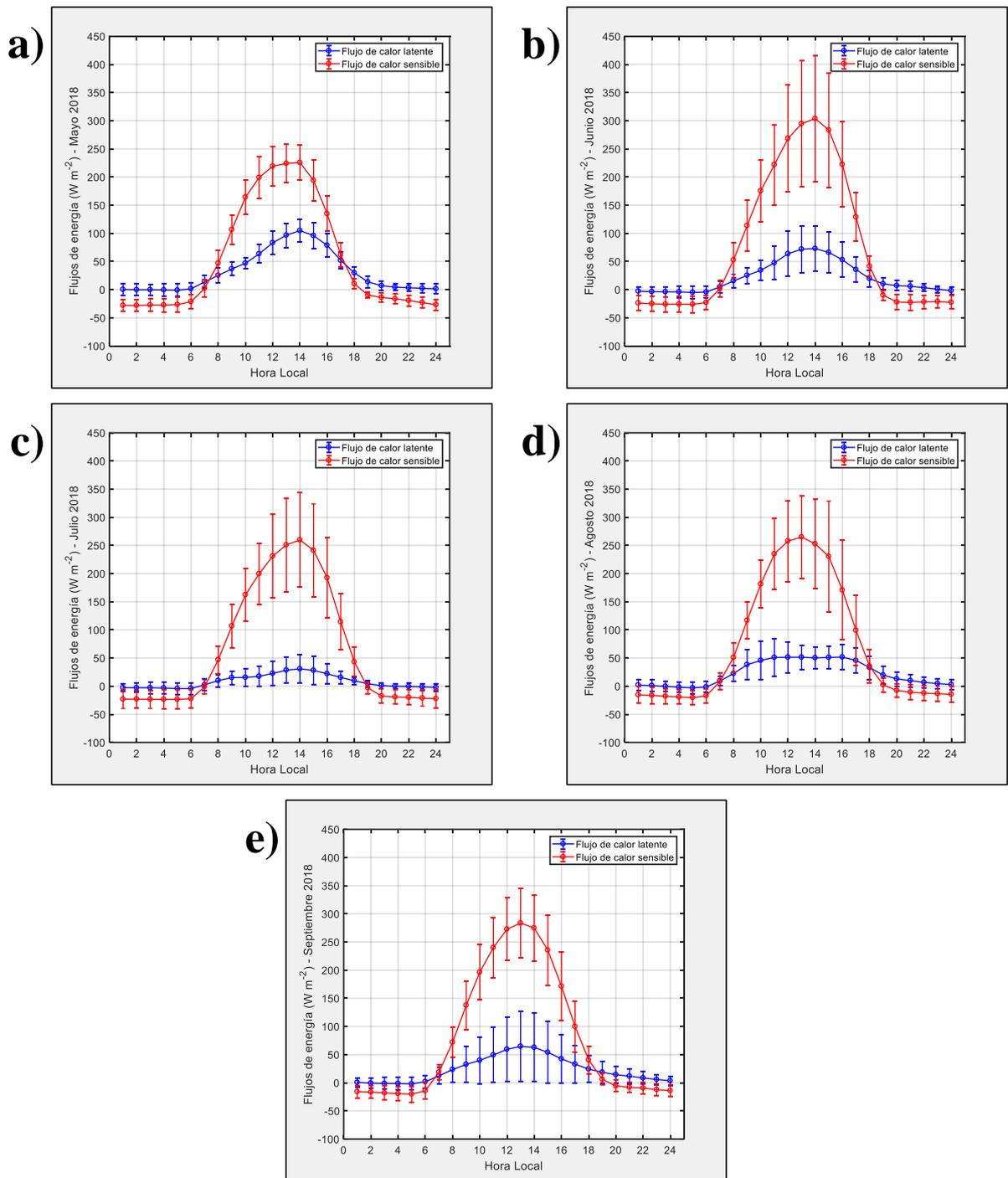


Figura 28. Ciclo diario de los flujos turbulentos de energía superficial estimados mediante el método de perfil aerodinámico modificado para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.

Durante las horas del día se registraron promedios horarios del número de Richardson (Ri) negativos, siendo a las 11:00 HL donde se reportaron los más negativos asumiendo mayor inestabilidad de la atmósfera para los meses de mayo (-1,86), julio (-1,75), agosto (-1,77) y setiembre (-1,84) mientras que en el mes de junio (-1,75) se reportó a las 10:00 HL.

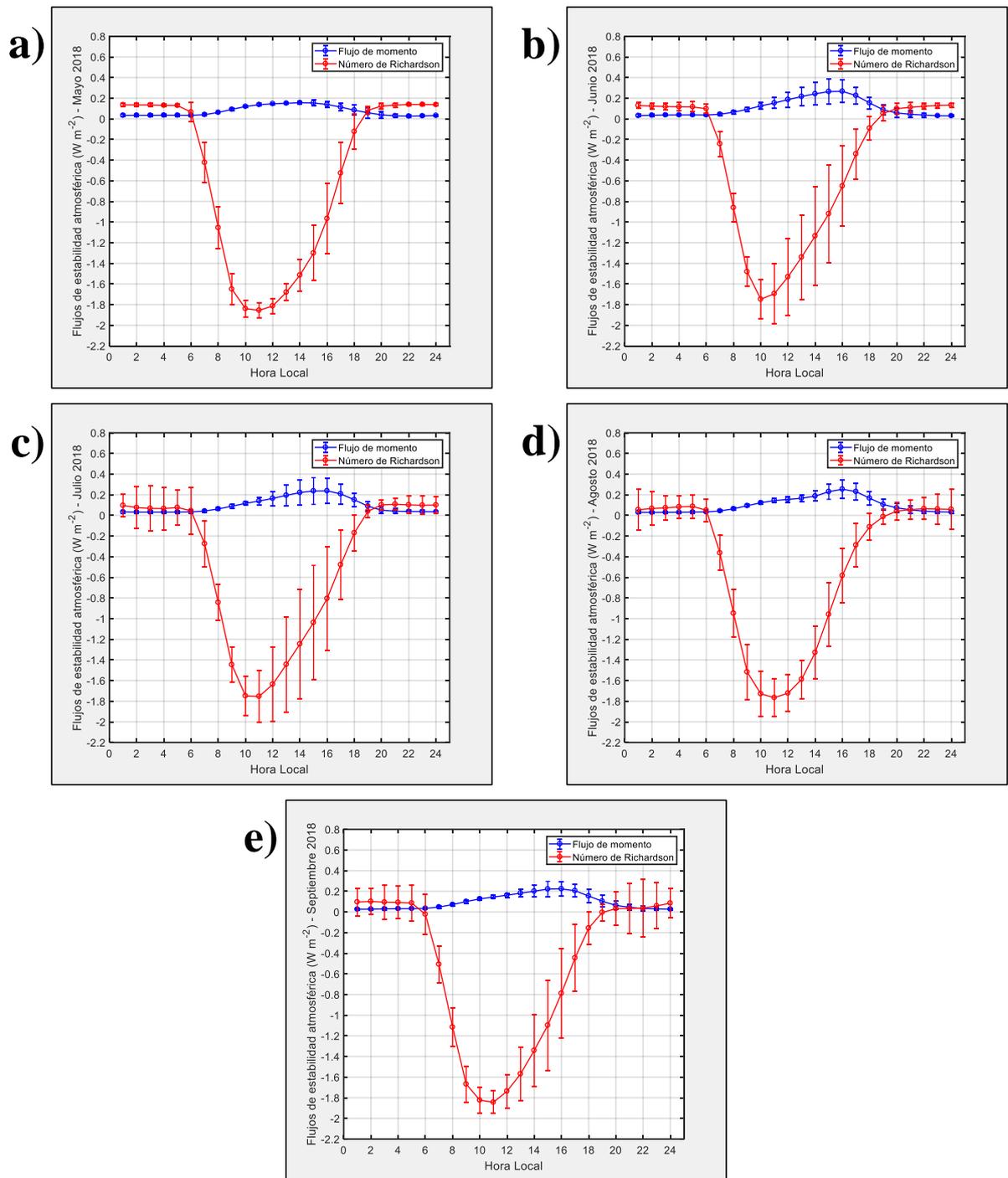


Figura 29. Ciclo diario de los valores de estabilidad atmosférica para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.

4.2.2. Método de relación del balance de energía de Bowen

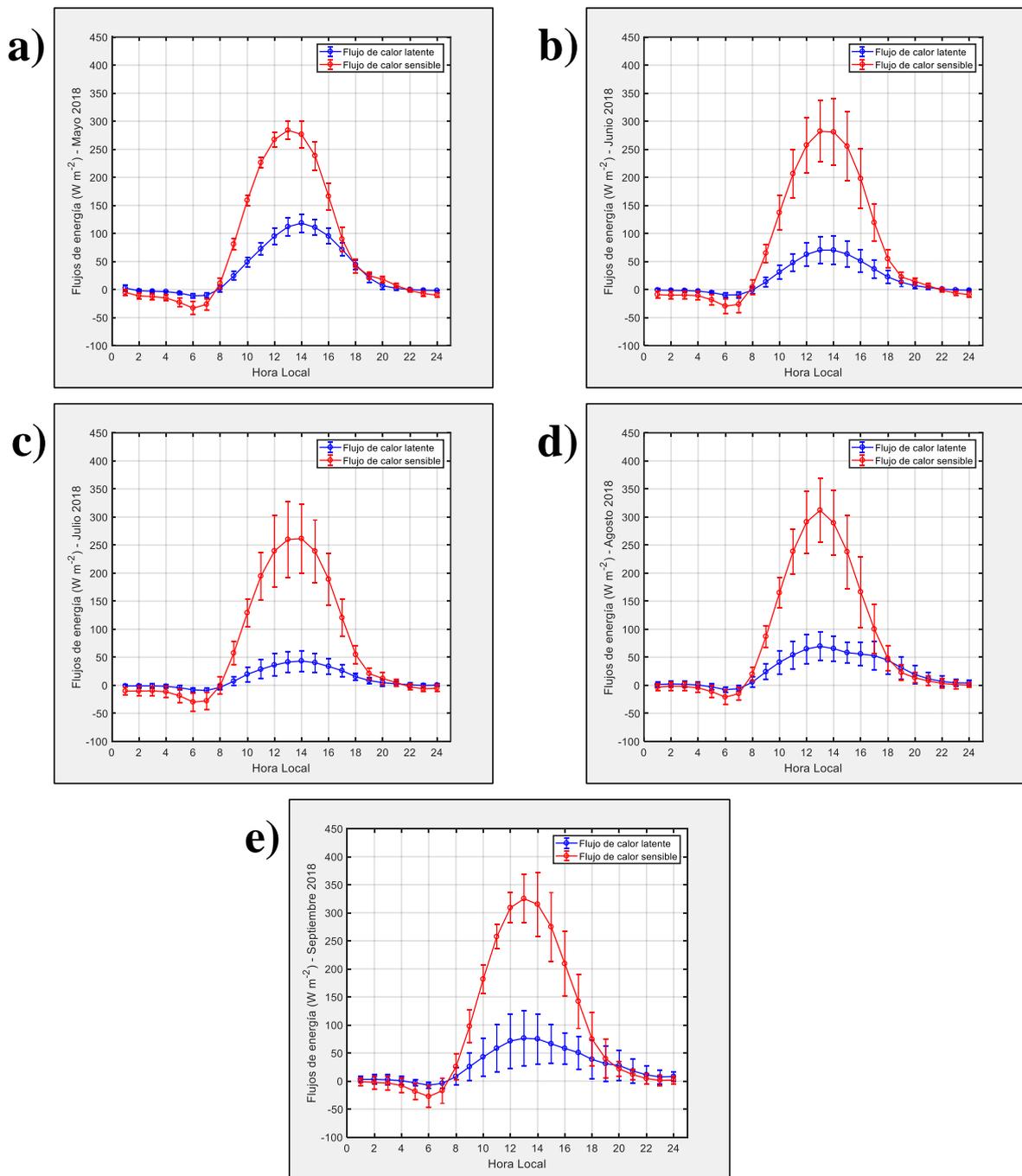


Figura 30. Ciclo diario de los flujos turbulentos de energía superficial estimados mediante el método de balance de energía de Bowen para los meses de: (a) mayo, (b) junio, (c) julio, (d) agosto y (e) setiembre del 2018.

Los promedios horarios del ciclo diario de los flujos turbulentos obtenidos por este método no presentaron variaciones representativas con respecto al método de perfil aerodinámico modificado, pero este método tiende a sobrestimar los valores de flujos turbulentos pues considera un balance de energía cerrado, se presentan los datos procesados en la *Figura 30*.

4.3. Eventos más intensos de heladas identificados

El período de estudio de los eventos extremos de heladas en la temporada seca empezó el 15 de mayo del 2018 y finalizó el 30 de setiembre del mismo año. Se procesaron los datos descargados semanalmente y se organizaron en 22 grupos, de dichos grupos de datos se seleccionaron los 6 eventos más intensos de mínima temperatura resaltados en la Tabla 16.

Tabla 16.

Resumen de eventos extremos de mínima de temperatura registrados desde el 15 de mayo al 30 de setiembre del 2018.

MES	GRUPO	SEMANA	DÍA	HORA (HL)	HR N1	HR N4	HR N6	VEL VIENTO N1	VEL VIENTO N4	VEL VIENTO N6	DIR VIENTO N4	DIR VIENTO N6	T _{min} (2 m)
MAYO	1	0515-0521	2018/05/19	06:06:00	92,39	75,86	72,01	1,063	1,412	1,863	297,9	283,3	-0,205
	2	0521-0528	2018/05/25	06:17:00	89,40	71,75	68,86	0,362	1,688	1,350	285,3	283,3	-1,705
	3	0528-0531	2018/05/30	06:11:00	77,32	56,33	54,06	0,000	2,325	2,037	277,3	277,5	-2,227
JUNIO	4	0601-0604	2018/06/01	06:10:00	78,19	64,07	61,52	0,083	1,213	1,550	268,0	274,7	-0,886
	5	0604-0611	2018/06/07	06:27:00	89,59	76,49	73,58	0,621	2,200	2,037	289,5	284,0	-1,781
	6	0611-0618	2018/06/18	07:02:00	79,54	69,41	66,61	0,775	1,225	1,137	288,6	312,1	1,653
	7	0618-0625	2018/06/21	06:03:00	82,05	66,81	65,44	0,950	1,512	1,313	285,1	278,7	-2,995
	8	0625-0630	2018/06/29	06:38:00	84,28	75,16	74,30	0,579	1,325	1,012	299,0	290,9	-2,192
JULIO	9	0701-0702	2018/07/02	06:39:00	82,25	67,31	64,70	1,038	1,375	1,400	271,0	263,0	-2,316
	10	0702-0709	2018/07/08	06:36:00	64,85	40,60	39,03	0,813	1,137	1,650	261,9	258,1	-5,144
	11	0709-0716	2018/07/16	05:40:00	83,89	73,67	69,97	0,662	2,300	2,175	290,3	311,8	-1,516
	12	0716-0723	2018/07/17	06:40:00	78,09	65,24	62,80	1,363	1,800	1,725	305,4	317,0	-3,814
13	0723-0731	2018/07/27	06:18:00	82,05	59,42	55,89	1,113	1,863	1,463	283,1	272,4	-2,984	
AGOSTO	14	0801-0806	2018/08/04	05:44:00	92,78	87,34	84,07	0,000	0,000	0,471	248,7	208,8	0,206
	15	0806-0813	2018/08/13	06:10:00	81,86	69,79	66,20	1,463	3,412	3,238	289,4	287,0	-0,818
	16	0813-0820	2018/08/14	05:56:00	84,47	72,21	70,05	0,367	2,413	2,037	287,2	305,5	-0,943
	17	0820-0827	2018/08/24	05:58:00	84,86	73,42	72,56	0,000	1,238	1,238	286,8	282,2	-0,411
	18	0827-0831	2018/08/29	06:16:00	82,92	76,84	73,74	1,012	1,325	0,938	271,0	263,1	-1,183
SETIEMBRE	19	0901-0910	2018/09/07	05:24:00	49,49	34,46	33,78	0,963	1,963	1,775	288,9	281,2	-2,278
	20	0910-0917	2018/09/14	05:39:00	72,00	63,39	61,44	1,375	1,987	1,813	283,3	271,6	2,678
	21	0917-0924	2018/09/19	05:49:00	91,33	85,41	79,35	0,800	2,187	2,175	286,5	294,6	2,794
	22	0924-0930	2018/09/27	05:27:00	88,14	75,55	74,29	0,987	1,463	1,375	284,3	285,8	3,891

Los valores registrados en la Tabla 16 fueron obtenidos por la torre de gradiente meteorológica, siendo N1 = nivel 1 (2 m), N4 = nivel 4 (18 m), N6 = nivel 6 (29 m) de las variables de humedad relativa (HR), velocidad de viento (VEL VIENTO), dirección de viento (DIR VIENTO) y temperatura mínima registrada a 2 metros de altura (Tmin 2 m).

4.3.1. Evento de helada del 30 de mayo del 2018 (-2,227 °C)

De los tres eventos de mínima temperatura por debajo de cero identificados por semana durante el mes de mayo, se seleccionó el más intenso que fue el 30 de mayo, cuando a las 06:11 HL se reportó -2,227 °C a 2 m de altura (*Figura 31*).

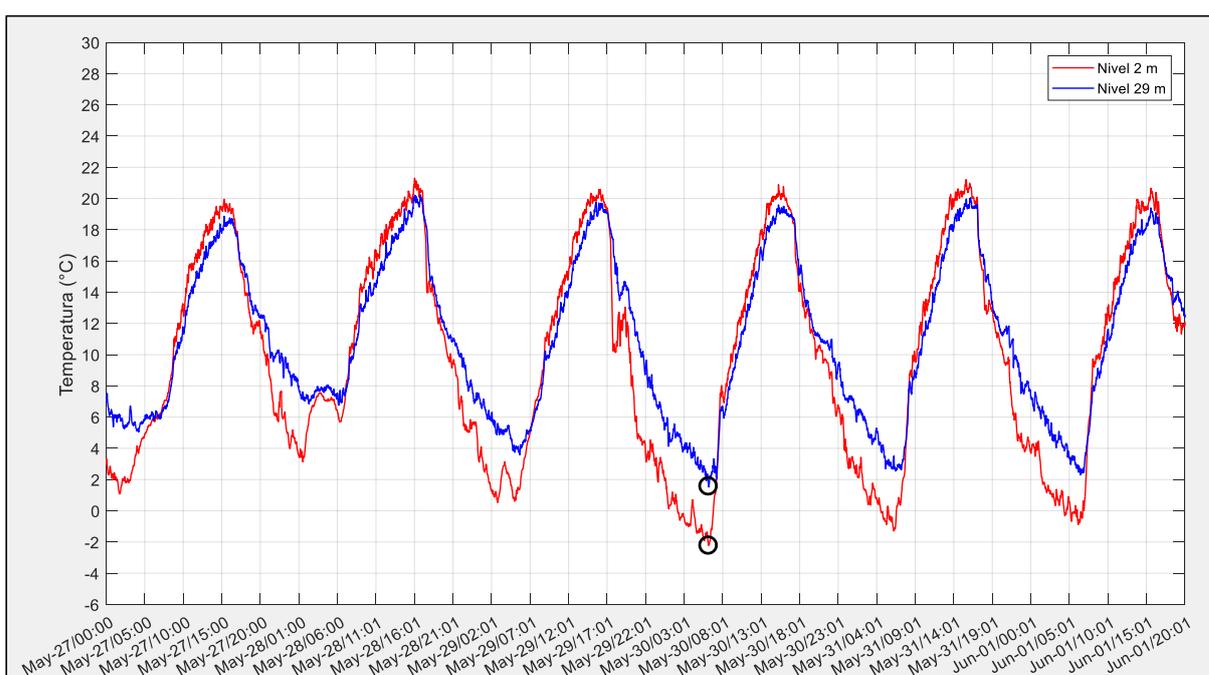


Figura 31. Variación de la temperatura dos días antes y dos días después del evento de helada del 30 de mayo del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

La humedad relativa registrada en ese momento fue de 72,32% (*Figura 32*), se puede ver que los registros de humedad relativa en los niveles más bajo y más alto (2 m y 29 m) fueron ligeramente menores en comparación con dos días antes y dos días después del evento de helada.

Los valores de razón de mezcla de vapor de agua durante la noche previa al evento de helada fueron menores también en comparación con días anteriores y posteriores al evento de helada, esto se interpreta como la disminución de cantidad en gramos de vapor de agua por una masa en kilos de aire. Durante el

evento de helada más intenso del mes de mayo se reportó $3,297 \text{ g kg}^{-1}$ de razón de mezcla de vapor de agua.

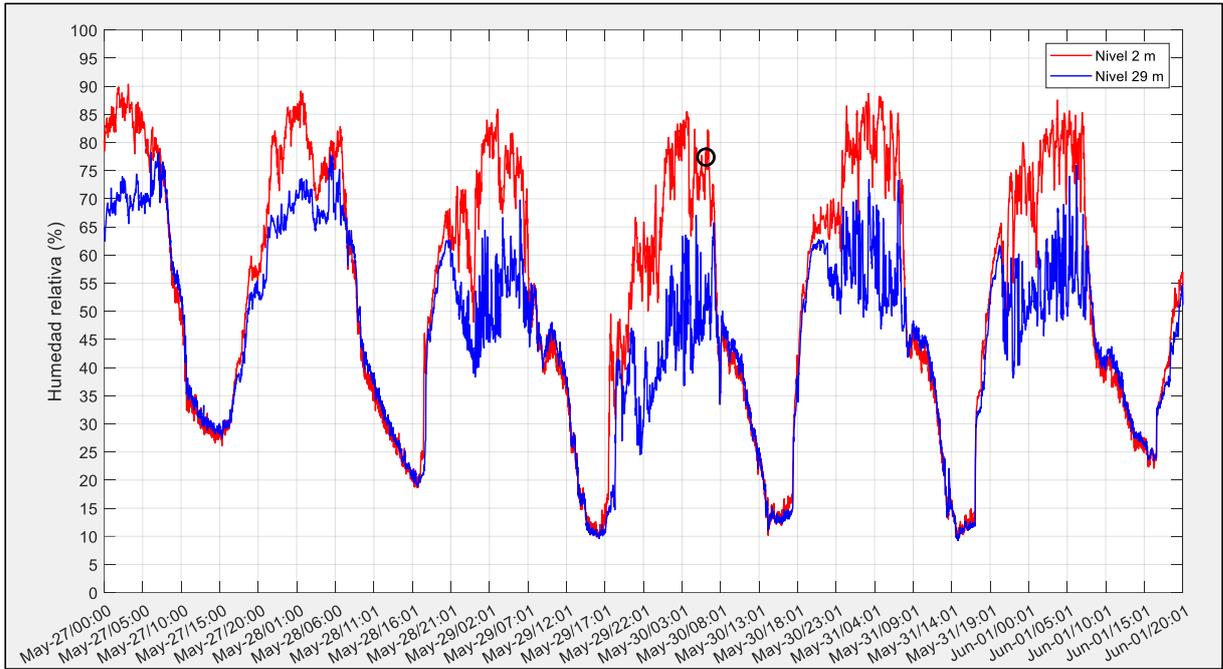


Figura 32. Variación de humedad relativa dos días antes y dos días después del evento de helada del 30 de mayo del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

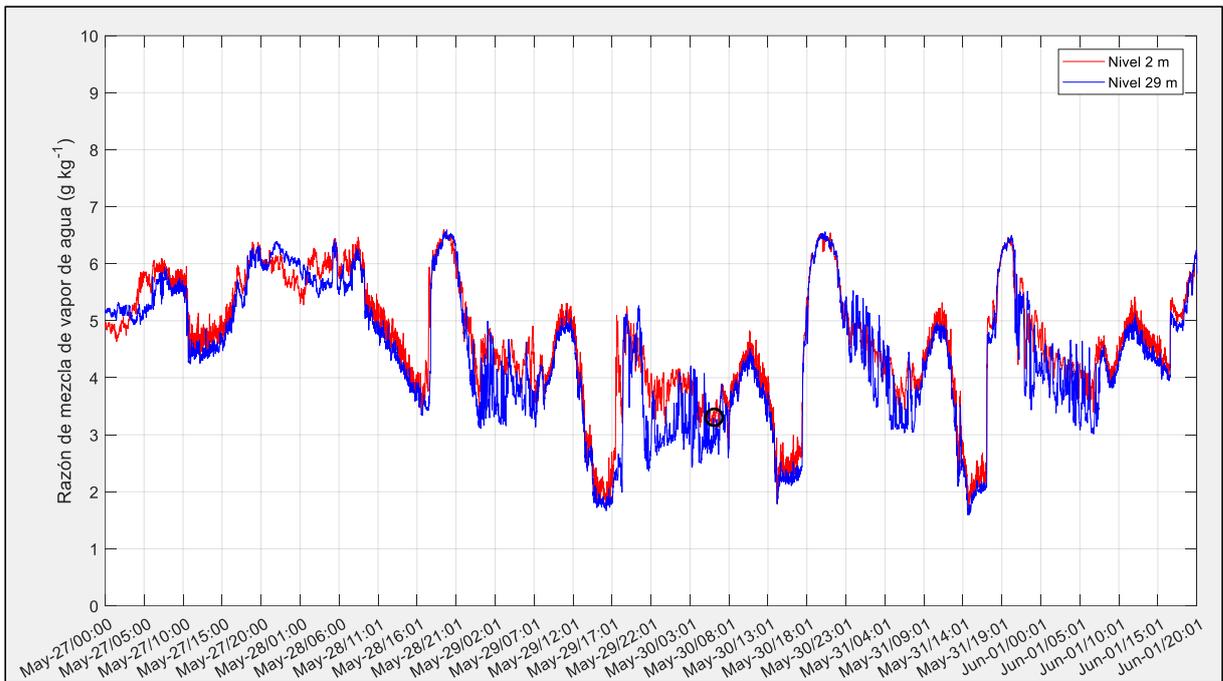


Figura 33. Variación de la razón de mezcla de vapor de agua dos días antes y dos días después del evento de helada del 30 de mayo del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

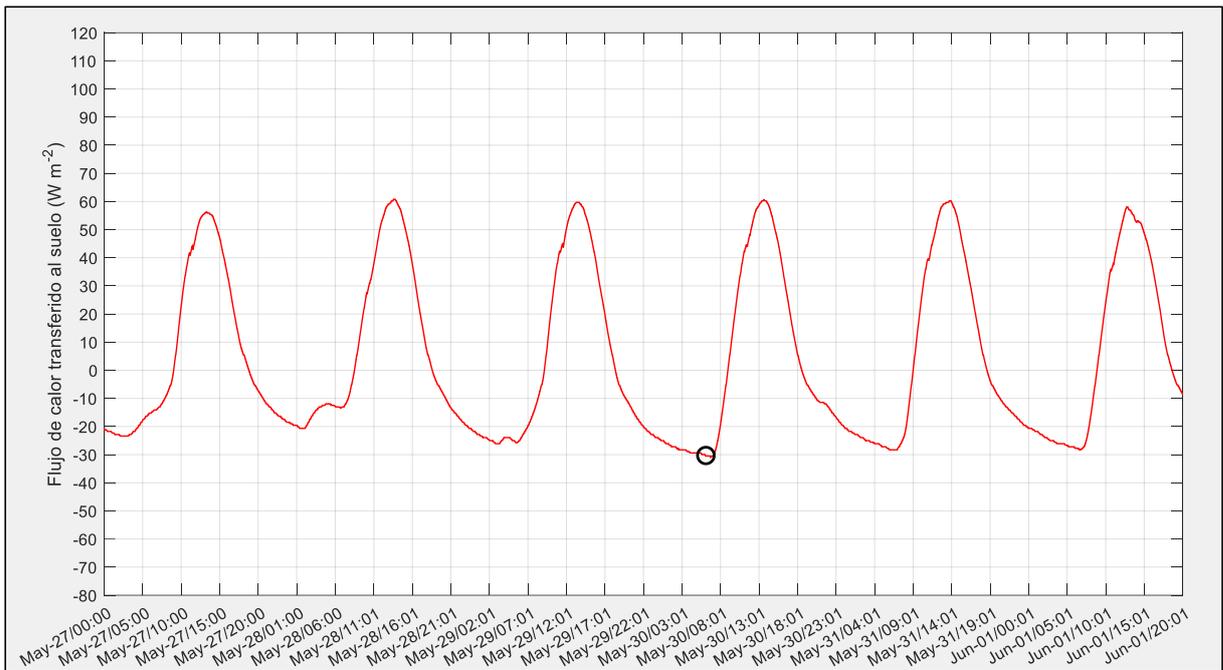


Figura 34. Variación del calor transferido al suelo dos días antes y dos días después del evento de helada del 30 de mayo del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

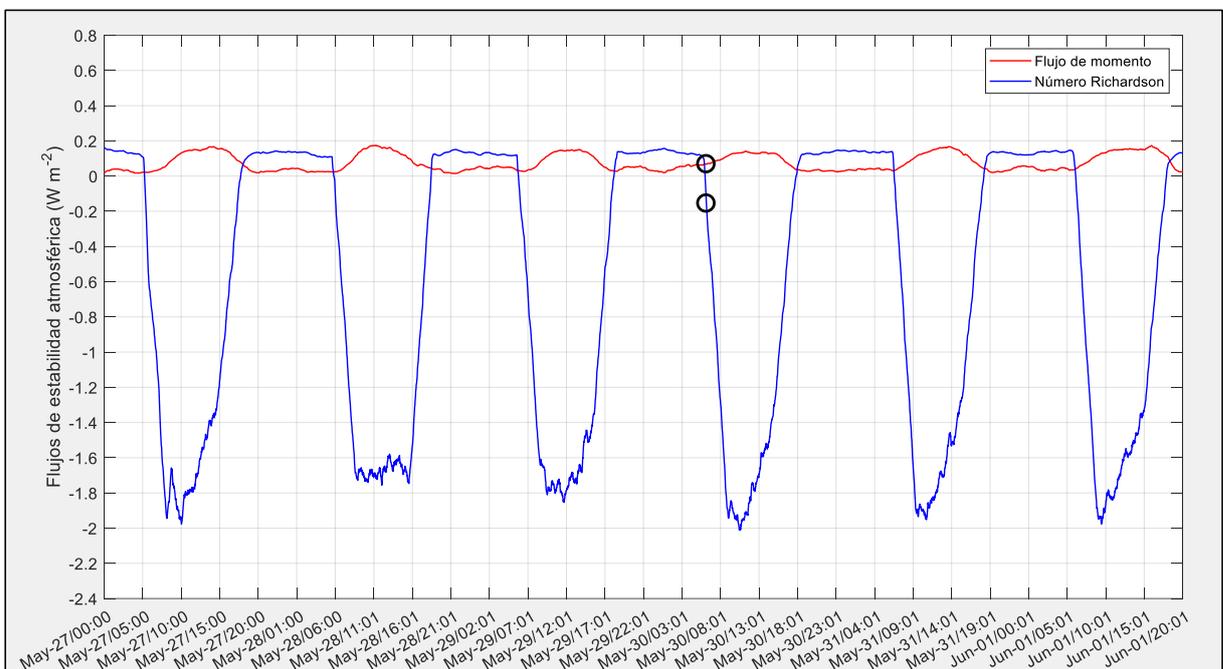


Figura 35. Variación del flujo de momento y el número de Richardson dos días antes y dos días después del evento de helada del 30 de mayo del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

El valor de flujo de calor transferido al suelo también se registró ligeramente más negativo ($-30,07 \text{ Wm}^{-2}$) que en los días previos y posteriores (Figura 34).

Durante la ocurrencia del evento de helada del 30 de mayo, el cálculo del número de Richardson mostró valores superiores a cero (Figura 35), lo que representó una condición de estabilidad normal de la atmósfera durante las horas

de la noche y primeras horas de la mañana. El valor de flujo de momento también fue mínimo, por tal motivo la turbulencia fue menor.

El calor sensible estimado fue de -48 W m^{-2} (Figura 36) ya que la atmósfera superficial durante el la noche perdió energía cediéndola a la superficie y debido a esto los niveles más bajos se encontraban más fríos.

El calor latente estimado fue de $+30 \text{ W m}^{-2}$ (Figura 36), lo cual dio a entender que el agua presente en la atmósfera superficial continuó presentándose en estado de vapor bajo las condiciones atmosféricas naturales.

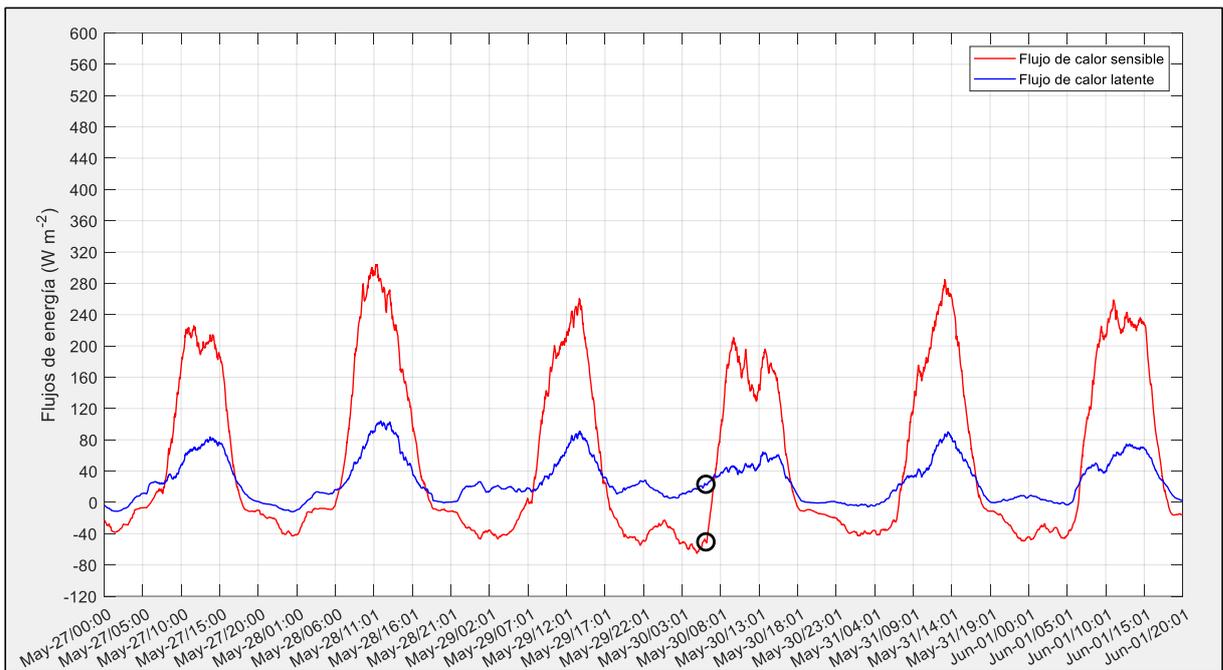


Figura 36. Variación del flujo de calor sensible y calor latente por el método de perfil aerodinámico modificado, dos días antes y dos días después del evento de helada del 30 de mayo del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

El sensor MODIS reportó valores de cobertura de nubes cercanos a cero desde la noche del 25 de mayo a las 22:20 HL (más de 4 días antes) con algunos registros de cobertura de nubes de 0,2 para el 27 de mayo a las 02:05 HL, 0,3 para el 27 de mayo a las 22:05 HL y 0,4 para el 28 de mayo a las 22:50 HL, valores que pudieron contrarrestar los efectos de la helada (Tabla 17). Durante la ocurrencia de este evento de helada los valores de cobertura de nubes fueron de cero (Tabla 17).

Tabla 17.

Valores de cobertura de nubes estimados por el sensor MODIS instalado en los satélites Terra y Aqua, desde el 25 de mayo al 01 de junio del 2018.

COBERTURA DE NUBES 25/05/2018 - 01/06/2018 (30/05/2018, 06:11:00 HL Tmin = -2,2270 °C)							
SATÉLITE	FECHA Y HORA LOCAL		COBERTURA DE NUBES	SATÉLITE	FECHA Y HORA LOCAL		COBERTURA DE NUBES
MOD06-TERRA	25/05/2018	22:20:00	0,000000	MYD06-AQUA	29/05/2018	01:50:00	0,000000
MYD06-AQUA	26/05/2018	01:20:00	0,003333	MYD06-AQUA	29/05/2018	14:05:00	0,000000
MOD06-TERRA	26/05/2018	10:45:00	0,022857	MYD06-AQUA	30/05/2018	00:55:00	0,000000
MYD06-AQUA	26/05/2018	13:35:00	0,000000	MOD06-TERRA	30/05/2018	10:20:00	0,000000
MYD06-AQUA	26/05/2018	23:00:00	0,000000	MYD06-AQUA	30/05/2018	13:10:00	0,000000
MOD06-TERRA	27/05/2018	02:05:00	0,200000	MOD06-TERRA	30/05/2018	22:35:00	0,000000
MYD06-AQUA	27/05/2018	09:50:00	0,113330	MYD06-AQUA	31/05/2018	01:40:00	0,000000
MOD06-TERRA	27/05/2018	14:20:00	0,000000	MOD06-TERRA	31/05/2018	11:05:00	0,000000
MYD06-AQUA	27/05/2018	22:05:00	0,280000	MYD06-AQUA	31/05/2018	13:55:00	0,000000
MOD06-TERRA	28/05/2018	10:35:00	0,008000	MOD06-TERRA	31/05/2018	23:20:00	0,000000
MYD06-AQUA	28/05/2018	13:25:00	0,000000	MOD06-TERRA	01/06/2018	10:10:00	0,000000
MOD06-TERRA	28/05/2018	22:50:00	0,440000	MOD06-TERRA	01/06/2018	22:25:00	0,586670

Los satélites Terra y Aqua sólo pudieron realizar tres capturas de datos en sus sobrevuelos sobre el Observatorio de Huancayo, en horarios cercanos al de la ocurrencia del evento de helada en el amanecer del 30 de mayo. (Figura 37)

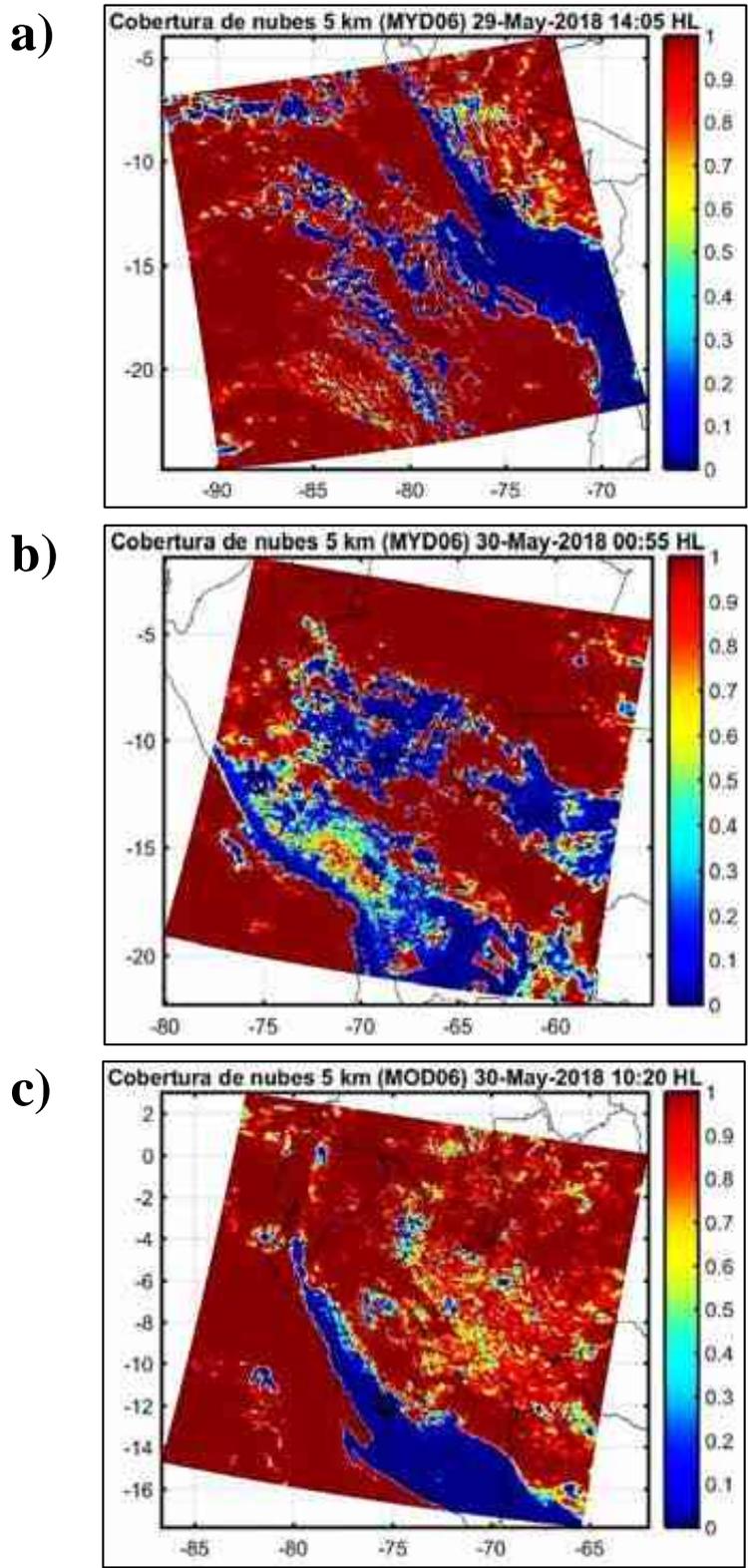


Figura 37. Producto de fracción de nubes (MODIS) para el evento de helada del 30 de mayo del 2018. a) Satélite Aqua, 29 de mayo a las 14:05 HL, b) Satélite Aqua, 30 de mayo a las 00:55 HL, c) Satélite Terra, 30 de mayo a las 10:20 HL. El círculo negro representa la ubicación del Observatorio de Huancayo.

4.3.2. Evento de helada del 21 de junio del 2018 (-2,995 °C)

En el mes de junio se reportaron cuatro eventos de mínima temperatura por debajo de cero que fueron identificados por semana y se seleccionó el evento más intenso de todo el mes que correspondió al 21 de junio. La temperatura mínima se registró a las 06:03 HL con un valor de -2,995 °C a 2 m de altura. (Figura 38)

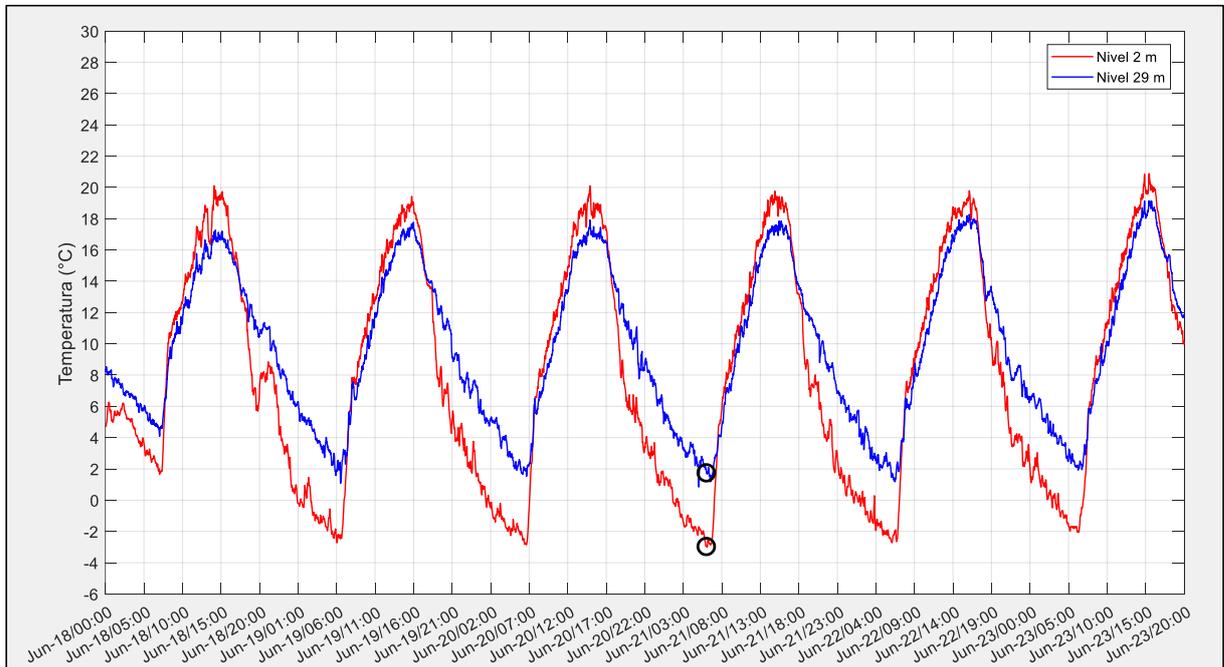


Figura 38. Variación de la temperatura dos días antes y dos días después del evento de helada del 21 de junio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

El valor de humedad relativa durante el evento de helada fue de 82,05%, un valor alto pero que no fue impedimento para que ocurriera el evento de helada. (Figura 39)

Cómo se pudo observar en el primer evento de helada del 30 de mayo, los valores de razón de mezcla de vapor de agua disminuyeron desde 5,0 g kg⁻¹ hasta 3,297 g kg⁻¹ de manera progresiva, en el caso del evento de helada del 21 de junio los valores ya eran inferiores desde dos días antes (Figura 40), siendo el valor para ese minuto de 3,315 g kg⁻¹

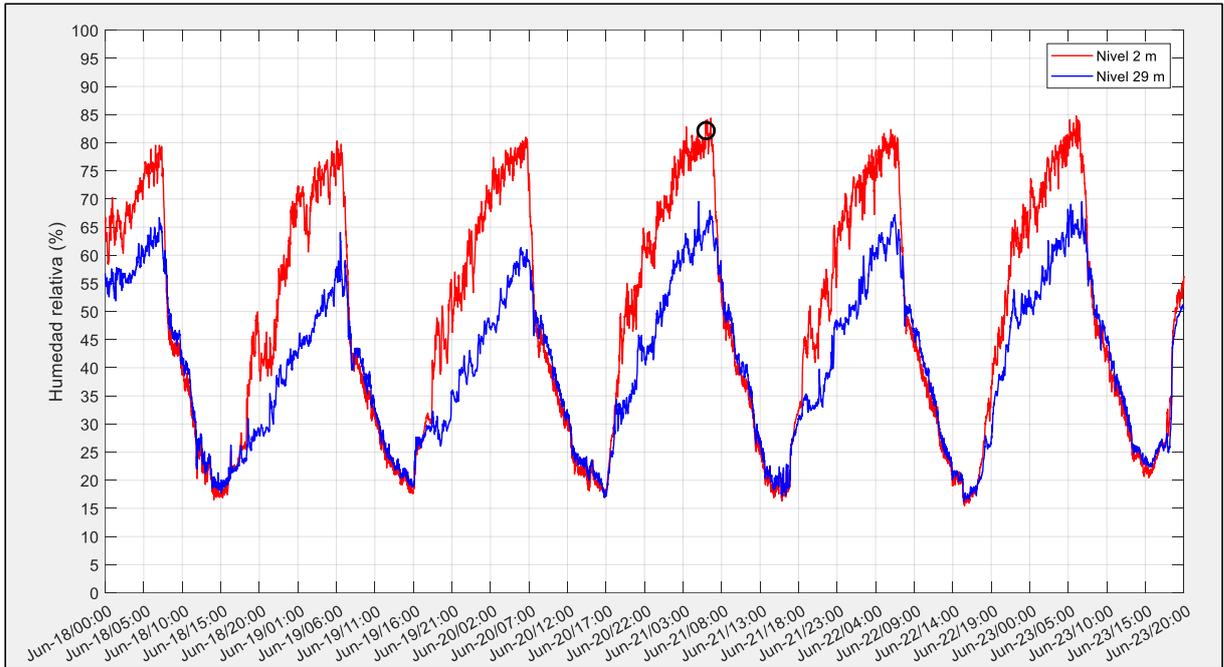


Figura 39. Variación de humedad relativa dos días antes y dos días después del evento de helada del 21 de junio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

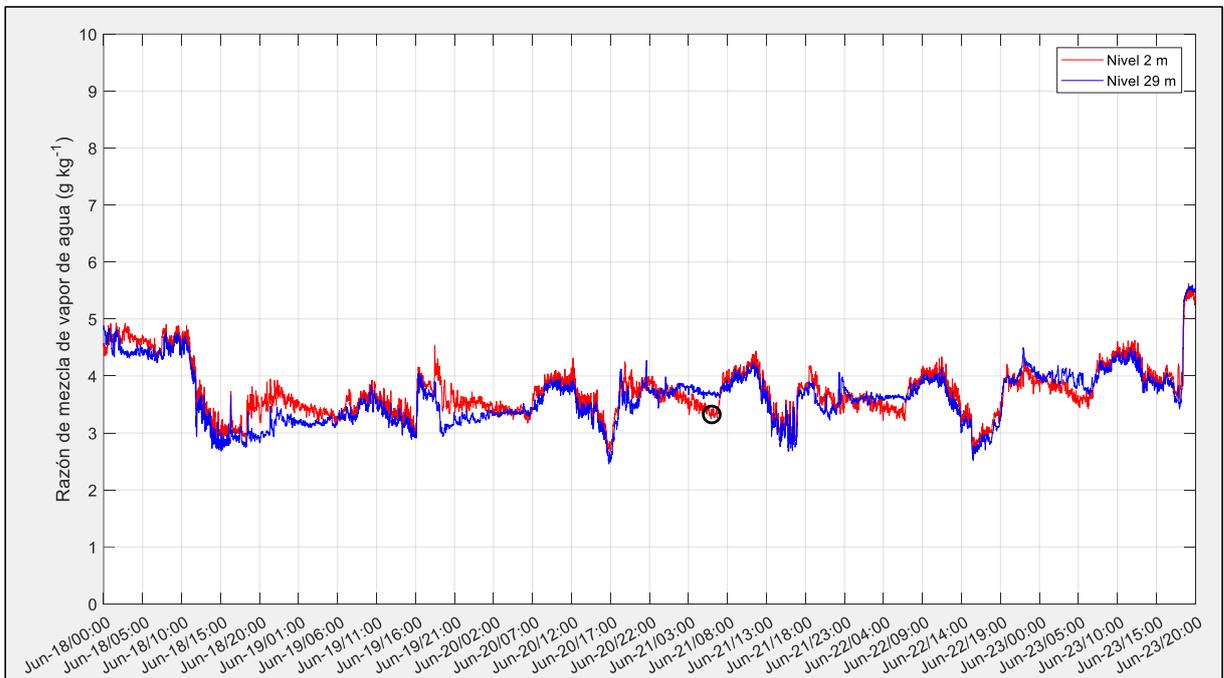


Figura 40. Variación de la mezcla de vapor de agua dos días antes y dos días después del evento helada del 21 de junio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

El flujo de calor transferido al suelo se mantuvo muy negativo desde dos días antes y un día después del evento de helada (Figura 41), lo cual se relaciona con la poca cobertura de nubes que reportó el sensor MODIS.

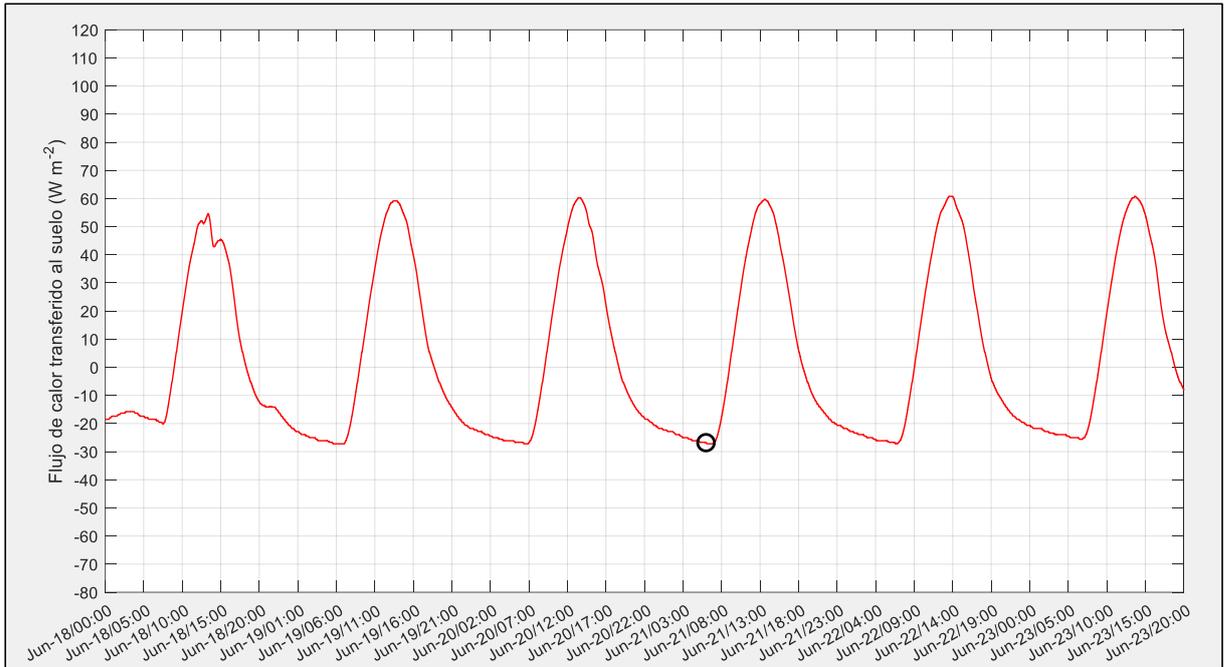


Figura 41. Variación del calor transferido al suelo dos días antes y dos días después del evento de helada del 21 de junio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

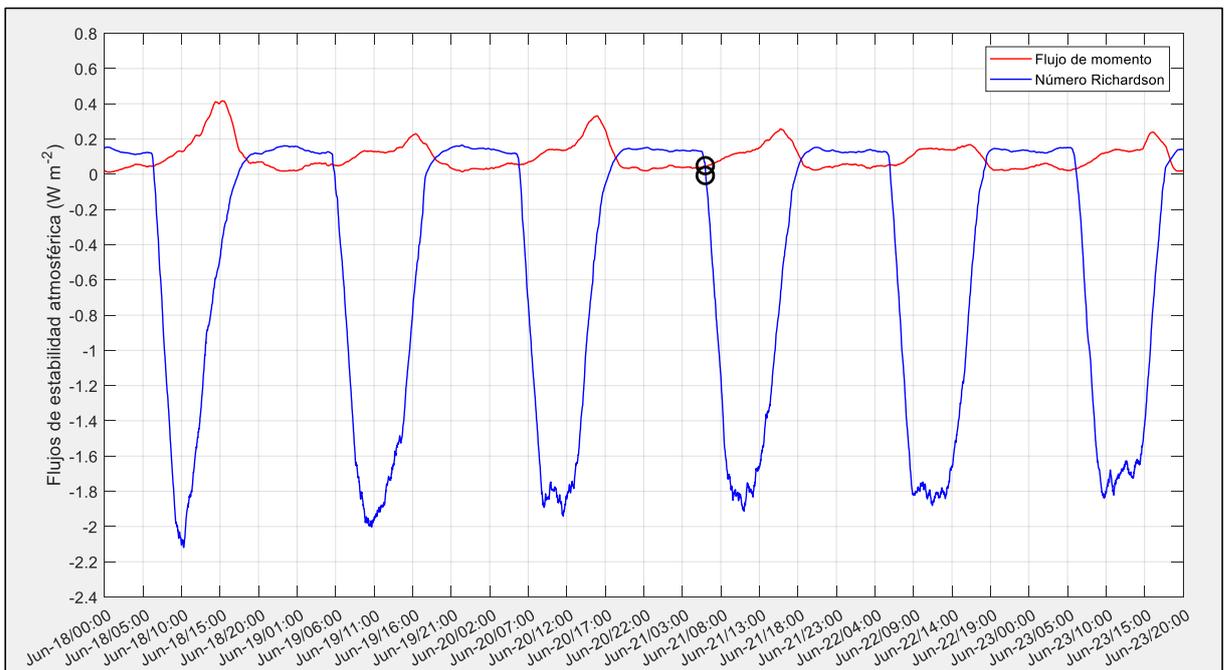


Figura 42. Variación del flujo de momento y el número de Richardson dos días antes y dos días después del evento de helada del 21 de junio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

Se pudo apreciar que la poca cobertura de nubes durante la noche tuvo relación inversa con la pérdida de energía de la superficie porque para el amanecer del 18 de junio, la pérdida de calor del suelo sólo fue de -20 Wm^{-2} cuando se reportó a la 0,9 de cobertura de nubes a la 01:25 HL del 18 de junio y para el evento de helada

del 21 de junio la pérdida de calor de la superficie fue de -27 Wm^{-2} y el sensor MODIS reportó 0,01 de cobertura de nubes a la 01:55 HL (Tabla 18).

Durante el evento de helada del 21 de junio se presentaron condiciones atmosféricas de estabilidad ya que el valor del número de Richardson fue superior a cero (Figura 42), lo cual representa también valores de flujo de momento mínimos cercanos a cero antes del amanecer.

Los valores calculados de calor sensible (Figura 43) fueron negativos, debido a que la atmósfera perdió energía para cederla a la superficie durante la noche y los niveles más bajos se encontraban más fríos. Los valores de calor latente también se registraron negativos durante la ocurrencia del evento de helada (Figura 43) debido a que posiblemente el vapor de agua se condensó y formó rocío que luego pasó a ser escarcha, ya que los valores de humedad relativa se reportaron muy elevados (82,05%).

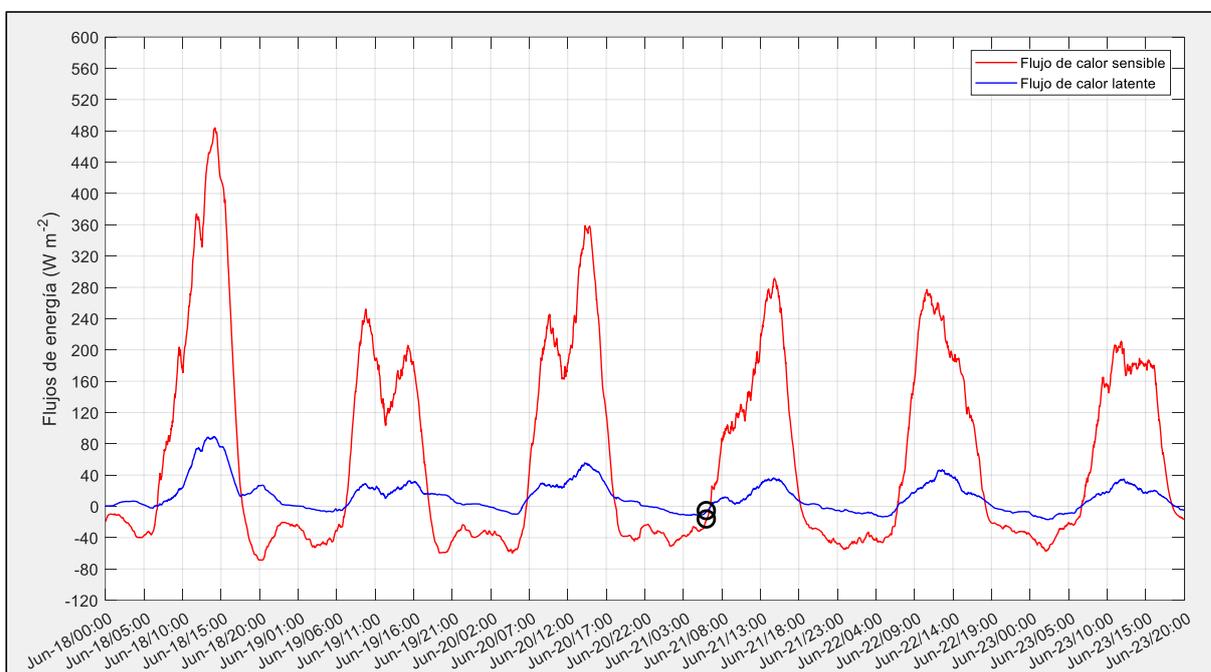


Figura 43. Variación del flujo de calor sensible y calor latente por el método de perfil aerodinámico modificado, dos días antes y dos días después del evento de helada del 21 de junio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

Tabla 18.

Valores de cobertura de nubes estimados por el sensor MODIS instalado en los satélites Terra y Aqua, desde el 18 al 23 de junio del 2018.

COBERTURA DE NUBES 18/06/2018 - 23/06/2018 (21/06/2018, 06:03:00 HL Tmin = -2,9950 °C)							
SATÉLITE	FECHA Y HORA LOCAL		COBERTURA DE NUBES	SATÉLITE	FECHA Y HORA LOCAL		COBERTURA DE NUBES
MOD06-TERRA	18/06/2018	01:25:00	0,920000	MYD06-AQUA	20/06/2018	13:30:00	0,016000
MYD06-AQUA	18/06/2018	10:50:00	0,144000	MOD06-TERRA	20/06/2018	22:55:00	0,022857
MYD06-AQUA	18/06/2018	13:40:00	0,610910	MYD06-AQUA	21/06/2018	01:55:00	0,011429
MOD06-TERRA	18/06/2018	23:05:00	0,057143	MOD06-TERRA	21/06/2018	09:45:00	0,000000
MYD06-AQUA	19/06/2018	02:10:00	0,000000	MYD06-AQUA	21/06/2018	14:10:00	0,000000
MOD06-TERRA	19/06/2018	09:55:00	0,000000	MOD06-TERRA	21/06/2018	22:00:00	0,270000
MYD06-AQUA	19/06/2018	14:25:00	0,010000	MYD06-AQUA	22/06/2018	01:00:00	0,016000
MOD06-TERRA	19/06/2018	22:10:00	0,005714	MYD06-AQUA	22/06/2018	13:15:00	0,000000
MYD06-AQUA	20/06/2018	01:15:00	0,005000	MOD06-TERRA	22/06/2018	22:45:00	0,000000
MOD06-TERRA	20/06/2018	10:40:00	0,000000	MYD06-AQUA	23/06/2018	01:45:00	0,004000

El sensor MODIS reportó valores de cobertura de nubes cercanos a cero desde la noche del 18 de junio a las 23:05 HL (un poco más de dos días antes), Tabla 18. Durante la ocurrencia de este evento de helada el sensor MODIS reportó valores de cobertura de nubes de casi cero.

Los satélites Terra y Aqua sólo pudieron realizar tres capturas de datos en sus sobrevuelos sobre el Observatorio de Huancayo, en horarios cercanos al de la ocurrencia del evento de helada. (Figura 44)

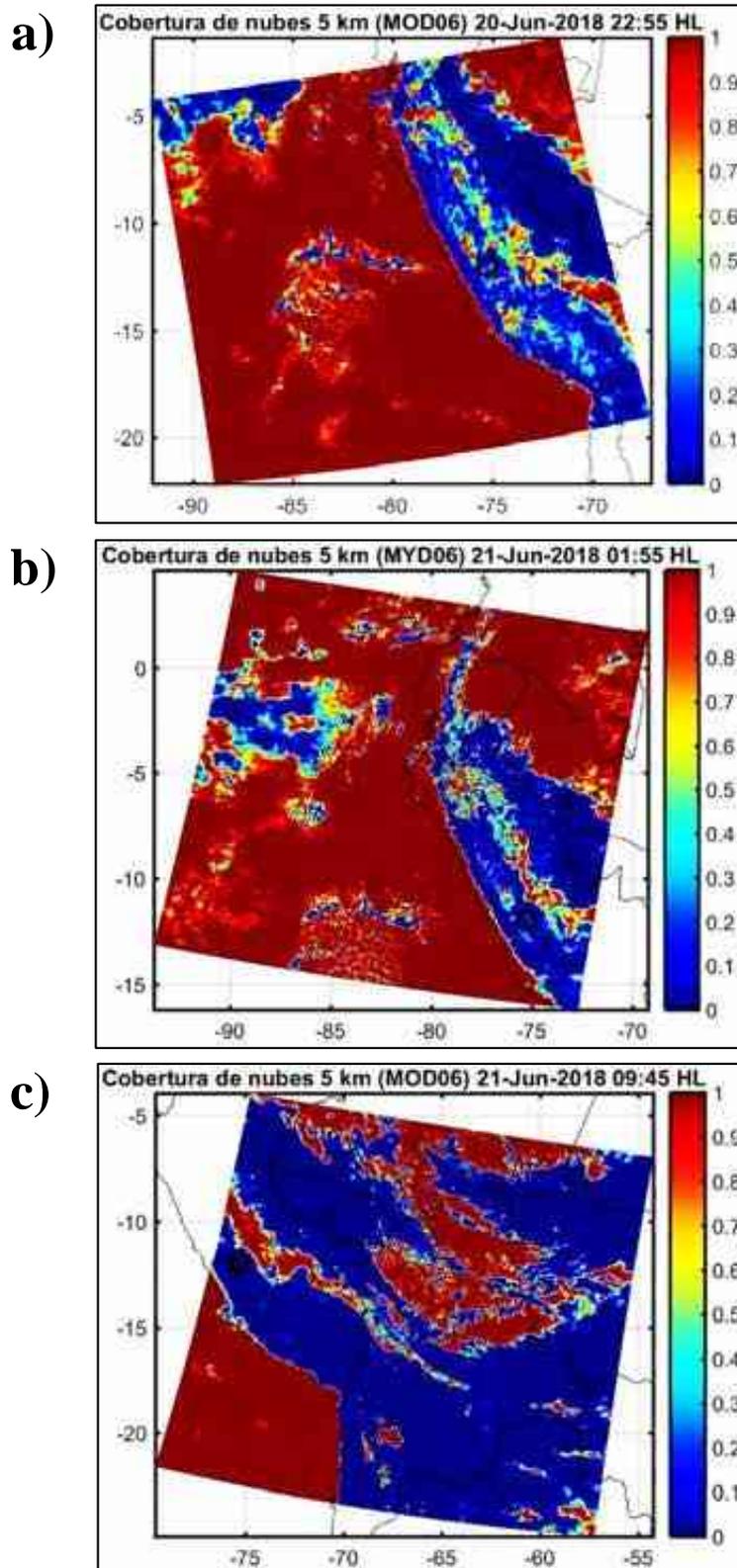


Figura 44. Producto de fracción de nubes (MODIS) para el evento de helada del 21 de junio del 2018. a) Satélite Terra, 20 de junio a las 22:55 HL, b) Satélite Aqua, 21 de junio a las 01:55 HL y c) Satélite Terra, 21 de junio a las 09:45 HL. El círculo negro representa la ubicación del Observatorio de Huancayo.

4.3.3. Evento de helada del 08 de julio del 2018 (-5,144 °C)

De los cinco eventos intensos de mínima temperatura por debajo de cero identificados por semana en el mes de julio, se seleccionaron dos eventos de heladas debido a que en el mes julio se producen las heladas más intensas de la temporada seca. El primer evento intenso identificado fue el día 08 de julio a las 06:36 HL y fue de -5,144 °C (*Figura 45*), este evento de helada fue el más intenso de la temporada seca, donde se pudo ver que las temperaturas mínimas diarias fueron inferiores a cero incluso hasta dos días antes y un día después del evento extremo. En la *Figura 45* resalta el comportamiento de la temperatura desde el día 10 de julio, donde los registros de los máximos y mínimos valores no son tan extremos en comparación con los días anteriores, esto puede estar explicado por los registros de cobertura de nubes estimados por el sensor MODIS (*Figura 79b*), donde se pudo ver que desde el 09 de julio los registros de cobertura de nubes fueron de 0,8 para luego mantenerse en 1, lo cual representa un cielo totalmente cubierto al día siguiente del evento de helada del 08 de julio.

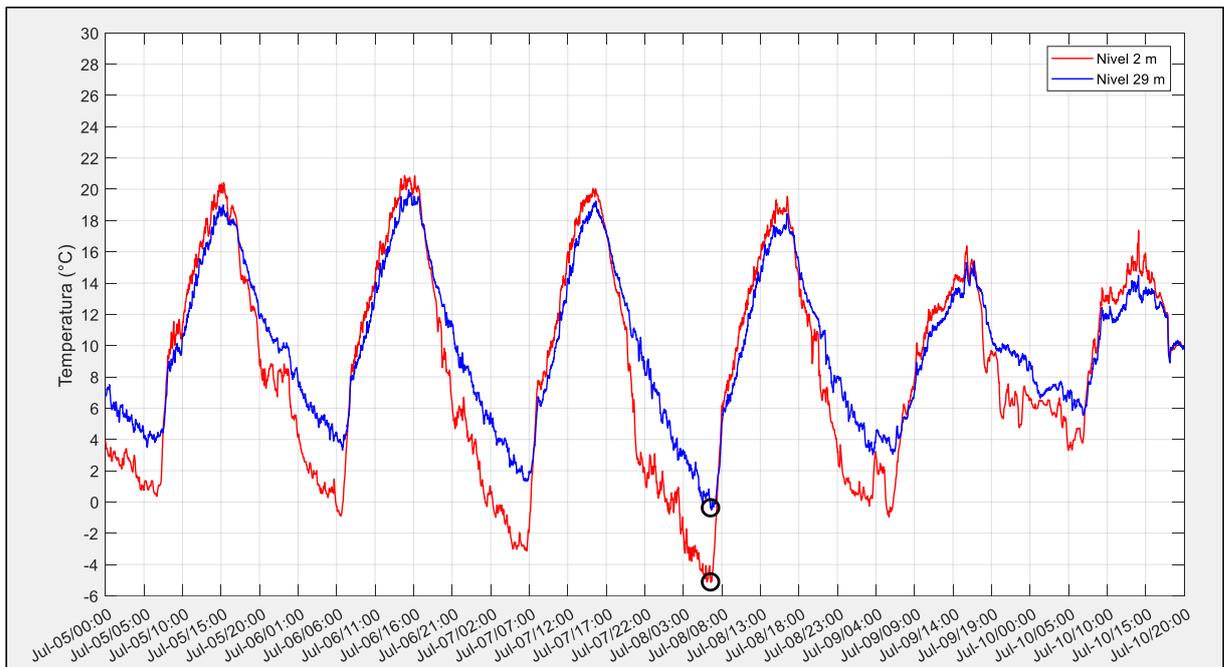


Figura 45. Variación de la temperatura dos días antes y dos días después del evento de helada del 8 de julio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

El registro de humedad relativa para este evento fue de 64,85% (Figura 46), el cual fue mucho menor comparado con los dos eventos seleccionados anteriores (Figura 32 y Figura 39). También resalta el gradiente de valores de humedad relativa cuando se tiene un valor de 64,85% de humedad relativa a 2 metros y 38,55% a 29 metros de altura.

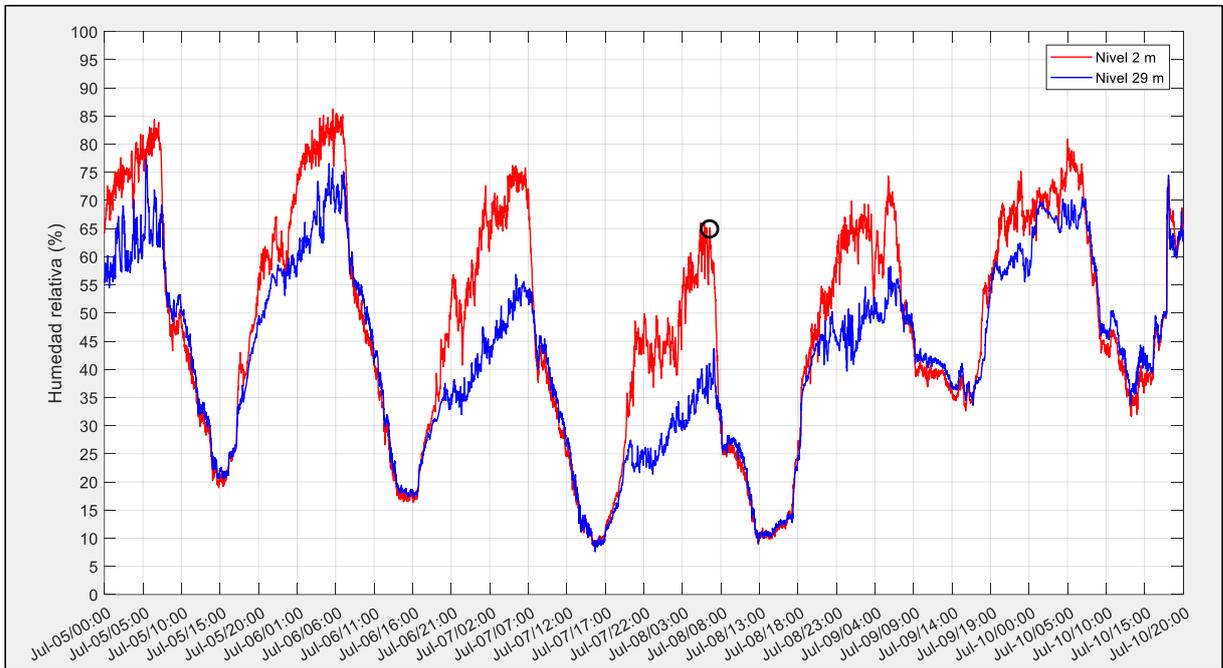


Figura 46. Variación de humedad relativa dos días antes y dos días después del evento de helada del 8 de julio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

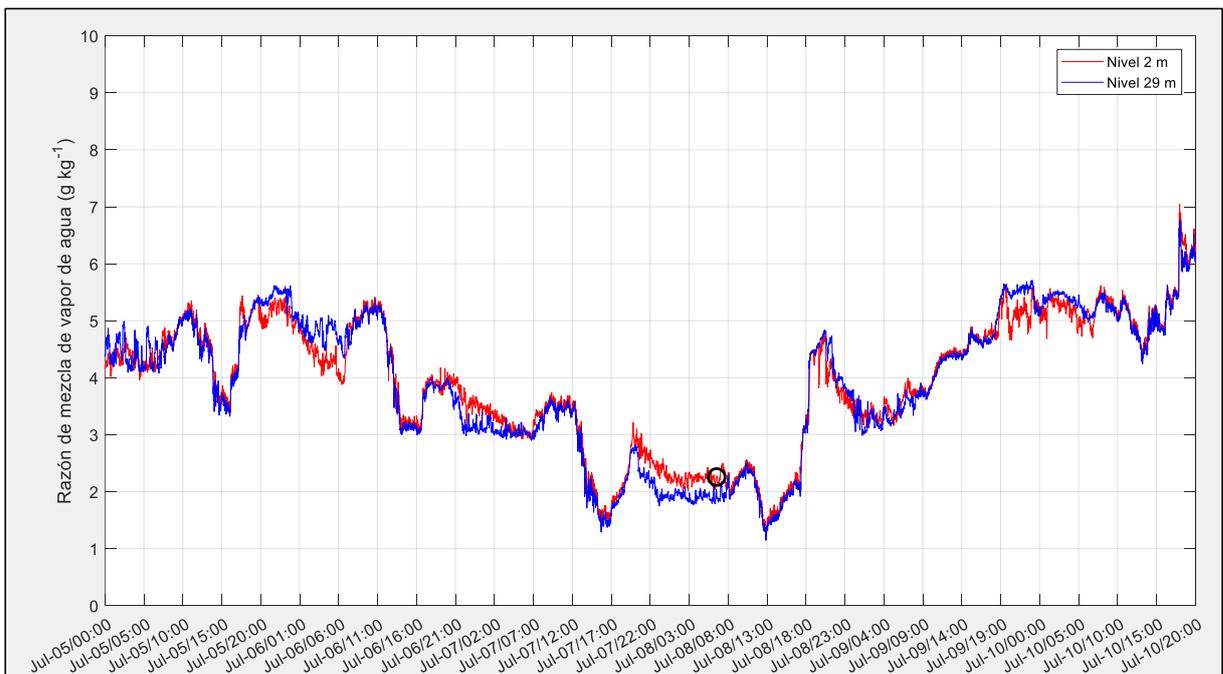


Figura 47. Variación de la razón de mezcla de vapor de agua dos días antes y dos días después del evento de helada del 08 de julio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

Los valores de razón de mezcla de vapor de agua están condicionados por la disponibilidad de vapor de agua, tal es el caso que cuando se tienen valores de humedad relativa inferiores como en el momento de ocurrencia del evento de helada (64,85%), se registraron $2,248 \text{ g kg}^{-1}$ de mezcla de vapor de agua.

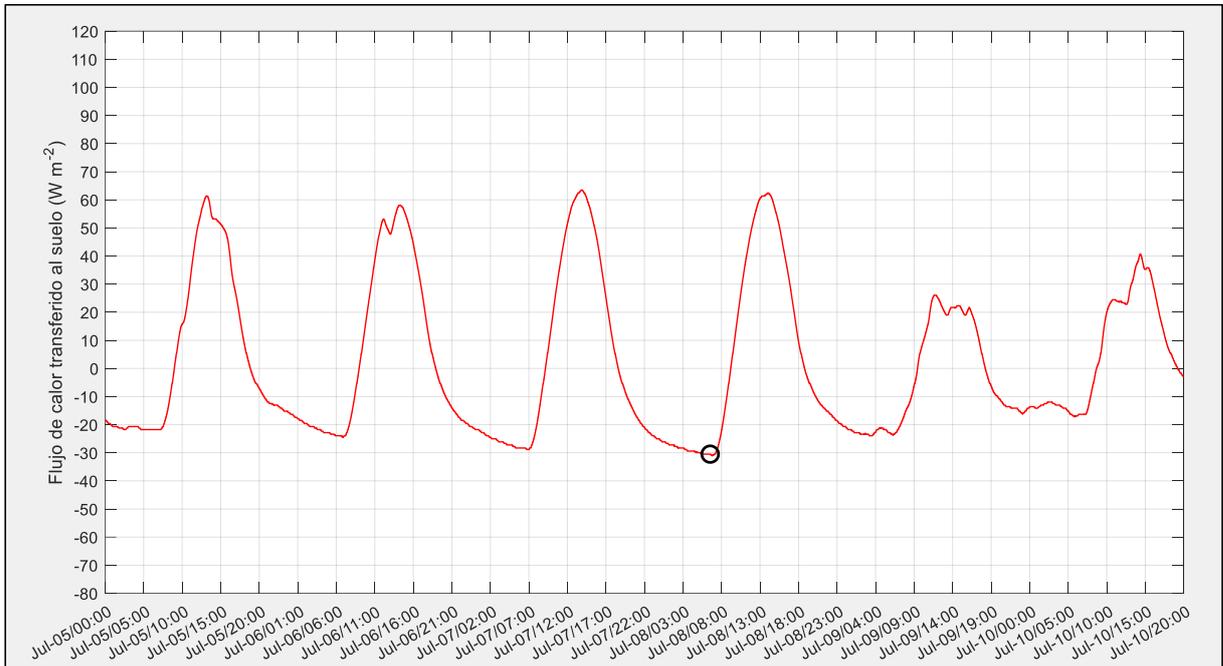


Figura 48. Variación del calor transferido al suelo dos días antes y dos días después del evento de helada del 8 de julio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

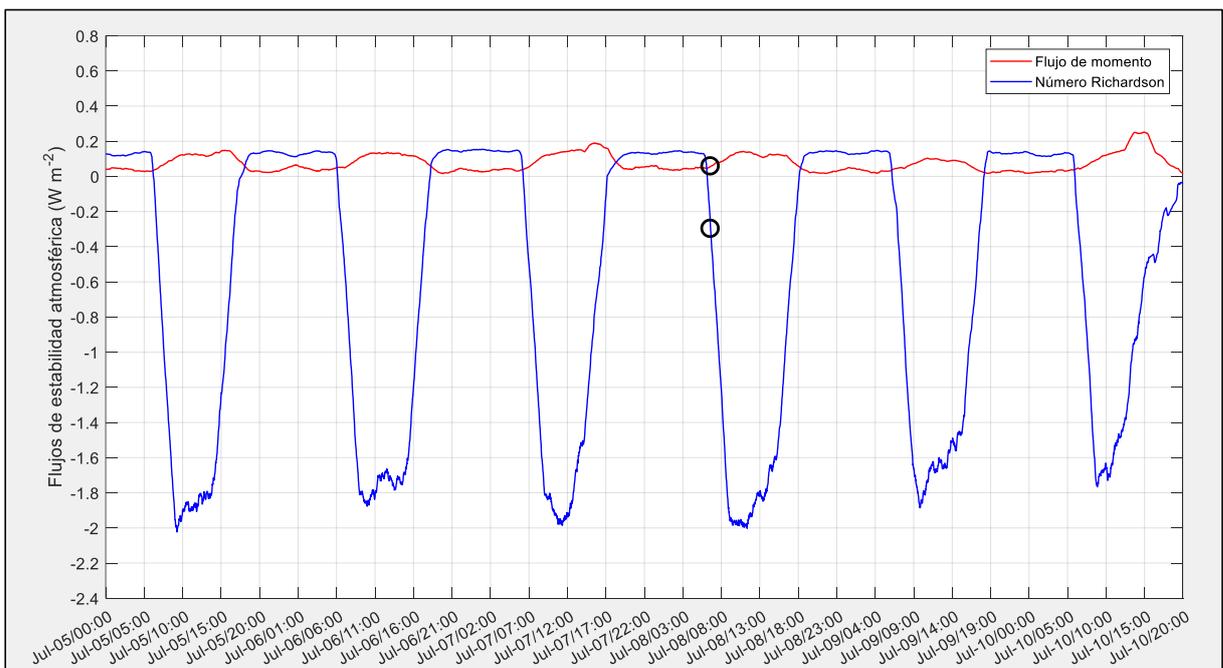


Figura 49. Variación del flujo de momento y el número de Richardson dos días antes y dos días después del evento de helada del 08 de julio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

El mínimo valor diario de flujo de calor transferido al suelo se mantuvo muy negativo durante la incidencia del evento de helada, con un valor de -30 Wm^{-2} (Figura 48), pero que comenzó con un descenso progresivo desde el 06 de julio ($-23,1 \text{ Wm}^{-2}$) y el 07 de julio ($-28,7 \text{ Wm}^{-2}$), antes del amanecer de cada día.

Durante el evento de helada del 08 de julio, los registros positivos del número de Richardson representan la estabilidad atmosférica normal de la noche y el valor mínimo positivo de flujo de momento representa ligera turbulencia que hubo durante esas horas (Figura 49).

En calor latente (Figura 50) se reportó cercano a cero debido a que posiblemente el vapor de agua se condensó y formó rocío y escarcha mientras que el calor sensible se registró bastante más negativo durante la noche previa al evento de helada (Figura 50) lo cual representa pérdida de calor de la atmósfera al ceder energía a la superficie cuando los niveles inferiores registraron menores valores de temperatura.

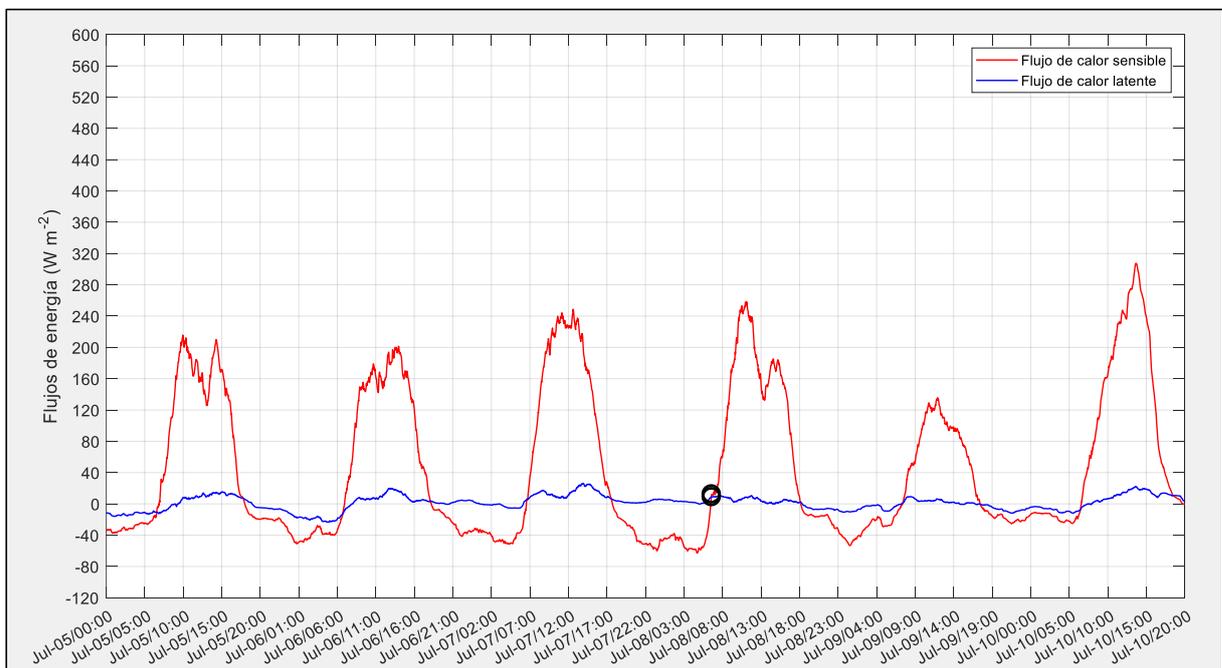


Figura 50. Variación del flujo de calor sensible y calor latente por el método de perfil aerodinámico modificado, dos días antes y dos días después del evento de helada del 08 de julio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

Tabla 19.

Valores de cobertura de nubes estimados por el sensor MODIS instalado en los satélites Terra y Aqua, desde el 05 al 10 de julio del 2018.

COBERTURA DE NUBES 05/07/2018 - 10/07/2018 (08/07/2018, 06:36:00 HL Tmin = -5,1440 °C)							
SATÉLITE	FECHA Y HORA LOCAL		COBERTURA DE NUBES	SATÉLITE	FECHA Y HORA LOCAL		COBERTURA DE NUBES
MYD06-AQUA	05/07/2018	09:55:00	1,000000	MOD06-TERRA	07/07/2018	22:00:00	0,000000
MOD06-TERRA	05/07/2018	14:25:00	0,660000	MYD06-AQUA	08/07/2018	01:00:00	0,020000
MYD06-AQUA	05/07/2018	22:10:00	0,485710	MOD06-TERRA	08/07/2018	10:30:00	0,000000
MYD06-AQUA	06/07/2018	01:15:00	0,152000	MYD06-AQUA	08/07/2018	13:15:00	0,000000
MOD06-TERRA	06/07/2018	10:40:00	0,000000	MOD06-TERRA	08/07/2018	22:45:00	0,003636
MYD06-AQUA	06/07/2018	13:30:00	0,004000	MYD06-AQUA	09/07/2018	01:45:00	0,072000
MOD06-TERRA	06/07/2018	22:55:00	0,025000	MYD06-AQUA	09/07/2018	14:00:00	0,822220
MYD06-AQUA	07/07/2018	01:55:00	0,016000	MYD06-AQUA	10/07/2018	00:50:00	1,000000
MOD06-TERRA	07/07/2018	09:45:00	0,000000	MOD06-TERRA	10/07/2018	10:15:00	0,996000
MYD06-AQUA	07/07/2018	14:10:00	0,000000	MYD06-AQUA	10/07/2018	13:05:00	1,000000

El sensor MODIS reportó valores de cobertura de nubes de casi cero desde la mañana del 06 de julio a las 10:40 HL, casi dos días antes (Tabla 19). Durante la ocurrencia del evento de helada, el sensor MODIS reportó valores de cobertura de nubes también de casi cero y presentó todo el día cielo completamente despejado. Los satélites Terra y Aqua realizaron tres capturas de datos en sus sobrevuelos sobre el Observatorio de Huancayo, en horarios cercanos al de la ocurrencia del evento de helada en el amanecer del 08 de julio. (Figura 51)

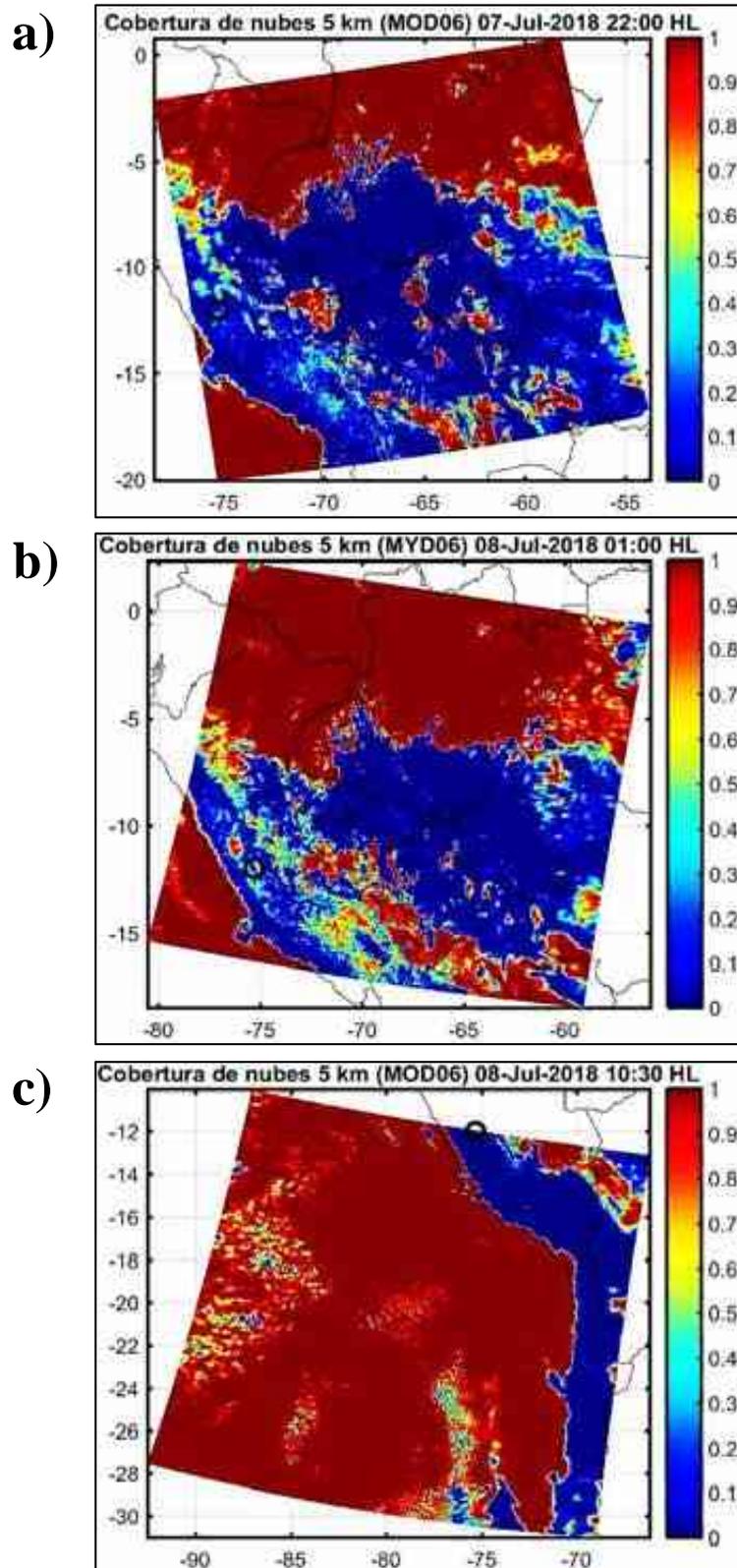


Figura 51. Producto fracción de nubes (MODIS) para el evento de helada del 08 de julio del 2018. a) Satélite Terra, 07 de julio a las 22:00 HL, b) Satélite Aqua, 08 de julio a la 01:00 HL y c) Satélite Terra, 08 de julio a las 10:30 HL. El círculo negro representa la ubicación del Observatorio de Huancayo.

4.3.4. Evento de helada del 17 de julio del 2018 (-3,814 °C)

El segundo evento de helada más intenso del mes de julio también fue el segundo evento más intenso de la temporada seca, el cual fue el 17 de julio a las 06:40 HL, cuando se registró -3,814 °C de temperatura mínima (Figura 52).

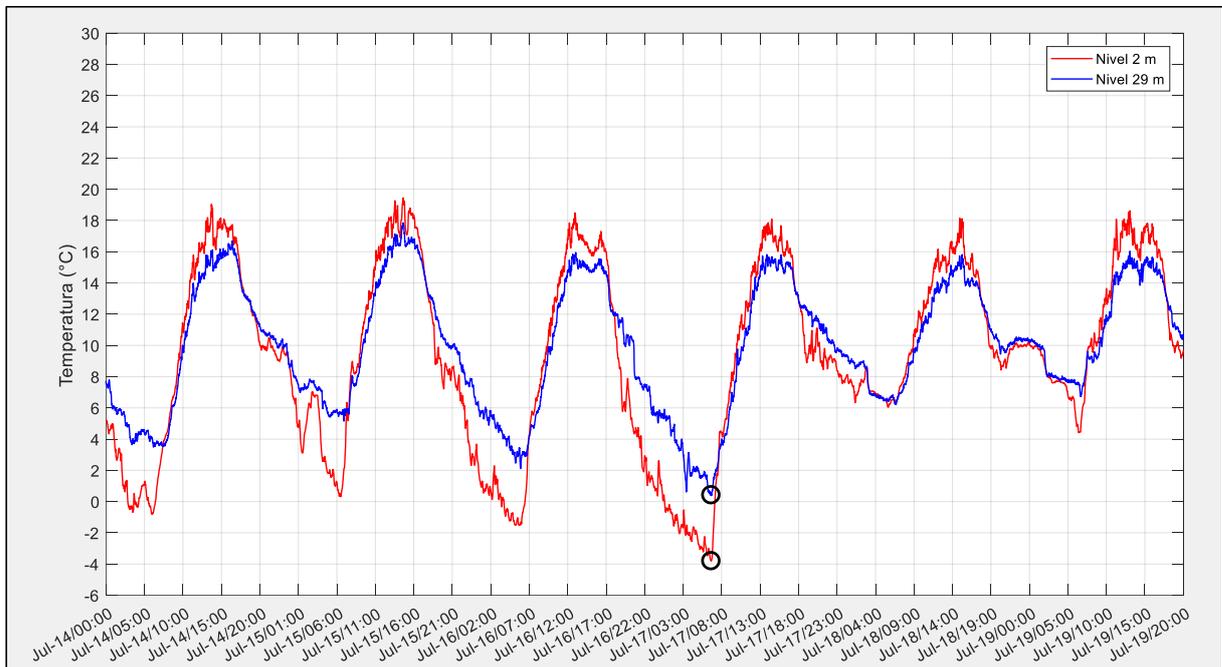


Figura 52. Variación de la temperatura dos días antes y dos días después del evento de helada del 17 de julio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

Durante el evento de helada, el registro de humedad relativa fue de 78,09% a 2 metros de altura, mientras que el nivel a 29 metros de altura se registró 58,55%, lo cual representó una gradiente muy fuerte (19,54 %) en comparación con los dos días anteriores. (Figura 53)

Los registros de los valores de razón de mezcla de vapor de agua durante el evento del 17 de julio responden posiblemente a la poca disponibilidad de humedad ambiental en superficie durante la ocurrencia del evento de helada. (Figura 54)

Luego del evento de helada los valores de humedad relativa en la superficie se recuperaron pues los registros indican que el nivel inferior y superior de la torre presentaron valores altos y similares, lo cual se traduce en mayor disponibilidad de vapor de agua para la mezcla, efectos que se ven representados en la Figura 54.

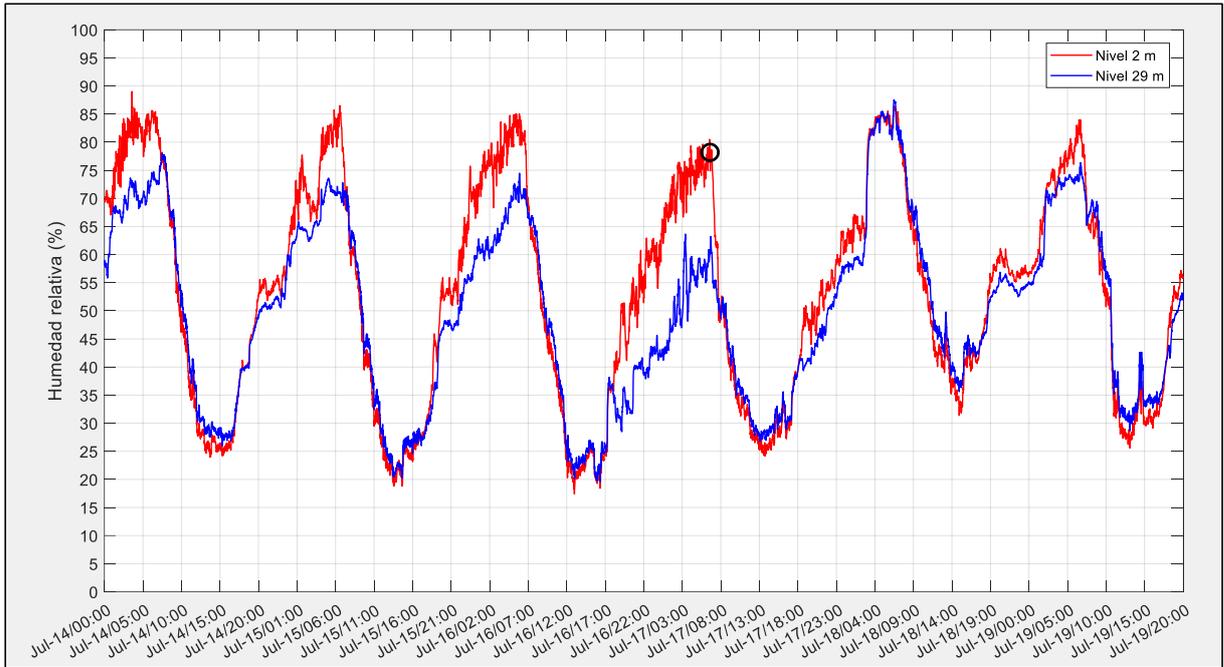


Figura 53. Variación de humedad relativa dos días antes y dos días después del evento de helada del 17 de julio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

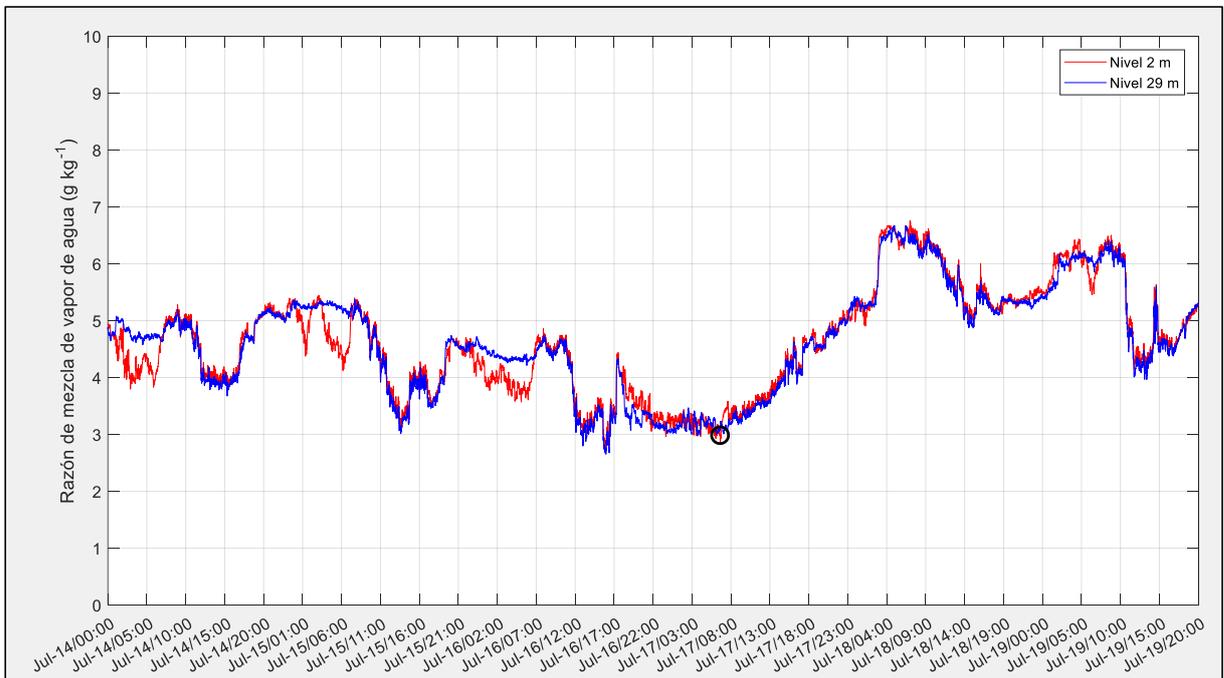


Figura 54. Variación de la razón de mezcla de vapor de agua dos días antes y dos días después del evento de helada del 17 de julio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

Los valores mínimos de flujo de calor transferido al suelo desde un día antes hasta la ocurrencia del evento de helada del 17 de julio se mantuvieron similares cercanos a los $-27,8 \text{ Wm}^{-2}$ (Figura 55).

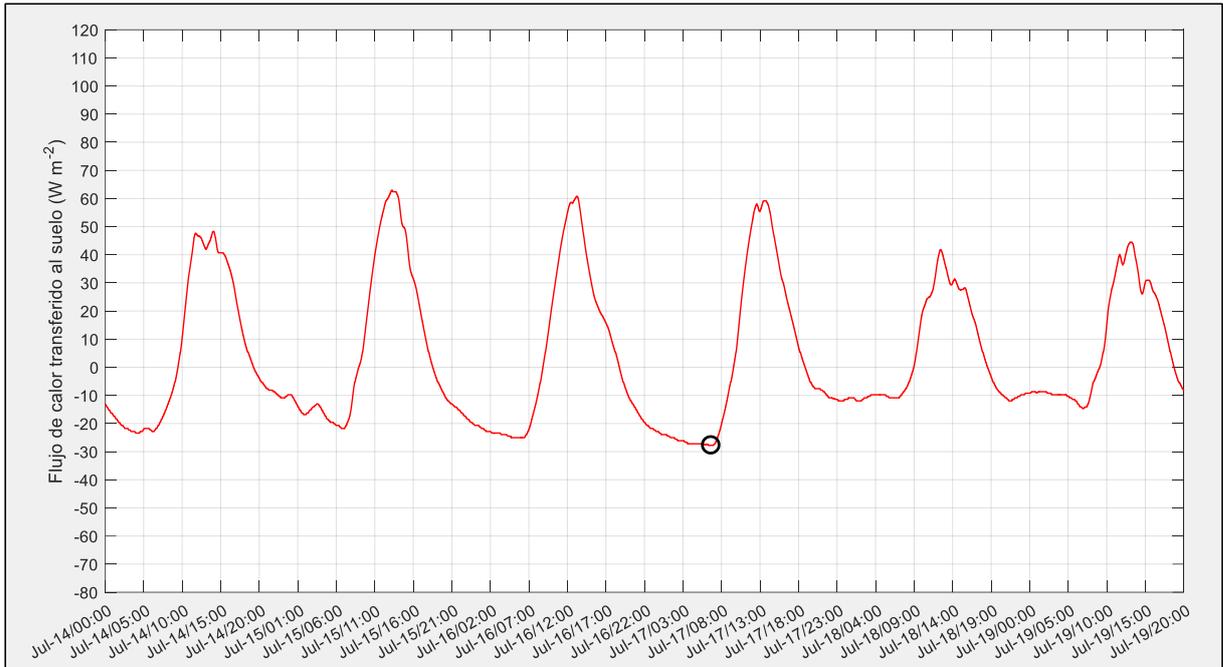


Figura 55. Variación del calor transferido al suelo dos días antes y dos días después del evento de helada del 17 de julio del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

Resalta el comportamiento de los valores mínimos de flujo de calor transferido al suelo desde el 18 de julio, ya que desde ese día no fueron muy negativos siendo $-12,1 \text{ Wm}^{-2}$ el 18 de julio y $-13,3 \text{ Wm}^{-2}$ el 19 de julio, lo cual pudo haber tenido relación con la cobertura de nubes que reportó el sensor MODIS.

El valor positivo del número de Richardson (Figura 56), representó condiciones de estabilidad atmosférica al igual que el valor positivo cercano a cero del flujo de momento (Figura 56) que representó baja turbulencia. El valor del calor latente (Figura 57) presentó valores negativos posiblemente debido a que la condensación del vapor de agua formó rocío y luego escarcha ya que los valores de humedad relativa se reportaron muy altos (78,09%).

Durante el evento de helada el calor sensible se calculó negativo (Figura 57) lo cual representó que la atmósfera perdió energía durante la noche para cederla a la superficie ya que los niveles más bajos presentaron menor temperatura.

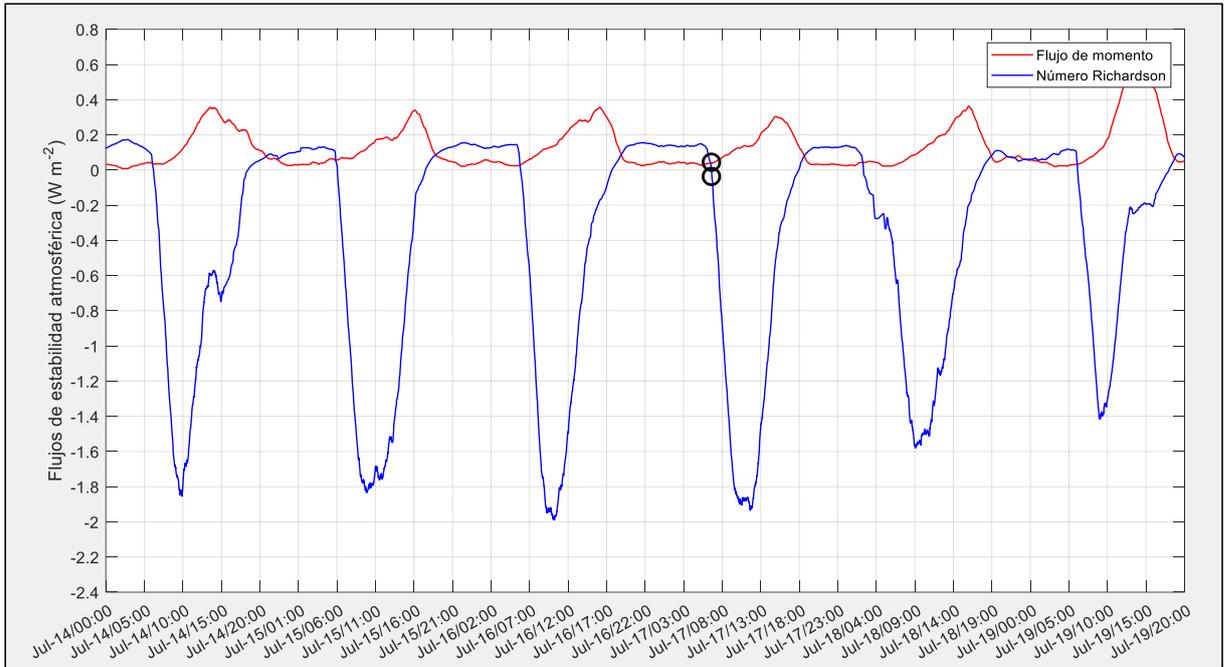


Figura 56. Variación del flujo de momento y el número de Richardson dos días antes y dos días después del evento de helada del 17 de julio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

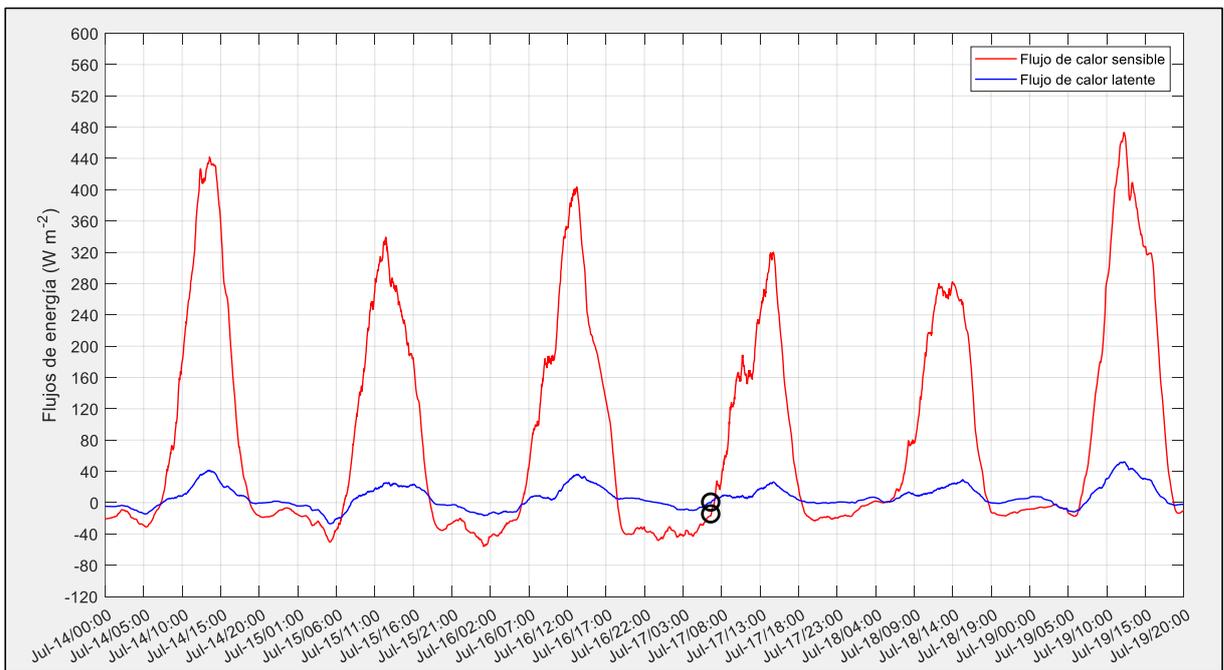


Figura 57. Variación del flujo de calor sensible y calor latente por el método de perfil aerodinámico modificado, dos días antes y dos días después del evento de helada del 17 de julio del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

Tabla 20.

Valores de cobertura de nubes estimados por el sensor MODIS instalado en los satélites Terra y Aqua, desde el 13 al 19 de julio del 2018.

COBERTURA DE NUBES 13/07/2018 - 19/07/2018 (17/07/2018, 06:40:00 HL Tmin = -3,8140 °C)							
SATÉLITE	FECHA Y HORA		COBERTURA DE NUBES	SATÉLITE	FECHA Y HORA		COBERTURA DE NUBES
	LOCAL				LOCAL		
MYD06-AQUA	13/07/2018	10:45:00	1,000000	MYD06-AQUA	16/07/2018	01:50:00	0,000000
MYD06-AQUA	13/07/2018	13:35:00	0,973330	MYD06-AQUA	16/07/2018	14:05:00	1,000000
MOD06-TERRA	13/07/2018	23:00:00	0,512000	MYD06-AQUA	17/07/2018	00:55:00	0,016000
MYD06-AQUA	14/07/2018	02:05:00	0,000000	MOD06-TERRA	17/07/2018	10:20:00	0,006154
MYD06-AQUA	14/07/2018	09:50:00	0,010000	MYD06-AQUA	17/07/2018	13:10:00	0,746670
MOD06-TERRA	14/07/2018	14:20:00	0,040000	MOD06-TERRA	17/07/2018	22:35:00	0,700000
MYD06-AQUA	14/07/2018	22:05:00	0,296000	MYD06-AQUA	18/07/2018	01:40:00	1,000000
MYD06-AQUA	15/07/2018	01:10:00	0,155000	MYD06-AQUA	18/07/2018	13:55:00	0,996000
MOD06-TERRA	15/07/2018	10:35:00	0,008000	MOD06-TERRA	18/07/2018	23:20:00	1,000000
MYD06-AQUA	15/07/2018	13:25:00	0,145000	MOD06-TERRA	19/07/2018	10:10:00	0,752000
MOD06-TERRA	15/07/2018	22:50:00	0,004000	MOD06-TERRA	19/07/2018	22:25:00	0,436000

El sensor MODIS reportó valores de cobertura de nubes de casi cero desde la madrugada del 14 de julio a las 02:05 HL (un poco más de tres días antes), Tabla 20. Durante la ocurrencia de este evento de helada, el sensor MODIS reportó valores de casi cero, pero un día antes fue de 1 (cielo cubierto) lo cual no tuvo mayor influencia en contrarrestar la ocurrencia de temperatura mínima extrema, porque ese registro fue durante la tarde previa y se sabe que el efecto de las nubes para contrarrestar las mínimas temperaturas es cuando su presencia acontece durante la noche.

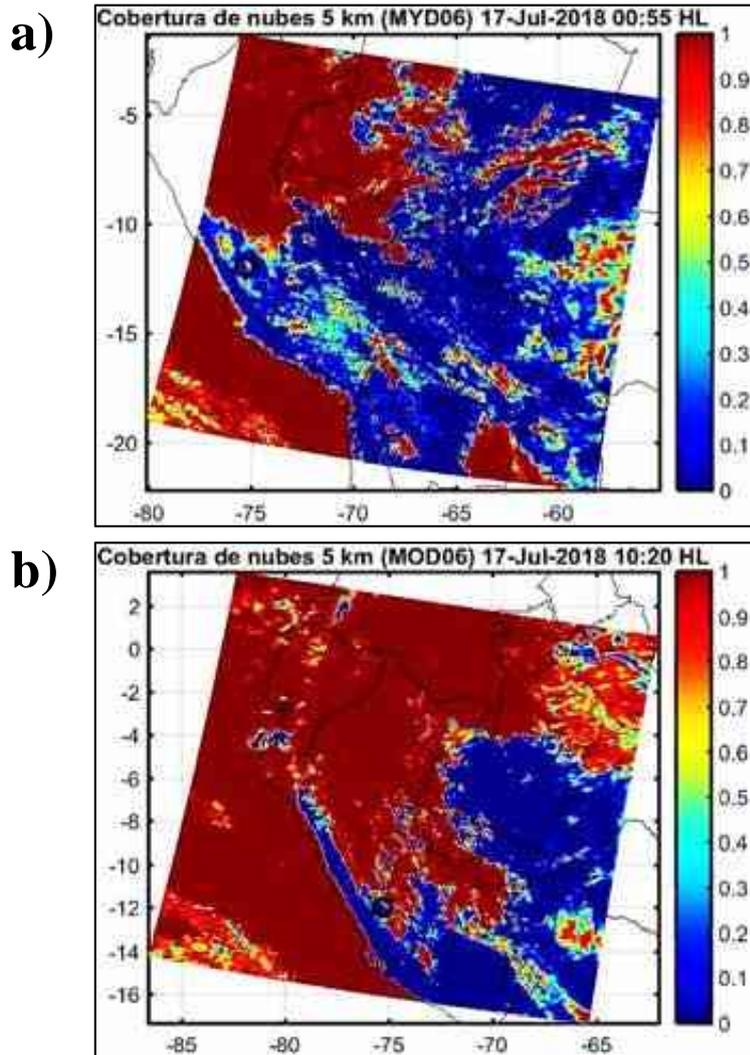


Figura 58. Producto de fracción de nubes (MODIS) para el evento de helada del 17 de julio del 2018. a) Satélite Aqua, 17 de julio a las 00:55 HL y b) Satélite Terra, 17 de julio a las 10:20 HL. El círculo negro representa la ubicación del Observatorio de Huancayo.

Los satélites Terra y Aqua realizaron sólo dos capturas de datos en sus sobrevuelos sobre el Observatorio de Huancayo, en horarios cercanos al de la ocurrencia del evento de helada en el amanecer 17 de julio (*Figura 58*).

4.3.5. Evento de helada del 29 de agosto del 2018 (-1,183 °C)

De los cuatro eventos de mínima temperatura por debajo de cero identificados por semana en el mes de agosto, se seleccionó el más intenso de todo el mes que correspondió al día 29 de agosto. La temperatura mínima de ese día se registró a las 06:16 HL y fue de -1,183 °C a dos metros de altura (*Figura 59*).

Los registros de temperatura mostraron que los dos días posteriores también presentaron valores mínimos por debajo de cero, pero se seleccionó el día 29 de agosto por presentar la temperatura mínima más extrema en comparación con los demás días del mes.

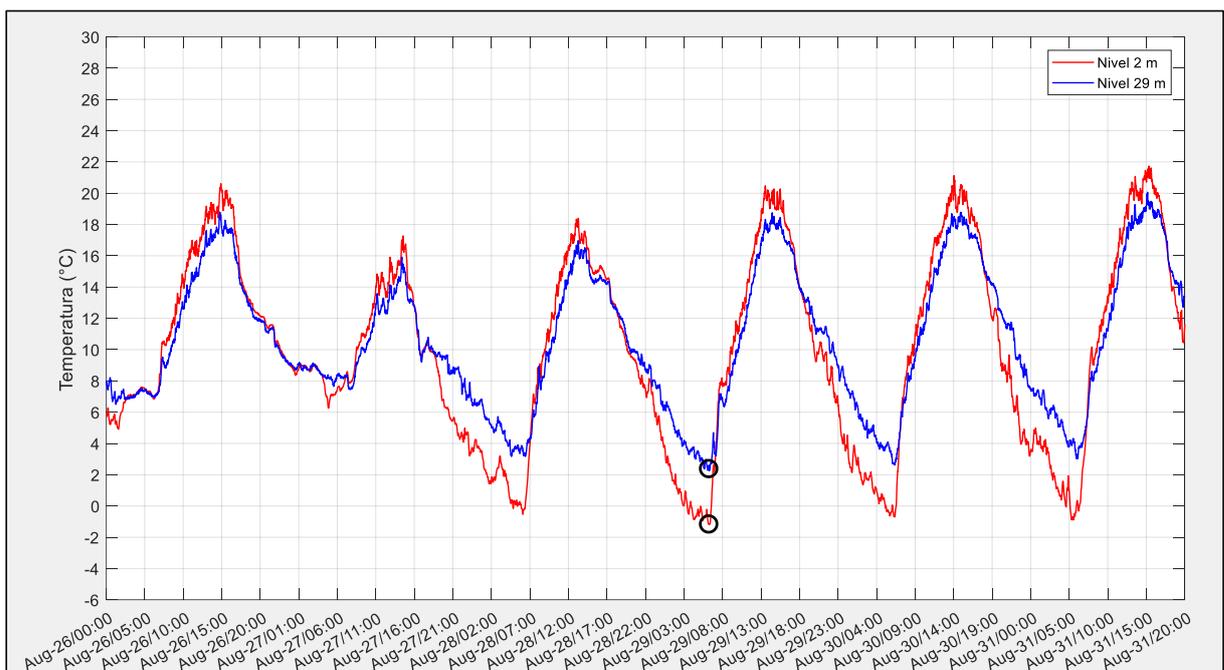


Figura 59. Variación de la temperatura dos días antes y dos días después del evento de helada del 29 de agosto del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

Los valores de razón de mezcla de vapor de agua mostraron una disminución progresiva desde la madrugada del 28 de agosto, donde se registró un valor de 3,804 g kg⁻¹.

El valor de humedad relativa fue de 82,92% (*Figura 60*) y en los días siguientes se registró un descenso ligero el cual fue de 81,9% y 76,3% en los días 30 y 31 cuando ocurrieron sus mínimos valores de temperatura a 2 metros de altura.

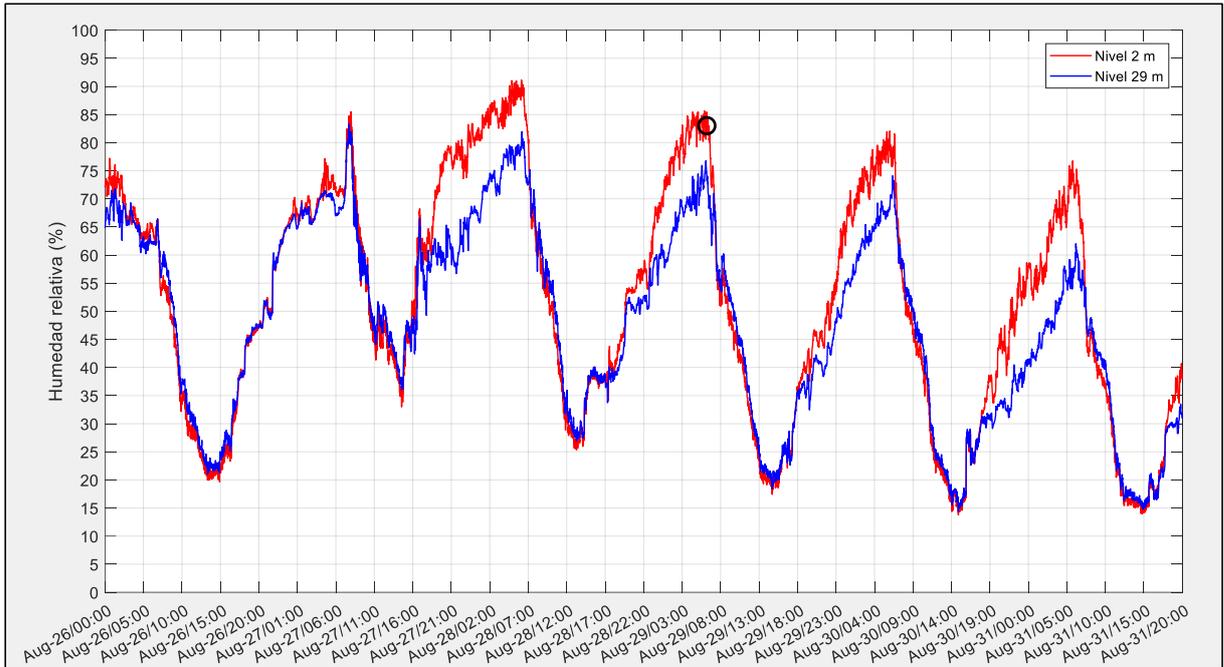


Figura 60. Variación de humedad relativa dos días antes y dos días después del evento de helada del 29 de agosto del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

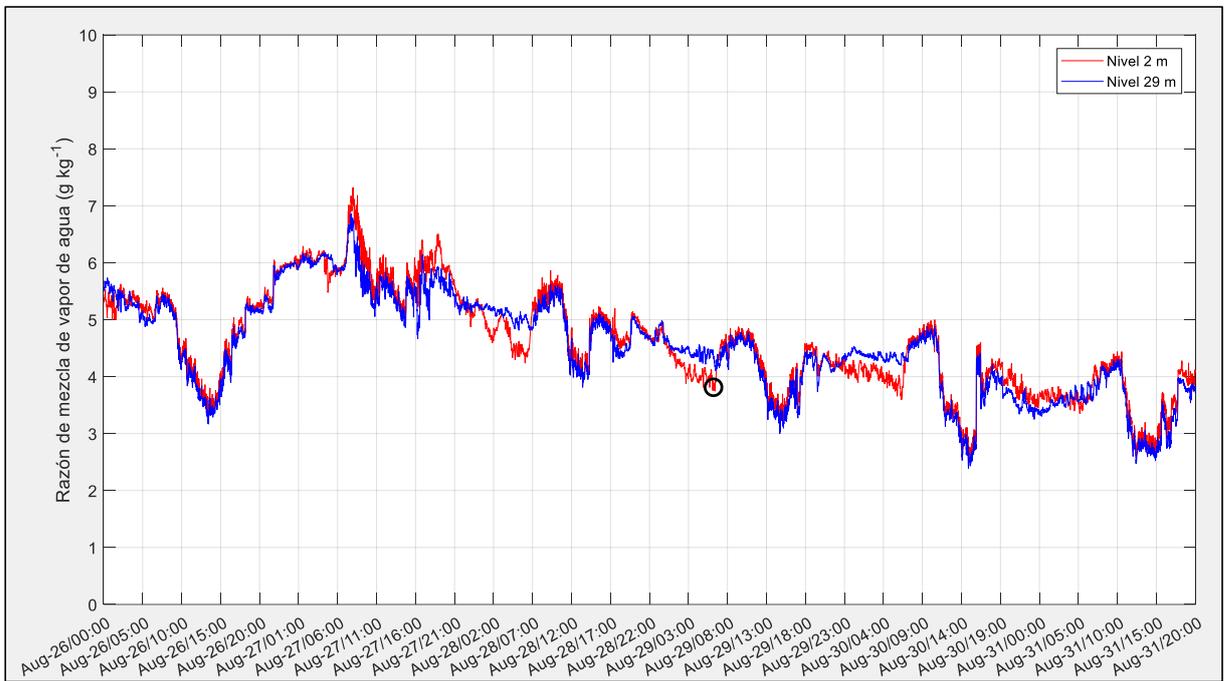


Figura 61. Variación de la razón de mezcla de vapor de agua dos días antes y dos días después del evento de helada del 29 de agosto del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

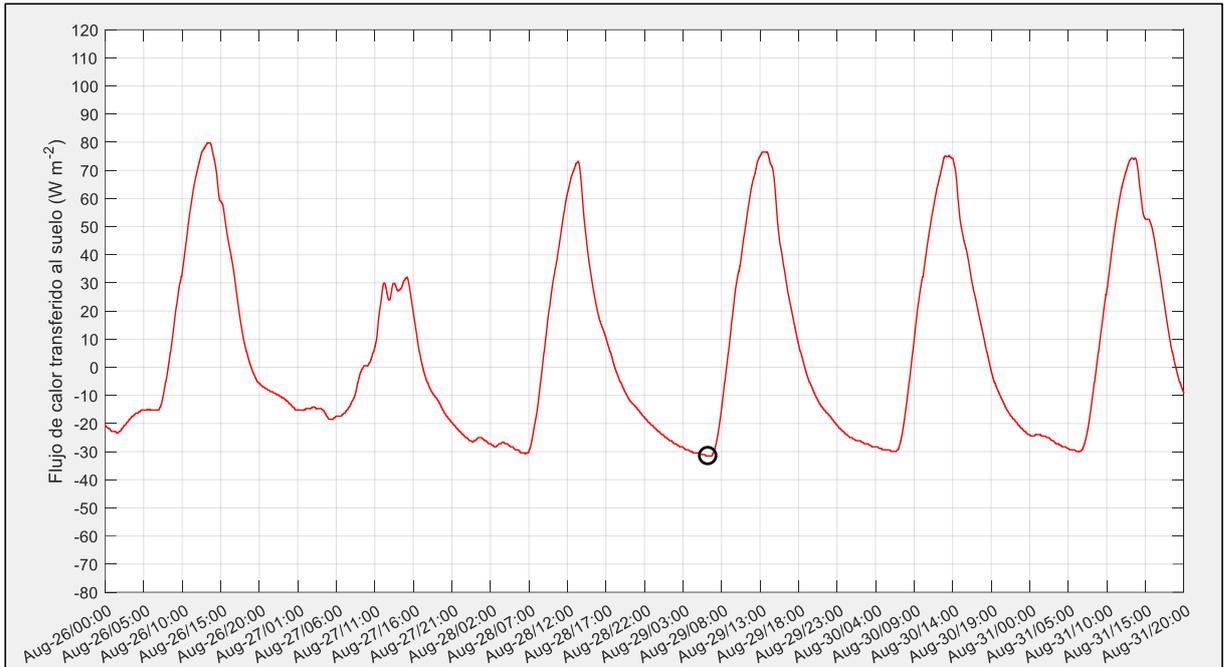


Figura 62. Variación del calor transferido al suelo dos días antes y dos días después del evento de helada del 29 de agosto del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

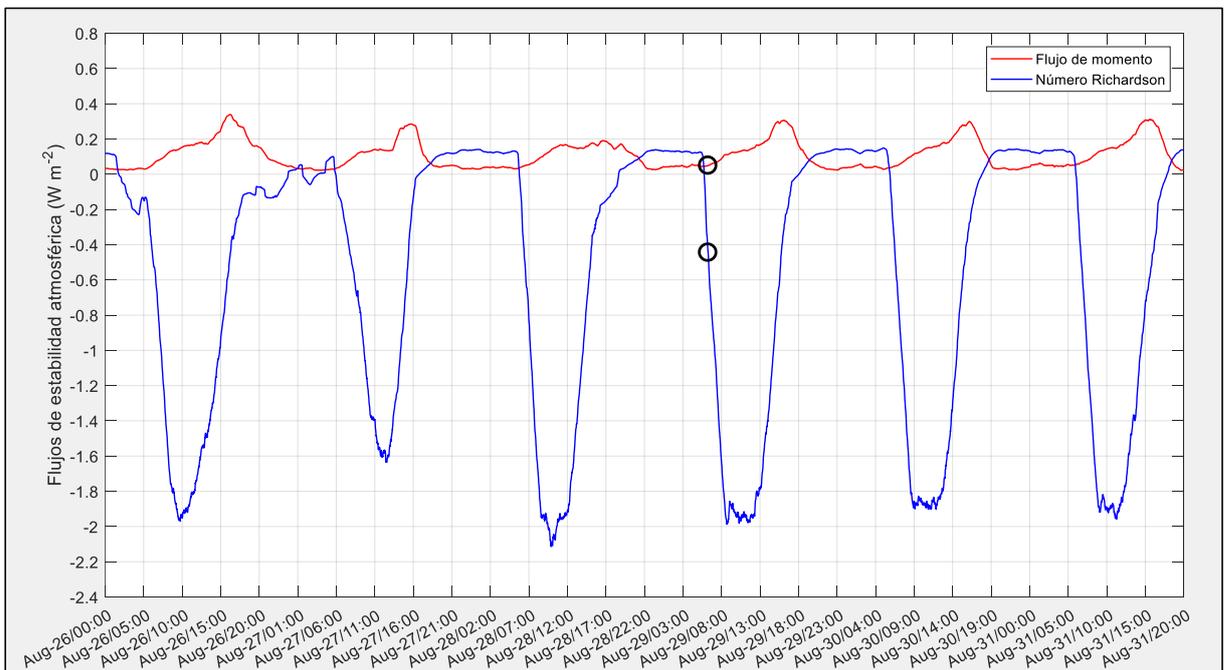


Figura 63. Variación del flujo de momento y el número de Richardson dos días antes y dos días después del evento de helada del 29 de agosto del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

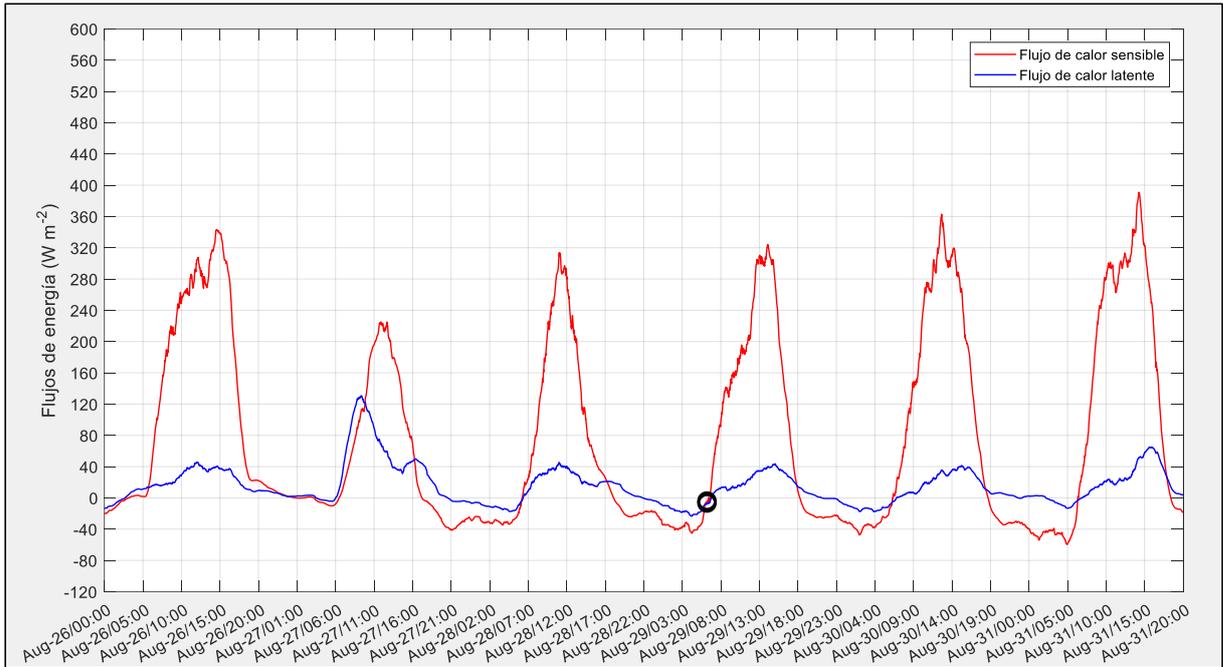


Figura 64. Variación del flujo de calor sensible y calor latente por el método de perfil aerodinámico modificado, dos días antes y dos días después del evento de helada del 29 de agosto del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

El flujo de calor transferido al suelo se mantuvo negativo para los eventos de mínima temperatura de los días 29, 30 y 31 de agosto alrededor de los -30 Wm^{-2} (Figura 62), posiblemente por el descenso de humedad reportado desde el 29 al 31 de agosto.

Durante el evento de heladas del 29 de agosto los valores del número de Richardson se reportaron negativos (Figura 63) lo que indicó una condición de inestabilidad atmosférica, pero valores de flujo de momento mínimos cercanos a cero que lo cual representó poca turbulencia (Figura 63).

Los valores calculados de calor sensible fueron negativos (Figura 64) lo cual indicó que la atmósfera perdió energía y que los niveles más bajos presentaron menor temperatura. Los valores negativos de calor latente (Figura 64) representaron la posible formación de rocío y escarcha sobre la superficie, ya que los valores de humedad relativa (82,92%) se reportaron muy elevados.

Tabla 21.

Valores de cobertura de nubes estimados por el sensor MODIS instalado en los satélites Terra y Aqua, desde el 27 al 31 de agosto del 2018.

COBERTURA DE NUBES 27/08/2018 - 31/08/2018 (29/08/2018, 06:16:00 HL Tmin = -1,1830 °C)							
SATÉLITE	FECHA Y HORA LOCAL		COBERTURA DE NUBES	SATÉLITE	FECHA Y HORA LOCAL		COBERTURA DE NUBES
MYD06-AQUA	27/08/2018	00:50:00	1,000000	MOD06-TERRA	29/08/2018	10:05:00	0,000000
MOD06-TERRA	27/08/2018	10:15:00	1,000000	MOD06-TERRA	29/08/2018	22:20:00	0,006667
MYD06-AQUA	27/08/2018	13:05:00	0,620000	MYD06-AQUA	30/08/2018	01:20:00	0,506670
MOD06-TERRA	27/08/2018	22:30:00	0,012000	MOD06-TERRA	30/08/2018	10:45:00	0,000000
MYD06-AQUA	28/08/2018	01:30:00	0,160000	MYD06-AQUA	30/08/2018	13:35:00	0,153850
MOD06-TERRA	28/08/2018	11:00:00	0,000000	MOD06-TERRA	30/08/2018	23:00:00	0,272000
MYD06-AQUA	28/08/2018	13:45:00	0,920000	MYD06-AQUA	31/08/2018	02:05:00	0,290000
MOD06-TERRA	28/08/2018	23:15:00	0,000000	MYD06-AQUA	31/08/2018	14:20:00	0,360000

El sensor MODIS reportó valores de cobertura de nubes cercanos a cero desde la noche del 28 de agosto a las 23:15 HL hasta la mañana del 29 de agosto a las 10:05 HL (Tabla 21), previo al evento de helada del amanecer del 29 de agosto a las 06:16 HL.

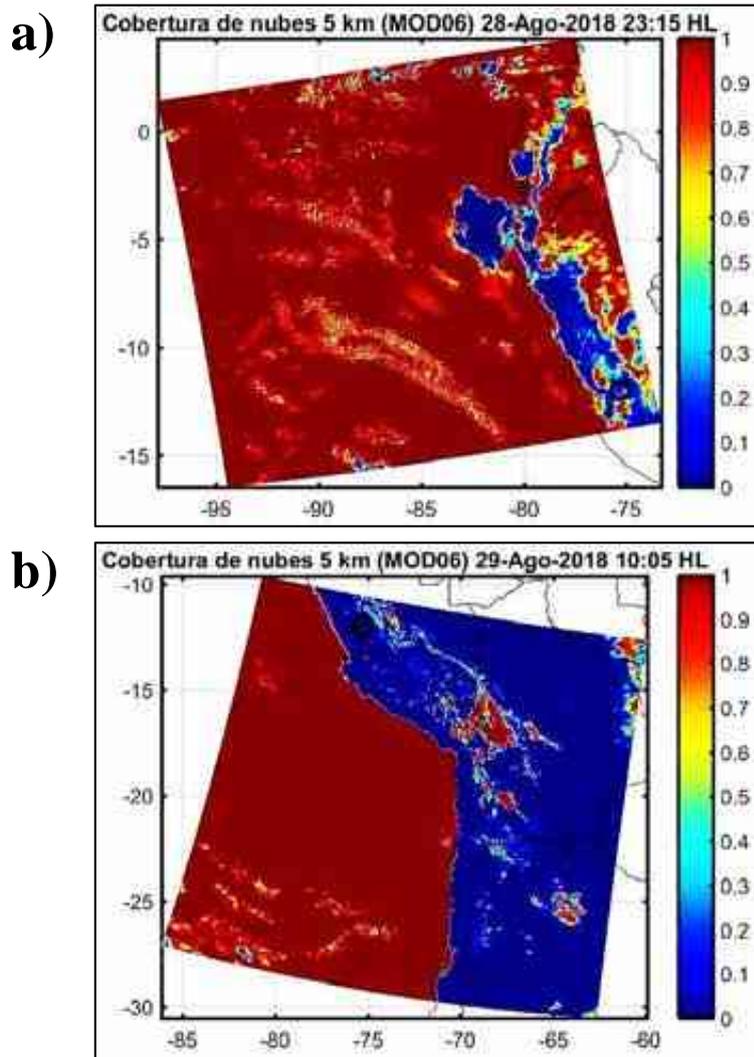


Figura 65. Producto de fracción de nubes (MODIS) para el evento de helada del 29 de agosto del 2018. a) Satélite Terra, 28 de agosto a las 23:15 HL y b) Satélite Terra, 29 de agosto a las 10:05 HL. El círculo negro representa la ubicación el Observatorio de Huancayo.

Los satélites Terra y Aqua realizaron sólo dos capturas de datos en sus sobrevuelos sobre el Observatorio de Huancayo, en horarios cercanos al de la ocurrencia del evento de helada en el amanecer del 29 de agosto. (*Figura 65*)

4.3.6. Evento de helada del 07 de setiembre del 2018 (-2,278 °C)

En el mes de setiembre sólo se reportó un evento extremo de mínima temperatura para el día 07 de setiembre (*Figura 66*), si bien los días 04, 05, 06 y 08 de agosto también se reportaron eventos de mínima temperatura por debajo de cero. Se eligió el evento del 07 de setiembre por ser el más intenso ya que a las 05:24 HL alcanzó un mínimo de temperatura de -2,278 °C.

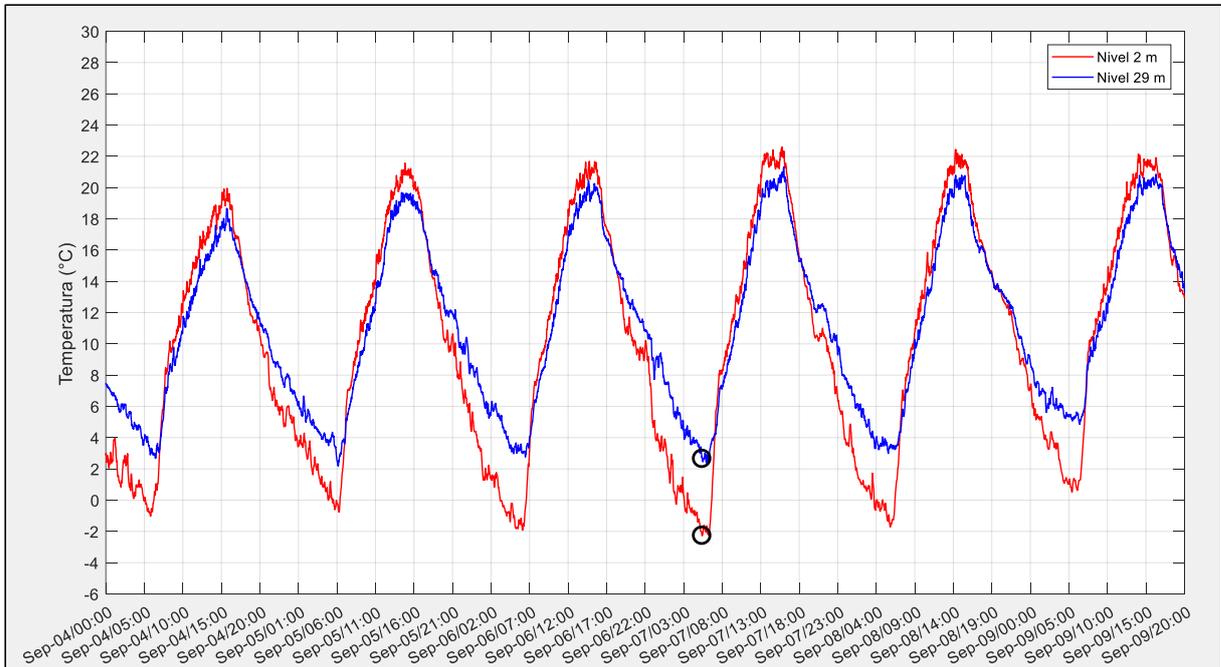


Figura 66. Variación de la temperatura dos días antes y dos días después del evento de helada del 7 de setiembre del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

La última precipitación ocurrió 11 días antes, el día 27 de agosto y tan sólo fue de 0,5 mm. (Anexo 1, *Figura 77b*), situación de sequía que posiblemente pudo originar la helada de la presente descripción

Debido a la falta de ocurrencia de lluvias durante este período los valores de humedad ambiental expresados en humedad relativa fueron menores, ya que fue de 49,49% (*Figura 67*), el menor registro de esta variable entre todos los eventos extremos de mínima temperatura.

El evento del 07 de setiembre describe claramente una condición ambiental de baja disponibilidad de humedad, lo cual se comprueba con los registros de razón de mezcla de vapor de agua que fueron de 2,103 g kg⁻¹, los menores registros durante un evento de helada en todo el período de estudio.

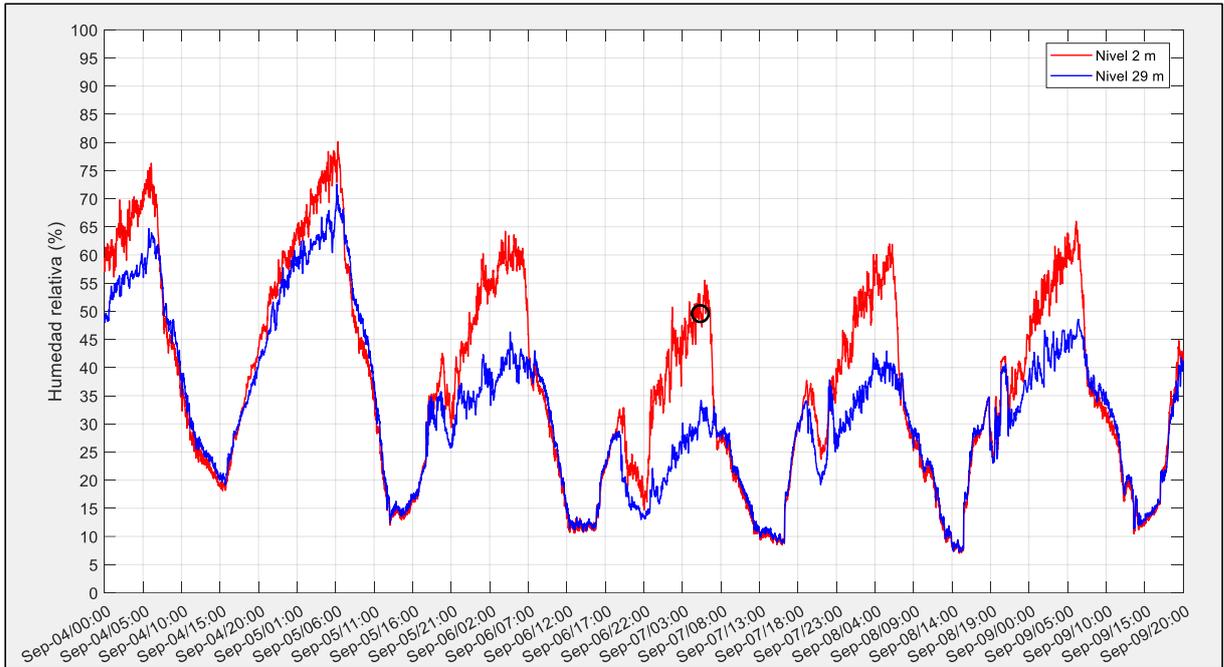


Figura 67. Variación de humedad relativa dos días antes y dos días después del evento de helada del 7 de setiembre del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

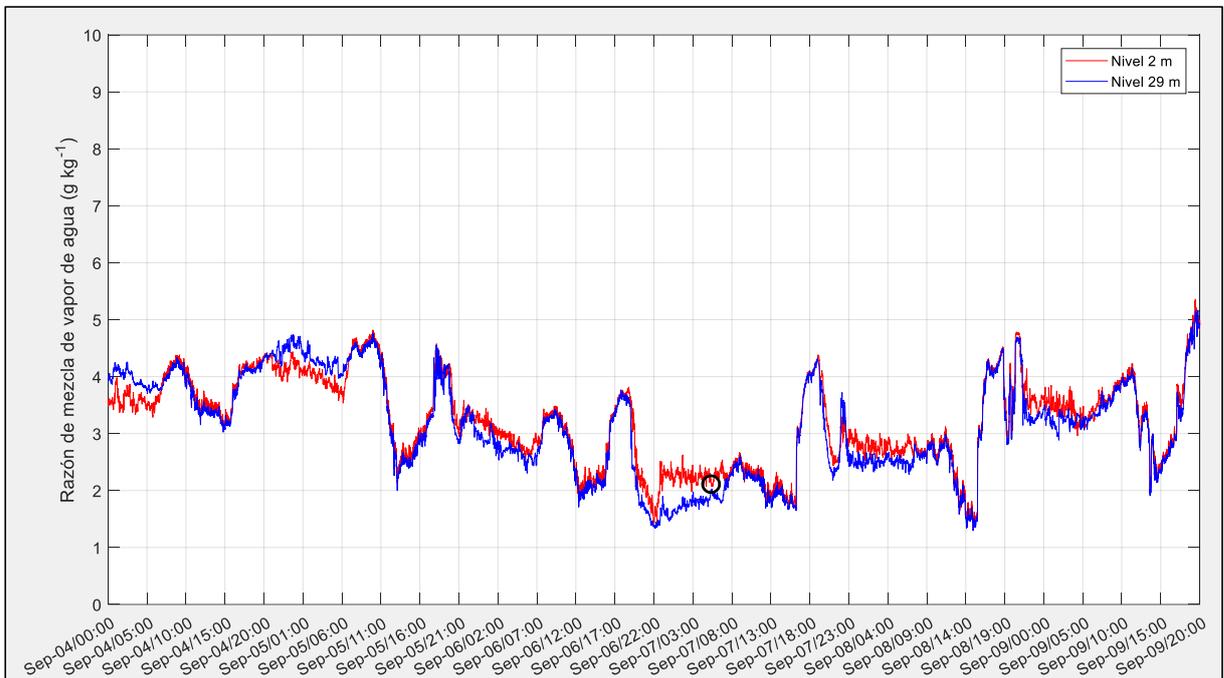


Figura 68. Variación de la razón de mezcla de vapor de agua dos días antes y dos días después del evento de helada del 07 de setiembre del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

El flujo de calor transferido al suelo se mantuvo naturalmente negativo con valores cercanos a los -30 Wm^{-2} desde el 04 al 09 de setiembre, alcanzando el mínimo valor más intenso ($-32,7 \text{ Wm}^{-2}$) el 07 de setiembre (Figura 69), posiblemente por la baja humedad del ambiente y la poca cobertura de nubes registrada por el sensor MODIS.

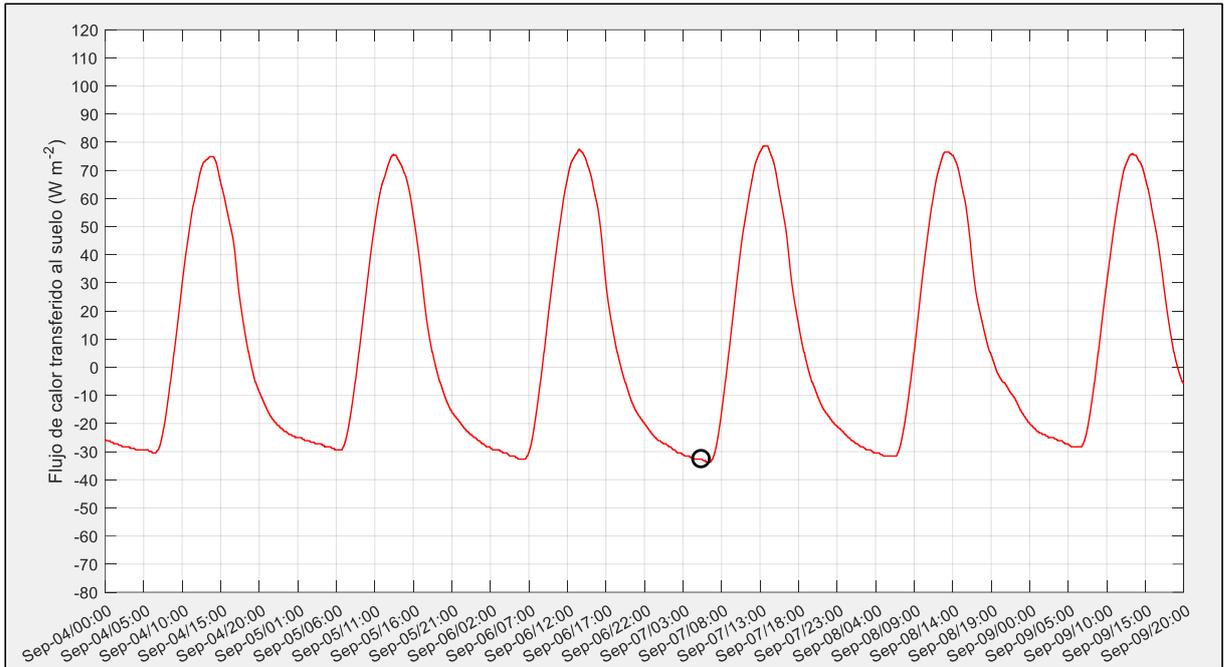


Figura 69. Variación del calor transferido al suelo dos días antes y dos días después del evento de helada del 07 de setiembre del 2018. El círculo negro indica la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

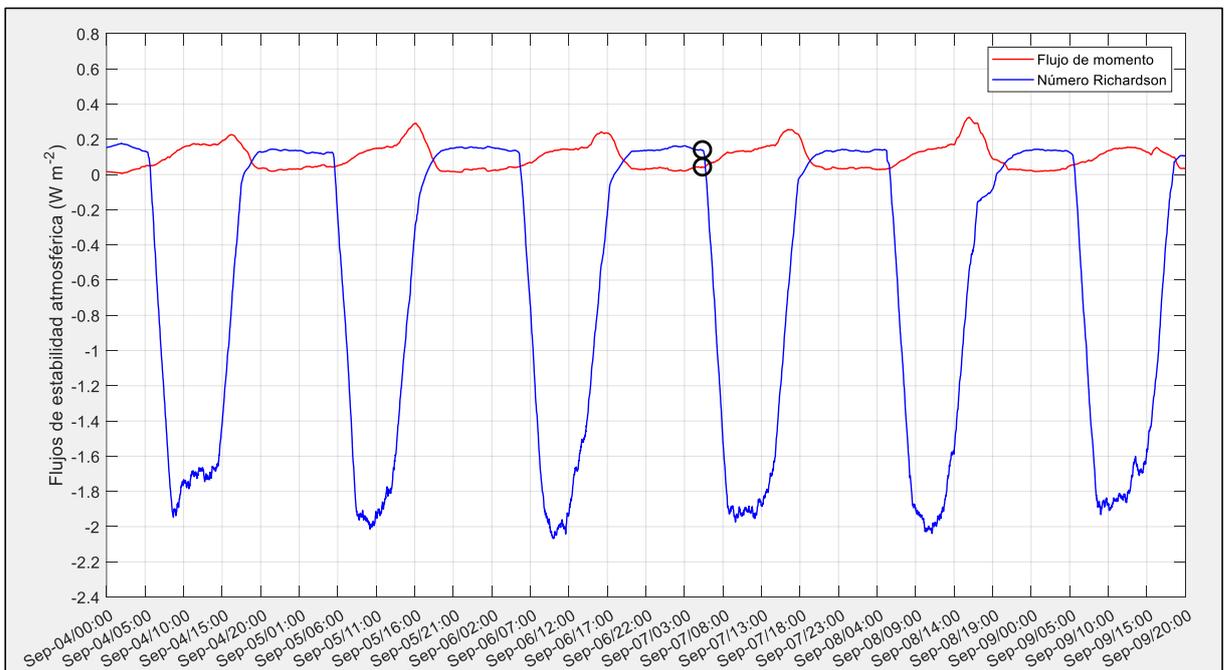


Figura 70. Variación del flujo de momento y el número de Richardson dos días antes y dos días después del evento de helada del 07 de setiembre del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

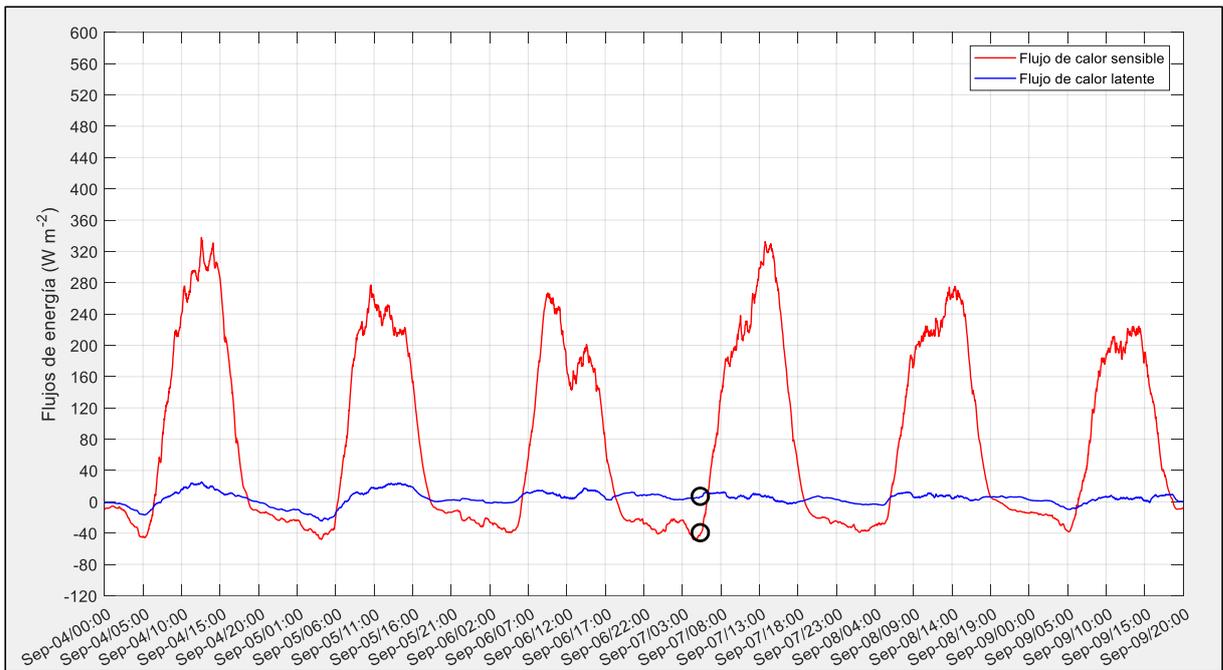


Figura 71. Variación del flujo de calor sensible y calor latente por el método de perfil aerodinámico modificado, dos días antes y dos días después del evento de helada del 07 de setiembre del 2018. Los círculos negros indican la hora exacta a la que se registró el evento de helada.

Durante la ocurrencia del único evento de helada en el mes de setiembre se presentaron condiciones normales de estabilidad atmosférica durante la noche, reportando valores del número de Richardson (Figura 70) positivos cercanos a cero lo cual se relaciona con los valores bajos de flujo de momento (Figura 70) que representa poca turbulencia en la atmósfera superficial.

Los valores calculados de calor sensible durante la noche de la ocurrencia del evento de helada fueron negativos (Figura 71), debido a que durante la noche la atmósfera perdió energía al cederla a la superficie y a que los niveles más bajos se encontraban más fríos. Los valores calculados de calor latente (Figura 71) fueron superiores a cero, lo cual indicó que el agua presente en la atmósfera continuó en estado de vapor sin llegar a condensarse.

Tabla 22.

Valores de cobertura de nubes estimados por el sensor MODIS instalado en los satélites Terra y Aqua, desde el 03 al 09 de setiembre del 2018.

COBERTURA DE NUBES 06/09/2018 - 09/09/2018 (07/09/2018, 05:24:00 HL Tmin = -2,278 °C)							
SATÉLITE	FECHA Y HORA LOCAL		COBERTURA DE NUBES	SATÉLITE	FECHA Y HORA LOCAL		COBERTURA DE NUBES
MOD06-TERRA	03/09/2018	13:10:00	0,560000	MOD06-TERRA	06/09/2018	23:05:00	0,010000
MYD06-AQUA	03/09/2018	22:35:00	0,003636	MOD06-TERRA	07/09/2018	09:55:00	0,000000
MOD06-TERRA	04/09/2018	01:40:00	0,000000	MYD06-AQUA	07/09/2018	14:25:00	0,000000
MYD06-AQUA	04/09/2018	13:55:00	0,080000	MOD06-TERRA	07/09/2018	22:10:00	0,000000
MOD06-TERRA	04/09/2018	23:20:00	0,000000	MYD06-AQUA	08/09/2018	01:15:00	0,000000
MOD06-TERRA	05/09/2018	10:10:00	0,000000	MYD06-AQUA	08/09/2018	13:30:00	0,004444
MOD06-TERRA	05/09/2018	22:25:00	0,014545	MOD06-TERRA	08/09/2018	22:55:00	0,000000
MYD06-AQUA	06/09/2018	01:25:00	0,008000	MYD06-AQUA	09/09/2018	01:55:00	0,340000
MOD06-TERRA	06/09/2018	10:50:00	0,000000	MOD06-TERRA	09/09/2018	09:45:00	0,100000
MYD06-AQUA	06/09/2018	13:40:00	0,012308	MYD06-AQUA	09/09/2018	14:10:00	0,010000

El sensor MODIS reportó valores de cobertura de nubes cercanos a cero desde la noche del 03 de setiembre a las 22:35 HL hasta la noche del 08 de setiembre a las 22:55 HL (Tabla 22). Período que coincide con los valores cercanos a los -30 Wm^{-2} del flujo de calor transferido al suelo desde el 04 al 09 de setiembre.

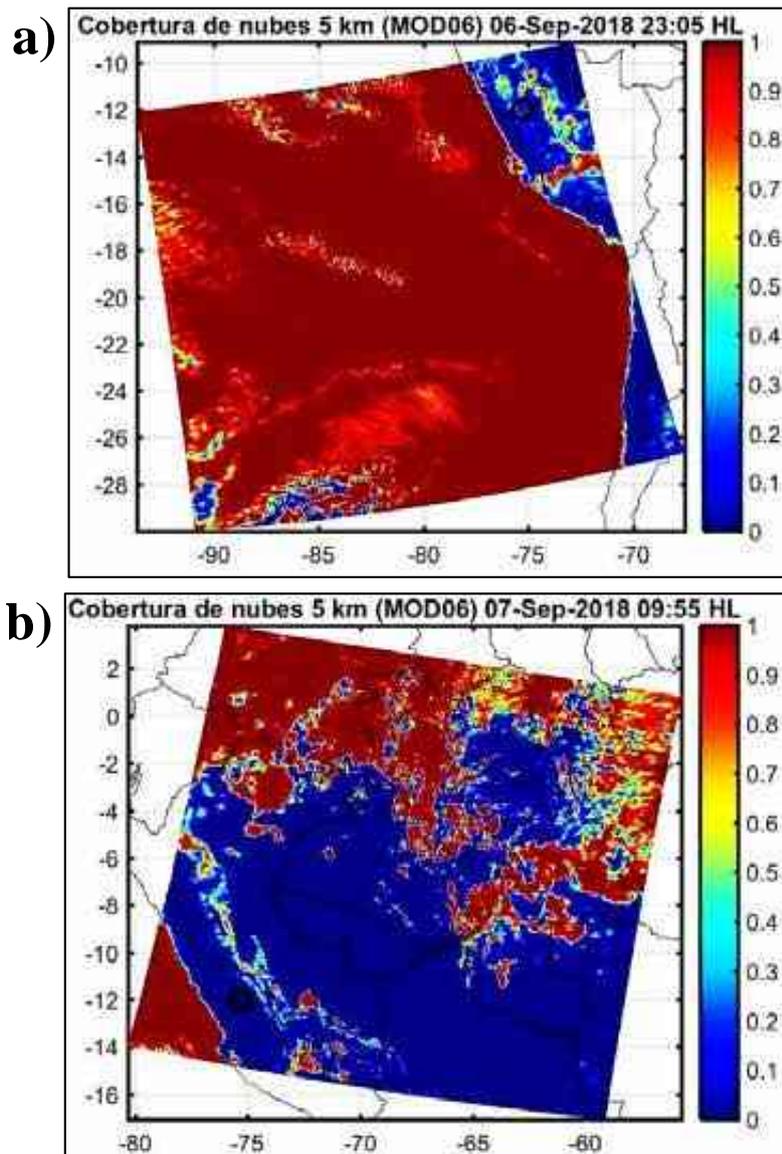


Figura 72. Producto de fracción de nubes (MODIS) para el evento de helada del 07 de setiembre del 2018. a) Satélite Terra, 06 de setiembre a las 23:05 HL y b) Satélite Terra, 07 de setiembre a las 09:55 HL. El círculo negro representa la ubicación del Observatorio de Huancayo.

Los satélites Terra y Aqua realizaron sólo dos capturas de datos en sus sobrevuelos sobre el Observatorio de Huancayo, en horarios cercanos al de la ocurrencia del evento de helada en el amanecer del 07 de setiembre. (Figura 72)

4.4. Comparación entre los métodos (Aerodinámico – Bowen)

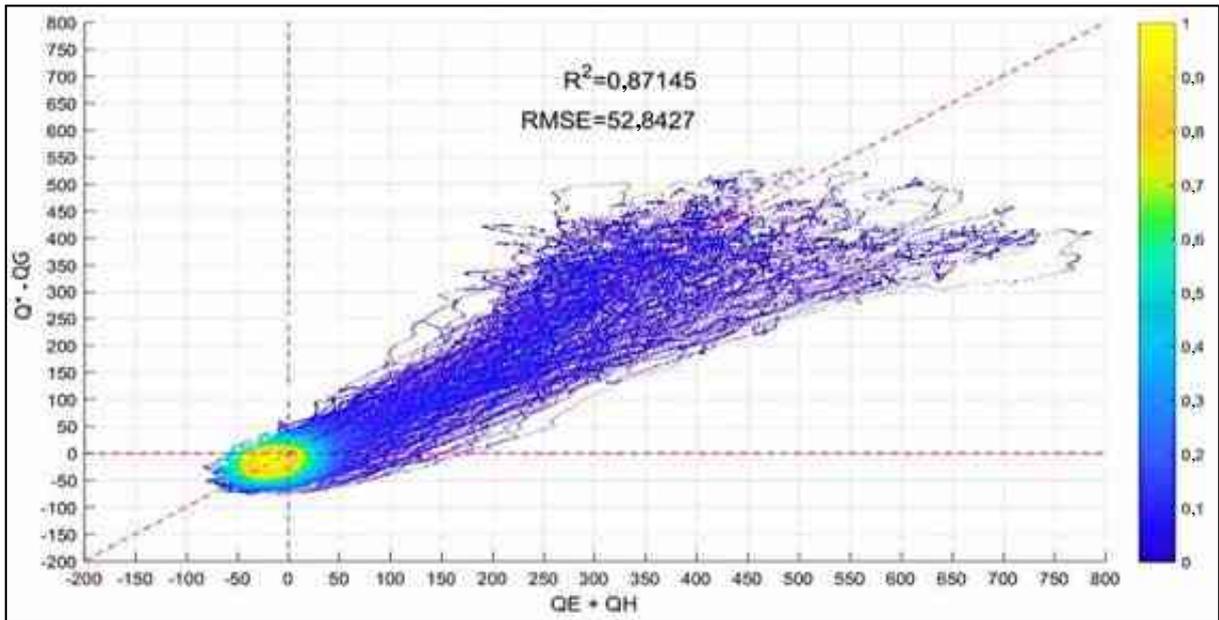


Figura 73. Comparación entre los flujos turbulentos de energía superficial del balance de energía superficial.

El balance de energía superficial para todos los datos desde mayo a setiembre del 2018, considerando sólo los flujos de radiación (Q^*), calor transferido al suelo (Q_G), calor latente (Q_E) y calor sensible (Q_H) (Foken, T.; Nappo, C., 2008), se ajustan muy bien cuando los valores de intercambio de energía son inferiores a los 150 Wm^{-2} , cuando se supera esos flujos el desequilibrio también aumenta y los valores ya no se ajustan para un balance energético cerrado. El desequilibrio en el balance energético es mínimo y natural, ya que sólo se están considerando los valores propuestos por el método del Balance de energía de Bowen, más no factores que también interfieren en el intercambio de energía de la superficie generando importante incertidumbre (Cuxart J., Conangla L. y Jiménez M. A., 2015), por el motivo de que no se cuenta con la instrumentación adecuada y que no es el tema de estudio de la presente investigación.

Cuando el presupuesto energético de superficie se determina experimentalmente, el desequilibrio es una parte inevitable que puede ser entre el 10-15% en condiciones de gran homogeneidad, como en el caso de la campaña de EBEX (Oncley, S.; et al., 2007) y a medida que el terreno se vuelve más heterogéneo, como en el caso de LITFASS-2003 (Foken, T.; et al, 2010), o topográficamente más complejo, el desequilibrio varía entre el 20-35% (Cuxart, J.; et al., 2016). Para el presente estudio se utilizaron los 6 niveles de medición de la torre de gradiente meteorológica que registraron valores de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y flujo de calor transferido al suelo.

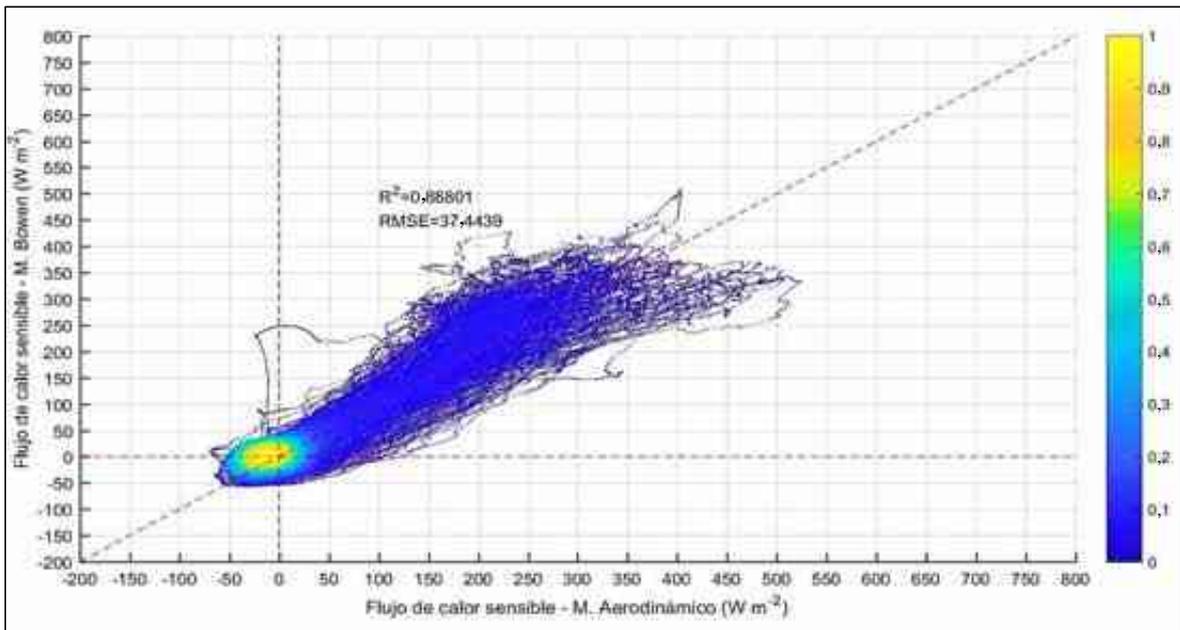


Figura 74. Comparación entre los valores de calor sensible calculados por el método de perfil aerodinámico modificado y el método del balance de energía de Bowen, mayo a setiembre del 2018.

Al comparar los valores de calor sensible obtenidos por el Método de Perfil Aerodinámico Modificado con el Método de Balance de Energía de Bowen, se calculó que existe un alto valor de correlación $R^2=0,888$ (Figura 74), lo cual indica que la obtención de dicho valor para ambos métodos es muy similar. La mayor correlación se presenta desde los valores mínimos hasta aproximadamente los 250 W m^{-2} . El error medio cuadrático (RMSE) obtenido no es representativo para la cantidad de energía superficial que interactúa en el período de estudio.

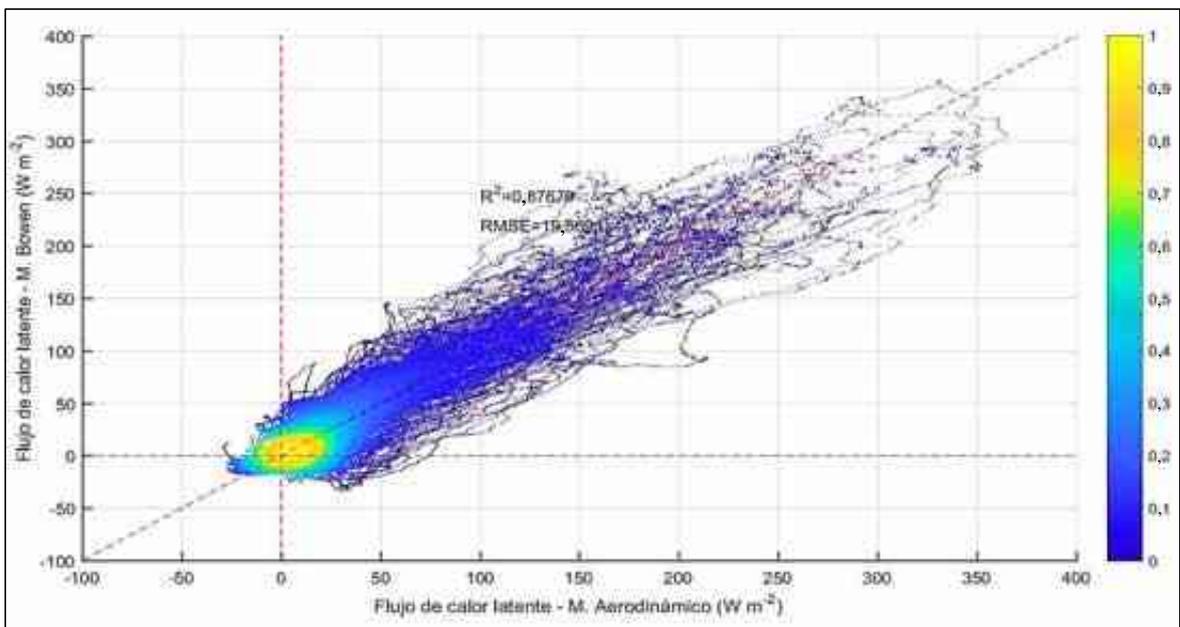


Figura 75. Comparación entre los valores de calor latente calculados por el método de perfil aerodinámico modificado y el método del balance de energía de Bowen, mayo a setiembre del 2018.

En la comparación de los valores de calor latente, obtenidos el Método de Perfil Aerodinámico y el Balance de Energía de Bowen, también se presentaron valores de correlación muy altos ($R^2=0,877$), (*Figura 75*), lo cual indica que también hubo mucha similitud entre los valores obtenidos por ambos métodos.

En esta comparación se presenta la mayor correlación desde los valores mínimos hasta aproximadamente los 120 Wm^{-2} y mientras más ascienden los valores de flujo de calor latente calculados por ambos métodos, menor es la correlación. El error medio cuadrático (RMSE) obtenido no es representativo para la cantidad de energía superficial que interactúa en el período de estudio.

CAPÍTULO V.

DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Discusión de resultados

En este trabajo se analizaron las variables meteorológicas principales y se estimaron los flujos de energía superficial de calor latente y calor sensible. En tal sentido en este apartado se presentan la discusión de los resultados obtenidos para el estudio de heladas en el Observatorio de Huancayo.

La variable de humedad relativa presentó una variación inversa con respecto a la temperatura, debido a ello durante la noche los niveles inferiores presentaron valores más altos con respecto a los niveles superiores. Entre las 09:00 y 17:00 HL del día aproximadamente, los valores de humedad relativa en los niveles superiores e inferiores descienden por la incidencia de la radiación solar siendo siempre los niveles inferiores los que registran los menores valores, por estar más cerca de la superficie que recibe la radiación solar y se libera la humedad superficial hacia las partes más altas.

Los promedios horarios de la variación de la dirección del viento mostraron que durante la noche existe una predominancia de dirección del viento proveniente del suroeste y oeste mientras que durante el día la predominancia de dirección del viento proviene del este y sureste. Este cambio de dirección del viento a lo largo del día se asoció a los efectos de la circulación valle-montaña, debido a que los vientos durante el día se mueven de manera ascendente desde el valle hacia las laderas, y durante la noche desde las partes altas de las laderas hacia el valle. Y según la ubicación del Observatorio de Huancayo que se encuentra al oeste del valle del Mantaro, se puede ver los efectos de la circulación valle-montaña debido las condiciones orográficas que fuerzan de esta circulación.

Se estimaron los flujos turbulentos de calor latente y calor sensible mediante el método de perfil aerodinámico modificado y el balance de energía de Bowen. Los resultados mostraron una correlación muy alta entre los flujos de calor sensible ($R^2=0,888$) hasta aproximadamente los 250 Wm^{-2} y calor latente ($R^2=0,877$) hasta aproximadamente los 120 Wm^{-2} calculados por ambos métodos, mostrando que los

valores calculados por el Método de Perfil Aerodinámico Modificado presentan mayores valores de energía cuando se compara con el Método de Bowen debido a que este método sólo considera a los valores de radiación neta (Q^*), flujo de calor transferido al suelo (Q_G), calor latente (Q_E) y calor sensible (Q_H), dejando de lado a variables que pueden representar también una adición o sustracción en el intercambio de energía (desequilibrio energético). Solamente considerar las mencionadas variables, fuerza el balance añadiendo cantidades a la radiación neta o distribuyéndola según la razón de Bowen entre el calor sensible y el calor latente (Foken y Nappo, 2008), generando importantes incertidumbres (Cuxart *et al.*, 2015)

De los 6 eventos de heladas seleccionados durante la temporada seca (mayo-setiembre, 2018) resaltan los dos eventos de heladas del 08 de julio y el 07 de setiembre. El 08 de julio a las 06:36 HL se produjo el evento más intenso de helada que fue de $-5,144$ °C, propio de la temporada, pero el más intenso de la campaña de observaciones registrando 64,85% de humedad relativa y valores de cobertura de nubes cercanos a cero un día antes y un día después del evento. El evento de helada del 07 de setiembre se consideró anormal, ya que luego de la última helada de agosto del 29 de agosto, se esperaba que los valores de temperatura mínima se elevaran. Es muy posible que el período de sequías durante varias semanas pudiera haber sido una de las causas de la ocurrencia del evento de helada del 07 de setiembre, ya que la humedad relativa para este evento fue de 49,49% (el menor valor de humedad relativa de los eventos de heladas seleccionados).

Para los eventos de heladas del 17 de julio y 28 de agosto, los sobrevuelos del sensor MODIS detectaron presencia de cobertura de nube cercana 1 (cielo cubierto) un día antes de la ocurrencia de esos eventos extremos de heladas, si bien se indicó que el cielo cubierto puede contrarrestar los efectos de la ocurrencia de un evento intenso de mínima temperatura, se pudo comprobar que esos registros de cielo cubierto corresponden a los sobrevuelos del satélite Aqua entre las 13:00 – 14:00 HL, y el efecto invernadero o de abrigo que ejercen las nubes es más influyente en contrarrestar la intensidad de los eventos de heladas cuando su presencia es por las noches.

Los valores de calor latente (Q_E) durante la ocurrencia de los eventos de heladas del 21 de junio, 17 de julio y 29 de agosto, se reportaron negativos. En la explicación de dichos eventos se detalló que aquellos valores pudieron deberse a la condensación de pequeñas cantidades de vapor de agua que formaron rocío y luego escarcha, pero también podría deberse a que dichos valores estimados de calor latente pueden estar

sujetos a error, ya que no se pudo obtener evidencia visual del cambio de estado del vapor de agua en la superficie.

5.2. Conclusiones

Los eventos de heladas son los principales eventos meteorológicos extremos que causan daños importantes a la agricultura y salud de la población del departamento de Junín, el mismo que se encuentra en tercer lugar de exposición de nivel alto de susceptibilidad por heladas. En tal sentido el presente trabajo de investigación tuvo como principal objetivo estimar los flujos de energía superficial de calor latente y calor sensible en el Observatorio de Huancayo por el Método de Perfil Aerodinámico Modificado y el Método de Balance de Energía de Bowen para entender el comportamiento energético de estos flujos durante la ocurrencia de heladas.

Complementariamente se analizó los promedios horarios de los ciclos diurnos de las variables meteorológicas, se identificó al mes de julio como el de menores valores de promedio horario de temperatura ($1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 2 metros) y de razón de mezcla de vapor de agua ($< 4,5\text{ g kg}^{-1}$ a 2 metros) durante las primeras horas de la mañana (05:00, 06:00 y 07:00 HL).

Si bien los eventos de heladas causan mucho más daño en la temporada de siembra, crecimiento y cosecha de los productos agrícolas en un valle, los datos recolectados durante la presente investigación (mayo - setiembre) permitieron entender mejor el comportamiento de los flujos de calor latente y calor sensible de estas heladas y que estimados mediante los métodos propuestos durante la temporada seca, que es cuando ocurren con mayor frecuencia y son mucho más intensos.

Para poder llegar a estas conclusiones, se abordaron los siguientes objetivos específicos:

Objetivo específico 1: Identificar los eventos de heladas en el período mayo – setiembre del 2018 utilizando los sensores meteorológicos de la torre de gradiente y el sensor MODIS – NASA, en el Observatorio de Huancayo.

Se identificó y caracterizó los seis eventos extremos heladas entre mayo y setiembre del 2018 con los registros de temperatura a 2 metros de altura de la torre de gradiente. Se procesó los productos de cobertura de nubes del sensor MODIS ubicados en los satélites Terra y Aqua de la NASA y se determinó que estos seis eventos más intensos estaban precedidos de hasta tres días de poca cobertura de nubes o de cielo

despejado, lo cual permitió categorizarlos de acuerdo a su formación en eventos de heladas radiativas.

El evento de helada más intenso identificado durante el período de estudio del presente trabajo fue de $-5,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ el 08 de julio del 2018 a las 06:36 HL y con ayuda del sensor MODIS se pudo determinar que estuvo precedido de casi dos días de cobertura de nubes cercanos a cero.

Objetivo específico 2: Estimar los flujos turbulentos de energía superficial mediante el método de perfil aerodinámico, durante los eventos de heladas en el período mayo – setiembre del 2018, en el Observatorio de Huancayo.

Fue posible estimar los flujos turbulentos de energía superficial mediante el método de perfil aerodinámico modificado durante los eventos de heladas del período de observaciones, reportando para el evento extremo el 08 de julio $12,6\text{ Wm}^{-2}$ de calor latente, un valor bastante bajo cercano a cero lo cual pudo representar condensación en la superficie pero posiblemente no se formó escarcha debido a los bajos registros de razón de mezcla de vapor de agua. El calor sensible fue de $18,5\text{ Wm}^{-2}$ luego de haber permanecido bastante bajo y negativo durante la noche previa al evento de helada, entendiendo que se produjo una mayor pérdida de calor en la superficie.

Objetivo específico 2: Estimar los flujos turbulentos de energía superficial mediante el método de perfil aerodinámico, durante los eventos de heladas en el período mayo – setiembre del 2018, en el Observatorio de Huancayo.

Al comparar los flujos de energía turbulenta estimados por el método de perfil aerodinámico modificado y el método de relación de balance de energía de Bowen se obtuvo una correlación muy alta para ambos flujos, se obtuvo un $R^2=0,888$ para el calor sensible y la mayor correlación se presentó desde los valores mínimos hasta aproximadamente los 250 Wm^{-2} . Para el calor latente se obtuvo un $R^2=0,877$ y mostró una mayor correlación desde los valores mínimos hasta aproximadamente los 120 Wm^{-2} .

Conclusiones adicionales.

Los flujos turbulentos de energía superficial estimados en la presente investigación servirán para la elaboración de un sistema de pronóstico de heladas en el valle del Mantaro, el aporte es importante ya que es la primera vez que estos flujos turbulentos son estimados por métodos numéricos e instrumentación sofisticada en la zona.

El análisis del ciclo diurno de los promedios horarios de las variables meteorológicas durante el período de observaciones permitió comprender el desfase horario de temperatura máxima entre las 13 HL y 15 HL, la inversión térmica con los perfiles verticales, la relación inversa del comportamiento de la temperatura y la humedad relativa. Los máximos valores promedios de velocidad de viento se reportaron entre las 17 HL y 18 HL, las noches son bastantes calmadas con valores cercanos a 1,58 m/s. Mientras que los promedios horarios de dirección del viento mostraron un comportamiento de circulación valle-montaña, cuando durante el día la dirección del viento es desde el centro del valle hacia las laderas y durante las noches en dirección contraria. Los valores de radiación directa mostraron los máximos al mediodía y los valores de radiación directa fueron mayores en mayo y setiembre debido a la poca cobertura de nubes.

5.3. Recomendaciones

Para el cálculo de la radiación neta se utilizaron datos de la estación de radiación BSRN, la misma que sólo cuenta con una memoria de 10 Mb (muy poca capacidad), esto podría representar la pérdida de algunos registros si los mismos no son descargados a tiempo antes de que se sobrescriban. Se recomienda acondicionar una memoria de mayor capacidad o un adaptador para establecer la conexión a internet de los datos, tal como ya cuentan otros instrumentos del Observatorio de Huancayo.

Mantener el registro de datos de los instrumentos meteorológicos de la torre de gradiente meteorológica y la estación de radiación para próximos estudios durante la temporada húmeda.

El período de estudio del presente trabajo comprende sólo la temporada seca (ausencia de lluvias entre mayo a setiembre), lo cual representa una limitación temporal si se pretende entender la ocurrencia de heladas durante todo el año en el valle del Mantaro. Se recomienda replicar la metodología aquí presentada para la temporada de lluvias cuando los cultivos son más susceptibles a las temperaturas mínimas extremas por debajo de 0 °C.

Es muy probable que los valores cercanos a cero de calor latente durante la ocurrencia de heladas representen la formación de rocío, y los valores negativos la formación de escarcha sobre la superficie, se recomienda para futuros estudios utilizando la misma metodología poder comprobar estas posibilidades.

Los métodos de Perfil Aerodinámico Modificado y el Balance de Energía de Bowen calculan los flujos turbulentos de energía superficial de calor latente y calor sensible mediante estimación por métodos numéricos, pero existe instrumentación como el higrómetro sónico Krypton KH20 para la medición directa de los flujos turbulentos el cual no estaba operativo durante el período de estudio de la presente investigación, se recomienda utilizar este equipo cuando se encuentre habilitado para comparar los registros obtenidos por los métodos numéricos aquí presentados. La instrumentación meteorológica adquirida por el Instituto Geofísico del Perú, la cual se utilizó en la presente investigación, y los datos que se siguen recolectando de manera ininterrumpida cada minuto en el Observatorio de Huancayo, servirán para futuros estudios de diversas temáticas relacionadas a la capa límite superficial y micrometeorología en el valle del Mantaro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arya, S. (1988). *Introduction to Micrometeorology. 2nd Edition*. North Carolina State University, Raleigh, U.S.A.: James Holton.
- Berens, P. (2009). CircStat: A MATLAB Toolbox for Circular Statistics. *Journal of Statistical Software* 31, 1-20. DOI: 10.18637/jss.v031.i10.
- Beringer, J.; Tapper, N. (2000). The influence of subtropical cold fronts on the surface energy balance of a semi-arid site. *Journal of Arid Environments* 44, 437 - 450. DOI: 10.1006/jare.1999.0608.
- Bowen, I. S. (1926). The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, 779 - 787. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.27.779>.
- Campbell Scientific. (2018). *Campbell Scientific PC400*. Retrieved Enero 10, 2018, from <https://www.campbellsci.es/pc400>
- Campbell Scientific, Inc. (2016). *Manual de usuario - Placa sensor de medición de flujo transmitido al suelo HFP01*.
- Campbell Scientific, Inc. (2017). *Manual de usuario - Sensor de dirección de viento Met One 024A*.
- Campbell Scientific, Inc. (2017). *Manual de usuario - Sonda de temperatura y humedad relativa HMP60*.
- Campbell Scientific, Inc. (2018). *Manual de usuario Set de Sensores de Viento 03002, Anemómetro 03101 y Velea de dirección de viento 03301*.
- CENEPRED. (2018). *Escenarios de riesgos por heladas y friajes en el marco del plan multisectorial multianual 2019 - 2021*. Lima: Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres.
- Cuxart, J.; Conangla, L.; Jiménez, M. A. (2015). Evaluation of the surface energy budget equation with experimental data and the ECMWF model in the Ebro valley. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120, 1008-1022. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014JD022296>.
- Cuxart, J.; Wrenger, B.; Martínez-Villagrasa, D.; Reuder, J.; Jonassen, M. O.; Jiménez, M. A.; Lothon, M.; Lohou, F.; Hartogensis, O.; Dünnermann, J.; Conangla, L.; Garai, Anirban. (2016). Estimation of the advection effects induced by surface

- heterogeneities in the surface energy budget. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9489-9504. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-16-9489-2016>.
- FAO. (2010). *Protección contra heladas: fundamentos, práctica y economía*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Foken, T.; Mauder, M.; Liebethal, C.; Wimmer, F.; Beyrich, F.; Leps, J. P.; Raasch, S.; DeBruin, H.; Meijninger, W.; Bange, J.;. (2010). Energy balance closure for the LITFASS-2003 experiment. *Theor Appl Climatol* 101, 149-160. Recuperado de [10.1007/s00704-009-0216-8](https://doi.org/10.1007/s00704-009-0216-8).
- Foken, T.; Nappo, C. (2008). *Micrometeorology*. Bayreuth - Alemania: Springer. Recuperado de <https://www.springer.com/gp/book/9783540746669>.
- Foken, T.; Richter, S.; Muller, H. (1997b). Zur genauigkeit der bowen-ratio-methode. *Wetter und Leben* 49, 57 - 77.
- Garay, O.; Ochoa, A. (2010). Subproyecto "Pronóstico Estacional de Lluvias y Temperaturas en la Cuenca del río Mantaro para su Aplicación en la Agricultura" 2007-2010. *Primera aproximación para la identificación de los diferentes tipos de suelo agrícola en el valle del río Mantaro*. Lima, Perú: Instituto Geofísico del Perú.
- Guevara Díaz, J. (2013). Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. *Terra Nueva Etapa*, 81-101. Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1012-70892013000200006&lng=es&tlng=es.
- IGP - Instituto Geofísico del Perú. (2005). *Diagnóstico de la cuenca del Mantaro bajo la visión del cambio climático*. Lima: CONAM - Consejo Nacional del Ambiente.
- Jammalamadaka, S.; Sengupta, A. (2001). *Topics in Circular Statistics*. Singap: World Sci.
- Kipp & Zonen. (2008). *Manual de usuario - Pirheliómetro CHP1*.
- Kipp & Zonen. (2014). *Manual de usuario - Pirgeómetro CGR4*.
- Kipp & Zonen. (2018). *Manual de usuario - Piranómetro CMP21*.
- LAADS DAAC - NASA. (2018). Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System Distributed Active Archive Center. Recuperado de https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/3/MYD06_L2--61,MOD06_L2--61/2018-05-15..2018-08-31/DNB/-80.1,-7.1,-72,-15.2.
- Malek E., McCurdy G., Giles B. (1999). Dew contribution to the annual water balances in semi-arid desert valleys. *Journal of Arid Environments* 42, 71 - 80. DOI: <https://doi.org/10.1006/jare.1999.0506>.

- Malek, E., Bingham, G., & McCurdy, G. (1990). Evapotranspiration from the margin and moist playa of closed desert valley. *Journal of Hydrology* 120, 15-34. DOI: DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(90\)90139-O](https://doi.org/10.1016/0022-1694(90)90139-O).
- Malek, E.; Bingham, G. (1997). Partitioning of radiation and energy balance components in an inhomogeneous desert valley. *Journal of Arid Environments* 37, 193 – 207. DOI: <https://doi.org/10.1006/jare.1997.0279>.
- Monin, A. S.; Obukhov, A. M. (1954). Basic laws of turbulent mixing in the surface layer. *Tr. Akad. Nauk SSSR Geophys. Inst.* 24 (151), 163-187.
- Monitorización ambiental Efesaro. (2020). Recuperado de <https://www.efesaro.com/contenido-agua-temperatura-decagon-5tm/>.
- NASA. (2018, Octubre 01). *GODDARD SPACE FLIGHT CENTER*. Retrieved from https://web.archive.org/web/20090912191715/http://aqua.nasa.gov/about/instrument_modis.php
- Oke, T. (1987). *Boundary Layer Climates*. Londres: Taylor and Frances Group.
- Oke, T. (2006). *Boundary Layer Climates, 2nd Edition*. Londres: Taylor & Francis Group.
- Oncley, S.; et al. (2007). The energy balance experimental EBEX-2000. Part 1: overview and energy balance. *Boundary-Layer Meteorol* 123, 1-28.
- Pessl Instruments. (n.d.). *Información del sensor de humedad del suelo Decagon 5TM*. Weiz, Austria: METOS.
- Prueger, J.; Kustas, W. (2005). *Aerodynamic methods for estimation turbulent fluxes, 1st Edition*. USDAARS / UNL Faculty.
- Saavedra Huanca, M. (2013). *Caracterización física de las heladas radiativas en el valle del Mantaro*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Tesis pregrado). Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12816/964>.
- Saavedra, M.; Takahashi, K. (2017). Physical controls on frost events in the central Andes of Peru using in situ observations and energy flux models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 239, 58–70. doi:10.1016/j.agrformet.2017.02.019
- Sánchez, J. M. (1985). *Caracterización de las heladas en Guatemala*. INSIVUMEH.
- Silva, B., Strobl, S., Beck, E., & Bendix, J. (2016). Canopy evapotranspiration, leaf transpiration and water use efficiency of an andean pasture in se ecuador a case study. *Erdkunde* 70, 5-18.
- Snyder, R. L. ; De Melo-Abreu, J. P; Matulich, S. (2005). *Frost Protection: Fundamentals, Vol. II. United Nations*. Rome: Food and Agriculture Organization.

- The MathWorks, Inc. (2019). *MathWorks*. Retrieved from https://la.mathworks.com/help/matlab/language-fundamentals.html?s_tid=CRUX_lftnav
- Universidad de Sevilla. (2018). *Vientos de montaña*. Retrieved from http://kartenn.es/salida-itinerante-geografia/?page_id=188
- Yela, R. (2016). El espectro electromagnético 1 NASA (Español). Recuperado de <http://richarddjstev.blogspot.com/2016/09/el-espectro-electromagnetico-1-nasa.html>.
- Yin, J.; Porporato, A. (2017). Diurnal cloud cycle biases in climate models. *Nat. Comunitario*, 8, 2269. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02369-4>.

ANEXOS

ANEXO 1.

Registros de precipitación desde mayo a setiembre del 2018

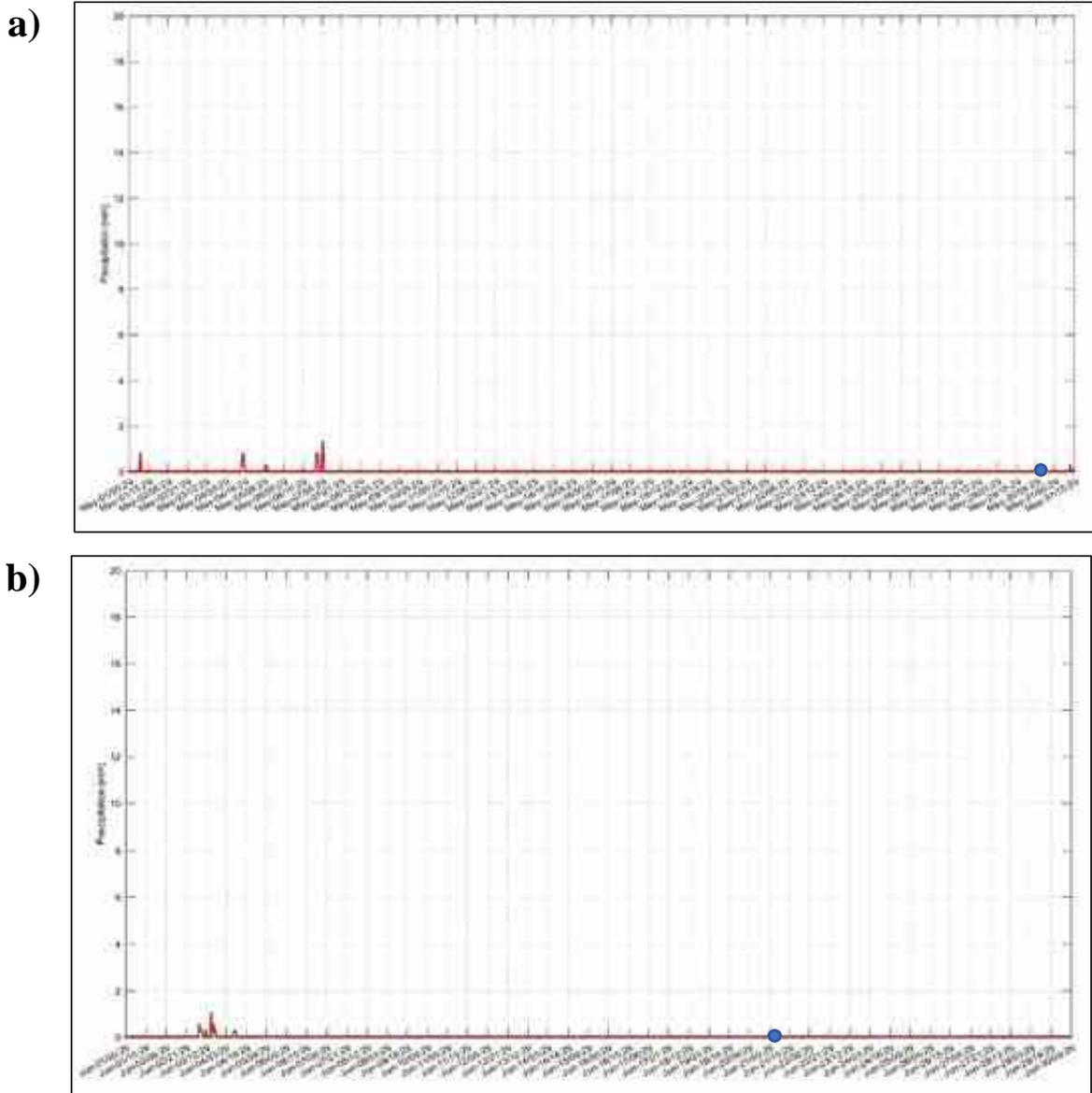


Figura 76. Registros de precipitación de la estación meteorológica automática del Observatorio de Huancayo, a) mayo del 2018 y b) junio del 2018. Los puntos azules representan los eventos más intensos de heladas.

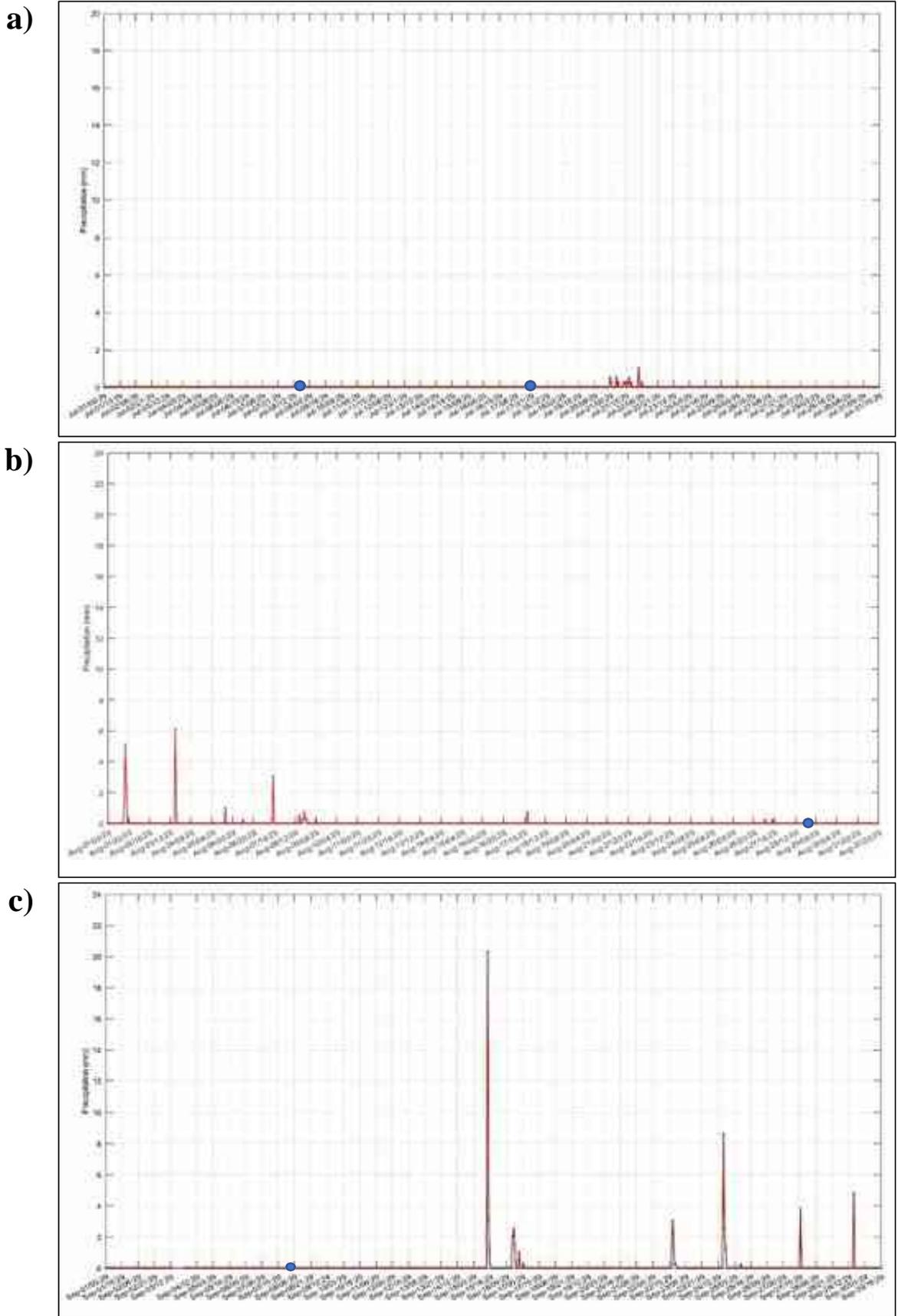


Figura 77. Registros de precipitación de la estación meteorológica automática del Observatorio de Huancayo, a) julio del 2018, b) agosto del 2018 y c) setiembre del 2018. Los puntos azules representan los eventos más intensos de heladas.

ANEXO 2.

Valores de cobertura de nubes estimados por el sensor MODIS

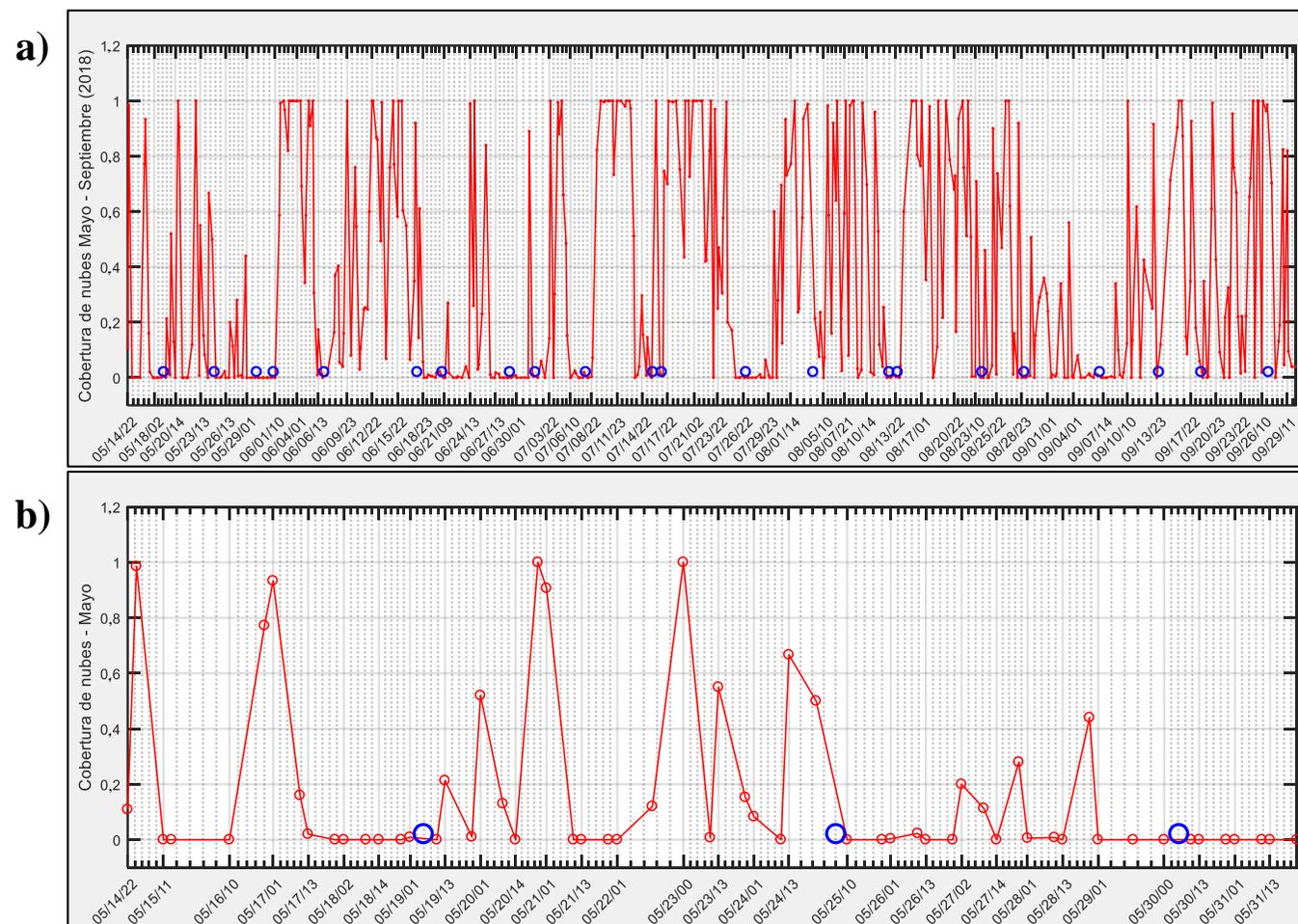


Figura 78. Variación del producto de cobertura de nubes (líneas rojas) estimada por el sensor MODIS (0 = cielo despejado, 1 = cielo totalmente cubierto), durante los eventos de mínima temperatura (círculos azules) para los meses de (a) mayo a setiembre 2018, (b) mayo 2018.

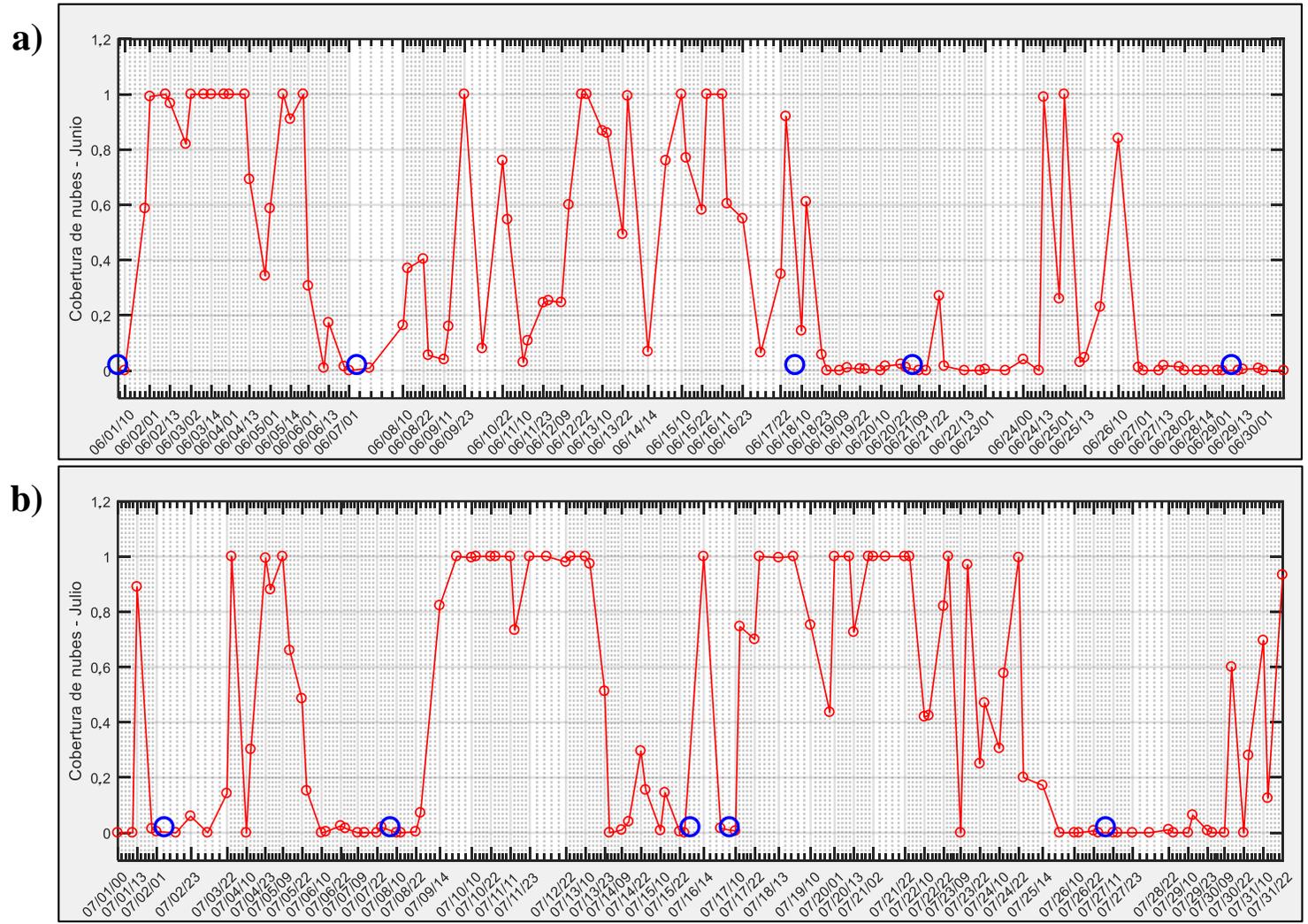


Figura 79. Variación del producto de cobertura de nubes (líneas rojas) estimada por el sensor MODIS (0 = cielo despejado, 1 = cielo totalmente cubierto), durante los eventos de mínima temperatura (círculos azules) para los meses de (a) junio 2018, (b) julio 2018.

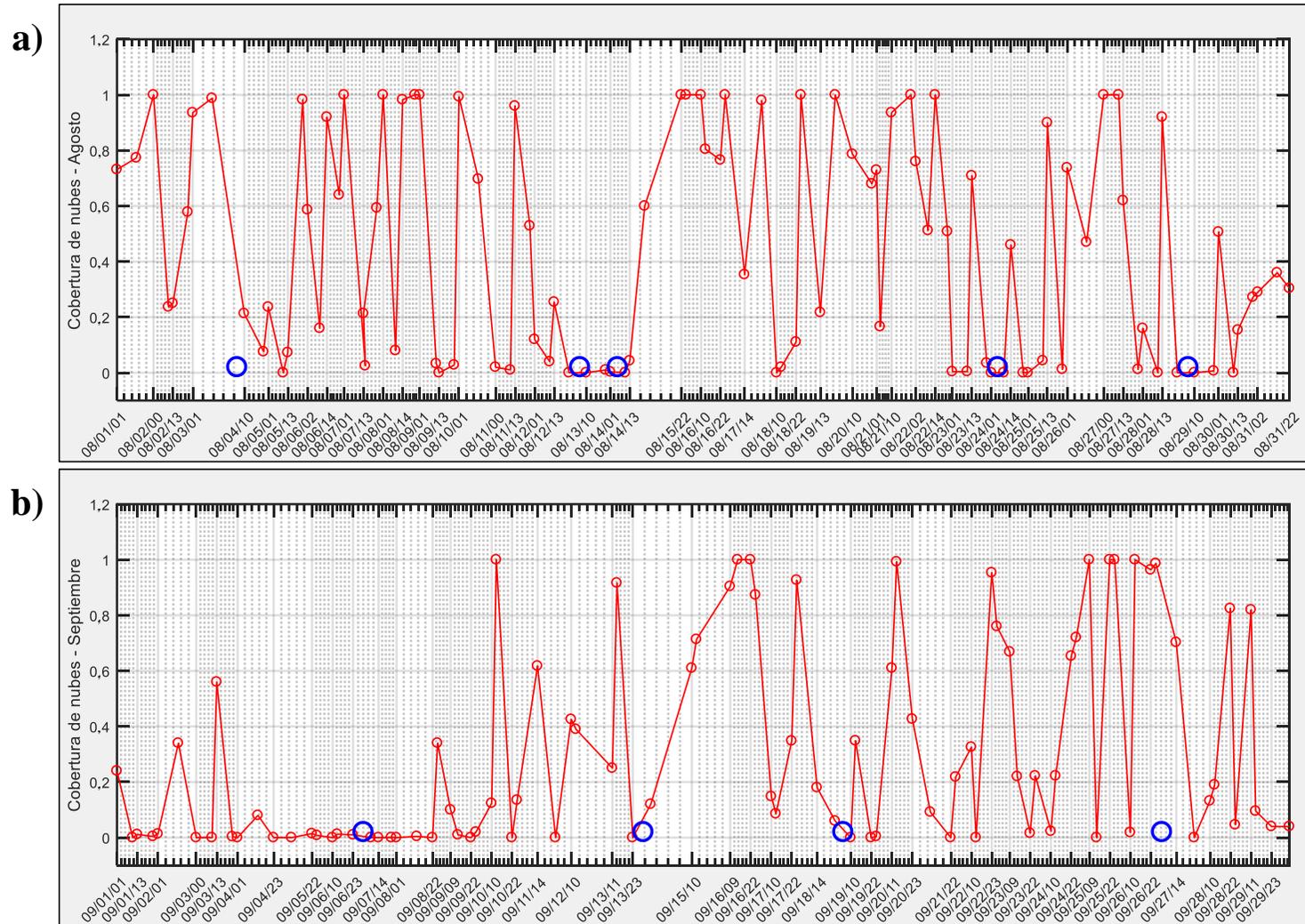


Figura 80. Variación del producto de cobertura de nubes (líneas rojas) estimada por el sensor MODIS (0 = cielo despejado, 1 = cielo totalmente cubierto), durante los eventos de mínima temperatura (círculos azules) para los meses de (a) agosto 2018 y (b) setiembre 2018.

ANEXO 3.

Control de calidad de los datos de la torre de gradiente

Todos los sensores de la torre de gradiente meteorológica fueron instalados el 25 de febrero del 2018 y se analizaron los registros hasta el 15 de marzo del 2018 (18 días). Cuando se revisó las gráficas de ciclo diurno y perfiles verticales de temperatura y humedad relativa se detectó un comportamiento anormal en los niveles 4 y 6 (18 y 29m) tal como se detalla a continuación:

Figura 81b, los promedios horarios muestran que los niveles 4 y 6 registran mayores valores de temperatura que los niveles 3 y 5 entre las 14 y 17 horas cuando la temperatura en horas de la tarde debería disminuir con la altura progresivamente y en los perfiles verticales de la Figura 82 se aprecia más claramente la sobreestimación de temperatura de los niveles 4 y 6.

Figura 83b, los promedios horarios muestran que durante la madrugada entre las 02 y 04 horas la atmósfera superficial se caracteriza por presentar estabilidad entre los niveles y una disminución progresiva de los valores de humedad relativa con respecto a la altura, pero el nivel 6 registró mayores niveles de humedad relativa que el nivel 4.

Por tales motivos se desplazaron los cinco sensores de temperatura y humedad relativa (termohigrómetros) hasta el nivel 1 (2 m) para intercompararlos desde el 28 de marzo hasta el 06 de abril y así calcular los factores de corrección tomando como referencia la estación meteorológica experimental de registro de automática que también está ubicada en el Observatorio de Huancayo, mientras se esperaba la respuesta de la empresa ENVIROEQUIP sobre la solicitud de estos mismos factores de corrección de datos por parte de ellos como proveedores.

Se utilizó también el software MATLAB 2017a para estimar la regresión numérica con respecto a los valores de temperatura y humedad relativa registrados por la estación meteorológica automática de la estación de Huayao de los cuales se obtuvieron los valores presentados en la *Figura 86*. Ya que los datos de los sensores fueron registrados por minuto, durante un día se reportaron 1440 datos, que multiplicado por los 9 días que se mantuvo la intercomparación se procesaron aproximadamente 12 960 datos. Los mismos que sirvieron para contrastar los factores de corrección facilitados por la empresa ENVIROEQUIP.

Con los nuevos factores de corrección obtenidos de la intercomparación de los sensores con dos datos de la estación meteorológica experimental se graficaron los ciclos diurnos de los promedios horarios y los perfiles verticales de temperatura y humedad relativa desde la *Figura 87* hasta la *Figura 90*, las mismas gráficas que lograron presentar un comportamiento más realista del comportamiento de estas variables meteorológicas en la capa atmosférica superficial de un ambiente natural.

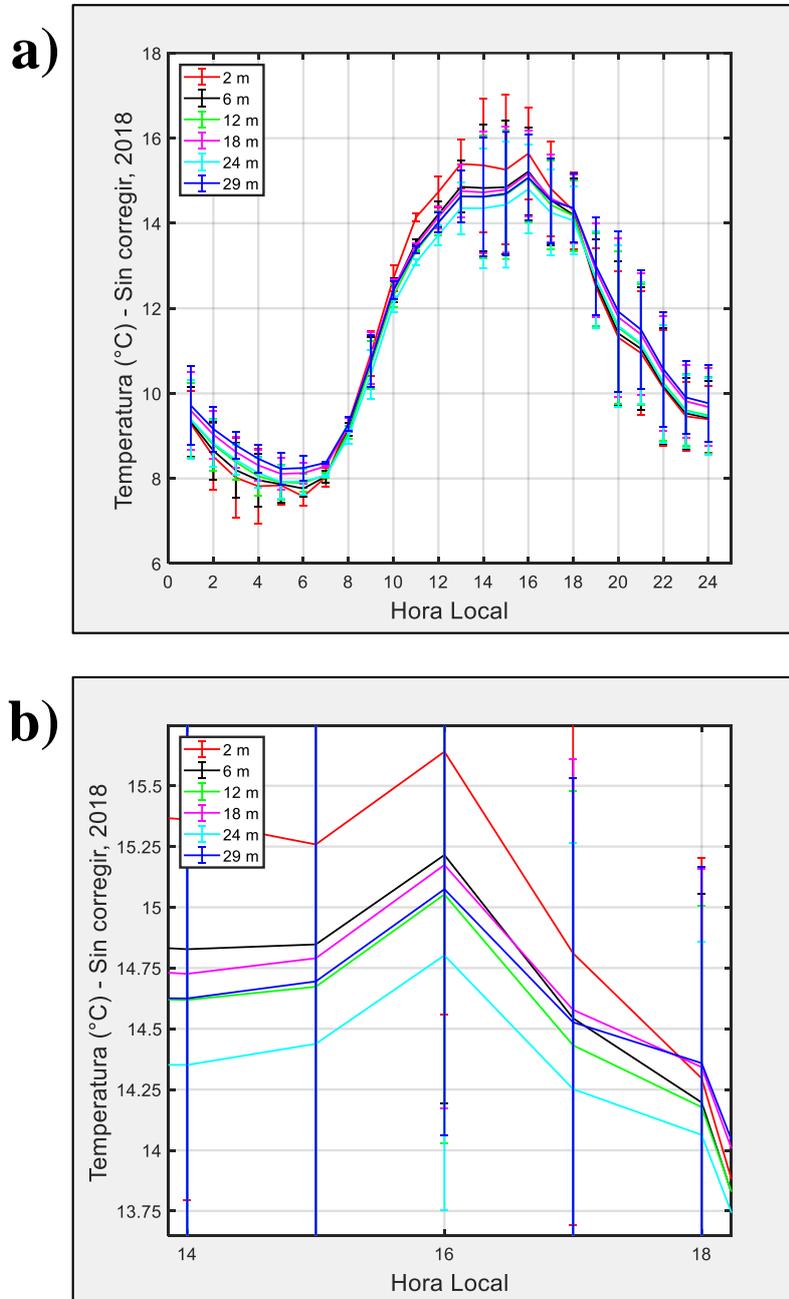


Figura 81. (a) Promedios horarios del ciclo diurno de temperatura sin corregir, (b) Valores de los promedios horarios del ciclo diurno de temperatura sin corregir entre las 14 y 18 horas, durante el período del 25 de febrero al 15 de marzo del 2018.

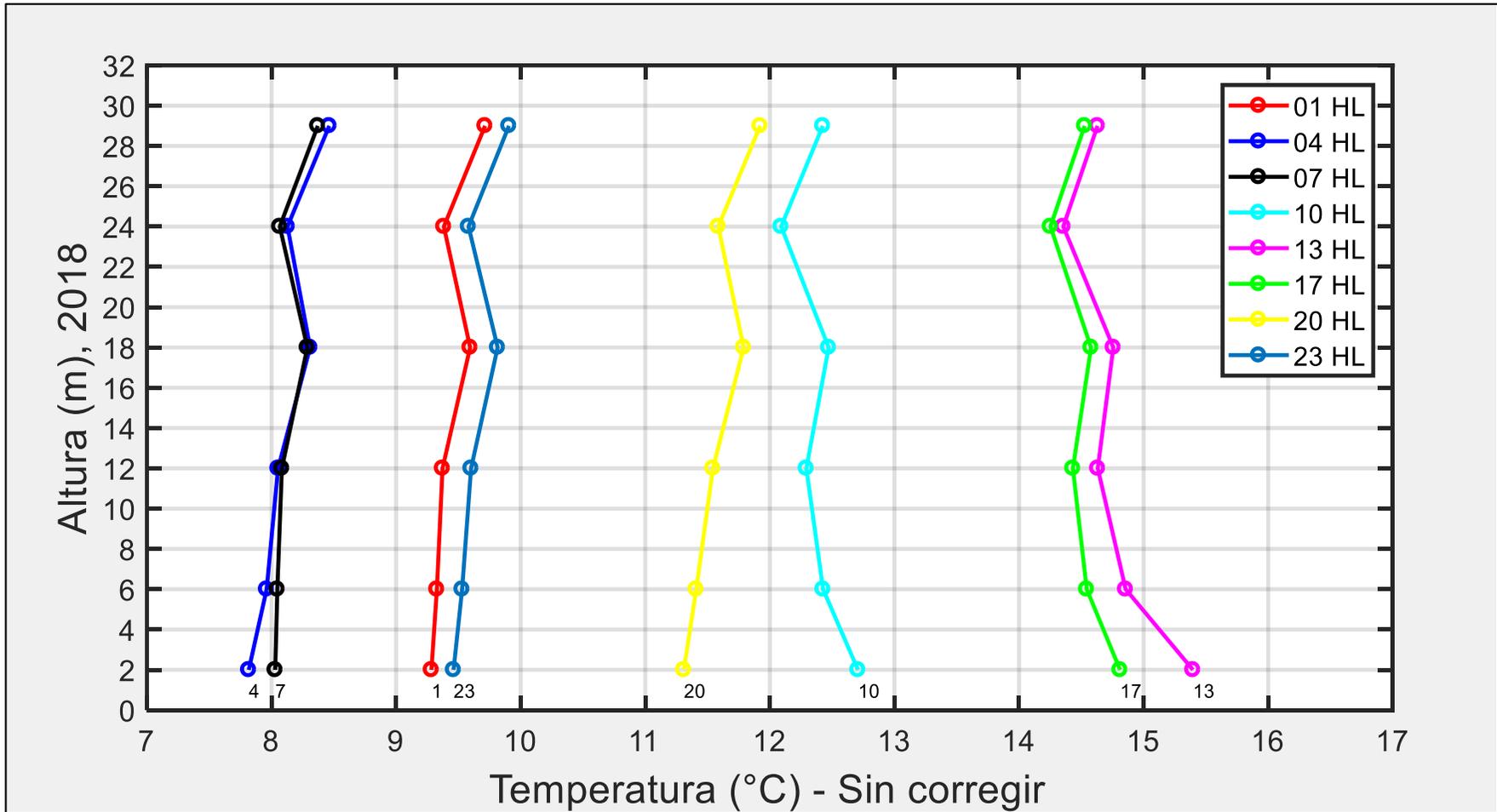


Figura 82. Perfiles verticales de temperatura sin corregir, entre el 25 de febrero y el 15 de marzo del 2018.

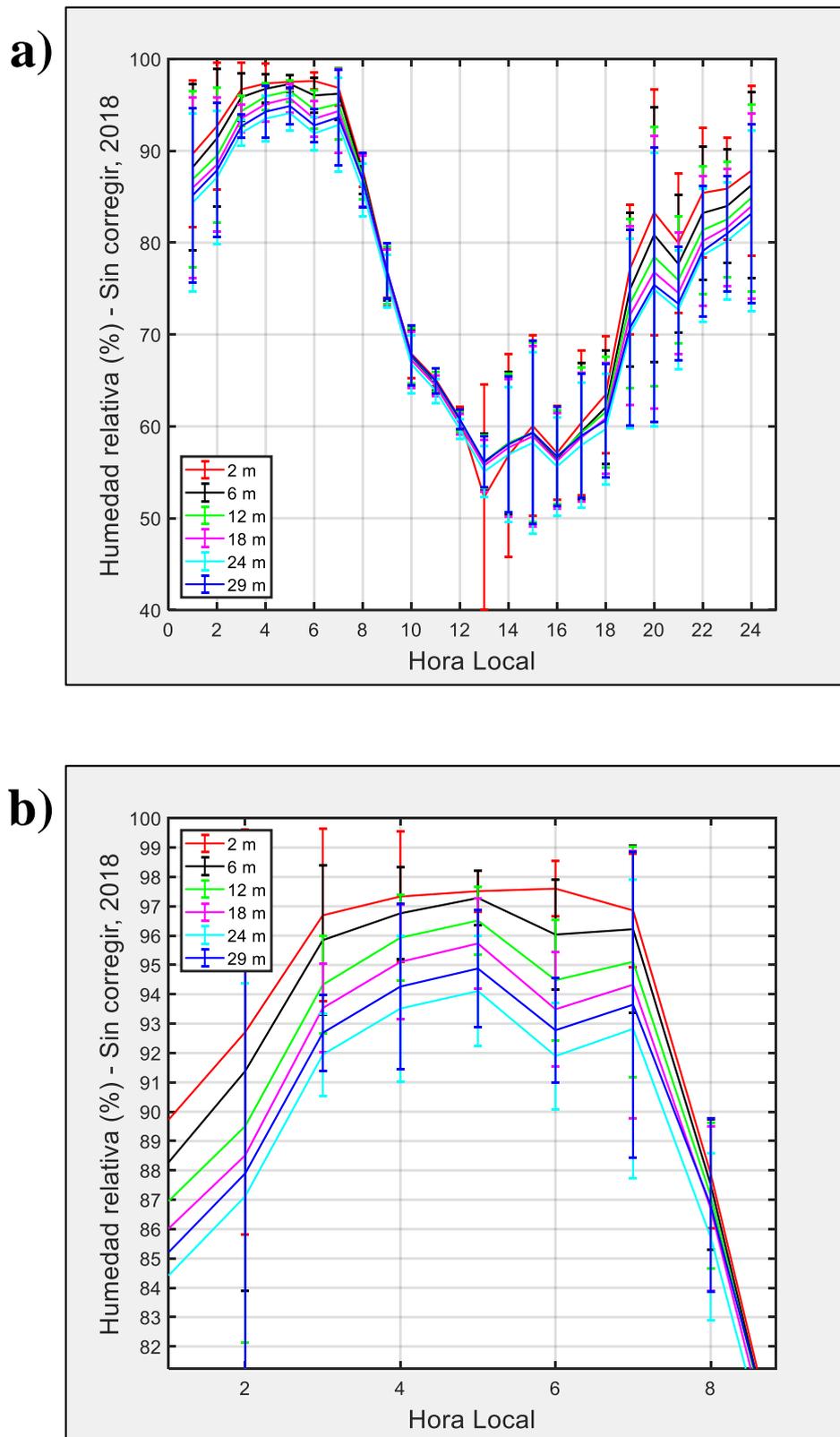


Figura 83. (a) Promedios horarios del ciclo diurno de humedad relativa sin corregir, (b) Valores del ciclo diurno de humedad relativa sin corregir entre las 02 y 08 horas, durante el período del 25 de febrero al 15 de marzo del 2018.

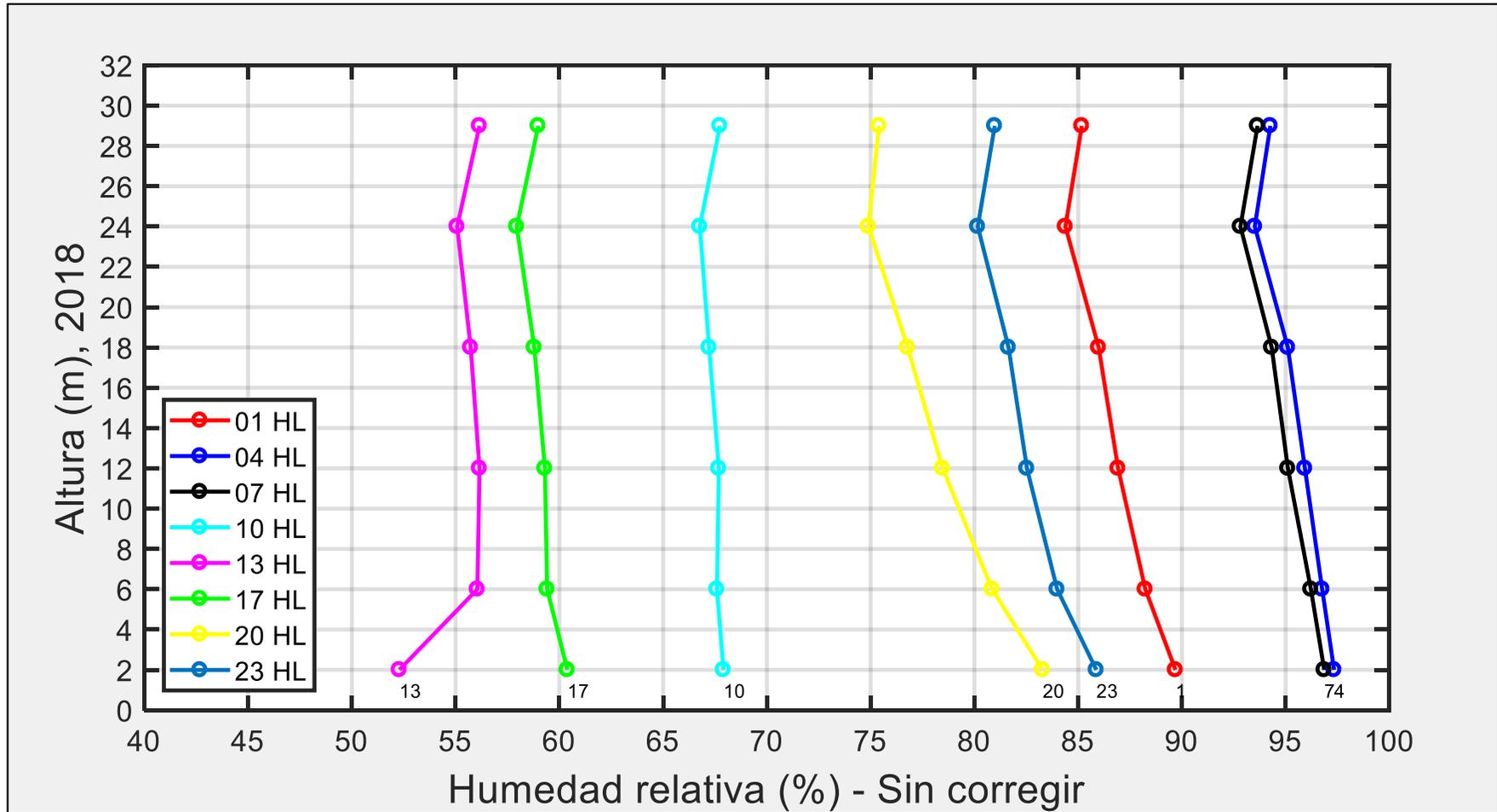


Figura 84. Perfiles verticales de humedad relativa sin corregir, entre el 25 de febrero y el 15 de marzo del 2018.



Figura 85. Termohigrómetros desplazados hasta el nivel 1 para su intercomparación.

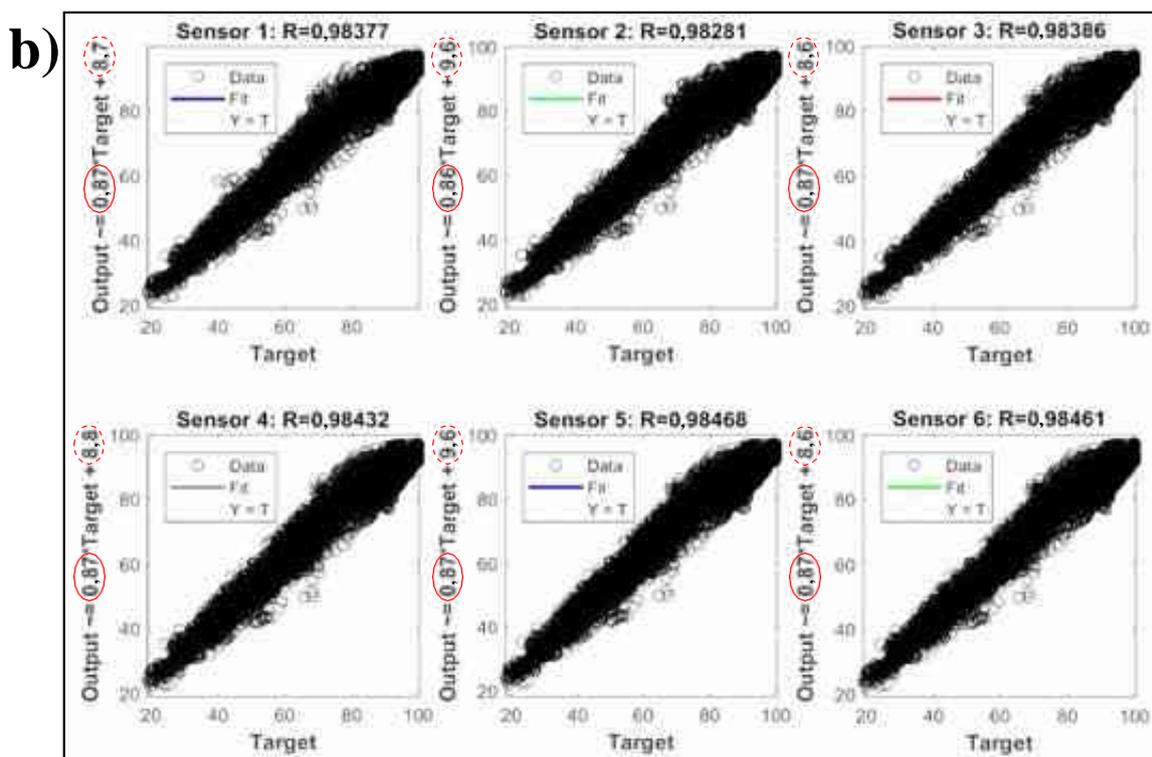
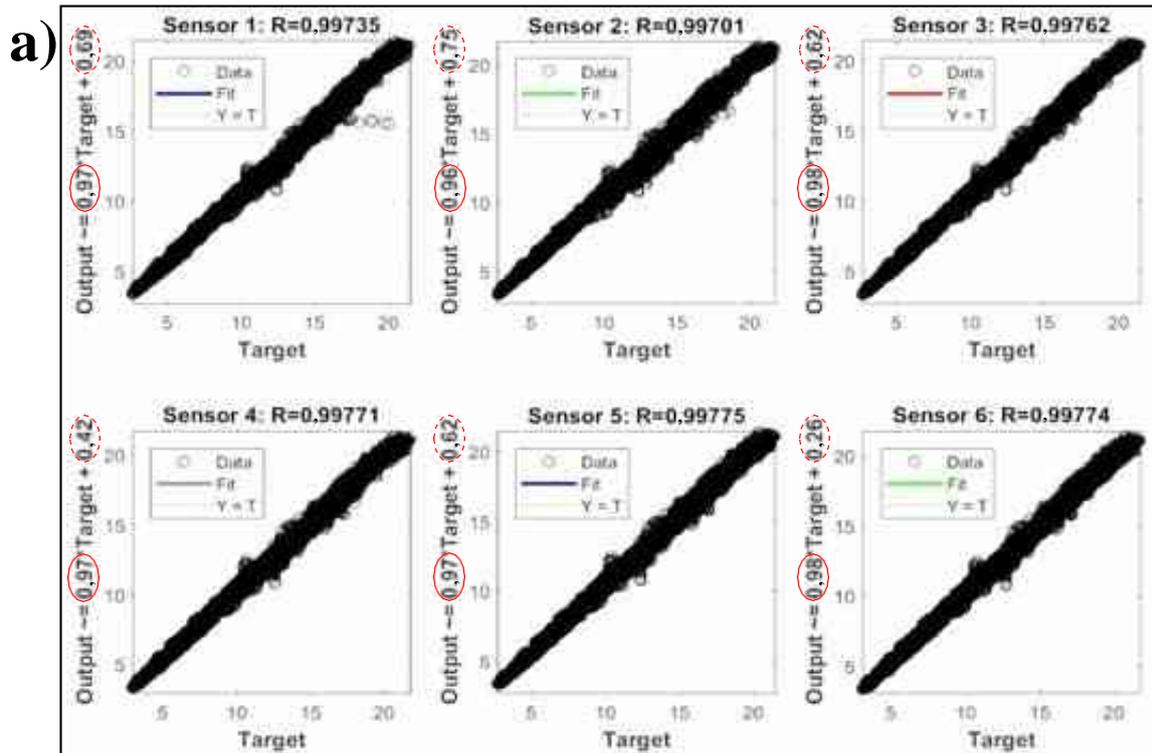


Figura 86. Factores de corrección calculados de la intercomparación de los 6 sensores de (a) temperatura y (b) humedad relativa de la torre de gradiente meteorológica con los sensores estación automática de Huayao, durante el período del 25 de febrero al 15 de marzo del 2018.

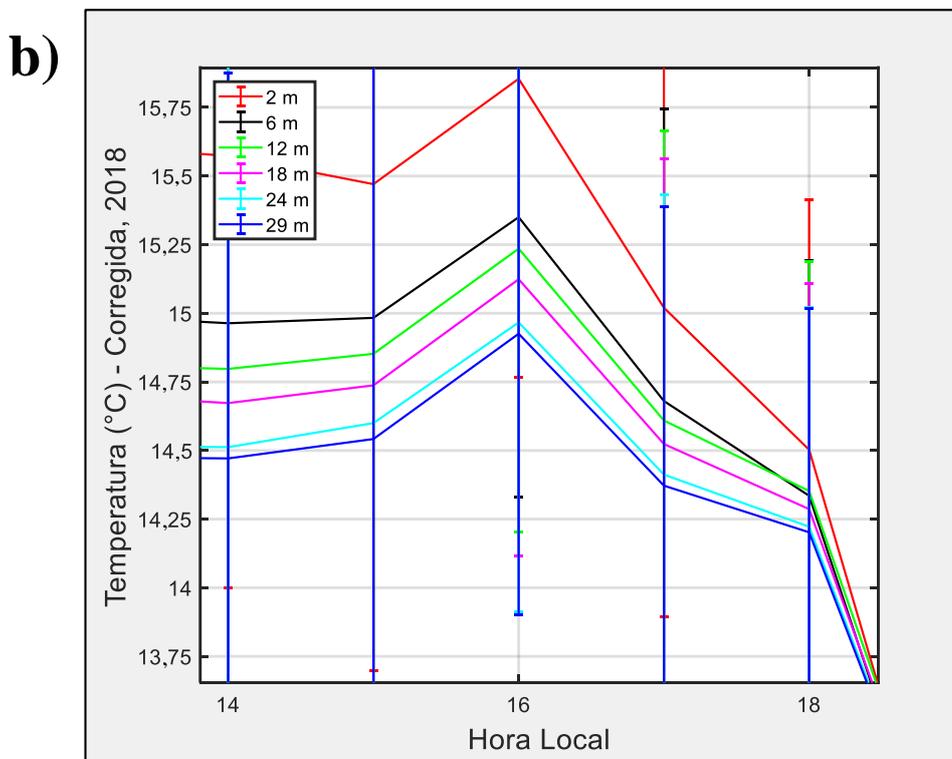
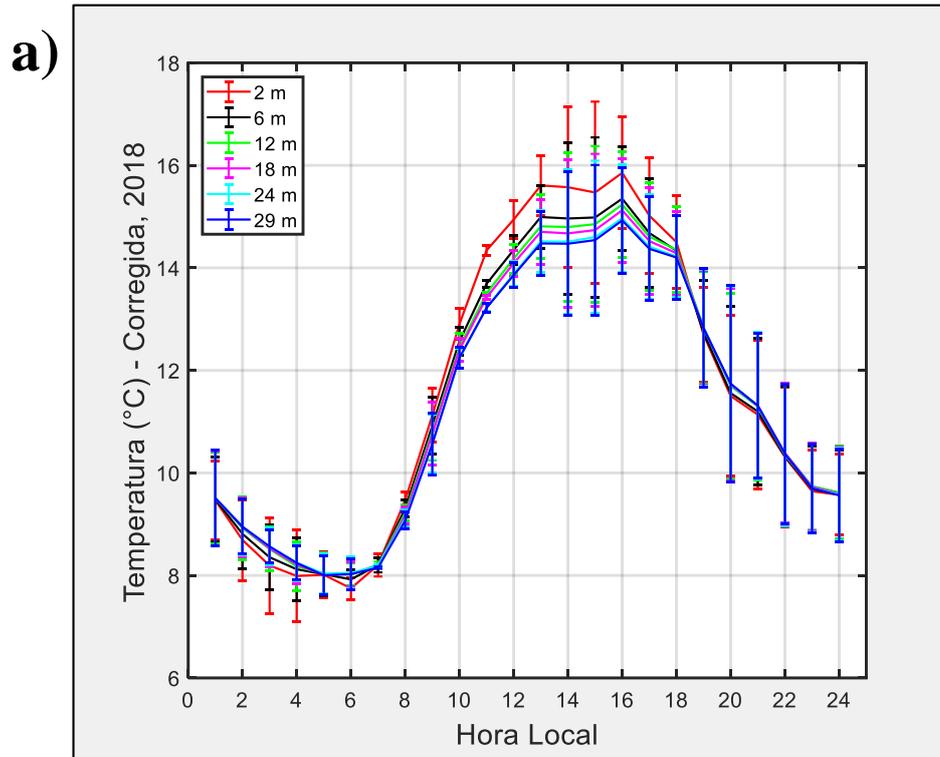


Figura 87. (a) Promedios horarios del ciclo diario de temperatura corregida, (b) Valores del ciclo diario de temperatura corregida entre las 14 y 18 horas, durante el período del 25 de febrero al 15 de marzo del 2018.

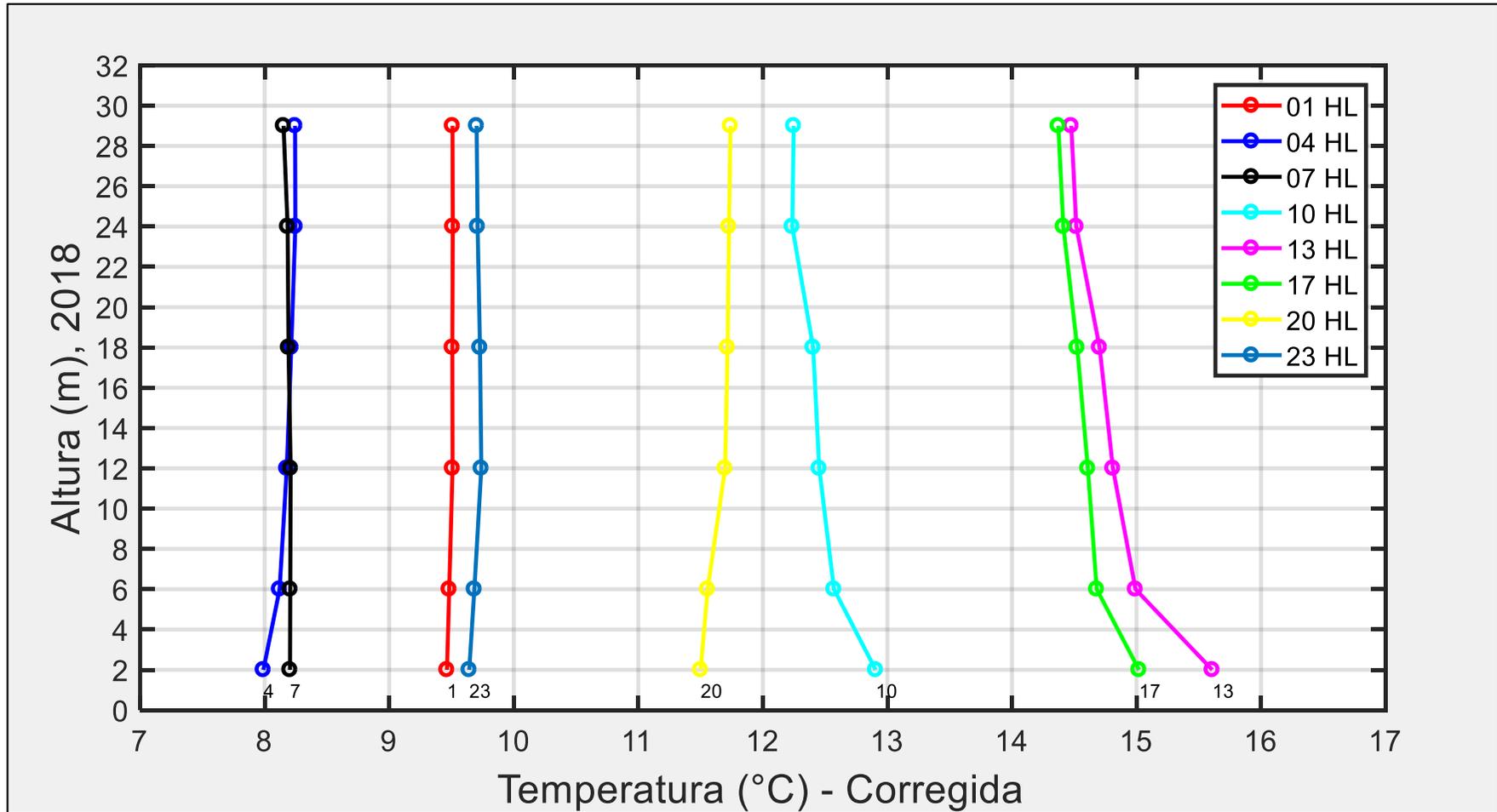
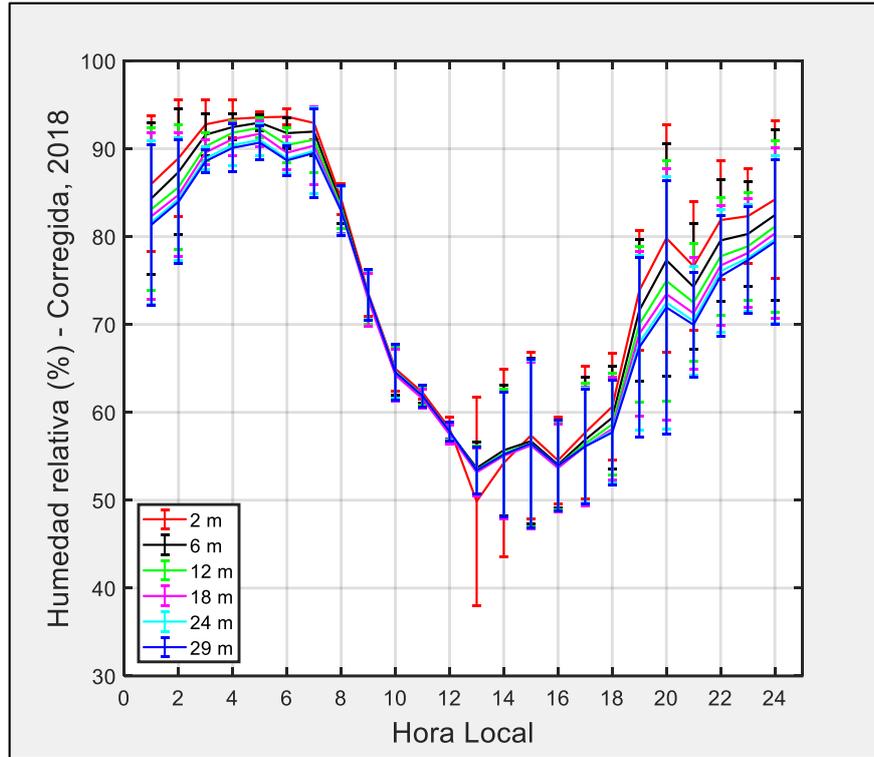


Figura 88. Perfiles verticales de temperatura corregida, entre el 25 de febrero y el 15 de marzo del 2018.

a)



b)

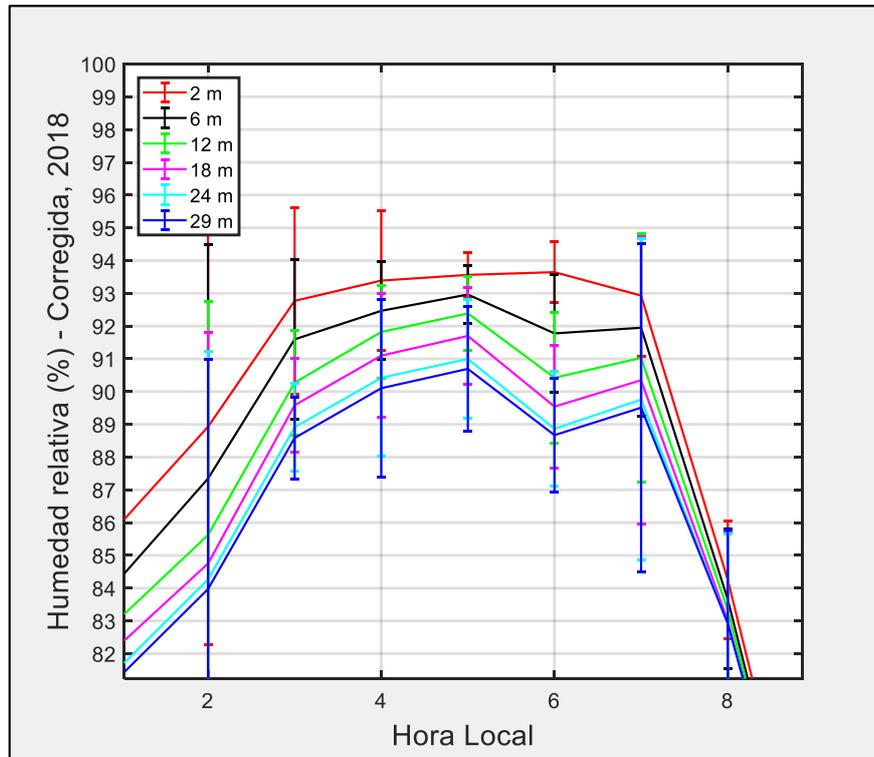


Figura 89. a) Promedios horarios del ciclo diurno de humedad relativa corregida, (b) Valores del ciclo diurno de humedad relativa corregida entre las 02 y 08 horas, durante el período del 25 de febrero al 15 de marzo del 2018.

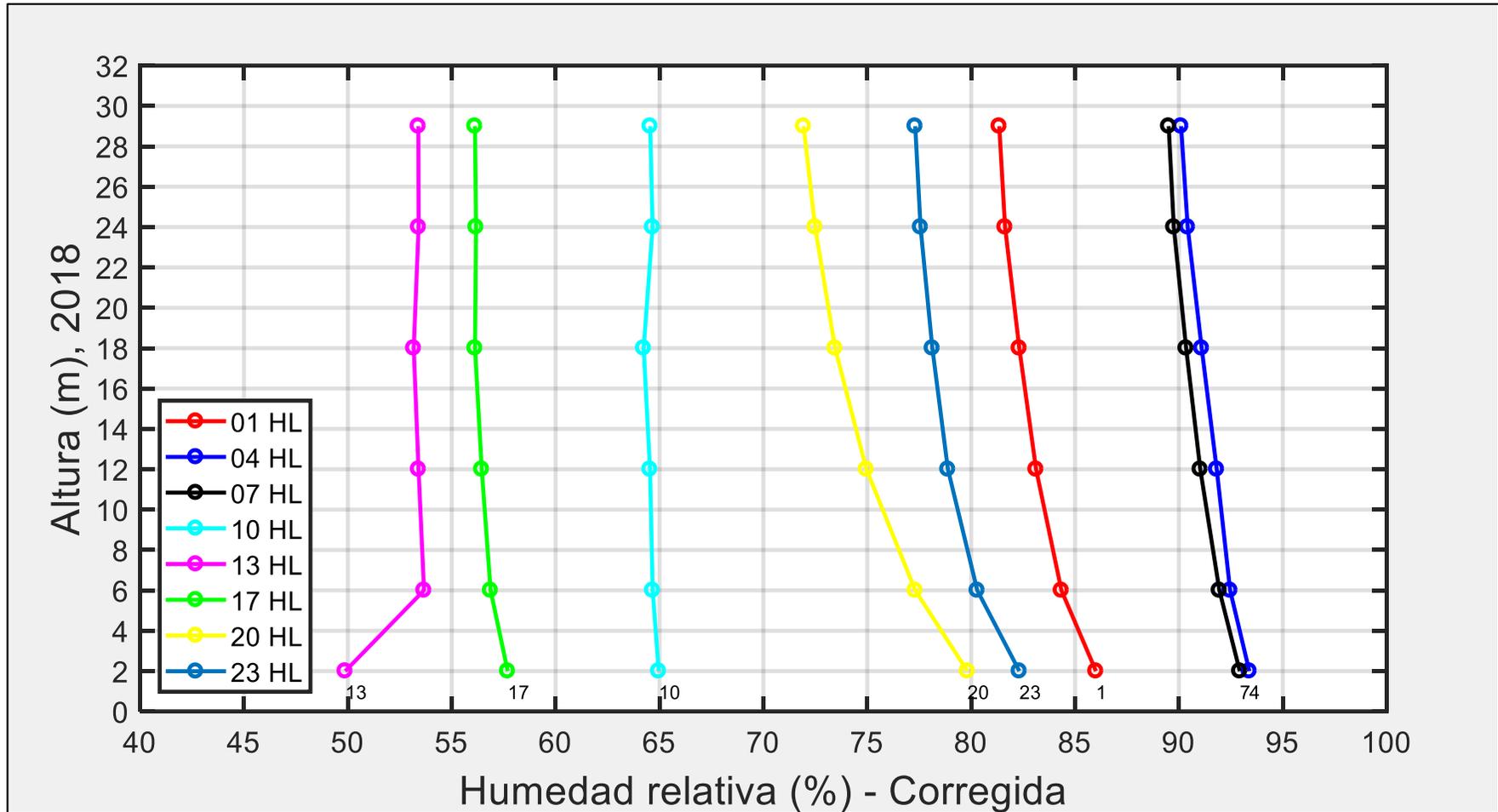


Figura 90. Perfiles verticales de humedad relativa corregida, entre el 25 de febrero y el 15 de marzo del 2018.