

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS



**“INFLUENCIA DE EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS) EN LA
OCURRENCIA DE HELADAS EN EL ALTIPLANO PERUANO”**

Presentada por:

Cristina Pamela Davila Arriaga

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

**Lima – Perú
2016**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“INFLUENCIA DE EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS) EN LA
OCURRENCIA DE HELADAS EN EL ALTIPLANO PERUANO”**

Presentada por:

Cristina Pamela Davila Arriaga

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Mestre. Jerónimo García Villanueva
PRESIDENTE

Ing. Franklin Unsihuay Tovar
MIEMBRO

Ing. Wilmer Pulache Vílchez
MIEMBRO

Mg. Sc. Ever Menacho Casimiro
ASESOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres por el apoyo brindado para culminar los años de formación universitaria y sobre todo por los ánimos para finalizar esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que, de alguna u otra forma, me ayudaron a comenzar, seguir y terminar este trabajo de estudio.

A mi familia, por toda la paciencia desde que terminé la universidad hasta culminar esta etapa. Por brindarme mi espacio y entenderme en los momentos de encierro para la redacción de este trabajo, sobre todo a mi hermana Patricia que me ayudó en los trámites en la universidad.

A mi asesor, el profesor Ernesto Ever Menacho Casimiro, por apoyarme en los trámites administrativos realizados a distancia para la aprobación del proyecto de tesis.

Al profesor Jerónimo García Villanueva por su ánimo y paciencia en las correcciones del proyecto y tesis.

A Eleazar Chuchón Angulo que siempre me reiteraba la importancia de culminar este trabajo.

A Alexander Tomo Tique por la asistencia internacional en algunas técnicas usadas en el trabajo.

A todos ellos y a mis amistades cercanas, gracias por la confianza y deseos que todo resulte favorable.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	VI
ABSTRACT	VIII
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 El Niño Oscilación del Sur (ENOS)	3
2.1.1 Características océano – atmosféricas del ENOS	4
2.1.2 Indicadores de eventos ENOS	6
2.1.3 Influencia de eventos ENOS en el Perú	10
2.2 Heladas en la región peruana	13
2.2.1 Características atmosféricas durante las heladas en el Perú	15
2.2.2 Relación entre eventos ENOS y las heladas en el Perú	16
III. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1 Descripción de los datos	18
3.2 Metodología	20
3.2.1 Evaluación del comportamiento de la temperatura mínima del aire	20
3.2.2 Relación entre la temperatura mínima del aire y la frecuencia de helada	21
3.2.3 Determinación de las anomalías de la temperatura mínima del aire correspondiente a los datos observados	23
3.2.4 Determinación de los patrones más relevantes de la temperatura mínima del aire ..	25
3.2.5 Análisis de correlación entre anomalías de TSM del Océano Pacífico y temperatura mínima del aire	26
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	28
4.1 Análisis exploratorio de los datos observados	28
4.2 Temperatura mínima del aire y frecuencia de heladas	35
4.3 Anomalías de los datos observados de temperatura mínima del aire	39
4.4 Patrones relevantes de la temperatura mínima del aire	41
4.5 Análisis de correlación entre TSM y temperatura mínima del aire	42
V. CONCLUSIONES	54
VI. RECOMENDACIONES	56
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
VIII. ANEXOS	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Superficie agropecuaria expuesta a heladas. FUENTE: Comunidad Andina (2009).....	14
Tabla 2: Información geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas.....	19
Tabla 3: Métodos utilizados en el análisis exploratorio.	21
Tabla 4: Promedios y valores del percentil 10 para cada estación meteorológica. DEF (verano), MAM (otoño), JJA (invierno) y SON (setiembre).....	28
Tabla 5: Coeficientes de Correlación entre temperatura mínima y frecuencia de heladas..	36
Tabla 6: Variancia explicada de los componentes principales.	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Características océano – atmosféricas en el Pacífico ecuatorial en (a) condiciones normales, (b) El Niño y (c) La Niña. Adaptado de http://geochange.er.usgs.gov	5
Figura 2: Representación de las regiones El Niño en el Océano Pacífico ecuatorial. FUENTE: NOAA.	6
Figura 3: Período de anomalías de TSM de la región Niño 3.4. Umbral de “El Niño” (línea roja) y umbral de “La Niña” (línea azul). FUENTE: National Center for Environmental Information – NOAA.	7
Figura 4: Serie de tiempo de las anomalías de radiación de onda larga (OLR). FUENTE: Climate Prediction Center – NOAA.	8
Figura 5: Localización de los puntos de Tahití y Darwin sobre el Pacífico tropical este y oeste. FUENTE: NOAA (www.climate.gov)	9
Figura 6: Mapa de ubicación del Perú con la topografía y regiones climáticas.	14
Figura 7: Perfil vertical de la anomalía de composición de la velocidad vertical omega (10^{-2} Pa s ⁻¹ – sombreado) y humedad específica (g kg ⁻¹ – líneas) a las 00:00 UTC para el periodo 1971 – 2005 durante la ocurrencia de heladas en la Cordillera Peruana. FUENTE: Davila (2016).	16
Figura 8: Mapa del área de estudio y ubicación espacial de las estaciones meteorológicas (puntos em amarillo).	19
Figura 9: Representación espacial del promedio de la temperatura mínima del aire para el periodo 1971 – 2005 para la estación de verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d).	29
Figura 10: Representación espacial del percentil 10 de la temperatura mínima del aire para el periodo 1971 – 2005 para la estación de verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d).	30
Figura 11: Histogramas de temperatura mínima correspondientes a la estación de verano.	32
Figura 12: Histogramas de temperatura mínima correspondientes a la estación de invierno.	33
Figura 13: Diagramas box-plot de temperatura mínima correspondientes a la estación de verano (a) e invierno (b).	34

Figura 14: Diagrama de dispersión entre la temperatura mínima del aire y frecuencia de heladas.	35
Figura 15: Mapas de frecuencia relativa de heladas durante el periodo 1971 – 2005 para cada estación del año: (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.	37
Figura 16: Mapas de intensidad de heladas durante el periodo 1971 – 2005 para cada estación del año: (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.....	38
Figura 17: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Ayaviri. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Ayaviri.	40
Figura 18: (a) Primera componente principal (CP1). (b) Segunda componente principal (CP2). Los valores de los contornos representan los valores de los autovectores.	42
Figura 19: Patrón de correlación entre la temperatura mínima del aire en Puno y la TSM de la región Niño 3.4 para el periodo 1979 – 2005 considerando todo el año (a), meses de verano (b) y meses de invierno (c).	44
Figura 20: Desarrollo temporal de los eventos ENOS entre los años inicial y final considerados en su nombramiento.	45
Figura 21: Mapas de anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) sobre el océano Pacífico para los meses de verano del año 1982 (arriba) y 1983 (debajo). FUENTE: SENAMHI.....	46
Figura 22: Mapas de anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) sobre el océano Pacífico para los meses de invierno del año 1982 (arriba) y 1983 (debajo). FUENTE: SENAMHI.....	47
Figura 23: Intensidades de heladas en los meses de verano (a) e invierno (b) durante una fase positiva del evento ENOS (1° año: 1982, 2° año: 1983).....	48
Figura 24: Mapas de anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) sobre el océano Pacífico para los meses de verano del año 1988 (arriba) y 1989 (debajo). FUENTE: SENAMHI.....	50
Figura 25: Mapas de anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) sobre el océano Pacífico para los meses de invierno del año 1988 (arriba) y 1989 (debajo). FUENTE: SENAMHI.....	51
Figura 26: Intensidades de heladas en los meses de verano (a) e invierno (b) durante una fase negativa del evento ENOS (1° año: 1988, 2° año: 1989).....	52

Figura 27: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Desaguadero.	62
Figura 28: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Huaraya-Moho.....	63
Figura 29: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Ilave.	64
Figura 30: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Juli.	65
Figura 31: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Lampa.....	66
Figura 32: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Muñani.....	67
Figura 33: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Pampahuta.	68
Figura 34: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Puno.....	69
Figura 35: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Huancane.	70

RESUMEN

DAVILA, A. C. P. **Influencia de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en la ocurrencia de heladas en el Altiplano Peruano.** 2016. Tesis – Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, 2016.

Las fluctuaciones en los patrones de circulación atmosférica global, asociados a los cambios en la temperatura superficial del mar (TSM) en el Océano Pacífico, son conocidas como eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Estos eventos influyen en el comportamiento de la temperatura y precipitación, y existen varios índices de monitoreo utilizados para conocer su desarrollo e impactos que podría originar. El objetivo principal de este trabajo fue determinar la influencia del ENOS en la ocurrencia de heladas en el Altiplano peruano mediante el análisis de la temperatura mínima del aire en el departamento de Puno. Para ello, se calcularon las anomalías de los datos observados, sin tendencia y ciclo anual, y se aplicó el análisis de componentes principales (ACP) para obtener los patrones más relevantes de la variabilidad. Adicionalmente, se utilizó el análisis de correlaciones entre los datos en formato grilla de la temperatura mínima de Puno y la TSM de la región Niño 3.4. El análisis exploratorio de los datos observados mostró temperaturas mínimas más frías en los meses de invierno, seguido de los meses de otoño, primavera y verano. La parte occidental de Puno es la zona más fría del departamento con la posibilidad de ocurrencia de eventos extremos. La ocurrencia de heladas está inversamente relacionada con la temperatura mínima del aire; es decir, lugares donde hay menores valores de temperatura mínima, se tiene una mayor frecuencia de heladas. En el invierno, se presentan las mayores frecuencias y heladas más intensas; el otoño muestra menores frecuencias de heladas que la primavera, pero con mayor intensidad que la misma estación. Las dos primeras componentes principales explican el 71.9% de la variancia total de los datos (61.9% la primera y 10% la segunda). La primera componente manifiesta un mismo patrón en todo el departamento; mientras que la segunda componente presenta un patrón de dipolo entre el sur y la parte centro-norte de Puno. El patrón espacial del análisis de correlación, considerando todos los datos del año, está relacionado con la segunda componente principal: existen correlaciones positivas en la parte sur y correlaciones negativas en la parte centro-norte del área de estudio. Sin embargo esta correlación no presenta significancia estadística al 95%. El análisis de

correlación separando verano e invierno está relacionado con la primera componente, con valores positivos de correlación para el verano y negativos para el invierno. Por tanto, la fase positiva (negativa) del ENOS, asociada al aumento (disminución) de la TSM en la región Niño 3.4, está relacionada con una menor (mayor) ocurrencia de heladas en Altiplano peruano durante el verano (invierno) debido al aumento (disminución) de las temperaturas mínimas del aire.

Palabras claves: Heladas, temperatura mínima del aire, ENOS, temperatura superficial del mar, Altiplano peruano, análisis de componentes principales, análisis de correlación.

ABSTRACT

DAVILA, A. C. P. **Influence of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) in the occurrence of frost in the Peruvian Altiplano.** 2016. Thesis – Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, 2016.

Fluctuations in the patterns of global atmospheric circulation, associated with changes in sea surface temperature (SST) in the Pacific Ocean, are known as El Niño-Southern Oscillation (ENSO). These events influence in the behavior of temperature and precipitation, and there are several indices of monitoring used to know its development and impacts that could originate. The main objective of this work was to determine the influence of ENSO on the occurrence of frost in the Peruvian Altiplano by analyzing the minimum air temperature in the department of Puno. For that, were calculated anomalies of observed data without trend and annual cycle, and was applied principal component analysis (PCA) to obtain the most relevant patterns of variability. Additionally, was used the analysis of correlations between the data minimum temperature of Puno in grid format and TSM of Niño 3.4 region. The exploratory analysis of the observed data showed colder temperatures in the winter months, followed by the autumn, spring and summer. The western part of Puno is the coldest part of the department with the possibility of occurrence of extreme events. The occurrence of frost is inversely related to the minimum air temperature; that is, places where there are minimum values of temperature, has a higher frequency of frost. In the winter, there are higher frequencies and more intense frosts; the autumn shows lower frequencies of frost than in spring, but with greater intensity than the same season. The first two principal components explained 71.9% of the total variance of the data (the first 61.9% and 10% the second). The first component shows the same pattern throughout the department while second component has a pattern of dipole between the south and the center-north of Puno. The spatial pattern of correlation analysis, considering all the data for the year is related to the second main component: there are positive correlations in the southern and negative correlations in the north central part of the study area. However this correlation no statistical significance at 95%. Correlation analysis separating summer and winter is related to the first component, with positive correlation values for summer and negative values in winter. Therefore, the positive (negative) phase

of ENSO associated with an increase (decrease) TSM in the Niño 3.4 region, is related to a lower (higher) occurrence of frost in the Peruvian highlands during summer (winter) due to increased (decrease) of air minimum temperatures.

Keywords: Frost, minimum temperature, ENSO, sea surface temperature, Peruvian Altiplano, principal component analysis, correlation analysis.

I. INTRODUCCIÓN

Una de las manifestaciones de escala global más importante de la variabilidad interanual del clima es el fenómeno El Niño Oscilación del Sur – ENOS (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI, 2014). Es por ello que, en varias regiones del mundo, la influencia del ENOS ha sido estudiada por muchos investigadores con el objetivo de entender mejor sus impactos a escala local. Se sabe que el ENOS es responsable de los cambios en los patrones de circulación atmosférica que influyen en el comportamiento de variables meteorológicas como viento, temperatura, precipitación en diferentes lugares del mundo (Pabón y Montealegre, 2008).

El Perú no es ajeno a aquella influencia, más aun siendo frontera con el Océano Pacífico donde inician los eventos ENOS debido a la variación de la temperatura superficial del mar. El entendimiento de los impactos del ENOS es de gran importancia en los países en vías de desarrollo como el nuestro, donde las principales actividades económicas son la agricultura y ganadería que dependen de las condiciones climáticas del entorno.

Los impactos producidos en las regiones peruanas son mayormente relacionados a la precipitación, reflejados en inundaciones y sequías que ocurren en el norte y sur del país, respectivamente; sin embargo también existen impactos en la temperatura del aire, no sólo en la región costera, sino también en la sierra y selva. Una de las situaciones más evaluadas en la sierra, debido a los daños económicos y sociales, es la frecuencia e intensidad de las heladas que son monitoreadas a través de la temperatura mínima del aire.

Es así que, en el Altiplano peruano, las heladas meteorológicas (valor de temperatura ambiente igual o menor a 0°C – FAO-SENAMHI, 2010) son eventos estudiados para prevenir pérdidas de los cultivos y aumento de enfermedades respiratorias en la población. En el Perú, el 21% de la población es afectada económica y socialmente por estos eventos en la época de invierno, debido a los impactos en los cultivos y ganado utilizados para

autoconsumo. Según el informe de la Comunidad Andina (2009), cada año se tiene pérdidas en la cosecha de papa, maíz, frejol y quinua por causa del congelamiento y deshidratación de las células (Food and Agriculture Organization – FAO y SENAMHI, 2010); así como en la reducción del rendimiento del ganado por falta de alimento fresco; puesto que un 75% del territorio está expuesto a los impactos de las heladas.

Entonces, ¿Cómo influye el ENOS en la ocurrencia de las heladas?. Es así, que el objetivo general de este trabajo es determinar la influencia de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en la ocurrencia de las heladas en el Altiplano peruano mediante el análisis de la temperatura mínima del aire. Para ello, primero se evaluará el comportamiento de la temperatura mínima del aire y su correlación con la frecuencia de heladas. Seguidamente, las anomalías de la temperatura mínima serán calculadas con la finalidad de determinar los patrones de mayor relevancia de la variabilidad mediante el análisis de componentes principales (ACP). Finalmente, se realizará una correlación temporal entre datos grillados de temperatura mínima y temperatura superficial del mar (TSM) de la región 3.4 del Océano Pacífico.

Mediante esta evaluación se quiere conocer el comportamiento de las heladas durante las fases positivas y negativas del ENOS, de esta manera aumentar la investigación en este ámbito y contribuir al diseño de mejores estrategias de prevención y mitigación de los impactos originados por estos eventos meteorológicos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

En este capítulo serán descritos los elementos teóricos e información recopilada que ayuden a entender la finalidad de este trabajo de investigación. Entre ello, se analizará el comportamiento de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), la cocurrencia de heladas y sus impactos en el Altiplano peruano, así como estudios previos sobre la influencia del ENOS en los patrones climáticos que predominan en el territorio peruano.

2.1 El Niño Oscilación del Sur (ENOS)

En el pasado, pobladores de la costa norte de Perú y Ecuador observaron cambios en los regímenes de peces debido al calentamiento del mar hacia finales de diciembre, a lo que llamaron a ese comportamiento como corriente “El Niño” (SENAMHI, 2014). La aparición de esta corriente marina significa el fin de la estación de pesca y la llegada del tiempo de mantenimiento de las herramientas para la pesca artesanal.

Sin embargo, cuando el calentamiento del mar ocurre de forma extrema, se desarrollan también cambios en la circulación atmosférica (flujos de vientos y distribución de la precipitación y temperatura) que es denominado fenómeno de “El Niño” (CONICIT, 1998). Ya en la década de 1960, investigadores encontraron relación entre el calentamiento de la costa oeste de América del Sur y la oscilación de la presión atmosférica entre los puntos de Tahití (Océano Pacífico ecuatorial central) y Darwin (Océano Pacífico este central – Australia) conocida como Oscilación del Sur (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, 2006). Esa oscilación resulta de la interacción océano – atmósfera y presenta dos fases: la fase cálida corresponde a “El Niño” y la fase fría se le denomina “La Niña” (SENAMHI, 2014).

2.1.1 Características océano – atmosféricas del ENOS

El ENOS se caracteriza por cambios en los patrones oceánicos en la parte ecuatorial del Océano Pacífico, y cuando tales cambios se presentan de forma intensa, influye en el comportamiento atmosférico global. La Figura 1a muestra las características océano – atmosféricas en un año neutro. En condiciones normales, las aguas del Océano Pacífico oriental son más frías que la parte occidental, debido al afloramiento marino y a la corriente oceánica de Humbolt que transporta aguas desde la Antártida. A su vez, la influencia de los vientos alisios del sur intensifica la circulación de las aguas con sentido este – oeste en el Pacífico (Comunidad Andina, 2009), generando un nivel del mar más alto en Australia que en la costa sudamericana. Cabe mencionar, que el afloramiento marino es causado por la poca profundidad de la termoclina en esa parte del Pacífico, siendo que es la zona de transición entre la capa cálida superficial y la capa fría subsuperficial del mar y genera un ecosistema rico en nutrientes para la pesca (Boccaletti et al., 2003).

Ese calentamiento y desplazamiento de aguas hacia el oeste acumula el aire cálido y húmedo en la región australiana formando una zona de baja presión que impulsa al aire a ascender y condensarse, generando nubes de gran desarrollo vertical y abundantes lluvias; luego el aire seco y frío desciende desde la alta tropósfera sobre la parte oriental del Pacífico (León, Zea y Eslava; 2000). A esa circulación convectiva se le denomina Circulación de Walker, con el ramo ascendente en la región de Australia y el ramo descendente en las costas de América del Sur (Figura 1a).

Durante la fase cálida del ENOS (Figura 1b), los vientos alisios del sur son más débiles atenuando la corriente de Humbolt y también la termoclina se profundiza, lo que provoca que las aguas cálidas del Pacífico occidental se movilizan de oeste hacia el este y lleguen a la costa sudamericana calentando todo el Pacífico ecuatorial y aumentando el nivel del mar hasta en 40 cm en la parte oriental (Comunidad Andina, 2009). Esas condiciones alteran las posiciones de las zonas de baja y alta presión, causando que la circulación de Walker se desplace hacia el oriente, siendo que el ramo ascendente se ubica más al oriente del Océano Pacífico ecuatorial dejando sin precipitaciones a la región de Australia.

En la fase fría del ENOS (Figura 1c) ocurre todo lo contrario. Los vientos alisios del sur se intensifican junto con la corriente de Humbolt, provocando mayor inclinación de la termoclina y afloramiento marino en las costas de América del Sur. Durante “La Niña” existe mayor predominancia de aguas frías en el Pacífico ecuatorial, con lo que la piscina de aguas cálidas en Australia disminuye y ocurren precipitaciones intensas (NOAA, 2006).

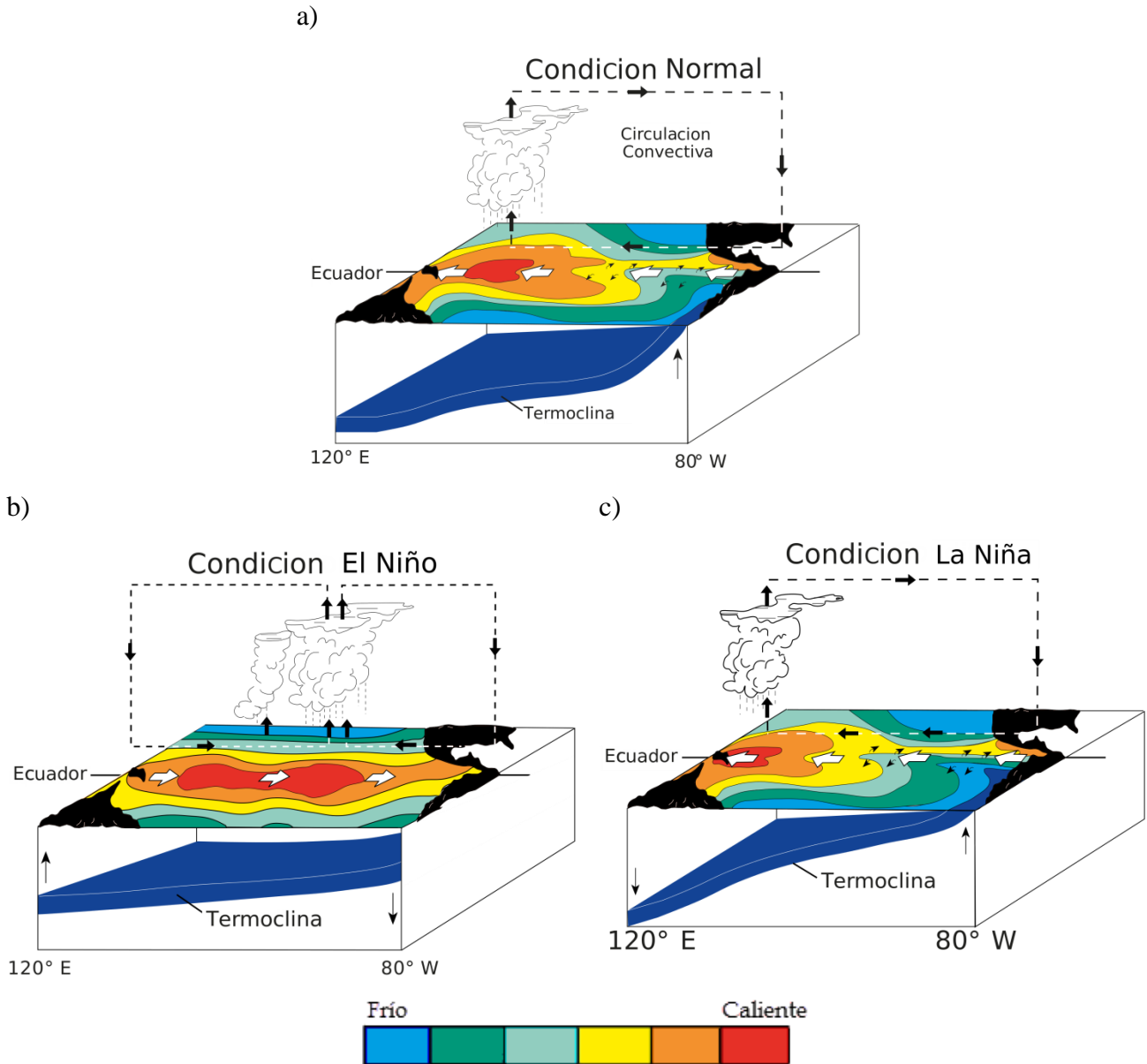


Figura 1: Características océano – atmosféricas en el Pacífico ecuatorial en (a) condiciones normales, (b) El Niño y (c) La Niña. Adaptado de <http://geochange.er.usgs.gov>

2.1.2 Indicadores de eventos ENOS

Según la NOAA, existen indicadores oceánicos y atmosféricos que contribuyen a la identificación de las fases del ENOS. Entre los indicadores se encuentran: la temperatura superficial del mar (TSM), radiación de onda larga (OLR), Índice de la Oscilación Sur (SOI) y la anomalía del nivel del mar.

2.1.2.1 Temperatura Superficial del Mar (TSM)

Uno de los indicadores más importantes en monitoreo de las fases del ENOS es la TSM, por ello el Océano Pacífico tropical fue dividido en cuatro regiones que son monitoreadas constantemente para diagnosticar la evolución de las fases del ENOS. En la Figura 2, se muestran las cuatro regiones: Niño 1+2 ($0^{\circ}\text{N} - 5^{\circ}\text{S}$, $90^{\circ}\text{W} - 80^{\circ}\text{W}$), Niño 3 ($5^{\circ}\text{N} - 5^{\circ}\text{S}$, $150^{\circ}\text{W} - 90^{\circ}\text{W}$), Niño 3.4 ($5^{\circ}\text{N} - 5^{\circ}\text{S}$, $170^{\circ}\text{W} - 120^{\circ}\text{W}$) y Niño 4 ($5^{\circ}\text{N} - 5^{\circ}\text{S}$, $160^{\circ}\text{W} - 150^{\circ}\text{W}$). Los números de las regiones corresponden a las etiquetas asignadas a las pistas de buques que transitaban esas áreas y que fueron de ayuda para registros históricos de eventos ENOS (Rasmusson y Carpenter, 1982).

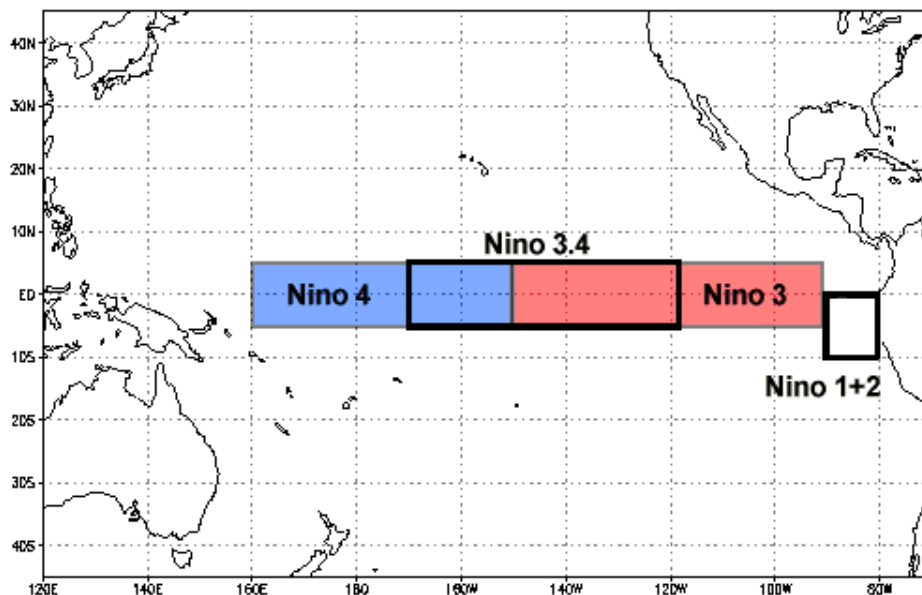


Figura 2: Representación de las regiones El Niño en el Océano Pacífico ecuatorial. FUENTE: NOAA.

Las regiones Niño 3 y 4 se caracterizan por presentar máximas anomalías¹ de TSM, la región Niño 1+2 abarca las costas de Perú y Ecuador y es un indicador de los cambios en los patrones de variabilidad en las costas de América del Sur. La región 3.4 es una subregión comprendida entre las regiones Niño 4 y 3 y presenta alta correlación entre la TSM y la variación de presión entre Tahití y Darwin (Jiménez, 2008); por esa razón es la región usada para definir el Índice Oceánico El Niño (ONI, por sus siglas en inglés).

El ONI corresponde al valor de la media móvil de tres meses de las anomalías de TSM de la región Niño 3.4, tomando como base el período 1971 – 2000 para la climatología. Este índice es empleado en el diagnóstico de las fase cálida (fría) del ENOS considerando cinco valores consecutivos superior (inferior) a $+0.5^{\circ}\text{C}$ (-0.5°C). La Figura 3 indica los años de “El Niño” y “La Niña” teniendo en cuenta el umbral de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en la serie de tiempo de las anomalías de TSM región Niño 3.4.

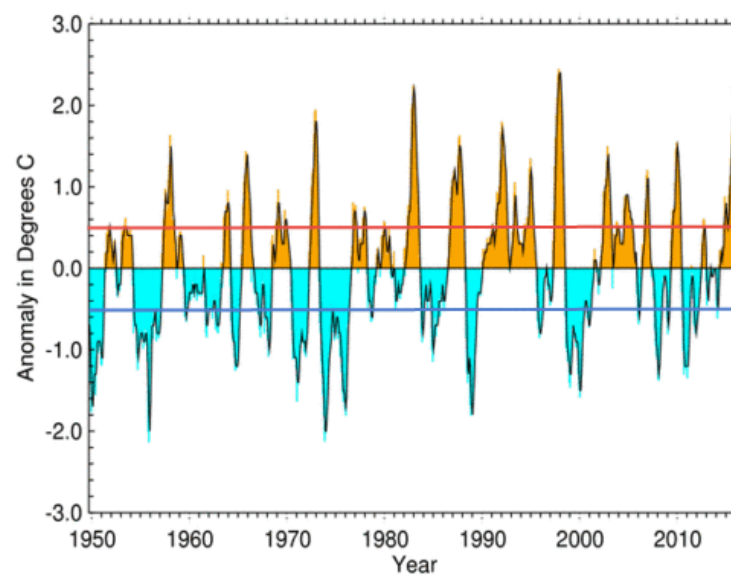


Figura 3: Período de anomalías de TSM de la región Niño 3.4. Umbral de “El Niño” (línea roja) y umbral de “La Niña” (línea azul). FUENTE: National Center for Environmental Information – NOAA.

¹ Valor obtenido de la diferencia entre el valor observado y el valor climatológico normal.

2.1.2.2 Radiación de Onda Larga (OLR)

El instrumento Advanced Very High Resolution Radiometer (AVVHRR) de la NOAA recopila datos de OLR en el tope de la atmósfera considerando las áreas ecuatoriales 160°E y 160°W de longitud con una resolución espacial de 2.5°x2.5°. Estos datos son convertidos en anomalías estandarizadas para usarlos como un índice de diagnóstico del ENOS (Gruber y Krueger, 1984). La Figura 4 presenta la serie de tiempo de las anomalías de OLR en Wm^{-2} , estos datos pueden ser encontrados en la página web del Climate Prediction Center OLR de la NOAA (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/olr>).

La OLR funciona como un indicador de la actividad convectiva: zonas donde la actividad convectiva es mayor, presentan nubes de gran desarrollo vertical con temperaturas bajas en el tope; con lo que emiten menos radiación infrarroja (OLR) hacia el espacio. Por lo tanto, valores negativos (positivos) de OLR son típicos de eventos “El Niño” (“La Niña”) debido al aumento (disminución) de la convección y nubes de mayor (menor) desarrollo vertical (Chelliah y Arkin, 1992).

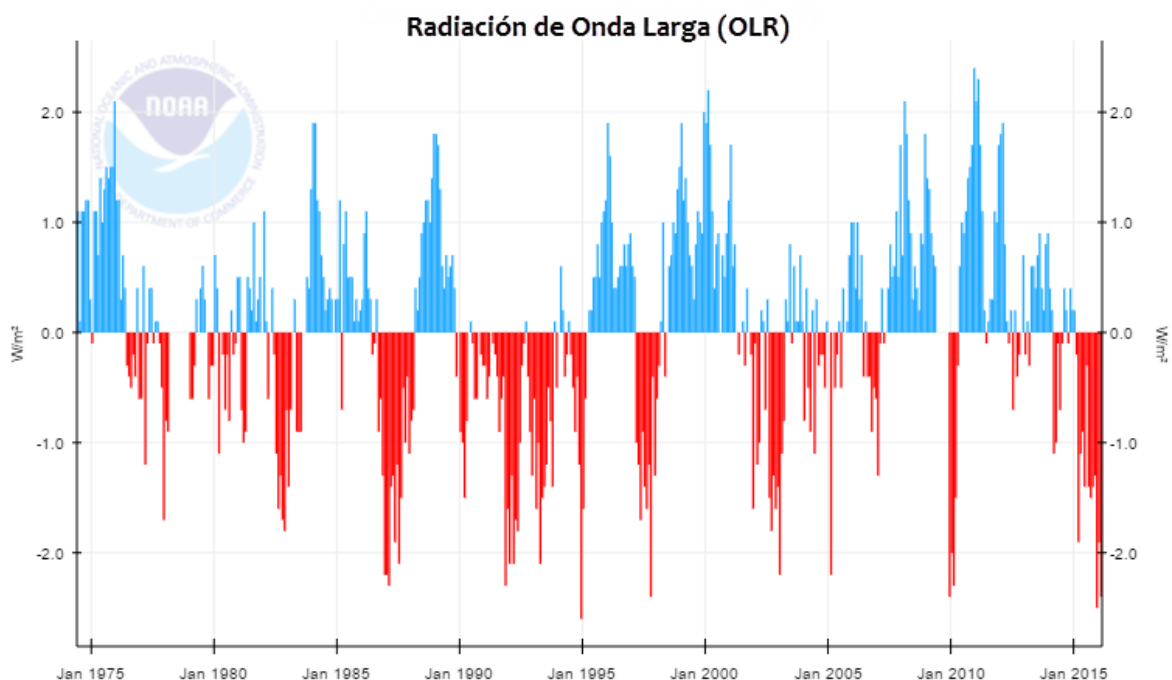


Figura 4: Serie de tiempo de las anomalías de radiación de onda larga (OLR). FUENTE: Climate Prediction Center – NOAA.

2.1.2.3 Índice de Oscilación Sur (SOI)

El SOI se basa en la diferencia estandarizada de los niveles de presión del mar entre los puntos de Tahití y Darwin que representan puntos estratégicos de las fluctuaciones en la presión del aire entre el Pacífico tropical este y oeste, respectivamente, durante eventos ENOS. La Figura 5 muestra la localización de Tahití y Darwin en el Océano Pacífico.

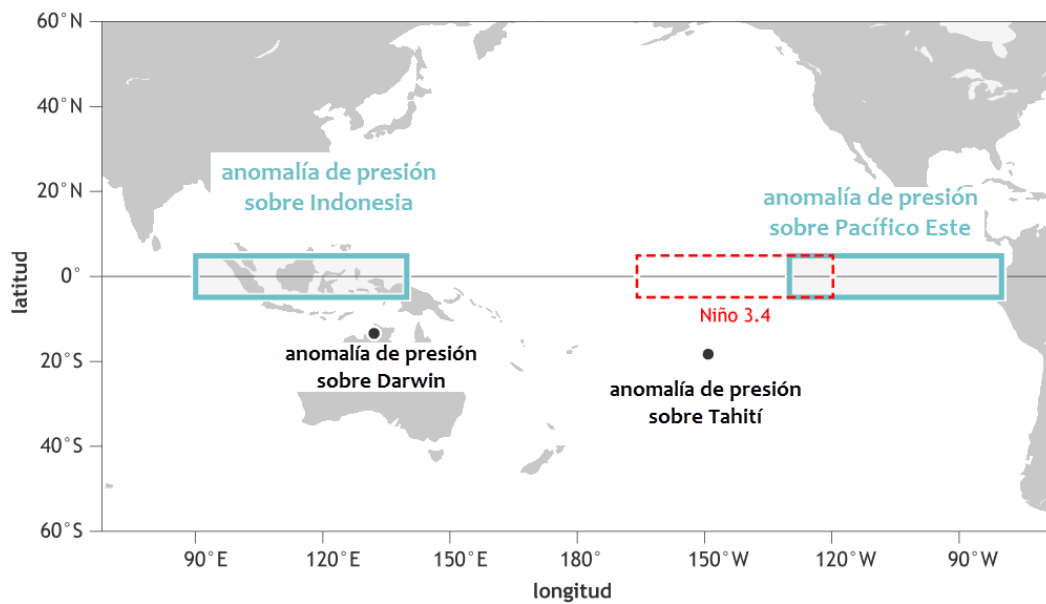


Figura 5: Localización de los puntos de Tahití y Darwin sobre el Pacífico tropical este y oeste. FUENTE: NOAA (www.climate.gov)

Durante la fase cálida del ENOS, la región Niño 3.4 (Tahití) presenta niveles de presión más bajos que la parte de Australia (Darwin) debido al desplazamiento de las aguas cálidas y de la circulación convectiva para el este. Por ello, periodos prolongados de valores negativos (positivos) de SOI coinciden con la presencia de aguas cálidas (frías) en el Océano Pacífico tropical oriental típico de la fase “El Niño” (“La Niña”). El índice SOI es calculado utilizando las siguientes fórmulas:

$$SOI = \frac{VPS_{Tahiti} - VPS_{Darwin}}{\sqrt{\frac{(VPS_{Tahiti} - VPS_{Darwin})^2}{N}}} \dots (1)$$

$$\text{Considerando: } VPS = \frac{p_i - \bar{p}}{\sqrt{\frac{(p_i - \bar{p})^2}{N}}} \dots (2)$$

Donde:

VPS = valor de presión estandarizada, calculada a partir del valor de la presión entre su desviación estándar.

N = número de meses

p_i , \bar{p} = presión actual y presión media

2.1.2.4 Anomalía del nivel del mar

El Jet Propulsion Laboratory del Instituto de Tecnología de California usa las imágenes del satélite de la NOAA OSTM/Jason-2 que utiliza altimetría de radar para coleccionar datos de altura de la superficie del mar de todos los océanos del globo. Las imágenes son procesadas para resaltar la señal interanual de la superficie del mar, sin considerar la tendencia y la estacionalidad de la serie. La altura de la superficie del mar se debe a dos factores: la gravedad (casi invariable en el tiempo) y las circulaciones oceánicas impulsadas por el viento, las cuales presentan movimientos hacia arriba y abajo, originando el calentamiento y enfriamiento de las aguas, en ese orden. Usando esa teoría, se emplean el nivel del mar para conocer el grado de almacenamiento de calor en el océano y asociarlo a las fases cálida y/o fría del ENOS.

2.1.3 Influencia de eventos ENOS en el Perú

Investigaciones en varios lugares del mundo han demostrado que los cambios oceánicos y atmosféricos provocados por los eventos ENOS influyen en el comportamiento y distribución de la precipitación y temperatura del aire. Por ejemplo, entre los meses de diciembre y febrero, durante la fase cálida del ENOS (“El Niño”), las precipitaciones disminuyen en Australia y nor-este de Brasil, la parte este del continente africano presenta aumento de temperaturas del aire y el este de Argentina aumentan las lluvias (SENAMHI, 2014). Ya en la fase fría del ENOS (“La Niña”), ocurren situaciones contrarias: toda la parte del continente australiano, nor-este de Brasil y este de África presentan condiciones de humedad y abundantes lluvias, y la parte este de Argentina experimenta secas (Glantz, 2002).

Para el caso de Perú, existen trabajos de investigación realizados que analizan los efectos de las fases del ENOS. Según la enciclopedia del National Geographic, la fase cálida del ENOS produce cambios en la población de peces, así como un drástico incremento de precipitación en la costa árida de Perú que contribuye al aumento de erosión del suelo e inundaciones. Estas inundaciones afectan destruyendo casas, hospitales, colegios, etc.

En 1985, Francou y Pizarro analizaron los eventos “El Niño” desde 1925 y los clasificaron considerando la duración e intensidad de las anomalías de TSM registradas en cuatro estaciones a lo largo del litoral peruano. Por medio de correlaciones, Francou y Pizarro establecieron una probabilidad entre 40 – 70% que exista un déficit en la precipitación de seis estaciones meteorológicas distribuidas en la parte central de los Andes peruanos y el Altiplano durante años “El Niño”. Similar conclusión se aprecia en el Reporte Oficial del Desarrollo Humano 2007/2008 de las Naciones Unidas (Trigoso, 2007), que para el caso de Puno (departamento del Altiplano peruano) se tienen registros de fuertes sequías durante “El Niño” de 1982/1983 mientras que en el “El Niño” 1997/1998 se presentaron sequías de corta duración pero de mayor intensidad.

Lagos et al. (2004) utilizaron la técnica de correlación lineal entre los datos de precipitación del período 1950 – 2002 registrados en la región andina del Perú (norte, centro y sur) y las series históricas de TSM calculadas en las cuatro regiones Niño (1+2, 3, 3.4 y 4). Los resultados indicaron que las lluvias tienden a ser mayores (menores) en el norte de los Andes, neutras en la parte central y ligeramente menores (mayores) en la parte sur andina cuando las anomalías de TSM son positivas (negativas) en la región Niño 1+2. Esas relaciones se acentúan cuando se considera sucesivamente las áreas Niño 3, Niño 3.4 y Niño 4.

Romero et al. (2007) analizaron la erosividad de las lluvias usando datos diarios de duración, intensidad y el total acumulado de lluvias durante el periodo 1995 – 2000 en la parte norte de los Andes peruanos. Durante los años “El Niño” se observaron mayores intensidades de lluvia, mientras que en años “La Niña” se caracterizaron por presentar mayores acumulados de lluvia con menor intensidad comparando con la fase cálida del ENOS.

En el Informe de Pasantía Phi-Lac Unesco, realizada por Erika Meerhoff en el año 2008, se hizo un análisis de los impactos del ENOS 1997-1998 en las regiones de América Latina. El análisis realizado para el Perú concluyó que El Niño 1997-1998 provocó inundaciones en el litoral norte y centro, además de sequías en la sierra y nevadas aisladas en el invierno. Pero no todos los fenómenos de El Niño tienen la misma intensidad en los impactos, por ejemplo, en un informe realizado por la Corporación Andina de Fomento, afirma que la sequía en el Altiplano en el ENOS 1997/1998 fue menos intensa que en el ENOS 1982/1983 e incluso en algunas regiones se tuvo anomalías positivas de precipitación.

Lavado-Casimiro et al. (2013) analizaron datos de descarga en 20 cuencas hidrográficas distribuidas de la siguiente forma: 14 en la costa del Pacífico, 3 en la región del Lago Titica y 3 en el Amazonas. Además, clasificaron los eventos ENOS usando el SOI como “El Niño” fuerte, “El Niño” moderado, año normal, “La Niña” fuerte y “La Niña” moderada. Se encontró que, en promedio, durante los años “El Niño” fuerte las descargas aumentaron en la zona central y norte del Pacífico, mientras que en el resto de las estaciones las descargas disminuyeron. En los años “El Niño” moderado, no se muestra una marcada diferencia en el comportamiento de las descargas. Para los años “El Niña”, se observaron aumento de las descargas en la parte central de la costa peruana. Así mismo, la parte sur de la cuenca del Titicaca indicó anomalías positivas (negativas) de descarga en años “El Niña” (“El Niño”).

En la segunda parte del trabajo de Lavado-Casimiro y Espinoza (2013), se analizaron los principales modos de variabilidad interanual de las lluvias en el Perú usando la técnica de funciones empíricas ortogonales (EOF). Se encontró que el primer modo de variabilidad (con 37% de la variancia total) está asociado a los eventos “El Niño” extraordinario, que generó abundantes lluvias al norte del país y sequías en el Lago Titicaca y Amazonas. Por otro lado, el segundo modo de variabilidad (25% de la variancia total) se correlaciona con las anomalías de TSM de la parte central del Pacífico ecuatorial: condiciones de “La Niña” causan aumento de lluvias en los Andes, Lago Titicaca y Amazonas.

2.2 Heladas en la región peruana

De acuerdo a la ubicación geográfica, Perú debería presentar un clima tropical; sin embargo diversos factores atmosféricos y geográficos permiten que el país tenga diversidad de climas. Principalmente la Cordillera de los Andes funciona como una barrera climática dividiendo al país en tres regiones distintas: costa, sierra y selva (Figura 6). La región sierra es considerada en el presente trabajo y es la región que abarca casi toda la Cordillera de los Andes. Debido a la topografía irregular, la sierra presenta gran cantidad de climas desde cálido hasta frío polar, y proporciona condiciones para el desarrollo de actividades agrícolas y pecuarias que proporcionan alimentos a la población local y nacional.

Los eventos meteorológicos que ocurren en la región sierra generan impactos en la población. En el verano, las fuertes precipitaciones de origen orográfico provocan inundaciones y deslizamientos de tierra en las pendientes. Entre tanto, en el invierno, los eventos fríos son los que impactan en las actividades en esta región como por ejemplo la ocurrencia de heladas. Cabe resaltar que, en los lugares cercanos a lagunas o lagos, como en el caso del Lago Titicaca, la amplitud térmica es menor por el efecto termorregulador del agua que inhibe la caída de las temperaturas nocturnas.

Las heladas corresponden a la formación de hielo en la superficie del suelo o de las plantas por el descenso de la temperatura ambiente y son frecuentes en altitudes superiores a los 2500 m. Desde el punto de vista meteorológico, la helada se produce cuando la temperatura del aire alcanza valores iguales o menores que 0°C y la máxima intensidad ocurre generalmente en la madrugada o al nacer el sol (Comunidad Andina, 2009). Las heladas meteorológicas pueden ser clasificadas como helada advectiva o helada radiativa. Las heladas advectivas son producidas por el ingreso de masas de aire frío provenientes de las regiones polares hacia el continente y, algunas veces, llegan a países como Bolivia y al sur de Perú; mientras que las heladas radiativas son originadas por la pérdida de radiación de la superficie en las noches de cielo despejado, vientos suaves y poca concentración de vapor de agua en la atmósfera (FAO y SENAMHI, 2010).

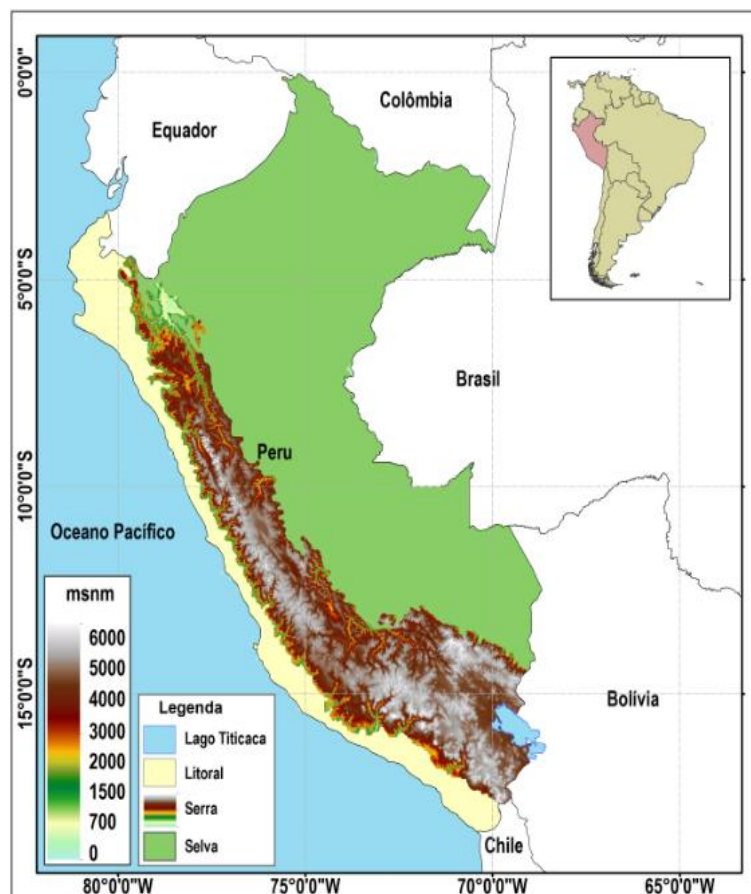


Figura 6: Mapa de ubicación del Perú con la topografía y regiones climáticas.

Las heladas afectan a los cultivos y ganadería que la población utiliza para autoconsumo y/o abastecimiento para otras ciudades. Según el atlas publicado por la Comunidad Andina (2009), el Perú presenta el mayor porcentaje de superficie agropecuaria expuesta a heladas, seguido de Bolivia, Ecuador y Colombia (Tabla 1).

Tabla 1: Superficie agropecuaria expuesta a heladas. FUENTE: Comunidad Andina (2009).

País	Área total	Área expuesta	%
Bolivia	269 000	100 000	37
Colombia	533 000	37 000	7
Ecuador	115 000	25 000	21
Perú	256 000	193 000	75
Comunidad Andina	1 173 000	355 000	30

Los efectos en la salud también se destacan por causa de la ocurrencia de estos eventos. Los años 2002 y 2007 fueron marcados por la intensidad de los impactos, declarando en estados de emergencia distintos departamentos por el gobierno peruano. De acuerdo al Instituto Nacional de Defensa Civil, el 2002 se registraron 80 víctimas mortales y 190 mil personas afectadas y el 2007 hubieron 9 personas fallecidas y 390 mil afectadas (Comunidad Andina, 2009).

2.2.1 Características atmosféricas durante las heladas en el Perú

La variabilidad topográfica de la Cordillera de los Andes favorece la ocurrencia de heladas, las cuales pueden presentarse en cualquier época del año, siendo el invierno la estación del año con mayor frecuencia e intensidad debido a las condiciones atmosféricas (INDECI, 2008). El invierno en la Cordillera de los Andes se caracteriza por ser el período seco ya que la humedad disminuye por la desorganización de la Alta de Bolivia, que en los meses de verano ayuda a mantener la convección (Martínez et al., 2012; Garreaud y Aceituno, 2001), y la posición más para el hemisferio norte de la Zona de Convergencia Intertropical, que influye en las lluvias en la parte norte (García, 2007).

Los vientos zonales en invierno, en la alta tropósfera, son predominantemente del oeste; además, el Anticiclón del Pacífico Sur se torna un sistema dominante posicionándose próximo al continente e induciendo condiciones estables en los bajos niveles de la atmósfera, siendo que inhibe el transporte de humedad del Océano Pacífico para la Cordillera de los Andes (Martínez et al, 2012).

Davila (2016) realizó composiciones de variables atmosféricas considerando los días de ocurrencia de heladas a lo largo de toda la cordillera peruana y determinó que las heladas en el invierno son principalmente de origen radiativo provocado por la disminución de la humedad, vientos calmos de oeste y subsidencia del aire, mantenida por el aumento de la vorticidad positiva que genera cielos despejados y pérdida del calor absorbido durante el día por la superficie terrestre (Figura 7).

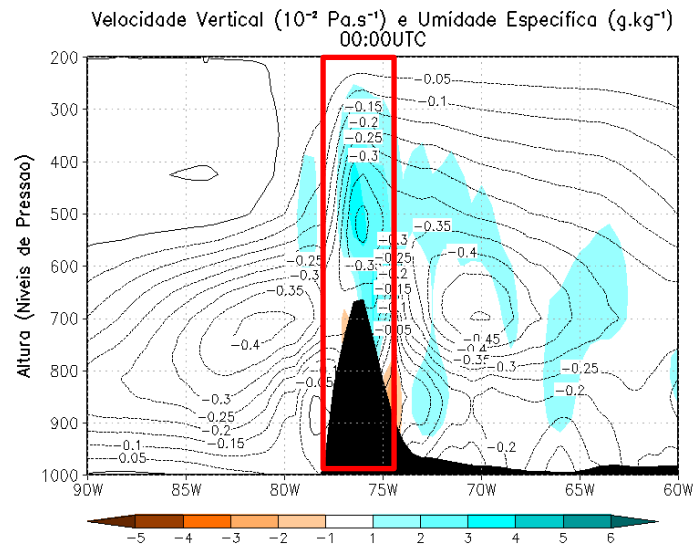


Figura 7: Perfil vertical de la anomalía de composición de la velocidad vertical omega ($10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$ – sombreado) y humedad específica (g kg^{-1} – líneas) a las 00:00 UTC para el periodo 1971 – 2005 durante la ocurrencia de heladas en la Cordillera Peruana. FUENTE: Davila (2016).

2.2.2 Relación entre eventos ENOS y las heladas en el Perú

Existen trabajos de investigación que analizan la influencia que tienen los eventos ENOS en la ocurrencia de heladas. En Argentina, Müller et al. (2000) determinaron que en los años “El Niño” (“La Niña”) el número anual de heladas es inferior (superior) que el promedio al igual que en el periodo de invierno, sin embargo en otoño y primavera el número de heladas está condicionado por la etapa de desarrollo del evento ENOS. Así mismo, Müller et al. (2000) analizaron las fechas de inicio y fin de las heladas en la región de La Pampa, y muestran que en los años “El Niño” (“La Niña”) existe un retraso (adelanto).

González (2004) analizó el comportamiento de horas-frío, grados-día, heladas y precipitación en la región Maule en Chile en el año “El Niño” 1997 y “La Niña” 1998 y 1999. En relación a la ocurrencia de heladas, se determinó que en los años “El Niño” (“La Niña”) se presentó una mayor disminución (aumento) de la frecuencia de heladas, con lo que se tendría un menor riesgo de heladas para los agroecosistemas.

En el Perú, la mayor parte de los estudios se basan en la relación de los eventos ENOS con las lluvias, que son usados para inferir cómo serían las situaciones de heladas durante esos eventos. Según SENAMHI (2014), la fase cálida del ENOS (“El Niño”) favorece la disminución de heladas en la sierra central y norte del país por el aumento de la TSM durante el otoño e invierno. Algunos informes, como el de la Comunidad Andina ‘El Niño y La Niña’, cita la explicación gráfica de Luhr (2003, pag. 449) donde explica que en condiciones de El Niño se tiene el aumento de las heladas y sequías en el Altiplano debido a la ausencia de nubosidad y cielos despejados que favorecen la pérdida de radiación de la superficie en las noches.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A seguir serán descritos los datos utilizados en el presente trabajo y la metodología empleada en los análisis realizados.

3.1 Descripción de los datos

Los datos utilizados están divididos en dos partes: datos observados de estaciones meteorológicas y datos de reanálisis Era-Interim procedentes del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). En relación a los datos del ECMWF, son consideradas dos variables: anomalías de TSM y temperatura mínima del aire, ambas en formato grilla.

3.1.1 Datos observados

Una de las variables analizadas en este trabajo es la temperatura mínima del aire que es la menor temperatura registrada en un día a una altura entre 1.25 y 2 metros por encima del nivel del suelo (Organización Mundial de Meteorología – OMM, 1996). Esta variable está directamente relacionada con las heladas ya que, al ser el menor valor de temperatura alcanzado en el día, indica la intensidad que tendría la helada meteorológica al presentarse.

Se consideraron datos diarios de temperatura mínima del aire de 10 estaciones meteorológicas distribuidas en la región del Altiplano peruano, departamento de Puno (Figura 8). El periodo de años analizados fue de 1971 – 2005. En la Tabla 2 se muestran las latitudes, longitudes y altitudes de las estaciones meteorológicas.

Tabla 2: Información geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)
Ayaviri	14.88°S	70.59°W	3920
Desaguadero	16.57°S	69.04°W	3860
Huancane	15.20°S	69.76°W	3860
Huaraya Moho	15.39°S	69.49°W	3890
Ilave	16.08°S	69.64°W	3850
Juli	16.20°S	69.46°W	3825
Lampa	15.36°S	70.37°W	3900
Muñani	14.78°S	69.97°W	4119
Pampahuta	15.49°S	70.86°W	4320
Puno	15.82°S	70.02°W	3840

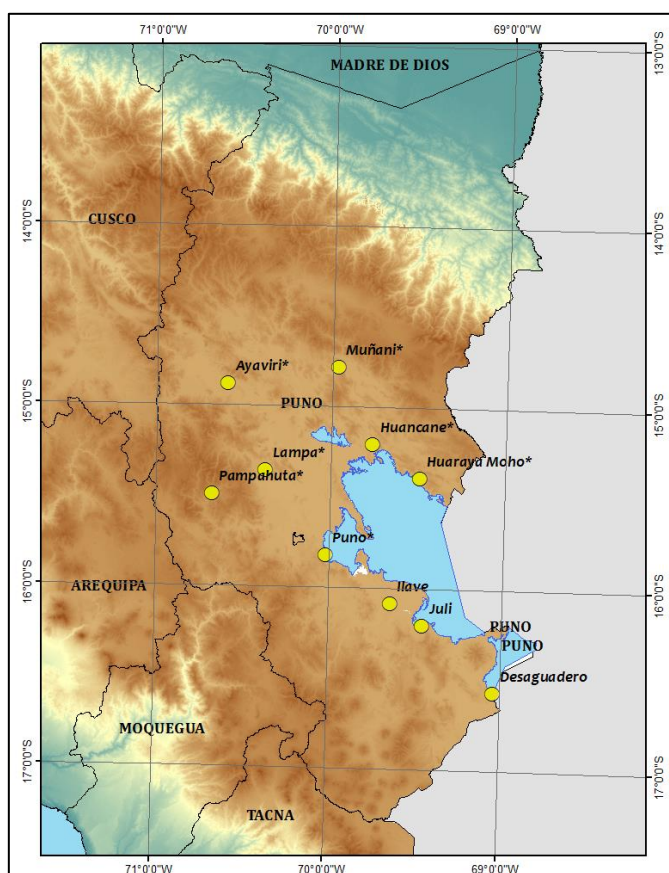


Figura 8: Mapa del área de estudio y ubicación espacial de las estaciones meteorológicas (puntos em amarillo).

3.1.2 Datos de reanálisis del ECMWF

Así mismo, fueron usados dos variables de los datos de reanálisis del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF): temperatura superficial del mar (TSM) y temperatura mínima del aire. La temperatura mínima del aire del ECMWF (Dee *et al.*, 2011) corresponde a un periodo de años de 1979 – 2005 con una resolución espacial de $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ y para el área de estudio mostrado en la Figura 8.

Para el caso de la TSM, los datos se refieren al valor de TSM grillado con una resolución espacial de $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ para el área Niño 3.4 ($5^\circ\text{N} - 5^\circ\text{S}$, $170^\circ\text{W} - 120^\circ\text{W}$) en un periodo de 1979 – 2005. Cabe resaltar, que los datos grillados de TSM y temperatura mínima del aire están en formato NetCDF.

3.2 Metodología

3.2.1 Evaluación del comportamiento de la temperatura mínima del aire

Las series temporales de la temperatura mínima del aire de cada estación meteorológica fueron evaluadas estadísticamente para tener una noción general del comportamiento de la variable en la zona de estudio y que pueda servir en la interpretación de los futuros resultados. Es así, que se realizó un análisis exploratorio de los datos desde el año 1971 hasta el 2005 considerando cálculos de promedios, percentiles, histogramas y diagramas box-plot. En la Tabla 3 se detalla las definiciones y fórmulas de los métodos de exploración estadística utilizados en el trabajo.

Tabla 3: Métodos utilizados en el análisis exploratorio.

Método exploratorio	Definición
Promedio	<p>Llamado también media aritmética. Es el valor característico de una serie de datos y se obtiene a partir de la suma de todos los valores dividida entre la cantidad de sumandos, según la siguiente fórmula:</p> $\bar{x} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} \dots (3)$
Percentil	<p>El percentil muestra cómo está posicionado un valor con respecto al total de la muestra en una serie ordenada de menor a mayor. Un ejemplo: el percentil 10 es el valor bajo el cual se encuentran el 10% de los datos.</p>
Histograma	<p>Es una representación gráfica de una serie de tiempo en barras proporcional a la frecuencia de los valores y sirve para conocer la distribución de la serie.</p>
Diagrama box-plot	<p>Es un diagrama que muestra los valores mínimo y máximo, mediana, percentiles 25 y 75, valores atípicos y simetría de la serie.</p>

En el caso del promedio y percentil 10, se elaboraron mapas estacionales para el periodo 1979 – 2005 con el software ArcGis para visualizar mejor la distribución espacial de los valores.

3.2.2 Relación entre la temperatura mínima del aire y la frecuencia de helada

La frecuencia de heladas consiste en contabilizar los días al mes en los que la temperatura mínima presentó valores iguales o menores a 0°C (Comunidad Andina, 2009). Fue calculado el promedio de la frecuencia de heladas con los datos observados para todos los meses del año de toda la serie de tiempo, así mismo se promedió la temperatura mínima mensual para los 35 años de datos. Es así, que se calculó la correlación estadística entre el promedio mensual histórico de la frecuencia de helada y de la temperatura mínima del aire por cada punto de estación, con la finalidad de describir la relación existente entre las heladas y temperatura mínima del aire.

La correlación estadística de Pearson permite medir la relación o asociación que existe entre dos variables con distribución normal, es decir, si los cambios de una variable influyen en la otra (Wilks, 2006). El valor de la correlación varía en el intervalo de -1 y 1. Los valores positivos indican una relación directa entre las variables, es decir las dos aumentan o disminuyen al mismo tiempo; mientras que los valores negativos de correlación representan una relación inversa, una de las variables aumenta cuando la otra disminuye. Un valor de 0 muestra que no existe relación entre las variables. La correlación de Pearson puede ser calculada de la siguiente forma:

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \dots (4)$$

Así mismo, se calculó la correlación de Spearman para comprobar que la relación entre las variables no depende de su distribución. La interpretación de la correlación de Spearman es muy similar a la correlación de Pearson, sus valores fluctúa entre -1 y 1 y valores de 0 significa que no existe relación entre las variables. Esta correlación se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\rho_{xy} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N d^2}{N(N^2 - 1)} \dots (5)$$

Como un análisis extra, se presentó de forma espacial la frecuencia relativa estacional y la intensidad estacional de heladas en el área de estudio con el software ArcGis. Cabe resaltar, que la frecuencia relativa estacional está referida a la cantidad de días en verano, otoño, invierno y/o primavera donde la temperatura mínima del aire alcanza valores iguales y/o menores a 0°C; mientras que, la intensidad estacional de heladas es el mínimo valor de la temperatura mínima del aire durante las estaciones del año, considerando sólo los días de ocurrencia de heladas.

3.2.3 Determinación de las anomalías de la temperatura mínima del aire correspondiente a los datos observados.

A continuación, el tercer objetivo específico consiste en determinar las anomalías de la temperatura mínima diaria del aire sin la influencia de la tendencia y estacionalidad, con la finalidad de aplicar el análisis de componentes principales y observar patrones relevantes en la serie. La tendencia corresponde al cambio en el tiempo que pudiera tener la variable, ya sea de aumento o disminución, mientras que la estacionalidad está dada por la oscilación repetitiva que presenta la variable en un intervalo de tiempo que con frecuencia es anual. Como primer paso, fue removido la tendencia de la serie. Una serie temporal de datos se puede descomponer de la siguiente forma:

$$X = T + I$$

Donde:

X: Serie temporal

T: Tendencia temporal

I: serie independiente de la tendencia temporal

La T puede ser representada por la siguiente función: $T = b * t + a$, donde a y b son las constantes a determinar mediante el modelo de regresión lineal y t es el tiempo. De esta forma, la remoción de la tendencia estaría expresado como:

$$I = X - (b * t + a)$$

El segundo paso consistió en remover la estacionalidad anual de la temperatura mínima del aire. En 1807, Fourier demostró que una función continua y periódica puede ser representada por una suma infinita de ondas seno y coseno, llamados armónicos (Carrillo, 2003). Es así, que una serie temporal puede ser representada de la siguiente forma:

$$y_t = \bar{y} + \sum_{k=1}^{n/2} \left\{ C_k \cos \left[\frac{2\pi kt}{n} - \phi_k \right] \right\} = \bar{y} + \sum_{k=1}^{n/2} \left\{ A_k \cos \left[\frac{2\pi kt}{n} \right] + B_k \sin \left[\frac{2\pi kt}{n} \right] \right\}$$

Donde:

y_t : Serie temporal

\bar{y} : Promedio de la serie temporal

n : Número de datos de la serie temporal

k : Número de armónico

C_k, A_k, B_k, ϕ_k : Coeficientes de la serie de Fourier que definen los ciclos anuales de la serie temporal.

Los coeficientes de la serie de Fourier son calculados con los siguientes criterios:

$$A_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \cos\left(\frac{2\pi kt}{n}\right); \quad B_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \sin\left(\frac{2\pi kt}{n}\right)$$

$$C_k = [A_k^2 + B_k^2]^{1/2}$$

$$\phi_k = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{B_k}{A_k} & A_k > 0 \\ \tan^{-1} \frac{B_k}{A_k} \pm \pi, & \text{o } 180^\circ & A_k < 0 \\ \frac{\pi}{2}, \text{ ou } 90^\circ & & A_k = 0 \end{cases}$$

En algunos casos, el ciclo anual de la serie puede estar representado por el primer armónico o por la suma del primero y el segundo; ello depende de la complejidad en el comportamiento de la serie en el tiempo. Una vez determinado el armónico que representa el ciclo anual de la serie, este fue removido con una sustracción. El resultado consistió en una serie temporal sin tendencia y sin influencia del ciclo anual, por lo tanto esa nueva serie fue considerada como la serie de anomalía de la temperatura mínima del aire.

Obtenidas las anomalías de la temperatura mínima, fue aplicado el índice de variación de régimen *Regime Shift Detector* – RSD (Rodionov, 2004) la cual es una herramienta muy

usada para detectar cambios abruptos en las series de tiempo a través de un test-t en el promedio y variancia en las anomalías de las variables.

3.2.4 Determinación de los patrones más relevantes de la temperatura mínima del aire

A continuación, se aplicó una técnica estadística llamada análisis de componentes principales (ACP) a las anomalías de los datos observados de la temperatura mínima diaria para obtener los patrones de variabilidad más relevantes. El ACP es una técnica estadística multivariada la cual transforma linealmente un conjunto original de variables en otro conjunto de nuevas variables no correlacionadas entre sí, para poder explicar la información contenida en el primer conjunto. A ese nuevo conjunto de variables se les llama componentes principales que son combinaciones lineales de las anteriores y se van construyendo según el orden de importancia en cuanto a la variabilidad total que recogen de la muestra (Pearson, 1901).

Se tiene un conjunto inicial de variables (x_1, x_2, \dots, x_p) y a partir de esos datos, se calcula un nuevo conjunto de variables (y_1, y_2, \dots, y_p) . Cada y_j (donde $j=1,2,\dots,p$) es una combinación lineal de las variables originales, pero no se encuentran correlacionadas entre sí:

$$y_j = a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + \dots + a_{jp}x_p = a'_j X$$

Siendo: $a'_j = (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{pj})$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_p \end{bmatrix}$$

Los componentes principales vendrían a ser a_1' de y_1 , a_2' de y_2 , etc.

Los patrones relevantes de la variabilidad de la temperatura mínima fueron hallados a partir de las componentes principales (CP), los cuales se obtienen maximizando la

variancia de la proyección. En el Anexo 1, se explica sobre la aplicación de esta técnica estadística en la meteorología.

Sin embargo, esa variancia puede ser influenciada por distintas escala de medidas o valores grandes que tendrían mayor peso en el análisis. Para el presente estudio, se consideró la matriz de correlaciones por la presencia de valores extremos en las anomalías de temperatura mínima que podrían influir en la distribución espacial de los patrones.

3.2.5 Análisis de correlación entre anomalías de TSM del Océano Pacífico y temperatura mínima del aire

Para el caso del análisis de correlación, esta técnica se aplicó entre los campos de grilla de las anomalías calculadas de TSM región 3.4 del Pacífico y las anomalías de los datos de temperatura mínima del aire del ECMWF también en formato grilla con una resolución espacial de $0.75^\circ \times 0.75^\circ$. Se utilizó la temperatura mínima del ECMWF debido al formato grilla necesaria para la correlación con la TSM. Las anomalías corresponden a las series sin tendencia ni ciclo anual con el objetivo de trabajar con series sin influencias estacionales. Los datos de ambas variables fueron datos diarios en el periodo 1979 – 2005 por la disponibilidad del sitio web del ECMWF.

El cálculo de las anomalías de ambos datos grillados fue realizado con el software *Climate Data Operator* (CDO) que facilita el trabajo con datos en formato NetCDF. Para calcular la correlación, tanto espacial como temporal, se utilizó el software *Grid Analysis and Display System* (GrADS); de esta forma se encontró patrones entre las dos variables que ayudaron a explicar las series de las componentes principales de la temperatura mínima observada en las estaciones meteorológicas.

En el análisis de correlación, se aplicó el test estadístico T-Student con un nivel de significancia de 95% con el objetivo de comprobar si la correlación encontrada entre las variables va más allá del azar. La prueba T-Student consiste en rechazar o aceptar la hipótesis nula. Para ello se considera el valor de “t” calculado a partir de los datos, que se

compara con el valor “t” crítico de la tabla estadística correspondiente al nivel de significancia y grados de libertad (Wilks, 2006). El valor de “t” calculado está definido por la siguiente fórmula:

$$t = \frac{r_{xy}}{\sqrt{\frac{1 - r_{xy}^2}{N - 2}}} \dots (6)$$

Donde:

r_{xy} : coeficiente de correlación espacial hallado a partir de los datos de temperatura mínima y TSM.

N: número de datos

t: valor de “t” calculado

Se rechaza la hipótesis nula si el valor de “t” calculado es mayor al valor “t” crítico de la tabla estadística.

Para finalizar, se realizó un análisis de las intensidades de heladas para la fase positiva (El Niño) y negativa (La Niña) del evento ENOS con la finalidad de verificar si los resultados obtenidos concuerdan con la realidad.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Análisis exploratorio de los datos observados

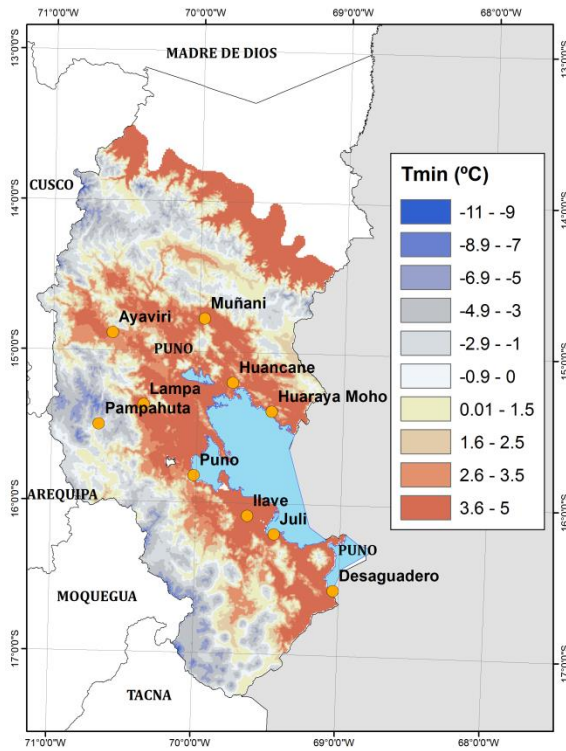
En este punto se presentan los resultados correspondientes al análisis exploratorio de los datos de temperatura mínima del aire de las estaciones meteorológicas. En la Tabla 4, se muestran los promedios y percentil 10 de forma estacional (verano – DEF, otoño – MAM, invierno – JJA y primavera – SON) para cada punto de estación meteorológica. Vale resaltar que el percentil 10 expresa el valor de la temperatura donde el 10% de los datos de la serie es menor a dicho valor; en otras palabras, se tiene 10% de probabilidad de ocurrencia y resultan en valores atípicos, por esta razón es muy utilizado para analizar eventos extremos fríos (Wilks, 2006).

Tabla 4: Promedios y valores del percentil 10 para cada estación meteorológica. DEF (verano), MAM (otoño), JJA (invierno) y SON (setiembre).

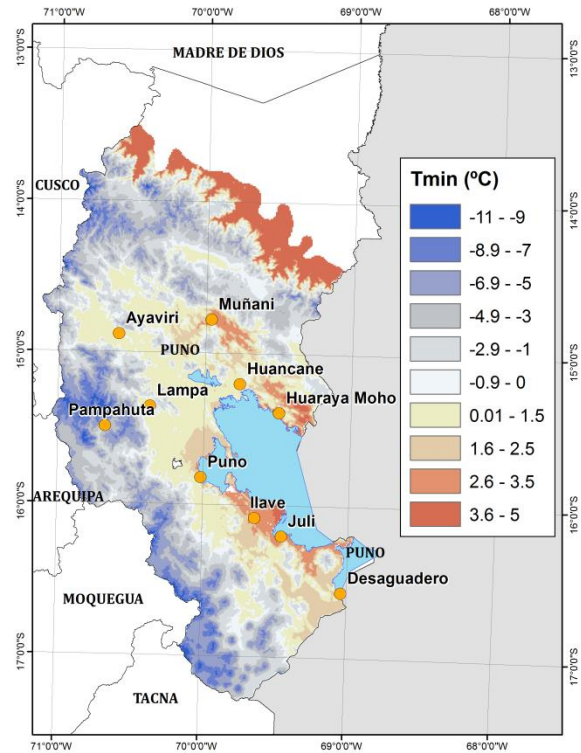
	AYAVIRI	DESAG	HUANCANE	HUARAYA MOHO	ILAV	JULI	LAMPA	MUÑANI	PAMPAH	PUNO
PROMEDIO	(DEF) 3.1	4.3	4.1	4.9	4.6	4.8	3.7	3.8	-0.9	5.2
	(MAM) 0.3	1.4	1.1	2.9	2.3	2.8	0.4	1.7	-3.8	3.1
	(JJA) -6.2	-4.5	-4.0	-0.7	-2.2	-0.7	-5.2	-2.3	-11.0	-0.7
	(SON) 0.4	1.0	1.7	3.0	2.1	3.0	-0.2	1.7	-6.2	3.1
PERCENTIL 10	(DEF) 0.8	1.8	2.0	3.2	2.8	2.8	0.9	1.6	-4.2	3.6
	(MAM) -5.6	-4.9	-3.8	-0.5	-1.8	-0.7	-5.4	-2.0	-10.0	-0.4
	(JJA) -10.5	-9.4	-7.4	-3.0	-6.0	-3.7	-8.8	-5.4	-15.0	-3.2
	(SON) -4.0	-4.2	-2.0	0.4	-1.2	0.2	-4.8	-1.2	-11.6	0.4

La temperatura mínima promedio presenta valores máximos en verano y mínimos en invierno, con valores negativos, en todas las estaciones meteorológicas. En otoño, el promedio de la temperatura mínima puede ser mayor o menor a la de primavera, dependiendo de las características geográficas en cada lugar. En la Figura 9, se muestran los mapas con la distribución espacial del promedio estacional de la temperatura mínima del aire.

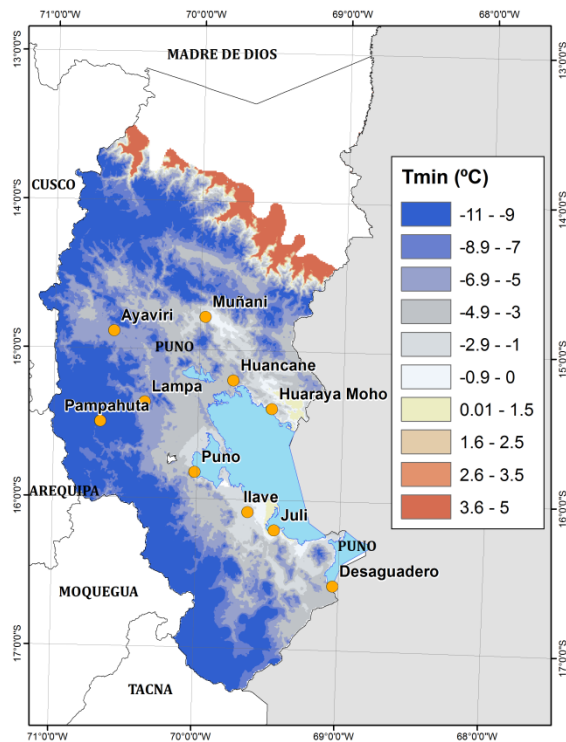
a)



b)



c)



d)

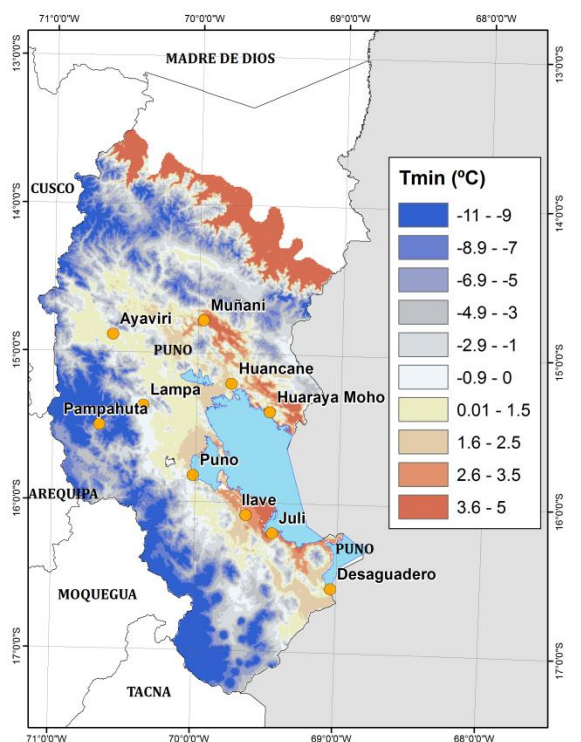
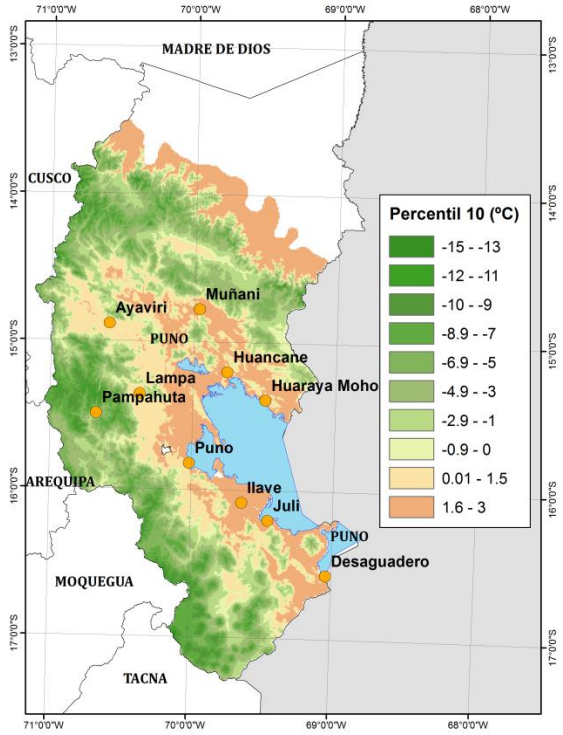
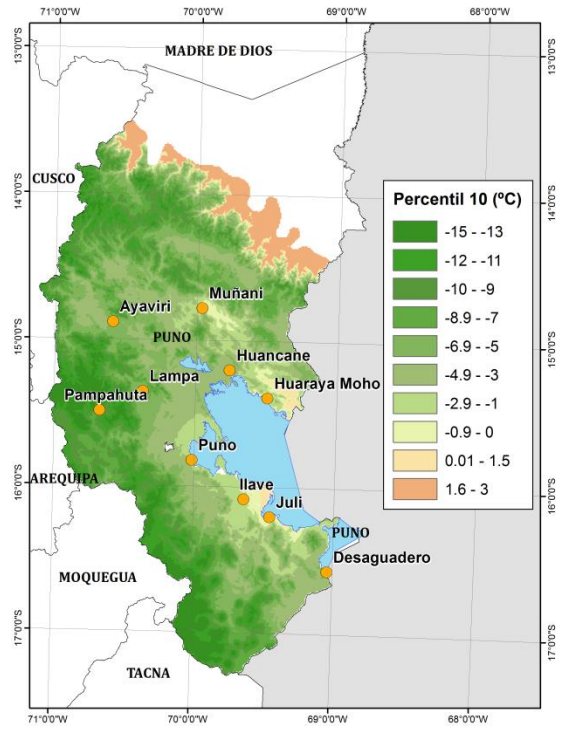


Figura 9: Representación espacial del promedio de la temperatura mínima del aire para el periodo 1971 – 2005 para la estación de verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d).

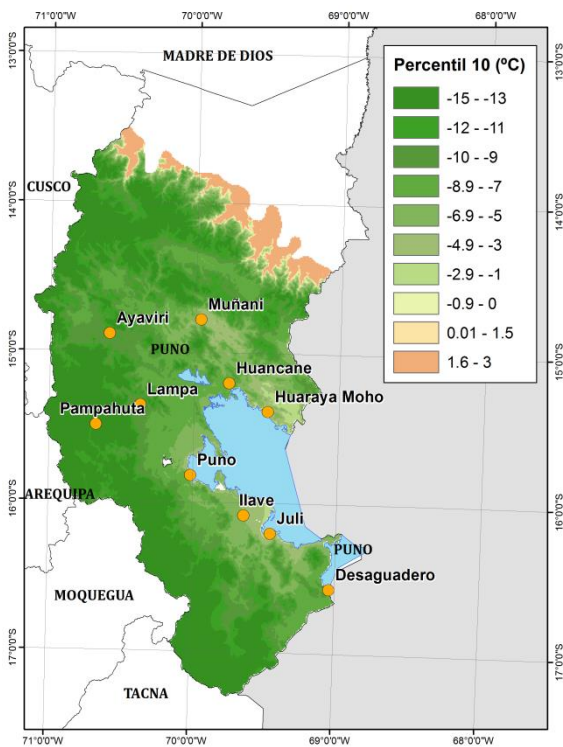
a)



b)



c)



d)

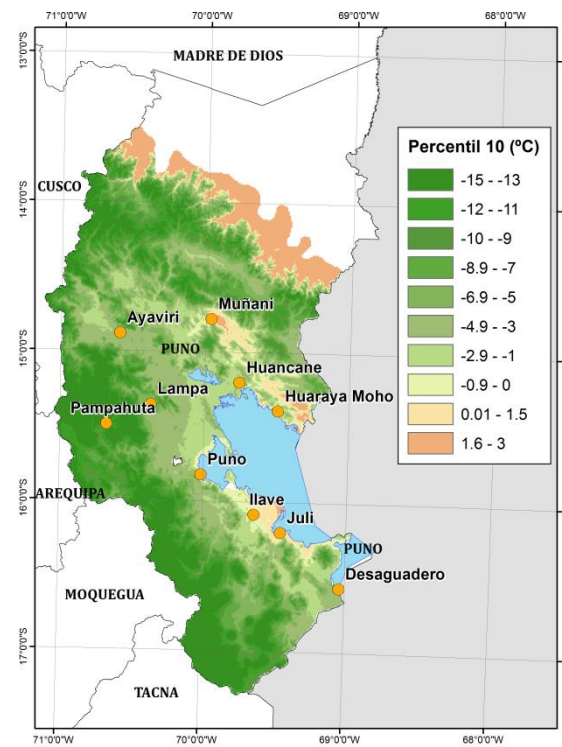


Figura 10: Representación espacial del percentil 10 de la temperatura mínima del aire para el periodo 1971 – 2005 para la estación de verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d).

En los mapas se puede observar que, en promedio, la temperatura mínima presenta los valores más bajos en la parte occidental del departamento de Puno (Pampahuta) para todo el año. Los distritos cercanos al lago Titicaca mantienen temperaturas mínimas más altas que las zonas más alejadas al lago, incluso durante el invierno; debido al efecto termorregulador del agua (Figura 9).

Con respecto al percentil 10, el invierno muestra valores más negativos por lo que se espera hallar temperaturas negativas más extremas. Siendo la estación de otoño el comienzo de la temporada fría, también presenta valores bajos de percentil 10 seguido de la primavera, con excepción en la estación meteorológica de Pampahuta donde en primavera se tienen valores más negativos que en otoño. Debido a la ubicación más lejana al lago Titicaca, la estación de Pampahuta muestra promedios de temperatura mínima negativos en todo el año y presentará valores más extremos que las demás estaciones meteorológicas (Tabla 4).

La Figura 10 presenta los mapas de los valores del percentil 10 en forma estacional de la temperatura mínima del aire. Estos mapas también muestran que la parte occidental de Puno es la zona más fría del departamento y con mayor probabilidad de ocurrencia de eventos extremos.

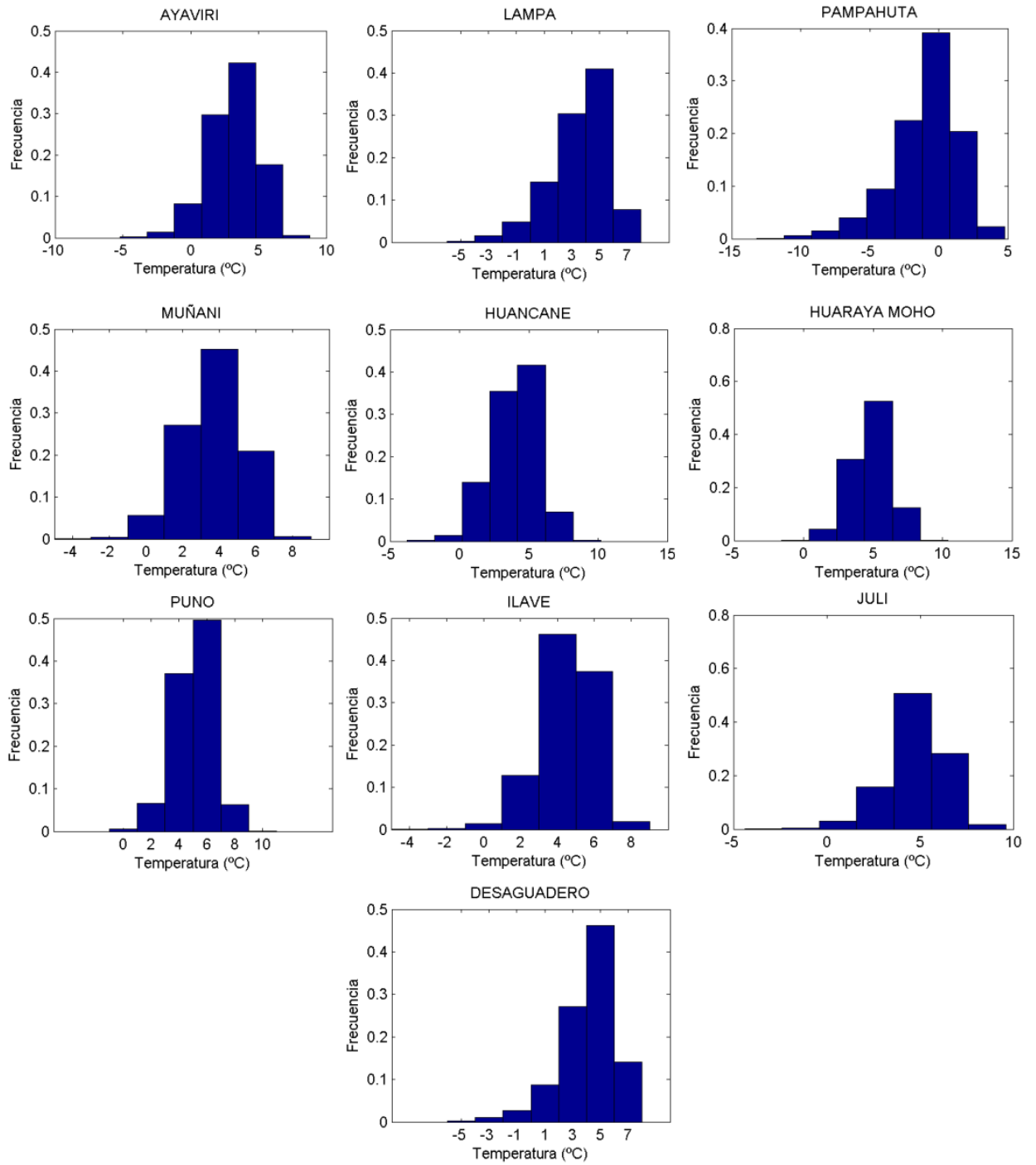


Figura 11: Histogramas de temperatura mínima correspondientes a la estación de verano.

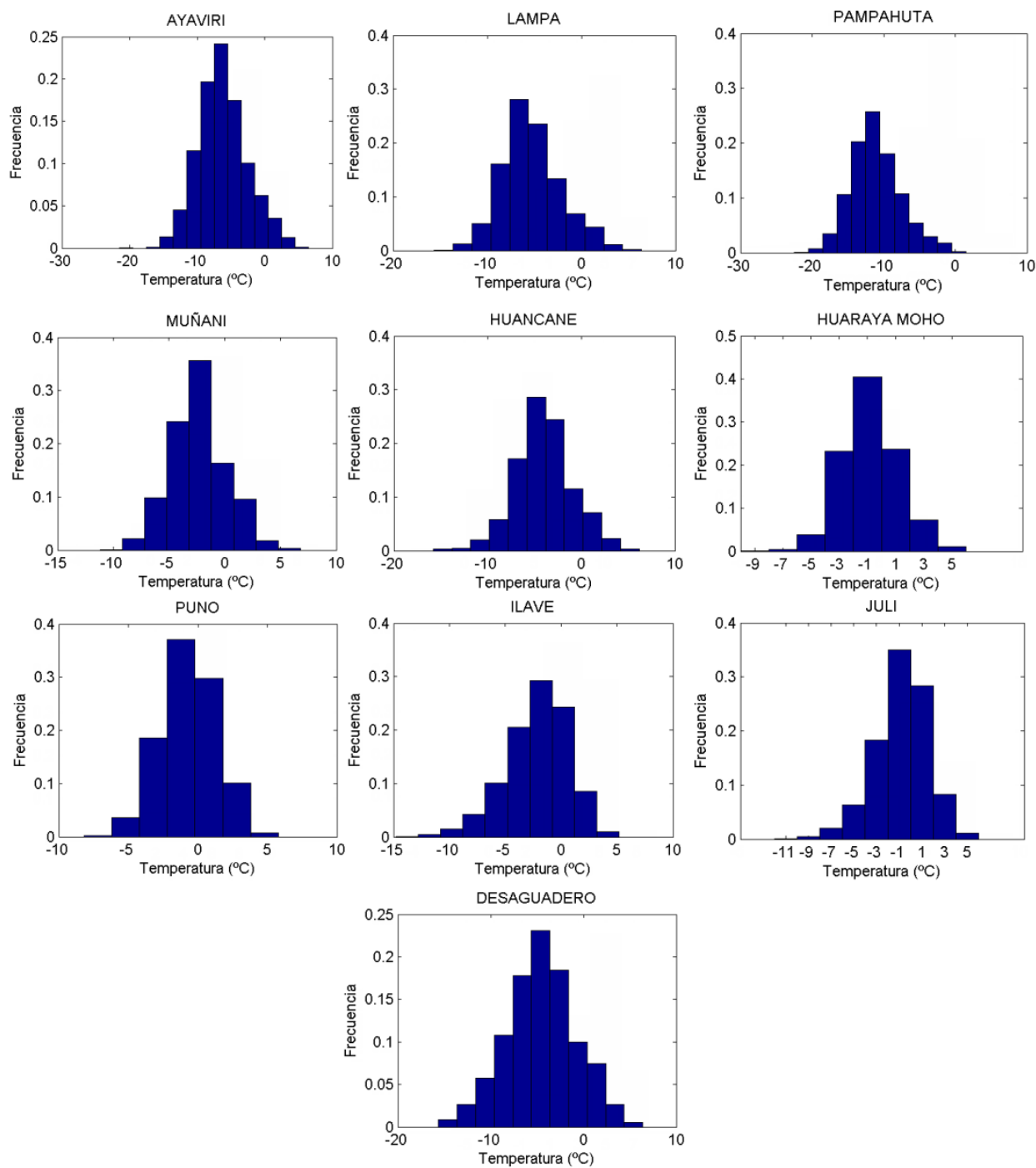
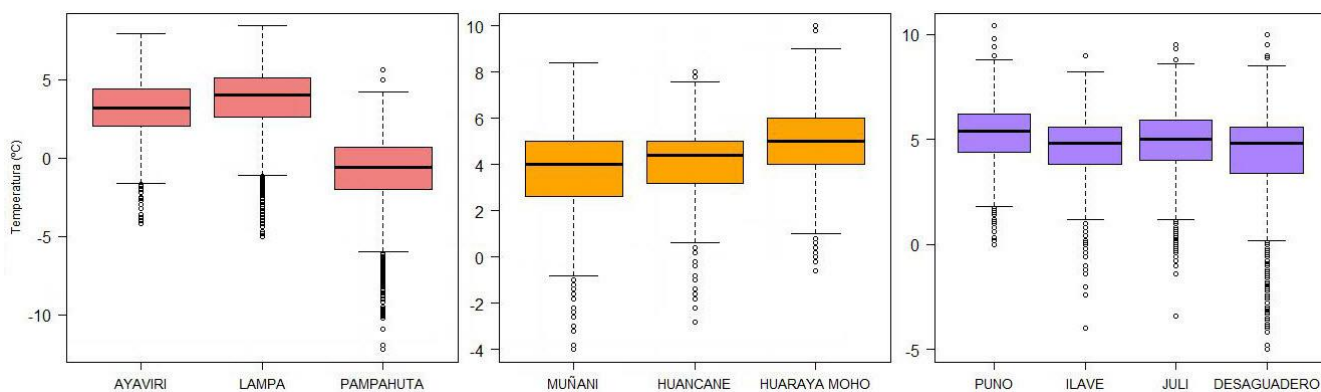


Figura 12: Histogramas de temperatura mínima correspondientes a la estación de invierno.

La Figura 11 y Figura 12 muestran los histogramas de temperatura mínima del aire para cada estación meteorológica para los meses de verano e invierno, respectivamente. La Figura 13 corresponde a los diagramas box-plot de la temperatura mínima para el verano (a) e invierno (b).

a)



b)

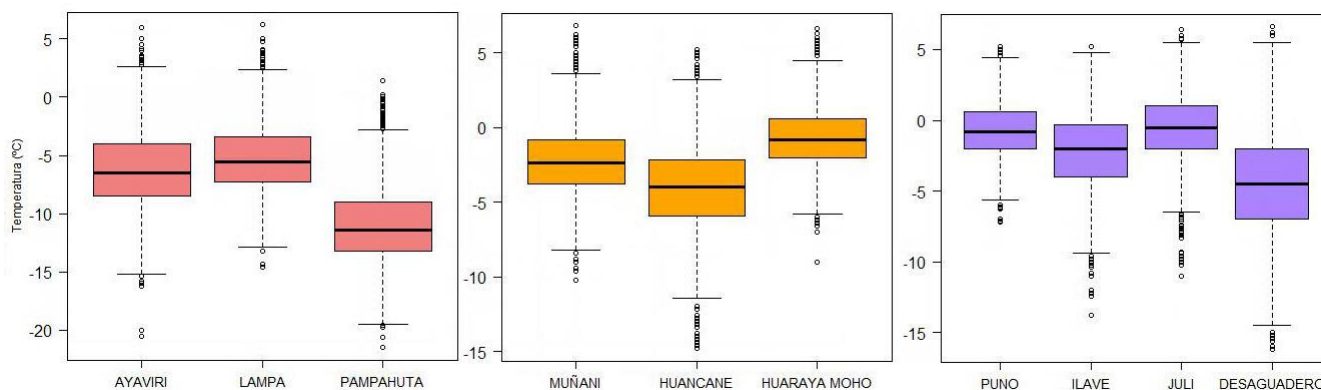


Figura 13: Diagramas box-plot de temperatura mínima correspondientes a la estación de verano (a) e invierno (b).

Durante el verano, las temperaturas mínimas más frecuentes están en el intervalo de 4°C – 6°C (Figura 11), mientras que en el invierno, el intervalo más frecuente cambia para valores negativos entre -4°C y -6°C, o hasta -10°C en el caso de Pampahuta (Figura 12). Así mismo, los histogramas muestran que la temperatura mínima en invierno presenta una distribución gaussiana en mayor grado que en verano.

El invierno se considera la estación del año con mayor frecuencia de temperaturas negativas por lo que, en los diagramas de box-plot, no se consideran valores atípicos las temperaturas extremas negativas (Figura 13b). En cuanto que en el verano, siendo la estación más cálida, los valores atípicos son en su mayoría temperaturas negativas (Figura 13a).

4.2 Temperatura mínima del aire y frecuencia de heladas

La temperatura mínima del aire está estrechamente relacionada con la frecuencia de helada, tal como se muestra en el diagrama de dispersión (Figura 14) y tabla de coeficientes de correlación de Pearson y Spearman (Tabla 5). Los promedios mensuales históricos de frecuencia de heladas y de temperatura mínima, calculados para cada punto de estación, presentan una línea de tendencia negativa; es decir los meses que poseen mayores valores de frecuencia de helada, son meses en los que la temperatura mínima es menor. Por lo tanto, existe relación inversa entre la temperatura mínima del aire y la frecuencia de heladas, siguiendo también los valores negativos de los coeficientes de correlación de Pearson y de Spearman (Tabla 5).

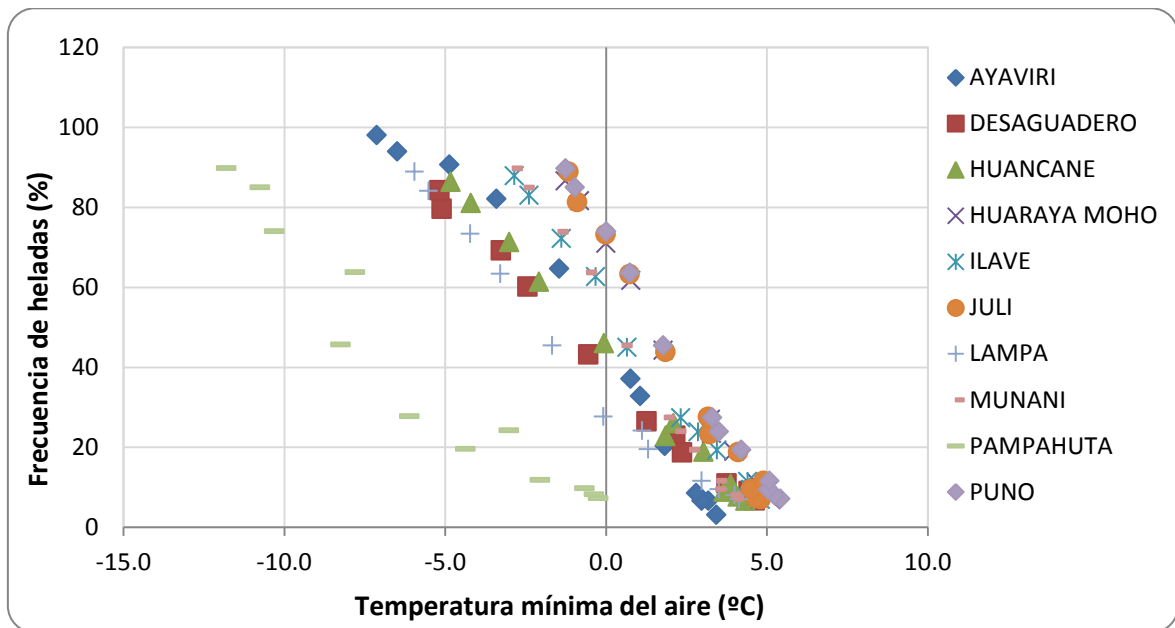


Figura 14: Diagrama de dispersión entre la temperatura mínima del aire y frecuencia de heladas.

Tabla 5: Coeficientes de Correlación entre temperatura mínima y frecuencia de heladas.

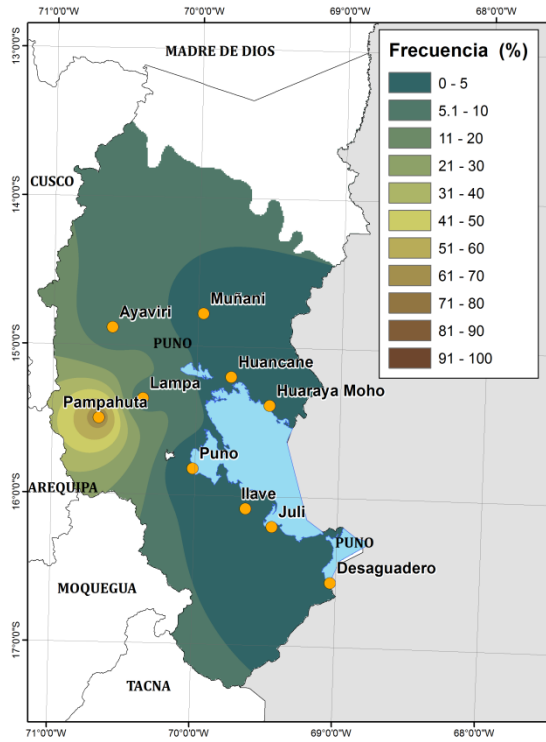
ESTACIÓN	COEF. PEARSON	COEF. SPEARMAN
AYAVIRI	-0.98	-0.99
DESAGUAD	-0.99	-0.99
HUANCANE	-0.99	-0.98
HUARAYA MOHO	-0.99	-0.98
ILAVE	-0.99	-0.99
JULI	-0.99	-0.95
LAMPA	-0.98	-0.99
MUÑANI	-0.99	-0.99
PAMPAHUTA	-0.96	-0.98
PUNO	-0.99	-0.99

Teniendo en cuenta esta relación, se consideraron los datos de temperatura mínima del aire para estudiar, de forma indirecta, la influencia de los eventos ENOS en la frecuencia de heladas.

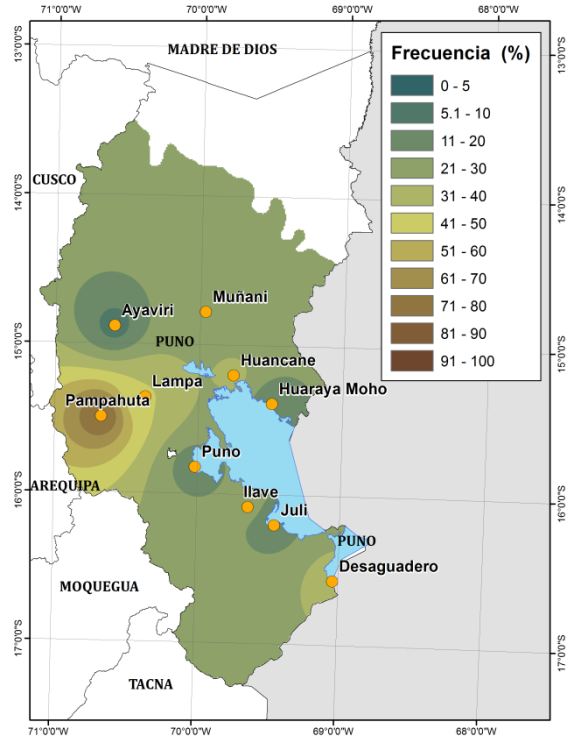
Adicionalmente, se analizó el comportamiento de la frecuencia estacional de heladas y su intensidad. La Figuras 15 y Figura 16 presentan los mapas estacionales correspondientes a la frecuencia e intensidad de heladas, respectivamente. La frecuencia de helada en verano tiene valores entre 0 – 5% para las estaciones cercanas al lago y máximo de 10% en las estaciones alejadas (Figura 15a). En otoño y primavera, las frecuencias de helada aumentan hasta llegar a 11 – 20% y 21 – 30%, en ese orden (Figura 15b y Figura 15d); mientras que en invierno, los valores se disparan hasta los 81 – 100% (Figura 15c). La estación Pampahuta tiene un comportamiento particular pues presenta valores resaltantes de frecuencia de helada en todas las estaciones del año, inclusive en el verano con 61 – 70% de frecuencia. Este comportamiento puede estar relacionado a su lejanía con respecto al lago Titicaca, que actúa como termorregulador, y a la mayor altitud que se encuentra.

En relación a la intensidad de heladas, en verano se presentan valores entre $-3.9 - 0^{\circ}\text{C}$ (Figura 16a) y en invierno llega a valores muy bajos como -18°C en Pampahuta (Figura 16c). En otoño, se observa mayor área de heladas más intensas comparado con la estación de primavera (Figura 16b y Figura 16d). Cabe resaltar, que en Puno ocurren heladas también en verano pero con menor intensidad y frecuencia que en invierno; además de que la parte occidental del departamento es más fría que el resto.

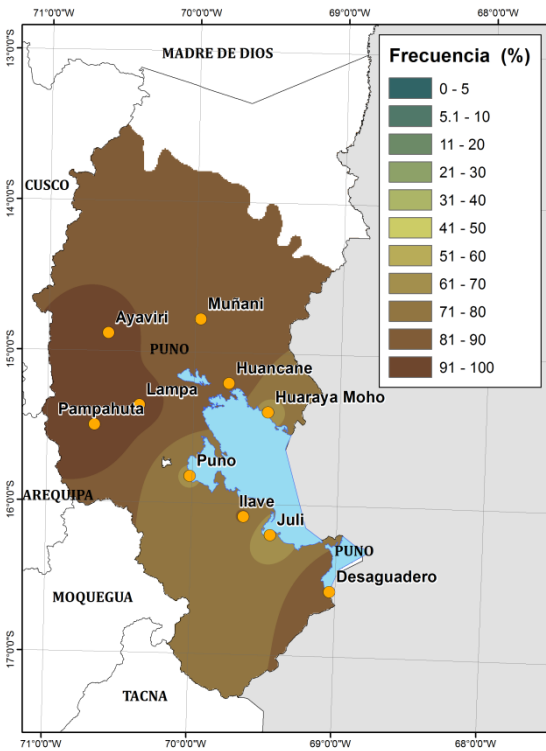
a)



b)



c)



d)

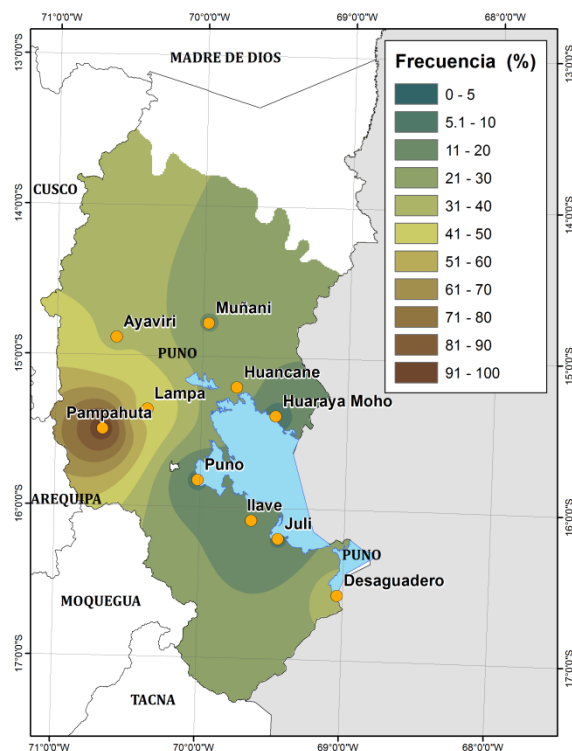
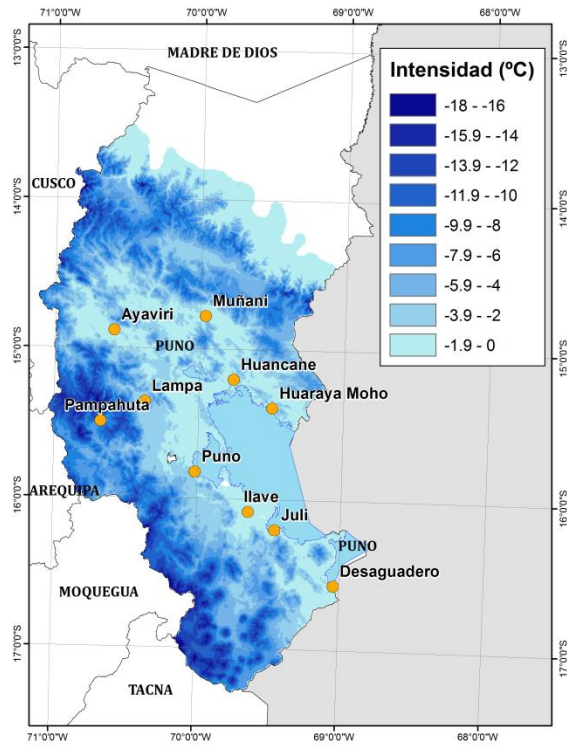
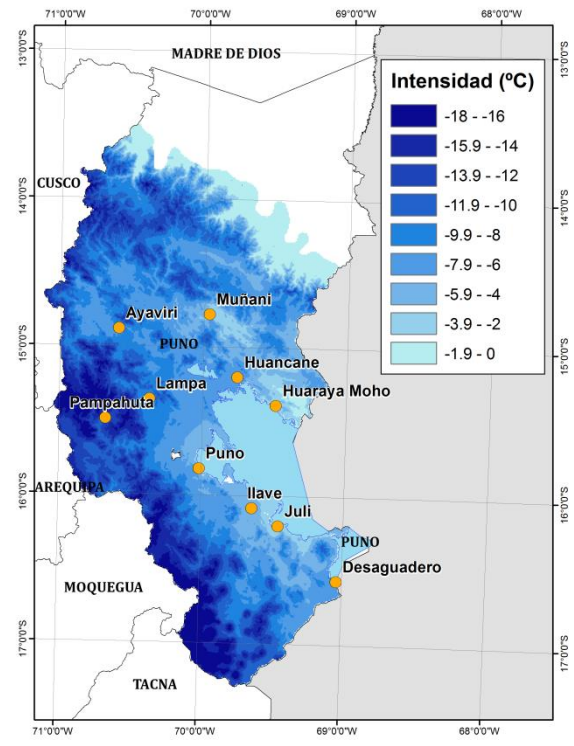


Figura 15: Mapas de frecuencia relativa de heladas durante el periodo 1971 – 2005 para cada estación del año: (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

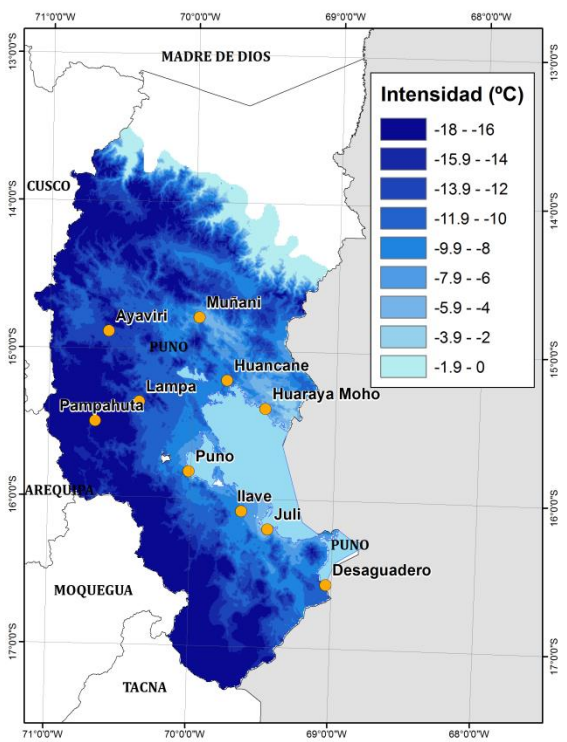
a)



b)



c)



d)

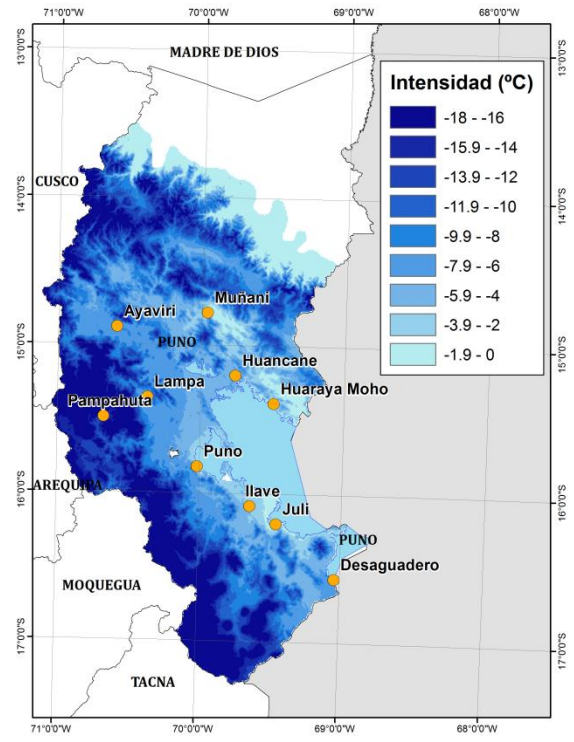


Figura 16: Mapas de intensidad de heladas durante el periodo 1971 – 2005 para cada estación del año: (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera.

4.3 Anomalías de los datos observados de temperatura mínima del aire

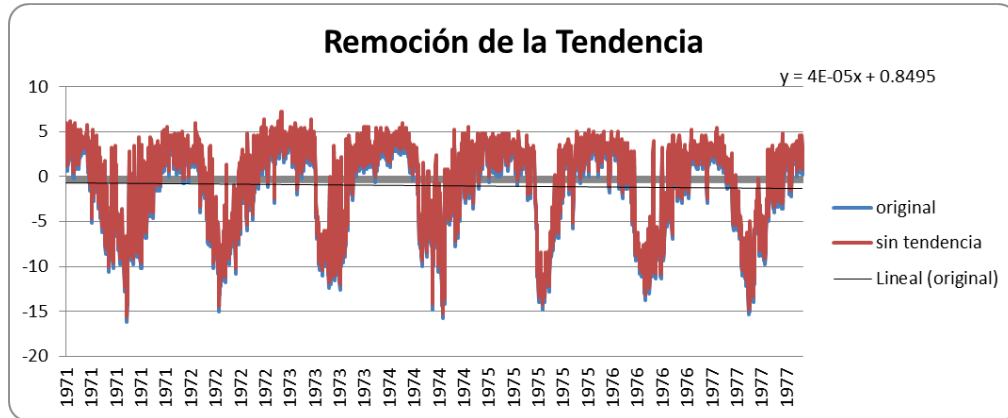
Si se consideraran los datos de temperatura mínima del aire como tal, los patrones más relevantes estarían influenciados por la tendencia a lo largo del tiempo de la serie y por la estacionalidad de la misma. Por tal motivo, la Figura 17 muestra la obtención de las anomalías de temperatura mínima por medio de la remoción de la tendencia y del ciclo anual de la serie. La Figura 17a presenta los datos observados originales (azul) y los datos observados sin tendencia (rojo); se puede observar que la serie no presenta una tendencia muy marcada, sin embargo es necesario eliminar esta característica para evitar su influencia en la variabilidad.

La Figura 17b representa los armónicos calculados para la serie de temperatura mínima de la estación Ayaviri. Para el caso de esta estación, el ciclo anual está representado por valores máximos en primavera y verano y valores mínimos en otoño e invierno; es decir tiene sólo una oscilación en la onda. Por ello, basta con el primer o segundo armónico para representar el ciclo. En la Figura 17c, se observa el comportamiento de la serie original de temperatura mínima, el ciclo anual representado por el segundo armónico y la serie de anomalías para la estación Ayaviri. Las anomalías fueron obtenidas con la sustracción entre la serie original y el ciclo anual, y es justamente estas series de anomalías que se usó para en la técnica de análisis de componentes principales. En el Anexo 2, se encuentran los gráficos del cálculo de las anomalías de las demás estaciones meteorológicas.

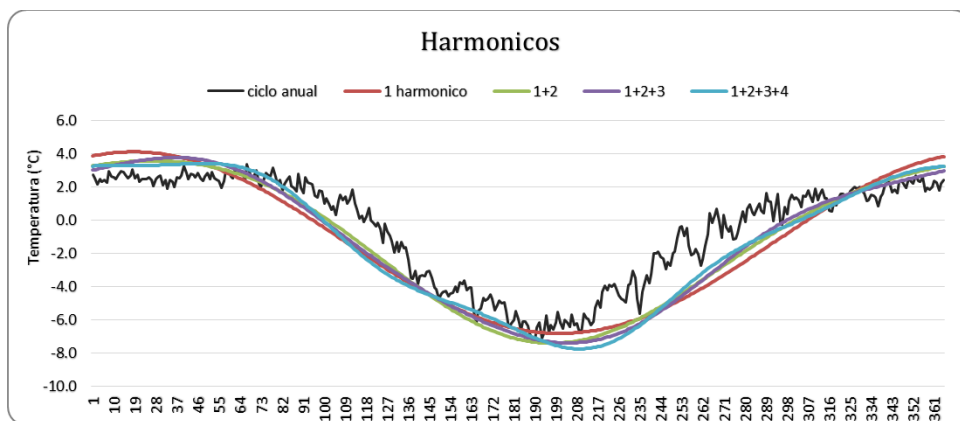
Antes de obtener los patrones predominantes de la temperatura mínima, se aplicó el índice RSD (Rodionov, 2004) para indagar si existen puntos de quiebre en las series de datos. Tales puntos de quiebre identifican diferencias en los promedios de ciertos tramos de la serie debido a cambios en la variabilidad de la zona o a cambios realizados en las estaciones meteorológicas, como ubicación, instrumentos, etc. Vale resaltar, que es necesario corroborar los resultados del test con archivos de metadata de cada estación meteorológica para determinar si el punto de quiebre se debe a cambios de ubicación; ya que si fuera el caso, se tendría que descartar la estación y/o el período de cambio pues la variabilidad correspondería a otra localidad. Los resultados del test RSD mostraron que no

se obtuvo ningún punto de quiebre significativo debido a cambios de ubicación en las estaciones consideradas, por lo que, no fue necesario disminuir la cantidad de datos observados en el análisis de los patrones predominantes.

a)



b)



c)

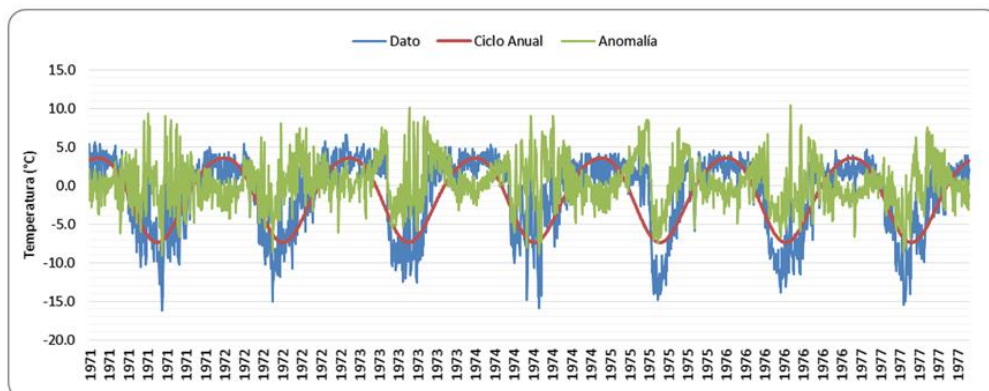


Figura 17: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Ayaviri. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Ayaviri.

4.4 Patrones relevantes de la temperatura mínima del aire

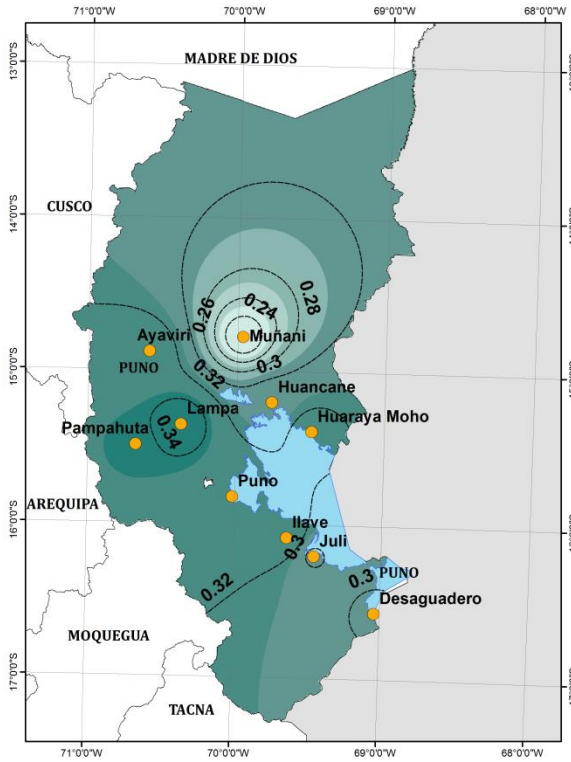
En la Tabla 6, se muestran los porcentajes de las variancias explicadas por todas las componentes principales. Las dos primeras componentes principales encontradas explican el 71.9% de la variancia total de los datos (61.9% y 10.0%, respectivamente). Por esta razón serán consideradas para el análisis espacial de los datos y representadas mediante la interpolación con el método Kriging para obtener el patrón espacial. La Figura 18 presenta las dos primeras componentes.

Tabla 6: Variancia explicada de los componentes principales.

Componente Principal	Variancia (%)
CP 1	61.9
CP 2	10.0
CP 3	6.5
CP 4	4.7
CP 5	3.9
CP 6	3.3
CP 7	3.1
CP 8	2.8
CP 9	2.2
CP 10	1.5

En la Figura 18a, se observa que para la CP1 toda la región de estudio presenta un mismo comportamiento de la temperatura mínima. La parte central (Pampahuta y Lampa) tienen los mayores coeficientes y la parte norte (Muñani), los menores coeficientes. En la Figura 18b, se aprecia señales opuestas entre la parte norte y centro (Ayaviri, Muñani, Huancane y Huaraya-Moho) y sur del área de estudio.

a)



b)

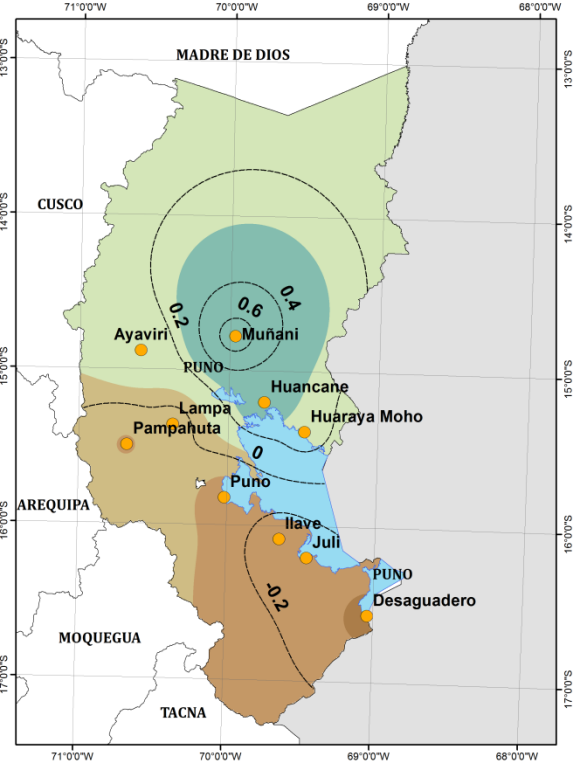


Figura 18: (a) Primera componente principal (CP1). (b) Segunda componente principal (CP2). Los valores de los contornos representan los valores de los autovectores.

La representación espacial de las componente principales nos muestran un determinado comportamiento relevante de la variable en estudio, pero no determina la forzante de tal variabilidad. Es así, que se hace necesario un análisis de correlación espacial y temporal para poder identificar la influencia de forzantes.

4.5 Análisis de correlación entre TSM y temperatura mínima del aire

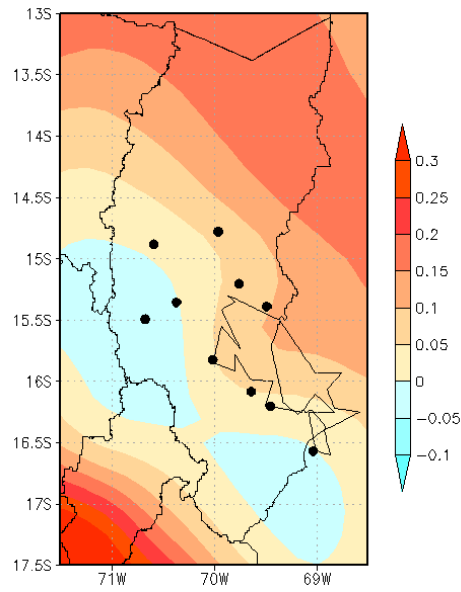
La Figura 19a presenta la correlación entre la región Niño 3.4 de la TSM y la temperatura mínima del aire en Puno, tomando en cuenta todos los datos del año. En la parte central y norte del departamento, se encuentran correlaciones positivas entre 0.15 – 0.2; mientras que la parte sur muestra correlaciones negativas entre -0.1 – 0. Este patrón de correlaciones es relativamente similar al patrón de la segunda componente principal encontrada en el ítem 4 en forma de dipolo, el cual explica un 10% de la variabilidad de los datos en esa

área. Por tanto, existe influencia de la región Niño 3.4 sobre la temperatura mínima del aire en Puno; sin embargo, al realizar la prueba de significancia estadística, se encontró que las correlaciones calculadas no eran significativas al 95% en el área de estudio.

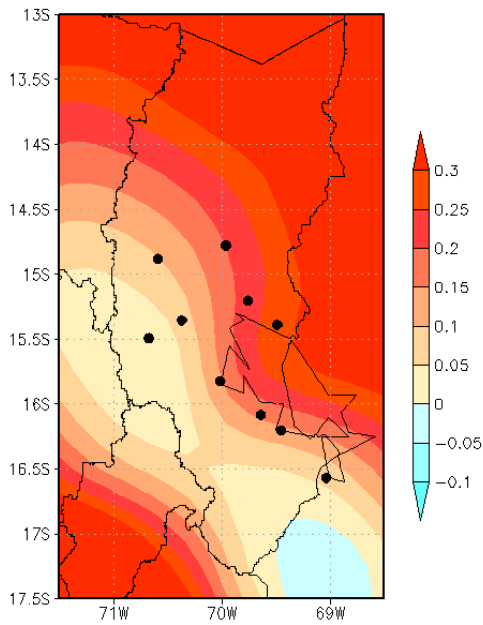
Por tal razón, y considerando la distribución obtenida en los histogramas, se calcularon las correlaciones entre la región Niño 3.4 y las temperaturas mínimas del aire separando los meses de verano e invierno. En la Figura 19b y Figura 19c, se presentan los mapas del análisis de correlación entre la TSM de la región Niño 3.4 y las temperaturas mínimas para el verano e invierno, respectivamente. En ambos mapas, se aprecia un mismo patrón de correlaciones en todo Puno, con la diferencia que para el verano se muestran correlaciones positivas (Figura 19b) y para el invierno correlaciones negativas (Figura 19c). En este caso, estos patrones son muy similares al patrón de la primera componente principal que explica un 61.9% de la variabilidad de los datos.

Es así que, un aumento (disminución) en las anomalías de TSM en la región Niño 3.4 induce a un aumento (disminución) en las temperaturas mínimas del aire en todo el departamento de Puno durante los meses de verano (invierno). Por lo que, se presentaría menor (mayor) ocurrencia de heladas en el departamento en la fase positiva (negativa) ENOS. Es importante señalar, que las correlaciones para el verano presentan mayor significancia estadística que en el caso de invierno.

a)



b)



c)

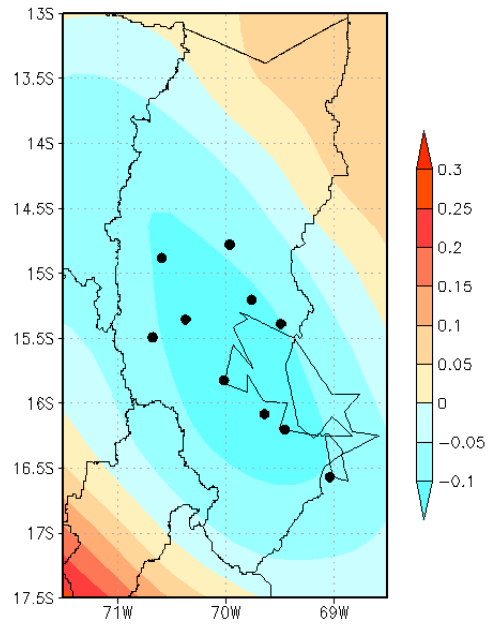


Figura 19: Patrón de correlación entre la temperatura mínima del aire en Puno y la TSM de la región Niño 3.4 para el periodo 1979 – 2005 considerando todo el año (a), meses de verano (b) y meses de invierno (c).

Se analizaron algunos estudios de caso para corroborar los resultados obtenidos. Antes de ello, es necesario entender que los eventos ENOS son nombrados por los años de inicio y finalización del mismo. La Figura 20 ilustra la forma de desarrollo temporal de los eventos ENOS. En general, para nombrar un evento ENOS se considera el año de inicio del

calentamiento del mar (principalmente a mediados de año) y el año en el que finaliza ese aumento de la TSM. Dado que, el mayor calentamiento del océano se muestra en los meses de primavera del primer año y verano del segundo año, los regímenes de precipitación en el país se ven alterados ya que coincide con el período de lluvias. Para el análisis de los casos en heladas, se consideraron los eventos ENOS 1982/1983 (fase positiva), y 1988/1989 (fase negativa).

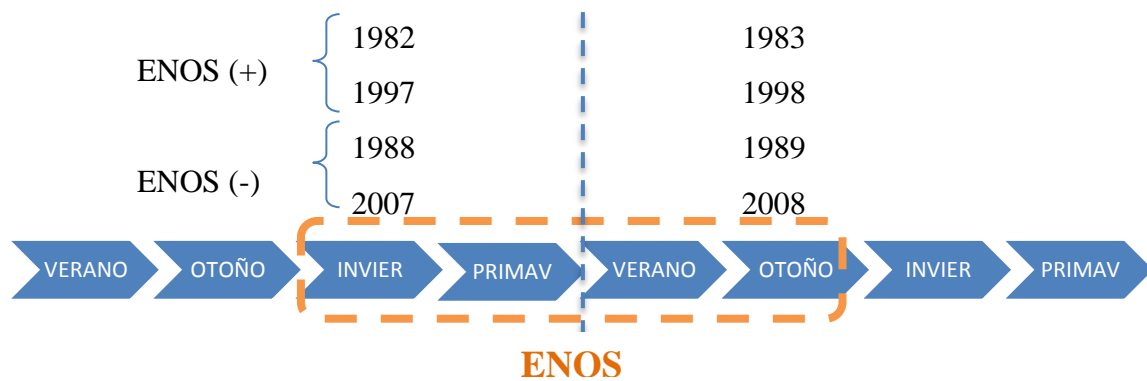


Figura 20: Desarrollo temporal de los eventos ENOS entre los años inicial y final considerados en su nombramiento.

En los estudios de caso, se compararon las intensidades de heladas durante los meses de verano e invierno en el año inicial y final de los eventos ENOS. Se comenzó con los eventos de fase positiva (El Niño) en los meses de verano. En la Figura 21, se presenta los mapas de anomalía de TSM en el océano Pacífico para los meses de verano del año 1982 y verano de 1983 elaborados por SENAMHI. Se puede observar que en el verano del año inicial del evento ENOS (1982) la temperatura superficial del mar no presenta un fuerte calentamiento sobre la región Niño 3.4, mientras que en el verano del siguiente año (1983) se muestran anomalías positivas de hasta 5°C.

Considerando este comportamiento diferenciado de la TSM en los veranos del primer y segundo año, se presentan en la Figura 23 los gráficos de la comparación: las barras azules corresponden a la intensidad de heladas del año inicial del evento ENOS, las barras verdes al segundo año del evento ENOS y la línea roja representa los valores normales de la intensidad de heladas para el período de estudio.

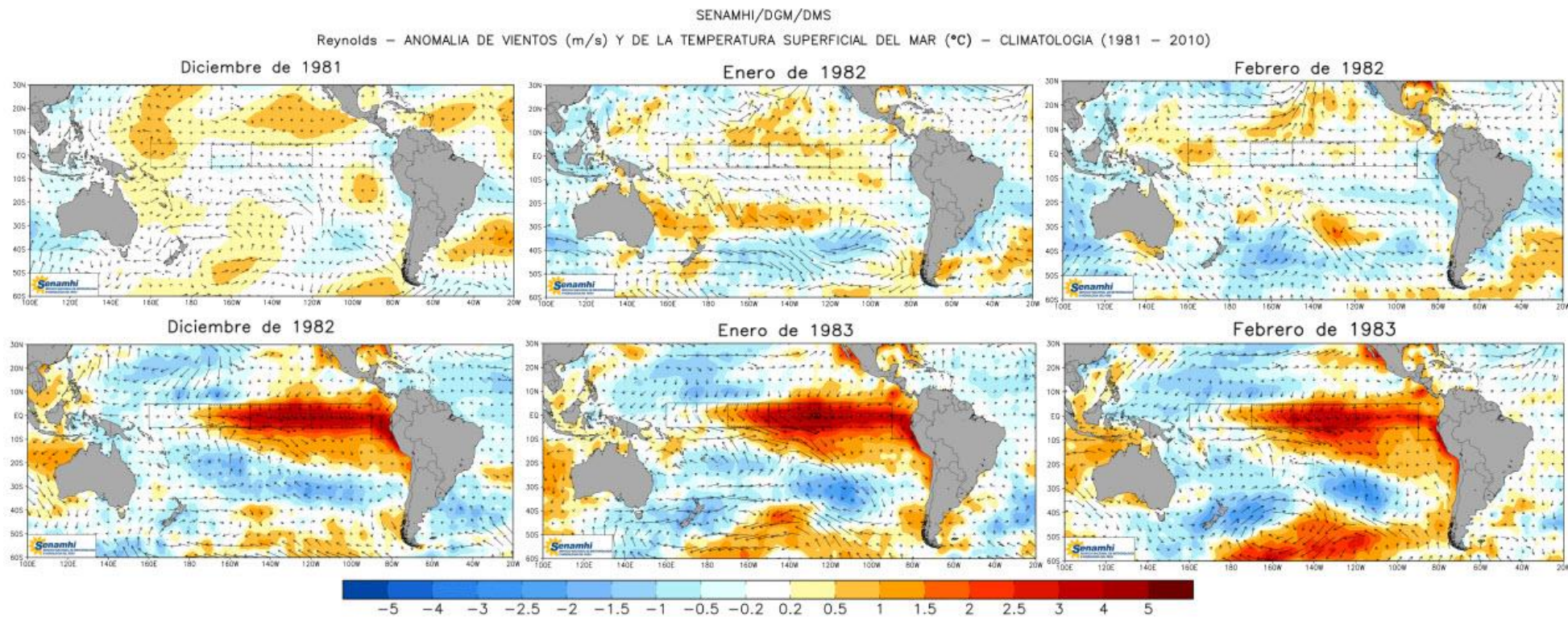


Figura 21: Mapas de anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) sobre el océano Pacífico para los meses de verano del año 1982 (arriba) y 1983 (debajo). FUENTE: SENAMHI.

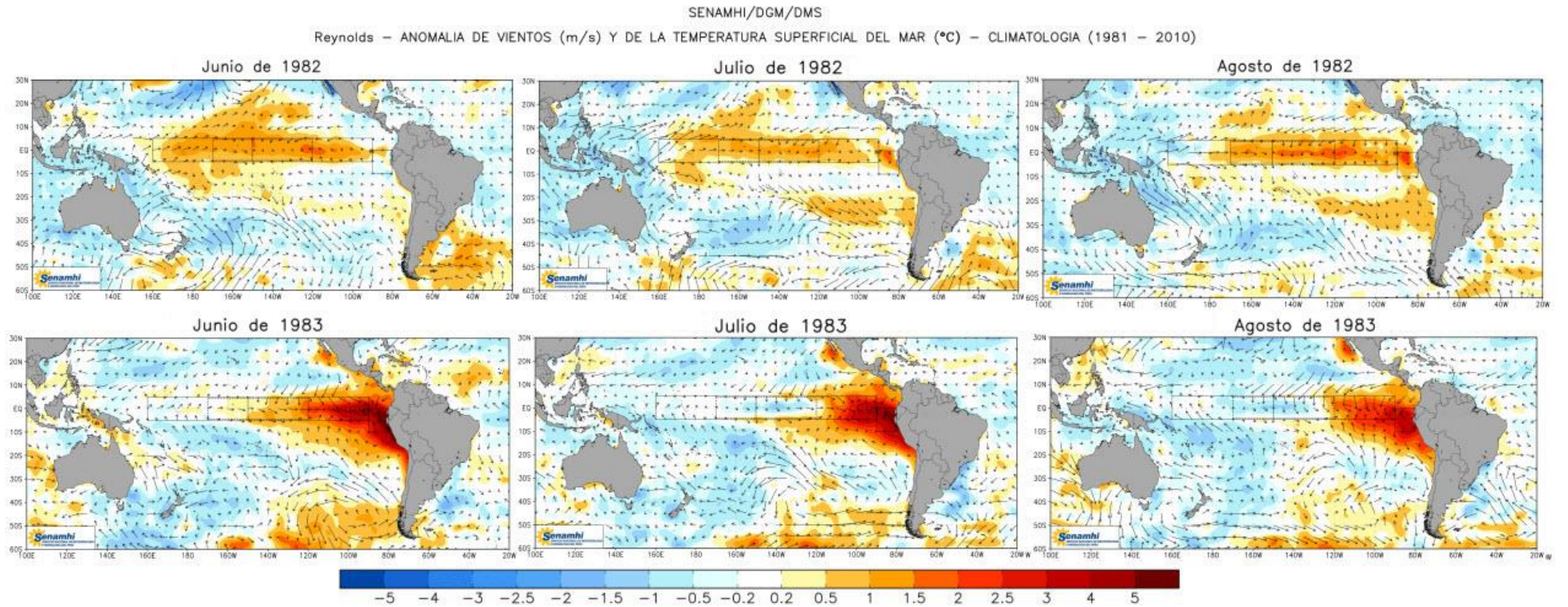
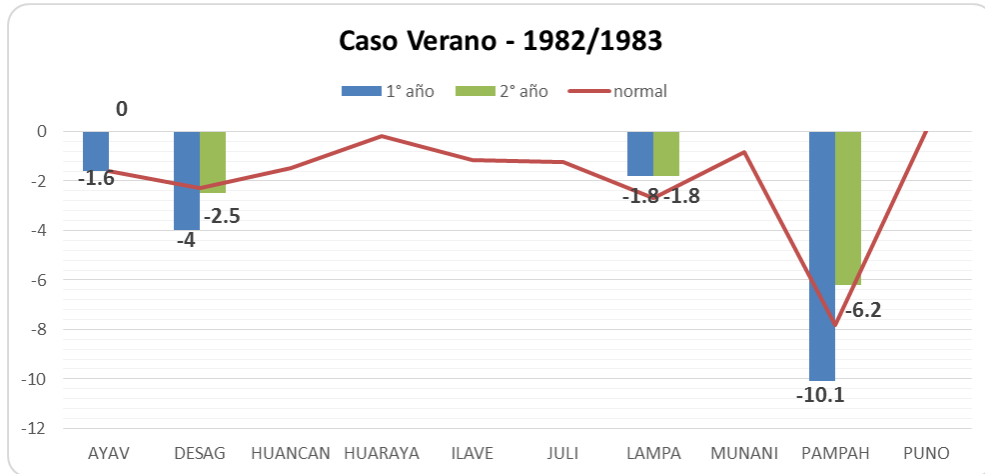


Figura 22: Mapas de anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) sobre el océano Pacífico para los meses de invierno del año 1982 (arriba) y 1983 (debajo). FUENTE: SENAMHI.

a)



b)

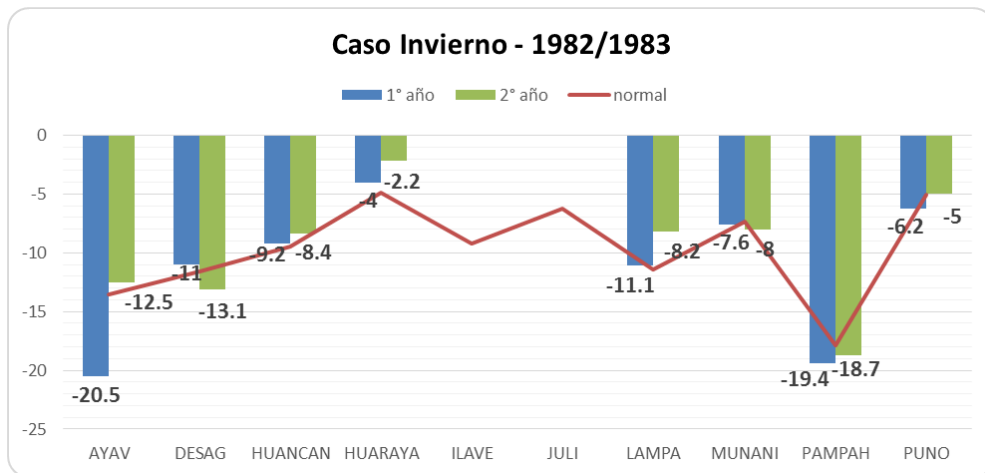


Figura 23: Intensidades de heladas en los meses de verano (a) e invierno (b) durante una fase positiva del evento ENOS (1º año: 1982, 2º año: 1983).

La intensidad de heladas en los meses de verano del año 1983 (2º año), donde se presenta aumento de la TSM en la región Niño 3.4, tiene menores valores comparado con la intensidad de heladas del verano 1982 (1º año), donde la TSM presenta valores normales en la región Niño 3.4; es decir la temperatura mínima del aire experimenta un aumento en los valores diarios (Figura 23a). Este comportamiento coincide con los resultados obtenidos en el análisis de correlación, puesto que, para el verano existe correlación positiva entre la temperatura mínima del aire en Puno y la TSM en el Pacífico central (Figura 19b). Es así que, al presentarse un aumento de temperaturas en la región Niño 3.4, las temperaturas mínimas del aire en el Altiplano también aumentarían y con ello, la intensidad de heladas sería menor durante el verano.

Para el caso de los meses de invierno en la fase positiva de ENOS, la Figura 22 presenta los mapas de anomalía de TSM en el océano Pacífico durante esa estación para el año inicial 1982 y año final 1983 elaborados por SENAMHI. Durante junio, julio y agosto de 1982, la TSM muestra anomalías positivas, es decir un aumento en sus valores; mientras que en el invierno de 1983, las aguas del Pacífico central experimentan una disminución en sus temperaturas expresada en anomalías negativas.

Según el análisis de correlación para el invierno, existe correlación negativa entre la TSM de la región Niño 3.4 y las temperaturas mínimas del aire en el Altiplano. Este patrón puede visualizarse en la Figura 23b: las intensidades de heladas en 1982 (1° año), donde la TSM aumenta, son mayores debido a una disminución de las temperaturas mínimas en la región y las intensidades de heladas en 1983 (2° año), donde la TSM disminuye, son menores debido a un aumento de las temperaturas mínimas del aire.

En el análisis de los estudios de caso para la fase negativa de los eventos ENOS (La Niña) para los meses de verano, la Figura 24 muestra los mapas de anomalías de TSM en el océano Pacífico durante el verano del primer año 1988 y segundo año 1989. Se puede observar anomalías positivas (aumento) para el verano 1988 y anomalías negativas (disminución) en la TSM para el verano 1989.

Analizando las intensidades de heladas para los veranos de esos años, se tiene mayor intensidad de heladas, por disminución de las temperaturas mínimas del aire, en el verano de 1983 (Figura 26a). Este patrón está asociado a la correlación positiva hallada en los resultados (Figura 19b) pues la disminución en la TSM influye también en la disminución de las temperaturas mínimas del aire en el Altiplano y con ello se tendrá mayores intensidades de heladas.

Los mapas de anomalías para los meses de invierno de la fase negativa de ENOS se muestran en la Figura 25. Se visualiza que el invierno del primer año (1988) presenta anomalías negativas más intensas que el invierno del segundo año (1989) para la TSM en el Pacífico central.

SENAMHI/DGM/DMS

Reynolds - ANOMALIA DE VIENTOS (m/s) Y DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR (°C) - CLIMATOLOGIA (1981 - 2010)

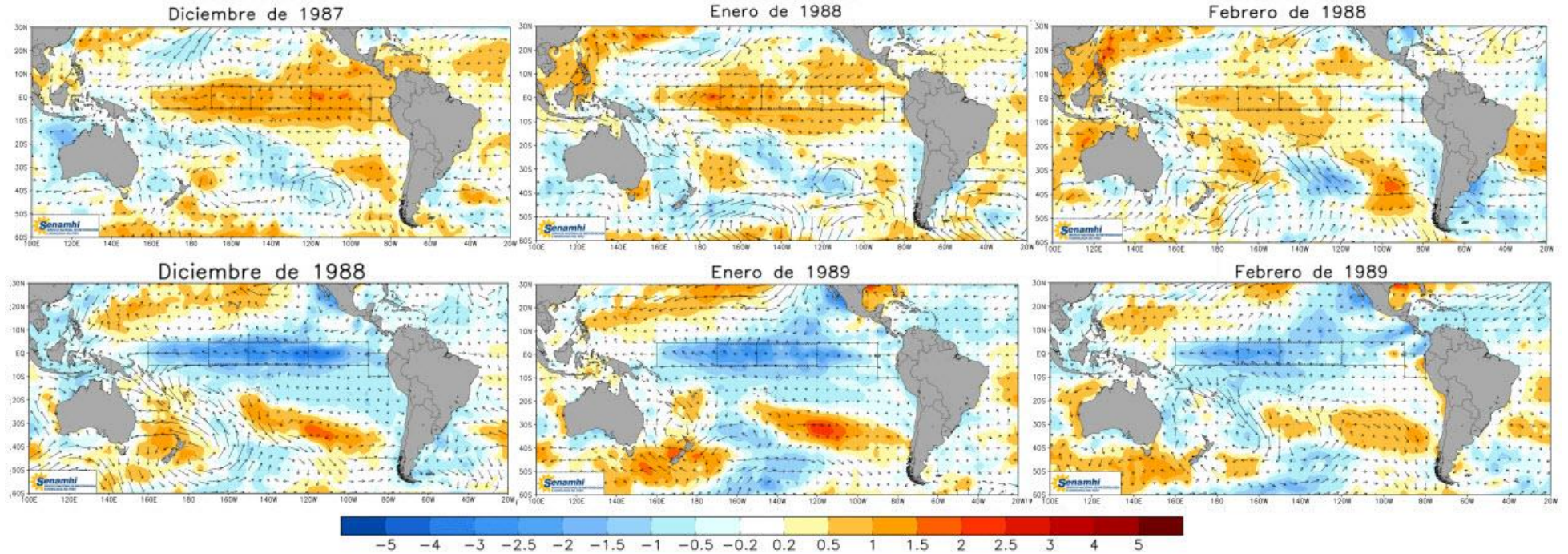


Figura 24: Mapas de anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) sobre el océano Pacífico para los meses de verano del año 1988 (arriba) y 1989 (debajo). FUENTE: SENAMHI.

SENAMHI/DGM/DMS

Reynolds - ANOMALIA DE VIENTOS (m/s) Y DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR (°C) - CLIMATOLOGIA (1981 - 2010)

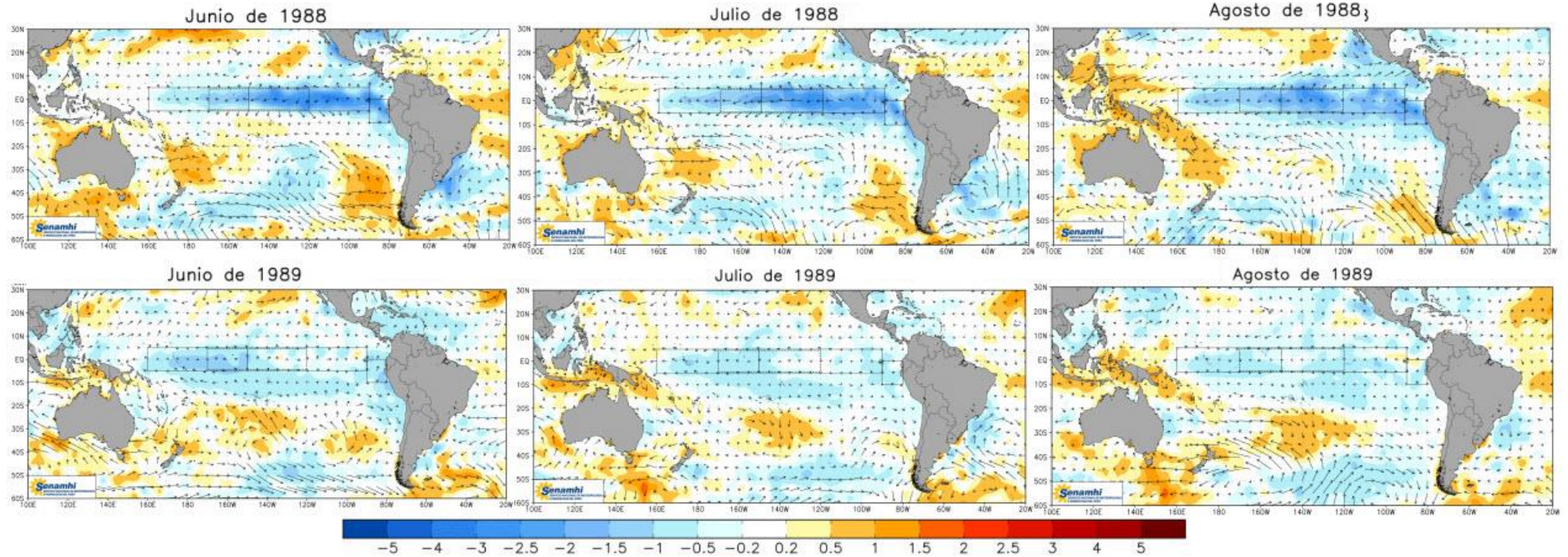
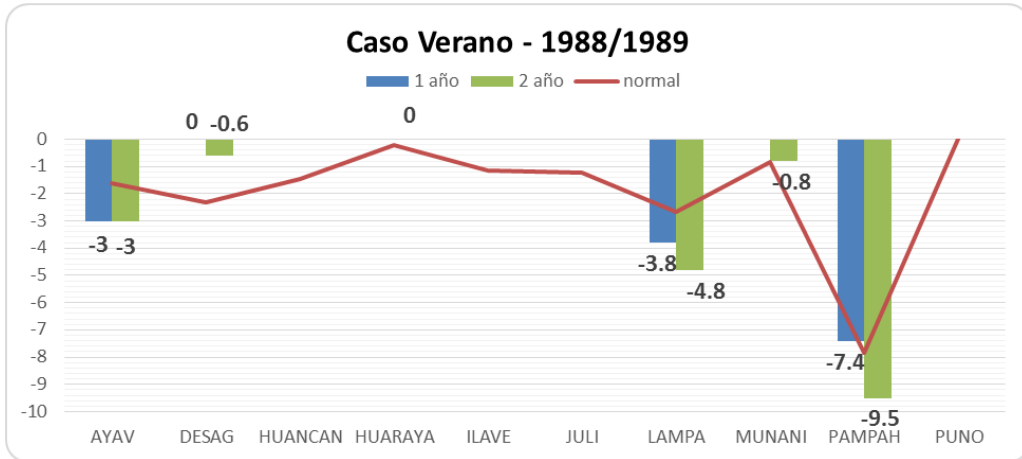


Figura 25: Mapas de anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) sobre el océano Pacífico para los meses de invierno del año 1988 (arriba) y 1989 (debajo). FUENTE: SENAMHI.

a)



b)

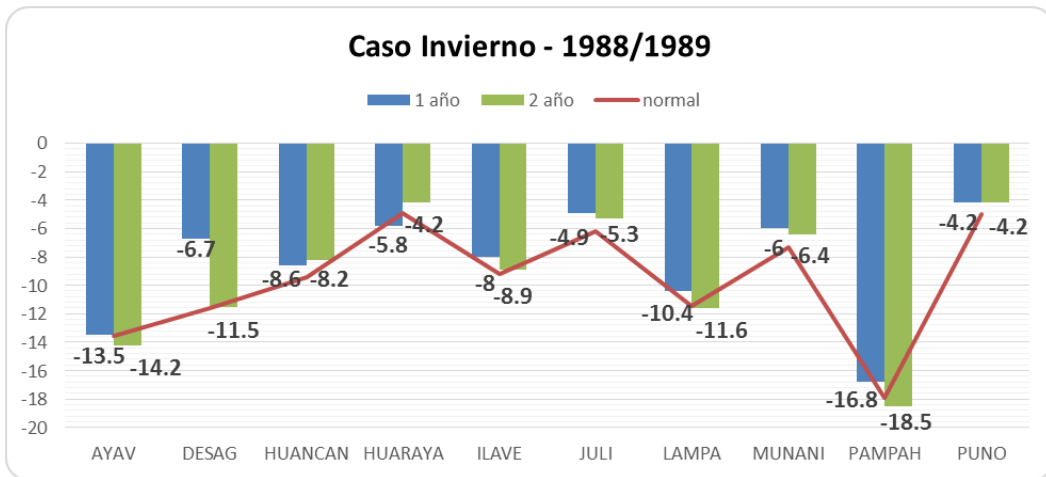


Figura 26: Intensidades de heladas en los meses de verano (a) e invierno (b) durante una fase negativa del evento ENOS (1° año: 1988, 2° año: 1989).

Ese comportamiento en las anomalías de TSM durante el invierno, influye en las intensidades de heladas. La Figura 26b muestra que las intensidades de heladas en el invierno del segundo año (1989) son mayores a las del primer año (1988), debido a una disminución de las temperaturas mínimas del aire correlacionada negativamente según la Figura 19c con el aumento de la TSM en la región Niño 3.4.

La comparación en el análisis de los casos considerados (1982/1983 y 1988/1989) apoya en la interpretación de las correlaciones calculadas para el verano e invierno. La correlación positiva entre la TSM y temperatura mínima del aire para el verano en la Altiplano tiene una mayor influencia en la etapa final o segundo año de un evento ENOS,

mientras que la correlación negativa presentada en invierno tiene mayor influencia en la etapa inicial o primer año de un evento ENOS.

V. CONCLUSIONES

En el análisis exploratorio se observó que en promedio, se pueden presentar valores de temperatura mínima del aire de hasta -11.0°C en los meses de invierno y de -0.9°C en verano. Los valores del percentil 10 en Puno muestran que en los meses de invierno se presentan las temperaturas mínimas más extremas, con mayor énfasis en la localidad de Pampahuta; además el otoño presenta temperaturas mínimas más frías comparado con la primavera.

La correlación entre la temperatura mínima y las heladas mostró que existe una relación inversa entre las dos variables; es decir, a medida que la temperatura mínima disminuye, la frecuencia de heladas aumenta. En los meses de verano, se tienen frecuencias entre 0 – 10% e intensidad en el intervalo de $-3.9 - 0^{\circ}\text{C}$, en otoño la frecuencia está entre 11 – 20% e intensidades de -11.9 a -8.0°C , el invierno presenta frecuencias mayores entre 81 – 100% con intensidades de hasta -18.0°C y la primavera tiene frecuencias mayores que el otoño (21 – 30%) pero menores intensidades (-7.9°C a -4.0°C).

Seguidamente, el ciclo anual en la mayoría de estaciones meteorológicas fue determinado por el segundo armónico. No se identificaron quiebres representativos en las series de datos observados mediante el software *Regime Shift Detector* (RSD), por lo que se consideraron todas las estaciones meteorológicas para los resultados posteriores.

De todas las componentes principales calculadas en el ACP, las dos primeras explican el 71.9% de la variancia total de los datos (61.9% y 10%, respectivamente). La primera componente presenta un patrón espacial único para todo el departamento; mientras que la segunda componente muestra un patrón espacial de dipolo, es decir la parte sur tiene una variabilidad distinta a la parte central y norte de Puno.

El análisis de correlaciones entre la región Niño 3.4 de la TSM y la temperatura mínima del aire en Puno para el periodo 1979 – 2005 presentó mayor significancia considerando por separado los meses de verano e invierno. Se obtuvo un patrón similar a la primera componente del ACP para ambas estaciones del año, siendo que un aumento/disminución en las anomalías de la TSM en la región Niño 3.4 del Océano Pacífico induce a un aumento/disminución de la temperatura mínima en Puno durante los meses de verano/invierno. Por ende, en la fase positiva/negativa de los eventos ENOS, se presenta una menor/mayor ocurrencia de heladas en el departamento durante el verano/invierno.

VI. RECOMENDACIONES

El presente trabajo ayudó a comprender la relación, aunque no significativa, entre la región Niño 3.4 de la TSM del Océano Pacífico y las heladas en el Altiplano Peruano, así mismo dejar algunas recomendaciones y sugerencias a ser tratadas en futuros estudios de investigación:

- ✓ Analizar más casos del comportamiento de las heladas durante las fases positivas y negativas del ENOS con el objetivo de afianzar los resultados.
- ✓ Replicar el análisis de correlación considerando otras áreas del Océano Pacífico Norte o del Atlántico Sur con el objetivo de encontrar mayor significancia a los patrones espaciales.
- ✓ Aumentar el número de estaciones meteorológicas, área y periodo de estudio para poder analizar de mejor manera las zonas afectadas por los eventos de heladas.
- ✓ Analizar los patrones sinópticos promedio de las heladas antes y después de la ocurrencia de un evento ENOS para conocer la dinámica atmosférica.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOCCALETTI, G., PACANOWSKI, R.C., PHILANDER, S.G.H AND FEDOROV, A.V. (2003). **The thermal structure of the upper ocean**. Journal of Physical Oceanography. Volume 34.
- CARRILLO, C. (2003). **Fundamentos del Análisis de Fourier**. Departamento de Enxeñería Eléctrica Escola Técnica Superior de Enxeñeiros Industriáis. Universidade de Vigo.
- CHELLIAH, M. Y ARKIN, P. (1992). **Large-Scale Interannual Variability og Monthly Outgoing Longwave Radiation Anomalies over the Global Tropics**. Journal of Climate.
- COMISIÓN NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DE VENEZUELA – CONICIT, (1998). Proporcionado por María Teresa Martero. Coordinadora de la División de Climatología. **El Fenómeno del Niño**.
- COMUNIDAD ANDINA. (2009). **Atlas de las dinámicas del territorio Andino: Población y bienes expuestos a amenazas naturales**. (p. 185). Capítulo: Cuando hiela, 132-139.
- COMUNIDAD ANDINA. (2009). **Atlas de las dinámicas del territorio Andino: Población y bienes expuestos a amenazas naturales**. (p. 185). Capítulo: El Niño y La Niña, 150-155.
- CORPORACIÓN ANDINA DE FOMENTO. **El Fenómeno El Niño 1997-1998: Memorias, retos y soluciones**. Volume V: Perú.
- DAVILA, C. (2016). **Estudo dos eventos de geadas na serra peruana em simulações climáticas regionais**. Tesis de maestria en Ciencias con énfasis en Meteorología. Universidad de São Paulo. Brasil.
- DEE, D. P., UPPALA, S. M., SIMMONS, A. J., BERRISFORD, P., POLI, P., KOBAYASHI, S., AND OTHERS (2011). **The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137(April), 553–597. <http://doi.org/10.1002/qj.828>

- FAO - SENAMHI. (2010). **Atlas de heladas del Perú** (p. 99).
- FRANCOU, B., PIZARRO, L. (1985). **El Niño y las sequías en los altos Andes centrales: Perú y Bolivia**. Bull. Inst. Fr. Et. And, N°. 1-2, pp. 1-18.
- GARCIA, M., RAES, D., JACOBSEN, S. E., & MICHEL, T. (2007). **Agroclimatic constraints for rainfed agriculture in the Bolivian Altiplano**. Journal of Arid Environments, 71, 109–121. doi:10.1016/j.jaridenv.2007.02.005.
- GARREAUD, R. D., & ACEITUNO, P. (2001). **Atmospheric circulation over South America: mean features and variability**.
- GONZÁLEZ, P. (2004). **Comportamiento de las horas-frío, grados-día, heladas y precipitaciones en los agroecosistemas de la Región del Maule durante los eventos El Niño 1997 y La Niña 1998-1999**.
- GRUBER A, KRUEGER AF, (1984). **The status of hte NOAA outgoing longwave radiation data set**. Bull. Am. Meteorol. Soc. **65**: 958–962.
- INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA CIVIL – INDECI. (2008). Documento País 2008. **Vulnerabilidades, Capacidades y Gestión de Riesgo en la República del Perú** (p. 177).
- INFORME DE PASANTIA PHI-LAC UNESCO (2008). Meerhoff, E. **Análisis de los impactos causados por el fenómeno meteorológico El Niño 1997-1998 a escala regional y por países**.
- JIMÉNEZ, R. (2008). **Aspecto biológicos de El Niño en el Océano Pacifico Ecuatorial**, pp. 309.
- LAGOS, P., SILVA, Y. Y NICKL, E. (2004). **El Niño y la precipitación en los Andes del Perú**.
- LAVADO-CASIMIRO, W. Y ESPINOZA, J. (2013). **Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (19650-2007)**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.29, n.2, 171 - 182, 2014
- LAVADO-CASIMIRO, W.S., FELIPE, O., SILVESTRE, E., Y BOURREL, L. (2013). **ENSO impact on hidrology in Peru**. Advance in Geosciences. DOI: 10.5194/adgeo-33-33-2013.
- LEÓN, G., ZEA, J. Y ESLAVA, J. (2000). **Circulación General del Trópico y la Zona de Confluencia Intertropical en Colombia**. Meteorol. Colomb. 1:31-38. ISSN 0124-6984. Santa Fe de Bogotá, D.C. – Colombia.

- MARTÍNEZ, R., CARRASCAL, D., ANDRADE, M., BLACUTT, L. Y OTROS (2012). **Síntesis del Clima de los Andes Tropicales**. En Herzog, S., Martínez, R., Jørgensen, & P., Tiessen, H. (2012). Cambio Climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales (p. 117 – 130).
- MÜLLER, GABRIELA V; NUÑEZ, MARIO; SELUCHI, MARCELO, (2000). **Relationship between ENSO Cycles and Frosts Events within the Pampa Húmeda Region**. International Journal of Climatology, 20, 13, 1619-1637.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – NOAA. National Weather Service (2006). **Hoja informativa pública**.
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE METEOROLOGÍA – OMM. (1996). **Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos**. Sexta edición, OMM N° 8. Ginebra, Suiza.
- PABÓN, D. Y MONTEALEGRE, E. (2008). **El Ciclo El Niño, La Nina – Oscilación del Sur**. Universidad Nacional de Colombia, febrero de 2009. Bogota, Colombia.
- PEARSON, K. (1901). **On lines and planes of closest fit to systems of points in space**. Philosophical Magazine, Series 6, vol. 2, no. 11, pp. 559-572.
- RASMUSSEN, E.M. AND CARPENTER, T.H. (1982). **Variations in Tropical Sea Surface Temperature and Surface Wind Fields associated with the Southern Oscillation/El Niño**. Monthly Weather Review.
- RODIONOV, S. N. (2004). **A sequential algorithm for testing climate regime shifts**.
- ROMERO, C.C.; BAIGORRIA, G.A.; STROOSNIJDER, L. **Changes of erosive rainfall for El Niño and La Nina years in the northern Andean highlands of Peru**. Climatic Change, v. 85, n. (3-4), p. 343-356, 2007.
- SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ – SENAMHI. (2014). **El Fenómeno El Niño en el Perú**.
- UNITED NATIONS. Editado por Glantz, M. (2002). **La Niña and its impacts: Facts and speculation**. University Press.
- UNITED NATIONS. Editado por Trigo, E. (2007). **Climate Change Impacts and Adaptation in Peru: the case of Puno and Piura**. 2007 Human Development Report.
- WILKS, D. S. (2006) **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Second edition. International Geophysics Series.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Análisis de Componentes Principales aplicado en la meteorología

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística multivariada la cual transforma linealmente un conjunto original de variables en otro conjunto de nuevas variables no correlacionadas entre sí, para poder explicar la información contenida en el primer conjunto. Es una técnica favorable cuando se analizan series temporales de muchos años ya que reduce la dimensionalidad del conjunto de datos conservando la mayor cantidad de información posible.

Al nuevo conjunto de variables se les llama componentes principales que son combinaciones lineales de las anteriores con máxima variabilidad y se van construyendo según el orden de importancia en cuanto a la variabilidad total que recogen de la muestra (Pearson, 1901). Esta técnica puede aplicarse a un conjunto de más de una variable, así como a una sola variable atmosférica. Al ser aplicada con varias variables, lo que se busca es encontrar relaciones entre esas variables tomando en consideración todos los datos, mientras que al aplicarse a una sola variable se identifica patrones de máxima variabilidad.

En el presente estudio se consideró una matriz de ingreso de 10×12775 (10 estaciones meteorológicas con 12775 datos de muestra de una sola variable – temperatura mínima diaria). Utilizando álgebra lineal, esa matriz reduce sus dimensiones a una matriz de 10×10 a partir de la matriz de covariancia, se obtiene 10 modos de variabilidad o autovectores. El ACP puede utilizar matriz de covariancia o matriz de correlación, calculadas a partir de los datos originales, para maximizar la variabilidad. Generalmente, se usa la matriz de covariancia por considerar la variación de la variable en el tiempo, pero también puede emplearse la matriz de correlación. La matriz de correlación es usada cuando se tiene variables con diferentes unidades y cuando la diferencia de la variancia para las distintas variables es muy grande.

En forma práctica, el ACP encuentra un conjunto de funciones empíricas ortogonales (EOF) para representar una serie de datos $X(x,y,t)$ de la siguiente manera:

$$X_{(x,y,t)} = \sum_{m=1}^M CP_m(t) \cdot EOF_m(x,y)$$

La ortogonalidad de las EOF consiste en que cada una de ellas son perpendiculares entre sí, es decir, el producto escalar entre el conjunto de autovectores o EOF y la traspuesta de ese conjunto es igual a cero ($V' * V = 0$).

En el ACP, se toma en cuenta tres puntos básicos: las funciones ortogonales empíricas (EOF, por sus siglas en inglés), los componentes principales (CP) y los autovalores. Las EOF son los autovectores de la matriz de covariancia y son estructuras espaciales. Los CP muestran la forma en que varían los autovectores en el tiempo, es decir son estructuras temporales. Los autovalores son proporcionales a la variancia explicada por los CP.

1.1 Rotación Varimax

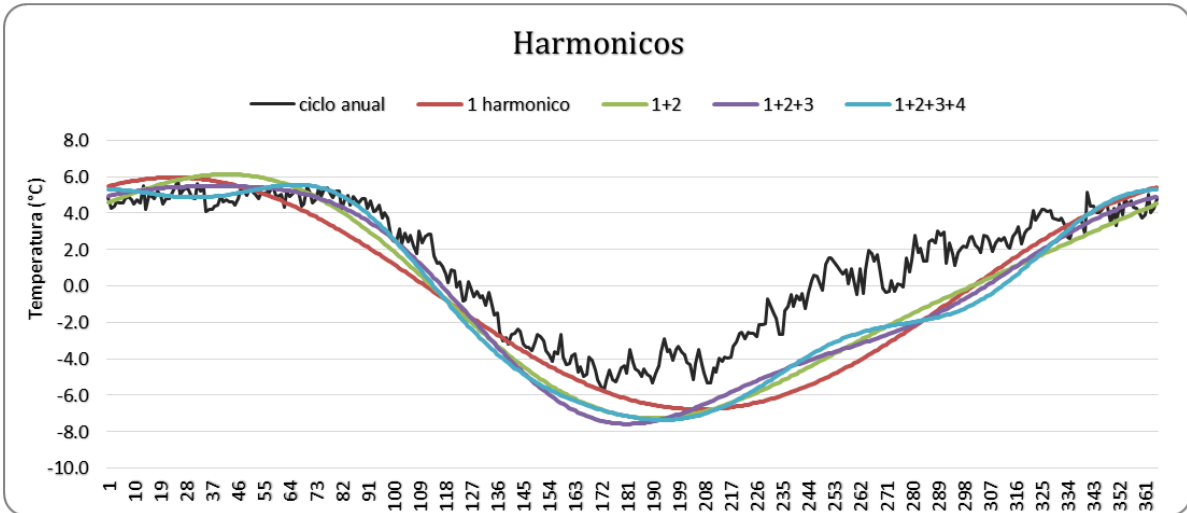
La rotación Varimax es uno de los métodos de rotación factorial de los EOF. Se realiza la rotación factorial con la finalidad de mejorar la interpretación de los EOF ya que se puede presentar características escondidas entre dos o más componentes. En meteorología, se aplica el ACP con la intención de interpretar físicamente las EOF, sin embargo, la condición de ortogonalidad de las EOF hace complicado ese punto. La rotación de las EOF minimiza la ortogonalidad de ellas y permite tener autovectores más localizadas en el espacio que son más fáciles de interpretar. Facilita mostrar alguna característica escondida entre las componentes inicialmente halladas.

La representación matemática de la rotación Varimax es la siguiente:

$$\sum_{m=1}^M \left[\sum_{k=1}^K e_{k,m}^{*4} - \frac{1}{K} \left(\sum_{k=1}^K e_{k,m}^{*2} \right)^2 \right]; \quad e_{k,m}^* = \frac{\tilde{e}_{k,m}}{\left(\sum_{m=1}^M \tilde{e}_{k,m}^2 \right)^{1/2}}$$

Anexo 2: Cálculo de las anomalías de temperatura mínima mediante el ciclo anual representados por armónicos.

a)



b)

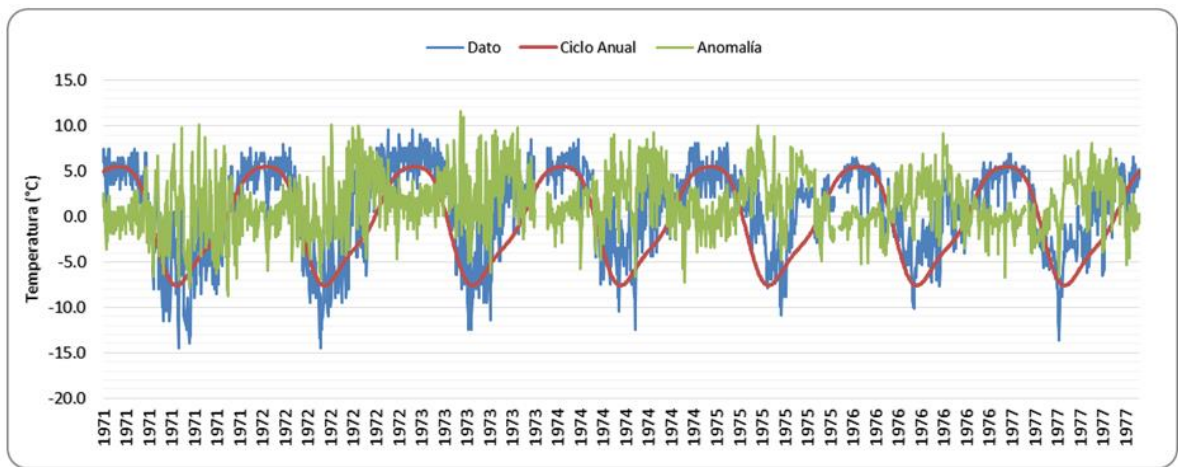
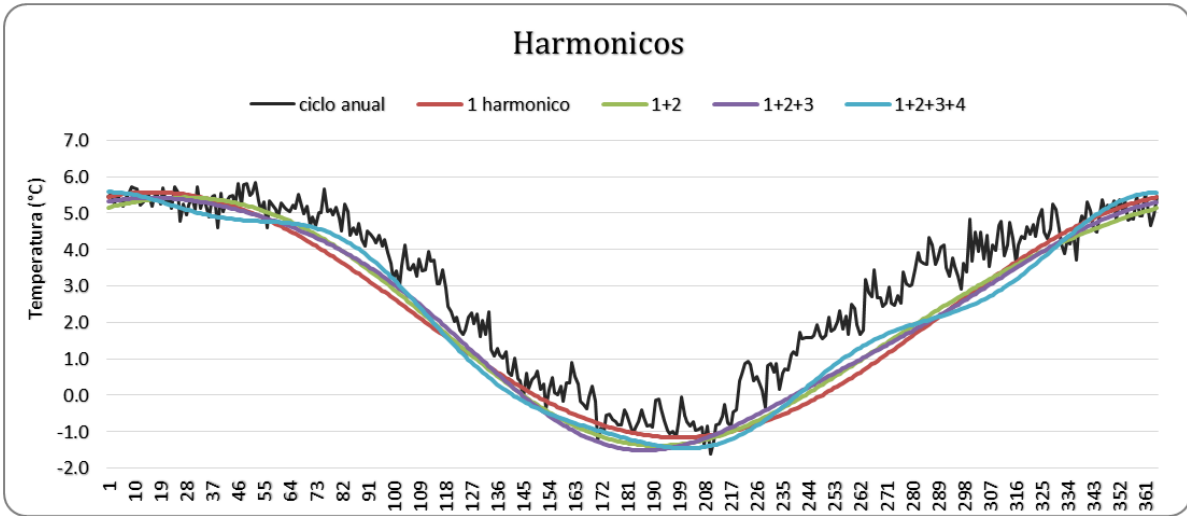


Figura 27: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Desaguadero.

a)



b)

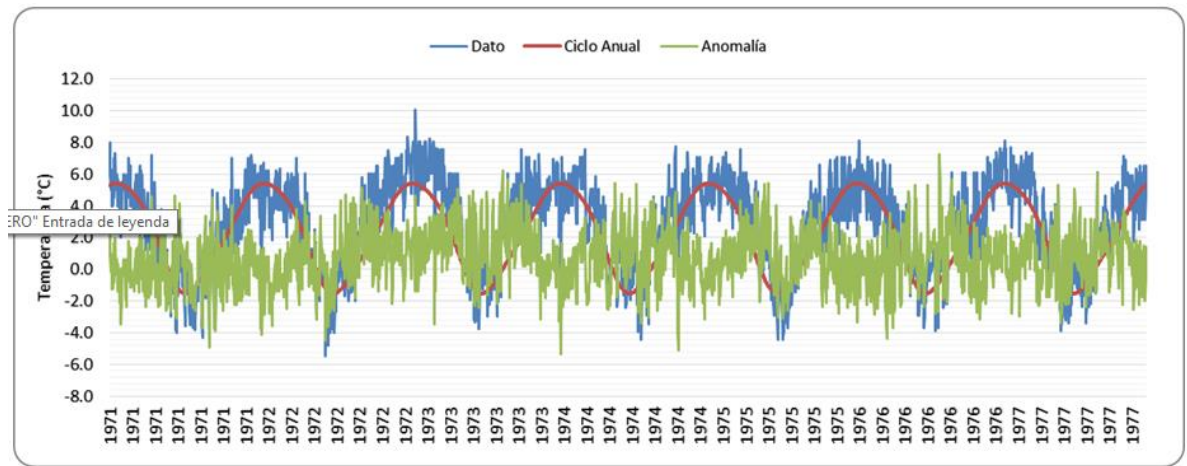
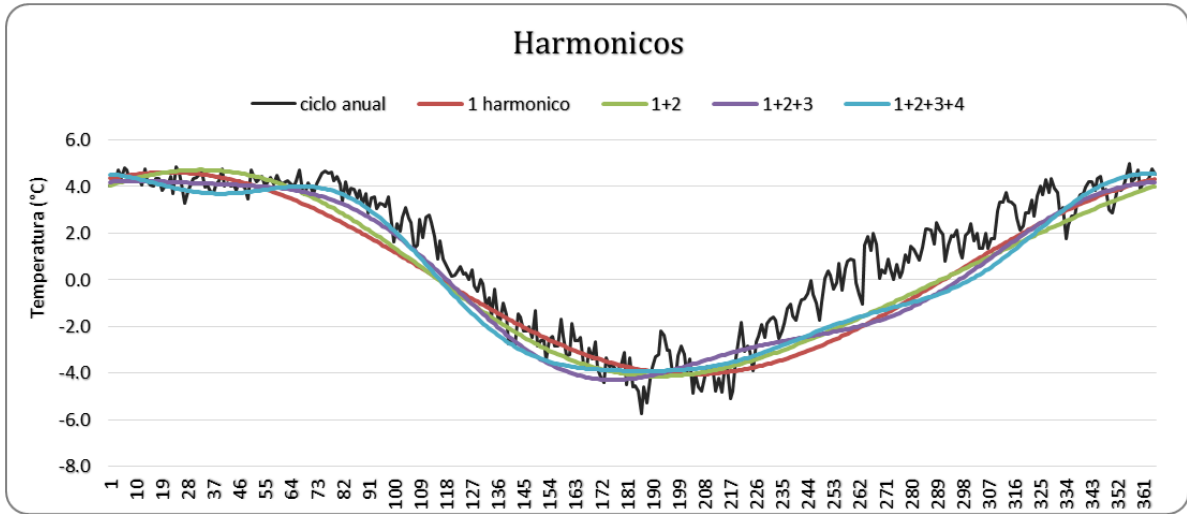


Figura 28: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de harmónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Huaraya-Moho.

a)



b)

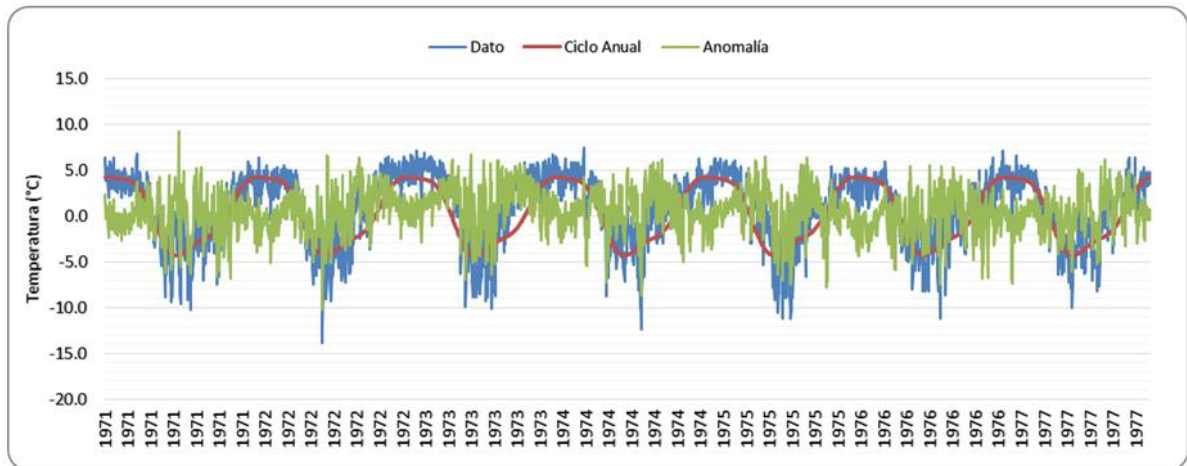
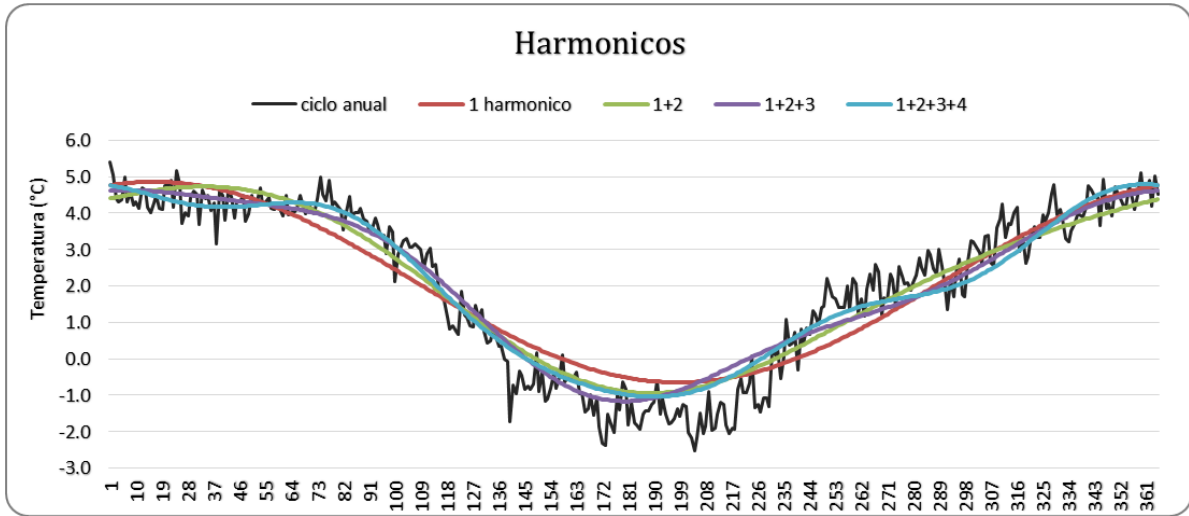


Figura 29: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Ilave.

a)



b)

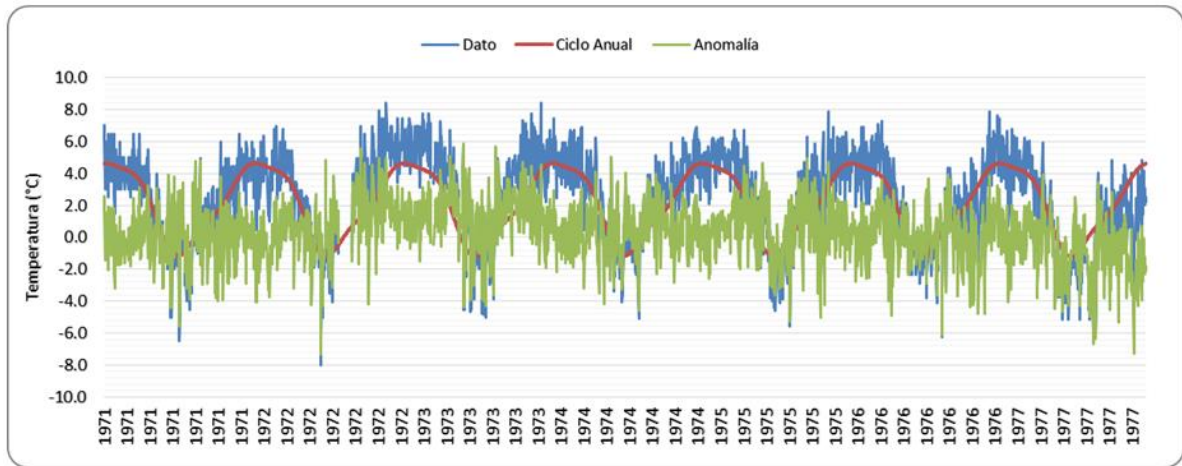
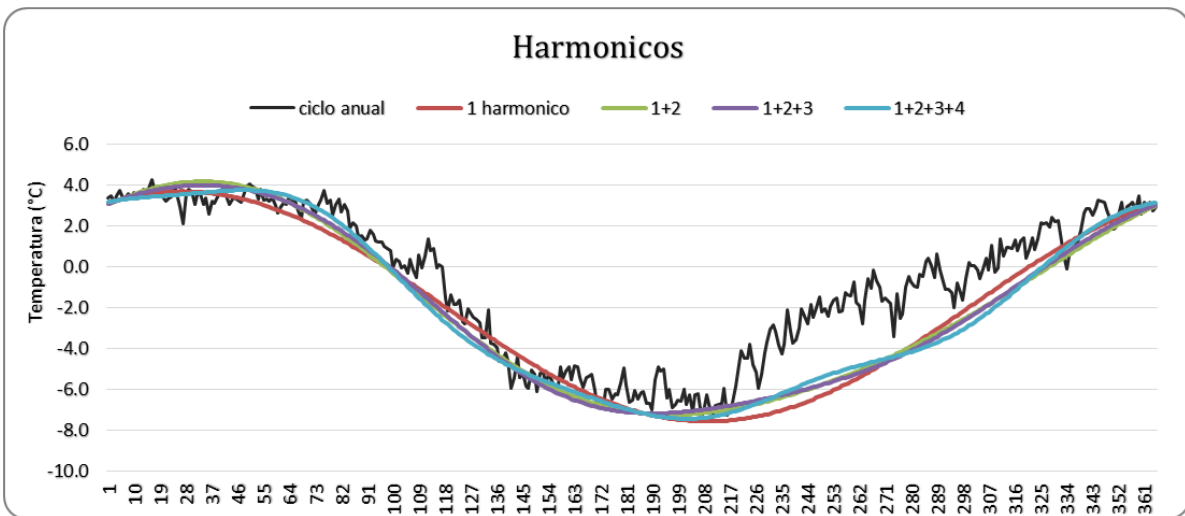


Figura 30: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Juli.

a)



b)

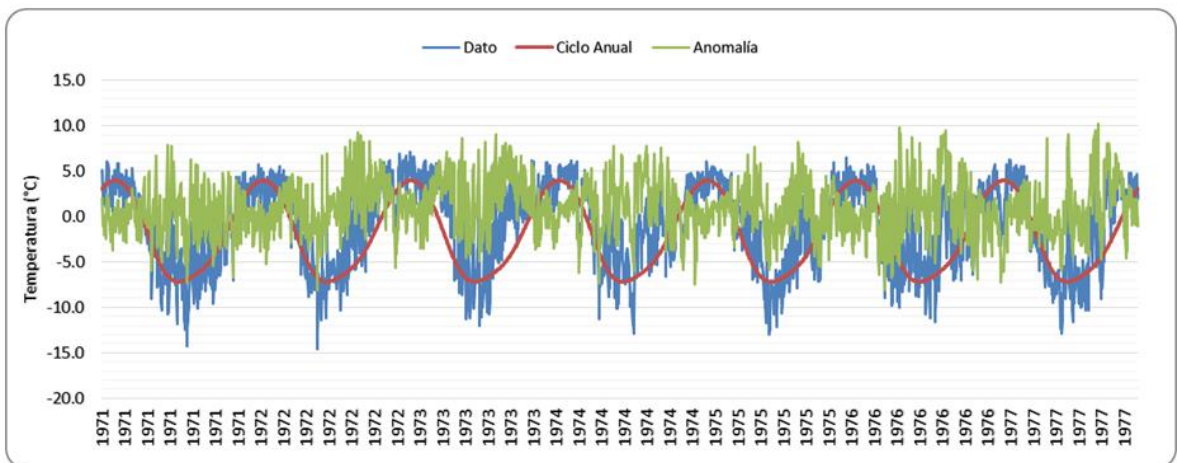
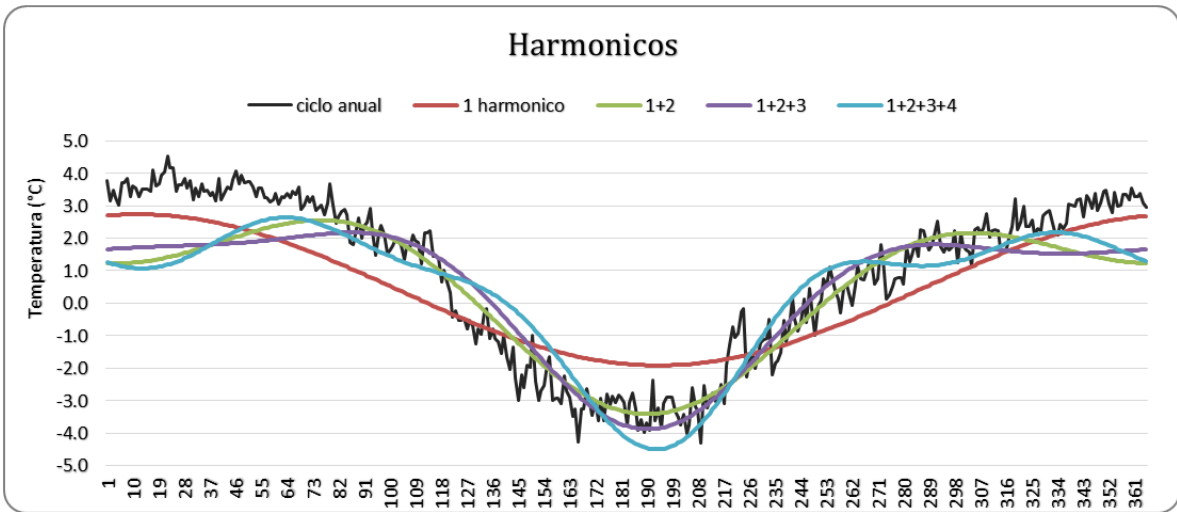


Figura 31: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Lampa.

a)



b)

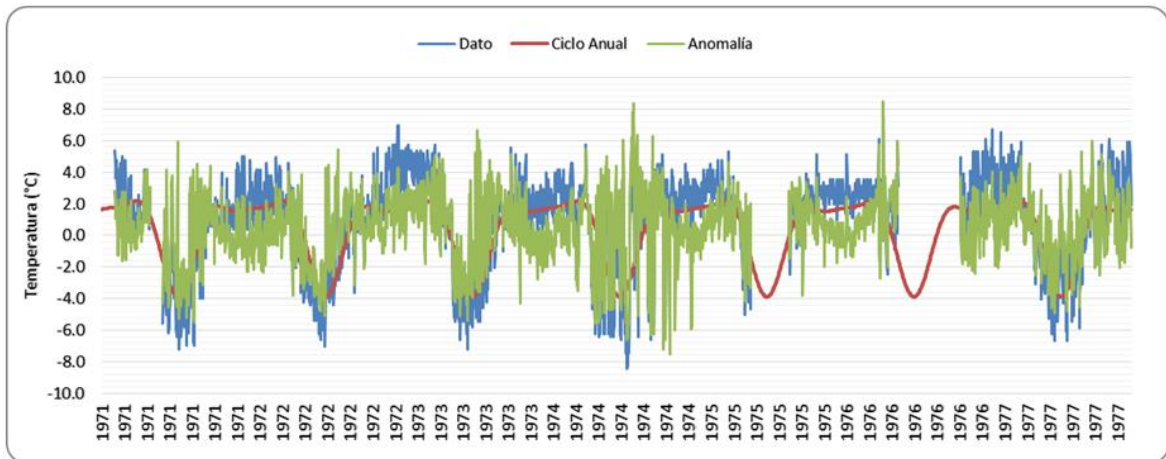
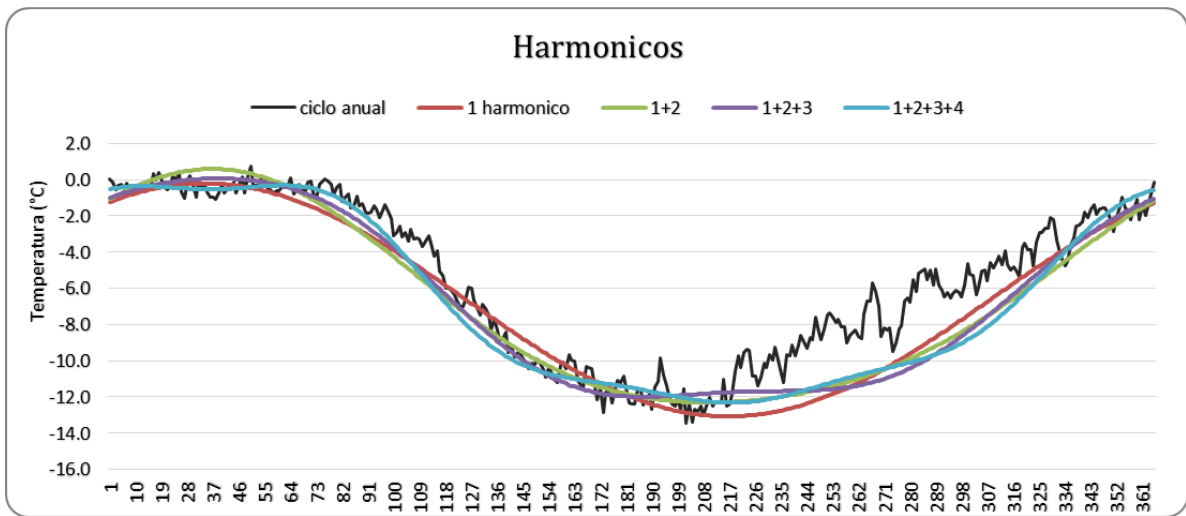


Figura 32: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Muñani.

a)



b)

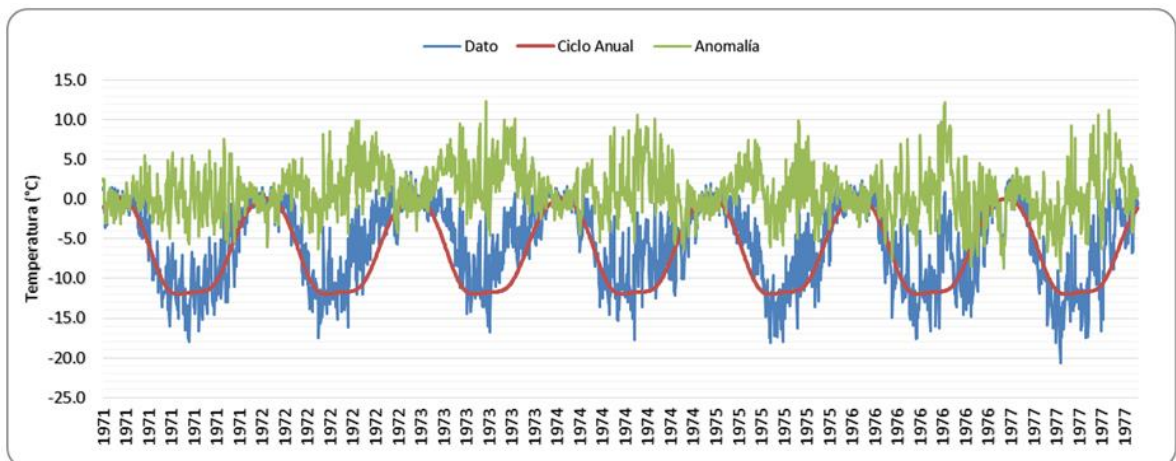
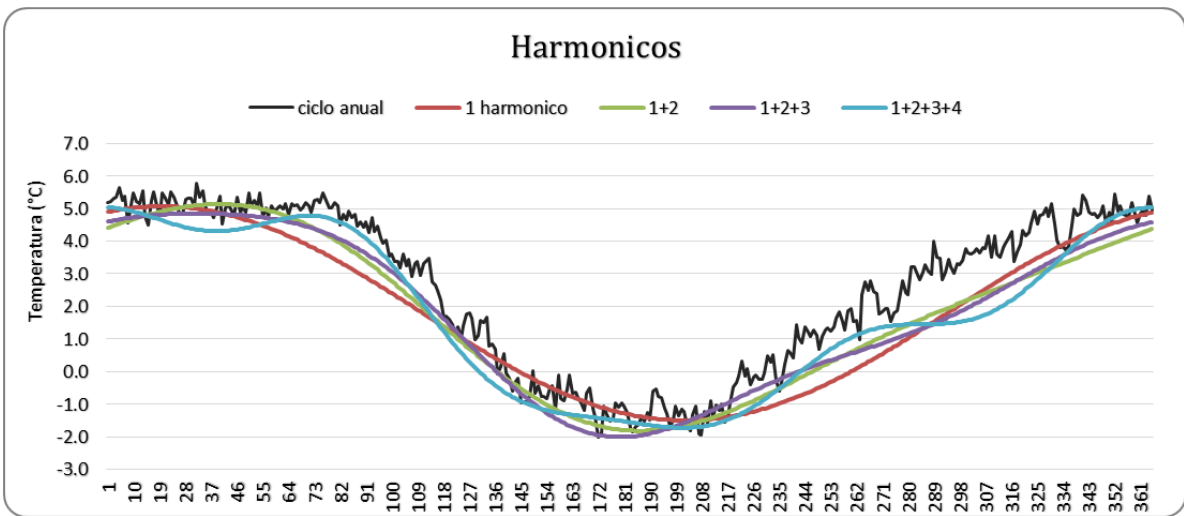


Figura 33: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Pampahuta.

a)



b)

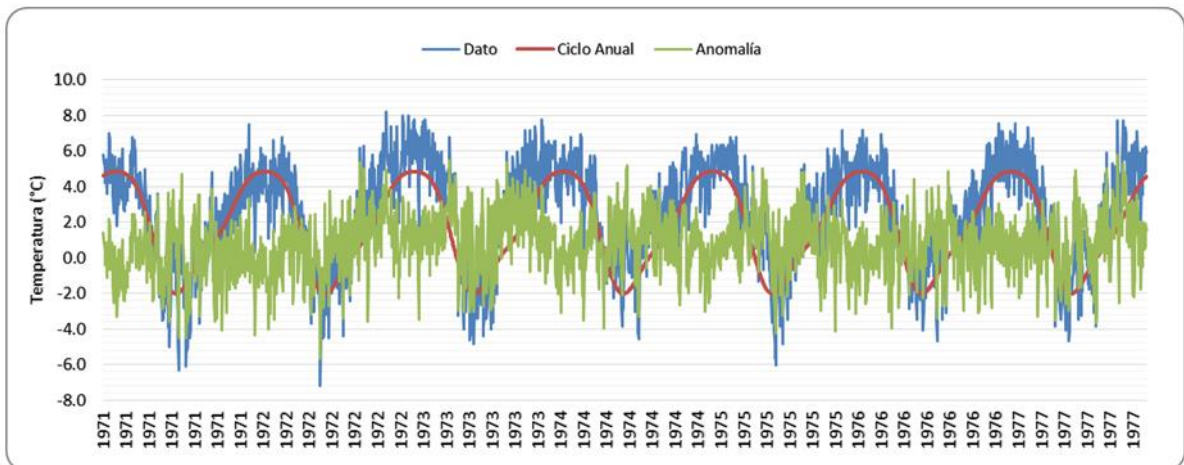
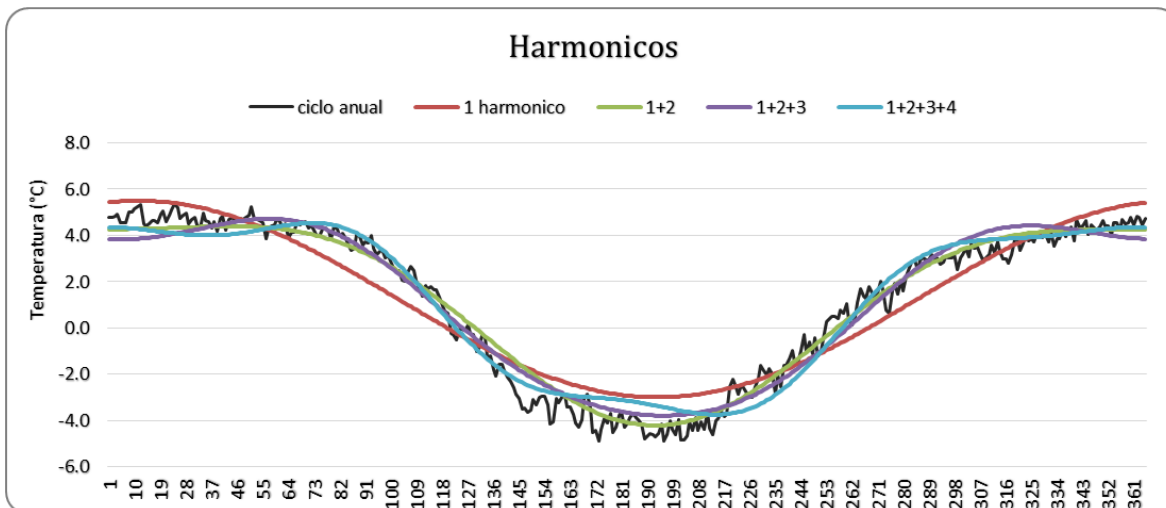


Figura 34: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Puno.

a)



b)

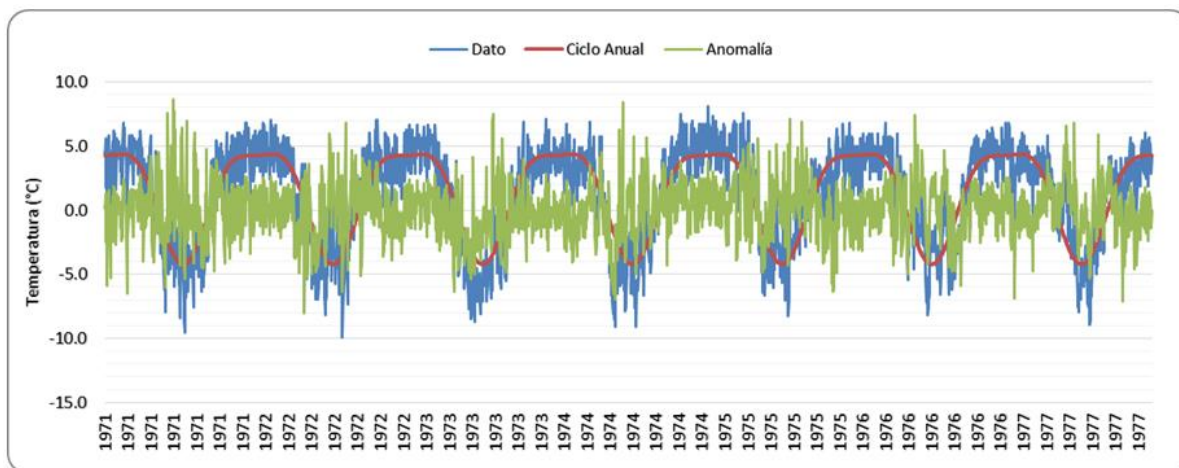


Figura 35: (a) Ciclo anual de la temperatura mínima y valores de armónicos para la estación Desaguadero. (b) Representación de la remoción del ciclo anual y anomalías como resultado para la estación de Huancane.