
ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO DE FRECUENCIA DE NEVADAS EN EL PERÚ

PREPARADO POR:

ALIAGA NESTARES, Vannia

GOICOCHEA DÍAZ, Noelia

ITA VARGAS, Tania

QUISPE GUTIÉRREZ, Nelson

Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica

Subdirección de Predicción Meteorológica

SENAMHI-PERU

LIMA, ENERO 2021

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	8
2.1. Nieve	8
2.2. Andes en Sudamérica y en Perú.....	8
2.3. Emergencias por eventos de nevadas en la cordillera de los Andes de Perú.....	11
2.4. Cronología de eventos de nevadas y sus impactos en la última década.....	13
2.5. Avisos Meteorológicos por nevadas.....	16
2.6. Configuraciones sinópticas para la ocurrencia de nevadas	17
2.7. Criósfera en el Perú.....	19
3. OBJETIVOS	19
4. DATOS Y MÉTODOS	20
4.1. DATOS	20
4.1.1. Datos de la red de estaciones meteorológicas de SENAMHI	20
4.1.2. Reanálisis ERA 5 - acumulado de nieve diaria (snowfall).....	21
4.1.3. Reanálisis ERA 5 – Datos en diferentes niveles de presión.....	22
4.2. MÉTODOS	22
4.2.1. Diseño de mapas de frecuencia de nevadas.....	22
4.2.2. Determinación de días con nevadas generalizadas.....	23
4.2.3. Eventos secos y húmedos.....	23
4.2.4. Determinación de los patrones sinópticos	23
4.2.5. Acumulados de nieve promedio	24
5. RESULTADOS.....	25
5.1. Zonas afectadas por nevadas	25
5.2. Mapas de frecuencia de nevadas por meses.....	28
5.3. Días y eventos con nevadas generalizadas	41
5.4. Circulaciones atmosféricas que producen nevadas generalizadas.....	43
5.5. Circulación Atmosférica Promedio – Niveles Altos	45
5.6. Circulación Atmosférica Promedio – Niveles Medios.....	48
5.7. Transporte Vertical de Vapor de Agua Promedio – Niveles Bajos.....	51
5.8. Acumulado de Nieve Promedio en cada Grupo	53

6.	CONCLUSIONES	57
7.	RECOMENDACIONES:	58
8.	AGRADECIMIENTOS	58
9.	GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	60
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	62
11.	ANEXOS.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.- Picos más altos por país de la Cordillera de los Andes.	10
Figura 2.2.- Efectos de las nevadas en diferentes regiones aledañas a la Cordillera de los Andes..	13
Figura 2.3.- Avisos Meteorológicos emitidos por SENAMHI entre el 2015 y 2019.	17
Figura 2.4.- Cartas sinópticas (en nivel de 500 de hPa) mostrando las típicas circulaciones para la ocurrencia de nevadas en Sudamérica en los meses de invierno. Fuente: European Weather Forecast Center, Reading, UK, con permiso del profesor D. Luethi, ETH-Zuerich. Obtenido de: Vuille y Ammann (1997).	18
Figura 4.1.- Relación y distribución de las estaciones convencionales de la red de SENAMHI consideradas para el estudio.	21
Figura 5.1.- Número de días con nevadas en cada estación meteorológica considerada en el estudio. Período 1995 – 2018.	25
Figura 5.2.- Variación mensual del número total de días con nevadas en cada región. Período: 1995-2018.	26
Figura 5.3.- Variación interanual del número total de días con nevadas en cada región.	27
Figura 5.4.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de enero. Período 1995 – 2018..	29
Figura 5.5.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de febrero. Período 1995 – 2018.	30
Figura 5.6.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de marzo. Período 1995 – 2018.	31
Figura 5.7.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de abril. Período 1995 – 2018..	32
Figura 5.8.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de mayo. Período 1995 – 2018..	33
Figura 5.9.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de junio. Período 1995 – 2018..	34
Figura 5.10.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de julio. Período 1995 – 2018.	35
Figura 5.11.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de agosto. Período 1995 – 2018.	36
Figura 5.12.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de septiembre. Período 1995 – 2018.....	37
Figura 5.13.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de octubre. Período 1995 – 2018.	38
Figura 5.14.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de noviembre. Período 1995 – 2018.....	39
Figura 5.15.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de diciembre. Período 1995 – 2018.....	40
Figura 5.16.- Acumulado total mensual (suma general) de los eventos de nevadas generalizadas identificados durante el período 1995 – 2018.	42
Figura 5.17.- Acumulado anual de los eventos de nevadas generalizadas identificados durante el período 1995 – 2018. Tendencia (línea punteada).	43
Figura 5.18.- Composiciones de altura geopotencial (m _{gp} , líneas gruesas), viento (m.s ⁻¹ , vectores) y divergencia en 300 hPa (s ⁻¹ .10 ⁻⁵ , sombreado) para a) Grupo 1 – secos, b) Grupo 2 – secos, c) Grupo 3 – secos, d) Grupo 1 – húmedos, e) Grupo 2 – húmedos.	47

Figura 5.19.- Composiciones de altura geopotencial (m_{gp}, líneas gruesas), viento (m.s⁻¹, vectores) en 500 hPa y relación de mezcla en 550 hPa (g.kg⁻¹, sombreado) para a) Grupo 1 – secos, b) Grupo 2 – secos, c) Grupo 3 – secos, d) Grupo 1 – húmedos, e) Grupo 2 – húmedos..... 50

Figura 5.20.- Composiciones de transporte integrado vertical de vapor de agua entre 1000 y 700 hPa (kg.(m.s)⁻¹, vectores y sombreado) para a) Grupo 1 – secos, b) Grupo 2 – secos, c) Grupo 3 – secos, d) Grupo 1 – húmedos, e) Grupo 2 – húmedos..... 53

Figura 5.21.- Composiciones de nieve acumulada en promedio (cm, sombreado) para a) Grupo 1 – secos, b) Grupo 2 – secos, c) Grupo 3 – secos, d) Grupo 1 – húmedos, e) Grupo 2 – húmedos..... 56

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1.- Información de la Cordillera de los Andes y picos más altos por país.	10
Tabla 2.2.- Número total de emergencias por motivo de nevadas por región desde el 2003 hasta el 2019 (SINPAD – INDECI, 2020).	12
Tabla 5.1.- índice Oceánico del El Niño – ONI. Los años resaltados de amarillo representan a picos mínimos de nevadas y los años resaltados con plomo, a picos máximos de nevadas.	27
Tabla 5.2.- Fechas de nevadas generalizadas en los Andes peruanos.	41
Tabla 5.3.- Clasificación de eventos de nevadas generalizadas en cada grupo.....	44

1. INTRODUCCIÓN

La presencia de nieve en los Andes tropicales es característica debido a la topografía de la región. La nevada es un fenómeno meteorológico, cuya identificación temporal y espacial cobra importancia ya que es el principal recurso de agua dulce para diversas comunidades en regiones de mayores altitudes, así como por su rol importante en el balance energético superficial de la Tierra.

Debido a la presencia de la cordillera de los Andes que permite tener altitudes superiores a 6000 m s.n.m. así como condiciones extremadamente frías, la nieve (*riti* en quechua) en Perú se presenta desde las zonas más altas de la región de Áncash (región centro de Perú) hasta las zonas más altas del extremo sur de Tacna y Puno (región sur de Perú). Asimismo, las extensas áreas por encima de los 4000 m s.n.m. hacen que el Perú sea el país tropical donde se puede presentar una mayor cobertura nival.

La nieve forma parte del sistema hidrológico en las regiones de altitud media y alta, e incluso en paisajes montañosos. La superficie cubierta de nieve influye en el incremento del albedo (aproximadamente el 86%), resultando en el enfriamiento de la superficie de las regiones afectadas. Asimismo, la nieve es también una importante reserva de agua y actúa como amortiguador en el sistema hidrológico que controla la descarga de los ríos y los procesos y peligros ambientales asociados.

En el Perú, las nevadas (precipitación en forma de nieve) de gran extensión y duración, además de intensificar la sensación de frío durante el día, generan pérdidas económicas en las zonas altoandinas y problemas en la agricultura, ganadería, turismo, circulación de vías de comunicación terrestre, vivienda, e incluso, daños en la salud, especialmente en los sectores centro y sur del país. Este tipo de precipitaciones suelen presentarse en localidades por encima de los 3800 m s.n.m.

En ese sentido, el presente trabajo tiene como objetivo principal determinar la distribución espacial y la frecuencia mensual de nevadas en el Perú. Asimismo, establece las circulaciones atmosféricas que favorecen a la ocurrencia de eventos de nevada generalizada, con la finalidad de prevención. Se utilizó información registrada en las

estaciones meteorológicas convencionales durante el periodo 1995-2018, así como reanálisis del ERA5.

Este documento ha sido desarrollado por la Subdirección de Predicción Meteorológica – SPM de la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica – DMA del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI, con la finalidad de brindar información relacionada a las nevadas en el territorio peruano, así como actualizar el **Primer Estudio de la Frecuencia de Nevadas en el Perú** (Bonshoms et al., 2018).

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1.Nieve

Tipo de precipitación de agua en estado sólido que se forma en las nubes con una temperatura del aire por debajo del punto de congelación. Compuesta de cristales de hielo en forma de copos de estructura cristalina, principalmente en forma de estrella o hexagonal de ramas complejas y a menudo aglomerados en copos de nieve, dependiendo de las condiciones de humedad y de temperatura en el ambiente.

La nieve se forma cuando la temperatura es tan baja que los cristales de hielo de las nubes se mantienen en estado sólido hasta llegar a la superficie. Por lo general puede presentarse nieve cuando se produce precipitación y si al momento de la caída, la temperatura del aire es inferior a 2-3°C. Además, el acumulado de nieve sobre la superficie dependerá del tipo de vegetación y si se presenta incremento de viento en la zona.

2.2.Andes en Sudamérica y en Perú

Los Andes son una cadena montañosa importante en el hemisferio sur por su elevación y extensión espacial. Impactan en la circulación atmosférica desde la escala sinóptica hasta la local, generando efecto en el flujo del viento, la temperatura, la presión y la humedad.

Salaverry (2007) indicó que “la cordillera de los Andes corre a partir de los 50°S de sur a norte en la divisoria del territorio de Chile y Argentina y se desvía del sudeste al noreste en el territorio del Perú, a la altura del paralelo 18°S hasta el paralelo 14°S, en donde vuelve a

cambiar de rumbo hacia el nor-noroeste hasta el paralelo 6°S y continúa hacia el noreste hacia Ecuador, Colombia y Venezuela”. Debido a su latitud, longitud, continuidad, elevación y proximidad al océano, los Andes tiene un efecto significativo en la circulación atmosférica, generando variaciones a nivel de mesoescala (escalas horizontales de cientos de kilómetros) y escala sinóptica (miles de kilómetros) por lo que, a su vez, condiciona las condiciones climáticas a lo largo de las laderas (Garreaud, 2009).

La Figura 2.1 muestra la extensión de la Cordillera de los Andes abarcando siete países, desde Venezuela hasta Chile. Asimismo, se observan los picos más altos a lo largo de la cadena montañosa, el más alto es el Aconcagua, ubicado en Argentina, alcanzando 6962 m s.n.m.

En tanto, en la Tabla 2.2 se muestra una breve descripción de los Andes para cada país de Sudamérica, considerando la porción de la cordillera que se encuentra en el Perú, con énfasis en el punto más alto para cada región.

Los Andes del Perú se presentan en 3 cordilleras paralelas, la occidental, central y oriental, las cuales se extienden desde el extremo norte hacia el sureste, hasta el lago Titicaca. La cordillera regula el clima de Perú marcando considerablemente 3 regiones: costa, sierra y selva. El pico más alto de la cordillera en Perú, es el Huascarán, alcanzando 6768 m s.n.m., considerado parte de la Cordillera Blanca (MINAM, 2007).

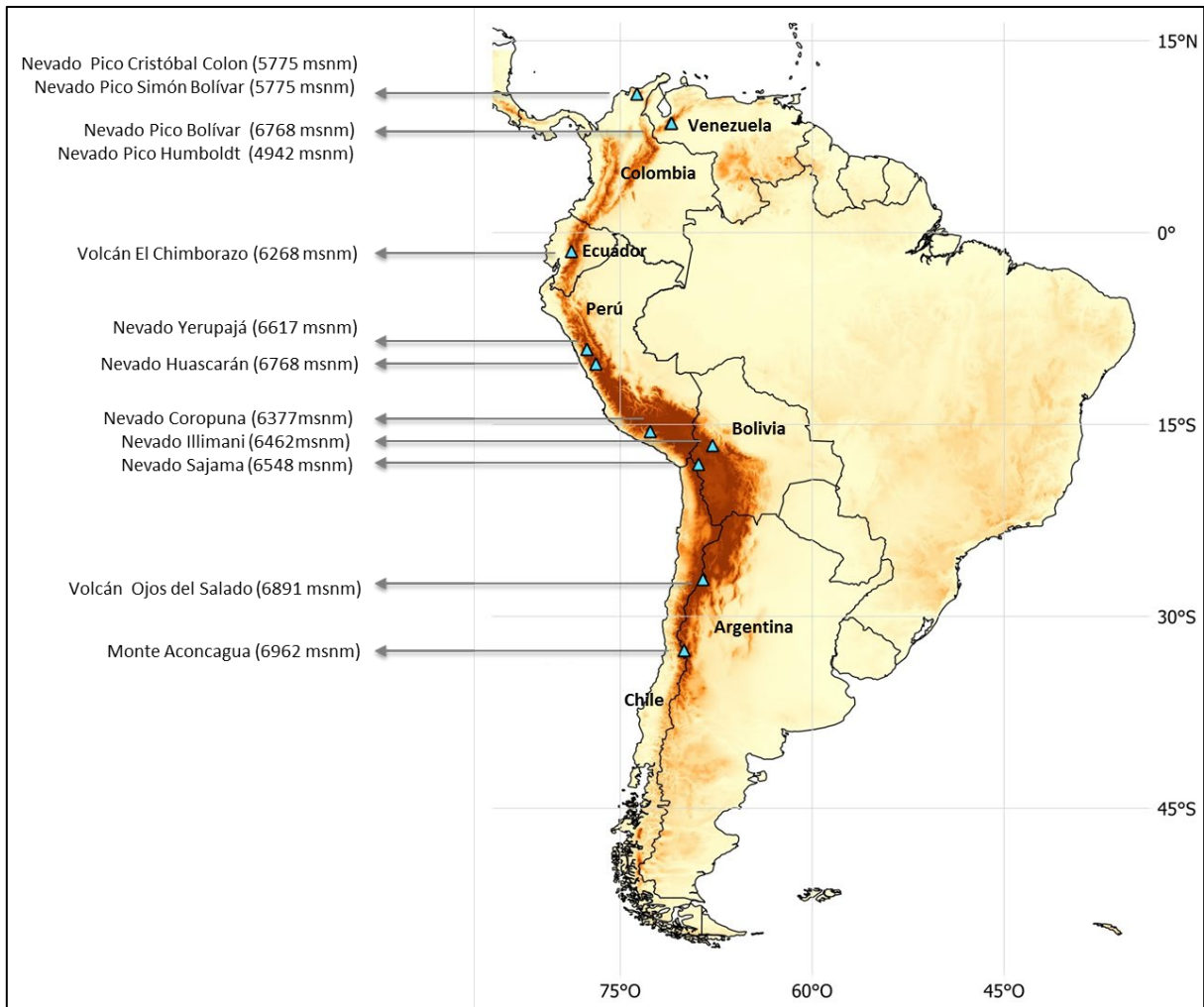


Figura 2.1.- Picos más altos por país de la Cordillera de los Andes.

Tabla 2.1.- Información de la Cordillera de los Andes y picos más altos por país.

País	Cordillera de los Andes	Pico más alto
Venezuela	Representan el 7% de la superficie del país, pero presenta la mayor cantidad de climas debido a las diferencias altitudinales, desde excesivamente húmedos a subhúmedos secos y, de cálidos a gélidos (MARN, 2003).	Nevado Pico Bolívar (4978 m s.n.m.)
Colombia	Los Andes forman en Colombia tres ramales conocidos como Cordillera Oriental con 1500 Km de longitud, Cordillera Central con 850 Km de longitud, y la Cordillera Occidental con 820 Km de longitud (IGAC, 1989).	Nevado Pico Cristóbal Colón y Nevado Pico Simón Bolívar (5775 m s.n.m.)

Ecuador	<p>Los Andes ecuatorianos dividen al país en tres regiones naturales, la región occidental o costa, la región central andina o sierra y la región oriental o amazónica. La región andina ecuatoriana localizada sobre los 1.000 m de altitud cubre aproximadamente un cuarto del país, lo que corresponde a 70.000 km (De la Torre, L. et Al, 2006).</p>	Volcán El Chimborazo (6268 m s.n.m.)
Perú	<p>Los Andes peruanos, por su altitud promedio, 4.000 m.s.n.m., y su orientación constituyen una barrera climática que dificulta la libre circulación de masas de aire tanto en el Pacífico sur, al oeste de la cordillera, como en la Amazonía y el Atlántico sur, al este de los Andes (MINAM, 2007).</p>	Nevado Huascarán (6768 m s.n.m.)
Bolivia	<p>Los Andes bolivianos presentan dos ramales, la cordillera Occidental o región volcánica y la cordillera Oriental, que encierran el altiplano boliviano y vuelven a unirse al sur formando un gran macizo montañoso (Montes de Oca, 1989). El altiplano boliviano ocupa una superficie de 178.662 km² (16.4 % del territorio nacional) (Andressen, L. et AL. 2007).</p>	Nevado Sajama (6548 m s.n.m.)
Chile	<p>En Chile, la Cordillera de los Andes empieza en el altiplano chileno con importantes nevados. Es la segunda más alta del mundo y bordea todo el este de nuestro país, llega al sur y se hunde bajo el Pacífico para luego reaparecer en la Antártica con el nombre de Antartandes.</p>	Volcán Ojos del Salado (6891 m s.n.m.)
Argentina	<p>La cordillera de los Andes argentinos corre de norte a sur a lo largo de todo el límite occidental del territorio, abarcando desde la provincia de Jujuy hasta la Isla Grande de Tierra de Fuego. Sus paisajes varían desde los resecos altiplanos septentrionales hasta los lagos y glaciares del sur (Tierra de vientos, 2011).</p>	Monte Aconcagua (6962 m s.n.m.)

2.3. Emergencias por eventos de nevadas en la cordillera de los Andes de Perú

Según datos del Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación - SINPAD del Instituto nacional de Defensa Civil - INDECI, entre el 2003 y 2019 se han presentado 1245 emergencias (Tabla 2.1) causadas por nevadas en diferentes regiones del país a lo largo de la Cordillera de los Andes (sierra central y sierra sur), observándose el incremento de las emergencias reportadas en las distintas regiones en los últimos años, ocasionando daños o perjuicios económicos en la población vulnerable como viviendas o afectando áreas de cultivos.

Tabla 2.2.- Número total de emergencias por motivo de nevadas por región desde el 2003 hasta el 2019 (SINPAD – INDECI, 2020).

Región	N° de Emergencias por Nevada
Cusco	287
Apurímac	249
Puno	181
Arequipa	173
Ayacucho	127
Huancavelica	98
Moquegua	44
Pasco	25
Tacna	24
Junín	20
Lima	17
Total	1245

La ocurrencia de nevadas en el Perú puede causar riesgos considerables sobre las zonas afectadas, dependiendo de la frecuencia y extensión en las que se presentan, tal como se observa en los registros fotográficos de la prensa y usuarios en general (Figura 2.2).





Figura 2.2.- Efectos de las nevadas en diferentes regiones aledañas a la Cordillera de los Andes.

2.4.Cronología de eventos de nevadas y sus impactos en la última década

2012:

En enero de ese año, por ejemplo, cientos de vehículos quedaron varados en los kilómetros 132 y 140 de la carretera central, producto de nevadas. La larga fila de vehículos llegaba hasta Matucana - Lima. En tanto, en el terminal terrestre de Yerbateros (ruta: Lima – regiones de la sierra centro del Perú) se suspendió la salida de buses por el mismo motivo. En tanto que, en Arequipa se perdió el servicio de electricidad en la provincia de Caylloma debido a la caída de postes y redes de media tensión, afectando a 6500 usuarios.

En octubre de ese mismo año se registraron daños en varias infraestructuras de la localidad de Chaupimarca - Pasco, debido a fuertes nevadas que causaron la declaratoria de

emergencia del lugar, se vieron afectadas iglesias, el coliseo municipal y varias viviendas que quedaron inhabitables.

2013:

En agosto, 10 regiones del país se vieron afectadas por nevadas, afectando a 67691 personas, 6259 viviendas y causando la muerte de 25319 animales de ganadería, además, en la provincia de Carabaya, Puno, se dieron 13000 casos de niños con conjuntivitis a causa de quemaduras causadas por el reflejo del sol por la gran cantidad de nieve acumulada.

En septiembre de ese mismo año los estragos ocasionados por las nevadas continuaron obligando a la declaratoria de emergencia en 250 distritos y provincias altoandinas de las regiones Lima, Junín, Ayacucho, Huancavelica, Apurímac, Cusco, Arequipa, Puno, Moquegua y Tacna.

2015:

En febrero, las intensas nevadas obligaron a cerrar temporalmente la carretera central y el terminal Yerbateros en Lima. En julio del mismo año el centro poblado de Ccalaccapcha, perteneciente al distrito de Oyolo, provincia de Páucar del Sara Sara (Ayacucho), soportó una intensa nevada que cubrió totalmente el poblado. En varios puntos la nieve alcanzó aproximadamente un metro de altura. La nevada cubrió todos los pastizales y provocó la muerte de alpacas, vicuñas y llamas y dejó aislado a los 700 habitantes debido a la caída de nieve que cubrió las carreteras.

En agosto, por otro lado, las intensas nevadas que cayeron en varias regiones del sur del país afectaron el tránsito en las carreteras. En Huancavelica este fenómeno afectó gran parte de las carreteras que unen las provincias de Huaytará y Castrovirreyna, se informó que la nieve cubrió toda la vía afectando a los transportistas que circulan por allí y a la población de varios anexos. Para las mismas fechas en cusco las intensas nevadas y lluvias obstaculizaron el tránsito vehicular y provocaron la cancelación de vuelos a la ciudad de Cusco.

2017:

En marzo, decenas de vehículos se quedaron varados en la vía Cusco -Arequipa, en el sector de Negromayo, distrito de Condorama, debido a las nevadas que se registraron desde las primeras horas de la madrugada, en los distritos de Kunturkanki y Layo, en la provincia de Canas, ubicada a más de 4000 m s.n.m., en la región Cusco. Asimismo, por causa del fenómeno natural, los cultivos de haba, papa, cebada en las chacras, fueron afectadas.

En mayo de ese mismo año, fuertes nevadas en el sur del país causaron estragos en distintas regiones. En Puno, los pobladores de zonas altas de Lampa informaron que la nieve llegó a una altura de 20 centímetros, afectando los pastizales que son principal alimento de las alpacas.

En Tacna, los colegios más afectados fueron los de Tarata y Candarave, donde el techo del patio cedió debido al peso de la nieve acumulada. El colegio José A. Encinas, del distrito de Huaytire de la misma provincia, también fue afectado. El patio y techos terminaron cubiertos de nieve, impidiendo el desarrollo de clases. Mientras, en septiembre de ese mismo año, los habitantes de siete distritos de la provincia arequipeña de Caylloma fueron afectados por nevadas inusuales que se extendieron por 6 horas, cubriendo pastizales y caminos. El evento se presentó en zonas ubicadas a 4200 m.s.n.m., donde las 2500 familias viven en cabañas y casas precarias de barro y paja; dedicadas a la crianza de 400000 cabezas de camélidos sudamericanos, de acuerdo al reporte de evaluación preliminar de daños. Por otro lado, en la zona de Imata, jurisdicción del distrito de San Antonio de Chuca en Caylloma - Arequipa, se reportó la caída de nieve de hasta 3 centímetros de espesor.

2018

En enero se registró nevada acompañada de lluvia en la carretera central en la zona de Ticlio de la región de Lima y también en Cerro de Pasco se registró nieve cubriendo vías y carreteras, lo que originó que los vehículos disminuyan su velocidad y algunos accidentes, asimismo, también se presentaron nevadas en la sierra sur (Arequipa y Puno) afectando carreteras.

Durante el mes de junio, se presentó intensa nevada en las zonas altas de las regiones de Cusco, Puno y Apurímac, en zonas por encima de los 3800 m s.n.m, presentándose casos de hasta 40 cm de espesor de nieve en Puno.

En julio se presentaron nevadas generalizadas en la sierra sur, en las regiones de Tacna y Arequipa. Además, se registraron en algunas provincias de la región de Puno alcanzando hasta 23 cm de nieve acumulada en algunos distritos cubriendo tramos la carretera Juliaca - Arequipa, afectando las zonas altas como en la provincia de El Collao y dañando infraestructura de colegios ocasionando la suspensión de labores escolares. También, en la región Cusco se registraron intensas nevadas siendo las más afectadas las provincias de: Calca, Espinar y Condoroma, restringiendo el pase vehicular a la provincia de Quillabamba y Madre de Dios.

En el mes de agosto de ese año, se registraron intensas nevadas de hasta 50 cm en las provincias altas de Cusco, de acuerdo al reporte de la oficina de Gestión de Riesgos y Seguridad del Gobierno Regional en las provincias ubicadas por encima de los 3800 m s.n.m., así como en la provincia de Espinar y también en la montaña de Siete Colores. Igualmente, en la zona de Puno y Arequipa se presentaron nevadas. Ocasionando la interrupción de las carreteras entre Cusco y Arequipa.

2019

En junio de ese año se registró intensa nieve en zonas altas de las regiones de Arequipa, Cusco y Puno cubriendo las carreteras en esas regiones.

A mediados de octubre, se reportaron lluvias y nevadas en Cusco generando accidentes e interrupción en la carretera. A finales del mes, se registró caída de nieve en la Carretera Central por lo que hubo tráfico vehicular. Mientras que, en noviembre, se registró caída de nieve en la carretera central durante varias horas a la altura de la zona de Ticlio (región Lima) provocando el acceso restringido en el tránsito vehicular.

2.5.Avisos Meteorológicos por nevadas

Las nevadas representan un fenómeno meteorológico que, dependiendo de su extensión e intensidad, generan diferentes niveles de peligro en la población. Por ello, el SENAMHI emite avisos meteorológicos para este fenómeno y otros. Es así que, entre el 2015 y 2019 se emitieron 29 avisos por nevadas y 159 por precipitaciones (los cuales pueden considerarse lluvia y nevada a la vez), representando un total de 5% y 24%, respectivamente (Figura

2.3), es decir que casi un 30% de los avisos emitidos en los últimos 5 años consideraron la ocurrencia de nevadas.

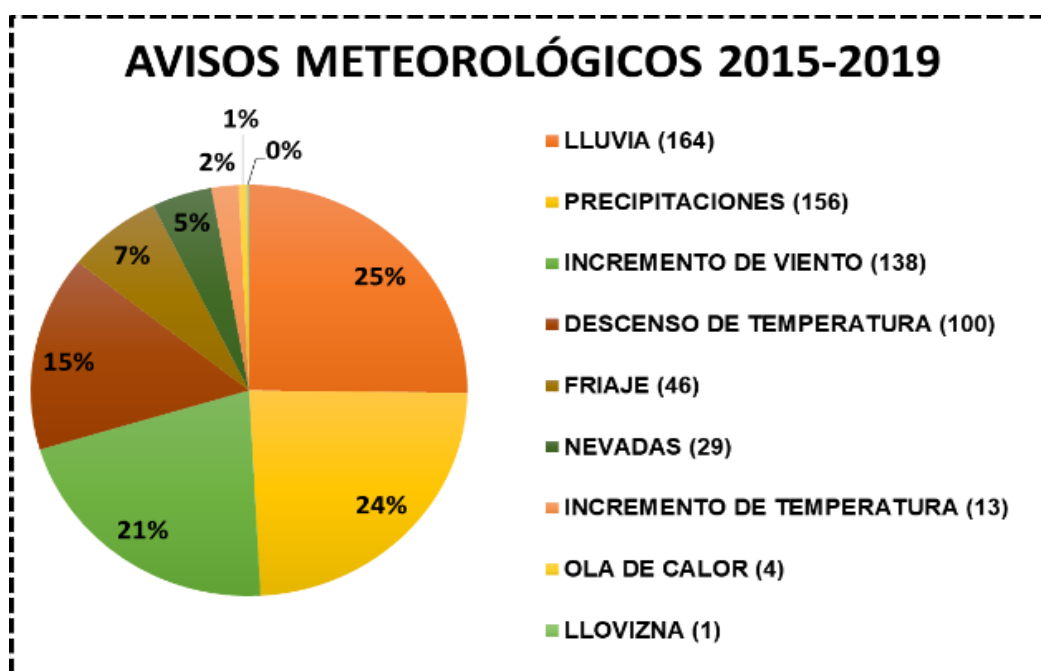


Figura 2.3.- Avisos Meteorológicos emitidos por SENAMHI entre el 2015 y 2019.

2.6. Configuraciones sinópticas para la ocurrencia de nevadas

La Cordillera de los Andes tiene un efecto importante en la circulación atmosférica, puesto que modifica el patrón de vientos al este y oeste de esta. Durante la temporada de precipitaciones en los meses de verano (diciembre, enero y febrero), los patrones fundamentales que predominan son: la Alta de Bolivia (AB), la cual se establece en alta atmósfera (~12km) favorecido por el calentamiento diurno sobre la zona del altiplano, permitiendo el ingreso de flujos del este desde la Amazonía hacia los Andes, generando cobertura nubosa e induciendo a la convección; la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) cuya posición está más hacia el sur (entre los 0 y 5°S) durante el verano e inicios del otoño austral, y el Jet de Bajos Niveles (LLJ, por sus siglas en inglés) que se desplaza en niveles inferiores (~1km sobre la superficie) transportando humedad hacia la ladera oriental de los Andes (Garreaud, 2000; Lenters, 1999), favoreciendo precipitación en los Andes peruanos.

Quispe (2014) manifiesta que otra configuración importante está relacionada a la interacción de humedad e ingreso de aire frío y seco proveniente de latitudes medias hacia regiones tropicales, lo cual conlleva a la frontogénesis (formación o intensificación de un frente) tropical y posteriormente la ocurrencia de nevadas intensas en zonas altas (sobre los 3800 m s.n.m.) de la región sur del Perú.

Mientras que en el invierno (junio, julio y agosto), la circulación atmosférica principal está caracterizada por el flujo de viento seco proveniente del Pacífico, la ocurrencia de frentes fríos desde latitudes medias, así como la ocurrencia de Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANA) o también llamadas bajas segregadas (*cut off low*), la cual genera incremento de vientos, así como disminución de temperatura y, por ende, ocurrencia de nevadas (Quispe y Avalos, 2006; Ramos et al., 2019 en Blunden and Arndt, 2019). Vuille y Ammann (1997) identificaron dos patrones principales de circulación atmosférica en 500 hPa que generan nevadas en Sudamérica. El primer patrón está relacionado a la ocurrencia de un frente frío que ingresa hacia el norte (Figura 2.4, izquierda), y el segundo patrón está relacionado a la presencia de una baja segregada (Figura 2.4, derecha).

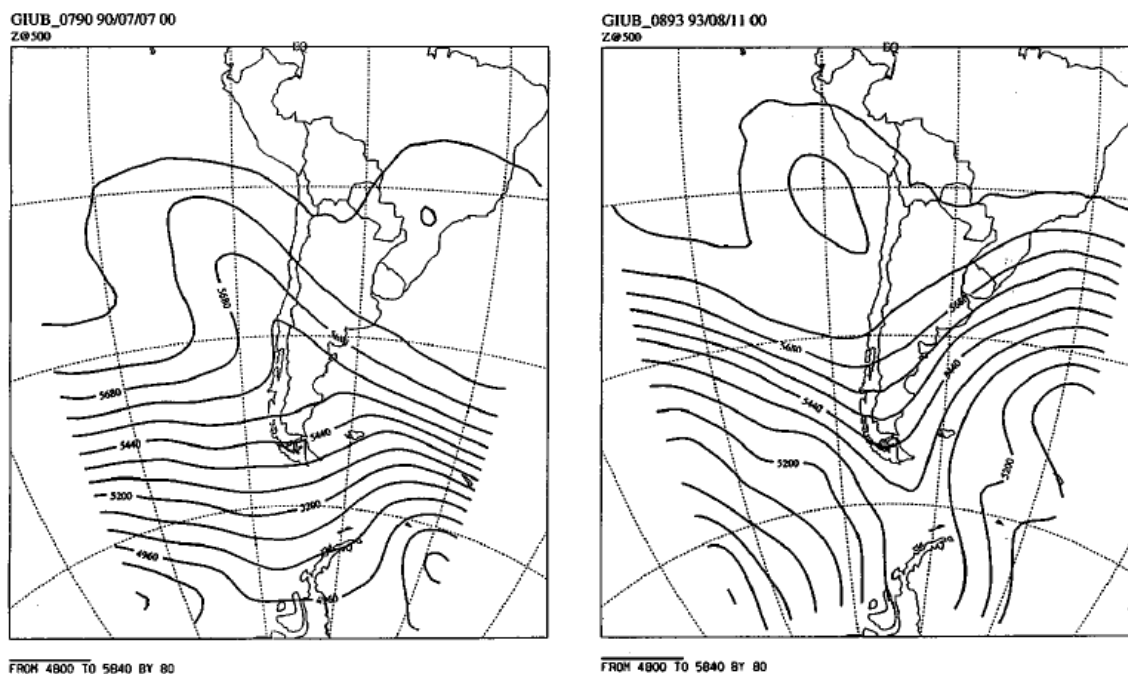


Figura 2.4.- Cartas sinópticas (en nivel de 500 de hPa) mostrando las típicas circulaciones para la ocurrencia de nevadas en Sudamérica en los meses de invierno. Fuente: European Weather Forecast Center, Reading, UK, con permiso del profesor D. Luethi, ETH-Zuerich. Obtenido de: Vuille y Ammann (1997).

Zamuriano et al. (2019) realizó un estudio de un evento de nevada analizando su configuración sinóptica y de mesoescala para el Altiplano Boliviano en agosto de 2013, en el cual concluyó que la presencia de una baja segregada ocasionó que ese sea un invierno particularmente frío, además que indicó que la caída de nieve extrema es considerada uno de los fenómenos meteorológicos más peligrosos en la región.

2.7. Criósfera en el Perú

Saavedra et. al (2018) indica que la capa de nieve tiene una variabilidad estacional mínima en los trópicos entre 8°S y 14°S, pero alcanza su punto máximo en el mes de marzo, finalizando el periodo de precipitaciones más intensas entre 14°S y 23°S. También indica que el aumento de la temperatura causa disminución en la capa de nieve posiblemente al elevar la isoterma de 0°C en las regiones montañosas.

Por otro lado, Cordero et. al (2019) indica que se observa una tendencia decreciente en la extensión de la capa de nieve durante la estación seca, entre los factores principales, por los cambios en El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) para las latitudes menores a 34°S.

Saavedra et al (2018) realizó un estudio usando imágenes MODIS para evaluar los cambios en la capa de nieve de los Andes en el periodo 2000 – 2016, entre los 8°S y los 36°S, debido a la alta frecuencia de nubosidad, entre sus principales objetivos, fue cuantificar los cambios en la cobertura de nieve con los patrones asociados con la latitud y elevación en los Andes y evaluar cómo estos cambios en la capa de nieve se relacionan con variables climáticas. En dicho estudio, calcula la Persistencia de Nieve (SP) como la fracción de tiempo con cobertura de nieve para cada año, determinándose la cota de nieve como aquella altitud en la cual la SP es superior al 20%, y para Perú la ubica por encima de los 5000 m s.n.m en su estudio de “Climatología de los Andes usando cobertura de nieve de MODIS” (2016). Sin embargo, en muchas ocasiones la nieve se presenta a altitudes menores, pudiéndose registrar en casos excepcionales en altitudes desde 3400 m s.n.m.

3. OBJETIVOS

- 3.1. Realizar un análisis de frecuencia de nevadas para el territorio nacional en el periodo 1995-2018.
- 3.2. Actualizar los mapas mensuales de la frecuencia promedio de nevadas en el Perú en el periodo 1995-2018.
- 3.3. Identificar los principales patrones sinópticos de circulaciones atmosféricas promedio que favorecen la ocurrencia de nevadas generalizadas en el Perú.
- 3.4. Analizar la distribución espacial del acumulado de nieve promedio en cada patrón sinóptico identificado.

4. DATOS Y MÉTODOS

4.1. DATOS

4.1.1. Datos de la red de estaciones meteorológicas de SENAMHI

Se utilizaron datos de 35 estaciones meteorológicas convencionales de la red hidrometeorológica del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI ubicadas a lo largo de la cordillera central y sur, desde los 3400 m s.n.m en adelante, en el período 1995-2018 (Figura 4.1). Se utilizaron las observaciones de las planillas, en las cuales, el observador indica el fenómeno meteorológico. Debido a que no se cuenta con instrumentos de medición de nieve, solo se contabilizaron los días de ocurrencia de nevadas, con el objetivo de realizar un análisis mensual y anual del número de eventos de nevadas¹ generalizadas en Perú.

¹ Evento de nevada = Días consecutivos con nevadas

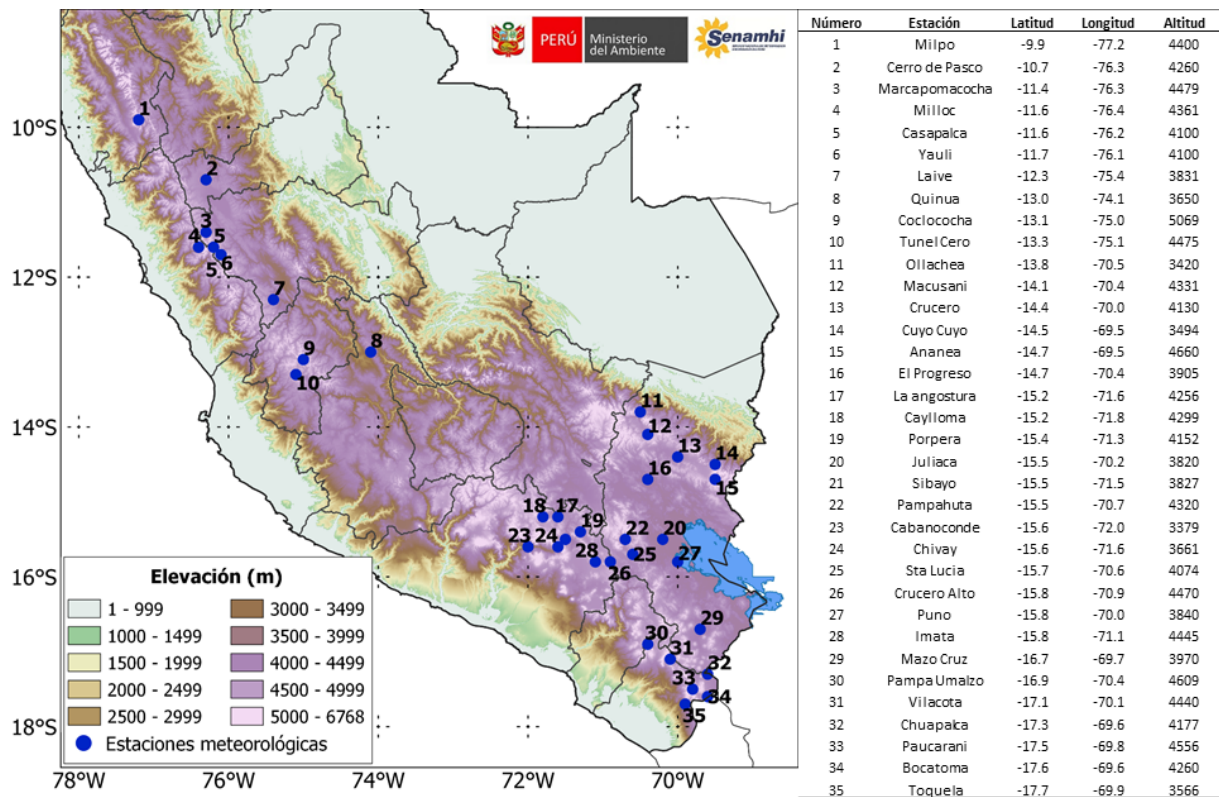


Figura 4.1.- Relación y distribución de las estaciones convencionales de la red de SENAMHI consideradas para el estudio.

4.1.2. Reanálisis ERA 5 - acumulado de nieve diaria (snowfall)

Este parámetro se refiere a la nieve acumulada que cae sobre la superficie, siendo la suma de las nevadas a gran escala y de las nevadas convectivas. Las nevadas a gran escala son generadas por el esquema de nubes en el Sistema de Pronóstico Integrado (IFS, por sus siglas en inglés) del ECMWF, el cual representa la formación y disipación de nubes y precipitación a gran escala debido a cambios en las cantidades atmosféricas (presión, temperatura y humedad) pronosticados en una cuadrícula. Mientras que la nevada convectiva es generada por el esquema de convección en el IFS.

La unidad de esta variable es la profundidad en metros de agua equivalente, es decir es la profundidad que tendría el agua si se distribuyera uniformemente sobre una grilla. Sin embargo, se debe tener cuidado al comparar los parámetros del modelo con las observaciones in situ, ya que, las mediciones locales son en un punto particular en el

espacio y tiempo, mientras que el modelo representa información de una cuadrícula (C3S, 2017).

Para el presente estudio se utilizó información acumulada diaria (de 12:00 a 12:00 UTC) de todos los días desde enero del 1995 hasta diciembre del 2018, con una resolución espacial de $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$.

4.1.3. Reanálisis ERA 5 – Datos en diferentes niveles de presión

Se utilizó la Información grillada de la quinta generación del reanálisis atmosférico del Centro Europeo para Pronóstico del Tiempo de Mediano Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés). Este reanálisis cuenta con información atmosférica global, disponibles de forma horaria, desde 1979 en adelante, con una resolución espacial de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ en 37 niveles de presión (C3S, 2017).

En este estudio se utilizaron datos de viento (dirección y velocidad), altura geopotencial, humedad relativa y temperatura en niveles altos (300hPa) y medios (500 y 550 hPa) de la tropósfera, desde 1995 hasta el 2018, a las 12:00UTC de los días representativos de los eventos de nevadas generalizadas, con el objetivo de buscar los patrones sinópticos de circulación atmosférica asociados a la ocurrencia de nevadas generalizadas en el Perú.

4.2. MÉTODOS

4.2.1. Diseño de mapas de frecuencia de nevadas

Utilizando, tanto los datos de reanálisis de nieve diaria del ERA 5 (considerando los acumulados diarios superiores a 1cm de nieve), como los datos registrados en las estaciones convencionales de la red hidrometeorológica de SENAMH, se diseñaron los mapas de frecuencia mensual de nevadas, considerando la variación altitudinal. Estos mapas se encontrarán disponibles en este informe para cualquier análisis posterior, así como en la plataforma geoespacial de SENAMHI: IDESEP (<https://idesep.senamhi.gob.pe/portaledesepe/>). Estos mapas se diseñaron con el software QGIS.

4.2.2. Determinación de días con nevadas generalizadas

Para determinar un día con nevada generalizada, es decir caída de nieve que cubrió un área considerable de Perú, se consideraron que se cumpla, por lo menos, uno de los siguientes criterios:

1. Mayor o igual al 50% de estaciones convencionales en la sierra central registraron nevada durante ese día.
2. Mayor o igual al 30% de estaciones convencionales en la sierra sur occidental registraron nevada durante ese día.
3. Mayor o igual al 50% de estaciones convencionales en la sierra sur oriental registraron nevada durante ese día.

Una vez identificados los días con nevadas generalizadas, se agruparon aquellos días consecutivos generando los eventos de nevadas generalizadas. Luego, se realizó un conteo mensual y anual de estos.

Es importante aclarar que existe una diferencia marcada entre un **día con registro de nevada** en una estación meteorológica y un **día con nevada generalizada**. El primero solamente requiere el registro de caída de nieve por el observador de la estación, mientras que el segundo requiere cumplir los criterios establecidos y mencionados en el punto 4.5.

4.2.3. Eventos secos y húmedos

Todos los eventos de nevadas generalizadas identificados entre 1995 y 2018 se agruparon en eventos secos y húmedos. En el primer grupo fueron considerados aquellos eventos ocurridos en los meses secos, es decir entre abril y setiembre; y en el segundo grupo, entre octubre y marzo.

Esta primera agrupación se realizó con el objetivo de la identificación correcta de los patrones sinópticos asociados a su ocurrencia, puesto que los patrones de circulación atmosférica varían notablemente en las temporadas seca y húmeda.

4.2.4. Determinación de los patrones sinópticos

Para la determinación de los principales patrones sinópticos de los eventos secos y húmedos, se utilizó el método de agrupamiento K-means (*clusters*) (Hastie et al., 2008), el

cual consiste en la agrupación de objetos en K grupos de acuerdo a las características de los objetos que se van a agrupar. Para este estudio cada objeto representó a la altura geopotencial en 300 hPa en cada fecha de los eventos de nevadas, tanto en los eventos secos, como en los húmedos. El agrupamiento se logra minimizando la distancia entre cada objeto y el centroide del grupo.

Para la selección adecuada del número de grupos (K) se utilizó el “método del codo”, el cual utiliza la inercia de los datos (suma de los cuadrados de las distancias entre el valor de objeto y su centroide). Luego, en un gráfico de la inercia versus los grupos, se selecciona el cambio brusco en la evolución de la inercia, lo cual se asemeja a un “codo”, y de ahí el nombre del método.

Los softwares que se utilizaron fueron Matlab (versión gratuita) y R. El área considerada para dicha agrupación está limitada por 100°W- 40°W, y 40°S-0°.

Una vez identificados los grupos de eventos generalizados de nevadas, se realizaron las composiciones de variables atmosféricas en diferentes niveles troposféricos, en cada grupo de eventos.

Las principales variables analizadas fueron: vientos, altura geopotencial y divergencia en 300 hPa, así como vientos y altura geopotencial en 500 hPa y relación de mezcla en 550 hPa, además del transporte integrado vertical de vapor de agua entre 1000 y 700 hPa, el cual fue utilizado para visualizar el jet de bajos niveles al este de los andes (Montini et al, 2019).

4.2.5. Acumulados de nieve promedio

Utilizando la información de reanálisis de nieve acumulada del ERA 5, se promediaron los valores diarios de nieve en cada grupo de eventos generalizados de nevadas, con el objetivo de determinar la distribución de nieve acumulada por cada grupo y así asociar las áreas de nevadas a los patrones de circulación atmosférica principales.

5. RESULTADOS

5.1. Zonas afectadas por nevadas

Con base en la información registrada en los 24 años, de las 35 estaciones seleccionadas, se estableció el número de días totales en los que ocurrieron nevadas para cada una, obteniendo como máximo valor un total de 942 días (11%) en la estación de Yauli – Junín, la cual se ubica en la zona centro del país y a una altitud de 4100 m s.n.m. Las estaciones con menor registro de nevadas se presentan en la vertiente occidental, en zonas que bordean 3400 msnm, entre ellas está Cabanaconde (3379 m s.n.m.) y Toquela (3566 m s.n.m.), con 13 y 6 días con nevadas, respectivamente. Se observó que los mayores días con nevadas se encuentran en la sierra centro y en localidades por encima de los 4000 msnm, lo cual está relacionado a la mayor disposición de humedad atmosférica proveniente de la Amazonía durante el año en la región centro que en la región sur (Figura 5.1).

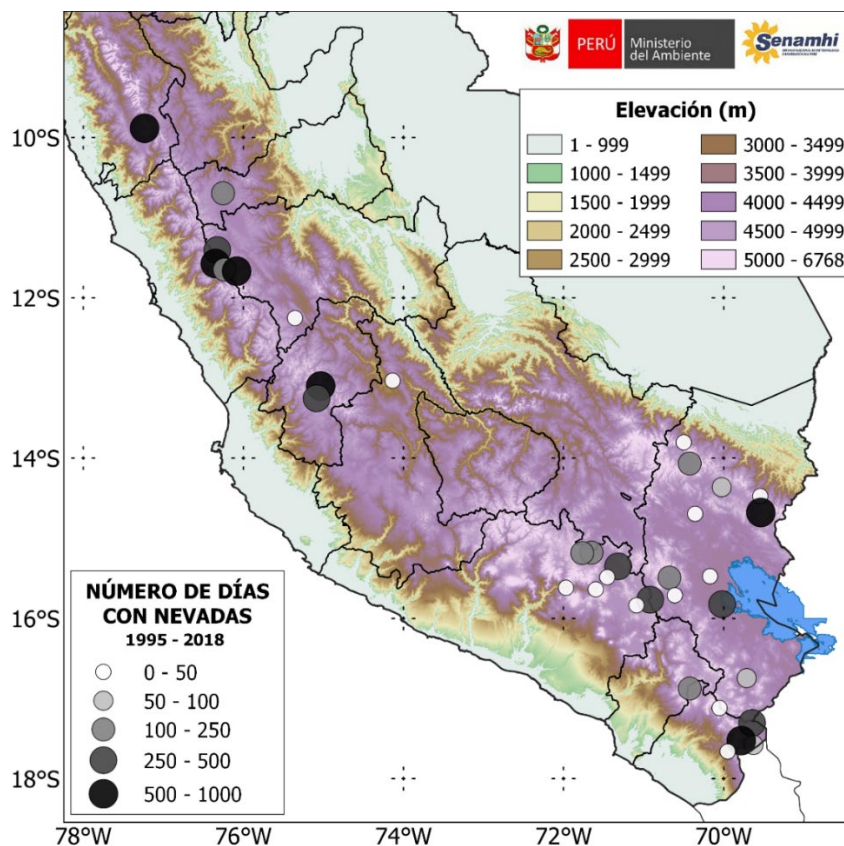


Figura 5.1.- Número de días con nevadas en cada estación meteorológica considerada en el estudio. Período 1995 – 2018.

Las 35 estaciones fueron separadas en tres regiones: sierra central, sierra sur occidental y sur oriental. Para determinar los valores días con nevadas en cada región, se promediaron los registros de las estaciones en cada región.

En la Figura 5.2 se observa que los meses con mayor cantidad de días con nevadas corresponden al verano y primavera (octubre, diciembre, enero, febrero y marzo); y los meses con menor cantidad de días, al otoño e invierno (mayo, junio, julio y agosto). El máximo de días con nevadas se alcanza en enero, y el mínimo, en mayo; asimismo, se observa que en noviembre existe un ligero descenso de total de días con nevadas. Aunque la tendencia es similar en las tres regiones, se observa que la sierra central presenta los mayores valores en casi todos los meses, excepto en julio, donde la sierra sur occidental presenta el máximo valor. Este comportamiento será explicado con el análisis de circulación atmosférica de la sección 5.3.

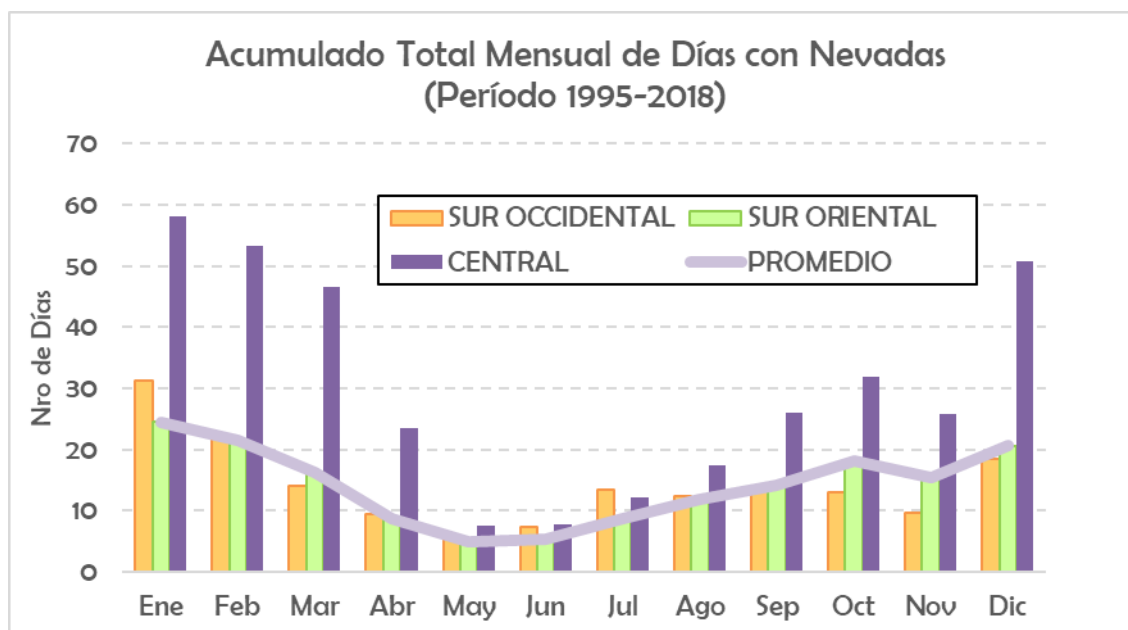


Figura 5.2.- Variación mensual del número total de días con nevadas en cada región. Período: 1995-2018.

Al realizar el análisis de forma anual (Figura 5.3) se observa que, entre 1995 y 2018, 2012 fue el año con mayor cantidad de días con nevadas, en general, y por el contrario, 1998 fue el año con menor acumulado de días con nevadas. Otros años con picos máximos de días

con nevadas fueron 2004, 2008, 2009, 2011, 2014 y 2018. Por el contrario, otros años con picos mínimos de días con nevadas fueron 2003, 2010 y 2016.

Al relacionar, el acumulado de días con nevadas con el Índice Oceánico de El Niño (Tabla 5.1), se observa que los picos máximos de nevadas están relacionados con inicios de años fríos (ONI negativo) o los últimos meses del año anterior fueron fríos, incluso la mayoría de ellos fueron considerados como La Niña. Por el contrario, los picos mínimos de nevadas están asociados a inicios de años cálidos (ONI positivo) o los últimos meses del año anterior fueron cálidos, considerados como El Niño.

Por último, existe una tendencia positiva a presentarse mayor número de días con nevadas en los últimos años, esto también fue encontrado en Ramos et al (2019), quienes analizaron las nevadas en los inviernos desde el 2000 hasta el 2018.

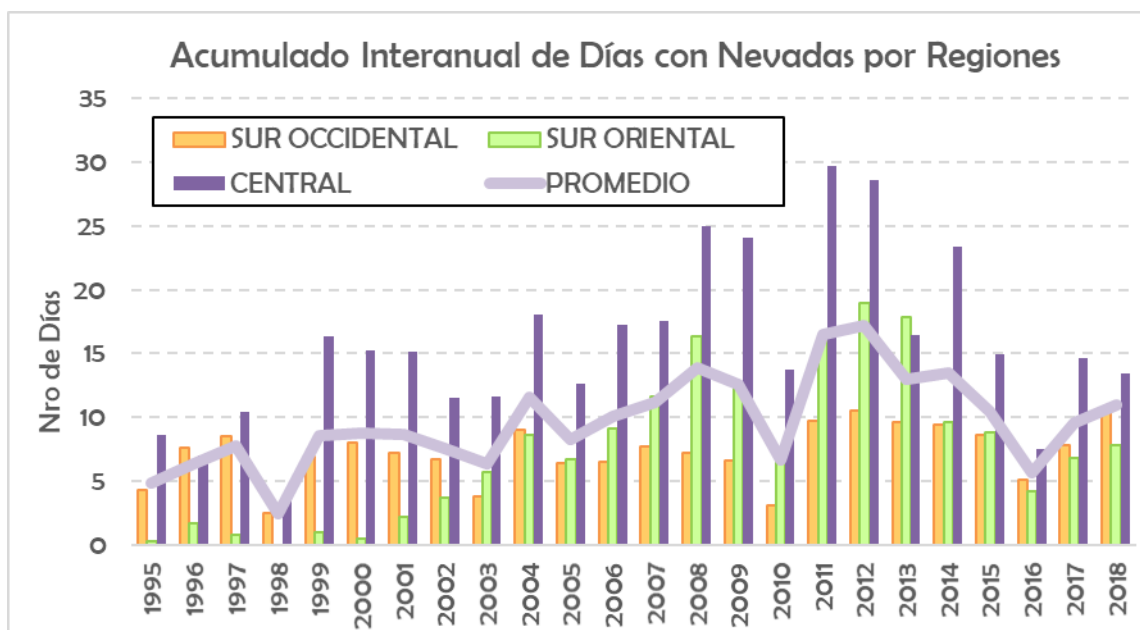


Figura 5.3.- Variación interanual del número total de días con nevadas en cada región.

Tabla 5.1.- índice Oceánico del El Niño – ONI. Los años resaltados de amarillo representan a picos mínimos de nevadas y los años resaltados con plomo, a picos máximos de nevadas.

Fuente: CPC – NOAA.

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1995	1.0	0.7	0.5	0.3	0.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0

1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.3	0.8	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3	2.4	2.4
1998	2.2	1.9	1.4	1.0	0.5	-0.1	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6
1999	-1.5	-1.3	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.5	-1.7
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9
2007	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.8	-1.1	-1.4	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
2016	2.5	2.2	1.7	1.0	0.5	0.0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.2	-0.1	-0.4	-0.7	-0.9	-1.0
2018	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	0.9	0.8

5.2. Mapas de frecuencia de nevadas por meses

En las Figuras 5.4 - 5.15, se muestra la distribución espacial promedio de la frecuencia mensual de días con nevadas en 24 años (1995-2018) a lo largo de la cordillera central y sur de los Andes peruanos usando datos de nieve del ERA5 y los datos de las estaciones convencionales.

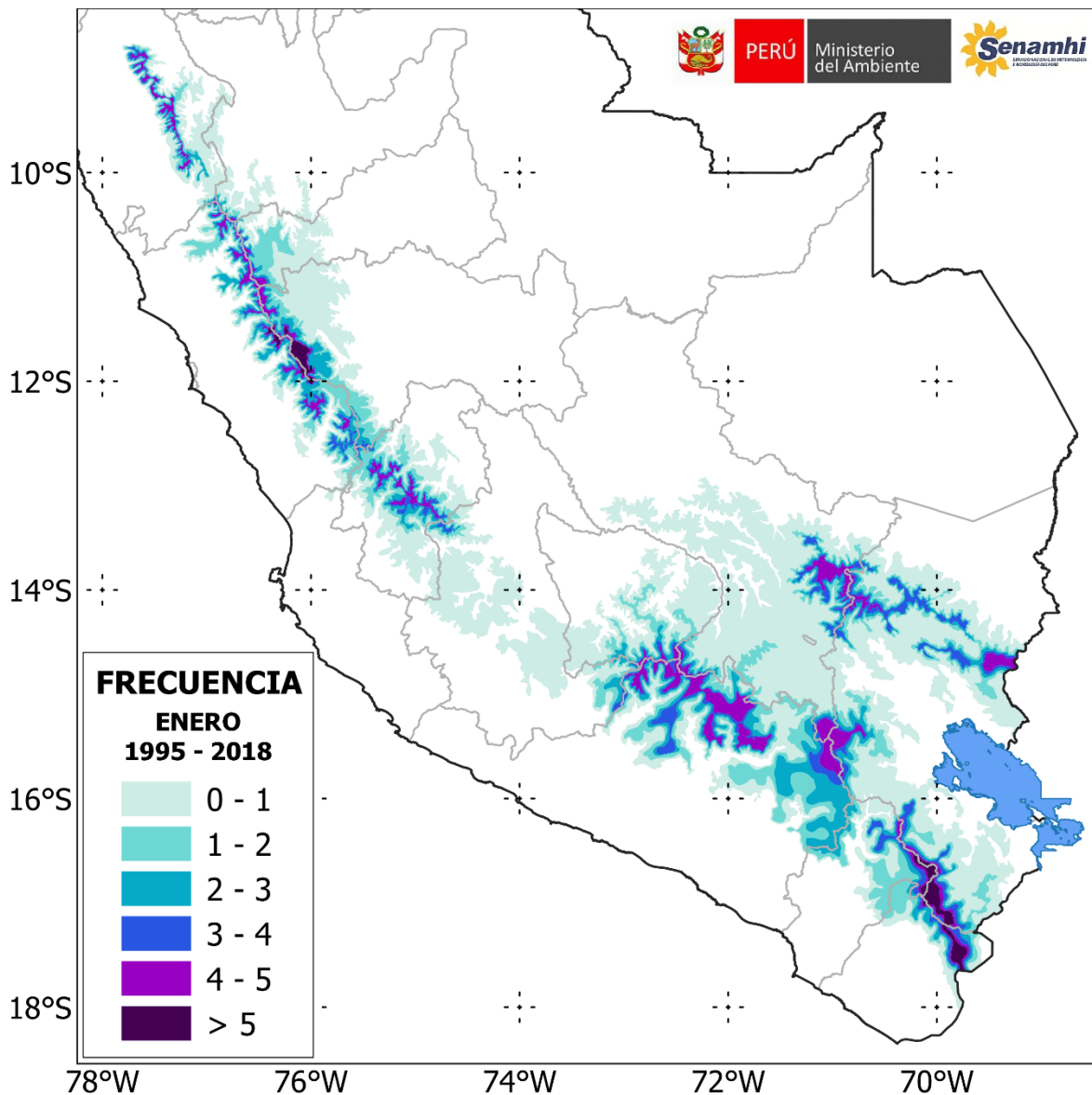


Figura 5.4.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de enero. Período 1995 – 2018.

En el mes de enero (Figura 5.4), se presenta los valores más altos de frecuencia de días con nevadas (superior a 3) en la vertiente oriental sur (entre Cusco y Puno), vertiente occidental sur (Apuímac, Arequipa, Moquegua y Tacna) y sierra centro (Lima, Junín y Áncash) en zonas por encima de los 4000 m s.n.m. Asimismo, las estaciones Yauli (Junín), Milloc (Áncash) y Paucarani (Tacna) presentaron una frecuencia superior a 5 días con nevadas por mes.

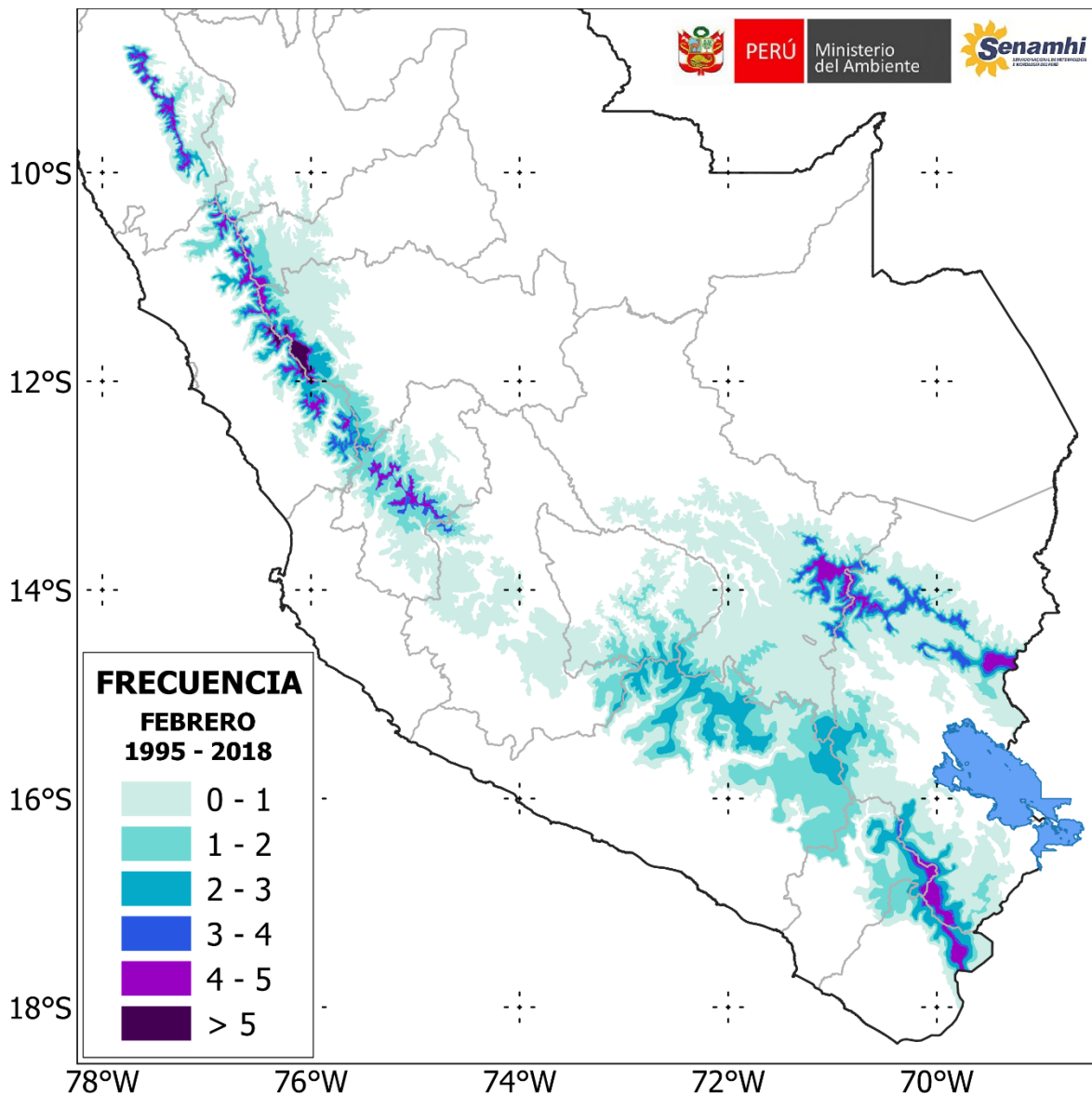


Figura 5.5.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de febrero. Período 1995 – 2018.

Para el mes de febrero (Figura 5.5), se presentaron altos valores de frecuencia de días con nevadas (superior a 3) en la vertiente oriental sur (entre Cusco y Puno), en el extremo sur de la vertiente occidental (Moquegua y Tacna) y sierra centro. Asimismo, en la estación de Yauli (Junín) se presentó el mayor número de días con nevadas (7).

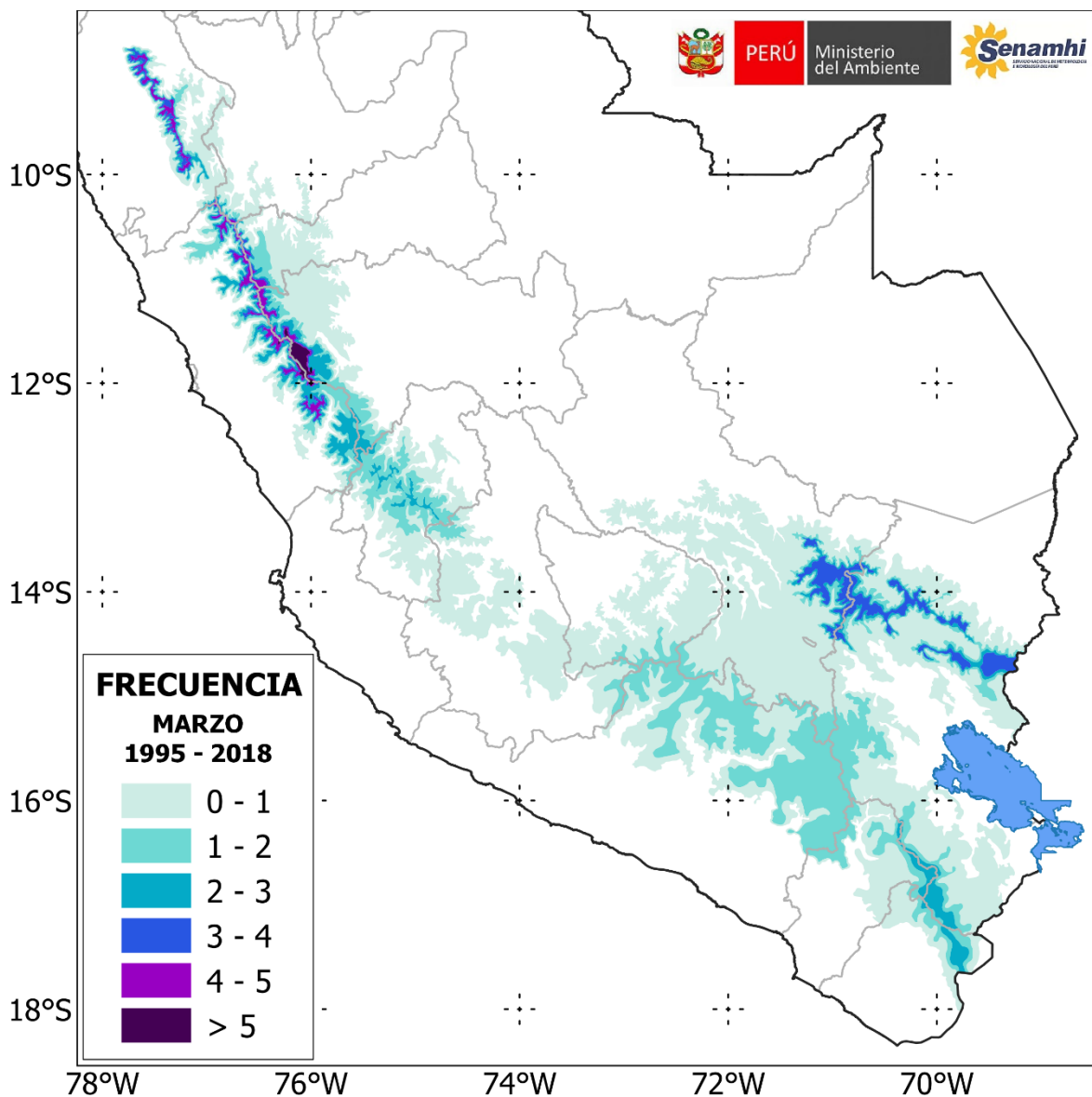


Figura 5.6.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de marzo. Período 1995 – 2018.

En el mes de marzo (Figura 5.6), en la vertiente occidental centro y la vertiente oriental sur continúan presentándose los valores más altos de frecuencia de días con nevada, a comparación de las demás zonas de la cordillera. Asimismo, la sierra centro presenta el valor más alto, teniendo de referencia la estación convencional Yauli (Junín) por encima de los 4000 m s.n.m.

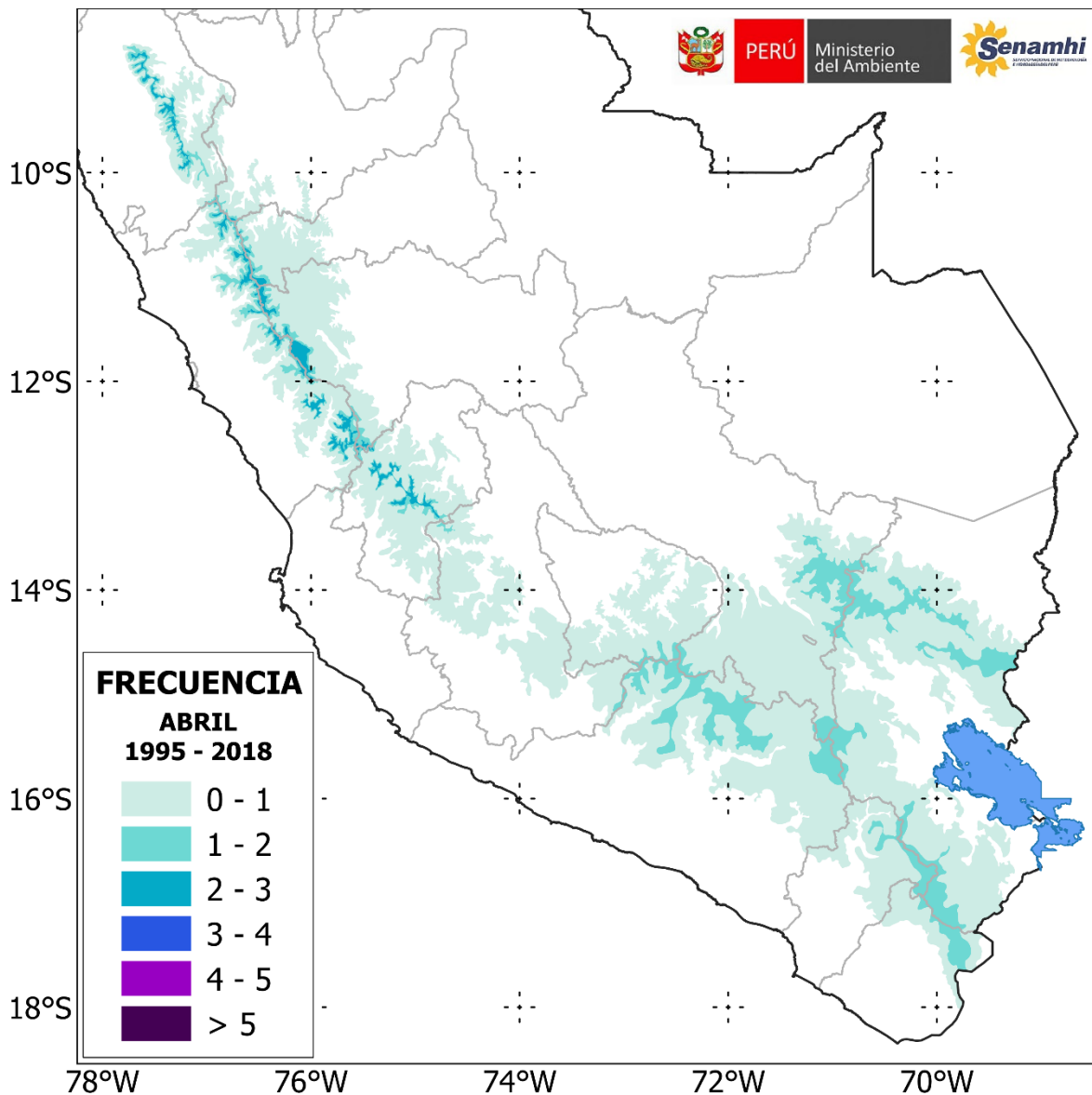


Figura 5.7.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de abril. Período 1995 – 2018.

En el mes de abril (Figura 5.7), la distribución de la frecuencia disminuye a comparación de los meses anteriores en toda la zona de cordillera. Mientras que la sierra central continúa presentándose los valores más altos de frecuencia de días con nevadas (entre 1 a 3).

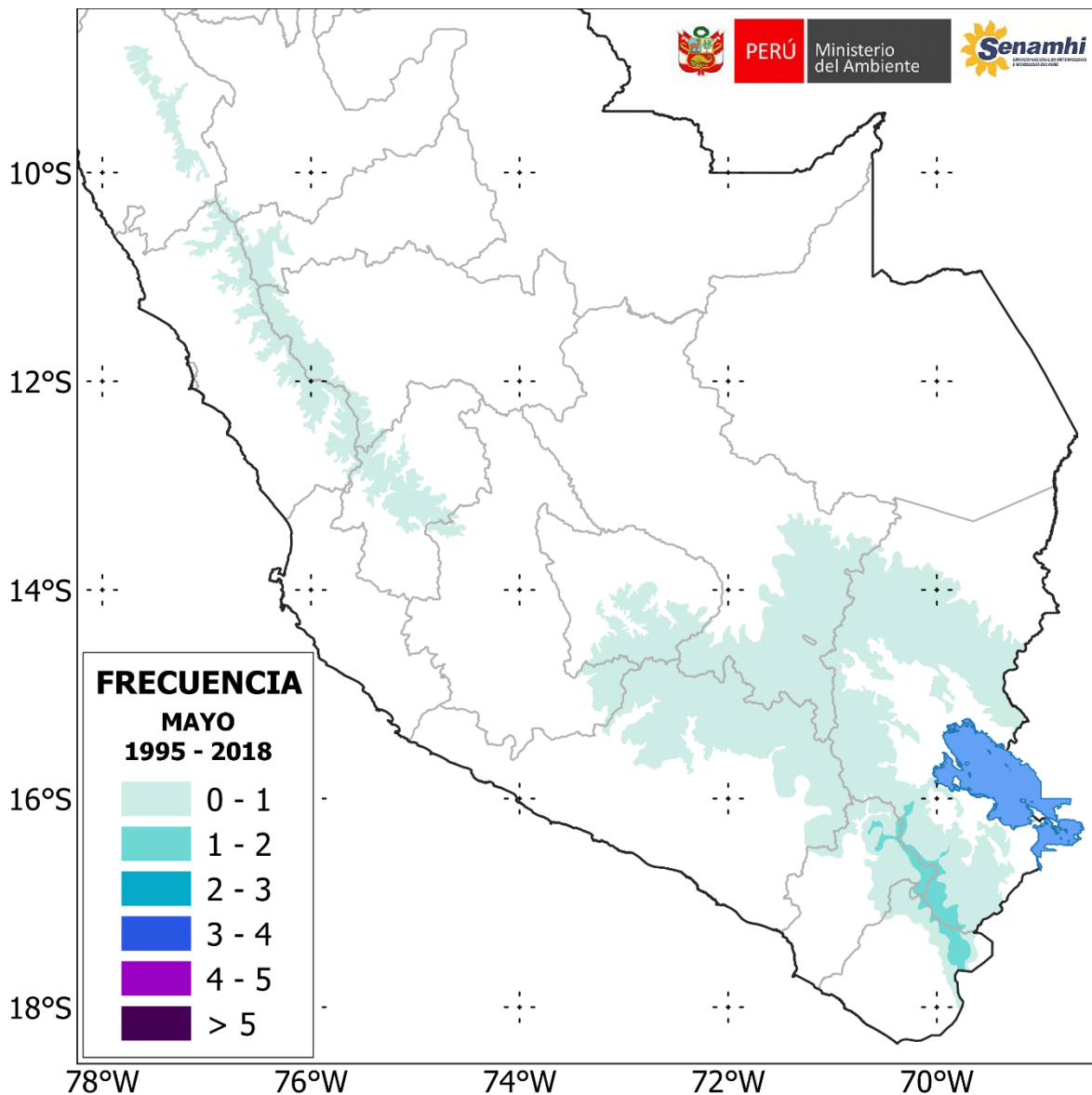


Figura 5.8.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de mayo. Período 1995 – 2018.

En los meses de mayo y junio (Figuras 5.8 y 5.9), se presentan una distribución homogénea de la frecuencia de nevadas, sin embargo, el extremo sur de la vertiente occidental presenta la mayor frecuencia (hasta 2 eventos) en zonas por encima de los 4000 m s.n.m. Asimismo, se presentan los menores valores en promedio de todo el año, tal como fue observado en la Figura 5.2.

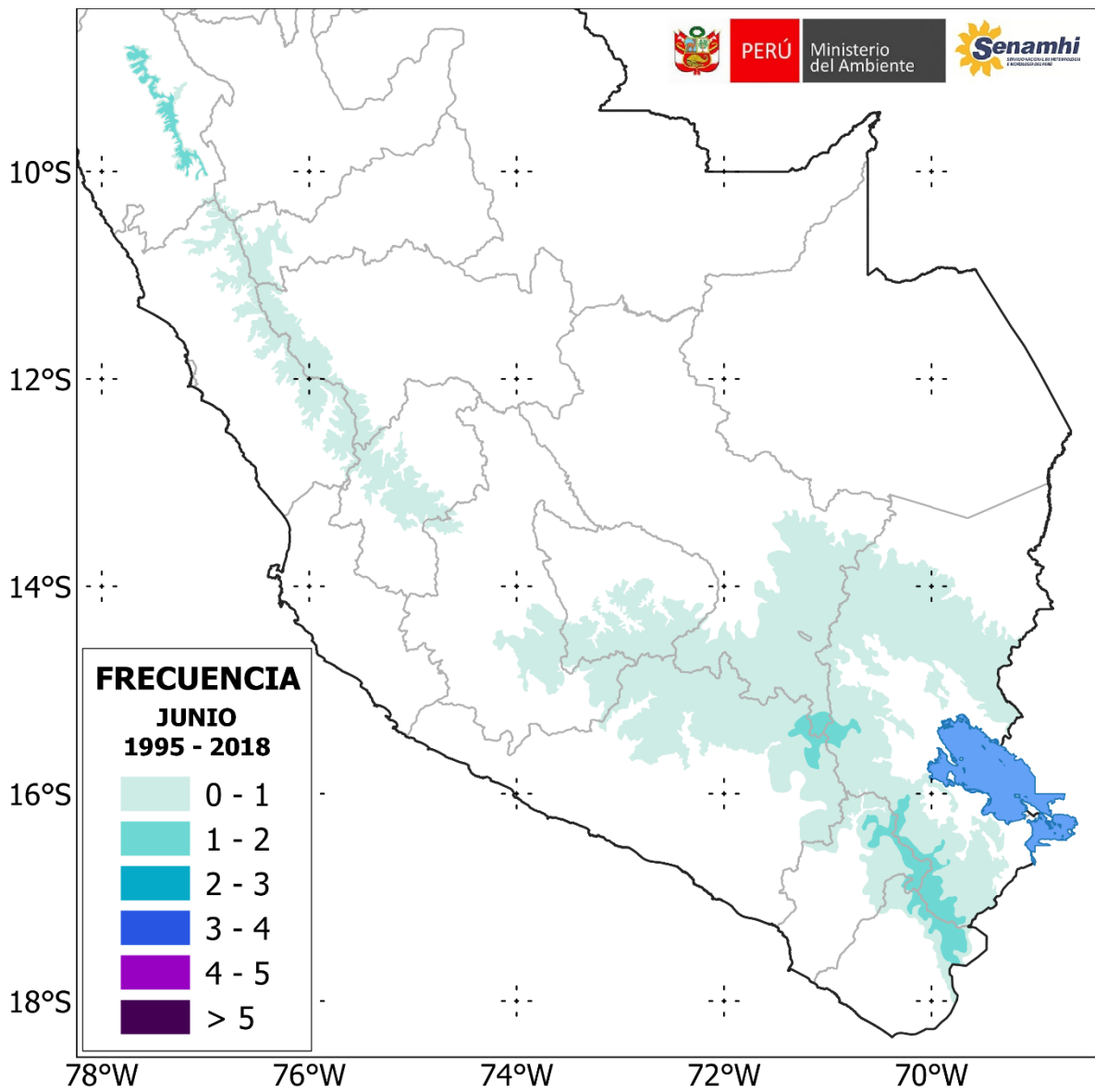


Figura 5.9.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de junio. Período 1995 – 2018.

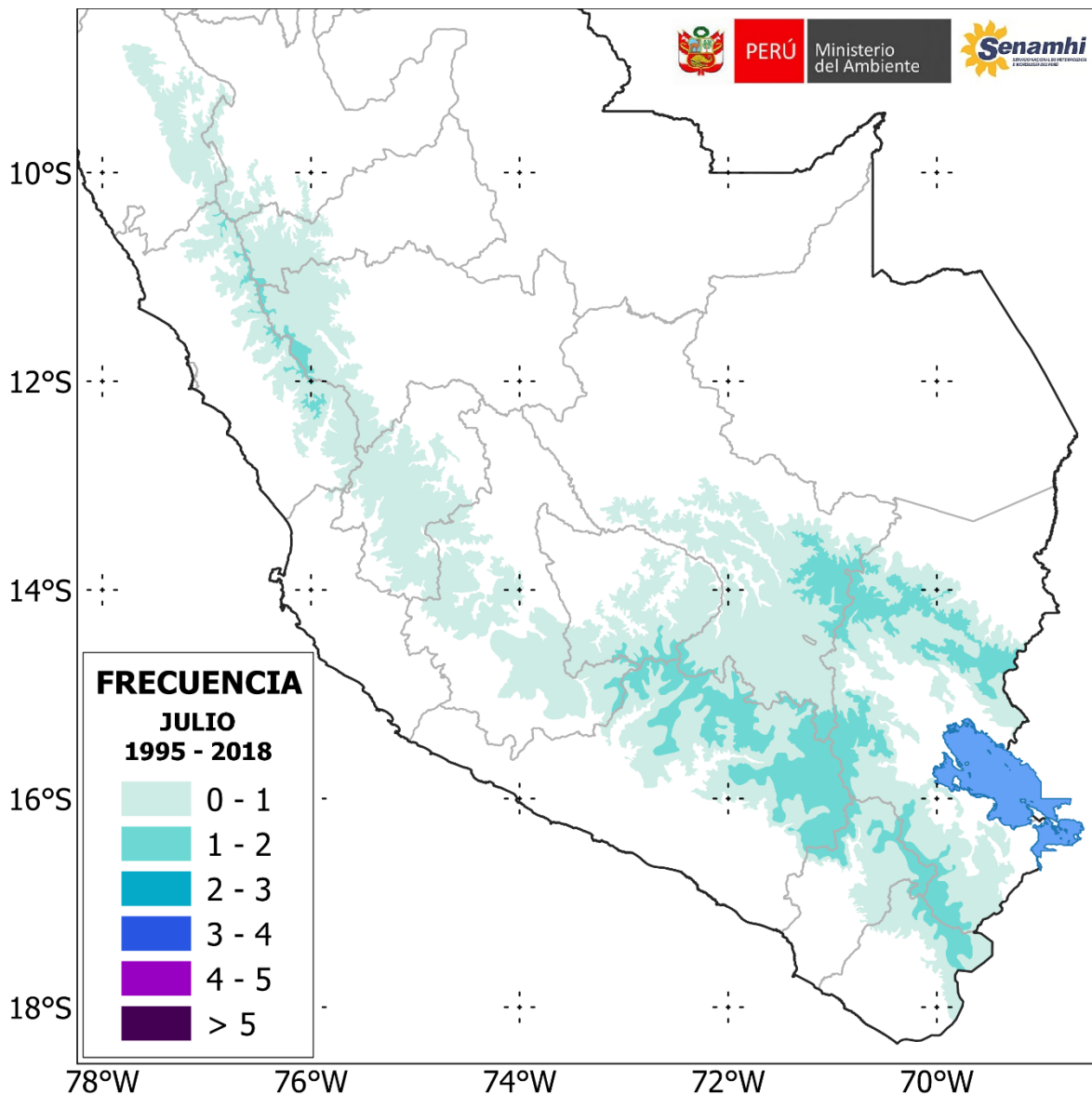


Figura 5.10.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de julio. Período 1995 – 2018.

En el mes de julio (Figura 5.10), se presenta una mayor distribución de frecuencia de nevadas a comparación de los dos meses previos. En ambas vertientes de la zona sur se presenta los valores más altos (hasta 2 eventos por mes). También, se presentan valores en cotas más bajas (hasta los 3400 m s.n.m.)

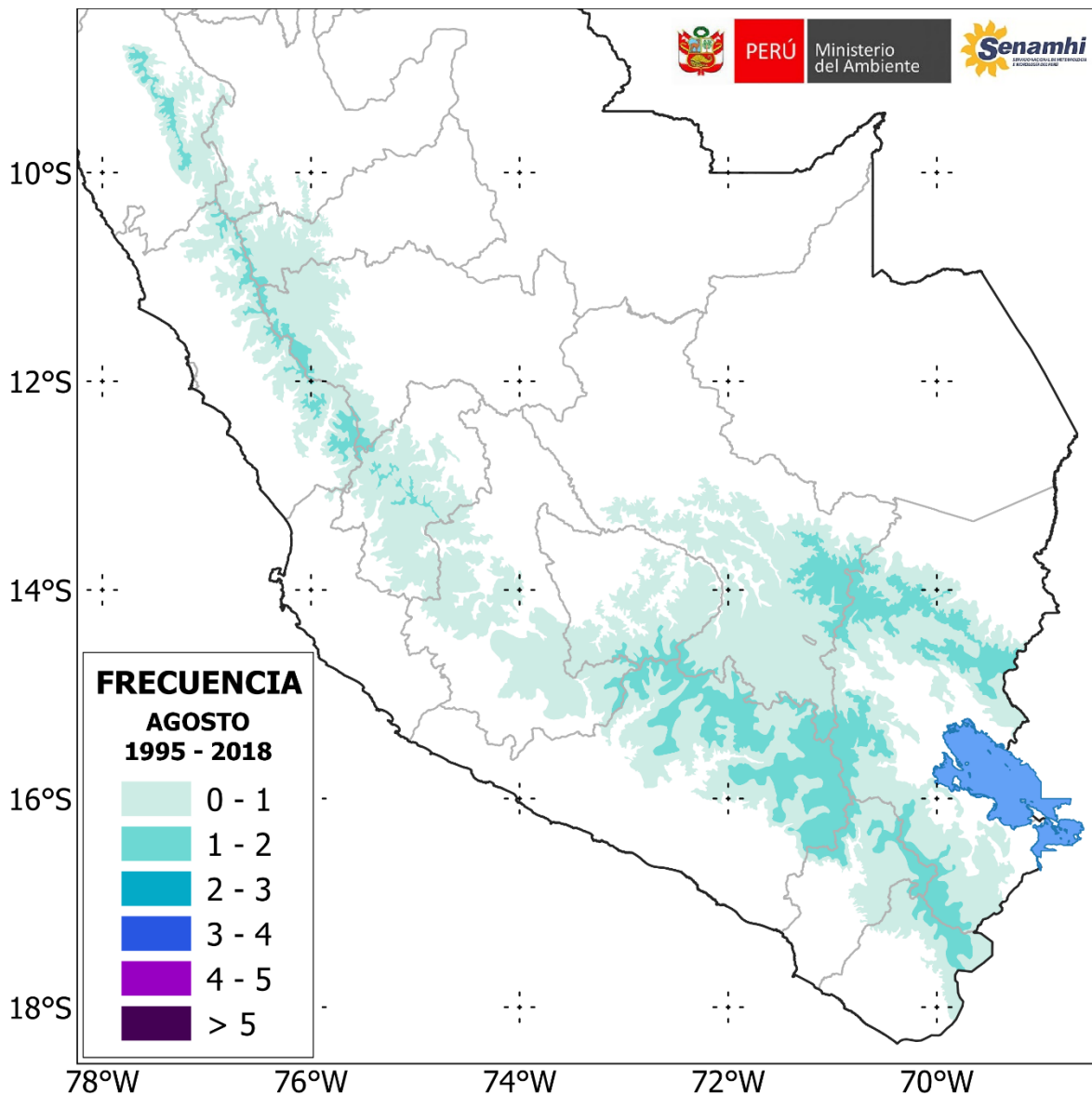


Figura 5.11.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de agosto. Período 1995 – 2018.

En el mes de agosto (Figura 5.11), la extensión del área afectada se mantiene similar al mes de julio, pero se observa un incremento en la frecuencia en la sierra centro. En ambas vertientes de la zona sur se incrementa la frecuencia (hasta 2 eventos por mes).

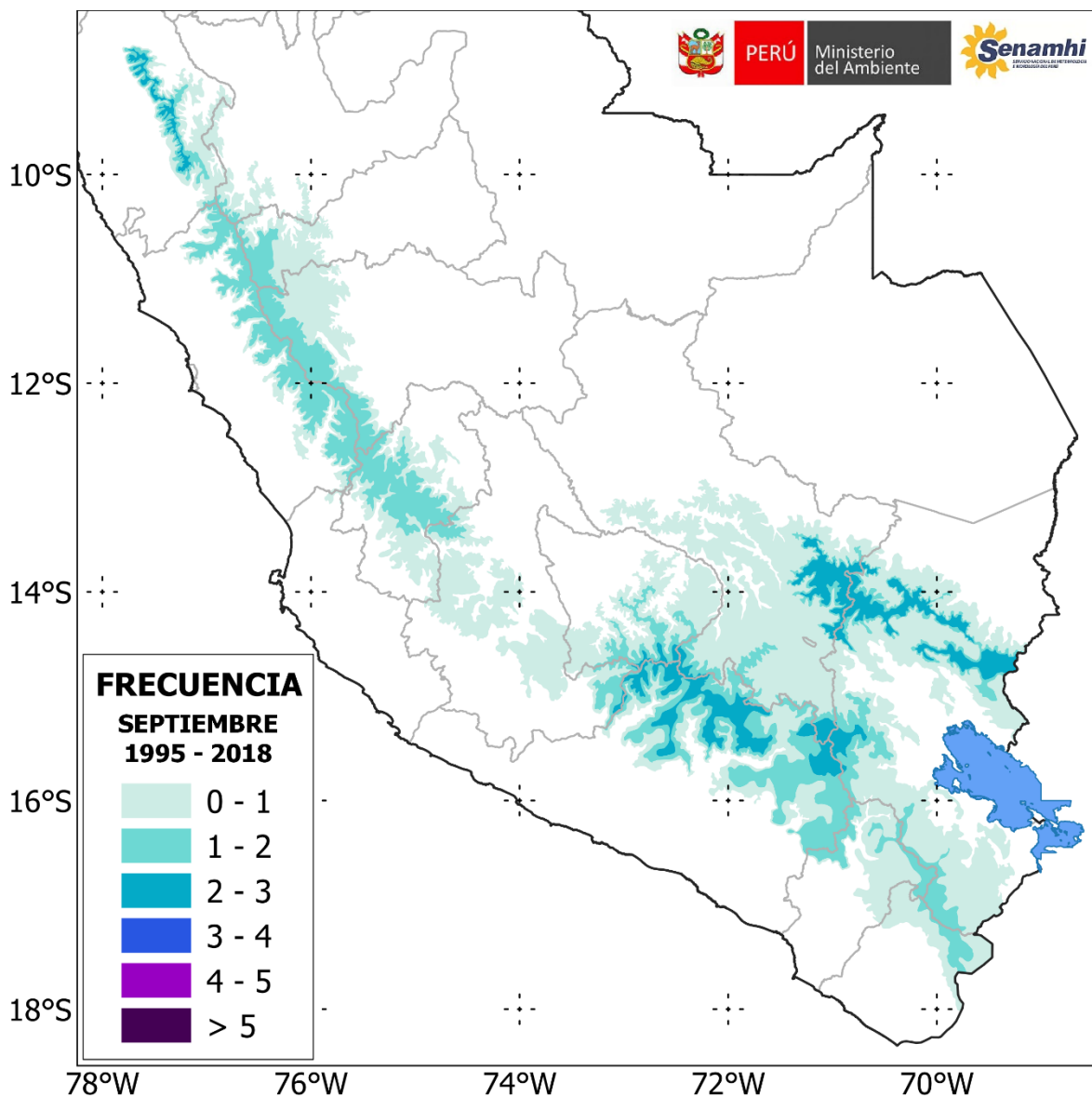


Figura 5.12.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de septiembre. Período 1995 – 2018.

En el mes de septiembre (Figura 5.12), se observa un incremento general de la frecuencia de días con nevada a comparación de los meses previos. Algunas estaciones convencionales como: Milpo (Áncash), Coclococha (Huancavelica) y Ananea (Puno) presentan la mayor frecuencia (hasta 3 eventos por mes).

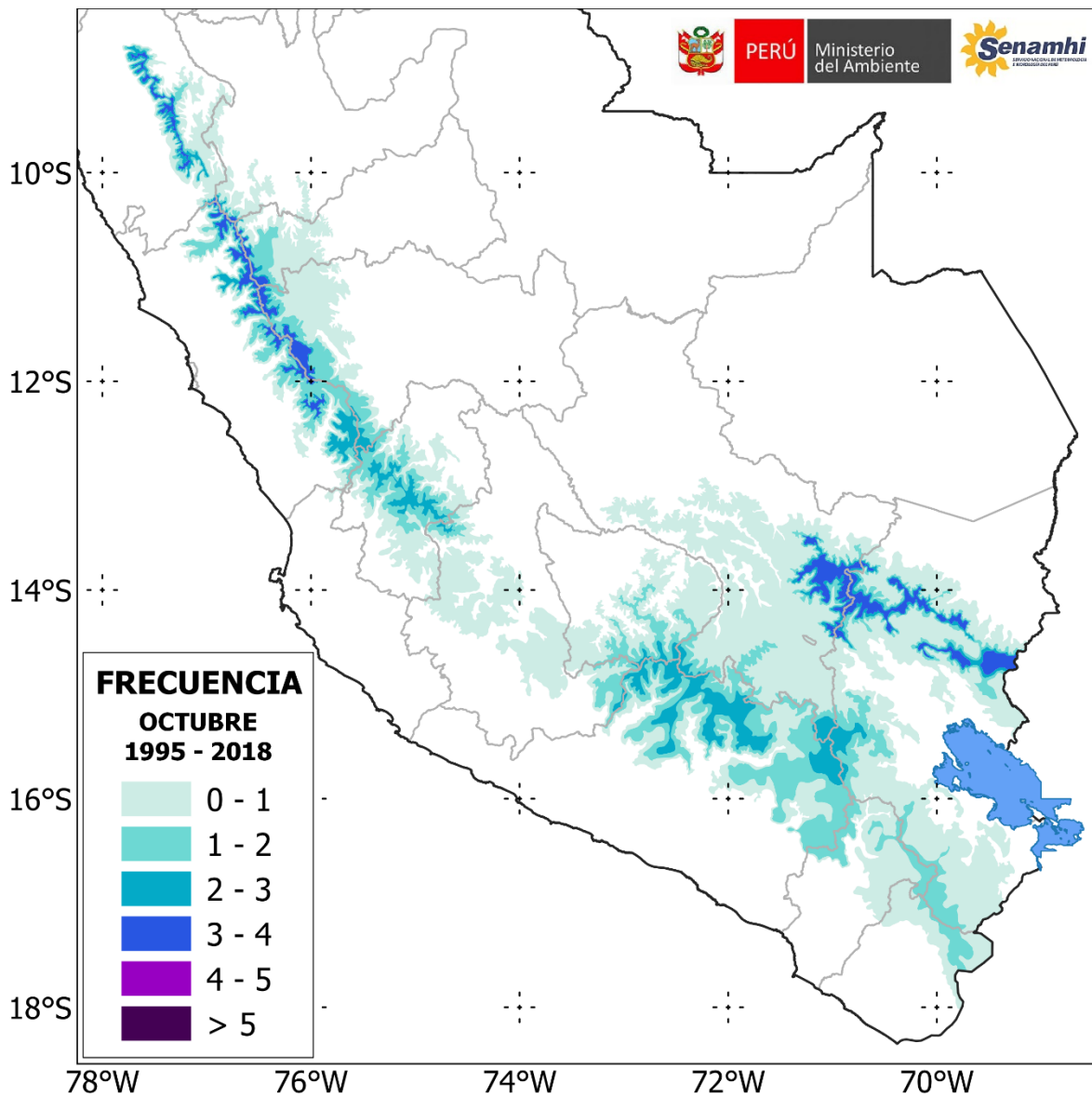


Figura 5.13.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de octubre. Período 1995 – 2018.

En el mes de octubre (Figura 5.13), se observa incremento de la frecuencia de días con nevada en la sierra centro y vertiente sur oriental (hasta 4 eventos por mes).

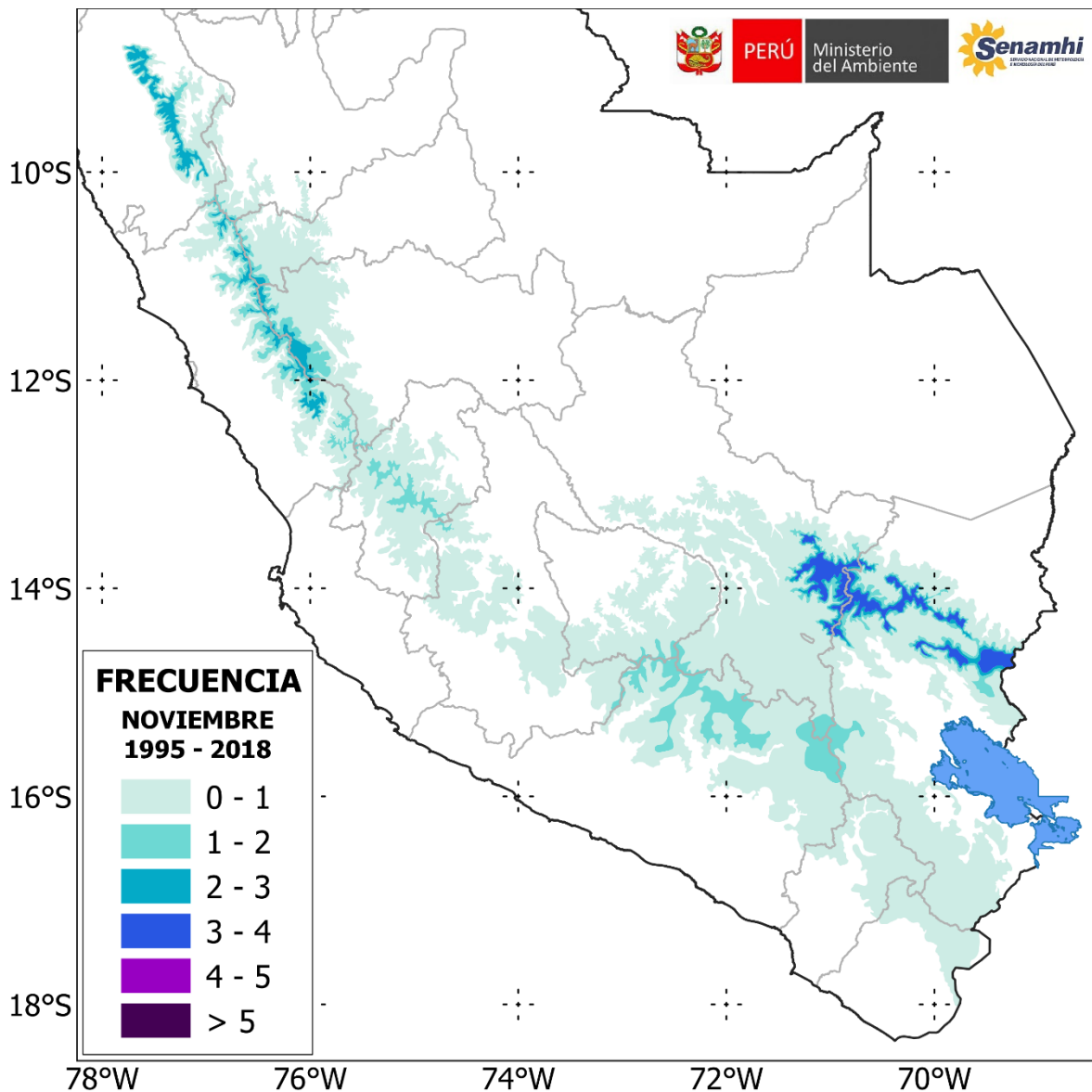


Figura 5.14.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de noviembre. Período 1995 – 2018.

En el mes de noviembre (Figura 5.14), se observa un descenso de la frecuencia de eventos de nevada en la sierra centro y vertiente sur occidental, mientras que en la vertiente oriental sur se mantiene la frecuencia (hasta 4 eventos por mes). Este comportamiento también se observa en la Figura 5.2.

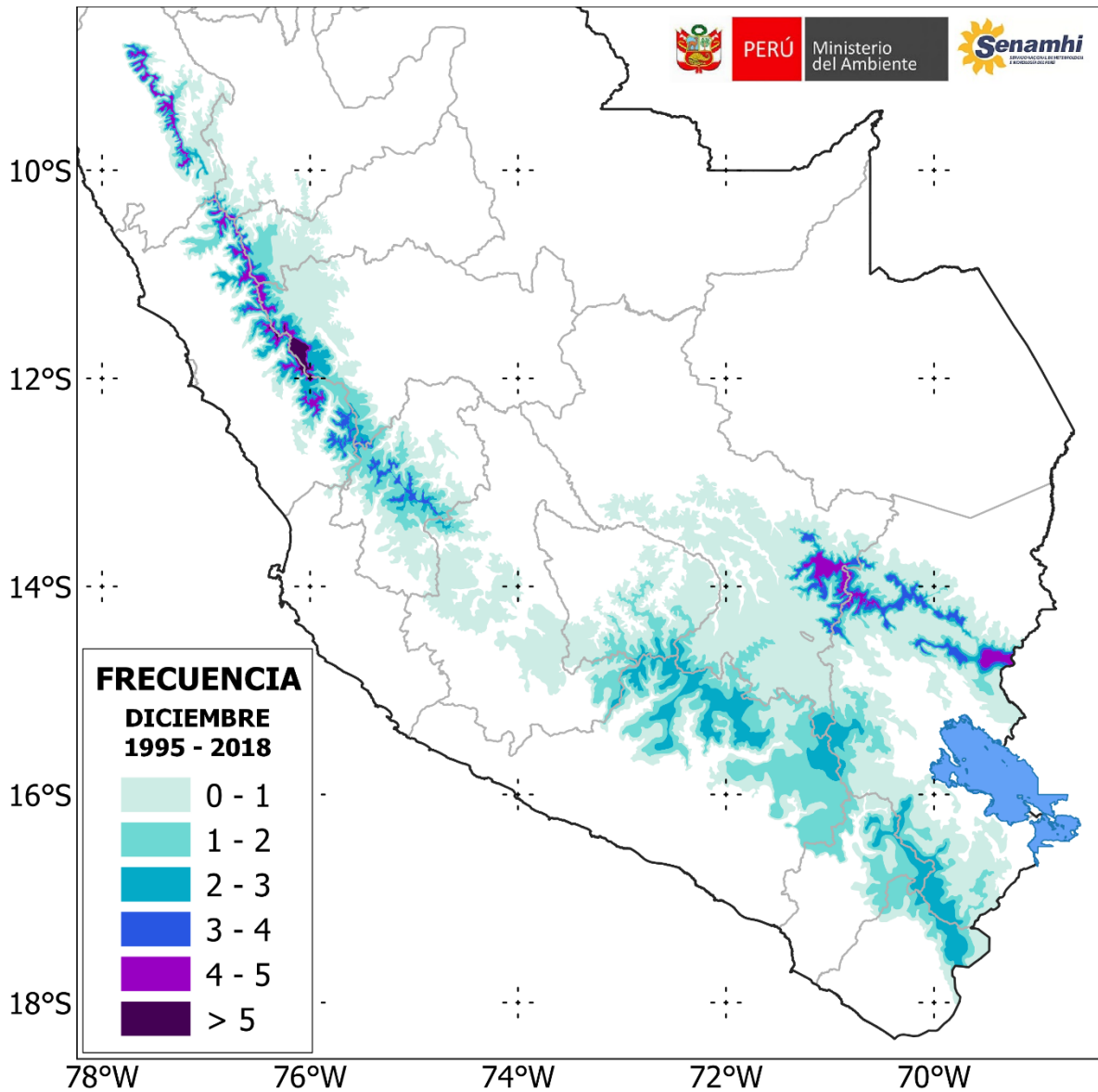


Figura 5.15.- Frecuencia promedio de días con nevadas en el mes de diciembre. Período 1995 – 2018.

Finalmente, en el mes de diciembre (Figura XX), se observa un incremento general de la frecuencia de días con nevada, siendo los valores más altos en la sierra centro y vertiente sur oriental (superior a 5 eventos por mes).

5.3. Días y eventos con nevadas generalizadas

En el período 1995 - 2018 se contabilizaron un total de 78 días con nevadas generalizadas, los cuales se agruparon en 59 eventos de nevadas generalizadas en la zona altoandina (Tabla 5.2).

Tabla 5.2.- Fechas de nevadas generalizadas en los Andes peruanos.

DÍAS	FECHA	Nº EVENTO	DÍAS	FECHA	Nº EVENTO	DÍAS	FECHA	Nº EVENTO
1	27-Dic-95	1	27	19-Nov-11	21	53	13-Mar-14	41
2	7-Ago-97	2	28	21-Dic-11	22	54	11-Set-14	42
3	21-Ago-97	3	29	23-Dic-11		55	4-Ene-15	43
4	3-Dic-99	4	30	24-Dic-11	23	56	20-Ene-15	44
5	10-Jul-02	5	31	25-Dic-11		57	3-Jul-15	45
6	23-Ene-04	6	32	5-Ene-12	24	58	4-Jul-15	
7	28-Jun-04	7	33	6-Ene-12		59	12-Ago-15	46
8	1-Jul-04		34	27-Ene-12	25	60	13-Ago-15	
9	2-Jul-04	8	35	29-Ene-12	26	61	3-Oct-15	47
10	3-Jul-04		36	6-Feb-12	27	62	28-Jun-16	48
11	4-Jul-04		37	9-Feb-12	28	63	7-Jul-16	49
12	23-Ago-04	9	38	12-Feb-12	29	64	22-May-17	50
13	24-Ago-04		39	20-Feb-12	30	65	30-May-17	51
14	13-Set-05	10	40	30-Mar-12	31	66	7-Set-17	52
15	14-Set-05		41	7-Jun-12	32	67	15-Set-17	53
16	7-Nov-05	11	42	28-Set-12	33	68	3-Jun-18	
17	31-Dic-07	12	43	28-Oct-12	34	69	4-Jun-18	54
18	8-Ago-08	13	44	17-Ene-13	35	70	5-Jun-18	
19	21-Dic-08	14	45	22-Ene-13	36	71	14-Jul-18	55
20	17-Feb-09	15	46	24-Ago-13	37	72	19-Jul-18	
21	13-Mar-09	16	47	25-Ago-13		73	20-Jul-18	56
22	26-Jul-09	17	48	27-Ago-13		74	21-Jul-18	
23	27-Jul-09		49	28-Ago-13	38	75	22-Jul-18	
24	10-Ene-10	18	50	29-Ago-13		76	7-Ago-18	57
25	12-Feb-11	19	51	26-Oct-13	39	77	5-Oct-18	58
26	3-Jul-11	20	52	16-Ene-14	40	78	27-Nov-18	59

A diferencia del acumulado total de días con nevadas (Figura 5.2) en el que el máximo se encontraba en enero, en el caso de nevadas generalizadas se observan dos períodos de ocurrencia máxima de eventos (Figura 5.16). El primer período comprende al verano, con un máximo mensual en enero, con 10 eventos en total, durante los 24 años de análisis. El segundo período comprende al invierno, con un máximo de 8 eventos tanto en julio como en agosto. Esto está acorde a lo encontrado por Quispe (2017), quien concluyó que las nevadas son más frecuentes en verano en la sierra central y en invierno en la sierra sur, sin embargo, las nevadas más intensas se dan en invierno.

Complementariamente, los meses de transición estacional presentan los mínimos de eventos de nevadas generalizadas, es así que abril no presentó ningún evento generalizado durante el período 1995-2018, mayo solo presentó 2 eventos de nevadas generalizadas durante los 24 años, y, por último, noviembre con solo 3 eventos en total.

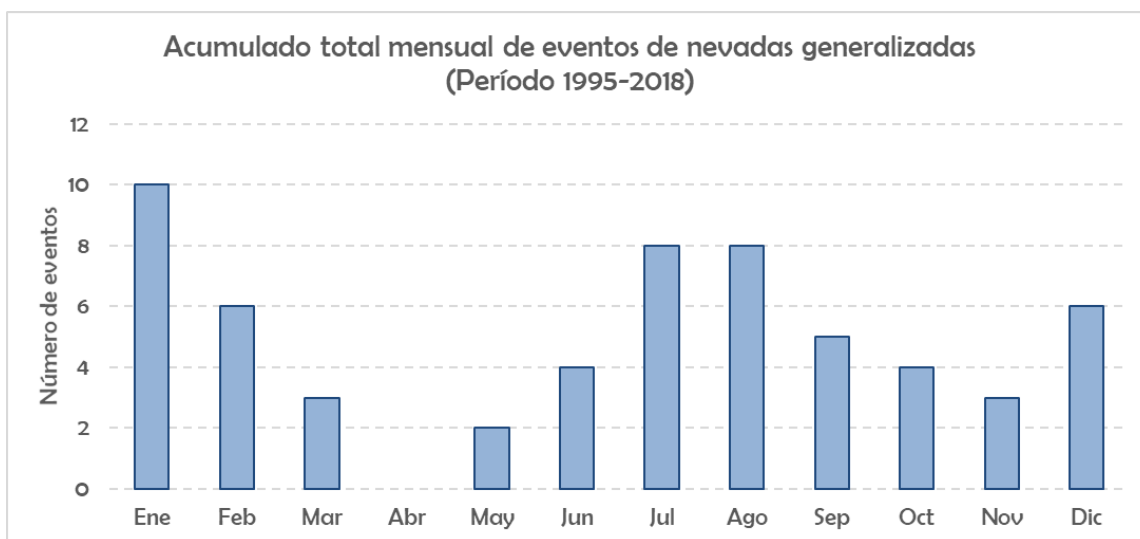


Figura 5.16.- Acumulado total mensual (suma general) de los eventos de nevadas generalizadas identificados durante el período 1995 – 2018.

Al analizar la variación del acumulado interanual de eventos de nevadas generalizadas (Figura 5.17), se observa una tendencia positiva de ocurrencia de nevadas en los últimos años, principalmente desde el 2011 en adelante. Esta tendencia también fue observada por Ramos et al. (2019), quienes encontraron mayor frecuencia de nevadas generalizadas desde el invierno 2013 en adelante.

Asimismo en la Figura 5.17 se observa que el año con un máximo anual de eventos de nevadas generalizadas fue el 2012 con un total de 11 eventos, sin embargo la mayor cantidad de los eventos en este año se presentaron en verano que en invierno (Ver Anexo 1). El siguiente año con un máximo de eventos fue el 2018 con 6 eventos en total, la mayoría de ellos en invierno que en verano (Ver Anexo 1) (Ramos et al, 2019). Asimismo, se presentaron 5 eventos de nevadas generalizadas tanto en 2011, como en 2013 y 2015.

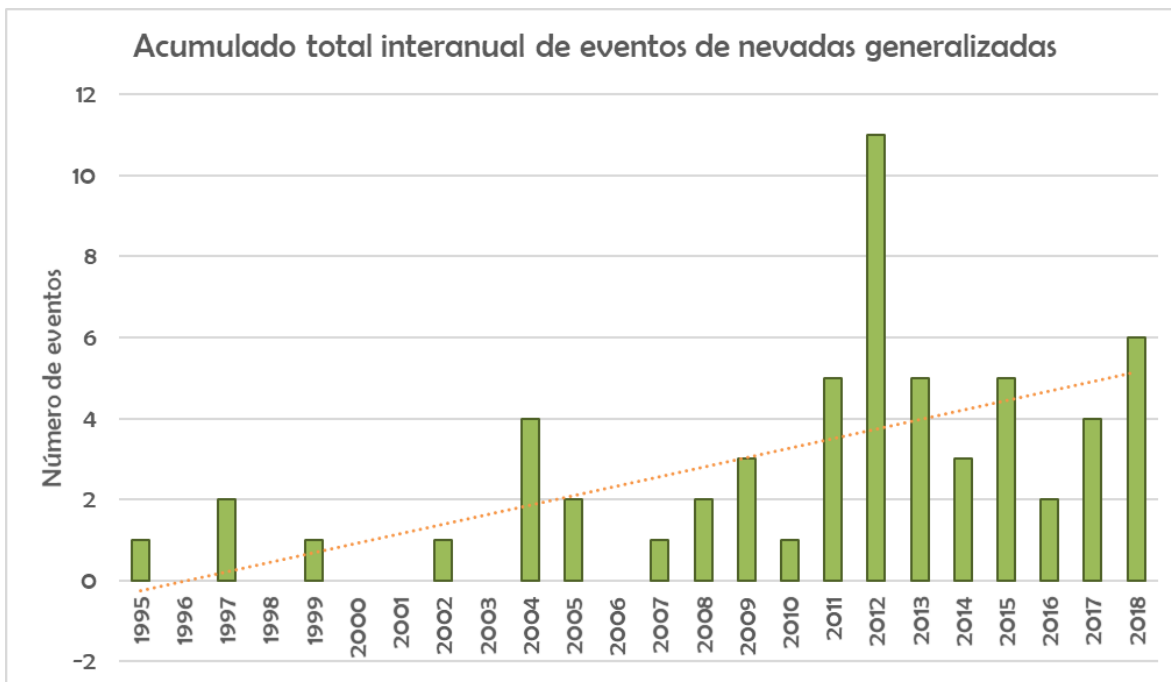


Figura 5.17.- Acumulado anual de los eventos de nevadas generalizadas identificados durante el período 1995 – 2018. Tendencia (línea punteada).

5.4. Circulaciones atmosféricas que producen nevadas generalizadas

De los 59 eventos de nevadas generalizadas, 27 pertenecen a los eventos secos, y 32, a los húmedos; y de ellos, utilizando el método de agrupación k-means y el “método del codo” para la selección adecuada de los grupos, se identificaron tres grupos en los eventos secos y dos en los eventos húmedos (Anexo 2), generando un total de cinco grupos con todos los eventos de nevadas generalizadas (Tabla 5.2).

El primer grupo de los eventos secos cuenta con 8 eventos, el segundo, con 9, y el tercero con 10. En el caso de los eventos húmedos, el primer grupo cuenta con 24 eventos, y el

segundo, con 8. En la Tabla 5.3 se pueden observar cada grupo con los eventos seleccionados en cada uno de ellos.

Tabla 5.3.- Clasificación de eventos de nevadas generalizadas en cada grupo.
El "Nº de evento" corresponde a los eventos listados en la Tabla 5.2

EVENTOS EN MESES SECOS					EVENTOS EM MESES HÚMEDOS				
Grupo	Nº de evento	Grupo	Nº de evento	Grupo	Nº de evento	Grupo	Nº de evento	Grupo	Nº de evento
1	3	2	2	3	7	1	1	2	11
	5		8		10		4		21
	13		9		37		6		22
	17		33		42		12		34
	20		38		46		14		39
	32		48		50		15		47
	45		51		52		16		58
	49		53		55		18		59
Total: 8		54		56	1	19	Total: 8		
Total: 9			57	23					
Total: 10				24					
						25			
						26			
						27			
						28			
						29			
					30				
					31				
					35				
					36				
					40				
					41				
					43				
					44				
					Total: 24				

5.5.Circulación Atmosférica Promedio – Niveles Altos

En la Figura 5.18 se observan que las circulaciones atmosféricas en niveles altos asociadas a los grupos de los eventos secos están caracterizadas por la presencia de una vaguada (sistema frío en forma de “V invertida”) sobre el Pacífico cerca a Perú, que advecta vorticidad negativa, genera divergencia e inyecta aire frío en la parte delantera (andes peruanos) mientras se aproxima hacia el continente, generando inestabilidad en la zona y favoreciendo la ocurrencia de precipitaciones. Asimismo, la presencia de esta circulación genera transporte de humedad, en niveles medios, desde la región amazónica hacia los andes peruanos, lo cual genera el ambiente adecuado para la ocurrencia de nevadas.

La circulación promedio en niveles altos del Grupo 1 de los eventos secos (Figura 5.18a) muestra la presencia de la vaguada en el Pacífico, con eje inclinado desde el noroeste hacia el sureste, llegando hasta 10°S como su posición más al norte, y una dorsal al sur de esta vaguada, desde los 30°S hacia el sur. La presencia de esta dorsal genera el desplazamiento hacia el norte de la vaguada, acercándola así hasta Perú. Asimismo, sobre el Ecuador y norte de Perú se encuentra una dorsal, asociada a la circulación anticiclónica con núcleo sobre el este de Brasil. Esta configuración genera divergencia en la región sur occidental y oriental del Perú.

El Grupo 2 de los eventos secos (Figura 5.18b) está influenciado por la presencia de la vaguada en niveles altos inclinada de noroeste hacia el sureste, con la parte delantera sobre todo el Perú, llegando hasta los 5°S como su posición más al norte, y generando divergencia tanto en el centro como en el sur del país.

El último grupo (Grupo 3) de los eventos secos (Figura 5.18c) muestra la presencia de la vaguada extendiéndose en todo el Pacífico, desde 5°S hasta 40°S, lo cual difiere de las otras dos configuraciones anteriores. Además, se observa un sistema anticiclónico con núcleo sobre el oeste de Brasil (límite con Perú y Colombia) generando viento del este en el norte de Perú. Mediante esta configuración se observa divergencia en la región de la sierra sur oriental del Perú.

En el caso de los eventos húmedos, la circulación principal promedio en niveles altos en ambos grupos está asociado a la presencia de la Alta de Bolivia - AB con núcleo sobre

Bolivia. Este sistema genera advección de humedad desde la región amazónica hacia la región andina, así como divergencia sobre Perú y, por ende, situación favorable a la ocurrencia de precipitaciones. Asimismo, la presencia de una vaguada en el Pacífico también es destacable, sin embargo, con menor predominancia que en los eventos secos. Por último, se observa que la velocidad de los vientos sobre Perú en este nivel, en ambos grupos de los eventos húmedos, es menor que en los eventos secos.

La primera circulación de los eventos húmedos (Figura 5.18d) muestra la AB con núcleo en el centro de Bolivia, generando divergencia sobre el sur occidental de Perú y oeste de Brasil. Asimismo, se observa la intrusión de una vaguada del Hemisferio Norte en el Pacífico ecuatorial, la cual favorece el incremento de viento del noroeste desde los 120°W hasta los 90°W, que interactúa con la AB y genera una vaguada inclinada del noreste hacia el suroeste sobre el Pacífico frente a Perú. Este sistema es el que favorece al mal tiempo en la zona de los Andes.

La segunda circulación de los eventos húmedos (Figura 5.18e) muestra la AB con núcleo sobre el este de Bolivia, generando difluencia sobre el norte y centro oriental, así como sobre el sur occidental del Perú, acompañado de otra circulación anticiclónica al norte de esta AB. Asimismo, se observa también la presencia de una vaguada en el Pacífico sobre los 80°W-90°W, con un eje casi recto y alejado de Perú.

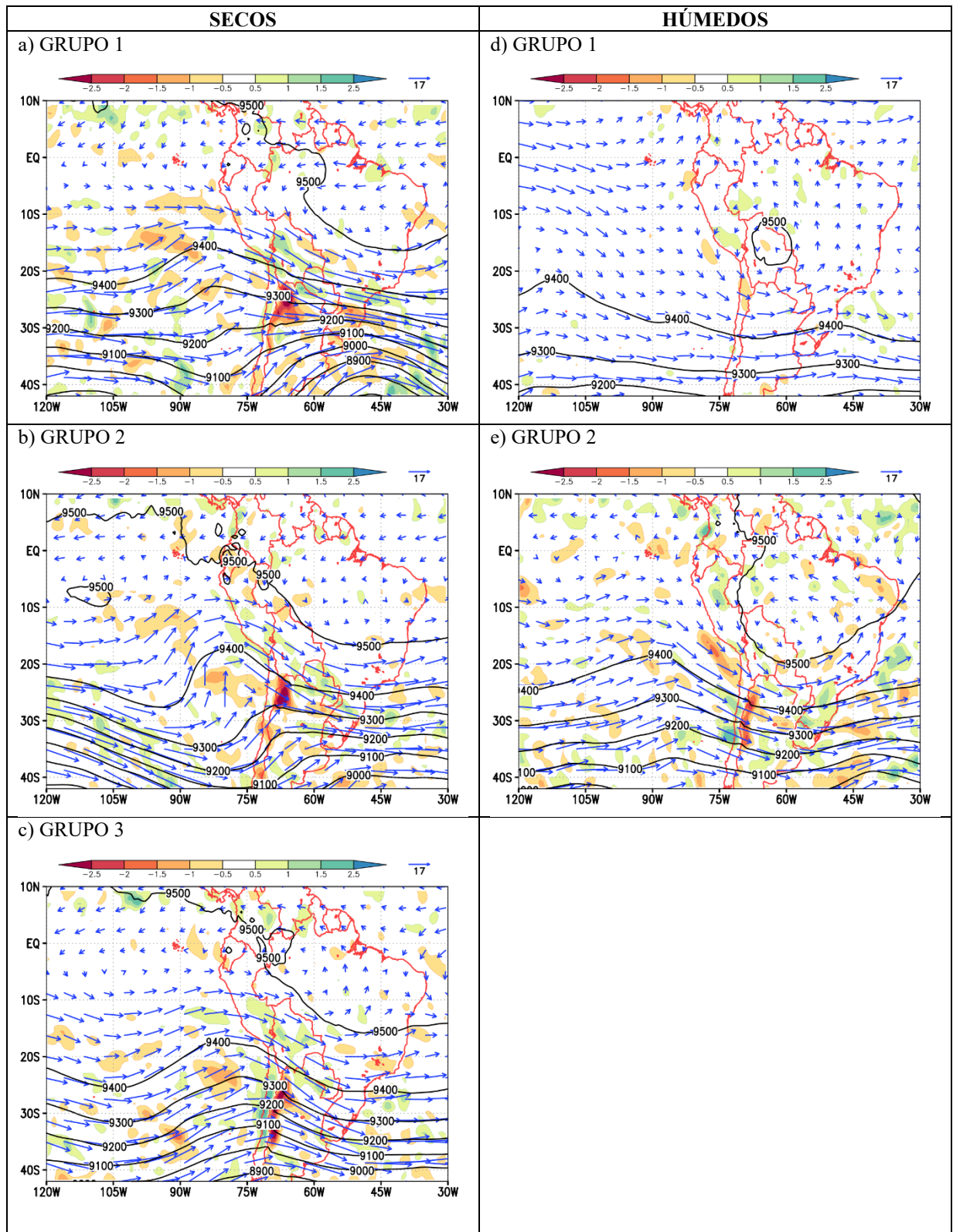


Figura 5.18.- Composiciones de altura geopotencial (mgp, líneas gruesas), viento (m.s-1, vectores) y divergencia en 300 hPa (s-1.10-5, sombreado) para a) Grupo 1 – secos, b) Grupo 2 – secos, c) Grupo 3 – secos, d) Grupo 1 – húmedos, e) Grupo 2 – húmedos.

5.6. Circulación Atmosférica Promedio – Niveles Medios

En niveles medios, la circulación de vientos, para los eventos secos de nevadas generalizadas (Figura 5.19), reflejan la circulación de los niveles altos, con la presencia de una vaguada en el Pacífico cerca a Perú, engranándose con la circulación anticiclónica al este, sobre la Amazonía, factor principal que permite la advección de humedad desde el este hacia los Andes peruanos. Sin embargo, en los eventos húmedos hay una ligera diferencia, puesto que, aunque la circulación de la AB se mantiene, la presencia de las vaguadas en el Pacífico no se manifiesta. Es notable que también en este nivel, la velocidad de los vientos sobre Perú es menor en los eventos húmedos que en los eventos secos.

La circulación promedio en el Grupo 1 de los eventos secos (Figura 5.19a) está caracterizada por la presencia de la vaguada en Pacífico, con eje ligeramente inclinado de noroeste hacia sureste, entre 95°W y 80°W y alcanzando 5°S como su posición más al norte. Esta vaguada se engrana con la circulación anticiclónica con núcleo sobre $53^{\circ}\text{W}-15^{\circ}\text{S}$, la cual permite la advección húmeda desde la Amazonía hacia los Andes.

En el Grupo 2 de los eventos secos (Figura 5.19b) la configuración promedio está marcada por la presencia de la Depresión Aislada en Niveles Altos – DANA con núcleo sobre $77^{\circ}\text{W}-22^{\circ}\text{S}$, la cual es una masa de aire frío en niveles medios y altos que favorece el ingreso de aire frío en los Andes generando inestabilidad, y por el tipo de circulación cerrada y ciclónica, asociada a la circulación anticiclónica al este, con núcleo sobre $55^{\circ}\text{W}-15^{\circ}\text{S}$, permite mayor transporte de humedad desde la Amazonía hacia los Andes que las otras dos configuraciones (Quispe y Avalos, 2006; Ramos et al., 2019; Vuille y Ammann, 1997). Asimismo, Quispe (2017) encontró que la presencia de esa DANA es uno de los patrones principales para la ocurrencia de nevadas generalizadas en el Perú, la cual se desarrolla e intensifica por la intensificación de la dorsal al oeste del sistema.

En el Grupo 3 de los eventos secos (Figura 5.19c) la mayor inclinación desde el noroeste hacia el noreste del eje de la vaguada sobre el Pacífico, así como la presencia de la circulación anticiclónica al este de esta, permite mayor transporte de humedad hacia los Andes nortes peruanos, ecuatorianos y colombianos, sin embargo, en la zona centro y sur

del Perú se tiene menos aporte de humedad con esta configuración, en comparación a los dos grupos anteriores.

En el primer grupo de los eventos húmedos (Figura 5.19d) se observa flujo de vientos del noreste hacia los Andes peruanos, generando presencia de relación de mezcla superior a 4g.kg^{-1} en 550 hPa sobre todo el Perú y Ecuador, así como en gran parte de Bolivia, en el sur de Colombia y al oeste de Brasil, esta disponibilidad de humedad, asociada a la circulación de niveles altos, permite desarrollar el ambiente necesario para el desarrollo de precipitaciones en los Andes.

El segundo grupo de los eventos húmedos (Figura 5.19e) también presenta disponibilidad de humedad sobre gran parte del Perú, Bolivia, Ecuador y Colombia, pero en menor área sobre Brasil, debido a la dirección e intensidad de los vientos del este sobre la Amazonía brasileña que transportaron mayor humedad hacia el este. En este grupo se observa la presencia de una vaguada en el pacífico, con eje sobre 90°W , la cual impide el ingreso de humedad en parte de la sierra occidental peruana.

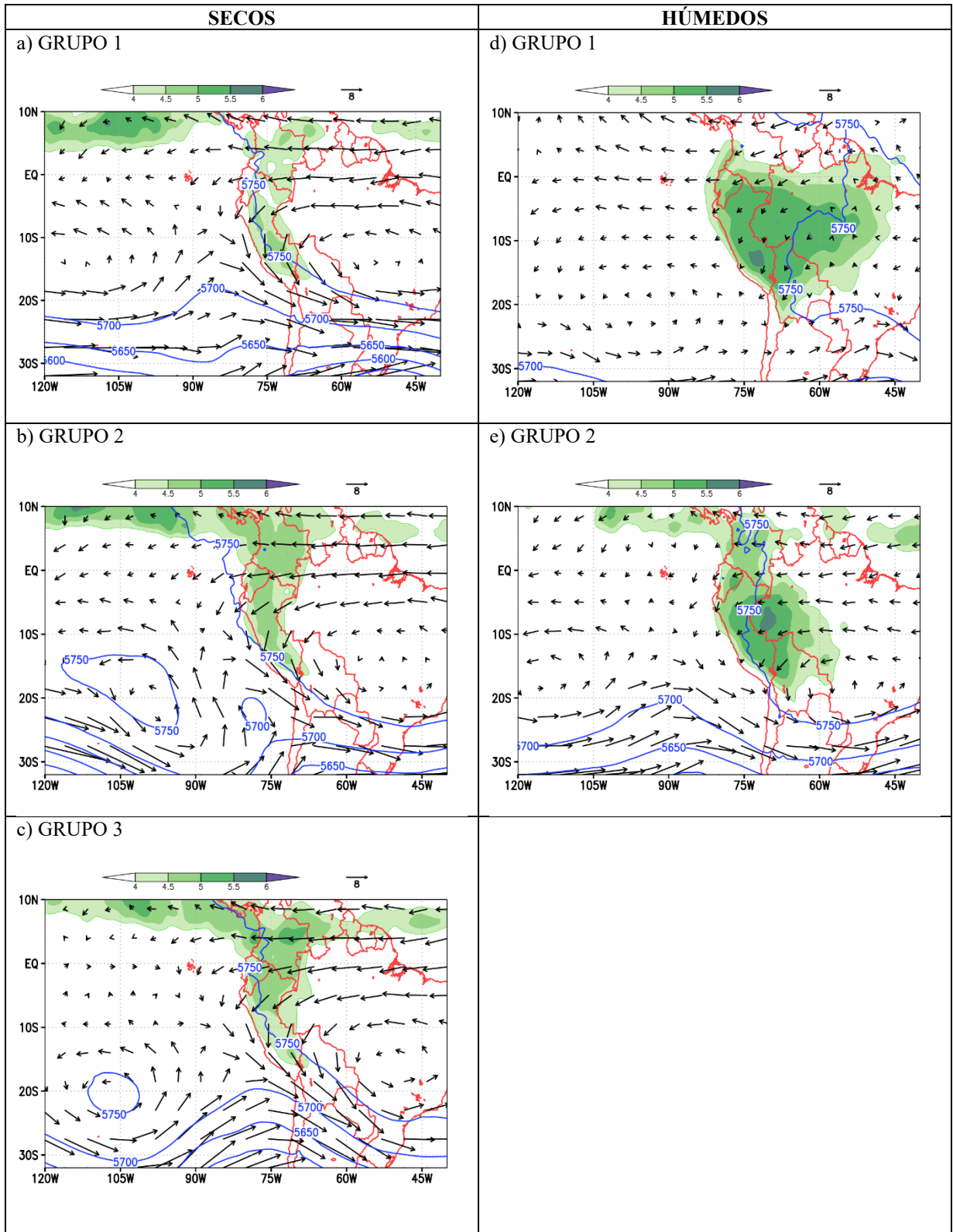


Figura 5.19.- Composiciones de altura geopotencial (m.gp, líneas gruesas), viento (m.s-1, vectores) en 500 hPa y relación de mezcla en 550 hPa (g.kg-1, sombreado) para a) Grupo 1 – secos, b) Grupo 2 – secos, c) Grupo 3 – secos, d) Grupo 1 – húmedos, e) Grupo 2 – húmedos.

5.7. Transporte Vertical de Vapor de Agua Promedio – Niveles Bajos

El transporte vertical integrado de vapor de agua en niveles bajos en los eventos secos (Figura 5.20) manifiesta un claro transporte de humedad desde el este de Brasil hasta el norte de Perú, por el contrario, en los eventos húmedos ese transporte de humedad está asociado a los alisios del noreste del Atlántico, los cuales configuran claramente el jet de bajos niveles – LLJ del norte al este de la Cordillera de los Andes.

En el Grupo 1 de los eventos secos (Figura 5.20a), el transporte de humedad hacia Perú en niveles bajos viene directamente del este de Brasil. No se forma el LLJ. El Grupo 2 de los eventos secos (Figura 5.20b) presenta un comportamiento similar con transporte de humedad del este hacia Perú, sin embargo en este grupo se configura ligeramente el LLJ, hecho que permite transportar humedad hacia el sur de continente, y por ende mayor apoyo para las nevadas en el centro y sur. El grupo 3 de los eventos secos (Figura 5.20c) muestra un transporte más marcado del este hacia la cordillera sobre Perú, formando el LLJ con mayor intensidad, hecho que permite mayor transporte de humedad hacia el centro y sur de Perú.

En el primer grupo de los eventos húmedos (Figura 5.20d) el transporte de humedad desde los alisios del noreste del Atlántico, así como la formación del LLJ al este de la cordillera es notable, transportando humedad necesaria hacia los Andes peruanos. En el caso del segundo grupo de los eventos húmedos (Figura 5.20e) también se observa el transporte de humedad desde los alisios del noreste del Atlántico hacia los Andes, formando el LLJ sobre Bolivia – Paraguay y norte de Argentina, pero y no al este de los Andes peruanos. Esto permite menor aporte de humedad de niveles bajos hacia los Andes que en el Grupo anterior.

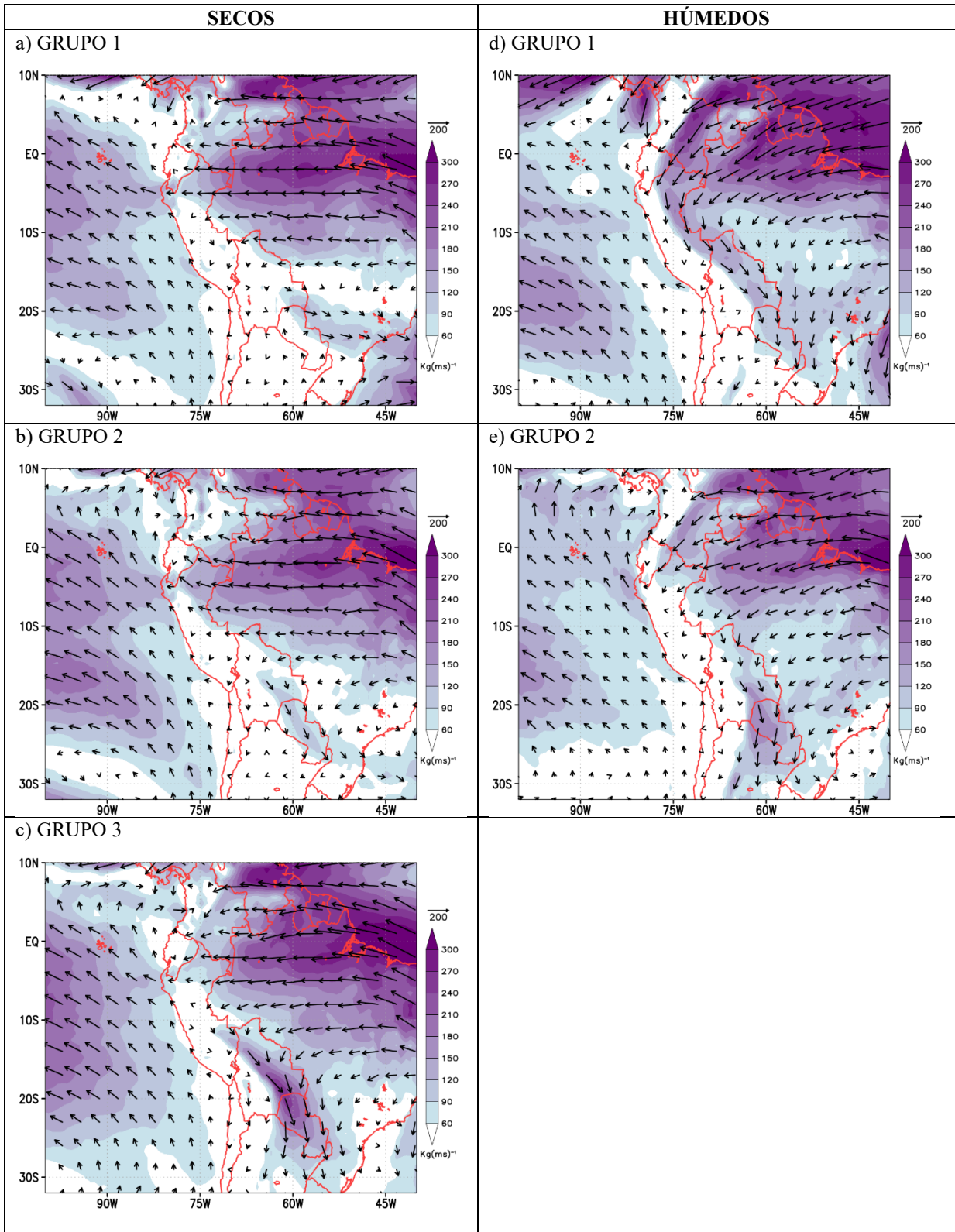


Figura 5.20.- Composiciones de transporte integrado vertical de vapor de agua entre 1000 y 700 hPa (kg.(m.s)-1, vectores y sombreado) para a) Grupo 1 – secos, b) Grupo 2 – secos, c) Grupo 3 – secos, d) Grupo 1 – húmedos, e) Grupo 2 – húmedos.

5.8.Acumulado de Nieve Promedio en cada Grupo

El acumulado de nieve promedio en los eventos secos tiene una extensión mayor que en los eventos húmedos (Figura 5.21), puesto que el valor superior a 0.1 cm de nieve alcanza incluso todo las regiones altas del departamento de Ayacucho y mayor extensión horizontal en la sierra central.

Los eventos que fueron clasificados dentro del Grupo 1 – Secos (Figura 5.21a) acumularon más de 0.1 cm de nieve en todas las zonas de la sierra occidental de las regiones comprendidas desde el sur de Lima hasta el sur de Tacna, así como la región oriental de Puno y Cusco. Además, se alcanzó acumulados superiores a 0.5 cm sobre Huancavelica, parte del sur de Lima y Junín, así como sobre el límite entre Apurímac, Ayacucho y Arequipa, además de las regiones límite entre Arequipa y Puno. También se alcanzaron acumulados promedios superiores a 1cm sobre la región de la sierra oriental, límites entre Cusco y Arequipa.

En el Grupo 2 de los evento secos (Figura 5.21b), la extensión de área con acumulados superiores a 0.1 cm es mayor que el Grupo anterior, puesto que abarca mayor área en sierra central (principalmente sobre el sur de Áncash y el oeste de Pasco) y en sierra sur (principalmente el sur de Cusco); sin embargo alcanza acumulados superiores a 0.5 cm solo en áreas puntuales del sur de Puno, Tacna, Cusco y Huancavelica, principalmente.

Los eventos del Grupo 3 – Secos (Figura 5.21c) acumularon nieve en un área más generalizada de la sierra sur, pero menos extensa en la sierra centro que el grupo 2, pero más parecida al grupo 1. Se observa también que los acumulados superiores a 0.5 cm coinciden en áreas de la sierra sur con el Grupo 1, pero disminuyen en la sierra centro.

Por otro lado, aunque los eventos húmedos suelen ser más frecuentes, son menos intensos, puesto que registran áreas más ceñidas de acumulados superiores a 0.1 cm, lo cual concuerda con lo encontrado por Quispe (2017). En el Grupo 1 – Húmedos (Figura 5.21d), la sierra centro solo alcanza un área estrecha que comprende desde el sur de Áncash, hasta

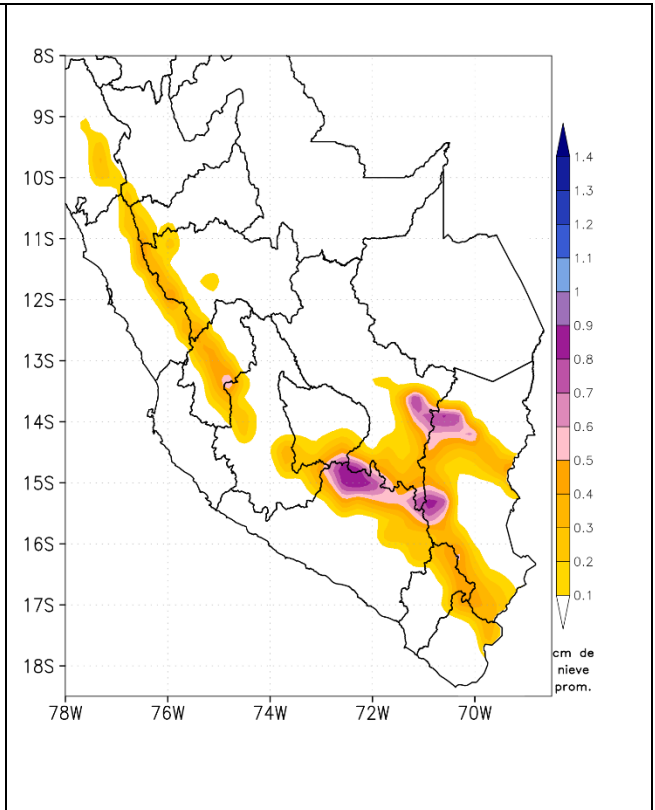
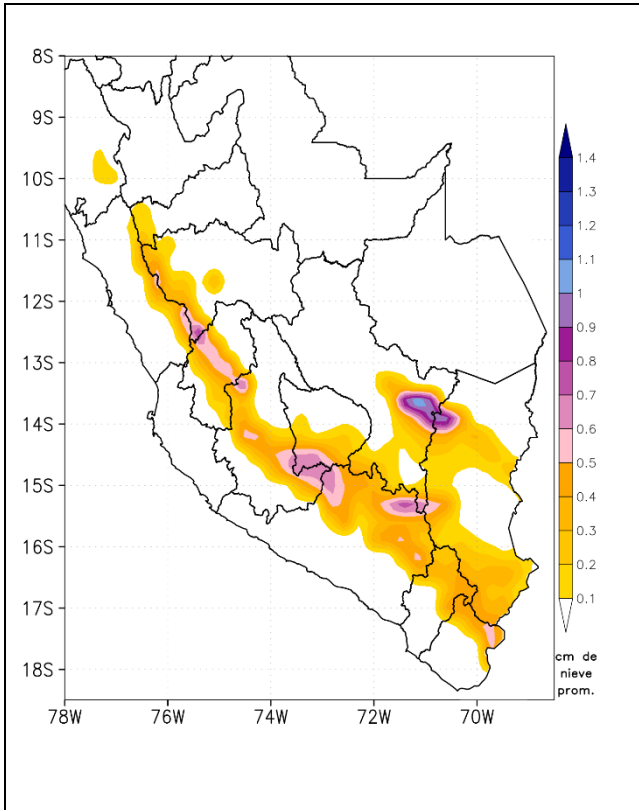
el norte de Ayacucho. La sierra sur sí comprende, tanto el occidente como el oriente, pero con acumulados máximos promedios de 0.9 cm.

Los eventos del Grupo 2 – Húmedos (Figura 5.21e) presentan menor extensión, tanto en sierra centro, ya que no alcanzan a presentarse en Ayacucho, y en la sierra sur solo alcanzan acumulados importantes en la región occidental, mas no en la oriental.

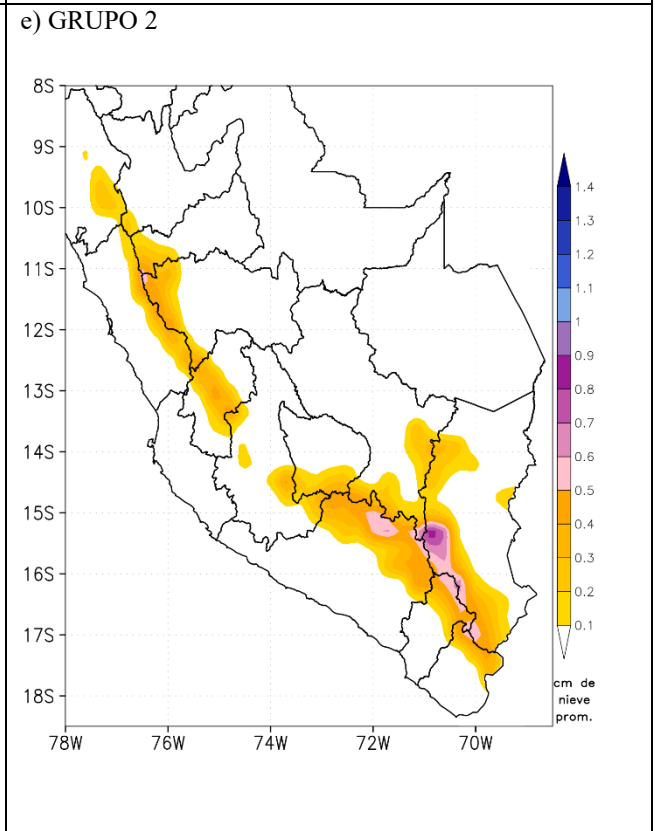
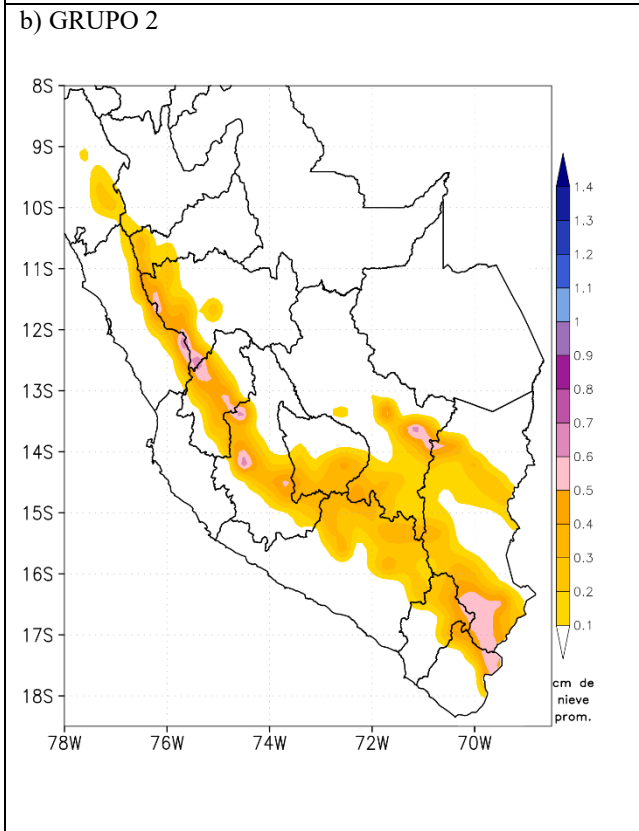
Todas los acumulados de los 5 grupos de eventos difieren en extensión e intensidad debido a las superposiciones de los patrones sinópticos en los diversos niveles troposféricos. Es así que, en el caso de los eventos secos, la presencia de la vaguada aproximándose al sur de Perú permitió la acumulación de nevadas en la región sur oriental en todos los grupos, y una ligera disminución en la intensidad, en general, en los eventos con DANA (Grupo 2 - secos), pero con intensificación al sur occidental (límite entre Puno y Tacna con acumulados superiores a 0.5 cm).

Por el contrario, en el caso de los eventos húmedos, la mejor configuración de la AB en niveles altos, asociada a una mayor área con disponibilidad de humedad en niveles medios y la formación del LLJ al este de la cordillera peruana permite mayor extensión e intensidad de los eventos en el Grupo 1 que en el Grupo 2.

SECOS	HÚMEDOS
a) GRUPO 1	d) GRUPO 1



b) GRUPO 2



c) GRUPO 3

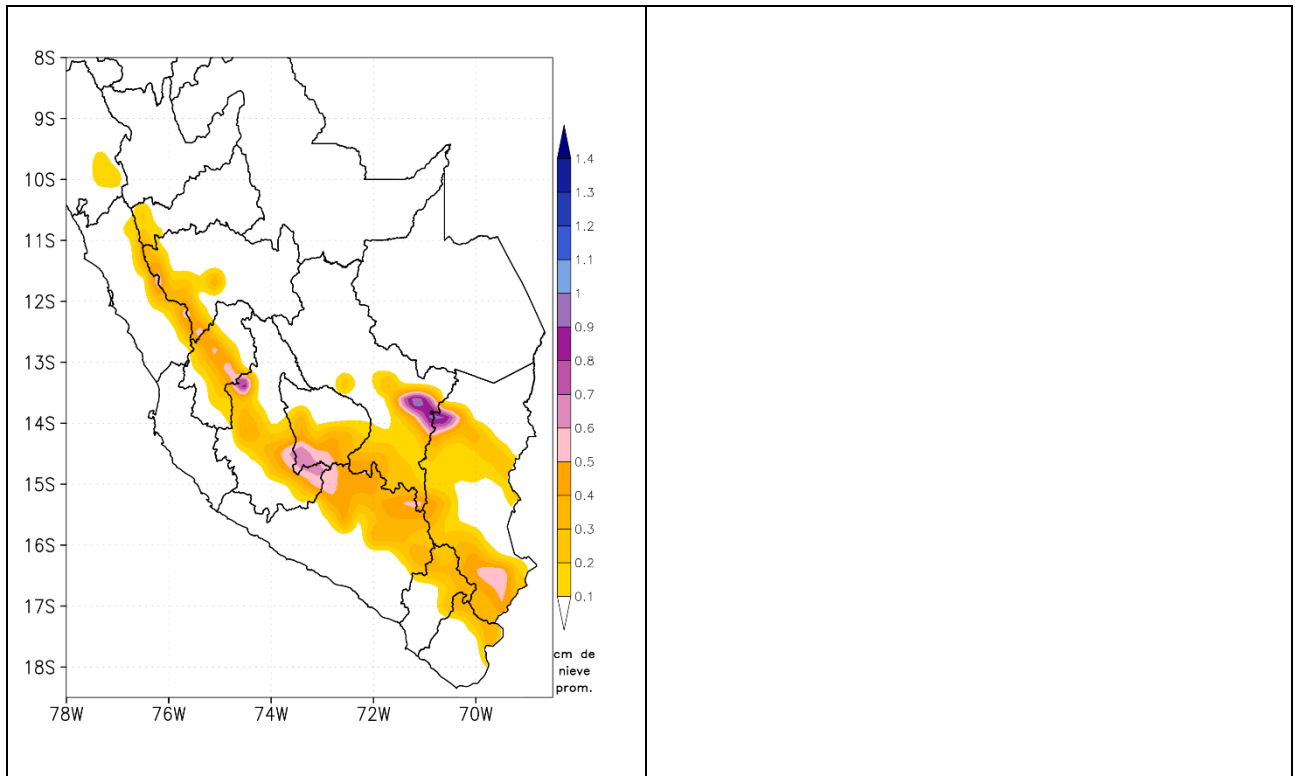


Figura 5.21.- Composiciones de nieve acumulada en promedio (cm, sombreado) para a) Grupo 1 – secos, b) Grupo 2 – secos, c) Grupo 3 – secos, d) Grupo 1 – húmedos, e) Grupo 2 – húmedos.

6. CONCLUSIONES

Del objetivo 1, realizar un análisis de frecuencia de nevadas para el territorio nacional en el periodo 1995-2018, se concluye que

6.1. En los Andes peruanos, existe mayor ocurrencia de nevadas en el verano austral (diciembre-marzo), y con un máximo en la zona central, llegando a duplicar la cantidad de días con nevadas de la región sur.

6.2. Desde el inicio del análisis, la ocurrencia de nevadas exhibe, en general, un incremento gradual con el paso de los años, con las mayores frecuencias en los años precedidos por condiciones “La Niña” como el 2012, y con menores frecuencias en los años precedidos por “El Niño” como el 2016. Este mismo incremento se observó en las emergencias reportadas por INDECI.

Del objetivo 2, actualizar los mapas mensuales de la frecuencia promedio de nevadas en el Perú en el periodo 1995-2018, se concluye que:

6.3. Las nevadas en el Perú, ocurren en la sierra centro y sur, siendo las más frecuentes en la región central, con un máximo en febrero alcanzando hasta 7 nevadas por mes en la estación de Yauli – Junín (4 100 m s.n.m.). Asimismo, en la región sur occidental, se observó un incremento en la frecuencia de nevadas, en relación al estudio anterior de Bonshoms (2018).

6.4. Los meses de menor frecuencia de nevadas, en promedio, fueron mayo y junio. Por otro lado, en julio se presentan nevadas en regiones con altitudes menores, llegando hasta los 3400 m s.n.m., principalmente en la región sur occidental.

Del objetivo 3, identificar los principales patrones sinópticos de circulaciones atmosféricas promedio que favorecen la ocurrencia de nevadas generalizadas en el Perú.

6.5. Las nevadas generalizadas en el Perú tienen dos máximos, uno en verano (diciembre - febrero) y, el otro, en invierno (julio - agosto), porque en este último ocurren los eventos más intensos.

6.6. Existen 5 grupos de circulaciones atmosféricas que generan nevadas generalizadas en el Perú. Los tres primeros están asociados a meses secos (abril - setiembre), y se encuentran caracterizados por la presencia de una vaguada en el Pacífico cerca al Perú, aportando divergencia en los Andes del centro y sur. Estos grupos de circulaciones se diferencian por la posición del eje de la vaguada y uno de ellos muestra la configuración de la DANA. Las otras dos circulaciones están asociadas a meses húmedos (octubre – marzo), y caracterizados por la presencia de la Alta de Bolivia con núcleo sobre Bolivia y generando divergencia en los Andes peruanos. Para la ocurrencia de nevadas generalizadas debe existir aporte de humedad, principalmente en niveles medios, desde la Amazonía hacia los Andes.

Del objetivo 4, analizar la distribución espacial del acumulado de nieve promedio en cada patrón sinóptico identificado, se concluye que:

6.7. Las nevadas generalizadas que ocurren en los meses secos son más intensas puesto que alcanzan menores altitudes, y los eventos que ocurren en los meses húmedos se presentan en regiones más al norte llegando a registrarse hasta la zona central de Áncash.

6.8. Todos los eventos de nevadas generalizadas alcanzan los andes del centro y sur, a excepción de los eventos que ocurren con circulaciones del grupo 2 de los meses húmedos, los cuales no generan nevada en la región sur oriental.

7. RECOMENDACIONES:

7.1. Se recomienda implementar un sistema de medición de nevadas con los observadores del SENAMHI y también con los proyectos en los Andes peruanos, como TAMBOS, para tener mejores análisis en este tipo de investigaciones.

7.2. Complementar estudios similares con imágenes de satélite MODIS o GOES-16.

8. AGRADECIMIENTOS

A las meteorólogas Kelita Quispe, Sara Olivares y Rosamaría Pérez por la recopilación y organización de los datos de nevadas registrados en las estaciones convencionales.

9. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Las definiciones del presente glosario han sido extraídas y en algunos casos, ligeramente adaptadas, de:

1. Glosario Global Cryosphere Watch

(<http://globalcryospherewatch.org/reference/glossary.php>)

2. Glosario American Meteorological Society

(http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page).

3. Un Buen Clima: Glosario de Términos Meteorológicos

(<http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/255>)

Albedo: Es un parámetro en la cual el porcentaje de la radiación que refleja cualquier superficie respecto a la radiación solar entrante. Dependiendo de la superficie puede mostrar un incremento en el albedo respecto al incremento del ángulo cenital solar.

Alta de Bolivia: Es una circulación anticlónica de nivel superior de la tropósfera (~ 200mb, pero puede ser observado hasta en niveles medios), que se desarrolla durante el verano sobre el altiplano boliviano, una región de meseta alta de los Andes centrales. La posición e intensidad de esta celda de alta presión se ha relacionado con la variación estacional en la precipitación amazónica, los episodios húmedos y secos sobre el Altiplano, la generación de vientos ciclónicos de 200mb y las variaciones interanuales en el nivel del lago Titicaca (ubicado en el Altiplano).

Altitud: Distancia vertical de un nivel, un punto o un objeto medido desde la superficie media del mar. En Perú utilizamos el sistema métrico por lo que las unidades de altitud se expresan como metros sobre el nivel del mar (msnm).

Congelación: Es el paso del agua de un estado líquido a un estado sólido, debido a temperaturas inferiores a los 0°C.

Cota de nieve: es la altitud por encima de la cual la precipitación es en forma de nieve.

Criósfera: Componente del sistema terrestre compuesto por aquellas zonas de la superficie del planeta en las que el agua se encuentra en estado sólido, ya sea en forma de nieve, hielo, glaciares o suelo helado. Generalmente se asocia la criósfera a las regiones polares, sin embargo, está presente también en las altas cumbres de las regiones tropicales y ecuatoriales del planeta. Las regiones frías del planeta tienen una gran importancia en la regulación del clima mundial, pero también gran relevancia a nivel regional y local. Además, muchos de las componentes de la criósfera se consideran importantes indicadores del cambio climático por su alta sensibilidad a cambios en la temperatura.

Depresión Aislada de Niveles Altos - DANA: Sistema de baja presión fría o baja segregada o cerrada en los niveles altos que se ha separado de una vaguada en altura y se ha desplazado fuera de la corriente del oeste básico y se encuentra hacia el ecuador de esta corriente.

Divergencia: La expansión o extensión de un campo vectorial; también, una medida precisa de la velocidad a la que el flujo adyacente diverge a lo largo de un eje orientado normal al flujo en el punto en cuestión. Lo contrario de la convergencia.

El Niño – Oscilación Sur (ENSO): Ciclo natural global del clima, de interacción océano-atmósfera, que ocurre en el Océano Pacífico. Las intensidades de sus fases inducen cambios en los patrones normales de lluvia, en la temperatura y en los sistemas de presión de la región tropical del Océano Pacífico, que afecta el clima del mundo entero.

Glaciar: Es todo cuerpo de hielo de diferentes formas y dimensiones que, ubicado sobre diferentes relieves (cumbres, mesetas, cornisas, laderas, fondos de valle), presenta distintos contenidos de material detrítico tanto interior como en superficie (1), registra diferentes y cambiantes velocidades de flujo (2), se comporta como un cuerpo plástico o semi-plástico, y su permanencia puede alcanzar desde varias décadas a varios miles de años (3). Además, puede presentarse estático o fluir según sea la pendiente, e incluso contra ella en forma local por compresión y empuje.

Jet: Vientos relativamente fuertes se concentraron dentro de una corriente estrecha en la atmósfera. Si bien este término se puede aplicar a cualquier corriente de este tipo, independientemente de la dirección (incluida la vertical), se le consideran normalmente

como una corriente en chorro casi horizontal de vientos máximos incrustados en las latitudes medias, en el caso del Jet de bajos niveles este se desplaza en baja atmosfera.

Sistema climático: El sistema climático es el sistema de mayor complejidad consistente en 5 componentes básicos: la atmósfera, la hidrosfera, la criósfera, la litosfera y la biosfera, y sus interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona con el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna y debido a forzamientos externos tales como erupciones volcánicas, variaciones solares y factores antropogénicos tales como la modificación de la composición de la atmósfera y el cambio de uso de la tierra.

Vaguada: Un área elongada de baja presión atmosférica. Lo opuesto a una dorsal. El eje de una vaguada es la línea de vaguada, y este término es usado comúnmente para distinguir la condición previa a la circulación cerrada de una baja. Una vaguada en niveles altos puede estar asociada con una baja en niveles bajos.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [AMS - glossary of meteorology] American Meteorological Society, 2015. Glossary of Meteorology [online], Available at: http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page. [Accessed 28/11/2020].
- Andressen, L. et Al. 2007. Regímenes climáticos del altiplano sur de Bolivia: una región afectada por la desertificación. Rev. Geográfica venezolana. 11-32.
- Blunden, J., and D. S. Arndt, 2019: State of the Climate in 2018. Bull. Amer. Meteor. Soc., 100, Si-S306, <https://doi.org/10.1175/2019BAMSSStateoftheClimate.1>.
- Bonshoms, M., Quispe, K., and Quispe, N. 2018. Estudio de la frecuencia de nevadas en el Perú. 56 pp. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/198>
- Copernicus Climate Change Service (C3S). 2017. ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), *date of*

access. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>.DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.

- Cordero, R.R., Asencio, V., Feron, S., Damiani, A., Llanillo, P., Sepulveda, E., Jorquera, J., Carrasco, J. & Casassa, G. 2019. Dry-Season Snow Cover Losses in the Andes (18°–40°S) driven by Changes in Large-Scale Climate Modes. *Sci Rep* 9, 16945. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53486-7>
- De la Torre, 2006, L. et Al, *Etnobotánica en los Andes del Ecuador*, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, 246-267.
- Garreaud, R. 2000. Intraseasonal variability of moisture and rainfall over South American Altiplano. *American Meteorological Society*. 3337 – 3346.
- Garreaud, R. 2009. The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*. 22. 3 – 11.
- IGAC. 1989: *Atlas básico de Colombia*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá pp. 50-66.
- Hastie, T., Tibshiriani, R. and Friedman, J. 2008. *The Elements of Statistical Learning*. Second Edition. Springer. 764pp.
- Lenters, J and Cook, K. 1998. Summertime precipitation variability over South America: Role of the large-scale circulation. *Monthly Weather Review*. 127. 409 – 431.
- MARN, 2003, *La precipitación en Venezuela y su relación con el sistema climático*, Caracas, 72.
- Ministerio del Ambiente - MINAM. 2007, *Los Climas del Perú*, 10.
- Montini, T.; Jones, C. and Carvalho, L. 2019. The South American low-level jet: A new climatology, variability, and changes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 1200–1218. <https://doi.org/10.1029/2018JD029634>
- Quispe, K. 2017. *Patrones sinópticos de una dana asociados a la ocurrencia de nevadas en la sierra central y sur del Perú*. Tesis de Ingeniera Meteoróloga. 105 pp. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3632>
- Quispe, N and Avalos, G. 2006. Intense snowstorm in the southern mountains of Peru associated to the incursion of cut-off low-pressure systems at upper level. *Proceedings of 8 ISDHMO, Foz do Iguação, Brazil, April 14-28, INPE*. 1945-1948.

- Quispe, N. 2014. Evaluación climática de la depresión aislada en niveles altos (DANA) sobre Sudamérica y océanos adyacentes y estudio de un caso en el Pacífico Oriental.
- Ramos, I., Aliaga – Nestares, V., and Castro, A. 2019. State of the Climate 2018. SIDEBAR 7.2: Heavy snowfalls in the Peruvian Andes: the wettest winter of the last 19 years. S203-S204. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/276>
- Saavedra, Freddy. Et al (2018). Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000-2016.
- Sagredo E.A, Lowel T.V. 2012. Climatology of Andean glaciers: A framework to understand glacier response to climate change.
- Salaverry, J. 2006. Macro-ecología de los Andes peruanos. Instituto Francés de Estudios Andinos. 312 p.
- SINPAD – INDECI. 2020. SINPAD v2.0. <http://sinpad.indeci.gob.pe/sinpad2/faces/public/portal.html>
- [SENAMHI - Un buen clima: glosario de términos meteorológicos] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Un buen clima: glosario de términos meteorológicos, Disponible en: <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/255>. [Accessed 28/11/2020].
- Tierra de vientos, Los Andes Argentinos, Geografía, Rev. Dig. 2011.
- Vuille, M., Ammann, C. 1997. Regional snowfall pattern in the high arid Andes (South America). Climatic Change 36, 413-423.
- [WMO - Cryosphere Glossary] World Meteorological Organization. Cryosphere Glossary, Available at: <http://globalcryospherewatch.org/reference/glossary.php>. [Accessed 28/11/2020].
- Zamuriano, Marcelo. Et al. 2019. Synoptic and Mesoscale atmospheric features associated with an extreme snowstorm over the Central Andes in August 2013.

11. ANEXOS

Anexo 1.- Frecuencia mensual y anual de los eventos de nevadas generalizadas en el Perú.

AÑO - MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	TOTAL ANUAL
1995	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
1996	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1997	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2
1998	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2002	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2004	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	4
2005	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2
2006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
2008	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
2009	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3
2010	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2011	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2	5
2012	3	4	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	11
2013	2	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	5
2014	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3
2015	2	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	5
2016	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	2
2017	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	4
2018	0	0	0	0	0	1	2	1	0	1	1	0	6
TOTAL MENSUAL	10	6	3	0	2	4	8	8	5	4	3	6	

Anexo 2.- Número recomendado de grupos en cada tipo de eventos: a) Eventos Secos. b) Eventos Húmedos

