



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis y Caracterización del Ambiente Atmosférico Durante Heladas Radiativas en Colombia

Oscar David Rivera Ricaurte

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2023

Análisis y Caracterización del Ambiente Atmosférico Durante Heladas Radiativas en Colombia

Oscar David Rivera Ricaurte

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Medio Ambiente y Desarrollo

Director:

Ph.D., Manuel David Zuluaga Arias

Codirectora:

Ph.D., Yuley Cardona Orozco

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2023

*“Por ella luchare hasta que me muera y por ella
no me quiera morir, tampoco que se me muera
mi vieja, pero yo sé que el destino es así...”*
Omar Geles – Los caminos de la vida

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Oscar Rivera

Oscar Rivera Ricaurte

Fecha 31/01/2023

Agradecimientos

Este trabajo sin duda no hubiera sido posible sin la enorme colaboración tanto de Manuel como de Yuley, a ellos muchas gracias por emprender este viaje del conocimiento conmigo y mostrar siempre mucho empeño en que llegara a buen puerto.

Por supuesto, no todo por lo que pase para concretar este trabajo es de ámbito académico y, por ello, en este punto también cabe agradecer a mis dos pilares; mi padre Luis que ya no nos acompaña físicamente en este mundo, pero que sin duda fue gestor muchos de mis intereses intelectuales y, por supuesto, a mi madre Josefina, quien además de velar siempre por mi excelencia académica y personal, siempre ha estado en mi camino para ser un cálido faro de luz y amor que me acompaña en mis momentos de luz y sombra. Esta tesis también es de ellos dos.

Finalmente, a aquellas personas que han aportado un granito de arena en mi vida, dado que como dice el dicho “dime con quien andas y te diré quién eres”. A todos ellos, familiares, amigos, profesores, muchas gracias.

Resumen

Análisis y Caracterización del Ambiente Atmosférico Durante Heladas Radiativas en Colombia

Las heladas radiativas en Colombia son un fenómeno meteorológico de descenso de temperatura hasta 0 °C o menos, por enfriamiento nocturno, las cuales resultan nocivas principalmente para la producción agrícola en la región Andina del país. Por lo anterior y por la relevancia de las variaciones meteorológicas en la modulación del enfriamiento nocturno, se analizaron las condiciones atmosféricas a distinta escala espacial y temporal que pueden llegar a modificar la ocurrencia de heladas radiativas para Colombia. Se encontró que, dependiendo de la altitud sobre el nivel del mar, la proporción de heladas tiene un ciclo bimodal (zonas por encima de 4000 metros) con máximos en los trimestres a inicio y mitad de año, o unimodal (áreas inferiores a 4000 metros) con máximo en el trimestre inicial del año, en ambos casos por ser épocas de menor nubosidad, precipitación, humedad, temperatura y magnitud en los vientos. A escala diurna la mayor frecuencia de heladas se encuentra en las 06:00 horas y, además se concluye que al menos 6 horas antes del inicio de estos eventos, se presentan anomalías negativas de nubosidad, humedad relativa, humedad específica, que generalmente son más severas a mayor altitud en la atmósfera. La evolución de la meteorología en la región alrededor de Colombia durante casos de helada otorga evidencia de que estas variaciones pueden no ser solo locales, sino que provienen de cambios en la meteorología a escala sinóptica, probablemente por intensificación de los vientos al norte del país y en dirección del nororiente. Finalmente, la simulación de casos de helada con el modelo atmosférico WRF, brinda una mejor aproximación de la variación espacial de la temperatura del aire para la zona Andina colombiana, lo cual permitió que se simularan heladas principalmente en zonas de alta montaña, aunque en zonas por debajo de los 3000 m.s.n.m. el modelo no presenta descensos de temperatura iguales a los registrados localmente.

Palabras clave: Heladas radiativas, meteorología de montaña, enfriamiento nocturno, pronóstico de amenaza meteorológica.

Abstract

Analysis and Characterization of the Atmospheric Environment During Radiative Frosts in Colombia

Radiative frosts in Colombia are a meteorological phenomenon of temperature drop to 0 °C or less, due to night cooling, which are harmful mainly for agricultural production in the Andean region of the country. Due to the above and to the relevance of meteorological variations in the modulation of nocturnal cooling, the atmospheric conditions at different spatial and temporal scales that can modify the occurrence of radiative frosts for Colombia were analyzed. It was found that, depending on the topographical altitude, the threat of frost has a bimodal cycle (areas above 4,000 meters) with maximum in the quarters at the beginning and the middle of the year, or unimodal (areas below 4,000 meters). with a maximum in the initial quarter of the year, in both cases because these are periods of less cloudiness, precipitation, humidity, temperature and wind magnitude. On a daytime scale, the highest frequency of frosts is found at 06:00 hours and, in addition, it is concluded that at least 6 hours before the start of these events, there are negative anomalies of cloudiness, relative humidity, specific humidity, which are generally more severe at higher altitudes in the atmosphere. The evolution of the meteorology in the region around Colombia during frost cases provides evidence that these variations may not only be local, but they come from changes in the meteorology on a synoptic scale, probably due to the intensification of the winds to the north of the country and from north-east. Finally, the simulation of frost cases with the WRF atmospheric model provides a better approximation of the spatial variation of air temperature for the Colombian Andean zone, which allowed frost to be simulated mainly in high mountain areas, although in areas below 3000 m.a.s.l. the model does not present temperature drops equal to those registered locally.

Keywords: Radiative frost, mountain meteorology, night cooling, meteorologic threat forecast.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Abstract	XI
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XVIII
Introducción	1
1. Estado del arte y área de estudio	5
1.1 Estado del arte	5
1.2 Área de estudio	8
2. Datos y metodología	11
2.1 Datos de temperatura del aire	11
2.2 Datos de variables meteorológicas asociadas a heladas radiativas	16
2.3 Metodología	19
3. Ambientes Atmosféricos Asociados a Heladas Radiativas	25
3.1 Relación de heladas radiativas con variables meteorológicas en superficie	25
3.2 Climatología de heladas radiativas	32
3.3 Evolución del ambiente atmosférico asociado a heladas radiativas.....	43
3.3.1 Caso estación Berlín.....	43
3.3.2 Caso estación Teatinos	48
3.4 Patrones en el ambiente atmosférico asociado a heladas radiativas y diferencias geográficas	52
3.5 Patrones sinópticos y heladas en Colombia	59
4. Aproximación a la modelación de heladas con WRF	67
4.1 Optimización de parámetros de WRF para la simulación	68
4.2 Ambientes atmosféricos asociados a heladas radiativas en la simulación con WRF	76
4.2.1 Comparación de casos de helada y no helada en WRF.....	76
4.2.2 Patrón espacial de WRF	81
5. Conclusiones y recomendaciones	87
5.1 Conclusiones y recomendaciones generales.....	87
5.2 Aplicaciones en la modelación de heladas radiativas en Colombia	90

Bibliografía	93
A. Anexo: Metadatos estaciones meteorológicas del IDEAM seleccionadas	97
B. Anexo: Homogeneización de periodos de revisión de heladas.....	101

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Zonas de Colombia sobre 2400 m.s.n.m (sombra roja) y porcentaje de producción agrícola por departamento (distintas tonalidades de verde). Información base DANE (2020)	9
Figura 2-1: Imágenes satelitales de MODIS de temperatura superficial del suelo (TSS) con diferentes condiciones de visibilidad. La primera fila de imágenes muestra datos de MODIS terra (MOD), mientras que la inferior de MODIS aqua (MYD). La primera columna de ambos casos (izquierda) muestra ejemplos de imágenes tomadas en condiciones de baja visibilidad y la de la derecha con mejor visibilidad.	14
Figura 2-2: Gráficos de dispersión de temperatura del aire a 2 m medida en estaciones del IDEAM (eje X) frente a ERA5 (eje Y).	15
Figura 2-3: Ejemplos de variación de temperatura del aire en una helada normal (a) y una posible helada anómala (b.)	21
Figura 3-1: Diagramas de dispersión de temperatura in situ (estaciones del IDEAM) contra variables de ERA5 superficiales. De izquierda a derecha y de la línea superior a la inferior, Temperatura del aire a 2 metros (MN2T), diferencia entre temperatura del aire y la temperatura de punto de rocío a 2 metros (T2DIF), cobertura de nubes a baja altura (LCC), radiación térmica neta del suelo (SNR), y velocidad del viento a 10 metros (WS10).	27
Figura 3-2: Diagramas de dispersión similares a la Figura 3-1, con discriminación por altitud.	29
Figura 3-3: Similar a Figura 3-1 con discriminación de las heladas por trimestre de ocurrencia.	31
Figura 3-4: Promedio horario de heladas radiativas y variables de ERA5 SL en el periodo 2005-2021, representando las variables en días sin heladas (línea roja) y días con helada (línea negra) De izquierda a derecha e iniciando en la línea superior: precipitación total (PPT), cobertura de nubes a baja altura (LCC), radiación térmica neta del suelo (SNR), diferencia entre temperatura del aire y temperatura de punto de rocío a 2 metros (T2DIF), Temperatura del aire a 2 metros (MN2T), y velocidad del viento a 10 metros (WS10).	32
Figura 3-5: Similar a figura 3-4 con variables de ERA5 PL para el intervalo 600 a 400 hPa. De izquierda a derecha e iniciando en la línea superior: Geopotencial (GEOP), Humedad relativa (RH), Humedad específica (Q), Temperatura (T) y Velocidad del viento (WS).	35
Figura 3-6: Similar a figura 3-4 para la escala Intraanual. Se presenta la media mensual multianual de las variables con una línea roja.	37

Figura 3-7:	Similar a Figura 3-5 para la escala intraanual.....	39
Figura 3-8:	Promedio anual de heladas radiativas y variables del reanálisis ERA5. De izquierda a derecha e iniciando en la línea superior: precipitación total (PPT), diferencia entre temperatura del aire y temperatura de punto de rocío a 2 metros (T2DIF), Temperatura del aire a 2 metros (MN2T), humedad específica entre 600 y 400 hPa (Q) y temperatura entre 600 y 400 hPa (T).	41
Figura 3-9:	Variación de las anomalías para las variables meteorológicas del reanálisis ERA5 SL para el caso Berlín. Cada recuadro muestra con una línea negra el comportamiento de la temperatura en la estación del IDEAM correspondiente y, además, con una línea roja de izquierda a derecha, empezando por la fila superior: la cobertura de nubes a baja altura (LCC), precipitación total (PPT), radiación térmica neta del suelo (SNR), diferencia entre temperatura del aire y temperatura de punto de rocío a 2 metros (T2DIF), Temperatura del aire a 2 metros (MN2T), y velocidad del viento a 10 metros (WS10). ...	44
Figura 3-10:	Variación de las anomalías para las variables meteorológicas del reanálisis ERA5 PL para el caso Berlín. Cada recuadro muestra con una línea negra el comportamiento de la temperatura en la estación del IDEAM correspondiente, con una verde la MN2T del reanálisis y en distintas paletas de colores, empezando por la fila superior: el geopotencial (GEOP), temperatura (T), humedad relativa (HR), humedad específica (Q) y velocidad del viento (WS).	47
Figura 3-11:	Similar a Figura 3-9 para el caso Teatinos.	49
Figura 3-12:	Similar a la Figura 3-10 para el caso Teatinos.....	51
Figura 3-13:	Conteo de anomalías (eje Y) durante heladas radiativas para las variables de ERA5 SL en los niveles de 800 a 600 hPa (eje X). En el eje X de izquierda a derecha están la cobertura de nubes a baja altura (LCC), precipitación total (PPT), radiación térmica neta del suelo (SNR), temperatura del aire a 2 metros (MN2T), diferencia entre temperatura del aire y temperatura de punto de rocío a 2 metros (T2DIF), y velocidad del viento a 10 metros (WS10).	53
Figura 3-14:	Conteo de anomalías (eje Y) durante heladas radiativas para las variables de ERA5 PL (eje X). En el eje X de izquierda a derecha están: geopotencial (GEOP), humedad relativa (RH), humedad específica (Q), temperatura (T) y velocidad del viento (WS).	56
Figura 3-15:	Similar a Figura 3-14 para 600-450 hPa.	58
Figura 3-16:	Mapa compuesto de anomalías de temperatura del aire a 2 metros (MN2T) para 18-12-2017.	61
Figura 3-17:	Mapa compuesto de anomalías de cobertura de nubes a baja altura (LCC) para 18-12-2017.	62
Figura 3-18:	Mapa compuesto de anomalías de velocidad del viento WS a 500 hPa para 18-12-2017.	63
Figura 3-19:	Mapa compuesto de anomalías humedad específica Q a 500 hPa para 18-12-2017.	64
Figura 4-1:	Mapas de los dominios para los experimentos con WRF. Las resoluciones de estos son de 27-9 y 3 km (izquierda), 9-3 y 1 km (centro) y 9 y 3 km (derecha).	70
Figura 4-2:	Temperatura del aire para la estación Teatinos y los distintos experimentos del dominio de WRF identificados como: D_09_03 (línea negra) dominio de 9 y 3 km;	

D_27_09_03 (línea verde) dominio de 27, 9 y 3 km; D_09_03_01 (línea roja) dominio de 9, 3 y 1 km; T2m ERA (línea gris) reanálisis ERA5; T2m 3507500133 (línea azul celeste) estación Teatinos.	71
Figura 4-3: Temperatura del aire para la estación Teatinos y los distintos experimentos de parametrizaciones de WRF identificados como: P_01 (línea negra) parametrizaciones de Torres (2020); P_02 (línea verde) parametrizaciones de Reboredo et al. (2015); P_03 (línea roja) parametrizaciones de Cui et al. (2019); T2m ERA (línea gris) reanálisis ERA5; T2m 3507500133 (línea azul celeste) estación Teatinos.	73
Figura 4-4: Temperatura del aire para la estación Teatinos y WRF modificando sus datos de entrada identificadas como: T2m WRF teatinos_20171218 (línea negra) simulación de WRF; T2m IDE (línea roja) estación Teatinos, T2m ERA (línea verde) reanálisis ERA5.	75
Figura 4-5: Variables meteorológicas de WRF en superficie para el caso Teatinos_WRF. En la columna izquierda se muestra con una línea negra la temperatura en la estación y se encuentran de arriba a abajo las variables (líneas rojas): cobertura de nubes a baja altura (LCC), humedad específica a 2 metros (Q2), y temperatura del aire a 2 metros de WRF (MN2T) y del reanálisis ERA5 (MN2T_ERA5). En la columna derecha se muestra tanto la temperatura en la estación (línea negra) como la de WRF (línea verde), así como las variables, de arriba a abajo: velocidad del viento (WS), humedad específica (Q) y temperatura (T).	77
Figura 4-6: Similar a la figura 4-6 para el caso Helada_WRF	80
Figura 4-7: Mapas compuestos de temperatura del aire a 2 metros (MN2T) durante la helada del 2017-12-18 para WRF (izquierda) y ERA5 (derecha).	82
Figura 4-8: Mapas compuestos de cobertura de nubes a baja altura (LCC) durante la helada del 2017-12-18 para WRF (izquierda) y ERA5 (derecha).	83
Figura 4-9: Mapas compuestos de humedad específica (Q) a 500 hPa durante la helada del 2017-12-18 para WRF (izquierda) y ERA5 (derecha).	83
Figura 4-10: Mapas compuestos de velocidad del viento (WS) a 500 hPa durante la helada del 2017-12-18 para WRF (izquierda) y ERA5 (derecha).	84

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Metadatos considerados en la selección de registros de temperatura del aire en el área de estudio.....	12
Tabla 2-2: Variables meteorológicas usadas del reanálisis ERA5.....	18
Tabla 2-3: Pruebas automatizadas de validación de registros de temperatura del aire de estaciones meteorológicas automáticas.....	20
Tabla 4-1: Esquemas de parametrizaciones usados en los experimentos sobre la malla de a usar el modelo WRF	68
Tabla 4-2; Descripción de los experimentos sobre la configuración espacial del modelo atmosférico.	69
Tabla 4-3: Estadísticos de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y correlación resultados de temperatura de WRF con distintos dominios y la registrada por la estación Teatinos. También se muestra la desviación estándar de cada simulación.....	71
Tabla 4-4: Esquema de parametrizaciones usado en los experimentos P_01, P_02 y P_03.	72
Tabla 4-5: Similar a la Tabla 4-3 para los experimentos con distintas parametrizaciones de WRF (P_01, P_02 y P_03).....	73
Tabla 4-6: Similar a la Tabla 4-3 para el experimento de WRF con modificación en la temperatura (WRF_T_MOD) de los forzadores y sin esta (WRF_BASE).	75

Introducción

El término helada está definido como la congelación del rocío presente en el aire sobre alguna superficie, no obstante, es más comúnmente usado para hablar de un fenómeno meteorológico en el cual la temperatura mínima del aire es igual o inferior a 0 °C (32 °F, 273.15 K) (AMS, s. f.; NOAA, s. f.). Estas configuran un evento meteorológico extremo, poco frecuente, cuya importancia radica principalmente en la capacidad de generar daños al congelar el agua y los tejidos de distintas plantas, lo que en algunos casos significa su necrosis que, dependiendo de la cantidad y tipo de individuos afectados, causa impactos ecológicos y socioeconómicos sobre las zonas bajo helada (FAO, 2010b, 2010a). Conocer las condiciones que favorecen la ocurrencia de estos casos es sin duda una gran herramienta en la prevención de sus efectos. Estas condiciones pueden ser de tipo ecológico, geográfico o meteorológico, siendo estas últimas las de mayor varianza en el corto plazo y, por lo tanto, las que se considera pueden brindar más información sobre la evolución de la temperatura del aire hasta alcanzar los umbrales que configuran un evento de helada.

Las condiciones atmosféricas bajo las cuales se producen estos eventos son particulares y con base en estas, a grandes rasgos, las heladas se dividen en evaporativas, advectivas o radiativas, siendo estas últimas las más comunes en zonas tropicales, como Colombia (IDEAM, 2012). Las heladas radiativas deben su nombre a que suceden cuando el balance local de radiación (especialmente de onda larga) tiene una tasa de salida acelerada. Por lo anterior, en la zona de estudio y en otras áreas geográficas donde el ciclo diario de radiación solar es relativamente estable a lo largo del año, estos eventos se dan por un proceso de enfriamiento nocturno anormal.

El enfriamiento nocturno es un proceso que ocurre ante la ausencia de luz solar (de ahí recibe su nombre) cuando el suelo no tiene una gran fuente de energía térmica entrante, por lo cual, durante toda la noche, esta se transfiere paulatinamente al aire. Como

resultado, se tiene un mínimo de energía en superficie en horas cercanas al amanecer y por consiguiente la temperatura del aire es también menor en este periodo (INIA, 2020). En Colombia, el enfriamiento nocturno ocurre de forma estable, alrededor de las 18:00 a 06:00 horas, sin embargo, este no suele causar heladas. Es cuando la salida de radiación y el enfriamiento nocturno son favorecidos por las condiciones ambientales, que se presentan los casos de helada radiativa. Generalmente, estas duran pocas horas, dado que, posterior a la salida del sol, el suelo y la atmósfera cercana a este son calentados rápidamente.

En Colombia las heladas radiativas están confinadas en el espacio a zonas altas, por encima de 2500 m.s.n.m (IDEAM, 2012), debido a que solo en estos sitios las condiciones de temperatura media antes de anochecer y meteorológicas permiten el enfriamiento del aire a 0 °C o menos. También se asocia las heladas con un ambiente atmosférico con poco contenido de humedad, puesto que esto reduce la capacidad calorífica del aire y este puede tener cambios de temperatura más rápidamente. Por otro lado, Saavedra & Takahashi (2017) resaltan el efecto de la nubosidad sobre el balance radiativo en superficie, con lo cual cielos despejados implican una menor cantidad de radiación térmica reflejada a la superficie, además de favorecer su salida. Los anteriores factores hacen que la mayor frecuencia de ocurrencia de heladas se encuentre anualmente en los trimestres diciembre, enero, febrero y junio, julio, agosto (IDEAM, 2012; Torres, 2020), épocas en las cuales para las zonas andinas del país suele haber una precipitación escasa. Además, se dice que las condiciones meteorológicas que favorecen la transferencia de radiación de onda larga de la superficie a la atmósfera, están compuestas por un ambiente similar al de la inversión térmica, es decir, cuando la altura de la capa límite atmosférica es reducida y el perfil vertical de temperatura tiene una zona cercana al suelo donde esta crece con la altitud, debido a que las condiciones de radiación solar y vientos de baja intensidad reducen la turbulencia y mezcla en el aire a estas altitudes, lo cual favorece que se creen y conserven zonas frías cerca al suelo (Wallace & Hobbs, 2006).

Los estudios meteorológicos de heladas radiativas revisados, se han centrado en observar el comportamiento conjunto de la temperatura del aire y algunas variables útiles en la descripción del estado de la atmósfera (humedad específica y relativa, velocidades de vientos, radiación, etc.). En algunos trabajos esto se hace por métodos estadísticos, como la separación de casos y la descripción del comportamiento medio de un conjunto de estos

(Torres, 2020) o también con el cálculo y análisis de correlaciones lineales entre temperatura del aire y otras variables (Menacho & Dávila, 2018). Otra aproximación es desde la modelación, donde el proceso de análisis de sensibilidad permite la modificación de condiciones atmosféricas y, a partir de esta experimentación, obtener evidencia acerca de la interacción de la variación del estado atmosférico y la temperatura mínima del aire (Crimp et al., 2015; Ding et al., 2019; Mamani, 2018; Mercado et al., 2016; Rozante et al., 2020; Saavedra & Takahashi, 2017). En su mayoría, estas investigaciones hacen uso de datos medidos por estaciones meteorológicas puntuales. Otros autores también emplean mediciones de sensores remotos, que permiten explorar la relación espacial de la temperatura del aire y desarrollar productos útiles en la zonificación de riesgo por heladas (Albornoz, 2017; Kotikot et al., 2020; Kotikot & Onywere, 2015; Pouteau et al., 2011); sin embargo, en estos no se explora información meteorológica adicional.

Estas dos aproximaciones presentan algunas limitaciones. Por un lado, algunos analizan la evolución de la temperatura y algunas variables atmosféricas con información puntual, descuidando su relación y variación espacial. En otros casos, se entiende el comportamiento espacial de la temperatura a costo de reducir la resolución en el tiempo y el estudio de su interacción con otros factores meteorológicos. Este trabajo busca entonces encontrar un equilibrio entre el entendimiento del ambiente atmosférico relativo a las heladas, tanto espacial como temporalmente. Además, se plantea algo poco explorado anteriormente, que es el estudio de la atmósfera en su estructura vertical, donde lo más cercano sería el modelo de Saavedra & Takahashi (2017), que explora la influencia de la altitud de la cobertura nubosa en las heladas. Esto puede facilitar deducir que forzadores favorecen las condiciones propicias para la ocurrencia de heladas radiativas en Colombia, así como entender si estas dependen únicamente de variaciones atmosféricas superficiales.

Se plantea entonces como objetivo analizar y caracterizar los factores meteorológicos que influyen en la temperatura mínima del aire durante eventos de helada radiativa en zonas susceptibles en Colombia y sus diferencias espacio temporales. Lo anterior, a partir de la identificación y descripción del ambiente atmosférico asociado a temperaturas bajo 0 °C, desde la observación de distintas variables meteorológicas en superficie y distintos niveles verticales. Adicionalmente, extraer de estos análisis aquellos parámetros que se puedan

considerar a futuro para mejorar la modelación de la amenaza de heladas radiativas en Colombia.

Para el desarrollo de estos objetivos, es fundamental la selección de fuentes de información (bases de datos, reanálisis, etc.) que dispongan de las variables meteorológicas relacionadas con heladas radiativas, en las dimensiones requeridas, con resoluciones espacio temporales lo más finas posible y con cobertura en el área de estudio. A partir de estas, se aplican distintas metodologías de análisis de datos que permitan describir las heladas desde casos únicos hasta un conjunto de eventos, para determinar patrones y diferencias en los ambientes atmosféricos. Otra herramienta usada es la modelación numérica, que permite explorar los procesos en diferentes resoluciones espaciotemporales, como también, desde el entendimiento de la dinámica del modelo usado, obtener hipótesis acerca de qué factores favorecen el desarrollo de estos eventos extremos.

1.Estado del arte y área de estudio.

1.1 Estado del arte

El estudio de las condiciones meteorológicas relacionadas con las heladas radiativas, en la bibliografía revisada, generalmente parte de cuatro enfoques identificados, los cuales se pueden clasificar, teniendo en cuenta los objetivos y metodología general de la investigación en: análisis espacio temporal de temperatura mínima, relación con otras variables meteorológicas, modelamiento y uso o adaptación de datos de sensores remotos.

Los trabajos de análisis espacio temporal de temperatura mínima, se centran en el hecho de que las heladas, independientemente de su tipo, se desarrollan bajo condiciones particulares, lo cual hace que solo sucedan en ciertas localizaciones y temporadas. Partiendo de esto, en este tipo de trabajos se hacen análisis estadístico-descriptivos de series de tiempo de temperatura mínima para establecer probabilidades sobre la ocurrencia de valores iguales o inferiores a cierto umbral (el cual consideran los investigadores para definir la helada) en determinada época o zona. Un ejemplo de esto se encuentra en el trabajo de García et al. (2015), donde, para la región de Anguil (Argentina), determinan los periodos medios de heladas, estimando la fecha promedio de ocurrencia del primer y último de estos eventos en el año. Otras investigaciones agregan a este tipo de análisis algunas variables no meteorológicas con el fin de hacer mejores zonificaciones de riesgo de heladas, por ejemplo, en Kotikot et al. (2020) y Kotikot & Onywere (2015) se estudia la interacción de la temperatura mínima con aspectos geográficos y biofísicos de las zonas altas de Kenia y su incidencia en la vulnerabilidad a heladas radiativas. En los trabajos de Gómez Latorre (2014); Gómez-Latorre et al. (2021) y Martínez et al. (2017) se realiza un ejercicio similar para un caso local, en el valle de Ubaté, Chicamocha y otras zonas del altiplano cundiboyacense, donde, a partir del análisis

de series de temperatura del aire de estaciones meteorológicas del IDEAM, del Índice Oceánico del Niño (ONI) y el Índice Multivariado del Niño (MEI), logra identificar que el trimestre de diciembre-enero-febrero (DEF) es en el que se presenta un aumento en la amenaza de heladas, seguido en menor medida por periodo entre julio y agosto (JJA) y que la temperatura mínima no tiene una relación lineal significativa con el ONI. También, que características fisiográficas como la lejanía a cuerpos de agua, coberturas de páramo, subpáramo o pastos se encuentran más expuestos a heladas.

Por otro lado, varios autores tratan de encontrar por distintos métodos, relaciones entre algunas variables meteorológicas y los cambios en la temperatura mínima del aire y por consiguiente de los casos de helada. Para esto lo más común es el uso de estadística, como en Menacho & Dávila (2018), donde para el altiplano peruano se usa la correlación lineal entre índices de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) con la temperatura mínima. Torres (2020), para la sabana de Bogotá, analiza la información meteorológica de algunas estaciones meteorológicas ubicadas en esta área (especialmente una en el municipio de Mosquera, Cundinamarca), concluyendo que los días de helada en esta zona en promedio presentan alta radiación solar, cambios abruptos de temperatura en las mañanas y noches, baja humedad, nubosidad y velocidad del viento, así como un ambiente de inversión térmica.

El enfoque del modelamiento de heladas se basa principalmente en pronosticar la temperatura mínima del aire y, a partir de experimentos de análisis de sensibilidad, deducir que parámetros están más relacionados con la ocurrencia de heladas. En general los modelos encontrados suelen ser de cuatro tipos: estadísticos o similares (p. ej. Crimp et al. (2015), es decir, basados en el comportamiento de la temperatura mínima y otras variables y sus tendencias probables; numérico-físicos (p. ej. Mamani, (2018); Saavedra & Takahashi (2017)) que a partir de ecuaciones que asemejan la dinámica del sistema atmosférico entregan uno o varios parámetros de interés; de aprendizaje automático (p.ej. Ding et al., (2019); Mercado et al., (2016)) que usan una red neuronal con diferentes entradas para pronosticar la temperatura mínima del aire o una variable dicotómica de ocurrencia o no de helada o también algunos que usan una mezcla de estos; por ejemplo, en Rozante et al. (2020) se usan simulaciones en WRF que pasan por una regresión que indica cuando en el modelo aumenta la amenaza de heladas. Para el caso local se encuentra nuevamente el trabajo de (Torres, 2020), que con WRF (modelo numérico-físico)

intenta reproducir un caso de temperatura mínima para Mosquera (Cundinamarca), a partir de lo cual logra encontrar una configuración óptima del modelo para que este simule lo más precisamente posible los registros de temperatura del aire de una estación meteorológica; sin embargo, no logra representar heladas. Para el mismo municipio, Bonilla et al. (2006) elaboran una red neuronal para el pronóstico de temperatura mínima que usa como principal predictor la misma variable, sin conseguir un éxito en la predicción de heladas y alcanzando una precisión del 73% en la modelación de la temperatura.

Finalmente, se encuentran los trabajos que hacen uso y adaptación de datos de sensores remotos. La mayoría de las investigaciones sobre heladas extraen información de estaciones meteorológicas en tierra; no obstante, los autores prefieren el uso de datos satelitales o similares por algunas ventajas que tienen como una mejor representación espacial, mayor facilidad para interpolar y realizar mapas de riesgo o amenaza, entre otras. Como ejemplos se encuentra el trabajo Albornoz (2017), que para Valparaíso (Chile) hace una estimación de riesgo de heladas a partir de temperatura superficial censada por el satélite MODIS y datos in situ de algunas variables meteorológicas; esto por medio de un modelo de regresión lineal que hace una corrección de la temperatura superficial para que sea más cercana a los valores de temperatura mínima del aire. Por otra parte, en la zona Andina de Bolivia, (Pouteau et al., 2011) hacen un modelo de inteligencia artificial por árboles de decisión que, con entradas de información topográfica del área de estudio, subescala datos de temperatura superficial de MODIS para estimar la probabilidad de ocurrencia de helada. En este caso no se encontraron referencias de este tipo para casos en Colombia.

De la revisión de estos trabajos, se observa que en Colombia las heladas radiativas se encuentran caracterizadas en cuanto a su frecuencia intraanual y diurna para buena parte del país (IDEAM, 2012) y para algunas zonas, principalmente del altiplano Cundiboyacense, se logra entender que el aumento de la amenaza de heladas en el trimestre DEF y en horas cercanas al amanecer, se debe a que en estas épocas se presentan con mayor probabilidad condiciones de baja magnitud en humedad, nubosidad y vientos, acompañados de días de alta radiación solar.

Se reconoce entonces que el estado del arte sobre heladas radiativas en Colombia se ha centrado en análisis de escala climática en una reducida zona de la región Andina, con lo

cual se desconocen aspectos como: el comportamiento climático asociado a estas en otras zonas sobre las cordilleras en el país; las variaciones de corto plazo del estado atmosférico (tanto en superficie como en la vertical atmosférica) asociadas a los casos de helada; la influencia de patrones regionales en la generación de ambientes propicios para estos eventos y las posibles diferencias geográficas que puedan existir entre los factores que aumentan la amenaza de heladas.

Por lo anterior, se plantea abordar estas cuestiones, además de analizar la componente vertical atmosférica durante estos eventos, que no ha sido previamente estudiada y en esta se pueden reconocer patrones meteorológicos que favorecen el ambiente característico de las heladas, también teniendo en cuenta la asociación de estos eventos con casos de inversión térmica. Esto a partir del objetivo general de analizar y caracterizar los factores meteorológicos que influyen en la temperatura mínima del aire durante eventos de helada radiativa en zonas susceptibles en Colombia y sus diferencias espacio temporales. Se plantean también los objetivos específicos de: Identificar y describir el comportamiento temporal y espacial característico en las variables meteorológicas relacionadas con heladas radiativas; analizar y describir el ambiente atmosférico en niveles cercanos a la superficie para eventos de helada radiativa; determinar los patrones sinópticos que crean las condiciones meteorológicas bajo las cuales se dan heladas radiativas y, finalmente, hacer un aporte a la modelación de este fenómeno, identificando variables meteorológicas (o modificaciones de estas) relevantes en la construcción futura de un modelo de pronóstico de amenaza de heladas radiativas para Colombia.

1.2 Área de estudio

En zonas tropicales como Colombia, las heladas radiativas están confinadas por límites de altitud sobre el nivel del mar. Específicamente, se han registrado estos eventos en altitudes por encima de los 2500 m.s.n.m. (IDEAM, 2012), lo cual brinda una buena delimitación sobre aquellos lugares en los cuales se debe obtener información. En la Figura 1-1 se muestra un mapa en el cual se resalta en rojo aquellas áreas del territorio nacional donde la elevación del terreno es igual o mayor a 2400 m.s.n.m. y, por lo tanto, se considera esta como área de estudio. Se selecciona esta cota inferior a la indicada por IDEAM considerando que el informe de esta institución está basado en detección de eventos más no en un límite fijo. No toda la zona roja es seleccionada finalmente, debido a la información

meteorológica encontrada y los límites finales del área de estudio se encuentran entre los 6 °N y 0° en latitud y 78 °W a 72°W para la longitud.

En el mapa de la Figura 1-1, se describe en distintos tonos de verde el porcentaje de aporte a la producción agrícola nacional discriminado por departamento, resaltando que una parte considerable de los verdes más oscuros (mayor aporte a la producción) se solapa con la zona de influencia de heladas, es decir, que aquí se pueden sufrir pérdidas agrícolas y económicas considerables por este fenómeno.

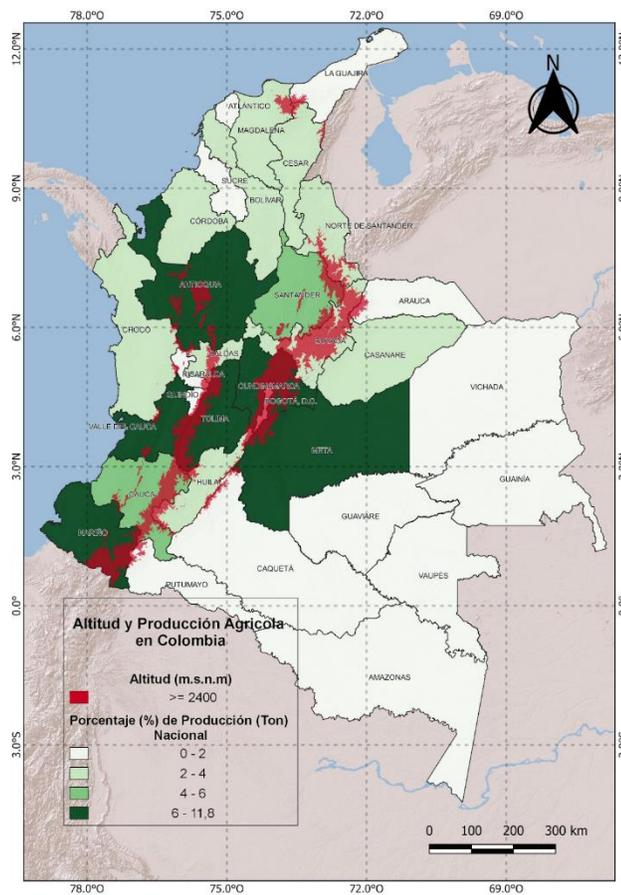


Figura 1-1: Zonas de Colombia sobre 2400 m.s.n.m (sombra roja) y porcentaje de producción agrícola por departamento (distintas tonalidades de verde). Información base DANE (2020)

2. Datos y metodología

El alcance de los objetos de investigación aquí planteados depende de la calidad de los datos a partir de los cuales se espera obtener resultados, más aun teniendo en cuenta que parte de la consecución de los objetivos planteados, recae en que los registros seleccionados cumplan ciertas condiciones relacionadas con cobertura espacial, frecuencia y periodo de muestreo.

Al iniciar la búsqueda de información, se debe considerar qué variables meteorológicas se esperan analizar. El insumo imprescindible con el que se debe contar en este caso, son registros de temperatura del aire, teniendo en cuenta que a partir de estos se pueden identificar los eventos de interés. Además, dado que el objetivo central de este trabajo es determinar el ambiente atmosférico que favorece las heladas, se entiende, a partir de la revisión de informes e investigaciones en el área de la meteorología (IDEAM, 2012; Torres, 2020 para Colombia y Ding et al., 2019; INIA, 2020; Saavedra & Takahashi, 2017 a nivel general), sobre heladas radiativas que, como variables relacionadas con este fenómeno se encuentran: la humedad presente en la atmósfera, la radiación de onda larga, la velocidad del viento y la precipitación. En secciones posteriores de este capítulo se presenta en detalle algunas precisiones en cuanto al proceso de selección y consolidación de bases de datos.

2.1 Datos de temperatura del aire

La temperatura del aire tiene una subsección separada en este capítulo, dado que es la variable meteorológica más importante en las investigaciones de heladas radiativas, pues, ésta es indicador de la ocurrencia de estos eventos (cuando tiene valores iguales o inferiores a 0 °C), además de servir en la estimación de intensidad del fenómeno, sea por duración de la helada o por mínimo de temperatura alcanzado.

Pensando únicamente en esta variable, se preseleccionaron tres productos para la obtención de registros de temperatura del aire en Colombia, los cuales son: estaciones meteorológicas y climáticas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el reanálisis ERA5 del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) y las imágenes de MOD11A1 - MYD11A1 del *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). La Tabla 2-1, resume información clave de estos productos.

Tabla 2-1: Metadatos considerados en la selección de registros de temperatura del aire en el área de estudio.

Producto	Variable relacionada	Instrumentos muestreo	Cobertura zona de estudio.	Resolución espacial	Frecuencia muestreo	Periodo
Estaciones IDEAM	Temperatura del aire a 2m (mínima, media y máxima)	Estaciones climáticas y meteorológicas con termómetros	Parcial, por ser información puntual.	Puntual	2 y 10 minutos, horaria o semi diaria, depende del tipo de estación.	Depende de la estación alrededor de 2000-2022.
Reanálisis ERA5	Temperatura del aire a 2m (mínima media y máxima)	Modelo de pronóstico numérico físico con asimilación de observaciones satelitales e in situ.	Total	0.25 °, aproximadamente 28 km	Horaria	1959-2022
MOD11A1 MYD11A1	Temperatura superficial del suelo	Espectro radiómetro en los satélites Terra y Aqua respectivamente	Parcial, depende de las condiciones de visibilidad de los satélites.	1 km o 6 km	Semi diaria	2000-2022

Fuente: Información base de ECMWF (s. f.); IDEAM, (s. f.) y MODIS, (s. f.)

A partir de los metadatos de la Tabla 2-1, se descartan en primera instancia los productos MOD11A1 y MYD11A1. Como se observa en la Tabla 2-1, MODIS tiene disponible hasta la fecha la temperatura de la superficie del suelo, que, al tener propiedades físicas distintas al aire, suele tener una magnitud mayor (menor) a la temperatura del aire en horas del día (noche), lo cual implicaría hacer correcciones a sus valores. Por otro lado, se tienen problemas de cobertura espacial, dado que el instrumento de los satélites depende de las condiciones de visibilidad y, ante alta nubosidad, se tiene pérdida de información. Un ejemplo de esto se observa en la Figura 2-1 donde se muestran dos imágenes del producto satelital en condiciones de visibilidad contrastantes, lo cual, se da tanto en MOD como en MYD. Igualmente se encuentran deficiencias en los tiempos de medición, debido a que la temperatura es representada en MOD y MYD con frecuencia semidiurna y no necesariamente en las horas de ocurrencia de heladas en Colombia, pues para el caso de MOD el paso del sensor se hace entre las 09:00 a 11:00 horas en el día y 21:00 a 00:00 horas en la noche y para MYD estos tiempos son de las 12:00 a 14:00 horas y 00:00 a 03:00 horas, pero en este caso, se debe a la trayectoria diaria de los satélites Terra y Aqua y no a problemas en las mediciones.

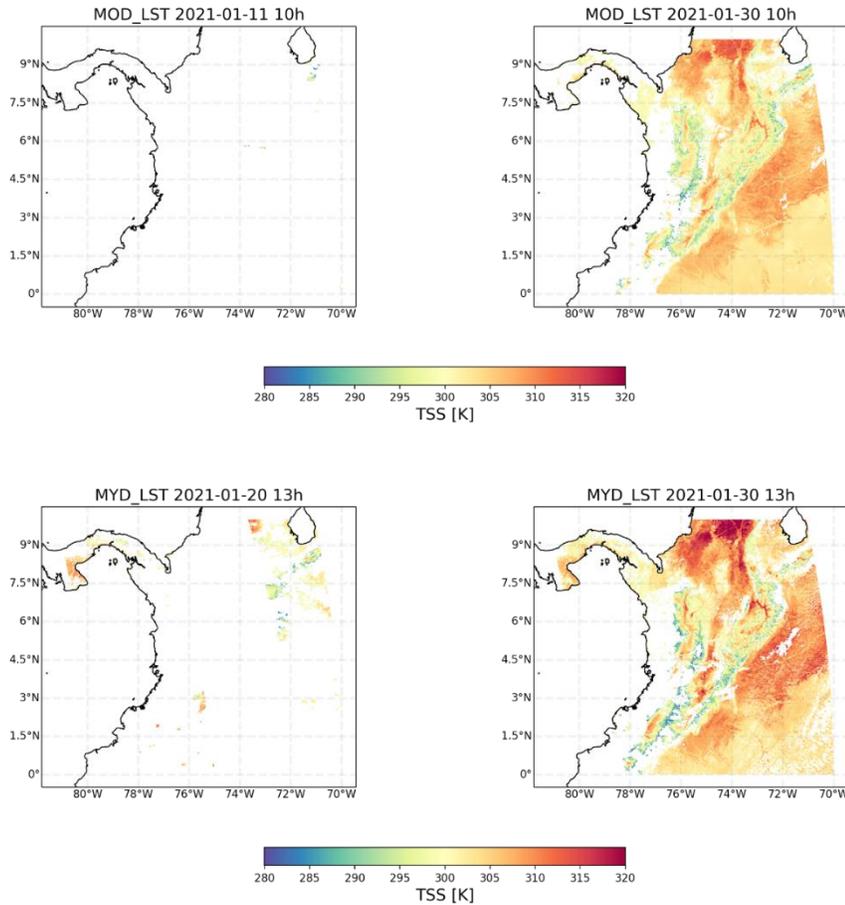


Figura 2-1: Imágenes satelitales de MODIS de temperatura superficial del suelo (TSS) con diferentes condiciones de visibilidad. La primera fila de imágenes muestra datos de MODIS terra (MOD), mientras que la inferior de MODIS aqua (MYD). La primera columna de ambos casos (izquierda) muestra ejemplos de imágenes tomadas en condiciones de baja visibilidad y la de la derecha con mejor visibilidad.

En cuanto a los dos productos restantes, cada uno tiene pros y contras. Por un lado, ERA5 tiene ventajas tales como cubrir homogéneamente el territorio a estudiar, similarmente sucede en la dimensión del tiempo, donde en toda la malla espacial el periodo es idéntico. Sin embargo, al tener una resolución relativamente baja (~ 28 km) para este tipo de eventos tan localizados (más aun teniendo en cuenta la orografía del país), la precisión en el valor de la temperatura del aire puede verse afectada. Por otro lado, las estaciones del IDEAM, si bien no tienen la homogeneidad y gran cobertura en el espacio y el tiempo de ERA5, son la fuente más confiable/precisa en cuanto a la medición de temperatura y otras

variables en el punto donde están ubicadas. Es posible comparar datos y determinar qué tan preciso puede ser ERA5 para la cuantificación de la temperatura del aire y la detección de heladas en Colombia, con el fin de aprovechar sus ventajas sobre las mediciones in situ.

La Figura 2-2 muestra una serie de gráficos de dispersión de la temperatura del aire a 2 metros de algunas estaciones del IDEAM (eje X) y ERA5 (eje Y). Dado que ERA5 no tiene datos puntuales, la comparación se hace con el píxel cuyas coordenadas son las más cercanas (en distancia euclidiana) a las reportadas para la respectiva estación. Los datos se agrupan por trimestres (columnas) y según si es temperatura diurna o nocturna (filas), esto debido a que se conoce que las heladas suceden casi exclusivamente entre las 00:00 y 06:00 horas y, en algunas zonas del país, que estas son más frecuentes en los trimestres diciembre, enero, febrero (DEF) y junio, julio, agosto (JJA). También se clasifican los datos por departamento en el cual se encuentra la estación que los registra, esto con el fin de identificar cómo se da la representación de la temperatura de ERA5 en distintas zonas del país.

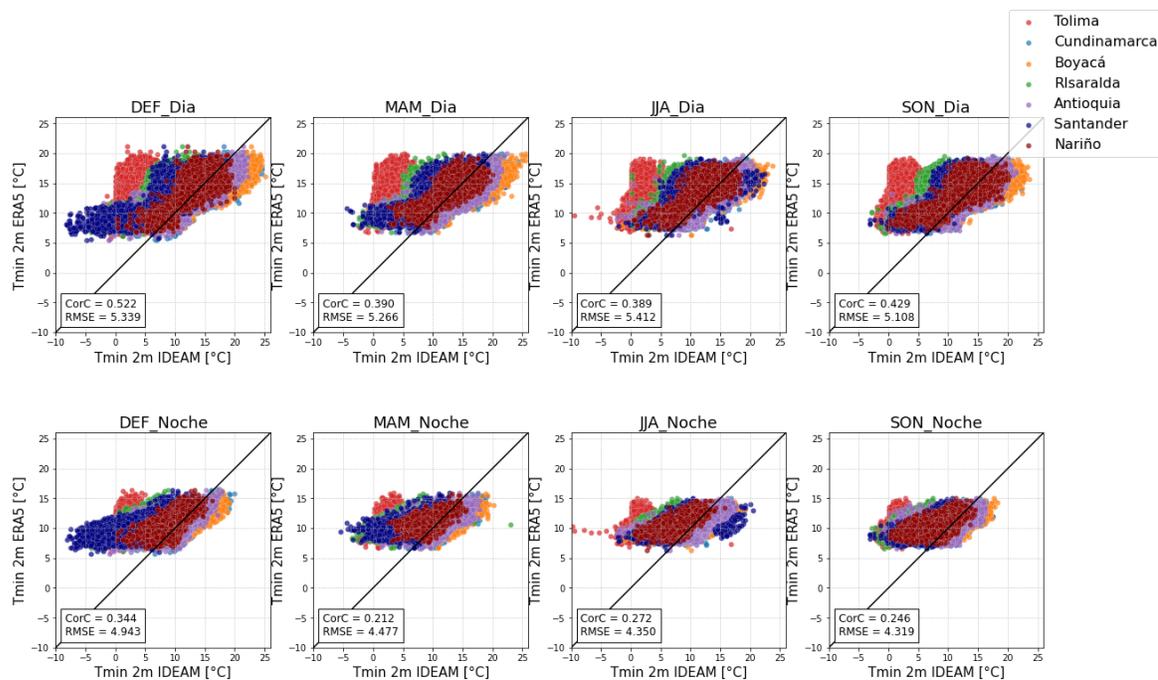


Figura 2-2: Gráficos de dispersión de temperatura del aire a 2 m medida en estaciones del IDEAM (eje X) frente a ERA5 (eje Y).

Estos gráficos de dispersión brindan claridad en cuanto a que base de datos es más útil en la tarea de detección de heladas radiativas en Colombia, es decir, las mediciones del IDEAM. En los distintos recuadros se observa que, si bien ERA5 e IDEAM tienen una buena agrupación en valores medios, ERA5 para los máximos subestima la temperatura y en cuanto a los mínimos tiende a sobreestimarla, lo cual es especialmente grave en los casos de helada, donde al menos en los píxeles revisados, no se tienen registros iguales o menores a 0 °C. Se entiende este comportamiento debido a la baja resolución espacial de ERA5 (comparado a la topografía de la región Andina colombiana), a una posible falta de inclusión de datos medidos para Colombia en la fase de asimilación de datos del reanálisis y, a que las heladas son eventos de poca extensión en área que no logran ser detectados a tales resoluciones.

La clasificación por departamentos no indica que ERA5 tenga mejor o peor precisión dependiendo de la región, pues los puntos tienen una agrupación similar independiente de este factor, exceptuando el caso de Tolima, donde los mínimos de temperatura son sobreestimados en mayor medida.

Esta revisión de bases de datos permite afirmar que, para esta investigación, en la cual es importante tener información en cuanto a tiempos y ubicaciones donde ocurren heladas radiativas, hasta el momento se debe recurrir exclusivamente a los registros de estaciones meteorológicas y climáticas del IDEAM para su identificación, al menos para objetivos similares a los de este trabajo.

2.2 Datos de variables meteorológicas asociadas a heladas radiativas

En conjunto con la detección de eventos de heladas radiativas, los objetivos de esta investigación requieren de información de otras variables meteorológicas relacionadas con este fenómeno. Como se mencionó anteriormente, estas deben indicar el estado de la atmósfera, al menos, en cuanto a temperatura, humedad, radiación de onda larga, velocidad del viento y precipitación. Además, se espera que estos datos puedan ser

analizados en conjunto con la temperatura del aire obtenida en los registros de las estaciones meteorológicas del IDEAM, con lo cual se espera que tengan una cobertura espacial y un periodo lo más similar posible a dichos registros. También, dado que se desea observar no solo el ambiente atmosférico instantáneo cuando ocurre una helada, sino un lapso anterior y posterior a estos instantes, para así analizar la evolución de las distintas variables, su interacción con la temperatura y las posibles causas del estado atmosférico que favorece el enfriamiento del aire, es necesario que estos datos complementarios tengan una frecuencia de muestreo mayor a la diurna o semidiurna.

Otro objetivo de esta investigación es la descripción del ambiente atmosférico relativo a las heladas en distintos niveles en la vertical, con lo cual también se busca que algunas variables permitan observar sus valores tanto superficiales como en el perfil de altura.

Ante estos requerimientos, obtener información de las mismas estaciones de IDEAM es una posibilidad, no obstante, tiene algunas desventajas. Para empezar, no todas las estaciones tienen instalados los instrumentos de medición en las mismas fechas, esto en algunos casos reduce el periodo susceptible de análisis y por consiguiente la cantidad de eventos que configurará la muestra de análisis. Los registros de temperatura y demás variables también pueden diferir en el periodo cubierto a causa de problemas en los sensores, que en ocasiones pueden fallar en instantes diferentes. Esto representa un problema en cuanto a que no solo se reduce la cantidad de eventos de helada disponibles para analizar, sino que igualmente puede reducir la cobertura espacial de la investigación, algo no deseable dado que se espera investigar sobre las heladas en distintas regiones de Colombia. Otra desventaja clave es que estas estaciones solo censan datos en superficie, no en distintos niveles de la atmósfera.

Teniendo en cuenta lo anterior, se buscan distintas fuentes de información meteorológica para el área de estudio. Productos como GOES, MODIS, GFS-FNL, ERA Interim y ERA5 tienen representación de distintos campos atmosféricos en niveles verticales de la atmósfera, así que se hace una exploración sobre sus características.

Sin duda, GOES y MODIS son productos interesantes en cuanto a la precisión de sus datos, dado que se trata de observaciones (satelitales) y no de análisis o reanálisis de modelos. Sin embargo, estos obtienen sus datos principalmente a partir de la observación de propiedades radiativas y ópticas de la atmósfera, con lo cual algunas variables no son

exactamente mediciones sino derivaciones de estas y en otros casos como la velocidad del viento no es posible su extracción. Además, estos satélites tienen información en ciertos niveles de la atmósfera, más no tienen una malla vertical que permita revisar el comportamiento de una misma variable a distintas alturas.

Lo anterior, hace que otras bases de datos como GFS-FNL, ERA interim y ERA5 cobren relevancia para la consecución de los objetivos del presente trabajo. Estas poseen ventajas como una malla relativamente homogénea en superficie, en tiempo y que cubre la atmósfera en distintos niveles de presión, además cuentan con las variables meteorológicas necesarias para este trabajo específico. Las diferencias entre estas fuentes recaen principalmente en la frecuencia de sus salidas, dado que en general todas son modelos de tipo *numerical weather prediction* (NWP) que hacen asimilación de datos censados, con lo cual, la precisión de sus valores es relativamente cercana entre sí, pero su frecuencia si es fácilmente diferenciable. Es esta característica la que lleva a la selección final de ERA5 como producto para la extracción y análisis de información de variables meteorológicas en superficie y en niveles de la atmósfera, pues sus contrapartes ERA interim y GFS-FNL tienen salidas cada 6 y 3 horas respectivamente, mientras que ERA5 los tiene disponibles cada hora, con lo cual, este producto está más acorde con la información de temperatura mínima del aire de IDEAM, que es igualmente horaria y con las características propias del fenómeno.

Para la zona de estudio se usan entonces los productos de ERA5 *single levels* (SL) para superficie y *pressure levels* (PL) para la vertical atmosférica. La Tabla 2-2 resume las variables extraídas de SL y PL, así como la utilidad que tienen en esta investigación. Todas estas se usan con frecuencia horaria, para un periodo entre 2005 y 2021 (donde se tiene registro de heladas). En cuanto a los niveles de presión usados, ERA5 cuenta con datos entre los 1000 hPa hasta 1 hPa, sin embargo, solo se usan los niveles de 1000 a 400 hPa.

Tabla 2-2: Variables meteorológicas usadas del reanálisis ERA5.

Producto	Variable	Abreviatura (unidades)	Utilidad
SL	Temperatura mínima del aire a 2 m	MN2T (K)	Sirve de comparación respecto a la temperatura in situ
	Temperatura de punto de rocío a 2 m	D2M (K)	Al ser usada con la temperatura del aire sirve como estimador de la humedad

Producto	Variable	Abreviatura (unidades)	Utilidad
			relativa. Esto se identificará como T2DIF
	Radiación térmica neta de la superficie (entrante)	SNR (J m^{-2})	La radiación de onda larga es determinante en la ocurrencia de heladas radiativas
	Velocidad del viento zonal y meridional a 10 m	U10 y V10 (m s^{-1})	Calcular la velocidad del viento (WS10).
	Cobertura de nubes a baja altura	LCC (%)	Se dice que las heladas están asociadas a cielos despejados, se espera comprobar esto
	Precipitación total	PPT (m)	Las heladas ocurren en temporadas de baja precipitación, se revisa esto.
PL	Temperatura	T (K)	Observar la evolución de la temperatura no solo en superficie.
	Geopotencial	GEOP (m s^{-2})	Estimar variaciones de presión en la atmósfera.
	Humedad relativa	RH (%)	Evaluar el contenido de humedad de la atmósfera
	Humedad específica	Q (kg kg^{-1})	Evaluar el contenido de humedad de la atmósfera
	Velocidad zonal y meridional del viento	U y V (m s^{-1})	Calcular la magnitud del viento (WS)

2.3 Metodología

Una vez se tienen a disposición los datos, se debe revisar si estos son confiables para su uso y análisis. En el caso de ERA5, los productos son liberados al público una vez estos han sorteado la etapa de asimilación de observaciones y corrección, con lo cual para esta investigación no es necesario que pasen por ningún preprocesamiento. Contrario ocurre con la información del IDEAM, dado que estos son de libre acceso prácticamente en tiempo real; en consecuencia, no siempre son revisados y no se detectan datos anómalos o dificultades en las mediciones como fallas de los instrumentos u obstrucciones en su funcionamiento, por lo tanto, estos datos si requieren una validación.

Estévez et al. (2011) describen una serie de pruebas para la validación de información de estaciones meteorológicas automáticas, es decir, que se ajustan al caso de las estaciones del IDEAM de las cuales se extraen registros. En la Tabla 2-3, se describen las funciones de estas pruebas, así como la fórmula que las define.

Tabla 2-3: Pruebas automatizadas de validación de registros de temperatura del aire de estaciones meteorológicas automáticas.

Prueba	Formulación	Descripción
Limites fijos	$-15\text{ }^{\circ}\text{C} \geq T_{anom} \geq 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	Se eliminan registros de temperaturas con valores por fuera de las oscilaciones que se consideran normales en la variable.
Paso	$ T_{anom}(h) - T(h-1) > 4\text{ }^{\circ}\text{C}$	Se eliminan registros donde las variaciones de temperatura en horas consecutivas sean mayores a 4 °C
Saltos	$\hat{X}_n - f * S_n \geq T_{anom}(1 \dots n)$ $\geq \hat{X}_n + f * S_n$	En una ventana de 9 horas para este caso, se eliminan registros que sobrepasen la media de la temperatura más o menos la desviación estándar por un factor de 1 o de un valor seleccionado por el usuario.
Varianza	$S_n \leq 0.001$	Se revisa también para una ventana de 9 horas que la varianza de la temperatura supere un umbral de 0.001
Chequeo horario	$T_{anom} \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ AND $(h \geq 8 \text{ OR } h \leq 20)$	Las heladas en Colombia se dan por enfriamiento nocturno, entonces se eliminan registros de temperaturas inferiores a 0 °C en horas del día.

Una vez se han sorteado los anteriores filtros (Tabla 2-3), se revisan los casos de helada remanentes y el comportamiento de la temperatura horas antes y después al registro del evento, de modo que se descarten aquellos donde la temperatura tiene variaciones que no parecen normales para el observador. La Figura 2-3 muestra un ejemplo de lo que se considera una variación normal (Figura 2-3 a), donde la temperatura desciende gradualmente, hasta estar por debajo de los 0 °C y posterior al amanecer el aire se calienta por encima de este límite, caso en el cual se conserva esta parte de la serie de temperatura. Por otra parte, se muestra lo que se identifica como anomalía (Figura 2-3 b), dado que se ve como la temperatura se reduce de manera significativa (alrededor de 10 °C) en un lapso de cerca de una hora, además de permanecer bajo cero en horas

posteriores al amanecer, por lo tanto, este evento es descartado. A partir de esto se tiene información de distintas estaciones en Colombia, cuya información se puede revisar en el Anexo A

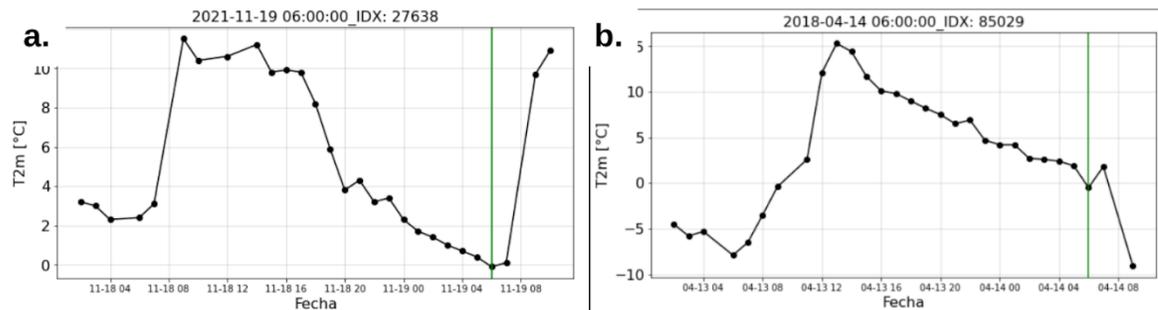


Figura 2-3: Ejemplos de variación de temperatura del aire en una helada normal (a) y una posible helada anómala (b.)

Adicionalmente, por la heterogeneidad en los periodos de registro de las estaciones del IDEAM seleccionadas, se experimentó con un ejercicio de homogenización de series de heladas, que buscaba la extensión de estas por métodos de aprendizaje automatizado con datos meteorológicos del reanálisis ERA5, el cual no logró resultados completamente satisfactorios. Por una parte, el método usado identificó como variables que más aportaban a la varianza de las heladas la radiación térmica neta del suelo (SNR), temperatura del aire a 2 metros (MN2T), precipitación total (PPT), la diferencia entre temperatura a 2 metros y temperatura de punto de rocío (T2DIF) y la componente meridional del viento a 10 metros (V10), sin embargo, el modelo fue capaz de identificar heladas con alta precisión (baja proporción de casos falsos detectados) pero con una baja exhaustividad (alta proporción de casos verdaderos no detectados), es decir que no cumpliría con efectividad el trabajo de extender las series de registro de heladas para Colombia. El desarrollo de este experimento se encuentra en detalle en el Anexo B.

Con los datos consolidados de IDEAM y el reanálisis ERA5 se plantean análisis para entender el ambiente atmosférico asociado a las heladas radiativas a distintas escalas temporales (climática y meteorológica) y espaciales (local y regional). Para esto se desarrollan:

- **Análisis de relaciones entre casos de heladas y variables meteorológicas:** Se construyen diagramas de dispersión de registros de helada y variables meteorológicas del reanálisis. Para estos, se filtraron de las distintas series de tiempo de temperatura del aire de las estaciones meteorológicas del IDEAM, aquellos registros menores o iguales a 0 °C. Posteriormente, se seleccionan los píxeles de ERA5 cuyas coordenadas sean las más cercanas a las de las estaciones meteorológicas y de las series resultantes se filtran las fechas donde se identificaron heladas. Dado que las heladas pueden tener una duración superior a una hora, se conserva únicamente la primera hora de registro de los distintos casos, esto con el fin de evitar duplicidad en la información. Para revisar relaciones espaciales y temporales, los diagramas de dispersión también clasifican los datos según una característica geográfica, que es la altitud en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y una temporal que es el trimestre de ocurrencia de los casos de helada.
- **Análisis del comportamiento medio de la frecuencia de heladas y variables meteorológicas asociadas:** Se calculó la climatología a distintas escalas temporales (diurna, intraanual e interanual) para la proporción de heladas radiativas y las variables meteorológicas en superficie seleccionadas. Se usa la proporción de heladas respecto a la muestra total para hacer una comparación más justa entre años con más o menos estaciones activas. La gran mayoría de heladas que se dan en zonas de alta montaña, para considerar esta particularidad sin sesgar el análisis, se divide la muestra con respecto a la altitud así: total de la proporción, estaciones ubicadas por encima de 4000 m.s.n.m. y otra para aquellas por debajo de este límite. Para la media de las variables meteorológicas, se seleccionaron series de tiempo que corresponden a los puntos más cercanos a las distintas estaciones del IDEAM. Seguidamente, se filtraron las fechas coincidentes con las respectivas locaciones, lo cual resulta en registros entre los años 2005 y 2021, años entre los cuales las variables se promedian. En este análisis se usan variables del reanálisis ERA5 tanto en superficie (SL) como en los niveles de presión (PL) y para este caso se promedian las variables también para altitudes ubicadas entre 600 y 400 hPa por su menor relación con el comportamiento de la atmósfera en superficie.

Adicionalmente, para el caso de la climatología diurna se promedian las variables para días en los cuales se registraron heladas y días de helada.

- **Análisis de la evolución de condiciones meteorológicas durante casos de helada:** En este caso, para observar los patrones atmosféricos particulares que ocurren en horas previas a las heladas (24 horas antes), se hace un cálculo de anomalías de las distintas variables del reanálisis ERA5 en superficie (SL) y niveles de presión (PL) para todos los casos de helada presentados en las distintas estaciones. La media respecto a la cual se toman las anomalías es horaria-mensual, es decir se promedia sobre cada hora del día y sobre cada mes del año, evitando efectos del ciclo interanual y diurno en las anomalías. Esta media corresponde al periodo 1993 a 2021 del reanálisis y es igualmente calculada sobre cada punto de la malla del reanálisis, con lo cual el análisis es de patrones atmosféricos de corto plazo y locales.
- **Análisis de patrones de anomalías:** Para resumir los distintos patrones presentados en el ejercicio anterior, se realizó un conteo de casos, el cual consiste en la revisión de las anomalías de las variables de análisis en horas cercanas a las heladas registradas y su clasificación según si éstas son positivas o negativas. Esto permite la integración de muchos eventos y la estimación de un rasgo del comportamiento de la atmósfera durante estas heladas. El conteo de anomalías se hace igualmente en las variables del reanálisis ERA5 SL y PL. Para el caso de superficie (SL), se tomó la serie de anomalías (calculadas de forma idéntica a la sección anterior) y se buscaron los periodos 6 horas previas y 3 horas posteriores al registro de las heladas, para promediar la sección y clasificar la magnitud resultante en anomalía positiva o negativa según corresponda. Para la vertical atmosférica (PL) se promedia también en los intervalos de 800 a 600 hPa y de 600 a 450 hPa. Estos dos son contrastantes y representativos de la atmósfera asociada a los eventos de heladas. Los niveles entre 800 y 600 hPa, en general, muestran una mayor dependencia y variación ocasionada por el ciclo diurno de radiación solar, además, se entiende que en estos niveles el efecto de la topografía también es relevante en la meteorología. Similar al análisis de relaciones entre heladas y variables meteorológicas, se dividen los casos según la altitud sobre el nivel del mar de la estación que los censa.
- **Análisis de patrones meteorológicos regionales:** Se elaboran mapas compuestos de las anomalías de corto plazo, calculadas de forma similar al

ejercicio anterior y presentadas a escala regional. Estos se hacen sobre un área que abarca los principales puntos que intervienen en la meteorología y climatología de Colombia, tales como la región de la Amazonia, el océano Pacífico y el mar Caribe. Los límites de la región se encuentran entre los 5° S y 15° N para la latitud y los 60° W y 80° W para la longitud. Para la selección de eventos objeto de este análisis, se tuvo en cuenta fechas en las cuales se registraron heladas en más de tres estaciones y además se tuvo en cuenta que estas se encontraran alejadas geográficamente entre sí. Para los mapas compuestos de variables en superficie solo se debe hacer la selección del tiempo a mostrar, pero para el caso de las de ERA PL se debe hacer algún procedimiento adicional para tener un campo de dos dimensiones a mostrar en el tiempo. Para eso se decide sólo usar el nivel de los 500 hPa que este brinda información sobre sistemas meteorológicos de mayor escala que la local.

- **Experimentos de simulación de heladas con un modelo atmosférico:** Variables como la temperatura, nubosidad y los vientos dependen de factores geográficos como la topografía, más aún en zonas donde la elevación del terreno presenta altas variaciones como en la región Andina de Colombia. Se plantea el uso de un modelo atmosférico como WRF para la simulación de un caso de helada, teniendo en cuenta la capacidad de estos modelos de mejorar la representación espacial de los patrones meteorológicos que se presentan en regiones con orografía compleja, su mejor solución de procesos locales (como el enfriamiento nocturno) y, además, buscando una comparación con el reanálisis ERA5 que permita entender que condiciones impiden que este producto reproduzca casos de helada para la zona de estudio.

3. Ambientes Atmosféricos Asociados a Heladas Radiativas

La temperatura del aire en Colombia tiene un comportamiento oscilatorio relativamente estable en el tiempo, por ejemplo, con sus variaciones diurnas o anuales. Las características geográficas del territorio colombiano, especialmente las diferencias altitudinales, determinan en buena parte los valores medios de temperatura del aire (Pabón Caicedo et al., 2001), lo cual hace que la región andina tenga un comportamiento diferenciado respecto a otras del país. En los altiplanos andinos hay dos grandes oscilaciones, una anual relacionada con el tránsito de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) y otra diurna, las cuales mantienen temperaturas más altas o bajas dependiendo de las condiciones de radiación solar. No obstante, en la misma región no es común que se presenten temperaturas inferiores a 0 °C, es entonces donde se supone que desviaciones poco frecuentes del comportamiento medio de la atmósfera, son las que pueden favorecer descensos de temperatura extremos.

En este capítulo se muestran distintos análisis realizados con la finalidad de identificar aquellas características del ambiente atmosférico relacionado con las heladas radiativas que son las principales causantes de la ocurrencia de estos eventos.

3.1 Relación de heladas radiativas con variables meteorológicas en superficie

El primer acercamiento al entendimiento del ambiente atmosférico que acompaña a las heladas se hizo buscando entender si entre las variables del reanálisis ERA5 en superficie (SL) y los registros de helada existía algún tipo de relación estadística. Para tal fin, se inició por la visualización de pares de variables a través de diagramas de dispersión, los cuales

son una gran herramienta para analizar posibles relaciones o agrupación entre las variables comparadas.

La Figura 3-1 muestra los diagramas de dispersión. Se observan 5 recuadros, correspondientes a la comparación de T (temperatura en la estación) en el eje Y, por ser la variable considerada independiente, contra la temperatura del aire a 2 metros (MN2T), la diferencia entre temperatura del aire a 2 metros y temperatura de punto de rocío (T2DIF), cobertura de nubes a baja altura (LCC), radiación térmica neta del suelo (SNR) y velocidad del viento a 10 metros (WS10), en los respectivos ejes X. Adicionalmente, se agregan histogramas en los dos ejes de cada recuadro, lo cual permite observar cómo se agrupan los valores de estas variables meteorológicas durante los casos de helada.

Lo primero que se puede observar en los diagramas es que las heladas, en su gran mayoría, suelen darse en valores cercanos a 0 °C, es decir, que la severidad de estos eventos en Colombia no suele ser alta en términos de magnitud. Esto muestra que la climatología y meteorología del país difícilmente favorece los mínimos de temperatura extremos.

La MN2T no muestra valores tan bajos como los de los correspondientes registros de temperatura de estaciones del IDEAM, incluso en los casos de helada más severos, esta variable está alrededor de los 10 °C. La agrupación alrededor de este valor muestra la gran deficiencia del reanálisis ERA5 para registrar extremos de temperatura (mínimos en este caso) en Colombia.

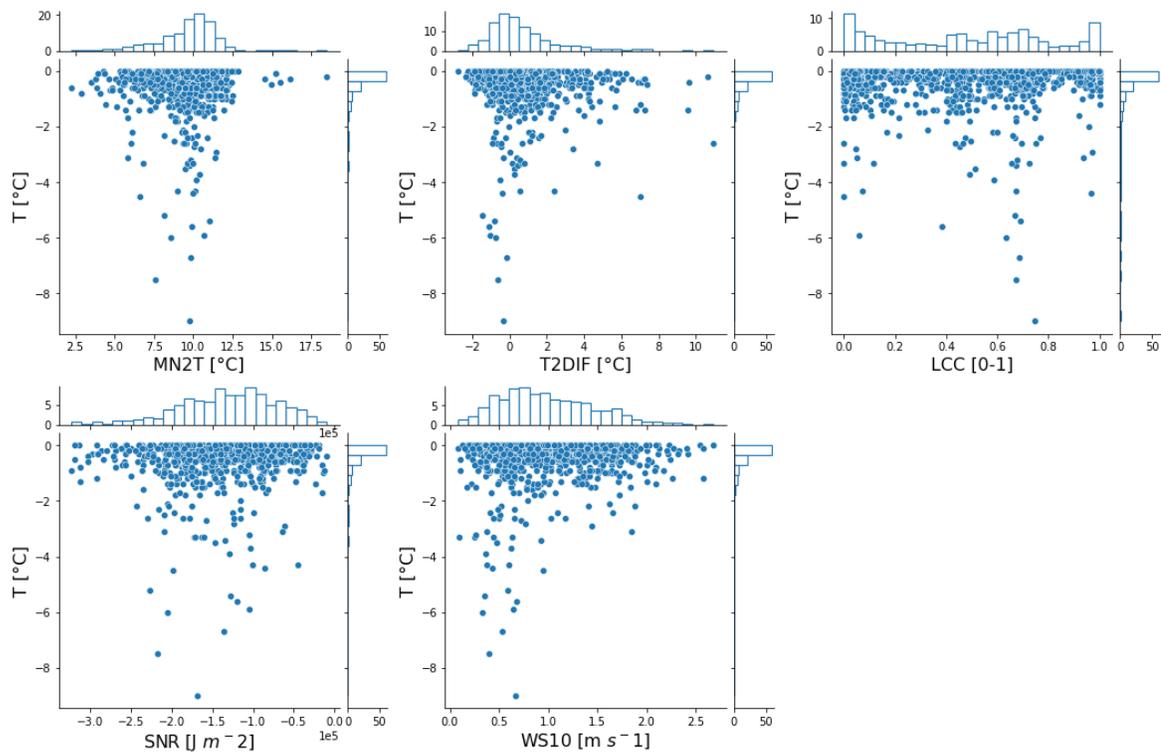


Figura 3-1: Diagramas de dispersión de temperatura in situ (estaciones del IDEAM) contra variables de ERA5 superficiales. De izquierda a derecha y de la línea superior a la inferior, Temperatura del aire a 2 metros (MN2T), diferencia entre temperatura del aire y la temperatura de punto de rocío a 2 metros (T2DIF), cobertura de nubes a baja altura (LCC), radiación térmica neta del suelo (SNR), y velocidad del viento a 10 metros (WS10).

En la T2DIF se observa una distribución que tiene una mayor área en valores positivos de esta variable, no obstante, la media de los valores se encuentra cercano a 0 °C. La T2DIF es una aproximación a la humedad relativa y cuando esta diferencia es mayor se debe a una reducción en la humedad relativa, condición que, según distintas investigaciones, es necesaria para la ocurrencia de heladas radiativas, sin embargo, esto no es lo que refleja la mayoría de los casos de helada.

La LCC es la variable que muestra una agrupación casi nula y se observa una distribución de heladas relativamente homogénea bajo distintos valores de esta. Si bien la columna con mayor densidad se encuentra en valores cercanos a 0, no es tan evidente que tenga una amplia superioridad sobre los demás valores de LCC. Este es un comportamiento

igualmente interesante, dado que se esperaba que la distribución de la variable estuviera más inclinada a poca LCC, pues los cielos despejados favorecen la salida de radiación térmica y, por lo tanto, son relacionados con la ocurrencia de heladas. Se observa que la SNR tiene únicamente valores negativos, en su mayoría todos inferiores a $-1 \times 10^5 \text{ J m}^{-2}$, que no son valores extremos para esta variable, pero que igualmente muestran que el suelo está perdiendo radiación térmica. La velocidad del viento se encuentra en su mayoría en velocidades menores a 1 m s^{-1} , lo cual indica que para estas zonas y horas del día los vientos suelen ser suaves, favoreciendo estabilidad atmosférica y enfriamiento del aire en superficie.

En la Figura 3-2 se muestra la reclasificación de los datos a partir de la altitud en metros sobre el nivel del mar, para hacer un análisis de una característica espacial de los datos. Cabe aclarar que, al tener estaciones en distintas zonas de la región andina colombiana, se encontraron datos en zonas de alta montaña, esto hizo que inicialmente se observara una predominancia en las distribuciones de los registros de estaciones por encima de los 4000 m.s.n.m. Lo anterior impedía una clara diferenciación de cómo se agrupaban las variables por encima y debajo de este límite de altitud. Para resolver este inconveniente de visualización se recurrió a usar una escala logarítmica en los respectivos ejes Y de los subgráficos de distribución.

De los subgráficos de distribución ubicados a la derecha de cada recuadro se resalta que la temperatura media tiene un comportamiento cuasi lineal, decreciente con la altitud (Chaves & Jaramillo, 1998), con lo cual se esperaría que las heladas con registros de temperatura mínimos sean aquellas ubicadas a mayores altitudes. No obstante, según lo que indican los datos, las heladas en zonas de alta montaña (por encima de 4000 m.s.n.m.) no son las que presentan las heladas más severas en magnitud, sino que son las ubicadas entre 2500 y 3000 m.s.n.m., seguidas por las de 3000 a 3500 m.s.n.m. Estas zonas en Colombia están asociadas a páramos, que se ubican en zonas con topografía altamente variable, distinto a lo que ocurre en otras regiones susceptibles a heladas a menor altitud, ubicadas en altiplanos como el cundiboyacense o nariñense.

Se puede observar, que la cantidad de eventos tan severos como para estar por debajo de los $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ es escasa (representan un 1.85% del total de registros de temperatura bajo $0 \text{ }^\circ\text{C}$), con lo cual se puede entender que estas zonas están sujetas a sistemas

meteorológicos con cambios más extremos y poco frecuentes, sin embargo, en los datos de ERA5 estos no se logran diferenciar respecto a heladas menos severas.

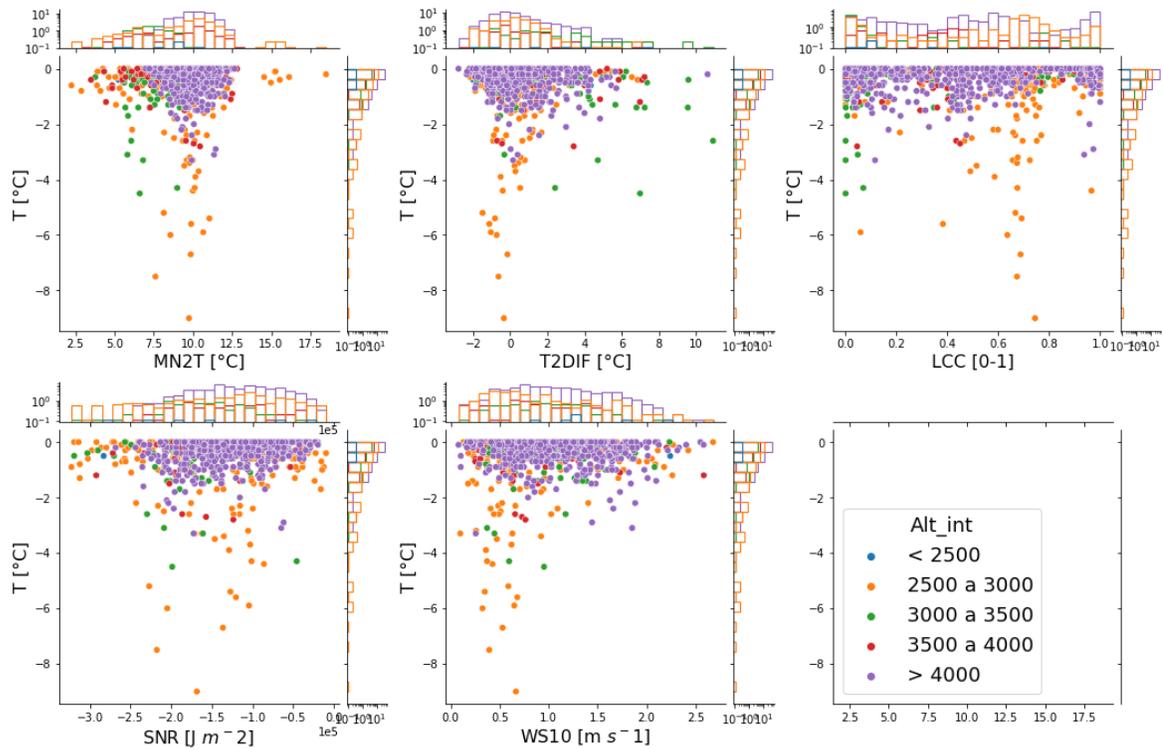


Figura 3-2: Diagramas de dispersión similares a la Figura 3-1, con discriminación por altitud.

Por otro lado, las heladas de alta montaña (asociadas a nevados) tienen temperaturas promedio bajas en comparación a las demás estaciones la mayoría del tiempo y, como se mencionaba antes, tienen más eventos de heladas, pero, estos son más leves en magnitud y se deduce que en estos lugares el estado atmosférico no causa enfriamientos tan abruptos sino más estables.

También se observa que existen algunas heladas de magnitud leve en altitudes inferiores a 2500 m.s.n.m. Esto en contraposición a los hallazgos hechos en la nota técnica sobre heladas del IDEAM (2012) donde se afirmaba que las heladas ocurren en zonas por encima de dicha cota de altitud. Esto se puede deber a distintas razones, tales como la falta de revisión de ciertas estaciones en ese trabajo previo, la instalación de instrumentos

de medición en estas zonas en fechas posteriores al año de la investigación, o incluso, a algún evento extremo causado por cambios debidos a forzadores climáticos de largo plazo. Se hizo una búsqueda de qué estación registró estos eventos y se determinó que el nombre de esta es Tanguavita, ubicada en Paipa, Boyacá e instalada en 2004 y con registros casi ininterrumpidos desde ese año. Esta se ubica a una altitud de 2470 m.s.n.m., cota muy cercana a la mencionada por IDEAM, además, se revisaron las fechas de estos eventos, que se encontraron en los años de 2019 y 2020, es decir, que el informe del IDEAM no contaba con evidencia en el momento (año 2012) para afirmar que las heladas en Colombia se pueden dar por debajo de los 2500 m.s.n.m.

Pasando a examinar la distribución de las heladas respecto a las distintas variables se tienen conclusiones similares a las de la Figura 3-1, aunque en este caso se añade cierta información. Para empezar, se observa que las estaciones por debajo de 4000 m.s.n.m., tienen una distribución de MN2T inclinada a valores más bajos respecto a las encontradas por encima de esta altitud. Esto se puede deber a que las temperaturas de alta montaña son pobremente representadas por el reanálisis ERA5 y al haber en estas una gran cantidad de eventos, se toman una mayor variedad de fechas en los datos de MN2T, teniendo como resultado una mayor variabilidad en la distribución y más representatividad para valores más altos.

En las demás variables no se encuentran mayores diferencias, pero se identifica que: los mayores valores de T2DIF se registran en las altitudes de 3000 a 3500 m.s.n.m; la LCC para los eventos más severos parece estar cerca de 0.7, pero en general es homogénea y que la velocidad del viento para los eventos más severos (que están entre 2500-3000) presenta valores inferiores a 1 m s^{-1} , pero para eventos con descenso de la temperatura inferior o igual a $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ se registran velocidades desde 0 hasta 2.5 m s^{-1} .

Finalmente, se hace un ejercicio similar al de las Figura 3-1Figura 3-2 en la Figura 3-3, en este caso discriminando las heladas por el trimestre en el cual ocurren, siendo estos: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM) Junio-Julio-Agosto (JJA) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON).

Se observa en la Figura 3-3 que al trimestre con mayor incidencia de heladas es DEF, además siendo este también en el cual ocurren las más severas en términos de magnitud.

Por los diagramas de densidad, no se observa que en este periodo las condiciones bajo las cuales ocurren las heladas sean diferentes a las de los demás trimestres del año, lo cual indica que, incluso según los datos de ERA5, el ambiente atmosférico bajo el cual ocurren heladas tiene un patrón similar independiente de la época del año, y este se da más comúnmente a finales e inicio de año.

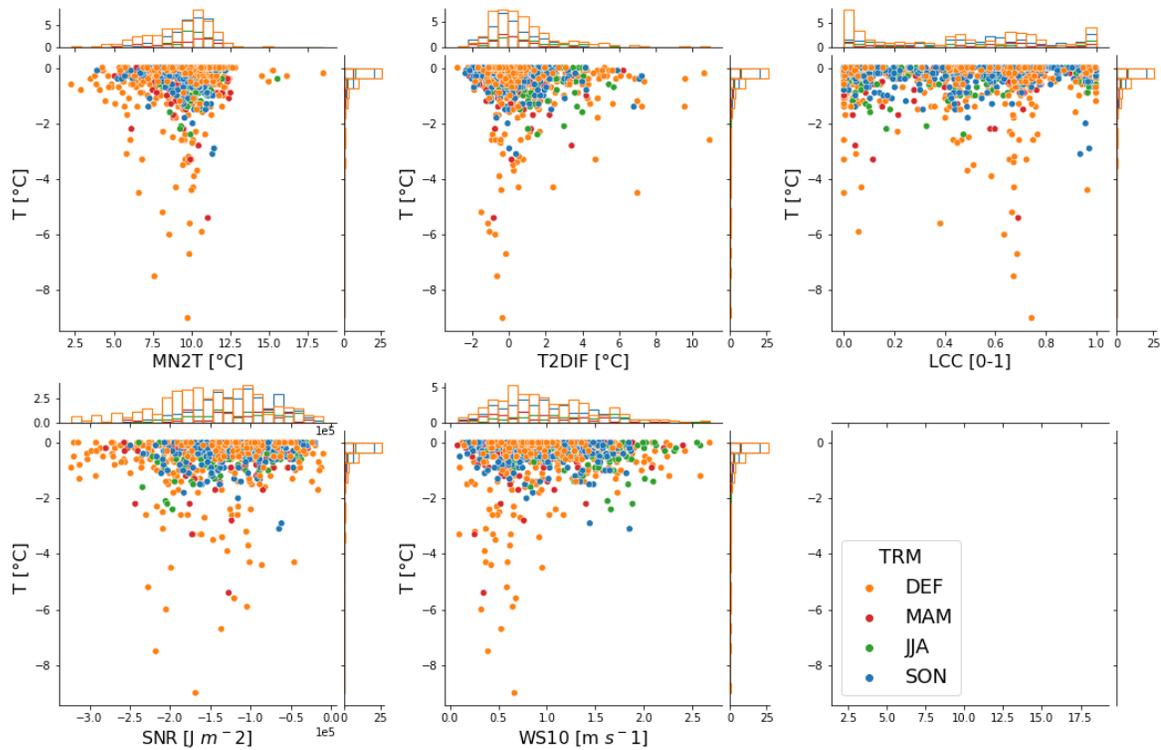


Figura 3-3: Similar a Figura 3-1 con discriminación de las heladas por trimestre de ocurrencia.

En términos de cantidad de eventos, a DEF lo sigue SON y entre JJA y MAM el número es muy similar, mientras que, en magnitud los tres trimestres restantes son similares. En cuanto a las distintas variables, se presentan valores parecidos para todos los trimestres, ocurriendo más heladas cuando MN2T está alrededor de 10 °C (con una mayor distribución hacia menores valores), T2DIF está alrededor de 0 °C (con mayor distribución hacia valores positivos), LCC tiene una distribución relativamente homogénea, SNR se encuentra en su mayoría entre los -1×10^5 y $-2 \times 10^5 J m^{-2}$ (con una mayor tendencia a valores más negativos en DEF) y WS10 en su mayoría está alrededor de $1 m s^{-1}$.

3.2 Climatología de heladas radiativas

La Figura 3-4, muestra la media multianual horaria del número de heladas radiativas identificadas, acompañada de la misma para las variables superficiaales seleccionadas. En cada una de estas gráficas, la altura de las diferentes barras representa la proporción de heladas con respecto a la muestra total. Estas barras clasifican la muestra con respecto a la altitud así: total de la proporción (blanca), estaciones ubicadas por encima de 4000 m.s.n.m. (azul cian) y otra para aquellas por debajo de este límite (verde). Por otro lado, la media de las variables meteorológicas es representada con una línea roja para días sin registro de helada y para días con helada con una línea negra.

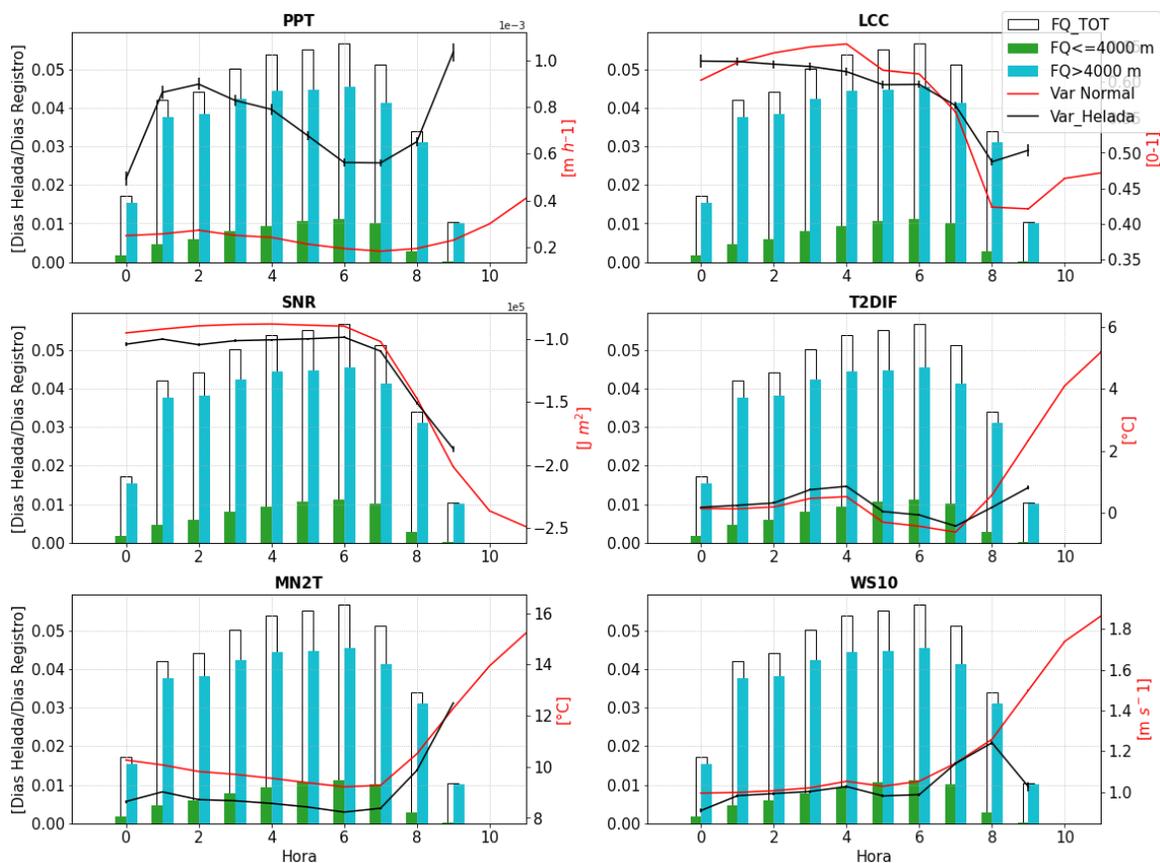


Figura 3-4: Promedio horario de heladas radiativas y variables de ERA5 SL en el periodo 2005-2021, representando las variables en días sin heladas (línea roja) y días con helada (línea negra) De izquierda a derecha e iniciando en la línea superior: precipitación

total (PPT), cobertura de nubes a baja altura (LCC), radiación térmica neta del suelo (SNR), diferencia entre temperatura del aire y temperatura de punto de rocío a 2 metros (T2DIF), Temperatura del aire a 2 metros (MN2T), y velocidad del viento a 10 metros (WS10).

Para empezar, se resalta nuevamente que en las zonas de alta montaña la proporción de registros de helada es bastante alta en comparación con zonas más bajas, por ejemplo, para las 06:00 horas la proporción en zonas por encima de los 4000 metros es superior a 0.04 (4%), mientras que por debajo de esta cota es de apenas 0.01 (1%). También se observa que la proporción de heladas tiene una variación homogénea entre estaciones por encima y bajo los 4000 metros, presentando en ambos casos un comportamiento creciente entre las 00:00 y 06:00 horas y decreciente desde este punto en adelante. Esto indica que si bien hay factores climatológicos que afectan la proporción de heladas a lo largo del tiempo, el principal proceso que determina la ocurrencia de las heladas es el enfriamiento nocturno y la meteorología que acompaña al mismo, independientemente de los factores geográficos. Otro resultado interesante es que solo se registran heladas posterior a las 23:00 horas y antes de las 09:00 horas, con lo cual se entiende que para Colombia el proceso de enfriamiento nocturno puede provocar heladas alrededor de 6 horas después del anochecer.

Otro comportamiento general en las gráficas es que las diferencias entre las variables durante días con y sin helada no son muy amplias a excepción de lo que ocurre con la PPT. Esto indica que, si bien en el área de cobertura de los píxeles de ERA5 se presentan diferencias en la física atmosférica en las horas bajo heladas, estas no llegan a ser relevantes como para diferenciarse del resto de casos, lo cual, es una de las causas de la pobre representación de ERA5 de valores extremos.

En cuanto al comportamiento de las variables, en general todas presentan variaciones que tienen sentido físico en cuanto a procesos que favorecen el descenso de temperatura. La LCC y la SNR tienen valores inferiores a la media en las horas con mayor frecuencia de heladas. Es entendible que una nubosidad menor al promedio favorece la salida de radiación térmica del suelo, por consiguiente, una menor SNR y temperatura. Esto se refleja igualmente en MN2T, que es menor a la media en horas con más heladas. Esto

puede indicar que, según ERA5, no solo las zonas con heladas, sino también regiones aledañas, en estas fechas sufren de un enfriamiento nocturno más severo que el promedio, a pesar de que este no sea muy notable. La T2DIF durante heladas es mayor a la variación normal, lo cual indica que la humedad relativa es ligeramente menor, condición que reduce la capacidad calorífica del aire y favorece cambios más rápidos de temperatura. La velocidad del viento en superficie es ligeramente menor a la media, aunque en general los vientos son en sí leves.

La PPT es mayor los días de helada y más lluvia significa un mayor aporte de humedad al aire, lo cual reduce la capacidad del aire de cambiar de temperatura rápidamente y hace menos severo el enfriamiento nocturno. No obstante, considerando que igualmente los valores de esta son bajos (el máximo se observa en 0.1 mm), se puede entender que esta no llega a afectar de manera significativa la humedad del aire.

La Figura 3-5 presenta el mismo ejercicio de la Figura 3-4 para las variables del reanálisis en niveles de presión (ERA5 PL). En esta, a diferencia de la Figura 3-4 hay una mayor cantidad de variables que muestran diferencias significativas entre los días de helada y no helada, exceptuando GEOP y WS.

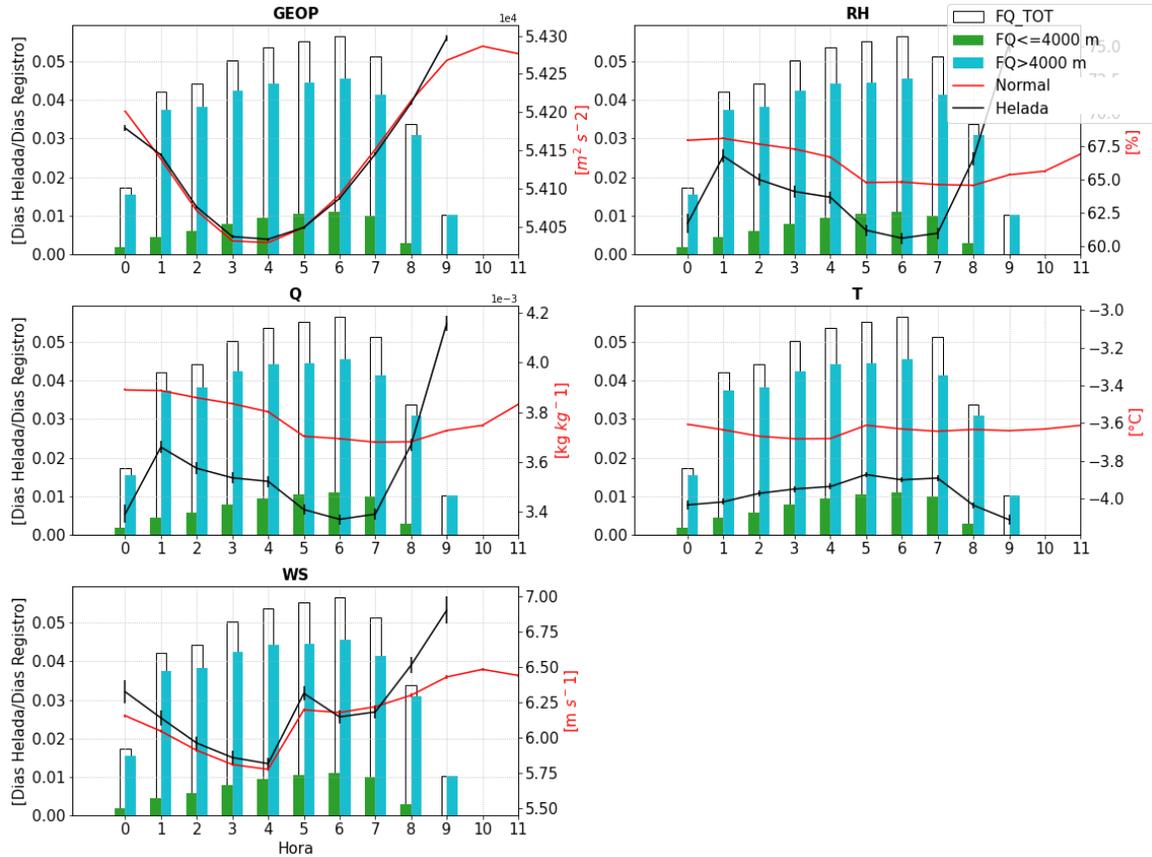


Figura 3-5: Similar a figura 3-4 con variables de ERA5 PL para el intervalo 600 a 400 hPa. De izquierda a derecha e iniciando en la línea superior: Geopotencial (GEOP), Humedad relativa (RH), Humedad específica (Q), Temperatura (T) y Velocidad del viento (WS).

El comportamiento de GEOP y WS, comparado también con el de WS10, llevan a formular la idea de que las variaciones de presión, estabilidad atmosférica, y velocidad del viento (al menos según los datos de ERA5), si bien acompañan el proceso de enfriamiento nocturno, no son claves para modificarlo y generar eventos de helada radiativa.

Por otro lado, la humedad presente en el aire muestra que las condiciones en las cuales la atmósfera está más seca son las que más favorecen la ocurrencia de heladas. Esto se muestra en la Figura 3-5, donde tanto Q como RH tienen valores considerablemente menores a la media cuando ocurren heladas. Es interesante observar que a estos niveles se presenta ese comportamiento, porque eso indica que el aire durante estos eventos se encuentra más seco no solo en superficie, con lo cual puede haber procesos de mayor

escala geográfica que no intervienen exactamente en la ocurrencia de heladas, pero si favorecen los ambientes más secos en los cuales estas se presentan regularmente. También cabe resaltar que las diferencias entre la humedad en horas antes y después del amanecer, son contrastantes en los días de helada en comparación a los normales, donde la variación se ve como una curva suavizada. Esto se puede deber o bien a la menor cantidad de datos usados para estos promedios (mucho menor a los usados para la línea roja) o bien a que el descenso de humedad puede ser causado por un proceso que ocurre en horas nocturnas y se desvanece en el día.

La temperatura de la atmósfera es menor en las fechas con heladas, lo cual no necesariamente está relacionado con estas por la altitud a la cual corresponde este promedio, pero no deja de ser interesante y un hecho a revisar más adelante en otros análisis de este trabajo.

Una vez se ha examinado el comportamiento de las heladas y las variables asociadas en la escala diurna, se revisa como es su variación Intraanual. La Figura 3-6 se presenta similar a la Figura 3-4, en este caso para la media mensual multianual de las distintas variables anteriormente presentadas. En este caso no se separaron los días de helada y no helada y por lo tanto solo se presenta la línea roja como la media mensual multianual de las variables.

Lo primero que salta a la vista es que las heladas de alta montaña tienen un ciclo bimodal, al igual que las demás variables de superficie. Para las heladas, los picos se encuentran en enero y agosto, mientras que los valles en mayo y noviembre. En las zonas por debajo de los 4000 metros, la variación es unimodal, teniendo un máximo en enero y el mínimo en mayo. Esto nos indica que las heladas de alta montaña pueden suceder ante cambios atmosféricos menos estrictos, mientras que las de zonas más bajas son más específicas, lo cual se puede deber a que, a mayor altitud, la temperatura media es menor y el enfriamiento nocturno que causa una helada no necesita hacer descensos tan abruptos.

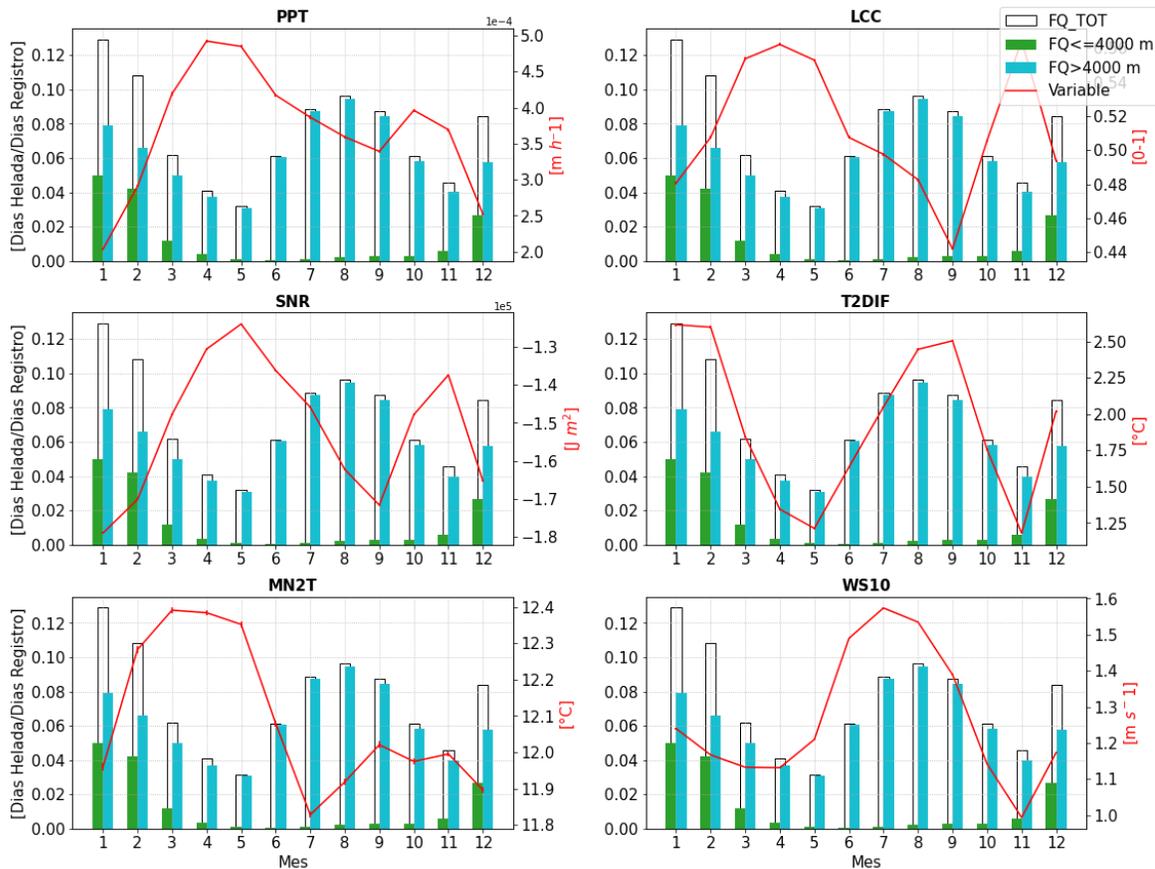


Figura 3-6: Similar a figura 3-4 para la escala Intraanual. Se presenta la media mensual multianual de las variables con una línea roja.

En estas gráficas es evidente la relación de LCC, PPT y SNR, con mínimos locales en enero y noviembre y los picos en abril - mayo y octubre-noviembre. Esta variabilidad indica que a menor nubosidad existe una menor probabilidad de precipitación que, además, facilita la salida de radiación térmica del suelo (menor SNR). Se entiende que efectivamente cielos más despejados, menor precipitación y menor SNR, son las condiciones que favorecen la mayor frecuencia de heladas radiativas a lo largo del año, pero también, los mínimos absolutos de SNR y PPT, están ubicados en el mes de enero, donde se presenta el máximo de heladas por debajo de los 4000 metros. Lo anterior indica que, en estos meses la escasez de lluvia y la menor SNR favorecen valores mínimos más extremos con mayor frecuencia, con lo cual se pueden desencadenar más eventos de helada en zonas no tan altas. Adicionalmente, se observa que el periodo entre los mínimos de estas tres variables puede ser igualmente un causante del abrupto aumento de eventos

en enero, pues el periodo de más nubosidad, lluvia y mayor SNR es más corto entre noviembre y enero (3 meses) que entre enero y noviembre (8 meses), con lo cual, se pueden ver afectados factores fisiográficos como la vegetación, el agua disponible en fuentes hídricas continentales, entre otros relacionados con las heladas.

La T2DIF tiene un comportamiento en fase a la frecuencia de heladas y en contrafase respecto a las anteriores variables, lo cual indica que, en los meses de enero y noviembre, donde esta variable tiene máximos, la humedad relativa es menor. La humedad relativa y, por lo tanto, la T2DIF describen un comportamiento similar al de la precipitación, dado que ante menos lluvia hay menor disponibilidad de agua y por consiguiente menos vapor de agua se incorpora a la atmósfera. En esta gráfica se identifica igualmente que las heladas en zonas de alta montaña están más sujetas a los cambios climáticos anuales, lo cual indica que, en estas zonas la humedad media y sus variaciones a lo largo del año son tales que en el trimestre de junio a agosto (JJA), se presentan con mayor frecuencia casos en los cuales el ambiente es suficientemente seco para que ocurra una helada. Para zonas más bajas estos extremos de humedad son poco comunes en esa época (JJA).

La MN2T se encuentra en contrafase a la frecuencia de heladas. Tanto esta variable como las anteriores están sujetas fuertemente a un ciclo bimodal anual, el cual en gran parte puede ser atribuido a la migración de la ZCIT, dado que, los meses más cálidos y con mayores lluvias son aquellos en los cuales la ubicación de esta es más cercana a la latitud en la cual está ubicada Colombia, mientras que los más fríos y secos son aquellos donde la ZCIT está al norte o sur del país. Cabe recordar que días con menor promedio de temperatura, favorecen igualmente la aparición de heladas radiativas, dado que, si antes del anochecer el ambiente está más frío, será más fácil que el enfriamiento nocturno que se da paulatinamente llegue a valores de 0 °C o menores.

Finalmente, WS10 no es una variable que a nivel intraanual esté tan relacionada en la ocurrencia de heladas radiativas (a diferencia de la temperatura o la humedad). Si bien este se encuentra en fase con la frecuencia de heladas, especialmente las de alta montaña, el máximo absoluto de WS10 no coincide con el mismo para la frecuencia de heladas. Se puede decir entonces que el ambiente que favorece las heladas es aquel en el cual la velocidad del viento suele ser mayor a lo largo del año, más no es necesario para que estas ocurran que se presenten velocidades relativamente extremas de esta variable.

Para los niveles de 600 a 400 hPa se presenta igualmente la climatología intraanual en la Figura 3-7. En estas figuras se evidencia que no todas las variables tienen un ciclo bimodal y tienden a tener una variación casi totalmente unimodal a diferencia de lo que ocurre en superficie.

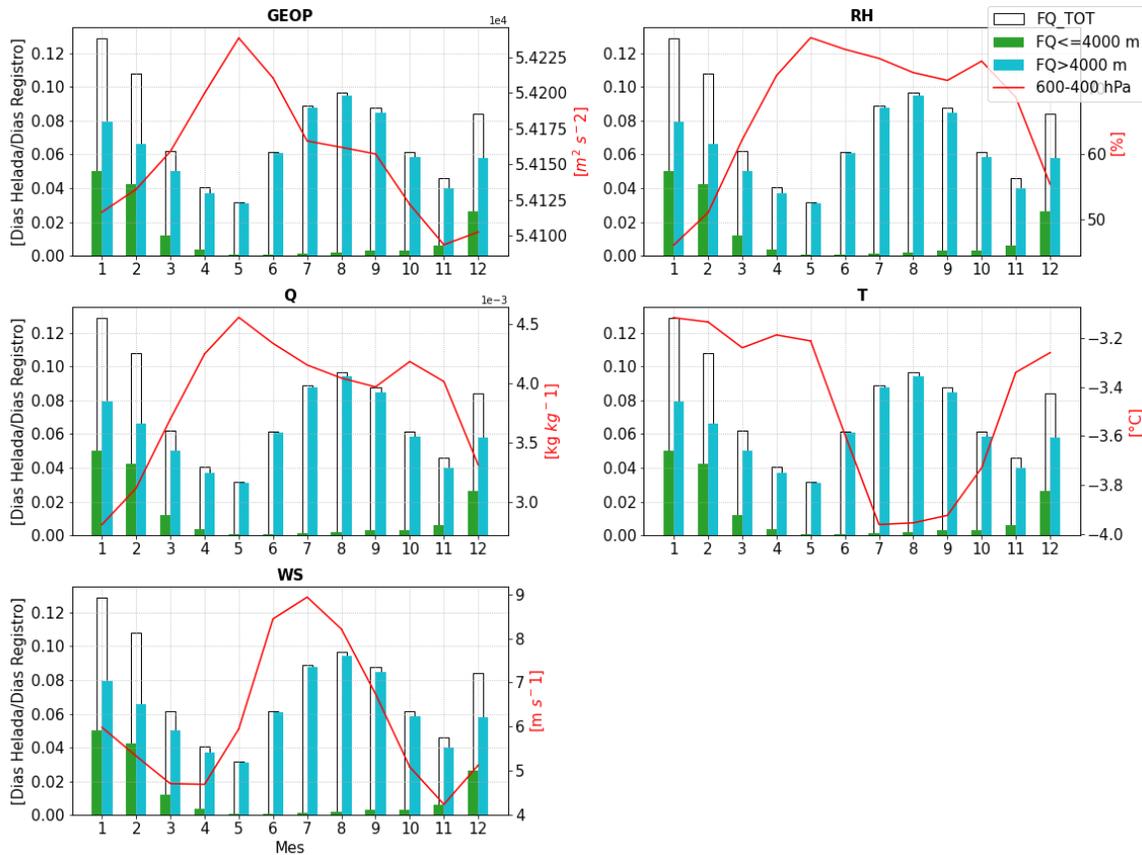


Figura 3-7: Similar a Figura 3-5 para la escala intraanual.

El geopotencial (GEOP) muestra valores mínimos en los meses de final e inicio de año, indicando sistemas de menores presiones en esta época. No obstante, se entiende que estos no están asociados a mayores precipitaciones, por lo visto en la Figura 3-6 y también por las condiciones de baja humedad que muestran RH y Q.

La humedad a esta altura muestra una variación que alcanza a ser casi bimodal y es similar al comportamiento de T2DIF, lo cual se debe a que buena parte de la humedad en estas

parcelas de la atmósfera proviene de la superficie. Los valores mínimos de Q y RH en el trimestre DEF, son una muestra de lo contrastante que es la humedad en esta época respecto al resto del año, lo cual, es de las principales causas de la gran cantidad de eventos de helada en estos meses.

La temperatura en estos niveles de la atmósfera, a diferencia de la superficial, se encuentra en contrafase con la frecuencia de heladas. Esto nos da a entender que en esta zona la ZCIT no tiene una relación directa con la temperatura y son otros factores los que determinan su variación. En parte, se podría decir que la mayor inestabilidad atmosférica, reflejada en los valores de GEOP, favorece procesos de mezcla que terminan llevando parcelas de aire más cálido a esta altura. No obstante, esto se encuentra en contraposición a la velocidad del viento, dado que se pensaría que mayores velocidades de viento también favorecen la mezcla de las parcelas de aire y los máximos de WS se encuentran casi en las mismas épocas de los mínimos de T.

La Figura 3-8, muestra la media anual del número de heladas radiativas identificadas, acompañada de la misma para las variables del reanálisis: precipitación total (PPT), diferencia entre temperatura del aire y temperatura de punto de rocío a 2 metros (T2DIF), Temperatura del aire a 2 metros (MN2T), humedad específica entre 600 y 400 hPa (Q) y temperatura entre 600 y 400 hPa (T).

Se observa en la Figura 3-8 que las tres barras oscilan de forma relativamente regular a lo largo de los años, lo cual, se identifica en los picos ubicados en 2007, 2011 y 2017 para alta montaña y 2007, 2010, 2017 y 2020 para zonas más bajas, periodos que, a pesar de no estar igualmente espaciados, no difieren en gran medida. La similitud en los picos y valles de la proporción de heladas de los dos tipos de estaciones lleva a entender que están sujetos a un mismo patrón climatológico interanual, independientemente de sus condiciones geográficas.

La PPT muestra un comportamiento oscilatorio con máximos locales en los años de 2010 y 2016 y mínimos en 2006, 2014 y 2019. No se observa que la línea que representa la precipitación se encuentre en fase con la que se podría dibujar a partir de las puntas de las barras. No obstante, los máximos y mínimos de lluvia se encuentran ligeramente desplazados a la izquierda, es decir, que estos ocurren con un rezago de entre uno y dos

años a los máximos y mínimos de frecuencia de heladas principalmente de zonas de alta montaña. Esto es interesante, dado que, en la zona de estudio, la precipitación está controlada por factores climáticos como el ENOS, y ésta casi coincidencia con la frecuencia de heladas podría indicar que esta clase de forzadores de escala climatológica también puede favorecer la confluencia de las condiciones meteorológicas que favorecen las heladas radiativas. La SNR presenta un comportamiento muy similar a la LCC, lo cual puede dar a entender que años con cielos más despejados favorecen la salida de radiación térmica del suelo a la atmósfera.

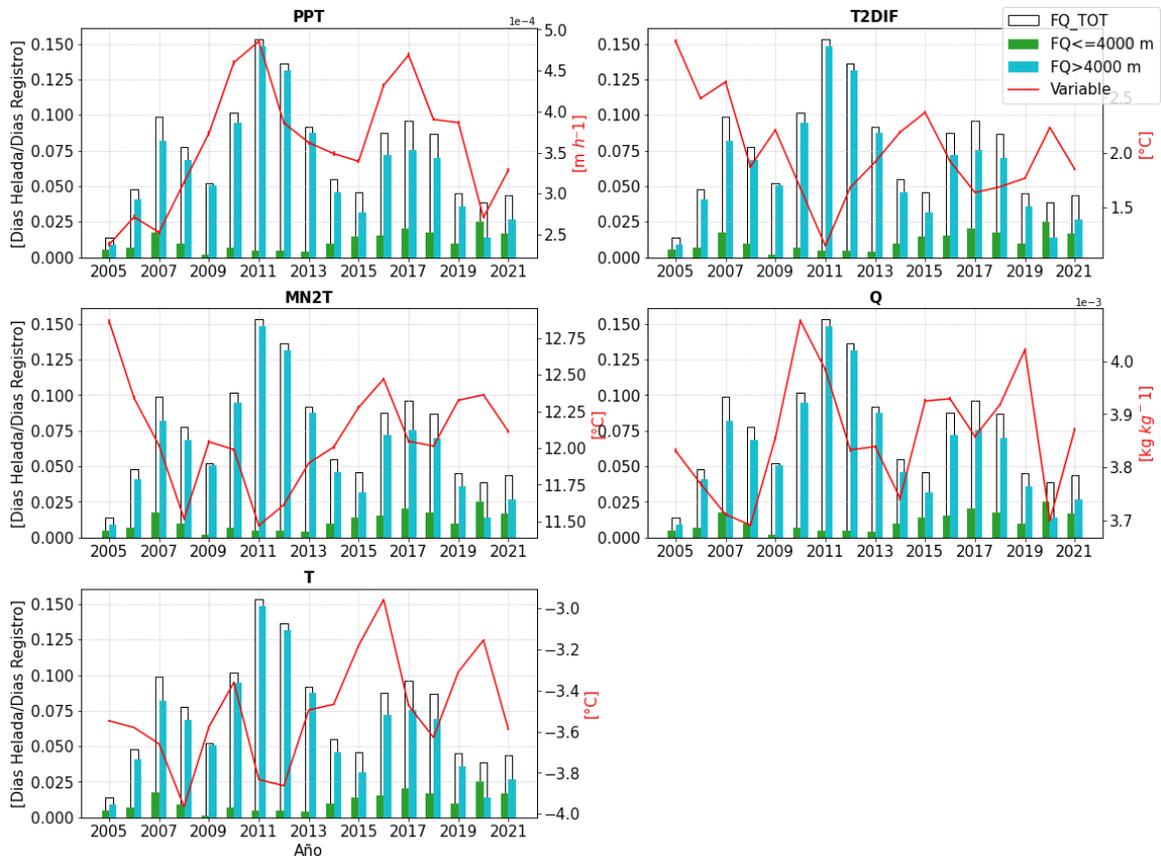


Figura 3-8: Promedio anual de heladas radiativas y variables del reanálisis ERA5. De izquierda a derecha e iniciando en la línea superior: precipitación total (PPT), diferencia entre temperatura del aire y temperatura de punto de rocío a 2 metros (T2DIF), Temperatura del aire a 2 metros (MN2T), humedad específica entre 600 y 400 hPa (Q) y temperatura entre 600 y 400 hPa (T).

La T2DIF muestra que estas zonas son en promedio relativamente secas, pues los valores positivos de esta variable están asociados a menor humedad relativa. Curiosamente, los máximos en la frecuencia de heladas radiativas coinciden con los mínimos locales de T2DIF, es decir, son años más húmedos en comparación a los anteriores. Una hipótesis que podría explicar este comportamiento y el de la PPT, es que tener menor humedad en el ambiente, conlleva estrés hídrico sobre la vegetación y el deterioro de esta favorece condiciones en las cuales la temperatura del suelo (y por consiguiente la del aire también), pueden tener cambios más abruptos (Carvajal & Pabón, 2014). La ocurrencia de años predominantemente secos consecutivamente puede favorecer condiciones fisiográficas en las cuales el enfriamiento nocturno asociado a las heladas es intensificado.

En cuanto a la MN2T, esta tiene una variación que está casi totalmente en contrafase con la frecuencia de heladas. Dado que el reanálisis ERA5 no registra heladas y estos son los datos con los que se calcula esa gráfica, la disminución de la temperatura en estos años no necesariamente es consecuencia del aumento en la frecuencia de heladas y más bien los descensos de temperatura son los que favorecen la mayor ocurrencia de estos eventos.

La humedad específica (Q), muestra que, aunque las heladas se dan en ambientes atmosféricos secos, los mayores valles de esta variable se presentan en los años donde la frecuencia de las heladas es menor. Este comportamiento es similar al de la T2DIF, donde los años de sequía parecen estar relacionados con una mayor ocurrencia de heladas, pero no de forma directa, sino que el aumento se presenta en años posteriores a las sequías.

La temperatura entre 600 y 400 hPa (T) se comporta similar a la del aire (MN2T), dado que presenta valores mínimos en los años con mayor frecuencia de heladas, aunque el año siguiente a los picos de heladas T es aún menor a la presentada los mismos años.

3.3 Evolución del ambiente atmosférico asociado a heladas radiativas

Además de entender las condiciones generales bajo las cuales son más frecuentes las heladas en Colombia, se examina la evolución del ambiente atmosférico en horas cercanas a los eventos. Como se mencionaba anteriormente, entre los factores que favorecen las heladas radiativas (geográficos, meteorológicos, ecológicos, etc.), los meteorológicos por su variación de corto plazo son los que determinan la ocurrencia del fenómeno, con lo cual se revisa el estado atmosférico a esta escala temporal y se analizan sus patrones característicos.

El análisis de la evolución del ambiente atmosférico asociado a heladas se realizó para casi la totalidad de casos encontrados, pero en esta sección se muestran solo dos casos. Para esto se buscaron heladas y estaciones de registro que dieran cuenta de las principales características que hasta aquí se han analizado y que las hacen distintivas, tales como la altitud y magnitud del evento (más ejemplos se pueden encontrar en el Anexo C). Así pues, las estaciones seleccionadas son: estación Berlín, ubicada en el municipio de Tona, Santander, a una altitud de 3316 m.s.n.m. con amplio registro de eventos de helada, entre las cuales se encuentran algunas de gran intensidad; estación Teatinos, en el municipio de Boyacá, Boyacá, a una altitud de 2740 m.s.n.m. Esta representa un rango de altitud contrastante y que presenta heladas de menor severidad. En cada una de estas estaciones de registro se hizo una búsqueda activa de eventos que permitieran hacer un análisis bajo condiciones de alta y baja severidad del evento.

3.3.1 Caso estación Berlín

El caso nombrado como Berlín, fue un evento severo de helada ocurrido el 01-01-2006 entre las 01:00 horas y las 07:00 horas. No solo presentó una gran duración, sino que, además, los mínimos de temperatura registrados fueron de $-7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, características que destacan este evento de helada para Colombia.

En la Figura 3-9, se muestra el comportamiento de las anomalías para las variables LCC, PPT, SNR, T2DIF, MN2T Y WS10 durante las 24 horas que anteceden el evento de helada y 5 posteriores a éste (línea roja, correspondiente al eje Y a la izquierda de cada panel), acompañadas de la temperatura registrada en la estación (línea negra, correspondiente eje Y a la derecha de cada recuadro), la línea vertical representa la hora a la cual se detecta el evento de helada en la estación.

Durante el caso Berlín (Figura 3-9) se observa que el día anterior a la helada la nubosidad era ligeramente mayor a la media, mientras que posterior a este evento el cielo se encontraba anómalamente más despejado durante todo el día e igualmente en horas de la noche previa al evento. Así mismo, que las anomalías se hacen más severas alrededor de las 19:00 horas, es decir al anochecer, llegando a mínimos cercanos a una LCC 30% menor respecto a la media.

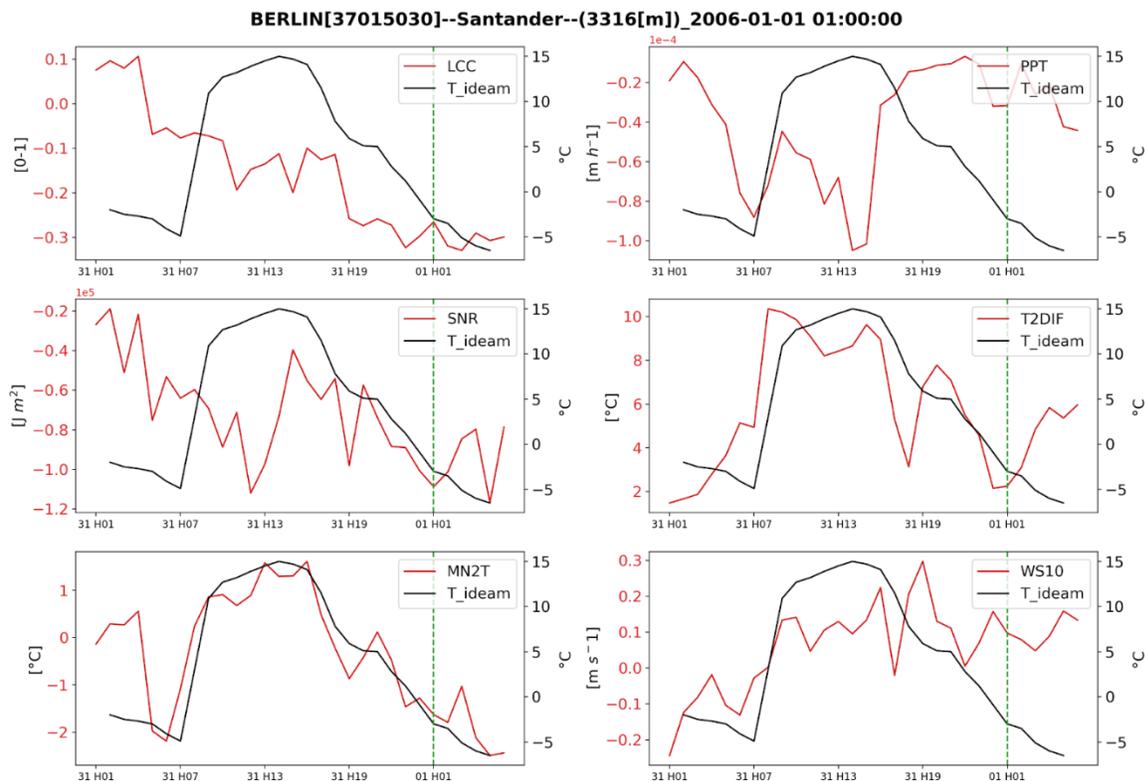


Figura 3-9: Variación de las anomalías para las variables meteorológicas del reanálisis ERA5 SL para el caso Berlín. Cada recuadro muestra con una línea negra el comportamiento de la temperatura en la estación del IDEAM correspondiente y, además,

con una línea roja de izquierda a derecha, empezando por la fila superior: la cobertura de nubes a baja altura (LCC), precipitación total (PPT), radiación térmica neta del suelo (SNR), diferencia entre temperatura del aire y temperatura de punto de rocío a 2 metros (T2DIF), Temperatura del aire a 2 metros (MN2T), y velocidad del viento a 10 metros (WS10).

La LCC está muy relacionada con la SNR, dado que esta presenta igualmente anomalías negativas y un descenso desde que se presenta la helada del día anterior hasta que se da el evento. Esto es entendible físicamente dado que las nubes representan igualmente parte de la radiación de onda larga entrante al suelo y su ausencia hace que el flujo neto esté aún más inclinado a la salida de radiación del suelo. La SNR presenta anomalías negativas en todo el periodo, lo cual indica una mayor salida de radiación térmica del suelo. Las mayores anomalías se encuentran en el día alrededor de las 12:00 horas y durante el evento, es decir, que el día anterior a la helada tuvo una mayor cantidad de radiación solar, situación favorecida por la poca LCC y que además las condiciones ambientales favorecieron en gran medida la salida de radiación de onda larga del suelo, con lo cual se da un enfriamiento nocturno.

Las variables PPT y T2DIF muestran un comportamiento en contrafase, estas denotan que el periodo mostrado fue anómalamente seco, pues las anomalías de PPT son negativas en toda la gráfica y las de T2DIF positivas, lo cual significa una menor precipitación y humedad relativa (respectivamente) respecto a la media. En ambas gráficas se observa que el día anterior a la helada fue más seco de lo normal, especialmente en horas cercanas al medio día. Por otro lado, la PPT tiene un descenso que coincide con el instante de detección de la helada, pero esta anomalía se hace menos severa posteriormente. Algo distinto ocurre en la T2DIF donde cerca al evento se empieza a notar un ascenso en la anomalía de esta variable, pero esta no se suaviza una vez empieza el evento, sino que se intensifica.

La MN2T muestra que, durante los dos eventos visibles en la serie, ERA5 representa registros por debajo de la media, es decir, que si bien el enfriamiento nocturno no es tan severo como el que se da en los datos de IDEAM, ciertamente se da una temperatura anómalamente fría en estas fechas. Se observa también que las anomalías no son negativas todo el tiempo y que el día anterior a la helada presentó periodos sobre la media. Esto se puede deber a lo mencionado anteriormente en el comportamiento de la LCC y la

SNR, que sugieren una mayor radiación solar especialmente cerca al medio día. No obstante, las anomalías positivas de MN2T no se conservan a lo largo del día y cerca a la puesta del sol estas son negativas, lo cual se entiende favorece la ocurrencia de heladas.

En cuanto a las anomalías de WS10, se observa que después del amanecer del día anterior y hasta el final del periodo mostrado, la velocidad del viento, si bien oscila, es generalmente mayor a la media en este periodo. Igualmente, durante la helada presentada el día anterior el viento es ligeramente más suave que la media. Algo notable es que las anomalías negativas de WS10 ocurren casi en sincronía con las positivas de nubosidad y dado que el viento es uno de los factores que ayuda a la movilidad de las nubes, se entiende que la escasa cobertura del cielo puede deberse en este caso a un viento anómalamente veloz.

Para las variables del reanálisis en niveles de presión también se revisan las anomalías presentadas durante el caso, las cuales son calculadas de manera similar a las de ERA5 SL, pero en este caso para cada nivel de la atmósfera. Estas se presentan en la Figura 3-10.

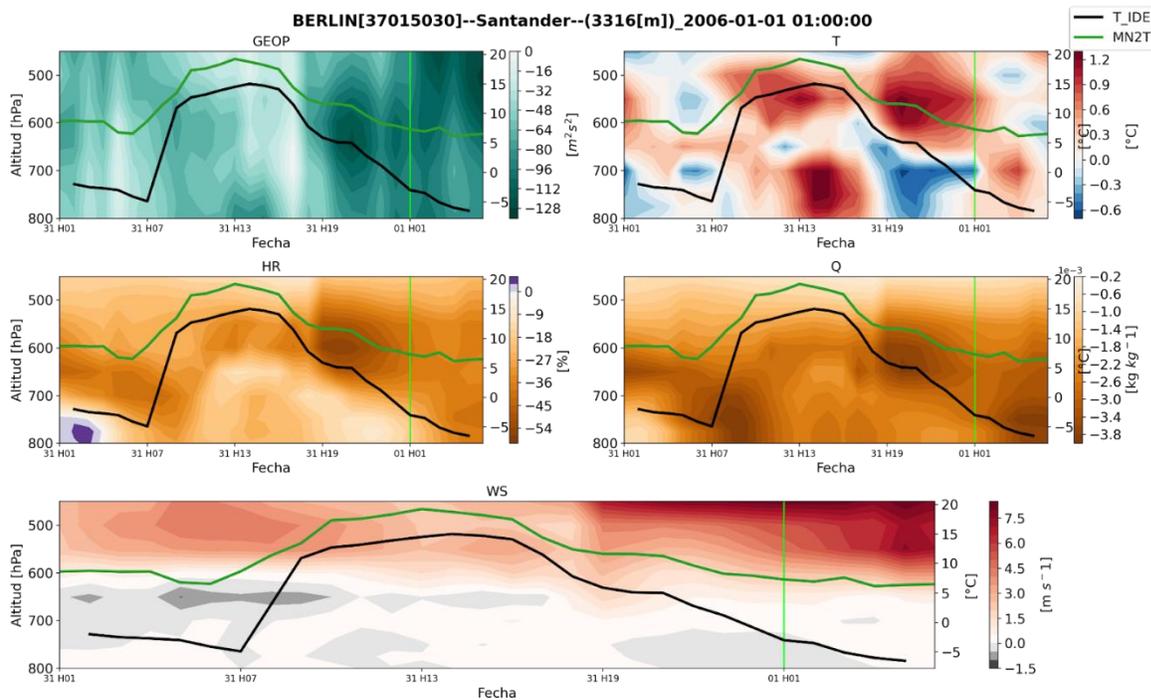


Figura 3-10: Variación de las anomalías para las variables meteorológicas del reanálisis ERA5 PL para el caso Berlín. Cada recuadro muestra con una línea negra el comportamiento de la temperatura en la estación del IDEAM correspondiente, con una verde la MN2T del reanálisis y en distintas paletas de colores, empezando por la fila superior: el geopotencial (GEOP), temperatura (T), humedad relativa (HR), humedad específica (Q) y velocidad del viento (WS).

Para empezar, GEOP presenta valores anómalamente menores en el periodo mostrado. Esto indica que las isóbaras se encuentran a menores alturas y el ambiente se encuentra bajo sistemas de menores presiones. Se puede atribuir esta menor presión a la alta radiación, favorecida por menor nubosidad, que puede aumentar la convección en la atmósfera, aunque esto no se ve reflejado en mayor nubosidad como se mostraba anteriormente.

Las anomalías de temperatura muestran un comportamiento heterogéneo. Por ejemplo, si se hace énfasis en los periodos entre las 01:00 y 07:00 horas del día del evento y de la helada anterior, se observa que, en los niveles entre 800 y 700 hPa, se encuentra para el día del evento anomalías positivas y lo contrario para el anterior. Para niveles superiores en el mismo periodo, se observa que ambos días tienen un comportamiento similar, con una temperatura más alta que la media que posteriormente se reduce y las anomalías se tornan negativas cerca de las 07:00 horas. En cuanto a lo que sucede en horas del día y la noche anterior a la helada de interés, se observa que en la tarde casi la totalidad de la columna atmosférica sobre la zona presenta anomalías positivas, mientras que, al iniciar la noche, en superficie, la temperatura desciende por debajo de lo normal y de los 750 hPa hacia arriba permanece más caliente. Este contraste entre día y noche es importante, dado que puede favorecer que exista la salida de radiación neta de una forma mucho más eficiente, y esto a su vez favorezca la helada. Esto puede suceder debido a la falta de nubosidad durante el día, lo que favorece que la atmósfera se caliente más de lo normal en el día y por la noche, su temperatura se reduzca por debajo de la media.

La Q y HR muestran que en este periodo la atmósfera se encontraba anómalamente seca. Las mayores anomalías que se registran están entre las 19:00 y 00:00 horas para los 750 a 650 hPa y durante el evento entre los 800 y 700 hPa. El día anterior a la helada no

necesariamente presentó anomalías más marcadas que las registradas después del anochecer, sino que estas fueron relativamente similares entre las 07:00 y 13:00 horas y menores entre las 13:00 y 19:00.

Finalmente, las anomalías de WS son principalmente negativas en los niveles más cercanos a la superficie, y positivas desde los 600 hPa hacia arriba. Se observa que la franja de anomalías positivas desciende ligeramente, especialmente posterior a las 19:00 horas de la noche anterior al evento.

3.3.2 Caso estación Teatinos

El evento seleccionado de la estación Teatinos es una helada que se detectó a las 03:00 horas del 18-12-2017. Esta no se considera tan severa, puesto que, las temperaturas alcanzadas fueron muy cercanas a los 0 °C, con un mínimo registrado de -0.3 °C. Esta tuvo una duración considerable, de más de 3 horas (entre las 03:00 y 07:00 horas). A diferencia del caso anterior, el día previo a la helada las temperaturas mínimas estuvieron por encima de los 0 °C.

La Figura 3-11 muestra las anomalías horarias de manera similar al caso de la estación Berlín. La gráfica de LCC muestra que el día anterior y la noche de la helada no solo había poca nubosidad, sino que además esta es menor de lo normal. En contraposición, la mañana anterior a la helada muestra anomalías nulas o positivas. Esto señala que la zona no suele tener cielos muy despejados y este descenso en la cobertura es un evento extremo como tal, además de gran magnitud pues la anomalía negativa cerca al evento es de más de 60%.

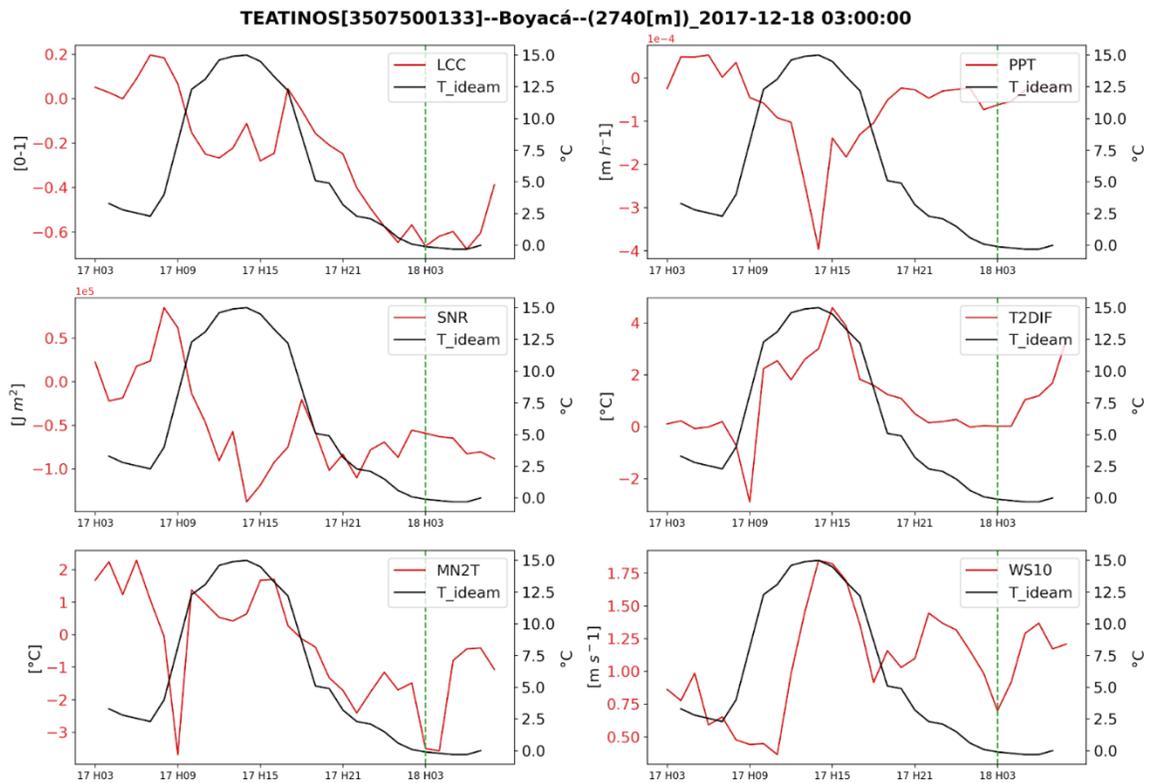


Figura 3-11: Similar a Figura 3-9 para el caso Teatinos.

Las anomalías de PPT son principalmente negativas, aunque estas están muy cercanas al cero, lo que dice que en general en la época y horas de la helada es común que no se presenten lluvias. La SNR, al igual que la LCC, tiene anomalías negativas, es decir, mayor salida de radiación térmica, tanto durante la helada como en el día anterior a esta. La SNR describe un patrón similar a la LCC que, en conjunto con lo revisado en el caso Berlín y la climatología de las variables, reafirma la alta relación existente entre estas dos. La menor anomalía negativa se da en horas del día y esta se conserva hasta horas de la noche previa a la helada, en valores relativamente estables.

La T2DIF presenta anomalías positivas el día anterior a la helada, con un máximo alrededor de las 15:00 horas, lo que indica que una humedad relativa por debajo de lo normal. Esta trata de estabilizarse en horas de la noche llegando a valores cercanos a 0 °C, pero en horas previas y posteriores a la helada se reduce de nuevo la humedad en el aire dado el aumento en los valores de la variable, comportamiento similar al del caso Berlín.

La MN2T tiene anomalías positivas el día anterior a la helada, a excepción de un periodo entre las 08:00 a 09:00 horas, es decir, que se presentó un día con temperaturas más altas de lo normal y además un calentamiento acelerado en las primeras horas de sol. Al igual que la T2DIF las máximas anomalías de MN2T se encuentran especialmente alrededor de las 15:00 horas. Pasado este punto del día las anomalías descienden y cerca a las 18:00 horas estas pasan a ser negativas y son más severas alrededor de la hora de detección de la helada.

Las anomalías de WS10 son positivas en todo el tiempo analizado. En comparación a la mañana anterior a la helada, desde las 03:00 horas y durante la helada, la magnitud de la anomalía es creciente. En horas del día también el viento fue más intenso que la media y al igual que T2DIF y MN2T el mayor pico se presenta alrededor de las 15:00 horas. La magnitud de la anomalía en horas nocturnas cercanas al evento es menor, sin embargo, no llega a estar por debajo de las velocidades de viento usuales en la época y hora del evento.

Finalmente, la Figura 3-12 muestra las anomalías durante y antes de la helada para las variables de ERA5 PL, de manera similar al caso de la estación Berlín. GEOP presenta anomalías negativas en casi todo el periodo y niveles atmosféricos mostrados. Al comparar esta gráfica con la PPT la sección del sistema que se encuentra con anomalías positivas (mayor presión) coincide con las anomalías negativas de PPT. Al igual que con el caso Berlín, al ser esta una época de poca precipitación y humedad, no se identifica que los sistemas de baja presión causen mayor PPT ni que intervengan en la ocurrencia de la helada.

Similar al caso Berlín, la T presenta una atmósfera más cálida respecto a la media en la mayoría de la gráfica. Estas anomalías se encuentran acentuadas principalmente en los niveles por encima de 600 hPa y en el día anterior a la helada entre los 800 y 700 hPa, aunque en estos niveles son de menor magnitud respecto a las que ocurren a mayor altitud. No obstante, en horas posteriores al registro de la helada, en los mismos niveles recién mencionados, se observan anomalías negativas, con lo cual seguramente ERA5 físicamente si presenta un enfriamiento nocturno más intenso que el promedio. Esto se evidencia en las anomalías de más de 1 °C alrededor del mediodía y el posterior descenso

de temperatura hasta tener temperaturas alrededor de 0.6 °C inferiores a la media en horas cercanas a la helada.

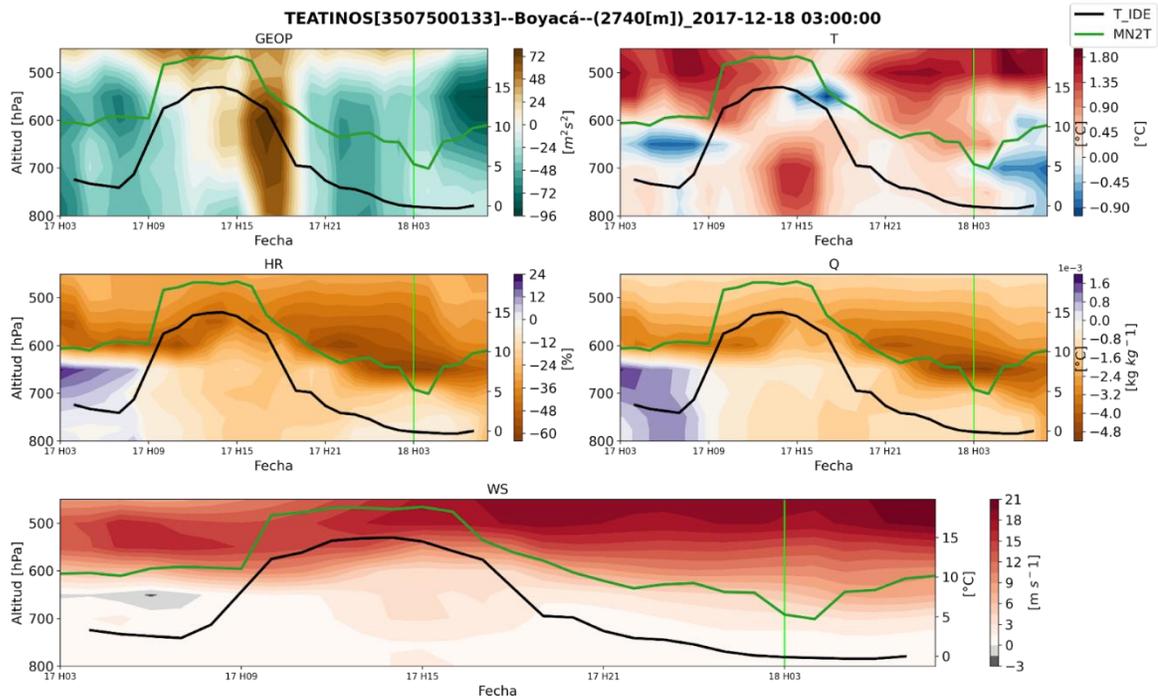


Figura 3-12: Similar a la Figura 3-10 para el caso Teatinos.

En cuanto a RH y Q, las dos reflejan que la atmósfera en estas fechas se encontraba anómalamente seca para todos los niveles de presión. La madrugada del día anterior a la helada, en las capas más superficiales de la atmósfera se presentó una humedad anómalamente mayor, pero a lo largo del día esta fue removida del ambiente y la atmósfera se conserva en estas condiciones hasta el día siguiente.

Finalmente, WS presenta vientos anómalamente más veloces, esto principalmente para los niveles superiores de la atmósfera. Estas anomalías parecen ser transmitidas a los niveles inferiores, dado que se observa como los colores cálidos en la noche previa a la helada invaden cada vez más las zonas de 600 hPa hacia abajo.

La comparación de los dos casos presentados lleva a conclusiones similares, dado que, si bien las heladas se presentan en regiones geográficamente e incluso climáticamente distintas, el ambiente bajo el cual se presentan tiene un patrón similar. En general, estas heladas muestran que ERA si representa estas fechas como eventos de salida de radiación térmica del suelo por encima de lo normal, lo cual en gran parte es favorecido por la poca presencia de nubes a baja altura y el ambiente anómalamente seco. También se muestra que los vientos en superficie y a mayores altitudes, alrededor de los 500 hPa, presentan una velocidad por encima de lo normal, con lo cual se podría suponer que en parte la ausencia de nubes se puede deber a su movimiento provocado por estos vientos. Igualmente, el ambiente atmosférico se encuentra bajo sistemas de menores presiones, que no necesariamente están asociados a mayor precipitación dada la escasa humedad en estas épocas y que, en conjunto con los vientos, muestran que al menos en los niveles mostrados la atmósfera no parece estar en condiciones de estabilidad.

3.4 Patrones en el ambiente atmosférico asociado a heladas radiativas y diferencias geográficas

La sección anterior es altamente ilustrativa en cuanto al ambiente que favorece las heladas radiativas en estos dos casos. Aunque se presentaron patrones similares, se reconoce que no dejan de ser una muestra muy reducida respecto al total de heladas registradas, por lo cual los resultados mostrados podrían ser producto de una mera coincidencia. Para expandir la muestra de análisis, se realizó un conteo de anomalías explicado en la sección de metodología (sección 2.3).

Los resultados de este procedimiento se muestran en la Figura 3-13, en la cual las barras verdes y blancas indican el conteo de anomalías positivas y negativas respectivamente para cada una de las variables y separadas por cinco rangos de altitud. Adicionalmente, sobre cada barra se muestra el promedio de la magnitud de las anomalías contadas. También se observa que se presentan 5 recuadros, los cuales representan la separación de los casos de helada según la altitud.

El conteo de anomalías de MN2T no es mayormente negativo. Aunque previamente se estableció que el reanálisis ERA5 no es capaz de representar fielmente la temperatura en estos eventos extremos, si se esperaba que las anomalías fueran en su mayor parte negativas, dado que, si bien no se desea que el reanálisis presente una temperatura bajo 0 °C, si se busca que muestre un proceso de enfriamiento nocturno más severo en estas fechas. Sin embargo, dado que las anomalías de LCC y SNR son en su mayoría negativas, se entiende que la MN2T sea mayor que la media en la mayoría de los casos, pues esas condiciones indican mayor radiación solar y más temperatura.

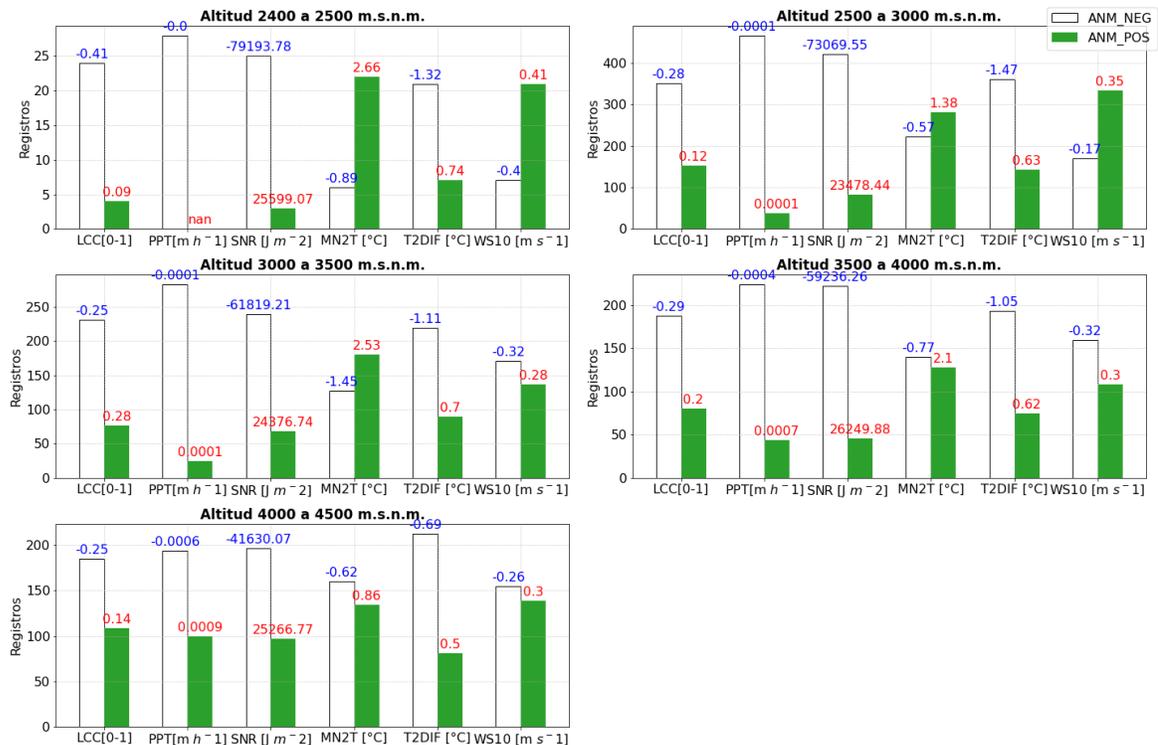


Figura 3-13: Conteo de anomalías (eje Y) durante heladas radiativas para las variables de ERA5 SL en los niveles de 800 a 600 hPa (eje X). En el eje X de izquierda a derecha están la cobertura de nubes a baja altura (LCC), precipitación total (PPT), radiación térmica neta del suelo (SNR), temperatura del aire a 2 metros (MN2T), diferencia entre temperatura del aire y temperatura de punto de rocío a 2 metros (T2DIF), y velocidad del viento a 10 metros (WS10).

La LCC (derivada de ERA5) presenta anomalías negativas durante la mayoría de los eventos de helada. No solo la cantidad de anomalías negativas es mayor en la gran parte de los intervalos de altitud seleccionados, también la desviación de la media es superior respecto a las positivas. Además, se observa que esta magnitud es relativamente estable, siempre alrededor de una escasez de cobertura del 26% aproximadamente. Esto es interesante, puesto que podría indicar que anomalías negativas de LCC superiores al 20% representan un aumento considerable en el riesgo de heladas radiativas en el corto plazo. También se observa que, en el intervalo de 2400 a 2500 m.s.n.m., las anomalías de nubosidad son muy severas en comparación al resto de estaciones, lo que en cierto modo es entendible, pues, a menor altura sobre el nivel del mar, la temperatura media aumenta y se requerirá de condiciones más extremas para la ocurrencia de una helada.

Al igual que LCC, PPT y SNR presentan en su mayoría anomalías negativas. En general, las heladas ocurren más frecuentemente en épocas secas, pero la ausencia de PPT indica que las fechas de helada presentan una deficiencia de humedad aún mayor al promedio. En cuanto a la SNR, al estar relacionada con la LCC, esta presenta en la mayoría de los casos una salida de radiación térmica del suelo anómalamente alta, además con una magnitud muy superior a la de las anomalías positivas contadas.

La T2DIF presenta predominantemente anomalías negativas. En cierto modo, esto resulta contradictorio con el conteo de LCC y PPT, pues indicaría que el aire presenta una mayor humedad relativa en estos casos, no obstante, los valores de LCC y PPT sugieren lo contrario. Finalmente, la velocidad del viento no muestra resultados tan concretos como otras variables, puesto que el conteo es, en los intervalos de 2400 a 3000 m.s.n.m., favorable a las anomalías positivas y entre los 3000 a 4500 m.s.n.m. a las negativas. Se puede suponer, de manera similar a como se hizo con la LCC, que las zonas de menor altitud requieren de condiciones meteorológicas más extremas para la ocurrencia de heladas, en este caso vientos más veloces, o bien, al menor número de casos contados.

De la Figura 3-13, se observa que en lo que se refiere a LCC, PPT y SNR, los casos Berlín y Teatinos pueden ser tomados como una buena representación del ambiente atmosférico que favorece el enfriamiento nocturno severo que acompaña una helada radiativa, mientras que en cuanto a T2DIF y WS los casos sí pueden ser más variables.

La Figura 3-14 representa el conteo de las anomalías de las variables representativas en la columna de atmósfera (ERA5 PL) para los intervalos de 800 a 600 hPa y de 600 a 450 hPa en la Figura 3-15. Estos dos intervalos son contrastantes y representativos de la atmósfera asociada a los eventos de heladas. Los niveles entre 800 y 600 hPa, en general, muestran una mayor dependencia y variación ocasionada por el ciclo diurno de radiación solar, además, se entiende que en estos niveles el efecto de la topografía también es relevante en la meteorología.

Empezando por los niveles de la atmósfera más cercanos a la superficie, la Figura 3-14 muestra que el geopotencial presenta un número ligeramente mayor de anomalías positivas, aunque las negativas tienen una alta representación también, con lo cual se entiende la coincidencia de anomalías negativas presentada en los casos Berlín y Teatinos. Esto indica que el geopotencial en estos niveles no es una limitante para la ocurrencia de heladas radiativas. Dado que, como se apreciaba en la Figura 3-13, el ambiente asociado a las heladas es de poca precipitación, se entiende que un GEOP anómalamente mayor o menor no modifica la ocurrencia de las heladas, puesto que en estas épocas no se encuentra asociado fuertemente a la precipitación.

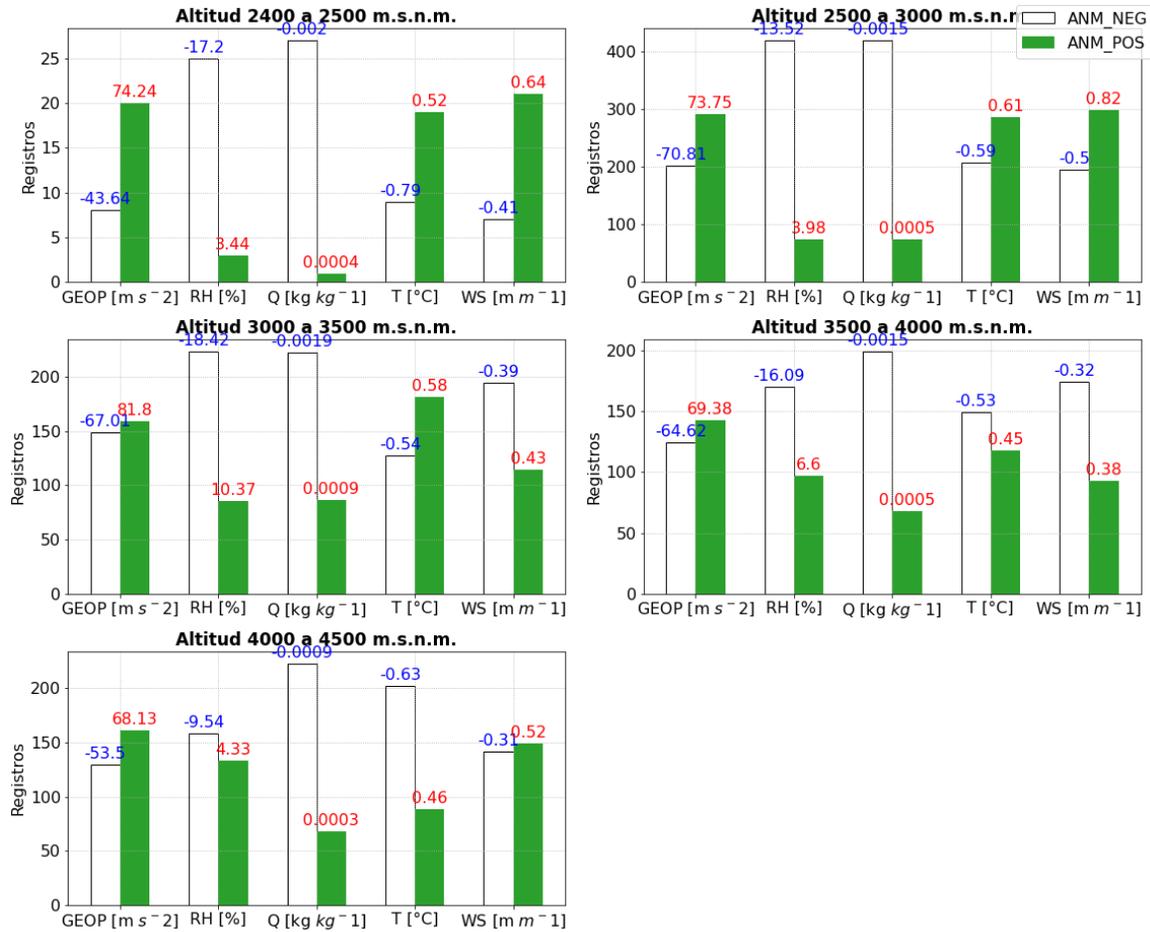


Figura 3-14: Conteo de anomalías (eje Y) durante heladas radiativas para las variables de ERA5 PL (eje X). En el eje X de izquierda a derecha están: geopotencial (GEOP), humedad relativa (RH), humedad específica (Q), temperatura (T) y velocidad del viento (WS).

La humedad relativa y específica muestra una clara mayoría de eventos que ocurren en ambientes anómalamente secos. Para el caso de HR estas anomalías se encuentran en casi todos los casos por debajo del -13% y para la Q por debajo de los $1.5 g kg^{-1}$. Al igual que con la LCC, las magnitudes de las anomalías negativas son mayores considerablemente a las de las positivas para estas dos variables.

En la temperatura se tienen resultados mixtos, pues entre los 2400 y 3500 m.s.n.m., las anomalías son en su mayoría positivas, mientras que entre 3500 y 4500 son negativas. La magnitud de estas es similar, con lo cual no se observa que las anomalías positivas sean más severas que las negativas.

En la WS existen también resultados mixtos. Entre los 2400 y 3000 m.s.n.m. y entre los 4000 a 4500 m.s.n.m., las anomalías son mayormente positivas y los otros dos intervalos son negativas. En este caso, la magnitud de las anomalías es relativamente similar en las zonas donde se da una mayoría negativa, mostrando diferencias que no superan los 0.1 m s^{-1} . Por otro lado, en las zonas con mayoría de anomalías positivas en todos los casos las diferencias en la magnitud de las desviaciones superan los 0.2 m s^{-1} .

De la Figura 3-14 se observa que coincide en buena medida con lo observado en los casos Berlín y Teatinos. Se confirma que en estos niveles HR y Q son menores en la mayoría de los casos. T no es homogénea entre heladas, pues como se observaba en dichas gráficas, las heladas parecen estar asociadas a días más cálidos de lo común para las épocas y, teniendo en cuenta los resultados de la Figura 3-13, seguramente ERA5 no representa con fidelidad el enfriamiento nocturno que se debería dar en estos casos de helada. El viento en los niveles superficiales también se presentaba con un comportamiento mixto tanto en esta figura como en las de los casos Berlín y Teatinos, pero se resalta que, en los casos de anomalías positivas, la desviación de estas resultaba ser mayor que cuando el viento era anómalamente menos intenso.

Pasando a revisar los niveles por encima de los 600 hPa, donde el efecto del ciclo diurno era menos relevante y seguramente será de igual manera con la topografía de las distintas zonas, se tiene la Figura 3-15.

En la Figura 3-15, se evidencia que en los niveles superiores de la atmósfera el geopotencial presenta, de igual manera que en los inferiores, una mayoría de eventos con anomalías positivas. La HR y Q presentan resultados similares a la atmósfera más superficial y la gran mayoría de casos presentados se dan bajo ambientes más secos de lo normal. Una diferencia respecto a las condiciones entre los 800-600 hPa es que la magnitud de las desviaciones negativas de humedad relativa es considerablemente mayor en los niveles altos de la atmósfera, estando por debajo del -19%.

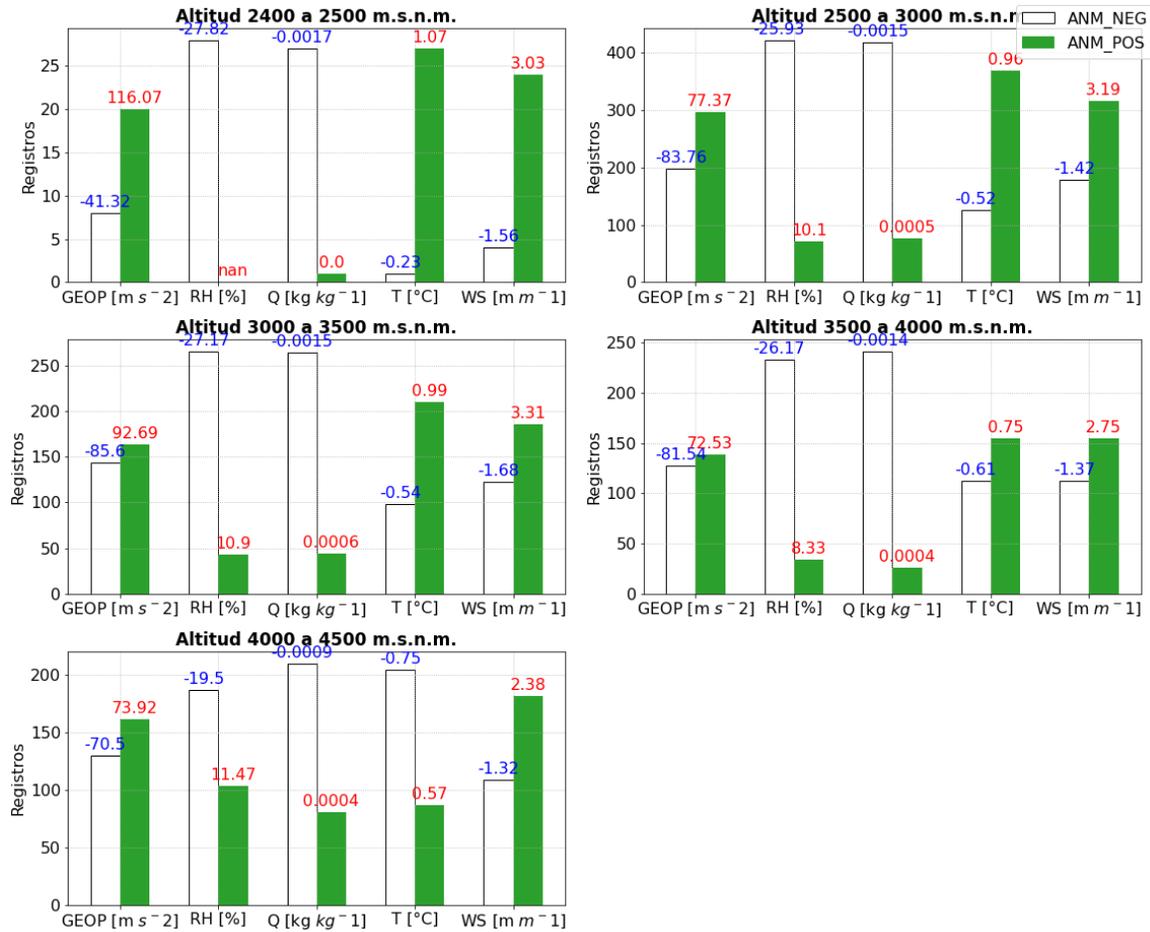


Figura 3-15: Similar a Figura 3-14 para 600-450 hPa.

La temperatura en estos casos presenta en su mayoría valores por encima de la media, lo cual coincide con los casos Berlín y Teatinos. La magnitud de las anomalías positivas es más severa en los píxeles asociados a estaciones que se encuentran a menor altitud, exceptuando el caso de la alta montaña. La WS muestra también anomalías positivas en su mayoría y al igual que la T, la desviación de estas es considerablemente mayor a los casos con anomalías negativas, llegando incluso a duplicarlas.

Las Figura 3-14 y Figura 3-15 permiten observar que lo visto en los casos Berlín y Teatinos es el ambiente atmosférico característico de la mayoría de los casos de helada. Se entiende entonces que, durante las heladas, la humedad de la atmósfera se ve reducida y esto ocurre no sólo en superficie sino en toda la vertical. La magnitud de las anomalías de humedad en la parte más alta de la atmósfera en comparación con la más superficial hace

pensar que el vapor de agua presente en la zona se pierde inicialmente por ascenso de esta a zonas de menores presiones y posteriormente esta sería transportada, principalmente por el viento. Esto coincidiría con el ambiente de anomalías positivas de WS en la atmósfera media-alta en la mayoría de los casos.

Igualmente, se observó que las heladas efectivamente están asociadas a días más cálidos de lo normal y esto sucede en buena parte de la atmósfera. Esto puede favorecer el mecanismo planteado anteriormente, dado que, en días más calientes, parcelas de aire con mayor temperatura y humedad pueden ascender en la atmósfera y mezclarse más fácilmente.

Finalmente, aunque las variaciones meteorológicas de los distintos niveles de presión están sujetas a diferentes forzadores, las anomalías del ambiente atmosférico relacionadas con las heladas radiativas no son propias únicamente de la superficie, sino que ocurren en una parte considerable de la columna atmosférica.

3.5 Patrones sinópticos y heladas en Colombia

Los análisis previos ayudan a entender el ambiente local que favorece las heladas radiativas en Colombia. No obstante, no brindan mucha información respecto a que causa en realidad que se presenten tales condiciones físicas en la atmósfera. Además, las similitudes en las anomalías del ambiente atmosférico en zonas altas y bajas de la atmósfera llevan a intuir que puede haber factores regionales que llevan al desarrollo de las condiciones antes mencionadas para la ocurrencia de las heladas. Por tal motivo se realizó un análisis respecto a la meteorología regional durante algunos eventos de helada.

En cuanto a las variables a analizar, se consideraron principalmente aquellas que, según los resultados obtenidos hasta este punto, parecen ser las que favorecen en mayor medida el enfriamiento nocturno y que además presentan resultados homogéneos en los distintos análisis, tales como LCC, WS y Q.

Pese a que se revisaron varios eventos con las características mencionadas, se presentan los resultados de uno de los casos, el cual fue seleccionado observando que presentara condiciones representativas de las distintas fechas observadas y además coincide con el

periodo de análisis de la estación Teatinos, es decir, el 18-12-2017, con lo cual se analiza el comportamiento de la atmósfera local y regionalmente para un mismo caso.

La Figura 3-16 muestra un mapa compuesto de anomalías de MN2T. Cada recuadro presenta las anomalías (calculadas según la sección 2.3) para la variable en intervalos de 3 horas durante un periodo de 24 horas previas a la fecha de las heladas. Es así como sobre cada recuadro se muestra una fecha en formato dd HH (día, hora), que indica el periodo promedio en cada imagen en hora local colombiana. En la esquina inferior izquierda se presenta un cuadro con fecha en formato yyyy-mm-dd HH, que no representa un promedio, sino que representa una hora específica, en la cual los eventos de helada ya se han desarrollado en todas las estaciones. Las estaciones en las cuales ocurren las heladas se encuentran simbolizadas con rombos verdes para las estaciones de alta montaña y azul celeste para las de zonas más bajas.

En esta fecha se presentaron heladas entre las 01:00 y 07:00 horas en 10 estaciones, distribuidas en los departamentos de Cundinamarca (2 estaciones), Tolima (1), Boyacá (3), Caldas (2), Norte de Santander (1) y Santander (1), en altitudes que van desde los 2543 a 4413 m.s.n.m. En estaciones ubicadas en otros departamentos no se registran heladas, en parte por no tener disponibilidad de datos en estas fechas y en otros casos porque la temperatura registrada si fue cercana a 0 °C (valores inferiores a 1 °C) pero no igual o inferior a este límite.

Similar a lo que sucedía localmente en el caso Teatinos, el ambiente del día anterior a los eventos en horas del amanecer hasta horas de la tarde es de temperaturas anómalamente altas y posteriormente se presenta un enfriamiento tal que las noches presentan en todo el continente anomalías de temperatura negativas. Se observa que, para Colombia, la zona de las cordilleras (en la cual ocurren las heladas) es la que sufre el descenso de temperatura más abrupto, mientras que las costas, en especial la del Pacífico, no registran anomalías negativas fuertes. Por la evolución en el tiempo de las anomalías, el enfriamiento parece darse por cambios en el estado atmosférico de la región continental. Esto se evidencia en el hecho de que las zonas que primero exponen anomalías negativas son las ubicadas al sur oriente (predominantemente territorio brasilero), donde el anochecer se da antes que en Colombia, e igualmente donde primero se observan anomalías positivas, dado que la salida del sol se presenta antes. Algo característico de estos eventos es que la temperatura parece tener un rango de variación más amplio de lo

normal, presentando anomalías positivas muy altas en el día y negativas muy bajas en las noches.

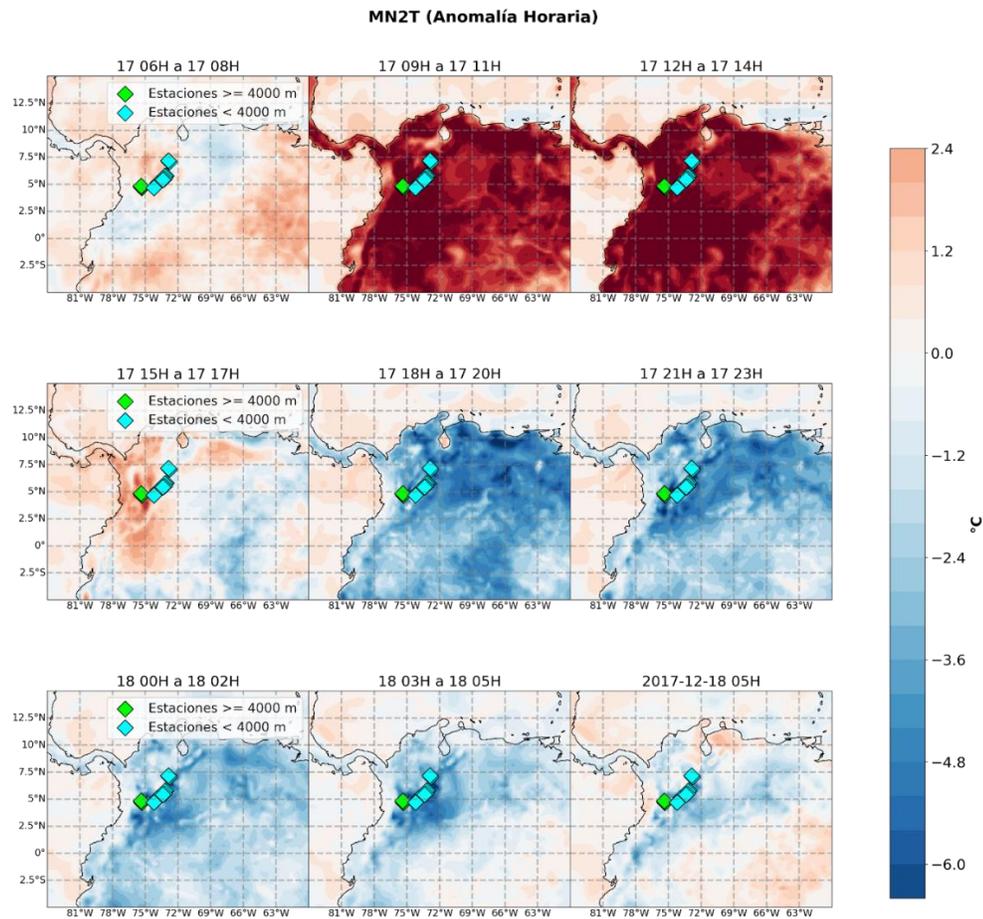


Figura 3-16: Mapa compuesto de anomalías de temperatura del aire a 2 metros (MN2T) para 18-12-2017.

Pasando a la revisión de anomalías de cobertura de nubes a baja altura (LCC), se muestra en la Figura 3-17 que en general, si bien esta es una época de menor precipitación en la región Andina colombiana, no necesariamente es común que la nubosidad sea tan baja sobre la región andina, pues se observa que las anomalías negativas sobre las cordilleras llegan a ser cercanas al -70%. La presencia de anomalías positivas en el Pacífico y al oriente de Colombia, permiten deducir que al presentarse días más cálidos de lo normal

(por lo visto en la Figura 3-16) pueden facilitar procesos de convección en el océano, lo cuales producen una buena cobertura de nubes, no obstante, la circulación en estas zonas no permite que esas nubes lleguen a cubrir el continente en especial en la zona de las cordilleras.

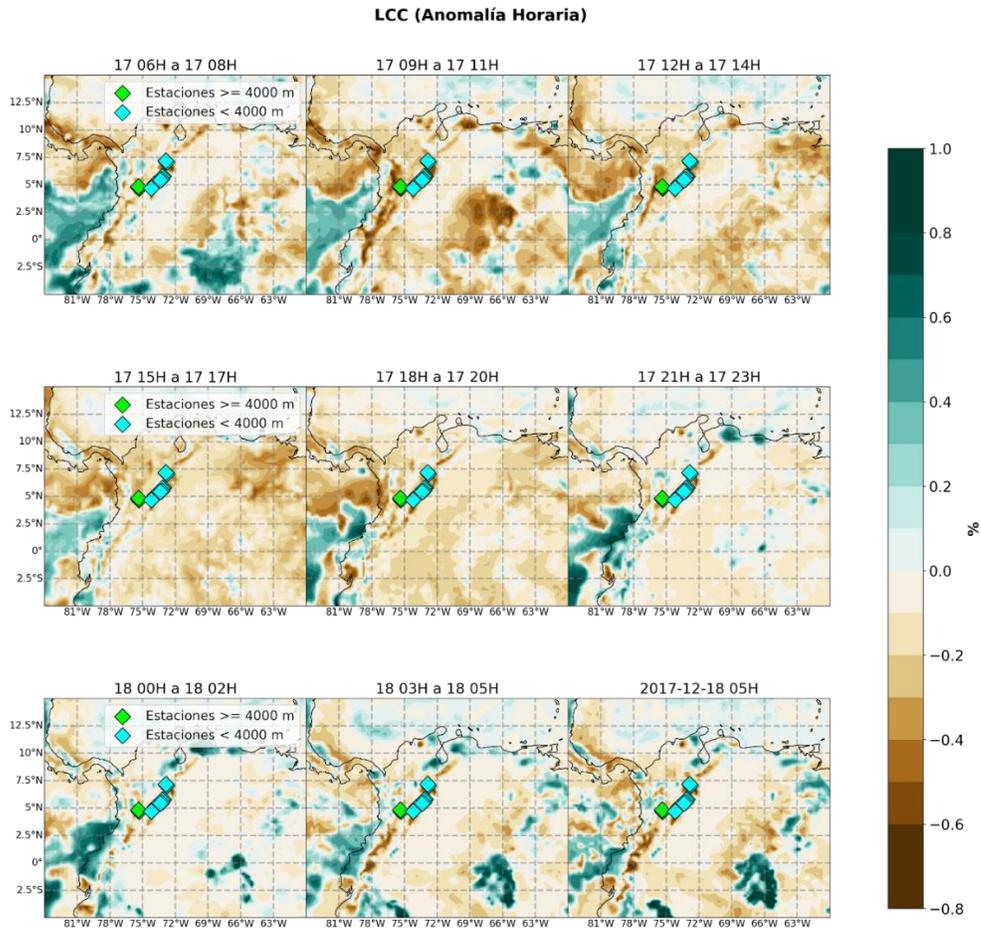


Figura 3-17: Mapa compuesto de anomalías de cobertura de nubes a baja altura (LCC) para 18-12-2017.

Por otro lado, las anomalías de WS a 500 hPa se encuentran representadas en la Figura 3-18. Esta muestra que el viento tiene un gran aumento de magnitud en esta fecha, llegando a tener anomalías positivas de hasta 24 m s^{-1} . En cuanto a la dirección del viento, este presenta anomalías desde el nororiente, es decir, no solo el viento está soplando con

mayor intensidad a lo normal, sino en una dirección más hacia el occidente. Por la evolución de la intensidad y dirección de las anomalías, estas provienen del Caribe y Atlántico al nororiente de Colombia.

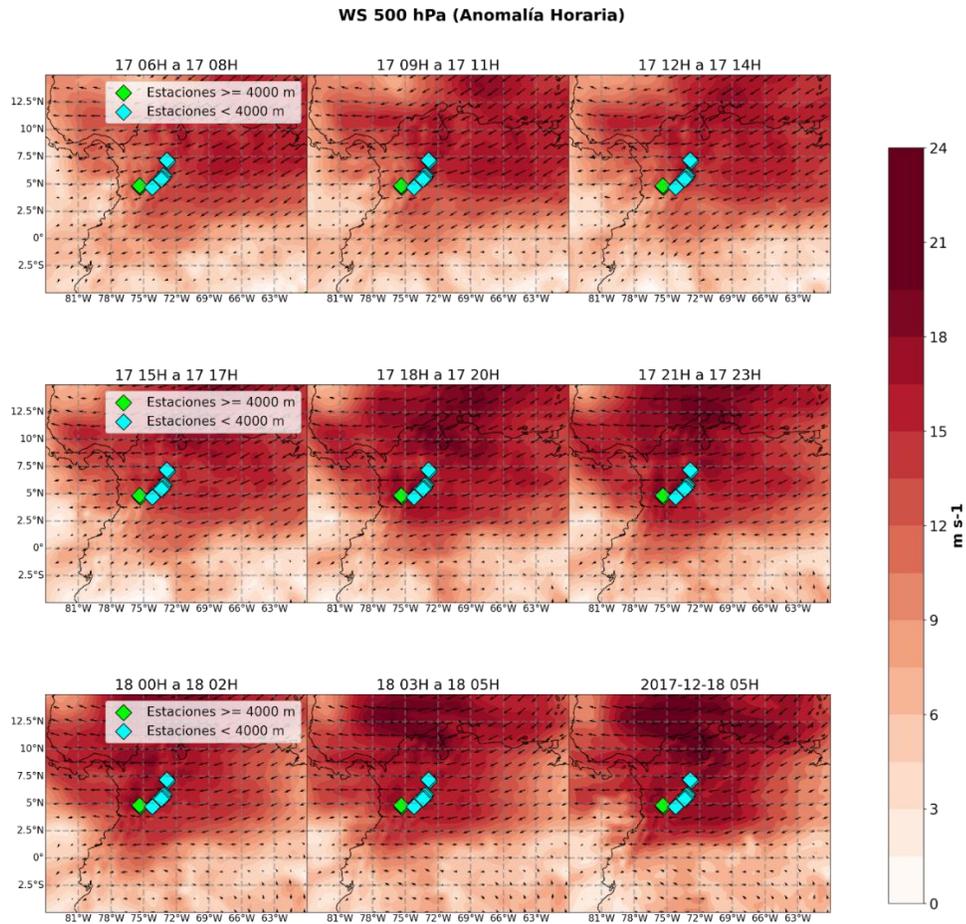


Figura 3-18: Mapa compuesto de anomalías de velocidad del viento WS a 500 hPa para 18-12-2017.

La gráfica de anomalías de la WS, muestran que, si bien en la región no se presenta una escasez de producción de nubes, estas por patrones de circulación no son fácilmente transportadas a las zonas continentales y la topografía de la zona dificulta aún más este proceso. Por lo visto en secciones anteriores, la escasez de nubosidad es de los factores que favorece en gran medida el aumento en las salidas del balance de radiación térmica

en superficie y además permite que una vez el sol irradia sobre estas regiones, se den cambios abruptos de temperatura y de igual manera cuando este se oculta.

Finalmente, la Figura 3-19 presentan la variación y anomalías presentadas en este periodo para la humedad específica.

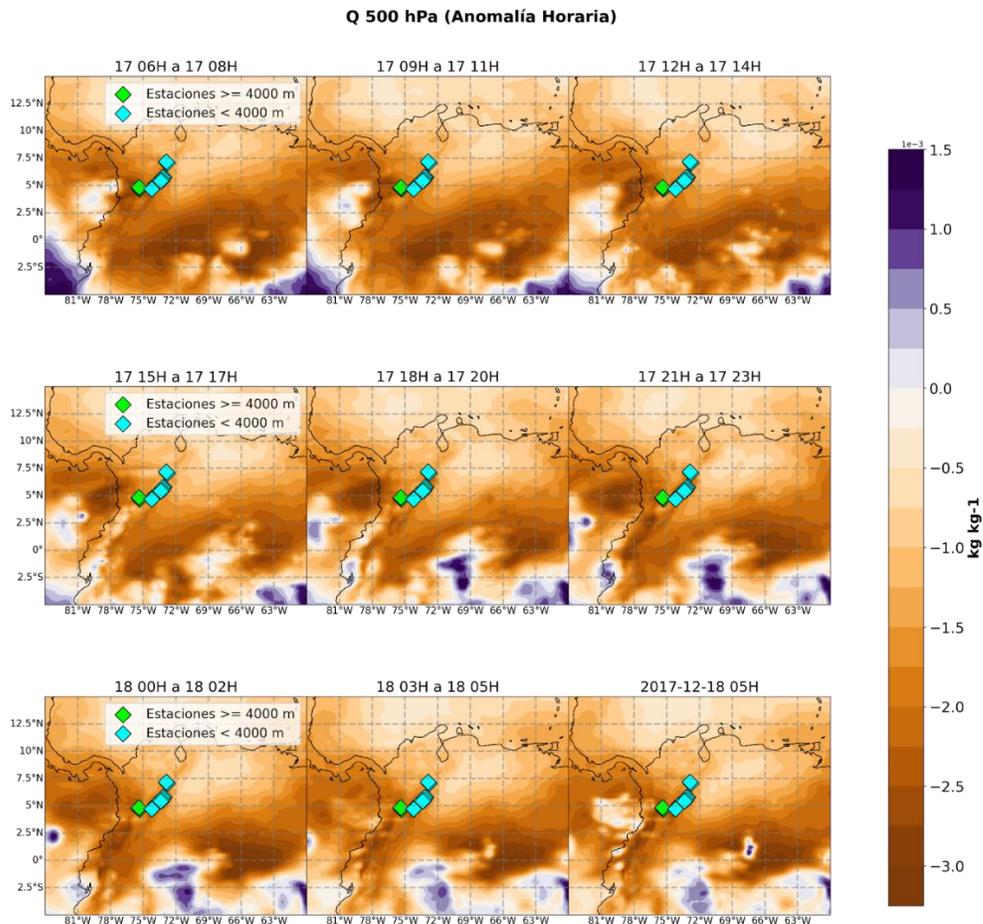


Figura 3-19: Mapa compuesto de anomalías humedad específica Q a 500 hPa para 18-12-2017.

En cuanto a las anomalías, la Figura 3-19 permite observar que toda la zona se encuentra bajo condiciones anormalmente secas. Algo muy interesante en esta gráfica es un foco de mayor humedad que se presenta cerca a las costas nariñenses y sur chocoanas, el cual inicia muy cerca de la costa en las primeras horas de análisis y se aleja cada vez más

hacia el occidente y un poco al sur. Al sur de Colombia, en la zona de la Amazonia, se exhibe un comportamiento similar, mostrando unas anomalías positivas que empiezan cerca a los 69 °W y terminan en los 72 °W. En comparación a lo que sucede en el Pacífico, el desplazamiento de esta anomalía es de alrededor de la mitad de distancia. Teniendo en cuenta que las mayores anomalías y magnitudes de WS se encontraban en latitudes más al norte, cobra sentido que la poca humedad producida en la zona sea transportada hacia el occidente.

En esta gráfica también se puede ver que las desviaciones negativas de menor magnitud se encuentran principalmente cerca del Caribe. Esto indica que dicha zona, al menos para la época en mención, no es una gran fuente de humedad para Colombia y su zona Andina, lo cual concuerda con trabajos previos (Cuartas & Poveda, 2002; Vallejo Giraldo, 2014) en los cuales el flujo de humedad por la frontera norte del país es solo entrante a altitudes bajas (por debajo de los 900 hPa) mientras que en el resto de la atmósfera es saliente. Con lo anterior, se puede suponer que cuando la magnitud del viento en esta zona sea alta y su dirección sea entrante al continente, se pueden presentar escenarios de baja humedad en la región.

Algo igualmente a resaltar en esta gráfica es que el ambiente anómalamente seco se presenta desde 24 horas antes a la fecha de las heladas y probablemente un tiempo antes, lo cual es interesante, pues, si bien las heladas ocurren principalmente por el proceso de enfriamiento nocturno de corto plazo, las condiciones que favorecen que este aumente su magnitud pueden no ser tan de corto plazo y ser gestadas varias horas o días antes.

4. Aproximación a la modelación de heladas con WRF

Los resultados obtenidos a partir del reanálisis ERA5 muestran una buena consistencia entre distintas escalas temporales y espaciales; sin embargo, el área de cobertura de los píxeles de este producto de más de 625 km² es considerablemente amplia, más teniendo en cuenta las irregularidades en la elevación del terreno en la región Andina colombiana y su relación con la meteorología local. Esto lleva a que, si bien se confíe en los hallazgos a partir de ERA5, se busque una forma de validar sus resultados y evaluar si al tener una mayor resolución espacial en las variables, se encuentran conclusiones congruentes o, por el contrario, aparecen nuevos patrones que resultan ser distintos a los hasta aquí observados durante la ocurrencia de heladas radiativas. Para tal fin se recurre a un instrumento ampliamente utilizado para el aumento en la resolución de datos meteorológicos, que es la modelación numérica física, en este caso a partir del *Weather Research & Forecasting Model* (WRF).

WRF es un modelo de predicción numérica enfocado a la meteorología y diseñado para aplicaciones de investigación, el cual puede producir simulaciones basadas en condiciones atmosféricas reales o idealizadas. Es mantenido por instituciones como el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (representada por los centros nacionales para predicción ambiental de Estados Unidos (NCEP)), además de contar con una amplia comunidad de colaboradores, con lo cual WRF se encuentra frecuentemente actualizado en términos de física, métodos numéricos y asimilación de datos (NCAR, s. f.).

En Colombia, WRF ha sido usado para objetivos de pronóstico operacional meteorológico por instituciones con similar fin, tales como el IDEAM y el Sistema de alerta temprana del valle de Aburrá (SIATA) (Ruiz & Melo, 2020), además en investigaciones relacionadas con

la reducción de escala de información meteorológica de modelos similares a ERA5 (Posada Marín et al., 2019), con lo cual se entiende que el modelo se ajusta a lo requerido para la meta planteada.

4.1 Optimización de parámetros de WRF para la simulación

Para el ajuste de WRF a las condiciones físicas que se presentan en la región andina de Colombia, se hace un análisis de sensibilidad en el cual se ponen a prueba principalmente la malla, las parametrizaciones y los datos meteorológicos para la construcción de condiciones iniciales y de borde del modelo. Para el análisis de sensibilidad se seleccionó una fecha en la cual se presentó un caso de helada radiativa el diciembre de 2017 alrededor del día 18, la cual ya fue analizada en la sección 3.3.2.

Inicialmente, el análisis de sensibilidad se centra la malla del modelo. Para estas simulaciones se usó un esquema de parametrizaciones similar al descrito en Torres (2020) como óptimo para la simulación de temperatura en una zona susceptible a heladas las cuales se encuentran en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Esquemas de parametrizaciones usados en los experimentos sobre la malla de a usar el modelo WRF

Parametrización	Nombre	Opción
Microfísica (mp_physics)	N/A	0
Radiación de onda larga (ra_lw_physics)	FLG (UCLA)	7
Radiación de onda corta (ra_sw_physics)	CAM	3
Interacción superficie atmósfera (sf_surface_physics)	Noah	2
Capa límite planetaria (bl_pbl_physics)	BouLac	8
Cúmulos (cu_physics)	Betts-Miller-Janjic	2

En cuanto al tiempo de calentamiento y simulación, (Torres, 2020) estima que para estos casos se deben tener al menos 12 horas de “calentamiento” (*spin up*) para el modelo, con

lo cual se considera simular 72 horas, empezando a las 19:00 (hora local) del 16 de diciembre y se finaliza a las 19:00 del 19 del mismo mes (almacenando datos cada hora). Dado que el evento ocurre a las 03:00 del 18 de diciembre, se cumplen con las 12 horas de calentamiento para el modelo y restan 60 de simulación.

Las condiciones iniciales y de frontera son generadas con datos del reanálisis ERA5 con una frecuencia de 6 horas. Estos son los mismos datos usados anteriormente en la descripción del ambiente atmosférico asociado a los casos de helada, con lo cual también será posible comparar los resultados obtenidos con este reanálisis y con el modelo atmosférico.

Se hacen tres experimentos para seleccionar la configuración espacial que se usará en las simulaciones, dos que se componen de tres mallas anidadas y uno con dos mallas anidadas. Estos se describen en la Tabla 4-2 y se desarrollan con las condiciones arriba mencionadas.

Tabla 4-2; Descripción de los experimentos sobre la configuración espacial del modelo atmosférico.

Nombre experimento	Bordes dominios		Resoluciones dominios
	Latitud	Longitud	
D_27_09_03	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 10.23 S a 18.75 N ▪ 0.07 N a 7.98N ▪ 3.04 N a 5.75N 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 62.10W a 85.89W ▪ 64.93W a 72.86W ▪ 67.57W a 70.38W 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 27 km ▪ 9 km ▪ 3 km
D_09_03_01	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0.28 N a 8.19 N ▪ 3.73 N a 6.45 N ▪ 4.72 N a 6.03 N 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 70.62W a 79.37W ▪ 72.22W a 75.02W ▪ 72.67W a 73.98W 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 9 km ▪ 3 km ▪ 1 km
D_09_03	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0.28 N a 8.19 N ▪ 3.73 N a 6.45 N 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 70.62W a 79.37W ▪ 72.22W a 75.02W 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 9 km ▪ 3 km

La representación de estos dominios se encuentra en la Figura 4-1, donde de izquierda a derecha se encuentran el dominio D_27_09_03 (27-9-3 km), D_09_03_01 (9-3-1 km) y D_09_03 (9-3 km). En esta figura las líneas rojas representan los límites de los dominios y el punto rojo es la estación del IDEAM Teatinos, de la cual se seleccionó la fecha y también se toman datos de temperatura para validación. En esta figura, se puede observar que D_27_09_03 abarca puntos como el Pacífico, con lo cual este dominio solucionaría la meteorología regional y entregaría los campos al dominio de 9 km donde se hace un

aumento de resolución que brinde información más aproximada a la malla interna de 3 km. D_09_03_01 no soluciona la meteorología regional en un área tan grande sino que tomando el territorio colombiano hace un aumento de resolución más directo, pasando por una malla de 3 km hasta tener una fina de 1 km que se enfoca en patrones meteorológicos locales relacionados con las variaciones en la altitud del terreno y aproximándose a solucionar procesos de turbulencia. Finalmente, D_09_03 es similar a D_09_03_01 pero sin llegar a enfocarse en turbulencia, sino solo llegando a los 3 km, donde se tiene en cuenta la influencia de la orografía compleja de la región Andina en el estado atmosférico

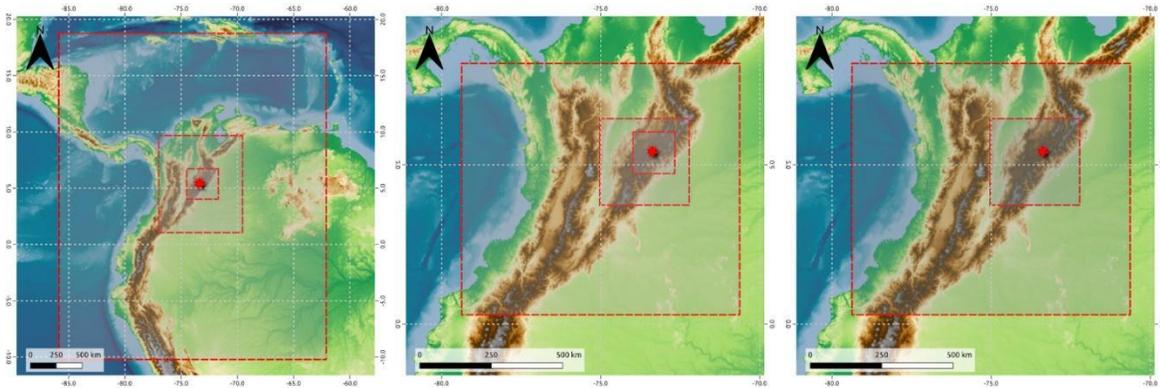


Figura 4-1: Mapas de los dominios para los experimentos con WRF. Las resoluciones de estos son de 27-9 y 3 km (izquierda), 9-3 y 1 km (centro) y 9 y 3 km (derecha).

La validación de los resultados del modelo se hace a partir de los datos de temperatura de las estaciones del IDEAM, dado que el objetivo es que las simulaciones del modelo WRF la representen de la manera más precisa posible. Esta comparación se encuentra en la Figura 4-2, donde el eje Y representa la temperatura del aire y el X las fechas. Las series que se muestran en la imagen corresponden al píxel más cercano a la estación Teatinos en las salidas del dominio más interno de cada experimento de WRF. La línea azul celeste representa los valores de temperatura de la estación, mientras que las demás corresponden a cada uno de los experimentos. Además, se muestra una línea horizontal azul que es la isoterma de 0 °C y una vertical que indica la hora en la que se registra por primera vez el evento en cuestión. Adicional a la comparación gráfica, la Tabla 4-3 presenta

los estadísticos de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación para las mismas series de la Figura 4-2.

Tabla 4-3: Estadísticos de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y correlación resultados de temperatura de WRF con distintos dominios y la registrada por la estación Teatinos. También se muestra la desviación estándar de cada simulación.

Experimento	RMSE	Correlación	Desv/Estand.
D_09_03	4.266	0.909	4.250
D_27_09_03	4.438	0.916	4.046
D_09_03_01	4.308	0.918	4.165

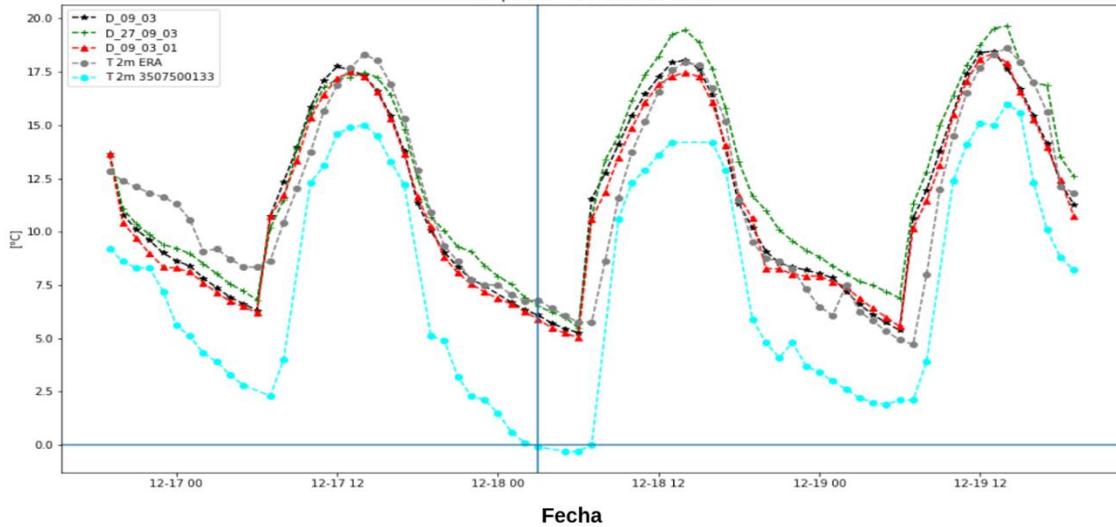


Figura 4-2: Temperatura del aire para la estación Teatinos y los distintos experimentos del dominio de WRF identificados como: D_09_03 (línea negra) dominio de 9 y 3 km; D_27_09_03 (línea verde) dominio de 27, 9 y 3 km; D_09_03_01 (línea roja) dominio de 9, 3 y 1 km; T2m ERA (línea gris) reanálisis ERA5; T2m 3507500133 (línea azul celeste) estación Teatinos.

Las series (Figura 4-2) presentan un comportamiento similar, estando cercanas a la temperatura in situ en horas donde los valores de esta son medios y separándose en los máximos y mínimos. A partir de esta imagen y del RMSE y desviación estándar, se

identifican los experimentos de 9-3 km y 9-3-1 km como aquellos que brindan una mejora en la representación de la temperatura por encima del de 27-9-3 km. Teniendo en cuenta que el aumento de resolución no favorece un acercamiento a la serie de datos de validación y, que este sí implica más tiempo computacional y requerimientos de almacenamiento, el arreglo de mallas que se conserva es el de 9-3 km (Figura 4-1, derecha). Con esto en consideración, también se amplía la zona de 3 km para abordar un mayor número de estaciones de IDEAM. Los límites definitivos de este dominio se encuentran entre 3.44 a 8.56 °N para latitud y 71.16 a 76.72 °W para la longitud.

Para la selección de parametrizaciones, al igual que con las mallas, se llevaron a cabo tres experimentos, nombrados P_01, P_02 y P_03. Los esquemas de parametrizaciones para cada caso se describen en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Esquema de parametrizaciones usado en los experimentos P_01, P_02 y P_03.

Parametrización	P_01	P_02	P_03
mp_physics	0	10	6
ra_lw_physics	7	1	7
ra_sw_physics	3	1	1
sf_surface_physics	2	2	1
bl_pbl_physics	8	8	8
cu_physics	2	2	1

El caso P_01 usa las mismas parametrizaciones de los experimentos sobre el dominio del modelo. Las variaciones en los dos experimentos restantes provienen de los trabajos de Reboledo et al. (2015) para P_02 y de Cui et al. (2019) para P_03, los cuales se enfocan en simular la calidad del aire para Bogotá y un evento de neblina acompañado de una helada en China, respectivamente. Los principales cambios de estos experimentos se encuentran en el esquemas de radiación, que teniendo en cuenta que el enfriamiento nocturno depende de la radiación térmica, pueden ayudar a hacer un mejor acercamiento a este proceso y, por otro lado, la microfísica que no es usada en P_01, pero en los otros casos se usan dos esquemas distintos. El esquema de microfísica, al calcular flujos de calor latente por cambios de fase en el agua y la masa de distintas partículas de agua, puede influir en la humedad en niveles altos de la troposfera (van Weverberg et al., 2013), que según lo visto en análisis anteriores (Figura 3-10 por ejemplo) se supone llegaría a

afectar la humedad en superficie y, por lo tanto, los cambios de temperatura. Los resultados de estos experimentos se muestran en la Figura 4-3 y en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Similar a la Tabla 4-3 para los experimentos con distintas parametrizaciones de WRF (P_01, P_02 y P_03)

Experimento	RMSE	Correlación	Desv/Estand.
P_01	4.266	0.909	4.250
P_02	4.614	0.930	3.514
P_03	4.343	0.922	3.861

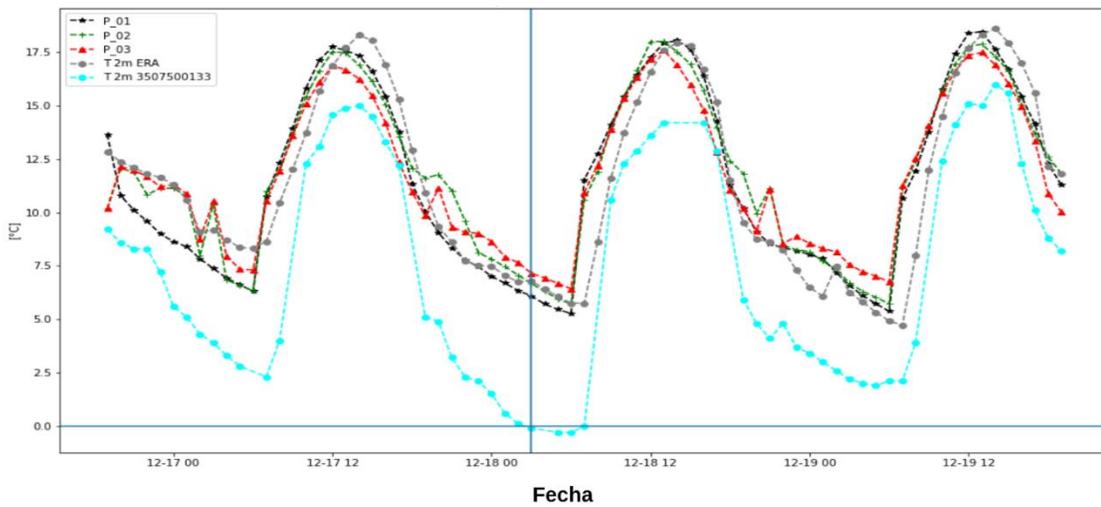


Figura 4-3: Temperatura del aire para la estación Teatinos y los distintos experimentos de parametrizaciones de WRF identificados como: P_01 (línea negra) parametrizaciones de Torres (2020); P_02 (línea verde) parametrizaciones de Reboredo et al. (2015); P_03 (línea roja) parametrizaciones de Cui et al. (2019); T2m ERA (línea gris) reanálisis ERA5; T2m 3507500133 (línea azul celeste) estación Teatinos.

De la Figura 4-3 y la Tabla 4-5, se concluye que ninguna de las parametrizaciones alternativas genera una mejora en la representación de la temperatura. Por el contrario, al inicio de la serie se encuentran más irregularidades en el comportamiento de P_02 y P_03, además de presentar un mayor RMSE y una menor desviación estándar, con lo cual se entiende que, el calentamiento del modelo con estas opciones requiere de más pasos de

tiempo. A lo largo del resto de la serie, también la opción P_01 se conserva como la más cercana a la temperatura real, con lo cual esta combinación de parametrizaciones es seleccionada.

Otros experimentos hechos, que no son mostrados en mayor detalle al no haber logrado mejorar los estadísticos de RMSE, correlación o desviación estándar son:

- Se cambió la variable HGT (altura sobre el nivel del mar) que usa datos de GTOPO30 (EROS, 2018), por datos del modelo de elevación digital ASTER (USGS, 2022) con una reducción de resolución a los 3 y 9 km de los dominios del modelo. Este cambio aumentaba la rugosidad del terreno, con lo cual la distribución espacial de la temperatura podría mejorar, pero no tuvo efecto notable en el descenso de temperatura esperado.
- Se cambió la base de datos con la que se generaban los forzadores del modelo, del reanálisis ERA5 a el modelo GFS; sin embargo, tampoco registró una mejora en los estadísticos de prueba y se conserva finalmente el reanálisis como fuente para la generación de condiciones iniciales y de frontera.
- Se usaron distintos periodos de forzamiento de cada 6 horas a cada 3, 12 y 24, en general, con resultados similares a los cambios anteriores, solo notando una leve mejora en el forzamiento cada 3 horas. Aun así, se conservan las 6 horas, para permitir que el modelo trate de simular los procesos de enfriamiento nocturno que causan las heladas y que duran aproximadamente este tiempo.

Finalmente, para mejorar la aproximación de la temperatura simulada de WRF a los registros de la estación Teatinos, se hizo un experimento que consistió en la modificación en los datos que se ingresan al modelo como condiciones iniciales y de frontera. WRF cuenta con un módulo de preprocesamiento llamado WRF Pre-Processing System (WPS), el cual toma datos crudos de información geográfica y meteorológica para entregar unos campos interpolados necesarios en la ejecución de WRF. Se agregó un último paso a este proceso, aplicando una reducción a la temperatura de los datos meteorológicos antes de ser entregados a WRF. Observando que existe una sobreestimación por parte de WRF en toda la serie y el valor aproximado de esta, se concluyó que reducir tanto la temperatura del aire a 2 m, como la de distintos niveles atmosféricos restando 2 °C, ayudaría al modelo a representar de mejor manera la temperatura del aire. Los resultados de la modelación una vez hecho este cambio se muestran en la Figura 4-4 y la Tabla 4-6.

Tabla 4-6: Similar a la Tabla 4-3 para el experimento de WRF con modificación en la temperatura (WRF_T_MOD) de los forzadores y sin esta (WRF_BASE).

Experimento	RMSE	Correlación	Desv/Estand.
WRF_T_MOD	2.305	0.934	4.064
WRF_BASE	4.266	0.909	4.250

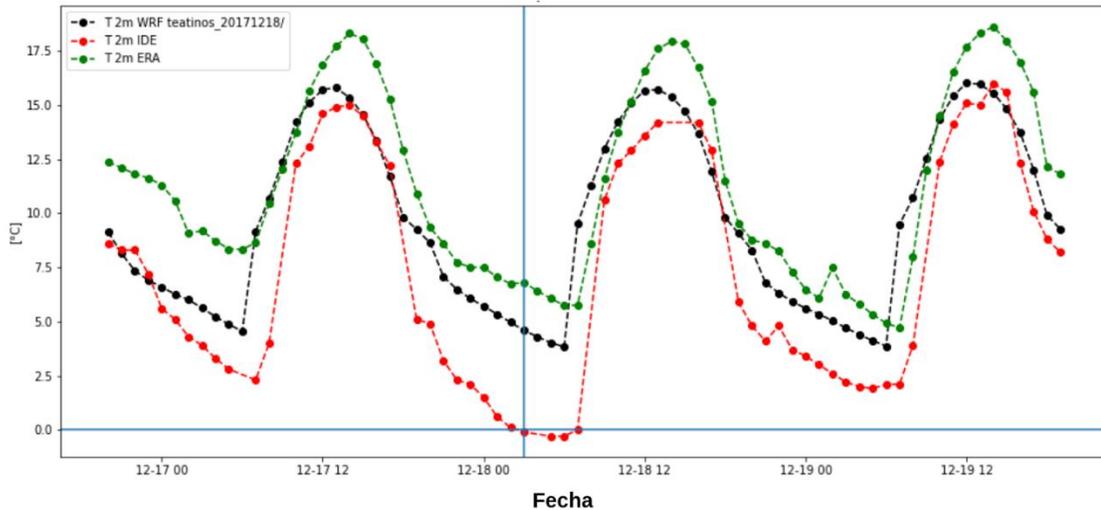


Figura 4-4: Temperatura del aire para la estación Teatinos y WRF modificando sus datos de entrada identificadas como: T2m WRF teatinos_20171218 (línea negra) simulación de WRF; T2m IDE (línea roja) estación Teatinos, T2m ERA (línea verde) reanálisis ERA5.

En la Figura 4-4 se aprecia que la línea negra que representa la temperatura de WRF se acerca más al comportamiento de la roja (temperatura real) en comparación a la verde (temperatura de ERA5), además, se observa una reducción en el RMSE para este experimento respecto al caso WRF_BASE, con lo cual esta modificación ayuda a que el aumento de resolución de los datos de temperatura efectivamente mejore su modelación y aproximación a datos reales.

4.2 Ambientes atmosféricos asociados a heladas radiativas en la simulación con WRF

Aunque por la figura 4-4 se confirma que para la estación meteorológica de validación (Teatinos), WRF no presenta un descenso tan abrupto de temperatura, se reconoce que la variable simulada por el modelo representa una mejor aproximación a los registros reales en comparación al reanálisis ERA5. Esto podría indicar que el modelo presenta de mejor manera la meteorología de la región Andina en Colombia y, por lo tanto, las variables asociadas a casos de heladas. Además, en otras zonas del dominio se encontraron eventos de helada, con lo cual se puede hacer una comparación entre el ambiente atmosférico descrito para un caso en el cual no hay helada y un caso en el cual se presenta uno de estos eventos.

Los casos de heladas en WRF están ubicados en las zonas cordilleranas colombianas, lo cual tiene sentido y también muestra que el modelo no registra heladas en zonas donde es imposible que sucedan en el país. Por la ubicación de las heladas reproducidas en WRF, varios de estos eventos se encuentran en zonas muy cercanas a algunas estaciones de las cuales se tenía información de temperatura del aire, con lo cual se pudo hacer un ejercicio de comparación para un caso donde WRF si representa una helada y donde no.

Al igual que en la sección 3.3, se seleccionaron dos casos para su revisión, el primero en fechas y localizaciones similares a las del caso Teatinos (nombrado Teatinos_WRF) y, el segundo, una posición en la cual WRF si presentó un evento de helada en esta misma fecha, en una ubicación muy cercana a la estación Berlín (nombrado Helada_WRF).

4.2.1 Comparación de casos de helada y no helada en WRF

Se analiza el estado de la atmósfera según las variables que en capítulos anteriores han demostrado una mayor incidencia en los casos de heladas. Según esto, las variables utilizadas de WRF son: en superficie, cobertura de nubes a baja altura (LCC), humedad específica a 2 metros (Q2), temperatura del aire a 2 metros (MN2T) y, en niveles de presión, velocidad del viento (WS), humedad específica (Q2) y temperatura (T). Para los casos presentados no se hace un cálculo de anomalías en las variables meteorológicas, esto debido a que se debería contar con una climatología de los datos con resolución espacial similar a la de WRF, para lo cual se requerirían más años simulados.

En la Figura 4-5 se muestra el caso Teatinos_WRF, en la cual se muestran en la columna izquierda los resultados de WRF para las variables en superficie y en la derecha para las de niveles de presión.

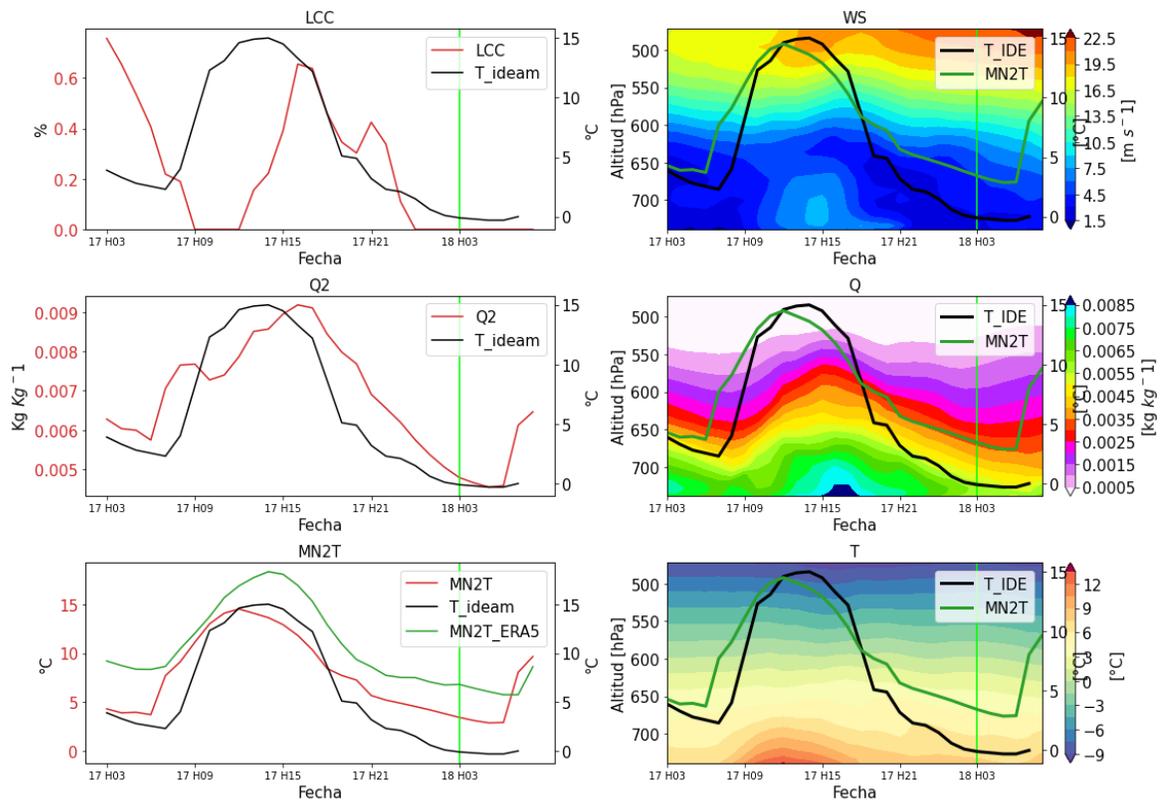


Figura 4-5: Variables meteorológicas de WRF en superficie para el caso Teatinos_WRF. En la columna izquierda se muestra con una línea negra la temperatura en la estación y se encuentran de arriba a abajo las variables (líneas rojas): cobertura de nubes a baja altura (LCC), humedad específica a 2 metros (Q2), y temperatura del aire a 2 metros de WRF (MN2T) y del reanálisis ERA5 (MN2T_ERA5). En la columna derecha se muestra tanto la temperatura en la estación (línea negra) como la de WRF (línea verde), así como las variables, de arriba a abajo: velocidad del viento (WS), humedad específica (Q) y temperatura (T).

El ambiente atmosférico descrito por la Figura 4-5 indica que durante la helada se tiene una nula cobertura nubosa, una precipitación ligera, MN2T cercana a 0 °C y con tendencia decreciente en la madrugada hasta antes del amanecer, comportamiento que se repite para Q2. Las horas previas al caso de helada, más específicamente las del día anterior, se presenta algo de nubosidad, aunque en su mayoría esta es menor al 50%, especialmente entre las 12:00 y 22:00 horas. En la Q2 durante el día se presenta una mayor humedad que en la noche y, esta evidencia que durante la madrugada de la helada había menos humedad en superficie que el día anterior. En la MN2T, WRF mejora la representación de la variable, especialmente en la estimación de los máximos, aunque también se muestra la dificultad de esta configuración de WRF para representar un enfriamiento nocturno más severo, especialmente en horas cercanas al anochecer. Como principales diferencias entre WRF y ERA5, se resalta que la temperatura en horas previas a la helada tiene una pendiente similar entre series, sin embargo, para ERA5 el enfriamiento es más severo que la fecha sin helada, mientras que para WRF no.

Pasando al estado de la vertical atmosférica, la Figura 4-5 muestra que a diferencia de ERA5, WRF representa las diferencias en los niveles de presión sobre las regiones en relación a la altitud a la cual se encuentran. Por lo anterior, para este caso se cubren los niveles entre aproximadamente 750 hPa y 450 hPa.

El comportamiento de WS en WRF, es parecido a lo mostrado por el reanálisis ERA5, con una atmósfera que hasta los 650 hPa muestra un marcado ciclo diurno de la velocidad del viento, con noches de vientos leves y días con mayores velocidades. WRF, en los niveles más altos mostrados, exhibe también una intensificación de los vientos desde las 09:00 horas del día anterior a la helada, aunque esta es menor (alrededor de 1 m s⁻¹) a la intensidad mostrada por el reanálisis para los mismos niveles. Finalmente, también se resalta como los contornos de mayor magnitud amplían su cobertura en la vertical en horas cercanas y durante la helada.

El ciclo diurno de Q es similar al del reanálisis ERA5, donde entre las 09:00 y 15:00 horas los valores de esta tienden a ser mínimos y en lo que resta del día se encuentran los máximos. De igual forma que en ERA5, se observa que la madrugada durante la que ocurre la helada se encuentra bajo condiciones de menor humedad, especialmente en superficie y hasta los 600 hPa.

La temperatura presenta un comportamiento similar al de ERA5, con una superficie atada al ciclo diurno de radiación solar y donde desde los 650 hPa hacia arriba este efecto es mínimo. Como principal diferencia, se encuentra que los niveles a menor altitud son más fríos en comparación a ERA5, especialmente en horas del mediodía, donde los contornos de 18 °C llegaban a alturas cercanas a los 700 hPa, mientras que en WRF en estos niveles es más común ver contornos de 15 °C.

El caso Teatinos_WRF aunque no describe una helada, si muestra que el ambiente atmosférico de ERA5 y WRF, en las variables que se consideran más determinantes para el descenso de temperatura, muestran magnitudes distintas; por ejemplo, en WRF se da una LCC de alrededor de 40% mientras que en el reanálisis ERA5 esta es casi nula. Sin embargo, en cuanto a las tendencias de estas en horas cercanas al inicio de la helada, las conclusiones son similares.

La figura 4-6, presenta el ambiente atmosférico simulado por WRF para el caso Helada_WRF.

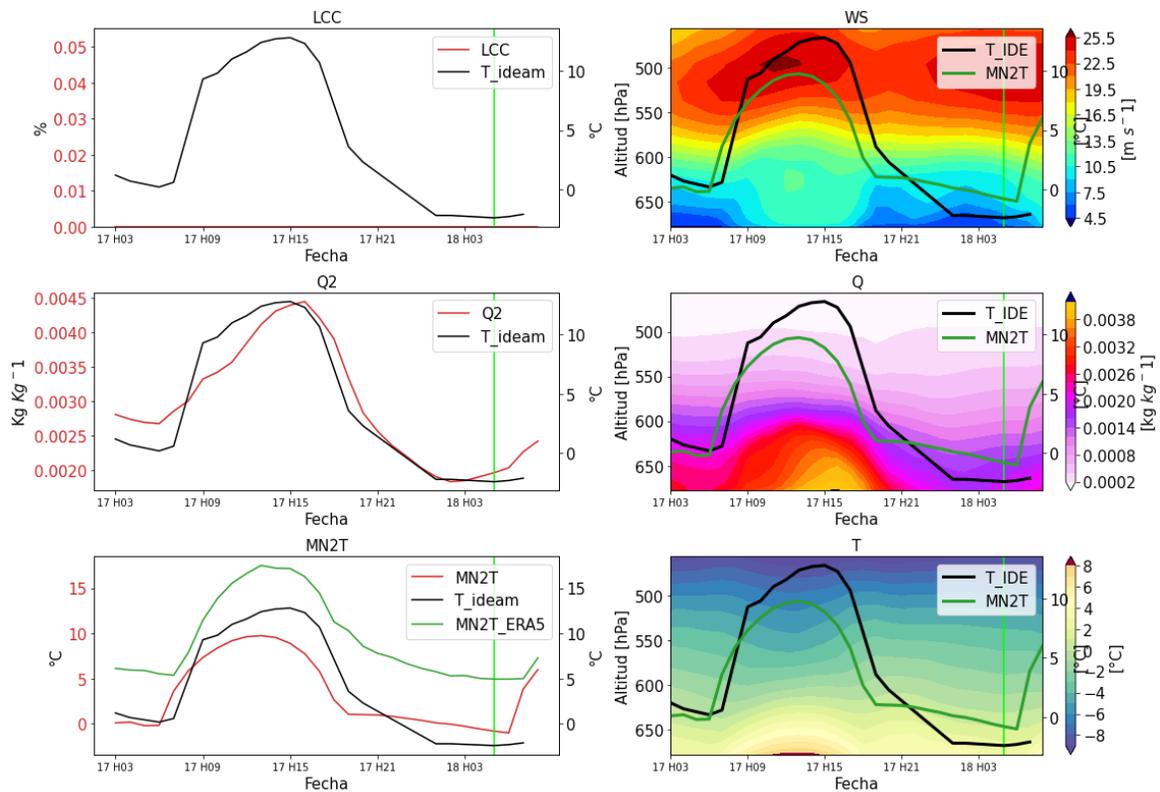


Figura 4-6: Similar a la figura 4-6 para el caso Helada_WRF

Empezando por comparar la temperatura del reanálisis ERA5, WRF y la estación Berlín (Figura 4-6), se observa que la línea de WRF es más cercana a la temperatura real en prácticamente toda la serie. A diferencia del reanálisis, que sobreestima en todo momento la MN2T, WRF en ciertos momentos del día se encuentra por debajo de la temperatura real, subestimando los máximos que se ven alrededor del mediodía. Si bien WRF presenta una menor temperatura que la real al anochecer, el enfriamiento nocturno del modelo sigue siendo pobremente simulado, con lo cual se observa como alrededor de las 22:00 horas WRF empieza a sobreestimar la temperatura. En las gráficas, en el periodo de las 22:00 a 02:00 horas, el enfriamiento que se da en los datos reales es considerablemente alto respecto al de WRF, donde la pendiente de la MN2T tiene menor inclinación, además de no tener cambios hasta el amanecer.

En cuanto a las demás variables, se aprecia un comportamiento similar al del caso Teatinos_WRF con ciertas particularidades que radican principalmente en la magnitud de las variables. Para empezar, la nubosidad en este caso es nula en toda la serie, la Q2 presenta igualmente valores inferiores ($0.0045 \text{ kg kg}^{-1}$ menos), mientras que con el viento ocurre lo opuesto y este es de mayor intensidad (alrededor de 3 m s^{-1} más rápido). Aun con estas disparidades de magnitud, las cuales se deben a la geografía y meteorología sobre la cual ocurren (este punto se encuentra alrededor de 800 metros por encima del caso Teatinos_WRF), el ambiente descrito por WRF en superficie durante la helada tiene los mismos patrones en horas cercanas a la fecha del evento, nula cobertura de nubes a baja altura, una humedad por debajo de la registrada en días anteriores y un viento leve, pero con tendencia creciente.

En la Figura 4-6 se hacen evidentes las diferencias climáticas entre las zonas cercanas a las estaciones Teatinos y Berlín, lo cual no se apreciaba en la sección 3.3, dado que ERA5 muestra datos de las variables en los mismos niveles de presión para todo su dominio, mientras que WRF muestra directamente solo aquellos por encima de la superficie del punto. En el ambiente atmosférico vertical de este caso, por la mayor altitud de esta zona de la malla de WRF, la representación de la atmósfera se encuentra entre los niveles de 700 a 450 hPa aproximadamente.

Para el caso Helada_WRF (Figura 4-6) las magnitudes de todas las variables son distintas en los niveles más cercanos a superficie, siendo menores para T (cerca de 7 °C menos), y Q (0.0048 kg kg⁻¹ menos) y mayores para WS (3 m s⁻¹ por encima), lo cual explica la ocurrencia de heladas para esta zona en WRF, dadas las condiciones meteorológicas más extremas de temperatura, sequía y vientos. Igualmente, se conservan los patrones más importantes de secciones anteriores, una Q menor en horas cercanas al evento y un viento leve en superficie, pero muy intenso entre 600 y 500 hPa.

La comparación de los dos casos muestra las posibles causas de la mejora en la representación de la temperatura por parte del modelo atmosférico respecto a los datos de reanálisis, así como sus deficiencias. Por una parte, el hecho de que los dos puntos revisados estén a altitudes distintas en el modelo (2644 m.s.n.m para Teatinos y 3351 m.s.n.m para Berlín) y que el ambiente en superficie y en la malla vertical presenta características distintas (ambiente más seco, frío y con vientos más intensos para Berlín), indica que el aumento de resolución espacial hecho ayuda a que las diferencias meteorológicas en la zona Andina, (que en parte se deben a su orografía compleja) cuenten con una mejor aproximación en el modelo atmosférico, lo cual ayudó a la simulación de casos de helada en las fechas simuladas en zonas donde efectivamente se pudieron presentar estos eventos. Por otro lado, se resalta que el proceso de enfriamiento nocturno en WRF no mostró descensos igual de abruptos en la temperatura a los presentados en los datos locales, lo cual puede ser causa de la resolución de los registros (3 km en WRF y puntual en los datos de validación) o bien a que aún a esta escala los procesos locales de transferencia de radiación térmica tienen difícilmente pueden ser resueltos por este tipo de modelos.

4.2.2 Patrón espacial de WRF

La sección anterior indica que el uso del modelo atmosférico representó una mejora en la representación de los patrones espaciales meteorológicos. Por tal motivo también se hace un análisis de mapas compuestos similar al de la sección 3.5, para observar en la región simulada el comportamiento y distribución de algunas variables meteorológicas, así como una comparación con los datos de reanálisis, con el fin de analizar también aquellos patrones que favorecieron la simulación de heladas en el modelo atmosférico.

Observando los patrones sinópticos relacionados con las heladas, se examina el comportamiento espacial de algunas variables en el área de la malla de WRF y se compara con el reanálisis ERA5 para una zona similar (no es idéntica por las diferencias de resolución). Esto se hace para las variables de superficie MN2T (Figura 4-7) y LCC (Figura 4-8) y para las variables a 500 hPa de Q (Figura 4-9) y WS (Figura 4-10). Los mapas compuestos representan un periodo de 24 horas, promediados cada 3 horas y con un cuadro final que representa el dato instantáneo en el cual se presentan más heladas simultáneamente.

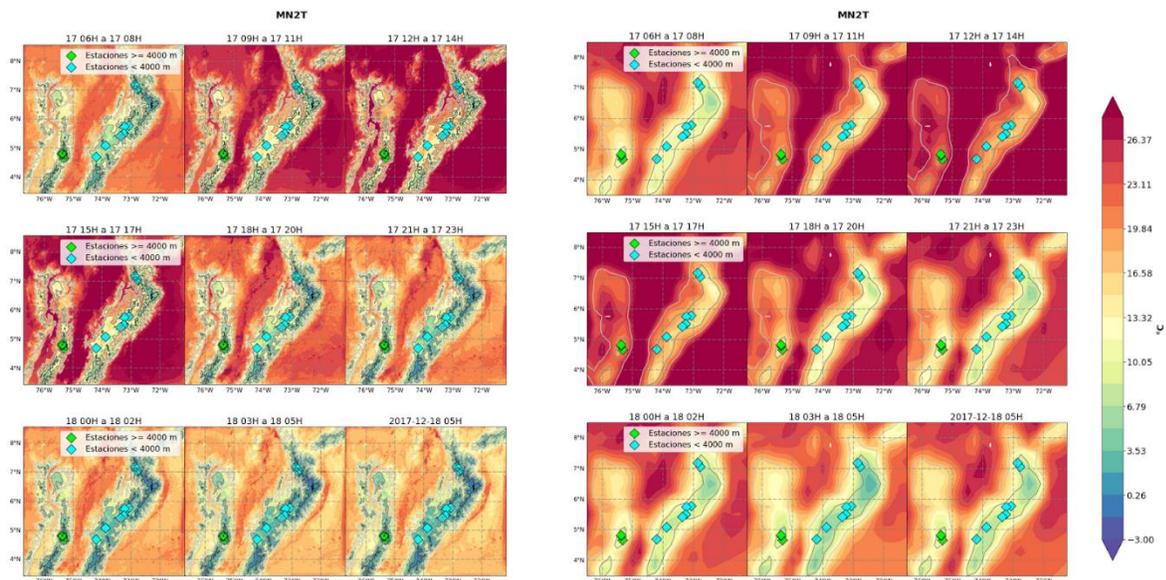


Figura 4-7: Mapas compuestos de temperatura del aire a 2 metros (MN2T) durante la helada del 2017-12-18 para WRF (izquierda) y ERA5 (derecha).

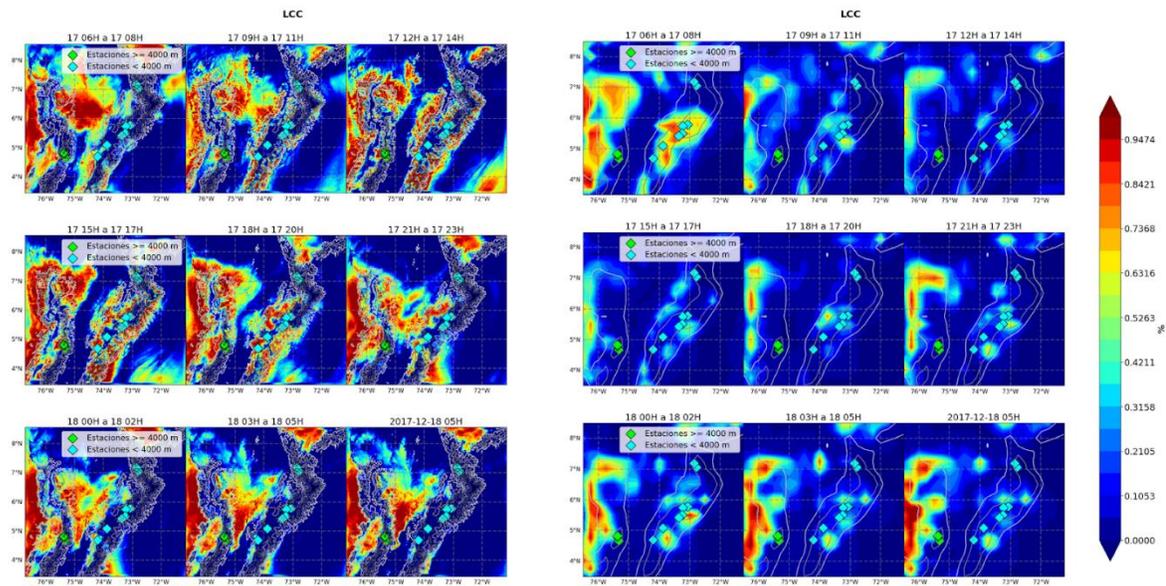


Figura 4-8: Mapas compuestos de cobertura de nubes a baja altura (LCC) durante la helada del 2017-12-18 para WRF (izquierda) y ERA5 (derecha).

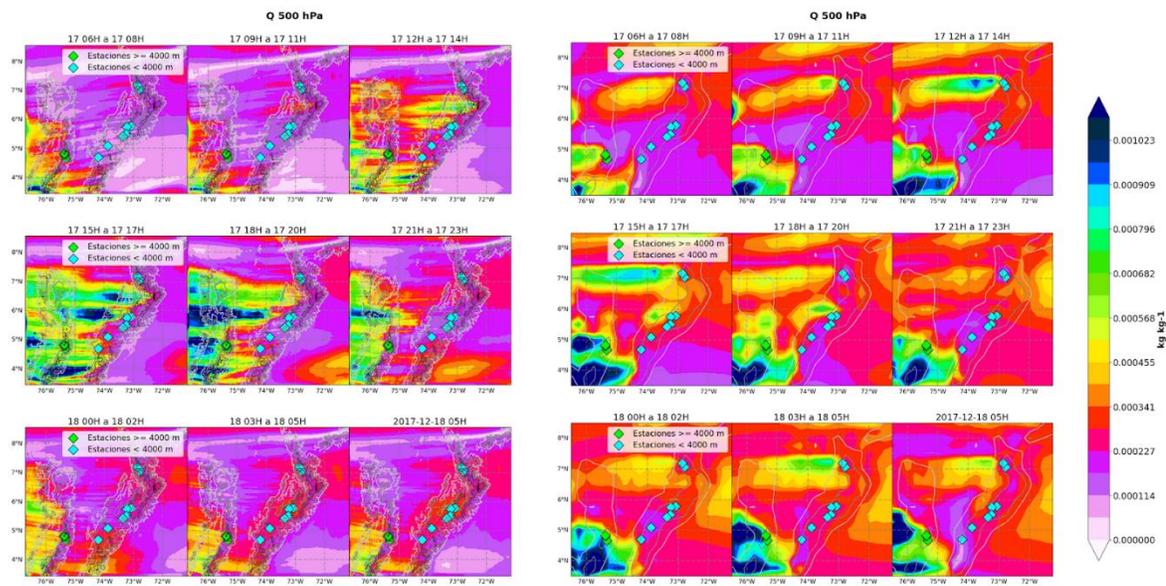


Figura 4-9: Mapas compuestos de humedad específica (Q) a 500 hPa durante la helada del 2017-12-18 para WRF (izquierda) y ERA5 (derecha).

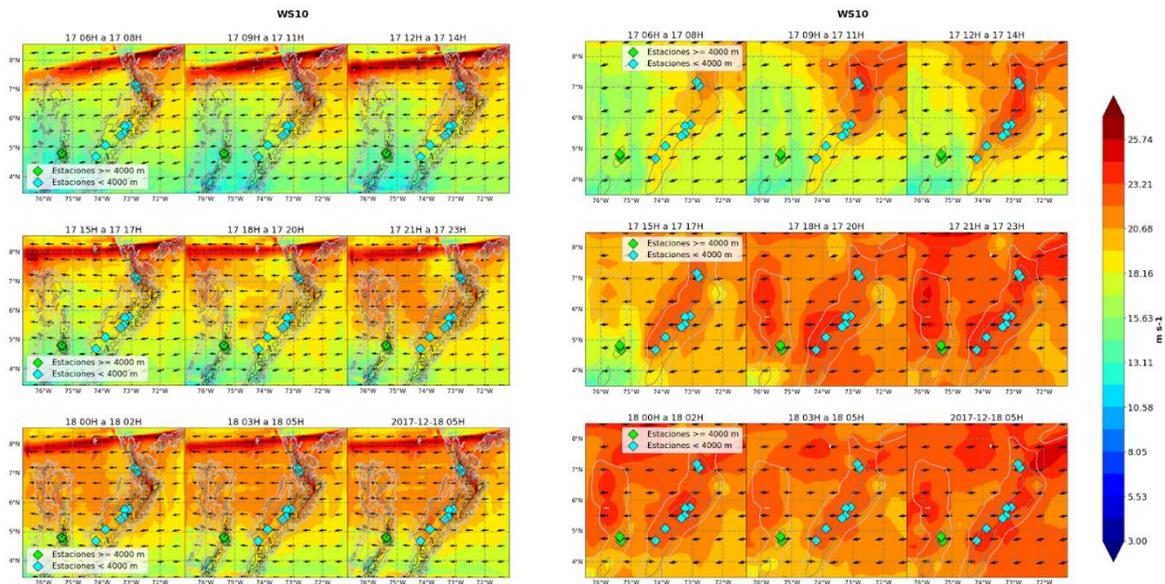


Figura 4-10: Mapas compuestos de velocidad del viento (WS) a 500 hPa durante la helada del 2017-12-18 para WRF (izquierda) y ERA5 (derecha).

De los mapas compuestos (Figura 4-7 a 4-10) se puede observar que la mayor resolución del modelo atmosférico mejora en gran parte la representación de varios patrones meteorológicos. Para empezar, se muestra una más precisa representación de la temperatura (Figura 4-7) en relación con la orografía colombiana, lo cual en parte ayuda a que WRF logre desarrollar eventos de heladas. No solo los mínimos se encuentran mejor representados y distribuidos en WRF, también para los máximos de temperatura, se puede observar como en zonas de menor altitud estos ocupan una menor área en la simulación de WRF y están confinados a zonas seguramente asociadas con el río Magdalena, donde es normal que la temperatura sea más alta. Esto también ayuda a que se represente de mejor manera el proceso de enfriamiento nocturno a nivel regional (no necesariamente localmente) en WRF, pues en el periodo entre las 15:00 y 23:00 horas las diferencias entre el día y la noche son más contrastantes en WRF que en ERA5.

En la LCC (Figura 4-8), WRF muestra aún más la influencia de un factor poco apreciado en ERA5, que es el valle interandino del Magdalena. Esta zona en WRF aparece como una importante zona de producción de humedad y nubes, las cuales se ha visto que son variables muy importantes en la ocurrencia de heladas. Aun con una mayor cantidad de nubes en WRF, se destaca que las zonas sobre las cuales están ubicadas las estaciones

revisadas y cerca de las cuales el modelo simuló heladas, reportan una escasa cobertura nubosa.

En la humedad específica (Q, Figura 4-9) existen diferencias significativas entre el modelo y el reanálisis. No solo desde tempranas horas de la noche WRF reporta una atmósfera más seca si se compara con el reanálisis, sino que además muestra un patrón de estelas horizontales de humedad que parecen extenderse hacia el occidente, dado que en esta zona aparecen áreas de mayor humedad que se van difuminando en ese sentido.

Finalmente, los vientos (Figura 4-10) muestran un patrón de intensificación hacia la hora de ocurrencia de la helada, el cual que empieza en el norte y se extiende hacia el sur de Colombia, además con vientos que soplan en direcciones similares tanto en ERA5 como en WRF. Al igual que con las demás variables, se observa también como la distribución espacial de esta variable se representa mejor en WRF, mostrando incluso interacciones con la orografía del país que son menos obvias en ERA5.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones y recomendaciones generales

En el análisis exploratorio de datos de temperatura del aire se logró identificar que, tanto los modelos de reanálisis (ERA5) como a los datos de sensores remotos (MODIS) no son capaces de representar temperaturas de helada para Colombia, esto posiblemente por cuestiones de resolución o de frecuencia de muestreo. Por otro lado, los registros de estaciones meteorológicas del IDEAM si logran captar casos de helada, pero las series de temperatura de esta fuente tiene deficiencias como desigualdad en el periodo de registro, presencia de datos anómalos y muy importante, presenta casos de helada falsos. Esto último se debe a que, ante fallas de los sensores de la estación, se pueden detectar falsos registros de temperatura igual a 0°C, limite usado para la identificación de heladas, los cuales en algunos eventos no fueron eliminados en los filtros automáticos de validación de los datos de las estaciones meteorológicas y solo fueron removidos al revisar las series de temperatura manualmente. Esto sugiere que, con el fin de usar datos meteorológicos para el estudio de fenómenos como las heladas en donde las variaciones de corto plazo son importantes, el IDEAM debe aumentar los esfuerzos en el control de calidad de la información que censan sus estaciones meteorológicas automáticas.

Pasando a los análisis del ambiente atmosférico relacionado a heladas radiativas, la climatología interanual permite entender que, si bien los ciclos intraanuales y diurnos de las distintas variables meteorológicas son los más determinantes en la proporción de heladas radiativas, cabe la existencia de forzadores climatológicos o fisiográficos que a largo plazo hacen que ciertos años sean más o menos vulnerables a estos eventos, los cuales pueden ser investigados con mayor profundidad en trabajos posteriores.

Se observó que la época de mayor frecuencia de heladas radiativas es el trimestre de diciembre, enero, febrero (DEF), para distintas zonas de la región Andina colombiana, esto

debido a que el ciclo anual (principalmente) de precipitación y humedad tienen un comportamiento similar en dicho territorio, siendo este trimestre el más seco del año. En los demás trimestres del año se encontraron diferencias entre zonas de alta montaña, por encima de 4000 m.s.n.m., y aquellas por debajo de esta cota, dado que en la alta montaña se encuentra otra época en la que aumenta considerablemente la amenaza de heladas que corresponde al trimestre junio, julio, agosto (JJA), mientras que para las zonas más bajas no se da un aumento. Se tiene entonces que para la alta montaña la amenaza de heladas tiene un ciclo bimodal con máximos en los trimestres DEF y JJA, mientras que para la baja montaña el comportamiento es unimodal con máximo en DEF. Una razón de este comportamiento diferenciado puede ser que, a mayor altitud, al tener condiciones de menor temperatura, cobertura de nubes y humedad, así como vientos de mayor magnitud, las variaciones trimestrales de estas variables llegan con mayor frecuencia a valores en los cuales el enfriamiento nocturno en estas zonas puede provocar heladas.

En los casos locales de análisis de anomalías, así como en el conteo de estas, se evidenció que la cobertura nubosa es la variable que ejerce mayor control sobre la salida de radiación térmica y, por lo tanto, de la ocurrencia de heladas. También que en general los días de helada son más secos (tanto en superficie como en la vertical atmosférica) y que en las horas cercanas a las heladas si bien se dan vientos leves (inferiores a 2 m s^{-1}), su intensidad no necesariamente es inferior a la media. Estas condiciones, sumadas al comportamiento contrastante de la temperatura en días de helada, se asemeja a lo que ocurre en zonas desérticas, donde los días son sumamente cálidos y las noches muy frías.

El conteo de anomalías, al ser hecho en las 6 horas previas a los casos de helada, permite suponer que el ambiente de poca nubosidad, humedad y alta salida de radiación térmica del suelo se presenta al menos 6 horas antes a que la temperatura descienda a $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y en algunos casos como los de la estación Teatinos y Berlín, hasta con 24 horas de antelación. Además, se identifica que la magnitud media de las anomalías asociadas a los casos de helada es de: cerca del -20% para la nubosidad (LCC); -10% para la humedad relativa (HR) de la atmósfera más cercana a superficie y de -20% para altitudes entre 600 y 400 hPa; y de -0.001 kg kg^{-1} para la humedad específica (Q) para altitudes entre 800 y 400 hPa. Observando también el factor geográfico revisado en este ejercicio, se observó que la magnitud media de las anomalías negativas de estas variables (LCC, HR, Q) en zonas de alta montaña es generalmente menor a la de zonas más bajas; por ejemplo, en la HR

hay una diferencia de al menos un 5% en las anomalías de las estaciones por encima y por debajo de 4000 m.s.n.m.

Los mapas compuestos de las anomalías en las variables meteorológicas en la región, en conjunto con la revisión local de estaciones indican que, condiciones geográficas, especialmente la topografía y la ubicación respecto a puntos como el Caribe, Pacífico y la Amazonia, condicionan la ocurrencia de heladas. Esto debido a que la cercanía a zonas con una mayor humedad media hace que los contrastes de temperatura en fechas asociadas a heladas sean menores. Además, los puntos geográficos mencionados son aportantes de humedad para Colombia y la orografía compleja de la región impide que estos puedan ser distribuidos con facilidad en la zona andina de Colombia.

Como un patrón destacado a escala sinóptica que mostró asociación a las heladas, se encontró una menor humedad en todo el norte de Sudamérica además de una intensificación de vientos del nororiente sobre esta misma región. Esto concuerda con estudios previos que muestran que, a las altitudes sobre las cuales hay susceptibilidad a heladas en Colombia y en el trimestre DEF, el flujo de humedad sobre el norte de Colombia es negativo, entonces esta intensificación de vientos y con estas direcciones favorecen precisamente ambientes en los cuales la atmósfera tiene un déficit de vapor de agua y los casos de enfriamiento nocturno acelerado son más frecuentes.

Durante el experimento de simulación de una helada con un modelo atmosférico, se presentaron heladas en distintos puntos del dominio de 3 km. En general, estos estuvieron ubicados a mayor altitud sobre el nivel del mar (por encima de los 3000 m.s.n.m.), con lo cual se muestra que el modelo fue capaz de entender como la orografía de Colombia tiene gran influencia sobre las condiciones de temperatura y también que el ambiente bajo el cual pueden ocurrir heladas a menores altitudes es menos frecuente. El hecho de que con píxeles de 3 km se simularan heladas indica que la extensión espacial de estos eventos es cercana a los 9 km², en un trabajo futuro se podría evaluar una forma de determinar mejor el área aproximada sobre la que ocurre una helada.

El factor diferencial para poder representar heladas en WRF y mejorar la representación de la temperatura del aire respecto al reanálisis ERA5, fue el escalamiento de los datos con los cuales se construyen las condiciones de frontera e iniciales del modelo. Teniendo en cuenta que con el modelo atmosférico hace un aumento en la escala espacial y temporal

reanálisis (o los datos con que se construyan los forzadores de este), se entiende que los registros de ERA5 pueden ser ajustados con la finalidad de mejorar la representación de variables como la temperatura del aire en Colombia. En este caso se hizo un procedimiento simple para su rectificación, sin embargo, se reconoce que pueden existir mejores métodos para este objetivo, con lo cual un posible trabajo futuro es encontrar aquellas formas óptimas para transformar datos de reanálisis que sirvan para mejorar la precisión de modelaciones atmosféricas en Colombia.

A través de la helada revisada que pudo ser simulada en WRF, se observa que el modelo tiene dificultades para representar enfriamientos o calentamientos muy abruptos de la temperatura del aire, con lo cual, en orden de mejorar la representación de este tipo de fenómenos meteorológicos, se debe revisar el origen de esta dificultad y entender si esta se debe a factores de resolución, de la física del modelo o de los datos con los cuales este es alimentado.

5.2 Aplicaciones en la modelación de heladas radiativas en Colombia

Los análisis sobre el ambiente atmosférico, así como los ejercicios de modelación de heladas llevados a cabo (Anexo B) permiten hacer distintas aseveraciones sobre los trabajos futuros en la modelación de la amenaza de heladas radiativas (además de lo mencionado en la sección anterior) en Colombia:

El ejercicio con modelos de aprendizaje automatizado (IA) indica que estos pueden presentar cierta utilidad en el pronóstico de la ocurrencia de heladas, dado que cuentan con una precisión (proporción de casos pronosticados que son verdaderos) de alrededor del 90%, es decir, que cuando pronostiquen una helada muy seguramente se presentará, no obstante, estos ignoran alrededor del 80 % de eventos reales. Estudiar formas de entrenar mejor estos modelos para evitar su baja exhaustividad en la identificación de estos eventos llevaría a un gran avance en la modelación de heladas, además con un bajo costo computacional.

Se observó que las variables cuyas anomalías negativas se encuentran más asociadas a las heladas son la cobertura de nubes a baja altura (LCC), radiación térmica neta del suelo

(SNR), humedad relativa (HR) y específica (Q), con lo cual su modelación en conjunto con la de la temperatura ayudaría a encontrar ambientes en los cuales la amenaza de heladas es mayor.

En los casos observados el descenso de temperatura hasta el punto de helada no se daba en periodos muy cortos, sino que se daba paulatinamente desde pasadas las 15:00 horas. Una posibilidad para un sistema de alerta de heladas de corto plazo sería revisar desde esta hora del día, el comportamiento del diferencial de temperatura horario y revisar si la pendiente de este presenta valores que son indicadores del aumento en la amenaza de helada.

El hecho de que el ambiente atmosférico asociado a las heladas mostrara influencia de patrones regionales y no solo locales, lleva a pensar en que el objetivo del pronóstico con modelos atmosféricos, no necesariamente se debe dedicar exclusivamente a simular la temperatura del aire, sino también, puede enfocarse en identificar estos patrones meteorológicos sinópticos, los cuales son representados de mejor manera en este tipo de modelos.

Bibliografía

- Albornoz, F. (2017). *Propuesta metodológica para el diseño de un sistema de alerta de heladas en base a datos satelitales, de superficie y modelados*. Universidad Nacional de Córdoba.
- AMS. (s. f.). *Frost - Glossary of Meteorology*. Recuperado 22 de diciembre de 2022, a partir de <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Frost>
- Bonilla, J. E., Ramírez, J., & Ramírez, O. (2006). Metodología para el diseño de un modelo univariado de red neuronal para el pronóstico de la temperatura mínima en la zona de Mosquera (Cundinamarca, Colombia). *Meteorología Colombiana*, 10, 111-120.
- Carvajal, A. F., & Pabón, J. D. (2014). Temperatura de la superficie terrestre en diferentes tipos de cobertura de la Región Andina Colombiana. *Sociedade & Natureza*, 26, 95-112.
- Chaves, B., & Jaramillo, A. (1998). Regionalización de la temperatura del aire en Colombia. *Cenicafé*, 49, 224-230.
- Crimp, S., Bakar, K. S., Kokic, P., Jin, H., Nicholls, N., & Howden, M. (2015). Bayesian space-time model to analyse frost risk for agriculture in Southeast Australia. *International Journal of Climatology*, 35(8), 2092-2108. <https://doi.org/10.1002/joc.4109>
- Cuartas, A., & Poveda, G. (2002). Balance atmosférico de humedad y estimación de la precipitación reciclada en Colombia según el reanálisis NCEP/NCAR. *Meteorología Colombiana*, 5, 57-65.
- Cui, C., Bao, Y., Yuan, C., Li, Z., & Zong, C. (2019). Comparison of the performances between the WRF and WRF-LES models in radiation fog – A case study. *Atmospheric Research*, 226, 76-86.
- DANE. (2020). *ENCUESTA NACIONAL AGROPECUARIA - ENA-2019-II*.
- Ding, L., Noborio, K., & Shibuya, K. (2019). Frost Forecast using Machine Learning-from association to causality. *Procedia Computer Science*, 159, 1001-1010. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.267>

- ECMWF. (s. f.). *ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present*. Recuperado 22 de diciembre de 2022, a partir de <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
- EROS. (2018). *USGS EROS Archive - Digital Elevation - Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30)*. <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-global-30-arc-second-elevation-gtopo30>
- Estévez, J., Gavilán, P., & Giráldez, J. V. (2011). Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations. *Journal of Hydrology*, 402, 144-154.
- FAO. (2010a). El daño producido por las heladas: Fisiología y Temperaturas críticas. *Protección Contra Las Heladas: Fundamentos, Práctica y Economía*, 15(4), 73-98. <http://www.fao.org/docrep/012/y7223s/y7223s00.htm>
- FAO. (2010b). Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía. En *Water Resources* (1.ª ed.).
- García, F., Sostillo, C., Casagrande, G., & Vergara, G. (2015). Caracterización del régimen de heladas en Anguil, provincia de La Pampa (Argentina). *Semiárida*, 25(1), 17-23.
- Gómez Latorre, D. A. (2014). *Caracterización, pronóstico y alternativas de manejo de las heladas en el sistema de producción lechero del valle de Ubaté y Chiquinquirá (Colombia)*. Universidad Nacional de Colombia.
- Gómez-Latorre, D., Araujo-Carrillo, G., Martínez, F. E., Rodríguez Roa, A. O., Estupiñan, J. M., & Deantonio, L. Y. (2021). Análisis de eventos climáticos extremos asociados a excesos de lluvia y heladas meteorológicas en el Altiplano Cundiboyacense de Colombia. *Revista de Climatología*, 21, 112-126.
- IDEAM. (s. f.). *Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos*. Recuperado 22 de diciembre de 2022, a partir de <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- IDEAM. (2012). Actualización Nota Técnica Heladas 2012. *Ideam*, 79. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21147/Documento+FINAL+actualizacion+nota+tecnica+heladas.pdf/e10a0183-62e6-410a-8e96-7e0739f6f06b>
- INIA. (2020). *Heladas. Factores, tendencias y efectos en frutales y vides*. 102.
- Kotikot, S. M., Flores, A., Griffin, R. E., Nyaga, J., Case, J. L., Mugo, R., Sedah, A., Adams, E., Limaye, A., & Irwin, D. E. (2020). Statistical characterization of frost zones: Case of tea freeze damage in the Kenyan highlands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84(August 2019), 101971. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101971>

- Kotikot, S. M., & Onywere, S. M. (2015). Application of GIS and remote sensing techniques in frost risk mapping for mitigating agricultural losses in the Aberdare ecosystem, Kenya. *Geocarto International*, 30, 104-121.
- Mamani, J. (2018). *Caracterización de temperaturas mínimas asociadas a heladas extremos usando WRF, en la parte sur del Perú*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Martínez, F. E., Castillo, L., Rojas, E., Gómez-Latorre, D., & Aguilera, E. (2017). Identificación de áreas de riesgo agroclimático para el sistema de ganadería de leche en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá y Alto Chicamocha. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 173-183.
- Menacho, E., & Dávila, C. (2018). Influencia del Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en la ocurrencia de heladas en el altiplano peruano. *Anales Científicos*, 79(1), 70-80.
- Mercado, F. R., García Fernández, W., & Acebey, J. A. H. (2016). Sistema de inteligencia artificial para la predicción temprana de heladas meteorológicas Artificial intelligence system for early prediction of weather frost. *Acta Nova*, 7(December), 1683-0768.
- MODIS. (s. f.). *MODIS Web*. Recuperado 22 de diciembre de 2022, a partir de <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod11.php>
- NCAR. (s. f.). *Weather Research & Forecasting Model (WRF)*. Recuperado 25 de enero de 2023, a partir de <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>
- NOAA. (s. f.). *NOAA's National Weather Service - Glossary*. Recuperado 22 de diciembre de 2022, a partir de <https://forecast.weather.gov/glossary.php?word=frost>
- Pabón Caicedo, J. D., Eslava Ramírez, J. A., & Gómez Torres, R. E. (2001). Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 4, 47-59.
- Posada Marín, J., Rendón, A., Salazar, J., Mejía, J., & Villegas, J. (2019). WRF downscaling improves ERA-Interim representation of precipitation around a tropical Andean valley during El Niño: implications for GCM-scale simulation of precipitation over complex terrain. *Climate Dynamics*, 52, 3609-3629.
- Pouteau, R., Rambal, S., Ratte, J. P., Gogé, F., Joffre, R., & Winkel, T. (2011). Downscaling MODIS-derived maps using GIS and boosted regression trees: The case of frost occurrence over the arid Andean highlands of Bolivia. *Remote Sensing of Environment*, 115(1), 117-129. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.011>
- Reboredo, B., Arasa, R., & Codina, B. (2015). Evaluating sensitivity to different options and parameterizations of a coupled air quality modelling system over Bogotá, Colombia. Part I: WRF Model configuration. *Open Journal of Air Pollution*, 4, 47-64.

- Rozante, J. R., Gutierrez, E. R., da Silva Dias, P. L., de Almeida Fernandes, A., Alvim, D. S., & Silva, V. M. (2020). Development of an index for frost prediction: Technique and validation. *Meteorological Applications*, 27(1), 1-12. <https://doi.org/10.1002/met.1807>
- Ruiz, J., & Melo, J. (2020). *Modelación numérica de tiempo y clima IDEAM*. <http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.019>
- Torres, E. (2020). Caracterización de las temperaturas extremas del aire para el cultivo de papa en la Sabana de Bogotá. *Repositorio UNAL*, 296. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78279>
- USGS. (2022). *ASTGTM v003*. <https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003/>
- Vallejo Giraldo, L. F. (2014). *Dinámica espacio-temporal de los ríos aéreos en el norte de sur américa y posibles efectos del cambio climático*.
- van Weverberg, K., Vogelmann, A. M., Lin, W., Luke, E. P., Cialella, A., Minnis, P., Khaiyer, M., Boer, E. R., & Jensen, M. P. (2013). The Role of Cloud Microphysics Parameterization in the Simulation of Mesoscale Convective System Clouds and Precipitation in the Tropical Western Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 70(4), 1104-1128. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0104.1>
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. v. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey* (2.^a ed., Vol. 92).

A. Anexo: Metadatos estaciones meteorológicas del IDEAM seleccionadas

Nombre	Altitud	Latitud	Longitud	Municipio	Fecha_inicial	Fecha_final	Conteo_heladas
PARAMO_ALTO [2120500050]	3046	5.158861	-74.043444	Cogua	2018-03-17 17:00:00	2022-02-28 05:00:00	18.0
UNIVERSIDAD_DE_LA_SABANA [2120500135]	2548	4.854750	-74.032669	Chía	2018-10-17 13:00:00	2022-02-28 05:00:00	1.0
LA_COSECHA [21205910]	2600	4.989222	-74.001194	Zipaquirá	2019-07-30 01:00:00	2022-02-28 05:00:00	16.0
VILLA_INES [21205940]	2590	4.834972	-74.383972	Facatativá	2018-03-07 17:00:00	2022-02-28 04:00:00	30.0
HACIENDA_SANTA_ANA [21206790]	2572	5.090500	-73.881250	Nemocón	2005-02-08 02:00:00	2021-06-16 06:00:00	665.0
PARAMO_GUERRERO [21206930]	3257	5.086444	-74.022167	Zipaquirá	2005-01-27 12:00:00	2022-02-28 05:00:00	39.0

TIBAITATA [21206990]	2543	4.6914 17	- 74.209 000	Mosquera (Cundinamarca)	2001-01- 23 09:00:00	2022-04- 01 04:00:00	84.0
NEVADO_DEL_TOLIMA [21215150]	4635	4.6707 78	- 75.327 778	Anzoátegui	2004-03- 09 05:00:00	2022-02- 28 05:00:00	5223.0
EL_DIABLO [22025040]	4100	2.9800 00	- 76.060 000	Páez (Belalcázar)	2005-01- 01 04:00:00	2012-10- 20 23:00:00	30.0
LA_BOYERA [24015110]	2610	5.3038 06	- 73.851 750	Ubaté	2001-06- 28 22:00:00	2022-02- 28 04:00:00	2.0
DUITAMA [2403500041]	2555	5.7875 50	- 73.081 783	Paipa	2017-10- 26 13:00:00	2022-02- 28 05:00:00	23.0
SOTAQUIRÁ [2403500081]	2549	5.7496 61	- 73.234 922	Sotaquirá	2017-10- 25 16:00:00	2022-02- 28 05:00:00	3.0
SIACHOQUE [2403500082]	2779	5.5060 97	- 73.251 053	Siachoque	2017-10- 10 14:00:00	2022-02- 28 04:00:00	94.0
MONGUA [2403500084]	2932	5.7580 19	- 72.794 850	Mongua	2017-12- 15 19:00:00	2022-02- 28 04:00:00	3.0
NEVADO_DEL_COCUY [24035380]	4676	6.5091 11	- 72.314 167	Guicán	2006-12- 03 17:00:00	2022-02- 28 05:00:00	7369.0
PARAMO_ALMORZADERO [24035390]	3600	6.9453 89	- 72.696 333	Cerrito	2001-02- 14 05:00:00	2022-02- 28 04:00:00	280.0
TUNGUAVITA [24035430]	2470	5.7459 17	- 73.116 361	Paipa	2001-02- 16 16:00:00	2022-03- 24 11:00:00	98.0

NEVADO_SANTA_ISABEL [26135320]	4757	4.802611	-75.380472	Villamaria	2001-03-25 02:00:00	2022-02-28 05:00:00	11251.0
LA_LAGUNA_DEL_OTUN [26135330]	3944	4.776361	-75.412500	Pereira	2010-04-13 09:00:00	2021-04-27 17:00:00	647.0
LAS_BRISAS [26155150]	4133	4.934528	-75.350389	Villamaria	2018-09-26 18:00:00	2020-05-07 09:00:00	60.0
PARAMO_CONEJERAS [26155250]	4413	4.829806	-75.375833	Villamaria	2008-05-10 12:00:00	2022-02-28 05:00:00	784.0
SENDERO_LAGUNA_VERDE [26155260]	4329	4.840667	-75.361611	Villamaria	2019-08-02 00:00:00	2022-02-28 04:00:00	129.0
ARAGON [27015320]	2652	6.780000	-75.560000	Santa Rosa De Osos	2002-09-07 01:00:00	2022-02-28 05:00:00	218.0
PNN_CHINGAZA [35025080]	3205	4.661000	-73.827333	La Calera	2003-03-11 03:00:00	2022-02-28 05:00:00	13.0
PARAMO_CHINGAZA [35035130]	3863	4.713667	-73.803250	Guasca	2002-01-12 13:00:00	2022-02-28 05:00:00	22.0
TEATINOS [3507500133]	2740	5.422822	-73.375778	Boyacá	2017-10-11 12:00:00	2022-02-28 04:00:00	23.0
PARAMO_RABANAL [35075080]	3398	5.392389	-73.562778	Ventaquemada	2001-03-09 07:00:00	2022-02-28 04:00:00	119.0
TOQUILLA [35195060]	2950	5.523611	-72.790972	Aquitania	2017-08-19 13:00:00	2022-02-07 22:00:00	1044.0
EL_PORTILLO [3701500117]	3909	7.056497	-72.790292	Silos	2017-07-03 15:00:00	2022-02-28 05:00:00	79.0
BERLIN [37015030]	3316	7.187000	-72.868500	Tona	2001-08-05 14:00:00	2022-02-28 04:00:00	1079.0

AEROPUERTO_SAN_L UIS [52055230]	2961	0.8570 83	- 77.677 750	Aldana	2019-01- 09 00:00:00	2022-02- 28 04:00:00	1.0
------------------------------------	------	--------------	--------------------	--------	----------------------------	----------------------------	-----

B. Anexo: Homogeneización de periodos de revisión de heladas

La revisión de los datos hecha en secciones anteriores permite concluir que la red de estaciones del IDEAM no tiene un periodo de registro homogéneo entre estaciones, esto debido a que, si se revisan los metadatos de estas, se observa que la fecha de su respectiva instalación varía (además de las intermitencias por fallas en los sensores). Si bien varias estaciones tienen datos desde 2005 o 2008, otras apenas cuentan con series de tiempo de 2 o 3 años previos a la fecha de extracción de los datos (finales de 2021).

Construcción y tratamiento del conjunto de datos

Es deseable que el periodo de los datos no tenga diferencias tan grandes, dado que, esto permitiría que las afirmaciones en cuanto al análisis de diferencias en las heladas, inducidas por factores geográficos, tengan una mayor sustentabilidad. Con este objetivo, se piensa en el uso de la base de datos ERA5 (que cuenta con una cobertura temporal idéntica en todos sus puntos) para, a partir de esta y de algún método de clasificación, encontrar posibles eventos de helada en fechas sin datos de las estaciones del IDEAM. Para esto, se debe diseñar un conjunto de datos, probar distintos algoritmos de clasificación para seleccionar el de mejor adaptación a la tarea, optimizar el mismo y evaluar su rendimiento con datos reales. La descripción de cómo se surtieron estos procesos se muestra a continuación.

Para entrenar y validar el algoritmo seleccionado, se debe tener un conjunto de datos objetivo (predictando) y uno de predictores (en inglés se puede conocer como *features*). En este caso, el predictando se crea fácilmente a partir de la temperatura del aire medida por las estaciones del IDEAM, convirtiendo esta variable de continua a binaria y finalmente obteniendo una serie que toma valores de 1 cuando la temperatura es menor o igual a 0 °C (helada) y 0 cuando es mayor (no helada). En cuanto a las variables, se busca que estas

sean lo más cercanas posible a las mediciones in situ tanto espacial como temporalmente, por esto se selecciona solo la base de datos SL de ERA5 que tiene información de variables meteorológicas en superficie. En un principio se hizo uso todas las variables extraídas de esta fuente, aunque estas fueron objeto de cambios (lo cual se explica posteriormente). Además, se crea un conjunto de datos buscando en las mallas de los distintos campos de ERA5 los píxeles más cercanos en distancia euclidiana a las coordenadas reportadas para las ubicaciones de las estaciones del IDEAM. Esto resulta en una serie de tiempo de la cual se seleccionan solo las fechas en las cuales se tiene información de temperatura del aire en las estaciones en tierra. Adicionalmente, cada una de estas variables es estandarizada a excepción de la binaria de ocurrencia de helada, una práctica recomendada al realizar estos ejercicios de clasificación.

Selección algoritmo

Para problemas de clasificación como el presente existen distintos algoritmos útiles. Ante tal variedad, no se encuentra una norma que indique cual de estos se puede ajustar mejor a una tarea específica. Por tal motivo, la selección de un algoritmo de clasificación se debe hacer por medio de un análisis de desempeño, es decir, usar varios de estos de manera básica con el fin de determinar cuál es más preciso con los datos y objetivos que se tienen. Según lo anterior, para la tarea de clasificar heladas, se evalúan los métodos de límites fijos, regresión logística, bosque aleatorio, vecinos más cercanos, árboles de decisión y finalmente redes neuronales. Las métricas para tener en cuenta en la comparación de modelos son explicadas posteriormente. A continuación, se explica brevemente el procedimiento que siguen estos métodos para las tareas de clasificación.

Límites fijos: Con esta clasificación solo se hace uso de la temperatura del aire de ERA5. Se presume que cuando las temperaturas de ERA5 sean bajas se deba a que en esa zona puede haber ocurrido una helada y se espera que exista un límite de temperatura asociado. Para seleccionarlo, se usan dos aproximaciones, una que depende de la distribución de los valores de temperatura de ERA5, seleccionando las colas inferiores de esta, específicamente la del 1 % (más adelante mencionado como 1PERC) y otro que depende de la máxima temperatura registrada en ERA5 cuando la ocurrencia de helada es afirmativa (más adelante referenciado como MAX).

Métodos de aprendizaje automatizado: Los demás métodos mencionados para la clasificación, hacen parte de los modelos de aprendizaje automatizado (también conocido

como *machine learning*). Estos son usados a partir de la librería *scikit-learn* del lenguaje de programación python. Esta es especializada en aplicaciones simples de aprendizaje automatizado, con lo cual se ajusta bastante bien a esta tarea de clasificación. Una breve descripción de cómo estos métodos generan pronósticos se encuentra a continuación:

- **Regresión logística (LOG):** Para una variable binaria como en este caso, esta regresión entrega la probabilidad de pertenencia a las dos clases de salida (helada y no helada). Funciona similar a una regresión lineal, en este caso cambiando la linealidad por la función logaritmo y las variables por las probabilidades de las clases.
- **Vecinos más cercanos (KNN):** busca ajustar áreas en las cuales, por cercanía y densidad de una clase, se tiene una mayor probabilidad de pertenencia a esta misma y menor similitud a las clases contrarias.
- **Árboles de decisión (TRE):** Este método busca, a partir de decisiones simples, separar los datos en las clases. Esta separación se hace buscando que variable y que valor de esta puede separar los datos en dos conjuntos, distintos entre sí, pero muy homogéneos internamente.
- **Bosque aleatorio (RFC):** Es un método que ensambla varios árboles de decisión, para al final de su ajuste hacer una media de la respuesta de los distintos miembros de este ensamble, la cual es tomada como la más acertada.
- **Redes neuronales (MLP):** En este caso, el tipo de redes neuronales usado es el *multi layer perceptron*, que consisten de una capa de entrada que tiene una cantidad de nodos (neuronas) igual a la cantidad de variables predictoras, unas capas de neuronas escondidas que no tienen como tal una variable asociada sino unos pesos, los cuales al final son sumados y usados en una función de activación (exceptuando la capa de salida) para obtener un resultado, que puede ser más o menos cercano a uno de los dos valores de las clases de salida. El ajuste de este modelo se hace revisando el error en cada iteración y modificando los pesos con el fin de reducirlo.

Manejo de los datos de ajuste: En el caso de la clasificación por límites fijos solo se requiere establecer dicho límite y aplicarlo al conjunto de datos. Por otro lado, los métodos de aprendizaje automatizado tienen ciertos requerimientos o buenas prácticas para mejorar su desempeño. Por esto, a las variables predictoras se les aplica un procesamiento

simple, el cual se compone de un filtro de fechas, en el cual se retiran registros de horas después de las 08 y antes de las 18, puesto que no se dan heladas en esta franja horaria y no tiene sentido alimentar con esos datos a los modelos. Posteriormente, se estandarizan las variables predictoras (MN2T, TP, T2DIF, LCC, SNR, U10, V10 y WS10), dado que, la magnitud de estas puede influir en la variabilidad que generan en las salidas, con lo cual la estandarización hace que estas sean más semejantes.

Finalmente, se requiere una división de los datos en entrenamiento y prueba, dado que, unos serán usados para que el modelo aprenda de los datos y el otro para revisar que tan bueno es el ajuste cuando los datos cambian. Para este caso, la proporción usada es un 66.64 % de datos de entrenamiento y 33.33% de prueba. En esta misma fase se hace algo recomendable, lo cual es mezclar el orden de las muestras que se tienen para evitar que el modelo aprenda sobre dependencias temporales.

Evaluación y resultados: Ante tareas de clasificación hay distintas métricas para evaluar el desempeño de un clasificador que, en su mayoría, se basan en estimar cuáles eventos son clasificados correctamente y cuáles no. La tabla B-1 resume algunas de estas métricas, las cuales corresponden a experimentos de clasificación que usan los datos descritos anteriormente y los algoritmos de clasificación con sus opciones base en *scikit-learn*, a excepción de los métodos MAX y 1PERC que no requieren esta librería. Como se puede observar por las siglas que se encuentran en la primera columna, las filas están asociadas a los distintos métodos de clasificación. Por otro lado, las columnas contienen las distintas métricas, las cuales tienen la siguiente interpretación:

- **ACC:** conocida como proporción de aciertos o *accuracy*. Mide la proporción de coincidencias entre los datos reales y pronosticados.
- **PREC:** precisión, mide la proporción entre los verdaderos positivos y la suma de verdaderos positivos y falsos positivos, es decir, mide del total de heladas pronosticadas la proporción de aquellas que son reales.
- **RCLL:** la exhaustividad o *recall*, mide la proporción de verdaderos positivos entre la suma de verdaderos positivos y falsos negativos, es decir, representa la proporción del total de heladas reales que sí fueron pronosticadas por el modelo
- **FI:** esta métrica es calculada a partir de la precisión y la exhaustividad y representa algo similar a un promedio entre las dos métricas.

- **TP:** verdaderos positivos o *true positives*, en este caso representa casos de helada reales que son pronosticados efectivamente.
- **TN:** verdaderos negativos o *true negatives*, es la cantidad de eventos de no helada pronosticados efectivamente.
- **FP:** falsos positivos o *false positives*, son aquellas heladas pronosticadas por el modelo que no ocurrieron en la realidad.
- **FN:** falsos negativos o *false negatives*, son aquellos registros donde el modelo no pronostica helada, pero en la realidad si se dio el evento.
- **FIT_T:** es el tiempo en segundos que toman los modelos en hacer su ajuste. max y 1_perc no cuentan con esta métrica dado que no requieren de ajuste.

Tabla B-1: Métricas de los métodos de clasificación. En las columnas se presentan las métricas correspondientes a cada método de clasificación, los cuales se encuentran en las filas, de arriba hacia abajo, límites fijos de máximo y de percentil (MAX y 1PERC), regresión logística (LOG), árbol de decisión (TRE), vecino más cercano (KNN), bosque aleatorio (RFC) y red neuronal (MLP).

	ACC	PREC	RCLL	F1	TP	TN	FP	FN	FIT_T
MAX	0.04	0.03	1.00	0.06	28672	16204	968565	0	NaN
1PERC	0.97	0.22	0.08	0.12	2281	976906	7863	26391	NaN
LOG	0.97	0.21	0.005	0.01	44	324740	161	9491	0.63
TRE	0.95	0.16	0.16	0.16	1529	316949	7952	8006	8.38
KNN	0.97	0.29	0.06	0.10	598	323452	1449	8937	1.24
RFC	0.97	0.20	0.06	0.09	538	322780	2121	8997	144.89
MLP	0.97	0.47	0.04	0.07	351	324500	401	9184	124.28

Antes de empezar el análisis de las métricas, notar que en la parte de TP, TN, FP Y FN los números de MAX y 1PERC están muy por encima de los demás métodos, esto debido a que en los mencionados no se hizo división de los datos en entrenamiento y prueba, dado que no se debía ajustar ningún modelo.

Las métricas permiten observar varios detalles. En primer lugar, se observa que 1_perc logra una buena precisión comparada con los otros modelos y por un muy bajo costo computacional, sin embargo, tiene deficiencias como la falta de flexibilidad en la clasificación y una pobre capacidad de mejora. TRE logra la mayor cantidad de heladas pronosticadas efectivamente (más TP respecto a los otros modelos), esto con el costo de tener muchas heladas falsas (más FP). MLP logra el menor número de heladas falsas, lo cual es bueno pensando en que este trabajo busca solo analizar heladas reales, sin

embargo, esto también se puede deber a que la cantidad de heladas pronosticadas es muy baja (suma de TP y FP). Visto lo anterior, RFC y KNN se muestran como los métodos más equilibrados según las distintas métricas.

Dado el tiempo de ajuste de RFC, se entiende que es un modelo más complejo, incluso respecto a cualquiera de los clasificadores aquí evaluados, con lo cual se presume que el método tiene un espacio de mejora que puede ser aprovechado para lograr el objetivo de homogeneizar las series de tiempo de heladas con mayor efectividad.

Ajuste modelo seleccionado

El modelo de clasificación RFC aún no presenta unas métricas que sean aceptables para identificar efectivamente eventos de helada y descartar aquellos que no lo sean. Por tal motivo, aún requiere de la manipulación de distintos parámetros en búsqueda de mejorar su desempeño. El enfoque de mejoramiento para este caso está dirigido a los datos que alimentan el modelo y al ajuste de los parámetros propios del algoritmo de bosque aleatorio.

Manipulación de los datos: Para manipular los datos que alimentarán al RFC se usa primero una selección de variables, el cual consiste a grandes rasgos en usar aquellas que influyan en mayor medida en la varianza de las salidas del clasificador. Para esto se usan tres herramientas, análisis de varianza o ANOVA, información mutua (IM) e importancia para el modelo (SFM por *Select From Model*), todas disponibles igualmente en *scikit-learn*. En estas pruebas se buscan 4 variables con los mejores resultados en cada una y posteriormente comparar cuales tienen mayor frecuencia de selección. IM y SFM arrojan conclusiones similares, siendo las variables más importantes LCC, T2DIF, MN2T y V10, lo cual tiene en cierto modo sentido físico, dado que las heladas están asociadas a cielos despejados (LCC), aire con poca humedad (T2DIF), bajas temperaturas (MN2T) y vientos de baja velocidad (V10). Por otro lado, ANOVA resalta como importantes TP, SNR, MN2T y V10.

Se observa que se encuentran discrepancias entre LCC, T2DIF, TP y SNR, para lo cual se revisa la correlación entre variables, dado que, si estas están más relacionadas, es redundante y poco eficiente conservarlas. La prueba muestra que LCC y SNR tienen la mayor correlación (por encima de 0.4, mientras que en las otras no supera los 0.2). Se toma entonces la decisión de conservar SNR, dado que LCC puede ser reemplazada en

cierta forma con la información de TP. Finalmente, se seleccionan 5 variables TP, SNR, T2DIF, MN2T y V10.

Otra modificación a los datos está relacionada con el desbalance de clases, es decir, cuando se está tratando de pronosticar un evento de muy poca frecuencia, por ejemplo, en este caso la proporción de heladas frente a las no heladas es del 2%. El usar los datos crudos, puede llevar a que el modelo aprenda que el evento ocurre pocas veces y no a que entienda cuál combinación de variables está relacionada con las heladas. Ante esto se decide usar el método de reducir la cantidad de no heladas, haciendo una selección aleatoria de estos, hasta que tengan una cantidad similar a la cantidad de heladas (conocido como *random downsampler*).

Ajuste de parámetros: el RFC tiene distintos parámetros que pueden ser variados, por ejemplo, la cantidad de árboles de decisión, el criterio de separación, la máxima cantidad de divisiones permitida, entre otros. No hay una forma fija de determinar los mejores para la tarea específica que se esté desarrollando, por tal motivo, lo que se suele hacer para ajustar estos parámetros es hacer distintas iteraciones con distintas combinaciones de parámetros en el mismo modelo y observar cuál genera mejores resultados.

En este caso solo se itera sobre 2 parámetros, el criterio de división y el número de estimadores. Los criterios de división son *gini*, *entropy* y *log_loss* y el número de estimadores varía entre 100, 200 y 300, con lo cual se tienen 9 casos (distintas combinaciones de los parámetros). La métrica de evaluación para comparar los estimadores es f1, dado que combina la precisión y la exhaustividad, las cuales tenían los peores resultados en la selección del modelo. En general, los resultados fueron similares, rondando alrededor de 0.68, a excepción de los estimadores en los que se usa *log_loss*, en los cuales la métrica es igual a 0. Los dos mejores estimadores fueron aquellos que tenían 300 árboles de decisión y entre estos, aquel que usa *entropy* como división, con un 0.69 de f1.

Resultados

Finalmente, se evalúa el modelo con las mismas métricas usadas en la selección de algoritmos. La tabla B-2, muestra el resumen de estos índices, esta cuenta con dos filas dado que se revisa el comportamiento del modelo cuando las clases de helada y no helada están balanceadas y cuando se usan los datos crudos.

Tabla B-2: Métricas RFC final.

	ACC	PREC	RCLL	F1	TP	TN	FP	FN
Balanceado	0.93	0.90	0.89	0.89	25207	54019	3193	2737
No balanceado	0.87	0.88	0.17	0.29	25239	853663	3165	121239

Las métricas muestran que el mejoramiento del modelo es notable respecto a la etapa de selección del modelo, pero, esto es especialmente notable en el clasificador con los datos balanceados. El índice con peor desempeño cuando los datos están desbalanceados (lo que ocurre en la realidad) es la exhaustividad, lo que indica que del total de eventos reales pocos serán efectivamente pronosticados por el clasificador. Por tal motivo, se concluye que el clasificador no va a lograr cumplir la tarea de homogeneizar los registros de helada, puesto que va a ignorar bastantes registros de helada. Además, se debe denotar que, el conjunto de datos para el clasificador mezcla todos los registros de todas las estaciones del IDEAM, con lo cual, es complejo entender si estas nuevas posibles heladas identificadas, efectivamente estarán ubicadas en aquellas estaciones con escasos datos, con lo cual se pueden tener más heladas, pero en zonas donde actualmente se cuenta con una buena cantidad de eventos a analizar.

ERA5 no logra reproducir de manera eficiente heladas por sus dificultades para representar valores extremos (lo cual sucede en la mayoría de los modelos). No obstante, los experimentos de clasificación permiten observar que, bajo ciertas circunstancias, los valores de las variables atmosféricas representadas por ERA5, especialmente TP, SNR, T2DIF, MN2T y V10, logran ser asociadas a casos de heladas, y a días normales de forma precisa (lo cual indica la precisión de 0.88 en los resultados finales del clasificador).

También se entiende que se mezclaron los datos de todas las estaciones disponibles, con lo cual el modelo puede tener problemas de ajuste al encontrar condiciones diversas en sus datos de entrenamiento. Una mejora sustancial se podría lograr agrupando aquellas estaciones cuyos datos presenten una climatología similar y desarrollando un entrenamiento para cada uno de los casos identificados.

El ejercicio de clasificación deja conclusiones variadas. Si bien se entiende que, para el objetivo específico de extender y homogeneizar registros de heladas, el modelo evaluado no fue efectivo por su baja exhaustividad, si se resalta que la cantidad de eventos falsos es baja y, por lo tanto, se puede tener buena confianza en cuanto a las heladas

identificadas por este. Esto puede indicar que a futuro este método, mejor desarrollado, puede servir incluso en el pronóstico de heladas radiativas.

La forma de uso del RFC se hizo de manera muy simplificada, sin embargo, existen otras librerías como *Tensorflow* o *Pytorch* que permiten una mayor personalización de los parámetros de este y otros algoritmos. No obstante, esto implica un mayor tiempo de dedicación a la optimización de parámetros y manipulación de los datos, lo cual hace que esto se salga del alcance de este trabajo investigativo.

C. Anexo: Evolución del ambiente atmosférico durante heladas radiativas en otras estaciones meteorológicas.

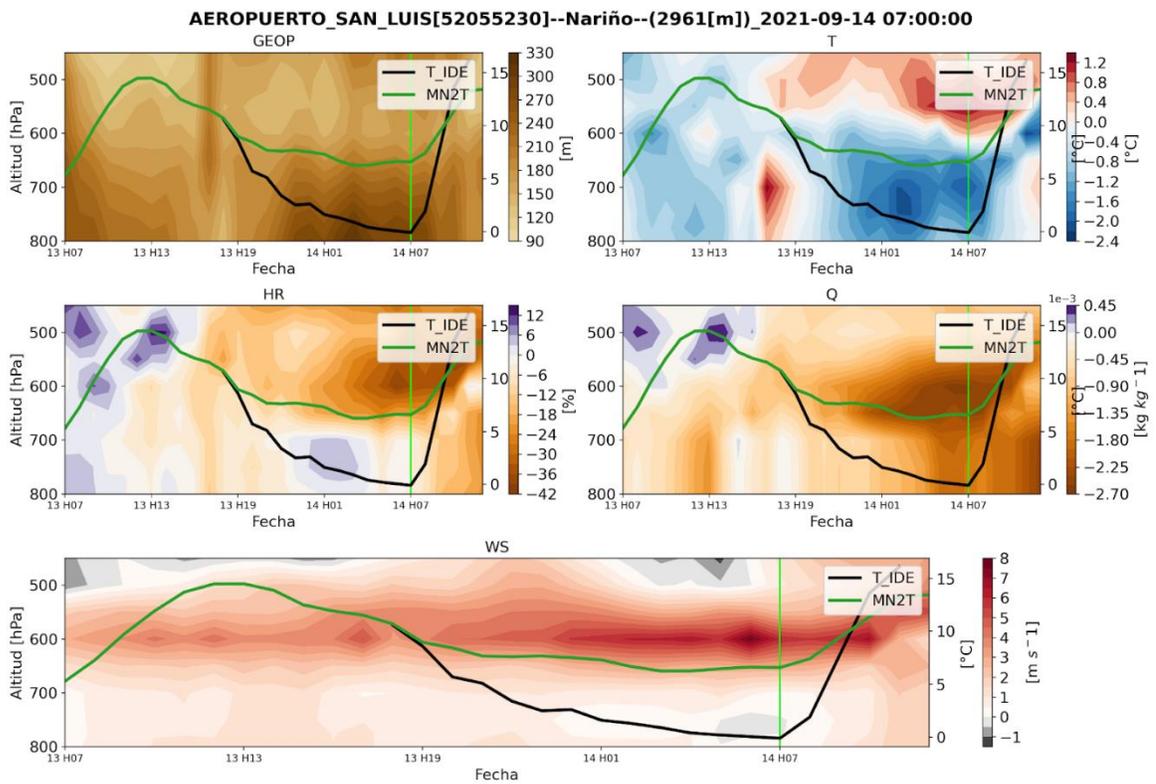


Figura C-1: Similar a **Figura 3-10** para caso de helada en estación Aeropuerto San Luis (Nariño).

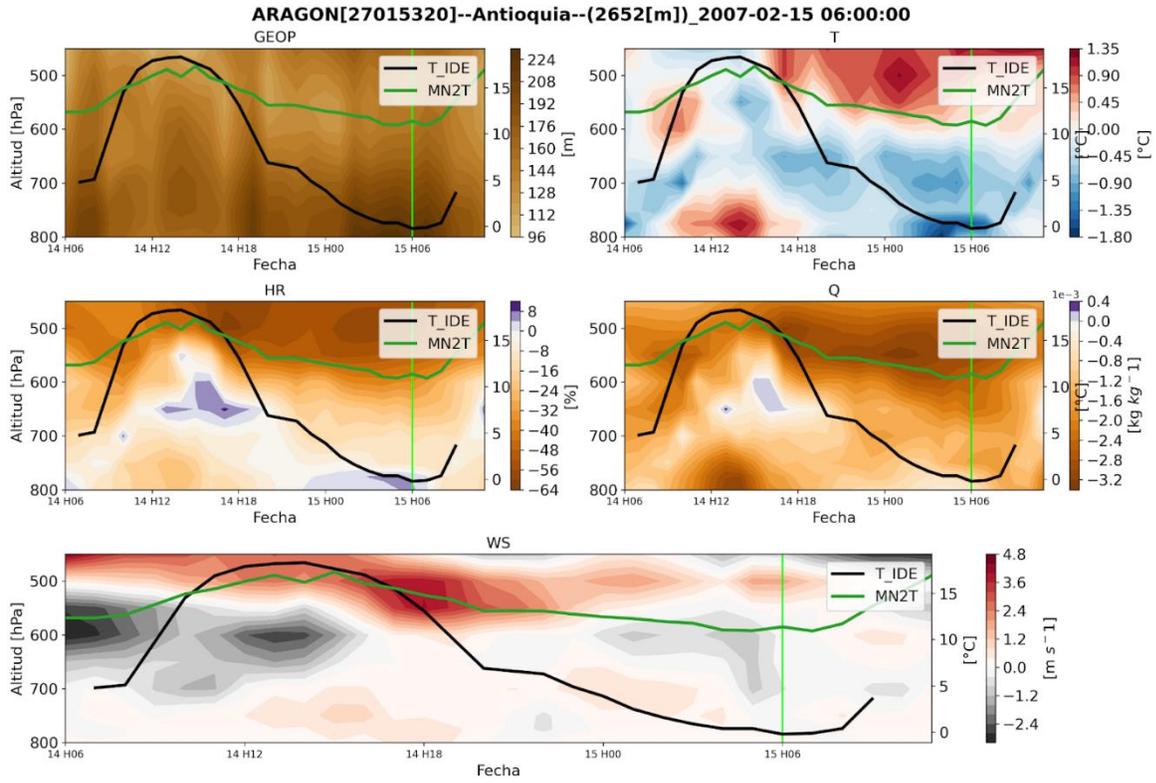


Figura C-2: Similar a Figura 3-10 para caso de helada en estación Aragón (Antioquia).

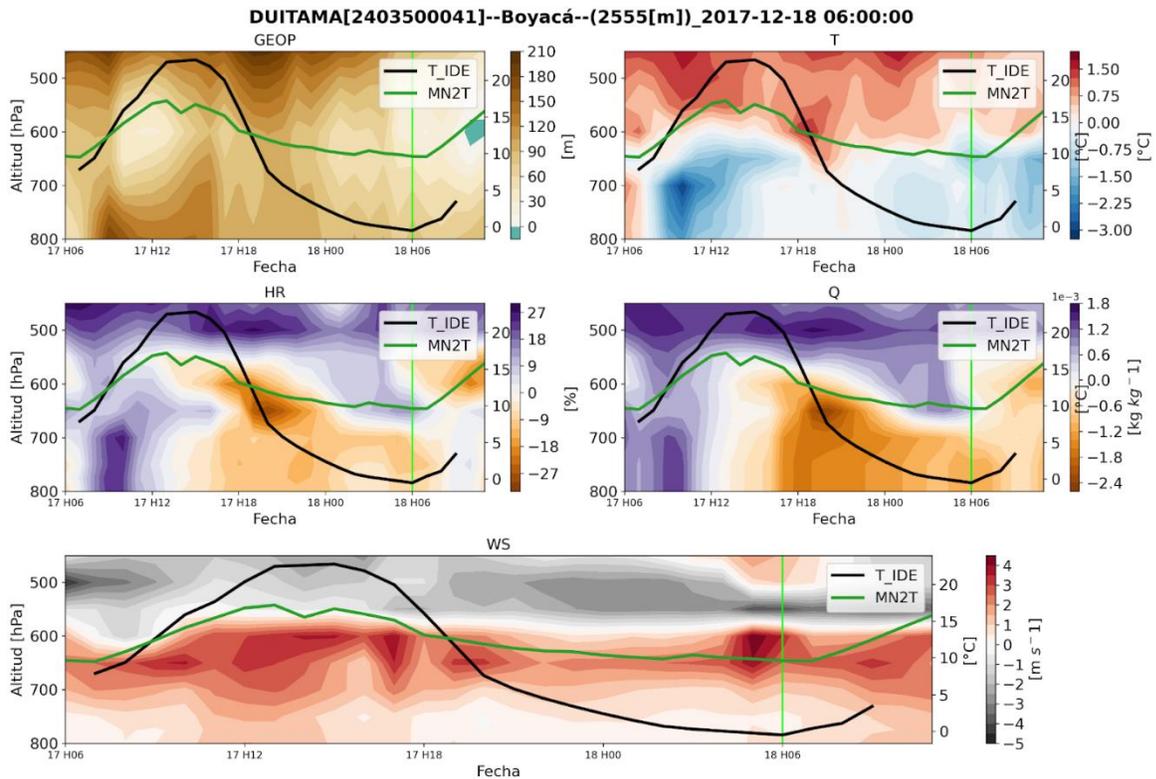


Figura C-3: Similar a **Figura 3-10** para caso de helada en estación Duitama (Boyacá).

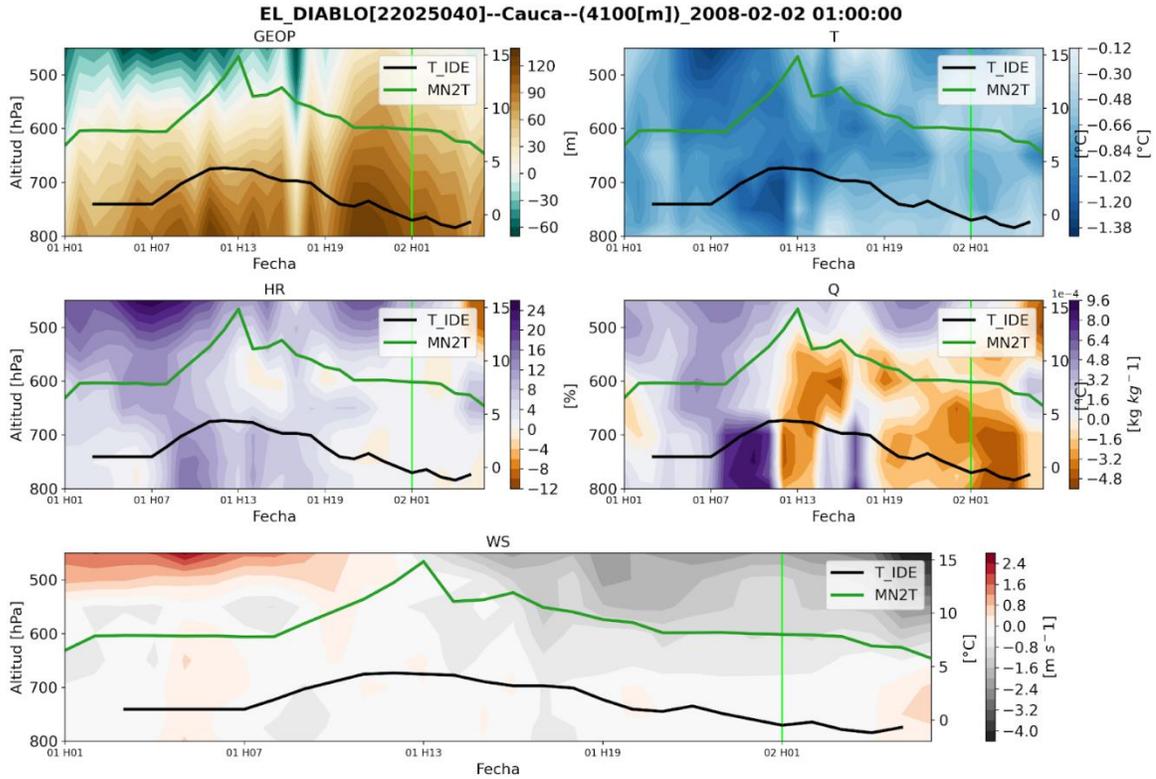


Figura C-4: Similar a **Figura 3-10** para caso de helada en estación El Diablo (Cauca).

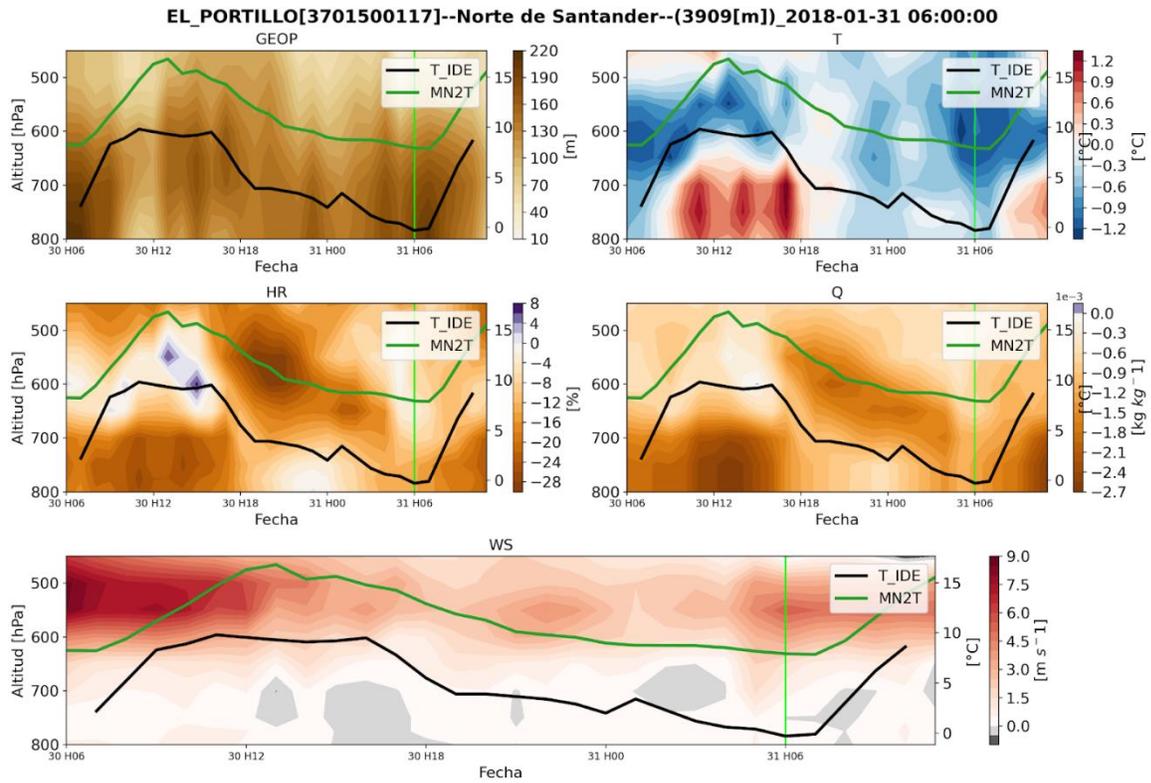


Figura C-5: Similar a **Figura 3-10** para caso de helada en estación El Portillo (Norte de Santander).

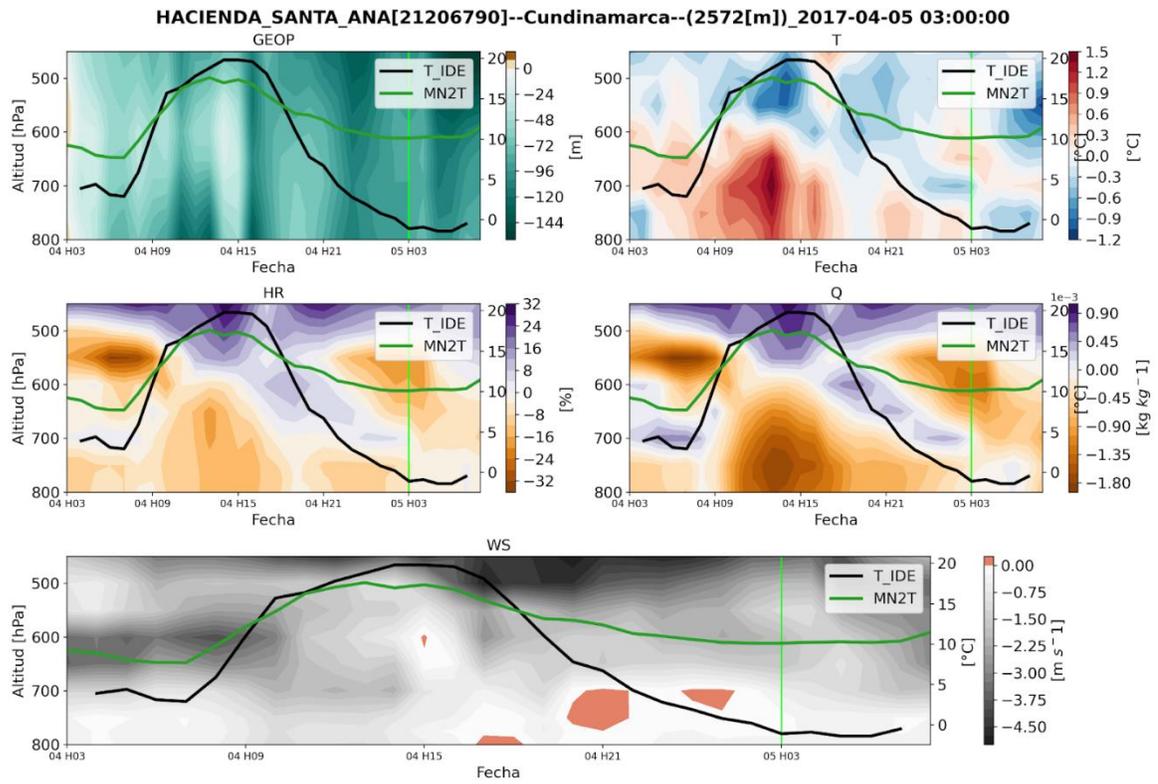


Figura C-6: Similar a **Figura 3-10** para caso de helada en estación Hacienda Santa Ana (Cundinamarca).

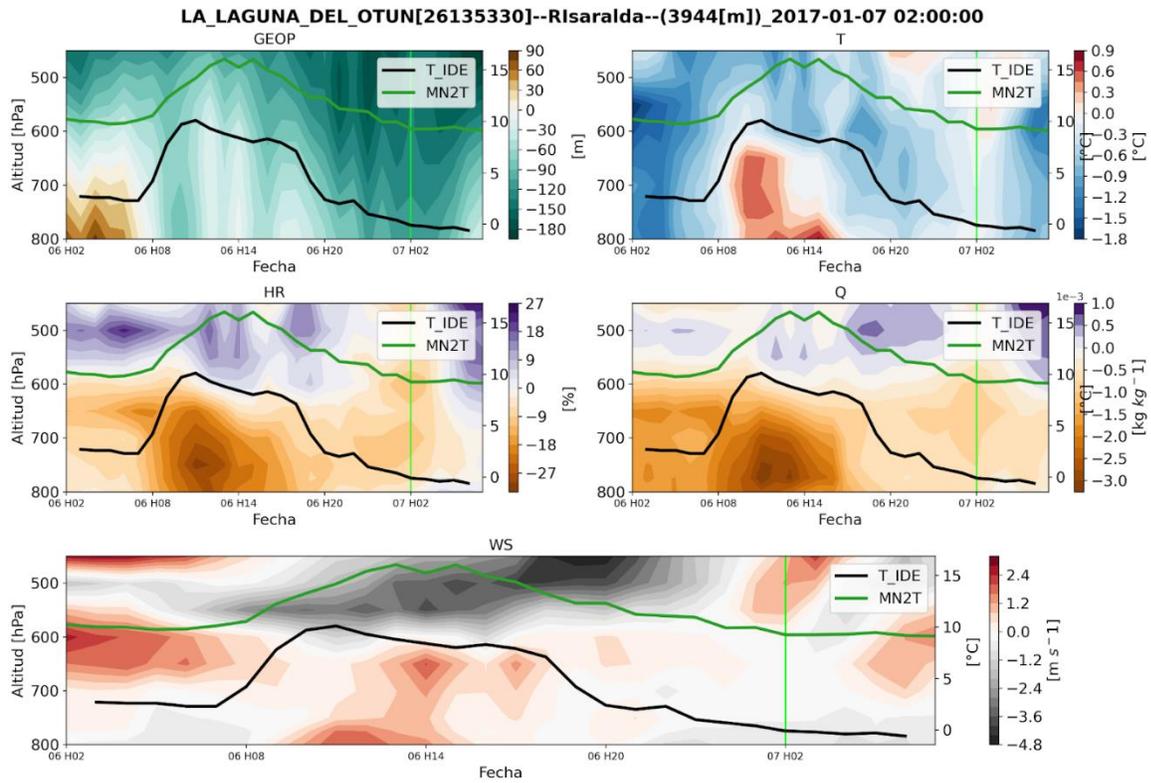


Figura C-7: Similar a **Figura 3-10** para caso de helada en estación La Laguna del Otún (Risaralda).

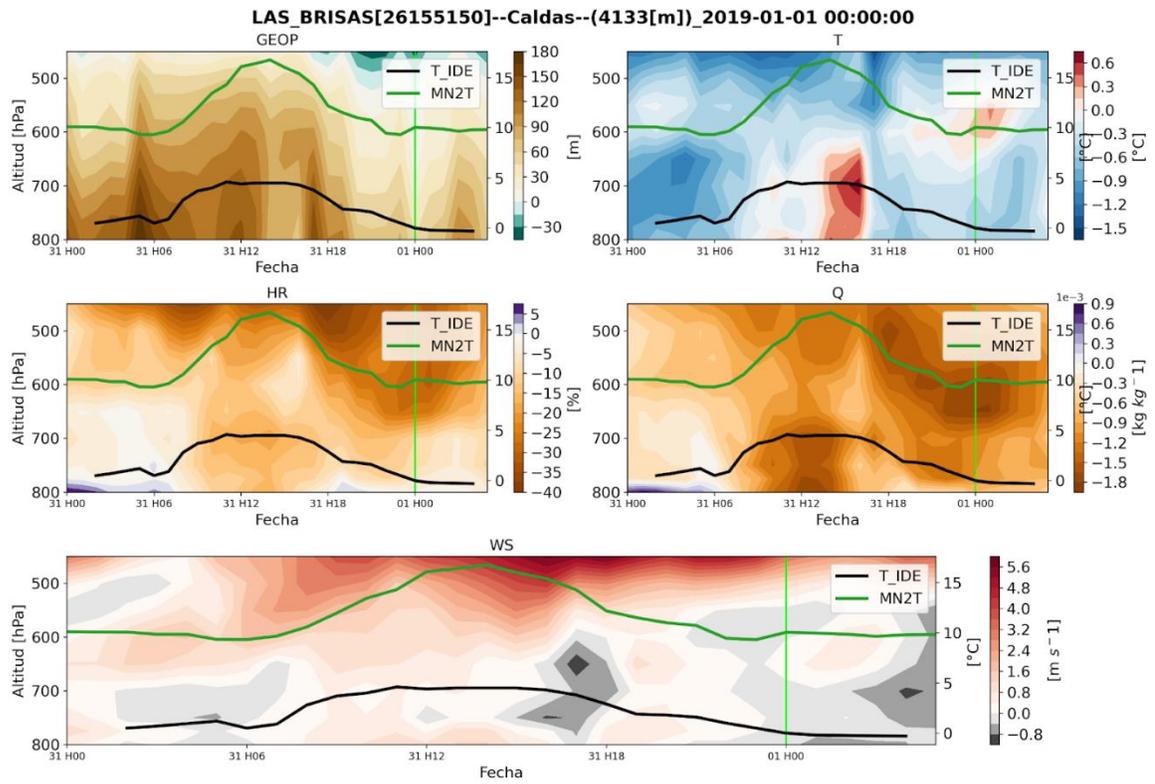


Figura C-8: Similar a Figura 3-10 para caso de helada en estación Las Brisas (Caldas).

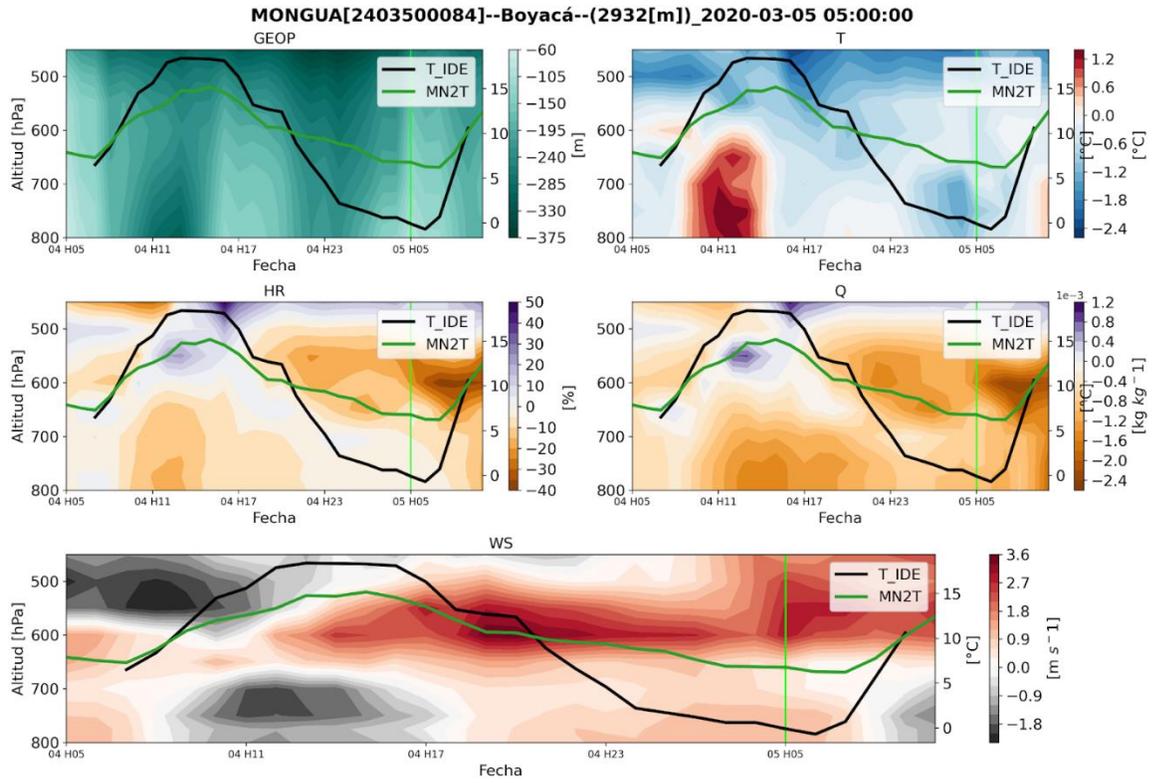


Figura C-9: Similar a Figura 3-10 para caso de helada en estación Mongua (Boyacá).

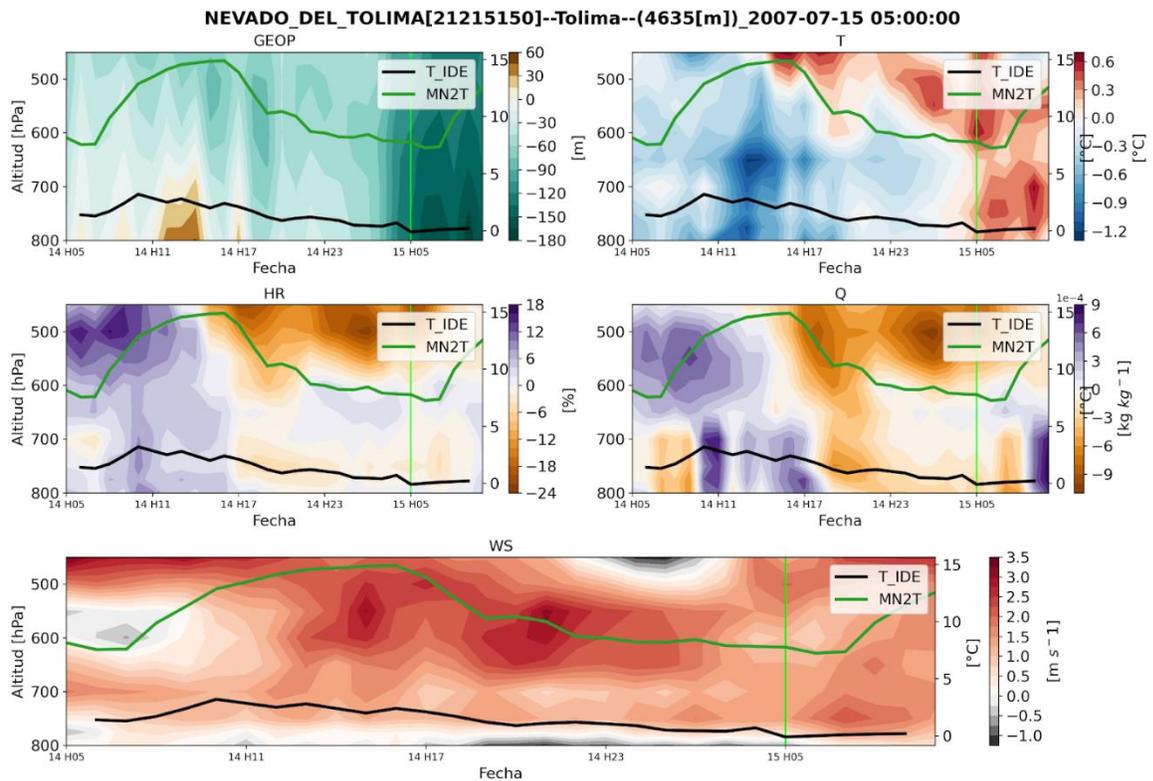


Figura C-10: Similar a **Figura 3-10** para caso de helada en estación Nevado del Tolima (Tolima).

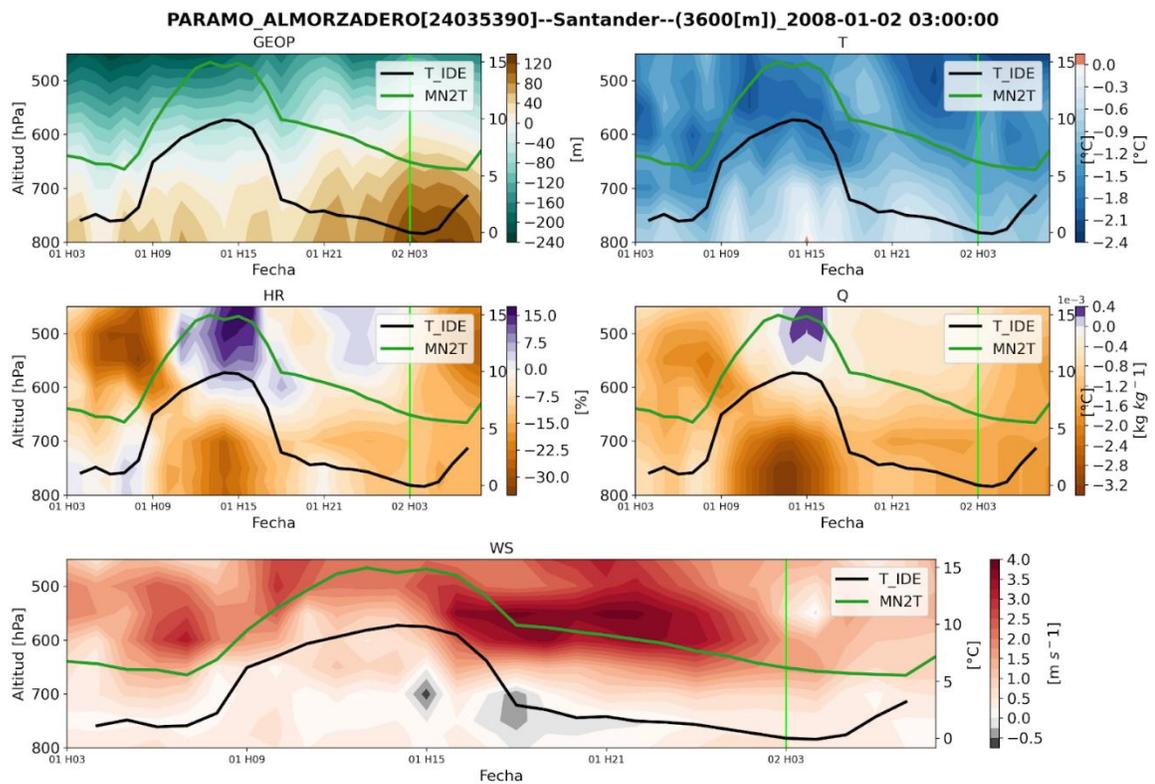


Figura C-11: Similar a **Figura 3-10** para caso de helada en estación Paramo Almorzadero (Santander).

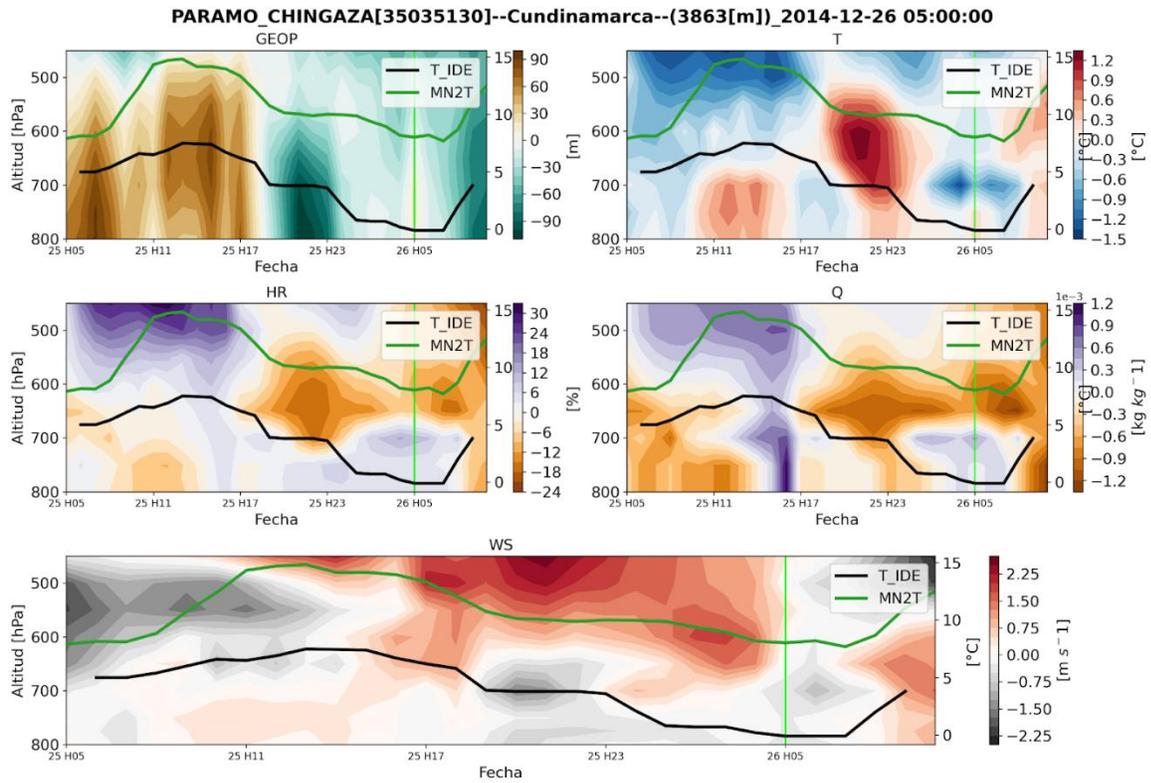


Figura C-12: Similar a **Figura 3-10** para caso de helada en estación Paramo Chingaza (Cundinamarca).

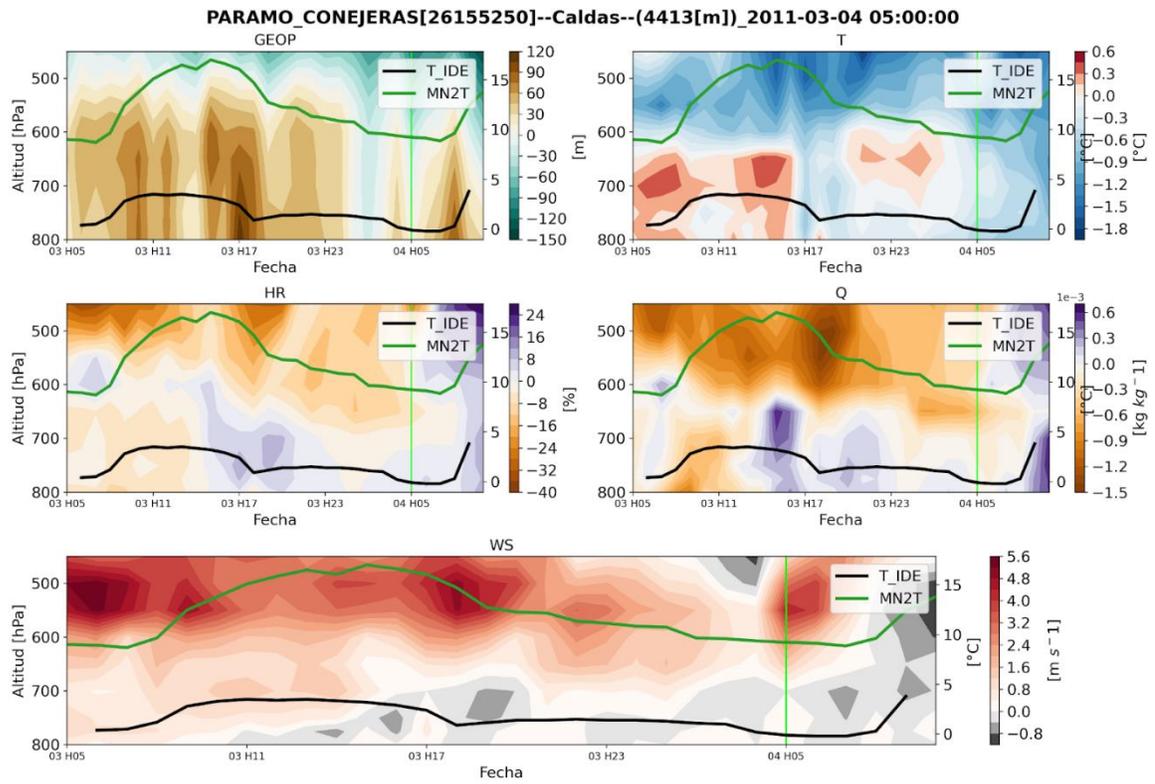


Figura C-13: Similar a **Figura 3-10** para caso de helada en estación Paramo Conejeras (Caldas).

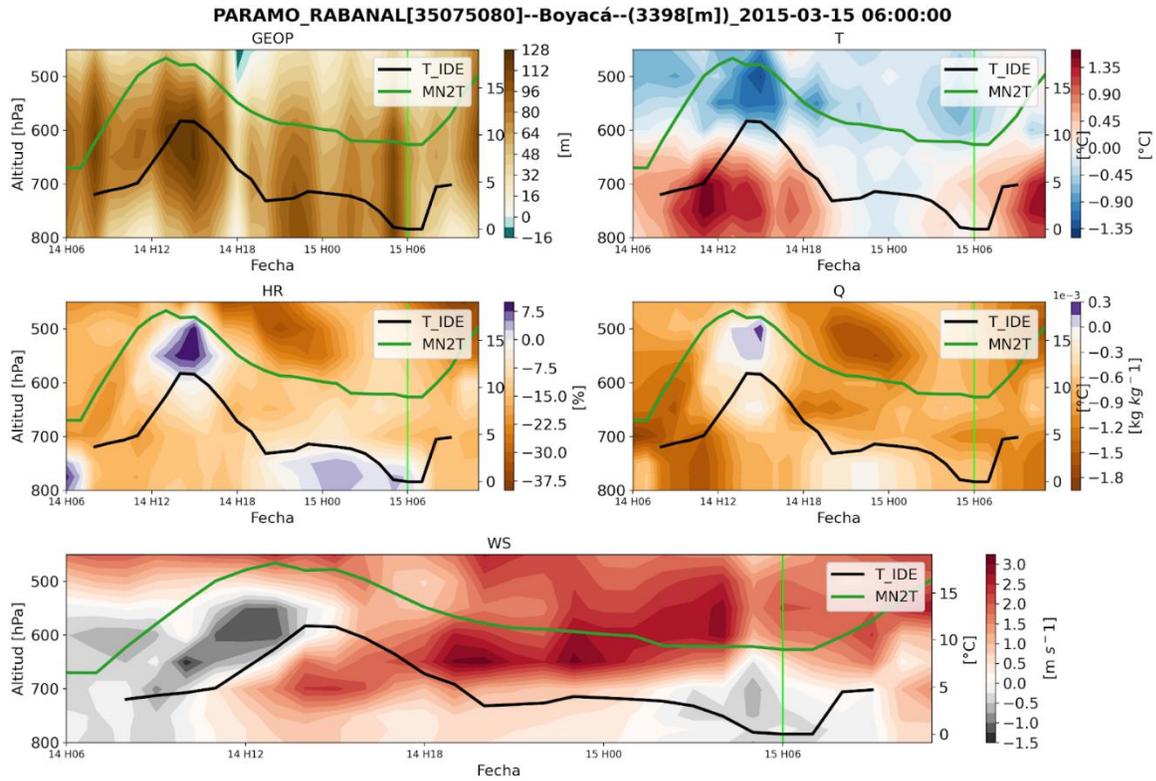


Figura C-14: Similar a **Figura 3-10** para caso de helada en estación Paramo Rabanal (Boyacá)

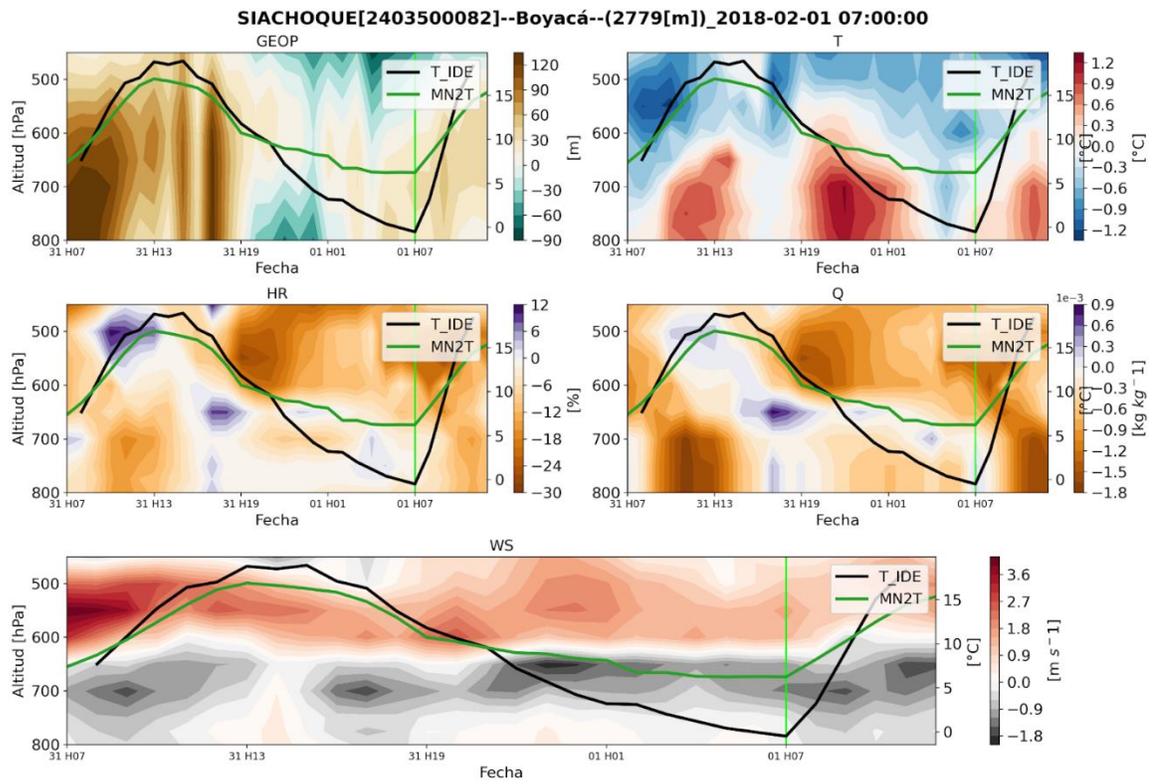


Figura C-15: Similar a Figura 3-10 para caso de helada en estación Siachoque (Boyacá)

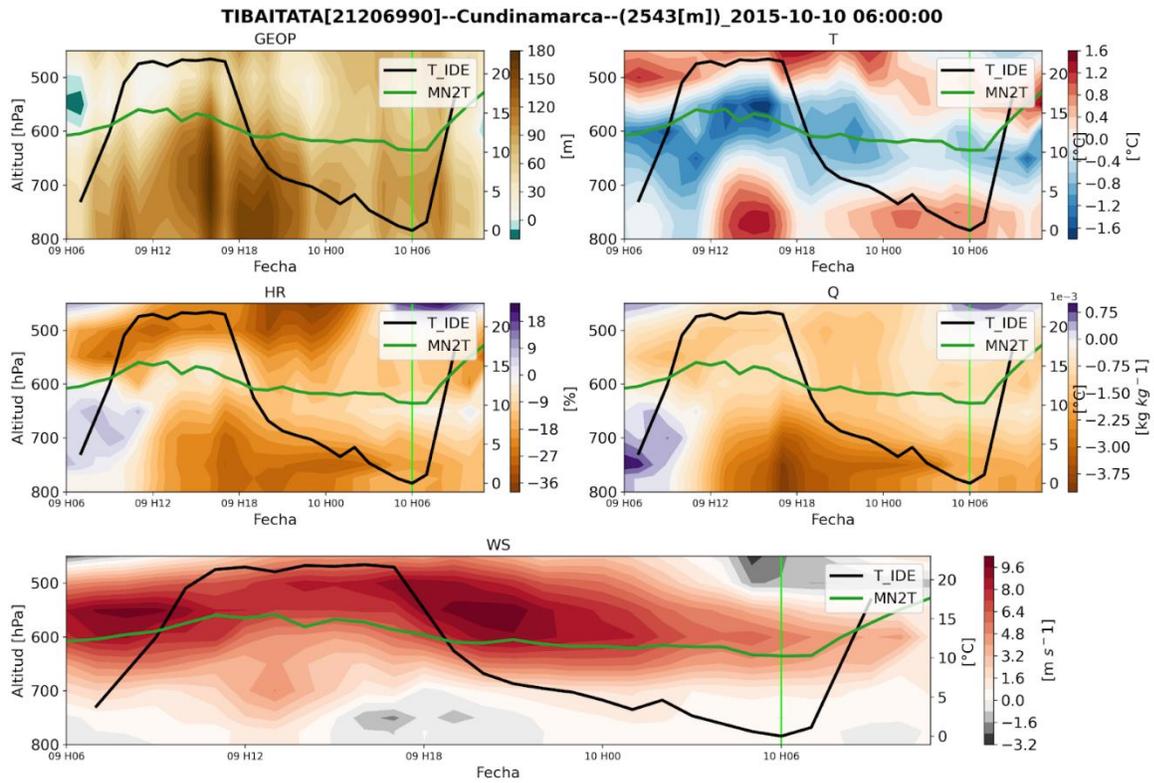


Figura C-16: Similar a **Figura 3-10** para caso de helada en estación Tibaitata (Cundinamarca)

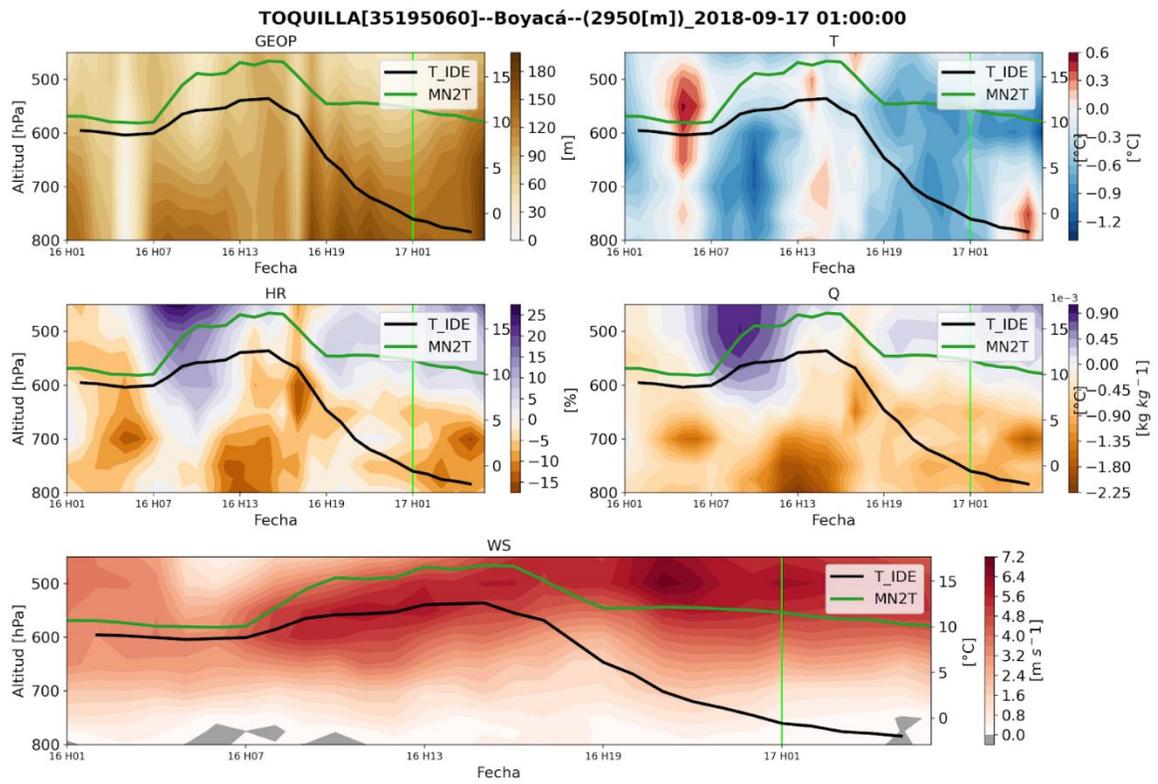


Figura C-17: Similar a **Figura 3-10** para caso de helada en estación Toquilla (Boyacá)