

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS



“OLAS DE FRÍO EN EL PERÚ”

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título de:

INGENIERO METEORÓLOGO

GUISSEPPE ARTURO VÁSQUEZ VILLANO

Lima – Perú

2022

**La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

“OLAS DE FRÍO EN EL PERÚ”

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título de:
INGENIERO METEORÓLOGO

Presentada por:

GUISSEPPE ARTURO VÁSQUEZ VILLANO

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Dr. Ernesto Ever Menacho Casimiro
Presidente

Mg. Sc. Martin Benedicto Sandoval Casas
Miembro

Mestre. Jerónimo García Villanueva
Miembro

Mg.Sc. Victoria Doris Calle Montes
Asesora

DEDICATORIA

Quiero dedicar desde el fondo de mi corazón el logro de obtener mi título profesional a mis padres, que me apoyaron incluso estando muy lejos, que me brindaron su amor, sus consejos y palabras de aliento, mostrándoles que todas sus palabras no fueron en vano, también a mi hermano mayor que gracias a su ejemplo de perseverancia y a su apoyo incluso desde mis inicios preuniversitarios no hubiera obtenido mi título, a mi hermano menor que a pesar que también se encuentre lejos decirle gracias porque pude ser un ejemplo para ti, a mi tío Hilario Soto que fue como un segundo padre todo el tiempo que viví solo y que me alentó a siempre seguir adelante y no rendirme. Por último, a alguien muy especial que me acompañó muchos años de mi vida universitaria y fuera de ella, brindándome consejos, compañía, cariño, aliento y lo más importante enseñarme a nunca rendirme en esta vida a pesar de las adversidades que puedan presentarte ahora o en el futuro. A todos de corazón muchas gracias por estar ahí en cada etapa vivida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Libélula Instituto para el Cambio Global y al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología que me permitieron ser parte del Proyecto de Apoyo a la Gestión del Cambio Climático en su Segunda Fase, a mi subdirectora M.Sc. Delia Acuña Azarte por apoyarme el tiempo que fui participe del proyecto como consultor, así como también por brindarme su confianza y la autorización de utilizar uno de los trabajos de investigación realizados en el marco del proyecto como parte de mi Trabajo de Suficiencia Profesional, a mis amigos de la Subdirección de Modelamiento Numérico de la Atmosfera, que me apoyaron con el control de calidad de los datos meteorológicos, a mi amigo el Ing. Gustavo de la Cruz que me enseñó el uso de distintos programas utilizados en mi trabajo. De la misma forma agradecer por la paciencia, palabras de aliento y enseñanzas que me brindo mi asesora la Mg.Sc. Victoria Doris Calle Montes en cada uno de los pasos realizados a través de mi trabajo de suficiencia hasta mi sustentación final, al Mestre. Jerónimo García Villanueva como miembro jurado que con sus observaciones puntuales pude mejorar y afinar el documento y mi presentación final, al Mg.Sc. Martin Benedicto Sandoval Casas por sus aportes a mi sustentación y al Dr. Ernesto Ever Menacho Casimiro que asumió de forma muy amable y apresurada la presidencia de mi sustentación debido a la lamentable e inesperada perdida de quien fue en vida un querido profesor en nuestra facultad el Dr. Julio Cesar Guevara Injoque. Por último, a todos y muchos más que aportaron en el desarrollo final de mi trabajo de sustentación gracias por todo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO	v
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	4
III. MARCO TEÓRICO	5
3.1. Cambio climático y variabilidad climática	5
3.2. Eventos climáticos extremos	6
3.2.1. Índices climáticos	6
3.2.2. Olas de frío	10
3.3. Análisis de tendencia	11
3.3.1. Control de calidad	12
3.3.2. Homogeneización	12
3.3.3. Prueba de Mann - Kendall modificado	12
3.3.4. Estimador de pendiente Sen	15
3.4. Marco teórico específico	16
IV. METODOLOGÍA	18
4.1. Ámbito de estudio	18
4.2. Pre – procesamiento: Selección de estaciones, control de calidad y homogeneización de datos	18
4.3. Cálculos de índices para olas de frío y análisis de tendencia	19
4.3.1. Cálculo de índices de extremos climáticos	19
4.3.2. Cálculo de tendencias climáticas	21
V. RESULTADOS	22
5.1. Contexto laboral	22
5.2. Determinación y análisis del problema.	24
5.3. Proyecto de solución	25
5.4. Evaluación del proyecto.	27
VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS E IMPACTOS	47
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
IX. ANEXOS	56
X. ASEGURAMIENTO	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Lista de los 27 índices climáticos propuestos del ETCCDI	7
Tabla 2: Índices climáticos para el estudio de olas de frío	10
Tabla 3: Valores de parámetros para el cálculo del índice CSDI.....	20
Tabla 4: Parámetros para el cálculo de tendencia para el índice CSDI y el aspecto CWN_ECF	21
Tabla 5: Actividades específicas	26
Tabla 6: Frecuencia de eventos presentados por Región.....	36
Tabla 7: Tendencias anuales de 1965 a 2019 para el índice CSDI 5 y CSDI 10	37
Tabla 8: Tendencias anuales de 1965 a 2019 para el aspecto CWN del índice ECF	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Organigrama estructural del SENAMHI.....	23
Figura 2: Serie de tiempo clasificada para el índice CSDI 5 para la región costa.....	30
Figura 3: Serie de tiempo clasificada para el índice CSDI 10 para la región costa.....	30
Figura 4: Serie de tiempo clasificada para el índice CSDI 5 para la región selva.....	31
Figura 5: Serie de tiempo clasificada para el índice CSDI 10 para la región selva	31
Figura 6: Serie de tiempo clasificada para el índice CSDI 5 para la región sierra.....	32
Figura 7: Serie de tiempo clasificada para el índice CSDI 10 para la región sierra.....	33
Figura 8: Serie de tiempo clasificada para el índice ECF para la región costa	34
Figura 9: Serie de tiempo clasificada para el índice ECF para la región selva	34
Figura 10. Serie de tiempo clasificada para el índice ECF para la región sierra.....	35
Figura 11: Distribución espacial de la tendencia anual del CSDI 5 para el periodo 1965 – 2019.....	42
Figura 12: Distribución espacial de la tendencia anual del CSDI 10 para el periodo 1965 – 2019.....	43
Figura 13: Distribución espacial del número de eventos de olas de frío del índice ECF para el periodo 1965 – 2019.....	44
Figura 14: Distribución espacial de tendencia del índice ECF para el periodo 1965 – 2019.....	45

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Errores no sistemáticos encontrados en el control de calidad	56
Anexo 2: Estaciones meteorológicas observadas y eliminadas.....	58
Anexo 3: Estaciones convencionales calculadas para los índices CSDI 5, CSDI 10 y CWN-ECF para un periodo anual.....	60

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo monográfico trata sobre el Estudio de Olas de Frío en el Perú realizado dentro de mis labores profesionales para la Subdirección de Modelamiento Numérico de la Atmósfera (SMN) del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, como parte del Proyecto de Apoyo a la Gestión del cambio climático – II Fase, liderado por el Ministerio del Ambiente (MINAM). Dicho proyecto entre sus componentes principales abarcó la información sobre el clima para la toma de decisiones. Un problema detectado y relevante para la SMN se encontraba en la falta de información y caracterización histórica con respecto a eventos de olas de frío a nivel nacional, por lo cual, la realización de un Primer Estudio de olas de frío a nivel Nacional fue la propuesta que permitió dar los primeros avances en la solución de este problema, así, el objetivo principal del estudio fue determinar el número de eventos y tendencias anuales de olas de frío que se suscitaron a nivel nacional para el periodo de 1965 al 2019. La metodología del estudio abarcó desde el preprocesamiento de los datos que incluía la selección de estaciones, control de calidad, homogeneización; seguido del cálculo de los índices y tendencias para olas de frío con su respectivo análisis en estos, todo esto realizado para el periodo de estudio en mención (1965 a 2019) y a nivel nacional. Como principales resultados se obtuvo que la mayor frecuencia de eventos de olas de frío se dio para la Sierra, seguido de la Costa y en menor medida en la Selva, además que la duración de eventos de olas de frío en el Perú se caracterizan por ser cortos (1 – 8 días) y de manera inusual se dan olas de frío de duración media (9 – 16 días), por otra parte, la tendencia de olas de frío en el País en la mayoría de estaciones meteorológicas fue nula, sin embargo, se pudieron observar algunas tendencias negativas. Por último, cabe recalcar que el desarrollo del Estudio de Olas de frío en el Perú, al ser el primero en realizarse contribuye de manera directa en la información brindada a diversos públicos que abarca desde investigadores, gestores, ambientalistas, etc.; genera nuevo conocimiento como parte del capital intelectual del país y promueve el interés y financiamiento por parte de entidades privadas o cooperaciones en su apoyo al Estado para el desarrollo de más estudios en relación a los eventos climáticos extremos, de los cuales los estudios nacionales son escasos.

I. INTRODUCCIÓN

En mi vida laboral y personal he tenido el agrado de trabajar con grandes profesionales del Sector Público y Sector privado, adquiriendo diversas habilidades por aprendizaje continuo y compartiendo conocimiento con colegas, muchos de los estudios que se realizan en el ámbito laboral son poco difundidos hacia los futuros egresados de universidades, por lo cual la motivación principal de este trabajo fue contribuir a la transferencia de conocimiento desde una perspectiva técnica, para aquellos que deseen conocer los estudios que pueden ser desarrollados en el ámbito laboral de la Meteorología.

La generación de información sobre el clima para la toma de decisiones, es uno de los principales componentes del Proyecto de Apoyo a la Gestión del cambio climático – II Fase, liderado por el Ministerio del Ambiente (MINAM), financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) y ejecutado por South North y Libélula. En este contexto, Libélula encargó al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), la ejecución de estudios de variabilidad climática en el Perú, entre los cuales se desarrolló la presente investigación de Olas de Frío en el Perú, dicho estudio estuvo bajo la supervisión de la Subdirección de Modelamiento numérico de la atmósfera (SMN) de SENAMHI.

La SMN, tiene por objetivo desarrollar y validar los modelos numéricos orientados a la predicción y simulación meteorológica, climática, hidrológica y atmosférica, e implementar la ejecución operativa de modelos desarrollados por otros órganos de la entidad. Dentro de sus actividades se encuentran la formulación y planes de directivas, protocolos y otras normas relacionados al modelamiento numérico de la atmósfera, conducir la operatividad de modelos de simulación y predicción meteorológica, representación numérica de procesos físicos, conducción de estudios e investigaciones sobre modelaje, así como otros proyectos de estudios.

Como parte de las actividades profesionales desempeñadas en la institución, se puede hacer énfasis en el desarrollo de estudios de variabilidad climática, diseño de herramientas tecnológicas para la predicción meteorológica, diseño de atlas y protocolos en tendencias e

indicadores de extremos climáticos, así como estudios de escenarios de cambio climático en el Perú.

El cambio climático repercute a todo nivel, ya sea en salud, educación, ecosistemas, economía, por lo cual, estamos inmersos en él y para combatirlo debemos conocerlo y estudiarlo, por ejemplo, analizar periodos históricos y detectar aquellas anomalías o eventos inusuales que puede haber sido originado como producto del calentamiento global. En tal sentido, los extremos climáticos representan un problema significativo para el ecosistema, así como para todas las actividades que dependen de patrones climáticos promedios y predecibles, este problema es transversal en todos los sistemas naturales. Los eventos climáticos extremos se relacionan con valores extremos de variables ambientales, entre las cuales la temperatura es primordial para determinar aquellos valores extremos que persisten durante días, considerándose así que estamos ante una ola de frío o calor (Añel et al., 2017).

Como se mencionó, el desarrollo de estudios históricos del clima y en particular la detección de alteración de patrones climáticos o eventos extremos, permitirá generar información necesaria para los tomadores de decisiones ya sean entidades rectoras de salud, energía, ambiente, forestal o transportes, incluyendo gobernadores regionales y locales, brindándole los detalles necesarios del comportamiento del clima que podría afectar, cultivos, carreteras, actividades socioeconómicas entre otras, lo cual tiene relevancia en el desarrollo de planes de prevención y combate ante estos fenómenos en pro de alcanzar el menor daño posible o en su efecto evitar grandes pérdidas ya sea materiales o humanas.

Este trabajo documenta el proceso completo de investigación y análisis realizado para el Estudio de Olas de Frío en el Perú, el cual comenzó en enero y concluyó a mediados de junio del 2020. Las etapas dentro del estudio comprenden revisión bibliográfica, pre procesamiento de datos, cálculos de índices climáticos y pruebas estadísticas, así como la redacción de un documento final. Los resultados obtenidos han sido entregados a SENAMHI para su difusión y manejo.

Climatología, es el área de conocimiento que vincula el estudio de Olas de Frío desarrollado en el presente documento.

El objetivo general de este trabajo fue determinar el número de eventos y tendencias anuales de olas de frío que se producen a nivel nacional para el periodo de 1965 al 2019, además, los objetivos específicos que se establecieron fueron calcular y analizar los índices de extremos

climáticos *Cold Spell Duration Index* (CSDI) y *Excess Cold Factor* (ECF) para la región Norte, Centro y Sur del Perú y calcular y analizar las tendencias de los índices CSDI y ECF en las estaciones meteorológicas del Perú. Por otro lado, la meta alcanzada con el estudio fue la elaboración de un documento del estudio de olas de frío en el Perú de 1965 – 2019.

II. OBJETIVOS

En la presente monografía se planteó los siguientes objetivos:

Objetivo general

- Determinar el número de eventos y tendencias anuales de olas de frío que se producen a nivel nacional para el periodo de 1965 al 2019.

Objetivos específicos

- Calcular y analizar los índices de extremos climáticos *Cold Spell Duration Index* (CSDI) y *Excess Cold Factor* (ECF) para la región Norte, Centro y Sur del Perú.
- Calcular y analizar las tendencias de los índices CSDI y ECF en las estaciones meteorológicas del Perú

III. MARCO TEÓRICO

3.1. Cambio climático y variabilidad climática

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define el cambio climático como cualquier cambio en el clima que persiste durante un periodo largo de tiempo (decenios o incluso más), debido a su variabilidad natural o como resultado de actividades humanas, que comparado con el estado medio del clima hace referencia a una importante variación estadística que persiste en el largo plazo (IPCC, 2013); los estudios del cambio climático involucran la investigación de los eventos meteorológicos que ocurren por cualquier anomalía en la variación de cualquiera de las variables meteorológicas diarias. Por ejemplo, si se evaluara el cambio futuro de la cantidad de días que presenta un evento de ola de frío, el cambio en la frecuencia de este evento puede conducir a serias implicaciones, principalmente en la salud y los servicios de salud relacionados (Ceccherini et al., 2016) muy distinto al impacto que se tendría si solo se evalúa los cambios en sus promedios mensuales o estacionales.

Además el cambio climático ha provocado de manera inevitable cambios en la variabilidad del clima y en la frecuencia, intensidad, extensión espacial y duración de climas extremos y eventos climáticos.

Por otro lado, según la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés), la variabilidad climática se define como variaciones en el estado medio y otras estadísticas del clima en escala temporal y espacial, más allá de los eventos meteorológicos extremos, por lo general, el término “variabilidad climática” identifica las desviaciones en estadísticas del clima en un periodo de tiempo establecido en comparación a las estadísticas a largo plazo para el mismo período, estas desviaciones son cuantificadas a menudo como anomalías (WMO, 2015).

En la actualidad la variabilidad climática ya tiene impactos relevantes sobre sistemas biológicos y sistemas agrarios. Estudios demuestran que la variabilidad en la precipitación muestra repercusiones en el producto bruto interno, y es probable que esta relación cercana

sea encontrada en muchos países tropicales que dependen en gran medida de la agricultura como motor de desarrollo económico (Thornton et al., 2014).

3.2. Eventos climáticos extremos

Acorde a la WMO (2015), un evento extremo es definido como el valor de una variable meteorológica o climática por encima o debajo de un umbral cerca de los extremos superiores o inferiores de la serie de valores observados; así un evento meteorológico o climático de alto impacto es considerado como un evento extremo. Los eventos extremos climáticos que ocurren con mayor frecuencia son la ola de calor, ola de frío, las precipitaciones extremas y la sequía. Además, se debe tener en cuenta que el cambio climático puede originar alteraciones en la intensidad y frecuencias de los eventos extremos, así como magnificar sus impactos en una variedad de sistemas físicos y biológicos, a su vez como círculo vicioso esto puede incrementar el calentamiento global. Muchos factores como la expansión urbana y el incremento exponencial de la población, junto con la migración de zonas rurales a urbanas plantean un desafío en el desarrollo territorial y también contribuyen al aumento del cambio climático (Alemu y Dioha, 2020).

3.2.1. Índices climáticos

Los índices climáticos son una serie temporal de datos construida a partir de variables climáticas que tienen como finalidad proporcionar un resumen agregado del estado del sistema climático (IPCC, 2013). Estos fueron propuestos por un Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI, por sus siglas en inglés) formado conjuntamente por la WMO, el proyecto de variabilidad climática (CLIVAR) y la Comisión Conjunta de Oceanografía y Meteorología Marítima (JCOMM, por sus siglas en inglés). Ellos propusieron un conjunto de 27 índices (Tabla 1) de cambio climático útiles en la detección y el monitoreo de cambios en los extremos del clima. Además muchos de los índices propuestos por ETCCDI están basados en percentiles con umbrales establecidos para evaluar los eventos extremos climáticos moderados que típicamente ocurren pocas veces cada año en lugar de aquellos eventos climáticos de alto impacto que ocurren, una vez en una década (Tank Klein et al., 2009).

Tabla 1: Lista de los 27 índices climáticos propuestos del ETCCDI

Nro.	Código	Nombre	Definición	Unidad
1	TXx	Máxima anual de temperatura máxima diaria	Valor anual máximo de temperatura máxima diaria	°C
2	TNx	Máxima anual de temperatura mínima diaria	Valor anual máximo de temperatura mínima diaria	°C
3	TXn	Mínima anual de temperatura máxima diaria	Valor anual mínimo de temperatura máxima diaria	°C
4	TNn	Mínima anual de temperatura mínima diaria	Valor anual mínimo de temperatura mínima diaria	°C
5	TN10p	Noches frías	Porcentaje de días cuando la temperatura mínima diaria < percentil 10ma	%
6	TX10p	Días fríos	Porcentaje de días cuando la temperatura máxima diaria < percentil 10ma	%
7	TN90p	Noches cálidas	Porcentaje de días cuando la temperatura mínima diaria > percentil 90vo	%
8	TX90p	Días cálidos	Porcentaje de días cuando la temperatura máxima diaria > percentil 90vo	%
9	FD	Días de heladas	Recuento anual cuando la temperatura mínima diaria < 0 °C	d
10	ID	Días de engelamiento	Recuento anual cuando la temperatura máxima diaria < 0 °C	d
11	SU	Días de verano	Recuento anual cuando la temperatura máxima diaria > 25 °C	d
12	TR	Noches tropicales	Recuento anual cuando la temperatura mínima diaria > 20 °C	d
13	GSL	Duración de la temporada de crecimiento	Número anual de días entre la primera ocurrencia de 6 días consecutivos con Tmean > 5 °C y la primera ocurrencia de 6 días consecutivos con Tmean < 5 °C	d
14	DTR	Rango de la temperatura diurna	Diferencia promedio anual entre la temperatura máxima diaria y la temperatura mínima	°C
15	WSDI	Índice de duración de periodo cálido	Número anual de días con al menos 6 días consecutivos cuando Tmax > percentil 90vo	d
16	CSDI	Índice de duración de periodo frío	Número anual de días con al menos 6 días consecutivos cuando Tmin < percentil 10ma	d
17	Rx1day	Cantidad de precipitación máxima de 1 día	Máximo anual de precipitación en 1 día	mm

continuación...

18	Rx5day	Cantidad de precipitación máxima de 5 días	Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos	mm
19	R95p	Días muy húmedos	Precipitación total anual de días > percentil 95vo	mm
20	R99p	Días extremadamente húmedos	Precipitación total anual de días > percentil 99vo	mm
21	R10mm	Días de precipitación fuerte	Recuento anual cuando la precipitación \geq 10 mm	d
22	R20mm	Días de precipitación muy fuerte	Recuento anual cuando la precipitación \geq 20 mm	d
23	Rnnmm	Días de precipitación por encima de nn mm	Recuento anual cuando la precipitación \geq nn mm	d
24	CDD	Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos cuando la precipitación < 1mm	d
25	CWD	Días húmedos consecutivos	Número máximo de días consecutivos cuando la precipitación \geq 1mm	d
26	PRCPTOT	Precipitación total en días húmedos	Precipitación total anual de días \geq 1 mm	mm
27	SDII	Índice de intensidad diaria simple	La razón de la cantidad de precipitación total anual con el número de días húmedos (\geq 1 mm)	mm

Por otro lado, de los 27 índices se seleccionará el índice Cold Spell Duration Index (Índice de duración de periodo frío [CSDI]) para el análisis de olas de frío, teniendo en cuenta estudios elaborados por Ceccherini et al. (2016); Malcheva (2017); Spinoni et al. (2015); que mencionan que el análisis de un índice en función de sus percentiles para una región o área presenta buenos resultados; igualmente Yin y Sun (2018) mencionan que las tendencias provenientes de índices de periodo de duración (Spell Duration) son más consistentes.

De la misma manera, el otro índice a utilizar para el análisis de olas de frío es un índice análogo (no se encuentra propuesto por el ETCCDI), es el Excess Cold Factor (Factor de Exceso de Frío [ECF]), perteneciente a Nairn y Fawcett (2013) que adaptaron un análogo al índice mostrado por (Nairn et al., 2009).

El índice ECF está basado en dos índices de exceso:

- a) Excess Cold Index (índice de exceso de frío [ECI_{sig}]), mide el grado de exceso de frío. Donde las temperaturas promediadas durante un periodo de 3 días son

comparadas en contra de un valor climático referencial para caracterizar el frío inusualmente alto en un índice de exceso de frío. La Ecuación 1 basada del análogo de Perkins y Alexander (2013) se observa cómo se calcula este índice de exceso de frío.

$$ECI_{sig} = \frac{T_i + T_{i-1} + T_{i-2}}{3} - T_{05} \quad (1)$$

b) Cold Stress Index (índice de estrés de frío [ECI_{acc}]), nos indica un periodo donde la temperatura es más fría en promedio que su pasado reciente. Es decir, la temperatura promedio sobre un periodo de 3 días y de 30 días previos son comparados para caracterizar el estrés por frío, asimismo un valor negativo en el índice significa que el periodo de 3 días es más frío en comparación del pasado reciente. En la Ecuación 2 basada del análogo de Perkins y Alexander (2013) se observa cómo se obtiene el índice de estrés de frío.

$$ECI_{acc} = \left(\frac{T_i + T_{i-1} + T_{i-2}}{3} \right) - \left(\frac{T_{i-3} + \dots + T_{i-32}}{30} \right) \quad (2)$$

Donde:

- T_i : Temperatura promedio diaria para el día i , definida como:

$$T_i = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

- T_{05} : Es el percentil 5 de la temperatura promedio diaria para el periodo climático de referencia 1981 a 2010.

Teniendo en cuenta las definiciones de los índices anteriores, se puede señalar que el índice ECF (Ecuación 3) es el resultado del efecto combinado del exceso de frío y el estrés por frío calculado como índices, que proporciona una medida comparativa de diferentes aspectos (intensidad, carga, duración y distribución espacial de un evento). Además, las condiciones de olas de frío existen cuando el ECF es negativo y que además está en progreso.

$$ECF = -ECI_{sig} \times \min(-1, ECI_{accl}) \quad (3)$$

Finalmente, un resumen de los índices a utilizar se observa en la Tabla 2.

Tabla 2: Índices climáticos para el estudio de olas de frío

Índices	CSDI	ECF
Descripción	Recuento anual de días con al menos 3 días consecutivos (Ceccherini et al., 2016) cuando la TN < percentil 10 y percentil 5 (Moberg et al., 2006; Spinoni et al., 2015). Sea TN_{ij} la temperatura mínima diaria en un día i en un periodo j y sea $TN_{ij} 10p$ (05p) el percentil 10 (percentil 5) de la temperatura mínima diaria calculado para una ventana de 5 días centrada en un periodo base definido.	El factor de exceso de frío se genera como efecto combinado del Exceso de Frío (ECI_{sig}) y el Estrés por frío ECI_{accl} , el cual genera una medida comparativa de intensidad, carga, duración y distribución espacial de un evento de Olas de Frío. Donde si el ECF es negativo, señala que la Ola de Frío está en progreso.
Umbral	Los percentiles TN10 y TN5 se calcularon a partir de la línea base especificada por el usuario y para cada día calendario usando una media móvil con ventana de 5 días basándose en el estudio de (Zhang et al., 2005).	El percentil 5 de la temperatura promedio se calculó dentro del periodo base especificado por el usuario, durante el año analizado y usando una media móvil con ventana de 15 días.
Fórmula	$TN_{ij} < TN_{ij} 10p$ $TN_{ij} < TN_{ij} 05p$	$ECF = - ECI_{sig} \times \min(-1, ECI_{accl})$
Unidad	Días	Eventos
Escala	Anual	Anual

3.2.2. Olas de frío

El Equipo de trabajo en definiciones de Eventos de Tiempo y Climas Extremos (TT - DEWCE, por sus siglas en inglés), menciona que una ola de frío se define como:

Un estado de tiempo frío (cold weather) marcado e inusual, caracterizado por una caída brusca y significativa de la temperatura del aire cerca de la superficie (máximo, mínimo y promedio diario) sobre un área extensa y que persiste por debajo de cierto umbral por al menos dos días consecutivos durante el evento frío (TT - DEWCE, 2018).

Asimismo, Malcheva (2017) menciona que “las definiciones usadas en olas de frío (basados en umbrales establecidos de temperatura, temperaturas anómalas, percentiles y capacidad de adaptación humana) corresponden a las condiciones climáticas locales y a los requerimientos de un sector específico”. Citando algunos ejemplos: Para la región Sierra en España, según Villazán citado por Sánchez (2015), menciona que las Olas de frío se definen por la sucesión de una serie de tipos de tiempo, que individualmente constituyen por sí solos situaciones ya muy frías y casi habituales en la secuencia anual de los inviernos, enfocando a que un episodio de frío severo se inicia con heladas advectivas, y en Perú para el Amazonas, la nota técnica realizada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología ([SENAMHI], 2015), denomina el evento de olas de frío como un descenso de temperatura del aire en el periodo de invierno en la Amazonía, y lo asocia a un evento local conocido como Friaaje.

Finalmente, Ceccherini et al. (2016) señala que hay una falta de acuerdo en la definición de una ola fría, es por ello que en el presente estudio se utilizará la definición más reciente propuesta por TT – DEWCE.

3.3. Análisis de tendencia

El análisis de tendencia a largo plazo en temperatura y precipitación es esencial para los tomadores de decisiones en hidrología, climatología y agricultura, dado que tipos de agricultura como las tierras agrícolas de secano dependen principalmente de la precipitación y regiones irrigadas dependen tanto de la temperatura como de la precipitación para la programación del riego, es así, que el análisis de tendencias de variables climáticas es considerado como el proceso central en la evaluación del estado del clima en una región y proporciona una estimación general sobre las variaciones en las variables climáticas (Mahmood et al., 2019).

La importancia del conocimiento de la variabilidad y tendencias climáticas tiene repercusiones en los encargados de formular políticas, los planificadores y gestores de recursos naturales frente a la adopción de medidas y adaptación para hacer frente al cambio climático; en la evaluación de tendencias climáticas a menudo se utilizan métodos paramétricos (prueba T, prueba F, regresión lineal etc.) y no paramétricos (prueba Mann-Kendall, prueba de Kruskal-Wallis y estimador de pendiente de Sen), aunque los métodos paramétricos son poderosos, sus aplicaciones están restringidas a series de tiempo distribuidas normalmente, sin embargo, la mayoría de series de tiempo climáticas, no

cumplen con el requisito de normalidad, por lo que los métodos no paramétricos se aplican con mayor frecuencia en el análisis de tendencias, además, los métodos no paramétricos se consideran más robustos que los métodos paramétricos contra los valores atípicos en una serie de tiempo (Mahmood et al., 2019).

La prueba de Mann – Kendall se usa generalmente para detectar tendencia ascendente o descendente en una serie de datos hidrológicos o climáticos, así como datos ambientales. El estimador de Sen es otro método no paramétrico utilizado en análisis de tendencias para conjuntos de datos hidroclimáticos, asegura la identificación de la magnitud de la tendencia, por lo tanto, es una prueba que calcula una tasa lineal de cambio (Alemu y Dioha, 2020).

3.3.1. Control de calidad

El objetivo del control de calidad de datos consiste en verificar si el valor de un dato notificado es representativo de la medición que se pretendía efectuar y no se ha visto afectado por factores no relacionados con el mismo. Por lo tanto, es importante comprender desde un principio lo que supuestamente deben representar las lecturas de una determinada serie de datos. Los datos no deberían ser considerados aptos para su archivo permanente hasta que no hayan sido sometidos a un control de calidad de un nivel adecuado (WMO, 2018).

3.3.2. Homogeneización

Acorde al Programa mundial de monitoreo y datos climáticos (WCDMP), las series de tiempo climáticas de vez en cuando muestran falsos saltos (no climáticos) y/o cambios graduales producidos por los cambios de ubicación de la estación, ambiente (exposición), instrumentación o prácticas en las observaciones meteorológicas. Estas des homogeneidades pueden afectar severamente los extremos (Tank Klein et al., 2009).

3.3.3. Prueba de Mann - Kendall modificado

El documento técnico del U.S. Department of Energy, (2014), menciona que la finalidad de la prueba de Mann – Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975; Gilbert, 1987) es evaluar

estadísticamente si hay una tendencia monótonica hacia arriba o hacia abajo de la variable de interés a lo largo del tiempo.

Este tipo de prueba no-paramétrica, se caracteriza por qué no se ve afectado por la distribución de los datos y posee menos sensibilidad ante valores atípicos (Hamed, 2008). Además el método de prueba no paramétrico Mann–Kendall es una de las técnicas más utilizadas por los investigadores (Arya y Murumkar, 2014; Basarir et al., 2018; Karmeshu, 2012) en el análisis de información de series de tiempo climático.

Finalmente la prueba de Mann-Kendall posee una propiedad excepcional, no observable en otras pruebas no-paramétricas; prueba que es invariable a las transformaciones de poder (monótonas), lo que la hace aplicable en múltiples situaciones (Hamed, 2008).

Los estadísticos del test de Mann–Kendall tomados de Ali y Abubaker (2019), muestran el cálculo del Estadístico S (Ecuación 4), donde n es la longitud del conjunto de datos observados, X_j e X_i , son informaciones sucesivas en tiempos distintos y $sign$ desarrollado en la Ecuación 5, la capacidad del signo de tomar valores de 1, 0 o -1 . Los valores positivos de S , asimismo, muestran una tendencia hacia arriba y el valor de S negativo una tendencia hacia abajo para las series temporales de datos.

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (4)$$

Donde:

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} -1 & \text{para } (x_i - x_j) < 0 \\ 0 & \text{para } (x_i - x_j) = 0 \\ 1 & \text{para } (x_i - x_j) > 0 \end{cases} \quad (5)$$

En la Ecuación 6, que calcula la varianza para S . Donde q es el grupo de números observados vinculados, k el k -ésimo grupo y t_k es la cantidad de datos en el grupo k .

$$V_o(S) = \frac{s(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^q t_k(t_k-1)(2t_k+5)}{18} \quad (6)$$

En la Ecuación 7, se observó el valor estandarizado de Z_{mk} , este es utilizado como una medida significativa de tendencia y se utiliza para testear la hipótesis nula. Donde el valor de Z_{mk} se contrasta con la tabla de distribución normal estandarizada a niveles de significancia de $\alpha=1\%$, $\alpha=5\%$ y $\alpha=10\%$. Cabe señalar que la hipótesis nula es aceptada para establecer una no tendencia si el valor de Z_{mk} , se encuentra entre $-Z_{1-\alpha/2}$ y $Z_{1-\alpha/2}$ de esta manera se rechazaría la hipótesis alterna (Vousoughi et al., 2012).

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{s - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{s + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Hay que mencionar, además que la existencia de una correlación serial en la serie de tiempo de los datos, afectará la habilidad del test de Mann-Kendall en evaluar la significancia de la tendencia (Von Storch, 1999), por lo que es necesario remover esta componente. Algunos trabajos relacionados a este procedimiento fueron realizados por Yue et al. (2002); Yue y Wang (2002); Zhang et al. (2001) y en otros estudios de tendencias.

Por otro lado, Yue y Wang, (2004) propusieron un procedimiento para eliminar un componente de la correlación serial, como un proceso autoregresivo (AR) de la serie antes de aplicar el test de Mann-Kendall. Para ello, se basaron en una fórmula empírica (Ecuación 8), para la modificación de la varianza desarrollada por Hamed y Rao (1998). Dicha ecuación requiere un factor de corrección que depende del tamaño de muestra actual (ASS) y el tamaño de muestra efectiva (ESS) obtenida de la Ecuación 9 desarrollada por Bayley y Hammersley (1946). De esta manera, se reduce la influencia de la correlación serial en el test de Mann-Kendall.

$$\text{Var}^*(S) = \text{Var}(S) \times CF \quad (8)$$

Donde:

- CF: Factor de corrección que deriva de $\frac{n}{n^*}$
- n: ASS

- n^* : ESS

Además:

$$n^* = \frac{n}{1 + 2 \cdot \sum_{k=1}^{n-1} \left(1 - \frac{k}{n}\right) \cdot \rho_k} \quad (9)$$

Donde:

- ρ_k : Coeficiente de correlación serial lag-k

Onoz y Bayazit, citado por Karmeshu (2012), mencionan que hay dos ventajas de usar el test de Mann-Kendall. El primero que es un test no paramétrico y no requiere que los valores a usar estén normalmente distribuidos. Segundo, el test tiene una baja sensibilidad hacia los cortes abruptos debido a la inhomogeneidad de la serie temporal.

La prueba de Mann Kendall es considerada por sus diversas documentaciones en publicaciones como una prueba poderosa para el análisis efectivo de tendencias estacionales y anuales en datos ambientales, datos hidrológicos y climáticos y esta prueba se prefiere frente a otras pruebas por su aplicabilidad en series de tiempo, donde los datos no siguen una distribución estadística (Alemu y Dioha, 2020).

3.3.4. Estimador de pendiente Sen

Propuesto por Sen (1968), es un método no-paramétrico usado para estimar la magnitud de tendencias en datos de series de tiempo, por lo cual, la pendiente de n pares de datos observados pueden ser estimados por medio de la siguiente ecuación:

$$\beta_i = \text{Media} \left(\frac{x_j - x_k}{j - k} \right) \forall (k < j) \quad (10)$$

Donde en la Ecuación 10 (Ali y Abubaker, 2019), X_j e X_k , son valores observados que pertenecen a los respectivos tiempos j y k , en el cual el tiempo j es consecutivo al k ($k < j$), y la mediana de los n valores de β_i es la prueba de estimador de pendiente Sen. Valores

positivos para β_i indican una tendencia de incremento en el tiempo, así como valores negativos representan una tendencia decreciente.

3.4. Marco teórico específico

Mahdi y Dhekale (2016), realizaron un análisis de tendencias de olas de calor y olas de frío en el sur de la India, donde usaron series de datos de 1969 al 2013 de temperaturas máximas y mínimas diarias de siete estaciones, desde donde se estimó la tendencia, ocurrencia, duración y severidad de las olas de calor y frío. Realizaron el cálculo de normales climáticas para clima cálido y clima frío para consecutivamente calcular anomalías diarias y reclasificar en criterios de ola de calor, ola de calor severo, ola de frío y ola de frío severa. Entre los principales resultados obtuvieron que las olas de calor aumentaban a una tasa de 0.11 eventos por año mientras las olas de frío se observó una tasa decreciente no significativa de 0.04 eventos por año.

Un estudio realizado por Kumar (2017), estudio las tendencias e impactos de olas de calor, olas de frío y lluvias extremas en cultivos, para lo cual, se basaron en datos diarios de temperatura y precipitación a largo plazo recopilado en cuatro estaciones de diferentes zonas agroecológicas en Bihar, India. La prueba de Mann Kendall se utilizó para la detección de tendencias, con la asunción previa que las observaciones son independientes en la serie de tiempo y no hay correlación. Como resultados detectaron tendencias decrecientes para dos estaciones, por el contrario, para las otras estaciones mostró una tendencia creciente. Para olas de frío, se detectaron de nivel moderado y en todas las estaciones se obtuvo una tendencia decreciente, en el caso de precipitaciones extremas detectaron una tendencia creciente generalizada. El estudio sugiere que estas incidencias de cambios en tendencias de eventos extremos provocaron reducciones significativas en el rendimiento de cultivos.

Tomczyk et al. (2018), caracterizaron días fríos y olas de frío en Pozna, Polonia durante 1966 a 1976 y 2015 a 2016 así como la caracterización de las condiciones térmicas de la ciudad en los años 2008 a 2009 y 2015 a 2016. Para el estudio obtuvieron una base de datos diarios de temperatura máxima y mínima y valores diarios de temperatura del aire en ocho puntos de medición ubicados en el área de estudio para diferentes usos de la tierra, para

caracterizar condiciones térmicas durante las olas de frío utilizaron imágenes de satélite calculando la temperatura de superficie terrestre, así para definir un día frío y olas de fríos establecieron umbrales. Como resultado obtuvieron que las condiciones térmicas de la ciudad mostraron una alta variabilidad durante la temporada de invierno y durante las olas de frío analizadas.

Un estudio de predicción de olas de calor y frío en Europa fue presentado por Lavaysse et al., (2018), para lo cual se trabajó con el conjunto de rango extendido del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a largo plazo, definiendo en el estudio a olas de frío y ola de calor a condiciones de tres días consecutivos con temperatura mínima y temperatura máxima por encima del cuantil 90 y por debajo del cuantil 10 respectivamente en el conjunto extendido de datos. En base a los resultados se observó que la predictibilidad era más alta para las olas de frío que para las olas de calor. El análisis de sensibilidad e incertidumbre en la predictibilidad de estos eventos extremos, determinó que la resolución temporal tiene un efecto insignificante (pocos errores debido a la mala sincronización de pronóstico) y una mejor previsibilidad a eventos de gran escala. En relación al inicio y fin de las olas se concluyó que son menos predecibles en base a pronósticos con ventaja de cinco días, además, en relación a la intensidad pronosticadas de las olas estas mostraron una correlación de 0.65 con las observadas, revelando el desafío a predecir esta característica.

Song et al. (2019) realizaron un estudio de caracterización de olas de frío en Handan, provincia de Hebei, China, basado en temperatura mínima de 16 estaciones con datos desde 1976 a 2016 donde caracterizaron este evento extremo en función de frecuencia, duración y rango de enfriamiento, así como la tendencia se analizaron estadísticamente utilizando tendencia lineal y la prueba de Mann – Kendall. Los resultados obtenidos mostraron que las olas de frío aparecieron desde Setiembre hasta mayo, así como las frecuencias de olas de frío fue alta en el este y Norte de Handan, para la duración de días de enfriamiento los procesos en las olas de frío fueron de uno a seis días, lo cual se relacionó negativamente con la frecuencia y positivamente con el rango de enfriamiento, además, la variación interdecadal aumento primero y luego disminuyó dándose el cambio abrupto en 2009 y 2012.

IV. METODOLOGÍA

4.1. Ámbito de estudio

Los extremos térmicos y su persistencia tienen implicaciones importantes sobre diferentes aspectos socioeconómicos: salud, agricultura, desarrollo regional, entre otros. Es por ello que el estudio abarcó la cuantificación y análisis de recurrencia de eventos de olas de frío en todo el territorio continental del Perú.

4.2. Pre – procesamiento: Selección de estaciones, control de calidad y homogeneización de datos.

La selección de estaciones meteorológicas en el área de estudio es primordial para elaborar una correcta evaluación y cálculo de los índices climáticos, además de poseer datos con un correcto control de calidad y homogeneización en la información meteorológica (Ceccherini et al., 2016; Malcheva, 2017; Spinoni et al., 2015).

Por lo anterior, se inició con una base de datos de temperatura máxima y temperatura mínima seleccionada de 369 estaciones meteorológicas convencionales perteneciente a la red de estaciones del SENAMHI proporcionadas por la Subdirección de Gestión de Datos (SGD). Donde se les aplico un procedimiento para realizar el control de calidad y otro para la homogeneización, y puedan ser utilizados como datos de entrada para el cálculo de los índices basados en variables de temperatura propuestos en el presente estudio. El procedimiento de control de calidad realizado se presenta a continuación:

- a. Realizar un filtro general de datos faltantes en las variables de temperatura máxima y temperatura mínima en las estaciones seleccionadas, basándose en el método de la Guía de Practicas Climatológicas (WMO, 2018), que señala que las medias de un periodo deberían calcularse sólo cuando los valores estén disponibles en al menos un 80% de los años registrados (o que falten un 20% del

total de los datos en su defecto) en el periodo de estudio y con no más de tres años faltantes consecutivos en cada una de las variables de temperatura, sin embargo, por consenso de los especialistas de la SMN se realizó un filtro más estricto, seleccionando sólo aquellas estaciones que cuenten con un máximo de 16% de datos faltantes dentro del periodo de estudio para cada variable (temperatura máxima y mínima). Por otra parte, no se tomó en consideración el criterio de presentar tres años faltantes consecutivos. Este proceso se realizó con el script “*control_calidad.R*” en el software R, desarrollado para realizar el filtro.

- b. Las estaciones convencionales resultantes del proceso “a”, fueron procesadas con los programas AndesQC (Aguilar, 2012) y SISCONTROL (programa propio de SENAMHI), ambos programas utilizados por la SMN, para detectar principalmente errores de carácter no sistemático como errores de digitación, outliers y valores fuera de rango, que serán revisados en planilla y corregidos.

Por otro lado el proceso de homogeneización hecho a las variables de temperatura máxima y mínima se realizó con el programa HOMER (Mestre et al., 2013), desarrollado por el proyecto europeo HOME, para el conjunto de estaciones meteorológicas convencionales que pasaron los procesos “a” y “b”. Esto se realizó con la finalidad de detectar cambios artificiales en las series climáticas y ajustarlas con el objetivo de hacer todas las observaciones comparables (Aguilar et al., 2003).

Finalmente se debe tener en cuenta que los resultados obtenidos en los procesos fueron evaluados posteriormente en conjunto por especialistas de la SMN, lo cual en función a la experiencia de los profesionales se obtuvo una decisión final de las estaciones controladas y homogenizadas a utilizar.

4.3. Cálculos de índices para olas de frío y análisis de tendencia

4.3.1 Cálculo de índices de extremos climáticos

Teniendo en cuenta que se requiere cuantificar los eventos de olas de frío que ocurren en las distintas localidades representadas por sus estaciones meteorológicas, se procedió a utilizar los índices CSDI y ECF para el presente estudio, ambos se calcularon para un periodo de

1965 a 2019 y con un periodo base de referencia de 1981 a 2010. Asimismo, el índice CSDI y ECF fueron calculados para el periodo anual.

El proceso del cálculo del índice CSDI, se realizó utilizando el paquete climático ClimIndVis (Sedlmeier et al., 2018) programado en R, que necesita que se le proporcione valores para parametrizar los datos de entrada (series de temperatura homogenizada). Los parámetros requeridos son: (i) La cantidad máxima de días faltantes en un año, expresado en porcentaje para poder obtener el valor calculado del índice. (ii) La cantidad mínima de días requeridos para calcular los cuantiles 10 y 5 propuestos para el índice CSDI y que dependerá de la agregación temporal a analizar (anual). (iii) Cantidad mínima de días consecutivos que caracteriza una ola de frío.

La parametrización mencionada se realizó para cada una de las estaciones meteorológicas resultantes del proceso 3.2, asimismo en la Tabla 3 se podrá observar los valores que se propusieron para cada uno de los parámetros. Cabe resaltar que estos parámetros fueron producto de un consenso de la SMN.

Tabla 3: Valores de parámetros para el cálculo del índice CSDI

Agregación temporal	Faltante diario en %	Cantidad días para cálculo de cuantiles	Cantidad días consecutivos
Anual (365 días)	15	55	3

Por otra parte, el proceso de cálculo del índice ECF se realizó a través del paquete ClimPACT2 (Alexander y Herold, 2016). Se tuvo en cuenta que el paquete genera como resultado cinco aspectos, el cual cada uno representa una cierta característica de una Ola de Frío ligada a la definición del índice ECF. El aspecto que fue utilizado en este estudio fue el CWN (Cold Wave Number defined by the Excess Cold Factor) o el número de eventos de las olas de frío. Este aspecto análogo deriva del estudio realizado por Perkins y Alexander (2013). Además, que se realizaron los cálculos con una escala temporal anual para el periodo de 1965 a 2019 teniendo como periodo base de referencia los años de 1981 a 2010 y resaltando que las estaciones meteorológicas que se analizaron con este índice son aquellas que presenten información de las variables de temperatura máxima y mínima a la vez.

Finalmente teniendo en cuenta el estudio de Matthes et al. (2015) que clasificó los eventos del periodo frío en categorías, de manera análoga al presente estudio los eventos fríos encontrados por el cálculo de los índices utilizados, se clasificaron en 4 categorías: (i) evento nulo (0 días); (ii) eventos cortos (1 – 8 días); (iii) eventos medianos (9 – 16 días); (iv) eventos largos (mayor a 17 días).

4.3.2. Cálculo de tendencias climáticas

El cálculo la magnitud de la tendencia para el índice CSDI para los periodos anual, así como la magnitud de la tendencia del aspecto CWN del índice ECF para el periodo anual, fue utilizando el método de SEN. Las magnitudes de tendencia son obtenidas a través del script desarrollado en R “**tendencia_Man.R**”, el cual requerirá una parametrización para la obtención del valor de tendencia.

La parametrización para el cálculo de tendencia es: (i) La cantidad máxima de años faltantes que pueda existir en el valor calculado del índice para el periodo seleccionado, expresado en porcentaje, dependiendo de la agregación temporal a analizar (anual). Donde lo mencionado se presentó a través de la Tabla 4, asimismo se agregó dos columnas a modo de información que contendrán: (a) La cantidad total de valores obtenidos por índice calculado por agregación temporal. (b) Cantidad máxima de valores faltantes según el porcentaje seleccionado en la parametrización.

Tabla 4: Parámetros para el cálculo de tendencia para el índice CSDI y el aspecto CWN_ECF

Agregación temporal	Faltante en años en %	Cantidad de datos de índice ^(a)	Cantidad de datos faltantes ^(b)
Anual (365 días)	20	55	11

Finalmente para el análisis de las hipótesis de la tendencia se trabajó con un parámetro de confidencialidad (α) de 0.05 (Yue y Wang, 2004).

V. RESULTADOS

5.1. Contexto laboral

El presente estudio fue llevado bajo actividad laboral del SENAMHI, esta entidad es un Organismo Público adscrito al Ministerio del Ambiente, con autonomía técnica, económica y administrativa. El SENAMHI tiene por finalidad planificar, organizar, coordinar, normar, dirigir y supervisar las actividades meteorológicas, hidrológicas y conexas, mediante la investigación científica, la realización de estudios y proyectos, así como la prestación de servicios en materia de su competencia. Además el SENAMHI tiene como visión ser una institución líder a nivel nacional y regional en el ámbito meteorológico, hidrológico, agrometeorológico y ambiental, sustentada en una organización eficaz y eficiente, recursos humanos de elevada capacidad profesional y un sistema hidrometeorológico y ambiental tecnológicamente actualizado, que contribuya a la protección de la vida, la propiedad y al desarrollo socioeconómico del país, así como tiene la misión de ser una institución de ciencia y tecnología que conduce las actividades meteorológicas, hidrológicas, agrometeorológicas y ambientales del país, participa en la vigilancia atmosférica mundial y presta servicios especializados para contribuir al desarrollo sostenible, la seguridad y el bienestar nacional.

El SENAMHI está estructurado en la forma que se presenta en la Figura 1, contando con principalmente con cuatro direcciones de línea: (i) Dirección de Redes de Observación y Datos, (ii) Dirección de meteorología y Evaluación ambiental Atmosférica, (iii) Dirección de hidrología y la (iv) Dirección de agrometeorología. El estudio presentado fue supervisado de manera directa bajo la Subdirección de Modelamiento Numérico de la Atmósfera la cual se encuentra incorporada a la Dirección de meteorología y Evaluación ambiental Atmosférica (ii).

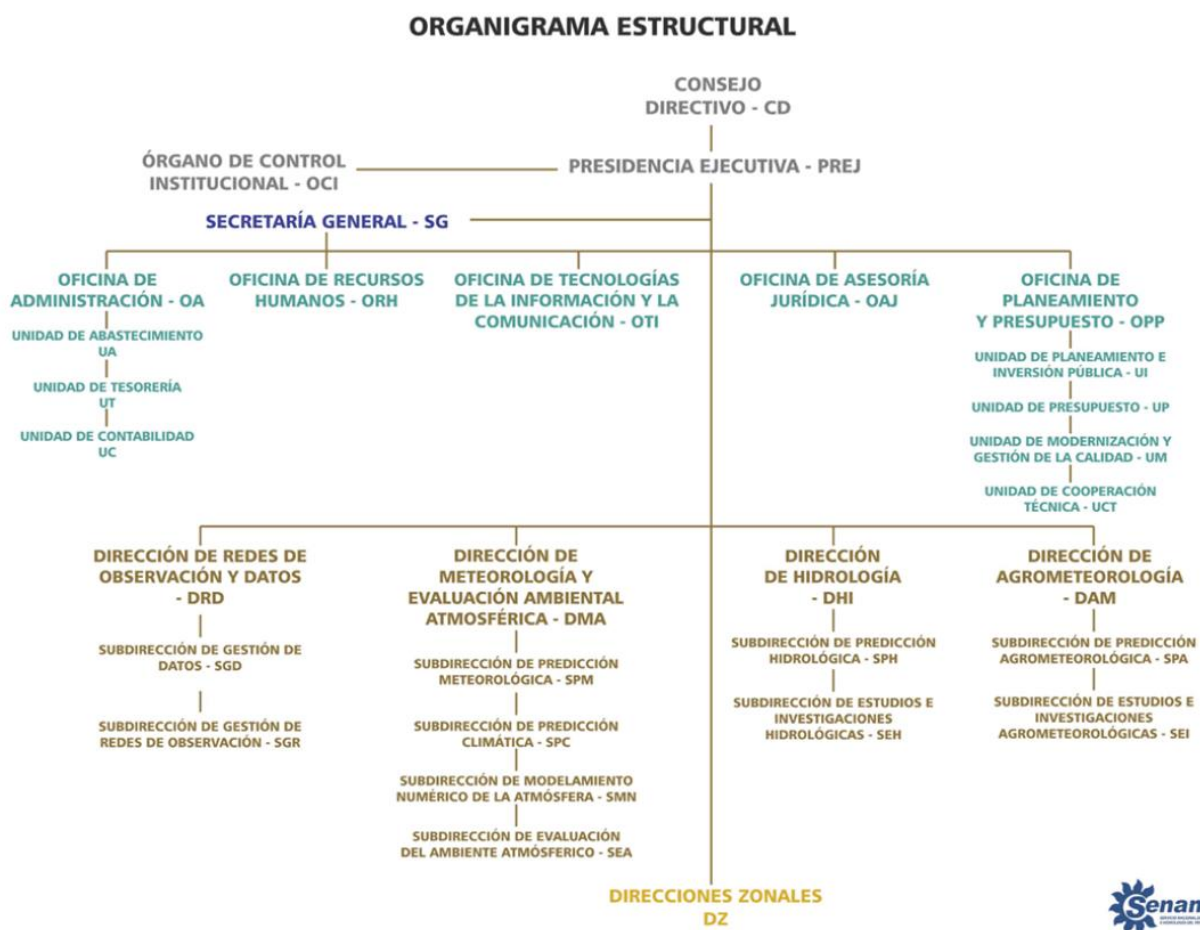


Figura 1: Organigrama estructural del SENAMHI
 FUENTE: Decreto Supremo N°003-2016-MINAM

La SMN es el departamento encargado de desarrollar y validar modelos numéricos orientados a:

- a) Predicción y simulación meteorológica.
- b) Predicción y simulación climática.
- c) Predicción y simulación hidrológica.
- d) Predicción y simulación atmosférica.
- e) Estudios e investigaciones.

Entre sus principales funciones de la SMN se encuentran:

- a) Formular y proponer planes, procedimientos, directivas, instructivos, protocolos y otras normas en el campo del modelamiento numérico de la atmósfera, en coordinación con los Órganos de la entidad, así como promover su implementación;
- b) Formular y proponer a la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica y notas técnicas en la materia de su competencia
- c) Desarrollar proyecciones de escenarios climáticos en el contexto del Cambio Climático, basados en modelos numéricos del clima;
- d) Conducir los estudios e investigaciones sobre modelaje numérico, así como evaluar los proyectos de estudios e investigaciones que deben ser desarrollados por las Direcciones Zonales
- e) Coordinar con entidades públicas, privadas y Órganos internos, la elaboración de estudios sobre modelamiento numérico de la atmósfera, en coordinación con las Direcciones Zonales;
- f) Brindar asistencia técnica, a las entidades públicas, privadas y Órganos de la entidad, sobre temas de su competencia.

5.2. Determinación y análisis del problema.

Como se ha observado la SMN tiene entre sus principales funciones el desarrollo de estudios e investigaciones tanto en coordinación con otras entidades públicas, así como con entidades privadas. En este contexto la falta de información con respecto a estudios relacionados a eventos de olas de frío a nivel nacional y la magnitud de la tendencia en la cantidad de eventos que pueda presentarse en las distintas estaciones meteorológica a nivel nacional en un determinado periodo de análisis es inexistente, los cuales pueden servir como instrumento para los tomadores de decisiones y planificadores de políticas, es por ello que bajo el contexto de la variabilidad climática se vio en la necesidad de realizar un estudio de Olas de frío en el Perú debido a la falta de información que se carece de este evento extremo climático.

5.3. Proyecto de solución.

Como parte de la solución al problema de escasas investigaciones nacionales en torno a eventos extremos climáticos, se planteó la propuesta de manera coordinada con el Proyecto Proyecto de Apoyo a la Gestión del cambio climático Fase II, de realizar un estudio de Olas de Frío en todo el territorio Continental del Perú para el periodo 1965 a 2019. En la Tabla 5 se presenta las actividades específicas o estrategias que correspondieron al estudio.

Tabla 5: Actividades específicas

Objetivos	Actividades específicas/estrategias	Indicador	Fecha	Recursos materiales	Recursos financieros	Meta
<ul style="list-style-type: none"> • Calcular los índices de extremos climáticos para la región Norte, Centro y Sur del Perú. • Calcular la tendencia para el índice <i>Cold Spell Duration Index</i> (CSDI) y el <i>índice Excess Cold Factor</i> (ECF) en las estaciones meteorológicas del Perú. 	Revisión bibliográfica sobre el tema	<ul style="list-style-type: none"> - Número de horas-hombre trabajadas. - Carpeta Digital con material bibliográfico recolectado. 	El tiempo abarcado para la realización del estudio fue de enero a junio del 2019.	Los recursos materiales utilizados fueron un equipo de cómputo: Workstation Core i7, capacidad de almacenaje de 2T y 32G de RAM y también recursos informáticos incluyendo el software R.	El financiamiento del estudio estuvo a cargo del Proyecto de Apoyo a la Gestión del cambio climático Fase II.	Elaboración de un estudio de olas de frío en el Perú de entrega en formato digital, por un especialista meteorólogo en un plazo máximo de seis meses durante el año 2019
	Pre-procesamiento de los datos (Selección de estaciones, control de calidad y homogeneización)	<ul style="list-style-type: none"> - Número de horas-hombre trabajadas. - Base dato digital con información meteorológica controlada y homogeneizada. - Archivo digital con código de programación en lenguaje R. 				
	Cálculo de índices climáticos para identificación de olas de frío y análisis de tendencias mediante pruebas estadísticas.	<ul style="list-style-type: none"> - Número de horas-hombre trabajadas. - Base de datos digital de los índices de olas de frío. 				
	Redacción del documento final del desarrollo del estudio de Olas de Frío en el Perú a la SMN de SENAMHI.	<ul style="list-style-type: none"> - Número de horas-hombre trabajadas. 				

5.4. Evaluación del proyecto.

Con respecto a la meta, esta se logró obteniéndose así en el periodo (6 meses) y por el personal encargado (1 investigador) el primer Estudio de olas de frío en el Perú de 1965 al 2019 en formato digital.

- a) **Con respecto al impacto de solución**, de manera general, el desarrollo del estudio de olas de frío en el Perú generó un nuevo conocimiento e incrementó el número de estudios de eventos extremos climáticos para la SMN, bajo el contexto del Proyecto de Apoyo a la Gestión del cambio climático – II Fase, y, por lo tanto, la información disponible respecto a eventos detectados en el clima histórico, brindada por SENAMHI para los tomadores de decisiones.

De manera específica, se generó el primer compilado bibliográfico respecto al tema en cuestión y promovió el uso de métodos estadísticos robustos para análisis de tendencia, que puedan ser replicados en otros estudios similares a desarrollarse por los profesionales de la SMN u otros profesionales del SENAMHI.

También como parte de sus impactos el estudio puso en relevancia la necesidad de incrementar el número de investigaciones para optimizar los diferentes indicadores que pueden ser utilizados en olas de frío, ya que, los índices utilizados mostraron marcadas diferencias en su capacidad para detectar los eventos de olas de frío.

Además, con la realización del estudio se reveló la necesidad de información que se tiene sobre desarrollar investigaciones de olas de frío a nivel de regiones y asociarlo con sus impactos en el ecosistema, esto debido a que en el estudio realizado las olas de frío mostraron contrastes marcados en el número de eventos y frecuencia según las regiones analizadas, predominando el suceso de olas de frío en algunas regiones.

Por último, los resultados exacerbaron el interés de la Entidad Privada patrocinante en fortalecer sus vínculos con la SMN de SENAMHI para financiar futuros estudios que complementen o refuercen el estudio realizado, consolidándose así la asociación Privado – Estatal.

b) Los resultados obtenidos de acuerdo a los objetivos se detallan a continuación:

Para el cálculo de índices climáticos para el periodo 1965 – 2019.

En el control de calidad, se obtuvo 121 estaciones meteorológicas convencionales con registros de temperatura mínima y máxima corregidas por el control de calidad, de las cuales 116 estaciones cuentan con información de temperatura mínima y 107 estaciones contienen exclusivamente ambas variables de temperatura (máxima y mínima). Estas 2 agrupaciones de estaciones se dan debido a que la totalidad de estaciones controladas no todas cuentan con las dos variables a la vez, ya que existirán estaciones que cuenten solo con información de temperatura mínima o solo de temperatura máxima, y también ambas a la vez. Adicionalmente, en el Anexo 1 se presentan los errores de carácter sistemático que se presentaron en las estaciones convencionales cuando se analizaron la serie de tiempo de datos a ser controlados, los cuales fueron comparados con revisión en planilla y corregido manualmente.

En la homogeneización de variables de temperatura máxima y mínima, a las estaciones procedentes del control de calidad se les aplicó el proceso de homogeneización dando como resultado información homogenizada para 92 estaciones meteorológicas, de las cuales 78 contienen registros de temperatura mínima (para el cálculo del índice CSDI) y solo 68 contienen registros de ambas variables de temperatura (para el cálculo del índice ECF). En el Anexo 2 se presenta una tabla con las estaciones meteorológicas convencionales que fueron observadas (usadas o eliminadas), producto del consenso de los especialistas de la SMN.

Para el cálculo de los índices CSDI y ECF, ingresaron las 78 estaciones convencionales resultantes del proceso anterior para el cálculo del índice CSDI, aplicando el paquete ClimIndVis e ingresando los parámetros especificados en la metodología (Tabla 3), con lo cual se obtuvo los valores calculados anuales para el índice CSDI en el percentil 10 (CSDI 10) y CSDI en el percentil 5 (CSDI 5), para un conjunto de 75 estaciones y para el aspecto CWN (Eventos de olas de frío) del índice ECF se obtuvo información para 68 estaciones. En el Anexo 3 se adjunta las estaciones que presentaron información para el cálculo del índice CSDI y el aspecto CWN del índice ECF (Tabla 2).

Las Figuras que muestran los resultados calculados, presenta una escala de colores referido a eventos por año ya mencionada en el apartado 4.3.1.

Según las Figuras 2 y 3, los resultados obtenidos para el índice CSDI 5 y CSDI 10 en la Costa Norte y Centro - Sur muestran que la mayor concentración de eventos fue durante el periodo 1965 a 1978 aproximadamente, en adelante (resto del periodo) se observa una disminución de resultados. Por mencionar un ejemplo, en la estación meteorológica Caraveli (costa centro sur) en el año 1965 se presentó un evento largo (más de 16 días calculados), esto quiere decir que cada uno de esos días presentó al menos tres días consecutivos donde su temperatura mínima era menor al percentil cinco de la temperatura mínima del periodo de referencia (1981-2010). También se observa que es el índice CSDI 10, el que detecta una mayor presencia de eventos por año.

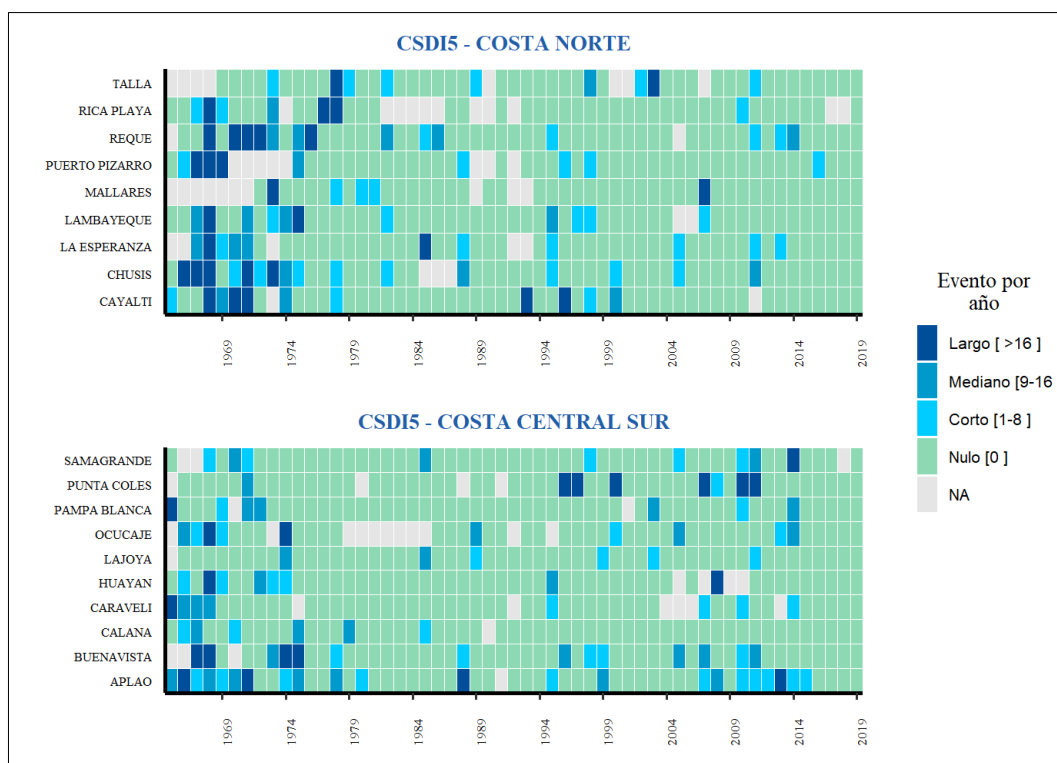


Figura 2: Serie de tiempo clasificada para el índice CSDI 5 para la región costa

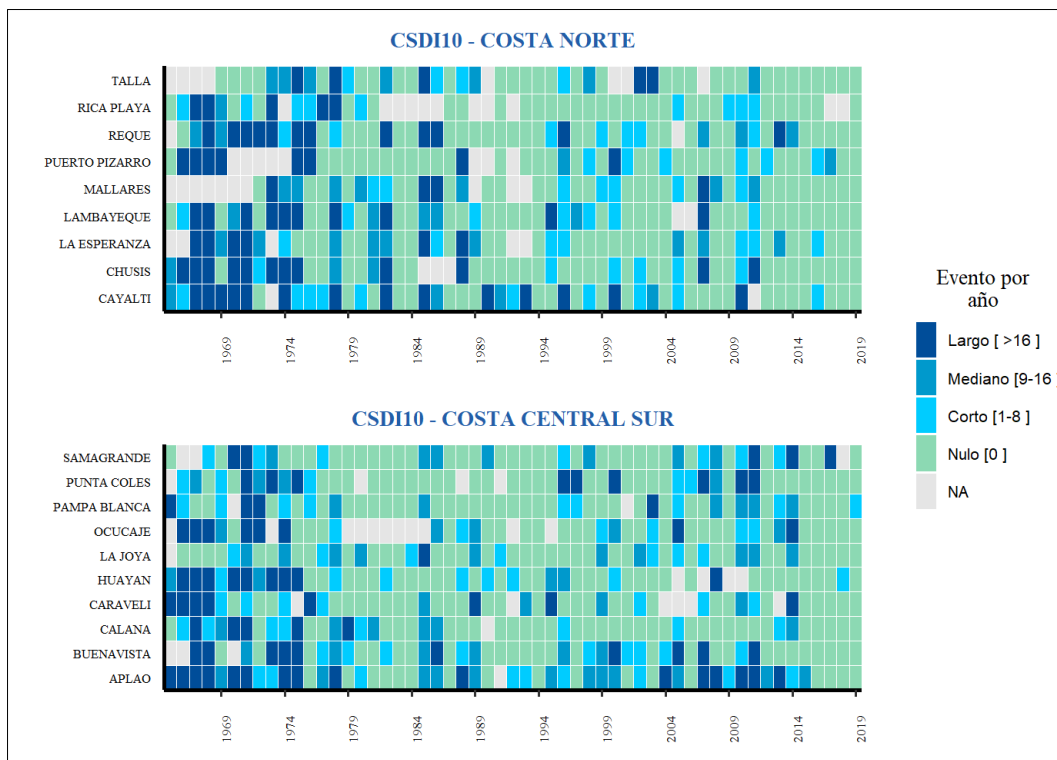


Figura 3: Serie de tiempo clasificada para el índice CSDI 10 para la región costa

Según las Figuras 4 y 5, los resultados obtenidos para el índice CSDI 5 y CSDI 10 en la Selva muestran que predominan los eventos nulos, es decir en esta región hay menor cantidad de olas de frío, además, los dos índices detectan los eventos de forma heterogénea, donde, la mayor cantidad de eventos es detectado por el índice CSDI 10. Un ejemplo representativo de un evento corto para toda la región es en 1975 para el índice CSDI 10, el cual podría estar relacionado con el Friaje que se presentó en la amazonia peruana en 1975 analizado por Giraldi (Marengo, 1983).

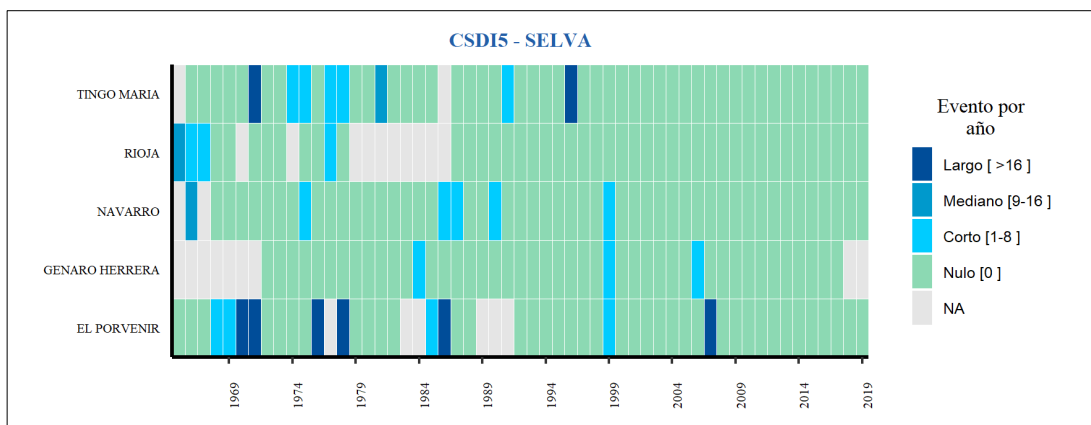


Figura 4: Serie de tiempo clasificada para el índice CSDI 5 para la región selva

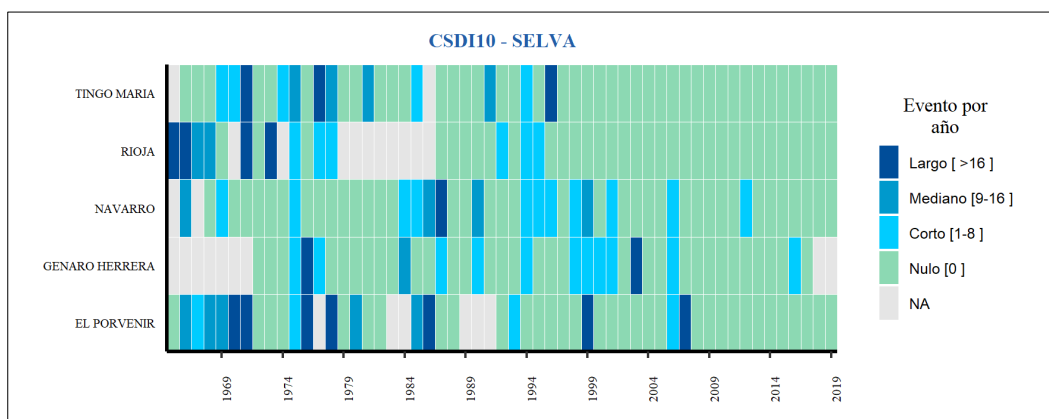


Figura 5: Serie de tiempo clasificada para el índice CSDI 10 para la región selva

Según las Figuras 6 y 7, los resultados obtenidos para el índice CSDI 5 y CSDI 10 en la Sierra Norte, Sierra Central y Sierra Sur se observa que, a diferencia de las otras regiones, concentran una gran cantidad de eventos por estación meteorológica, pero también los

eventos se presentan en casi todo el periodo histórico (1965 a 2019) y no se enfoca en periodos específicos.

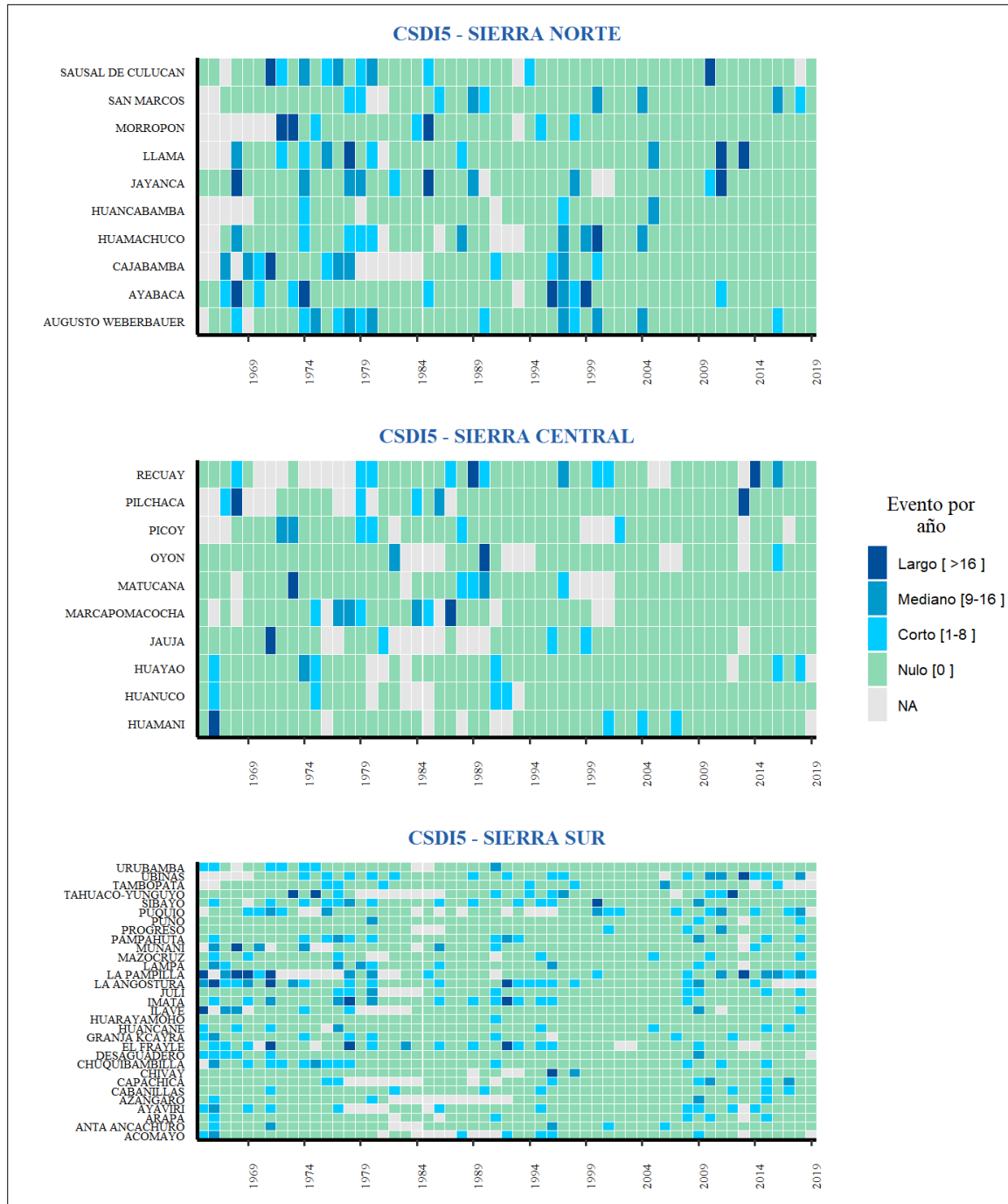


Figura 6: Serie de tiempo clasificada para el índice CSDI 5 para la región sierra

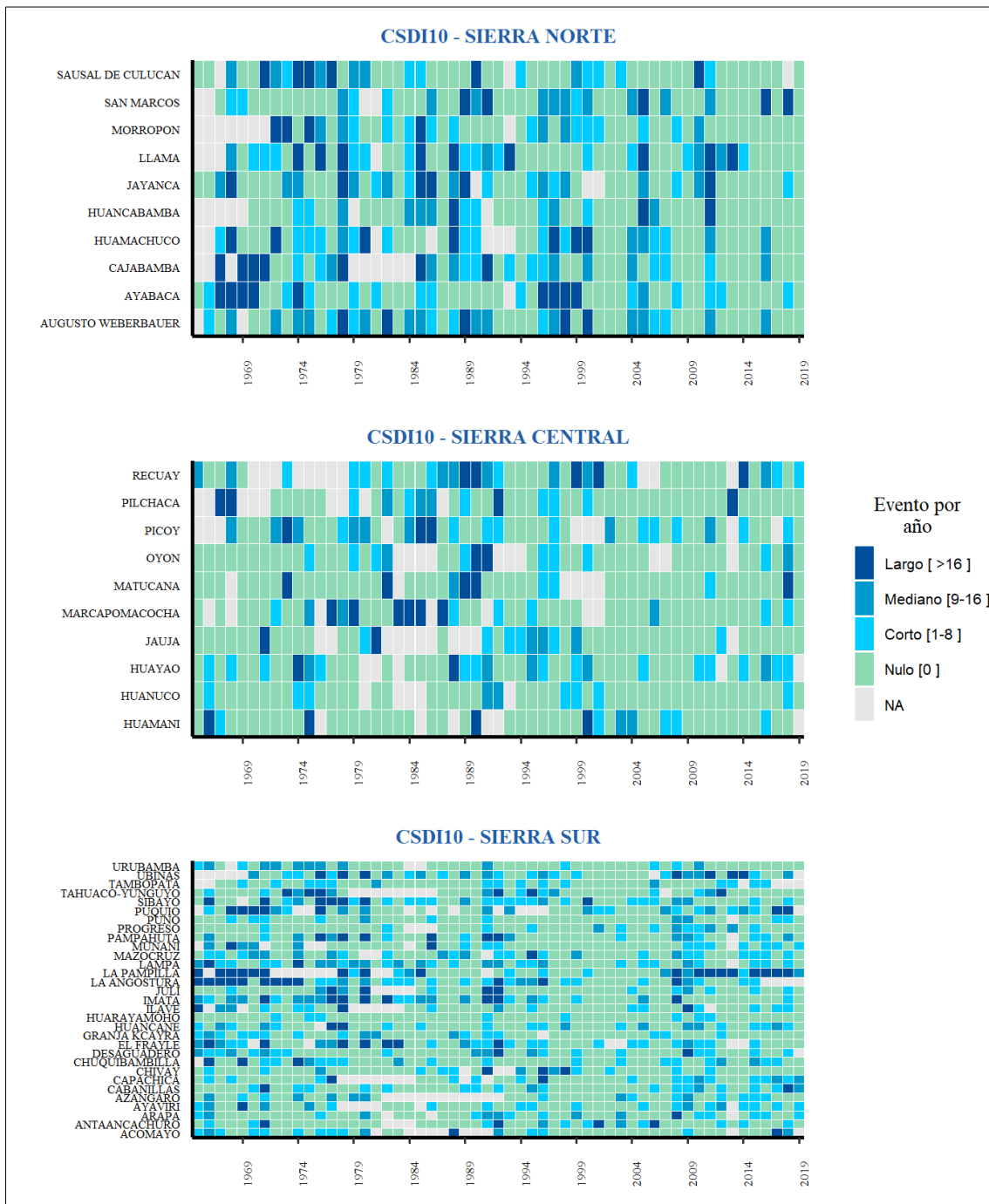


Figura 7: Serie de tiempo clasificada para el índice CSDI 10 para la región sierra

Los resultados obtenidos para el índice ECF, en específico el aspecto CWN, muestra que para las estaciones en costa (Figura 8) los eventos que se detectan tanto para el norte y el centro – sur tienen una frecuencia de entre 1 a 8 eventos anuales (evento corto), y en fechas muy puntuales 8 a 16 eventos por año (evento mediano), asimismo en las pocas estaciones

de la selva (Figura 9) la frecuencia es de 1 a 8 eventos por año y de igual forma en la sierra (Figura 10) que contiene la mayor cantidad de estaciones se observa que la frecuencia de eventos que se presenta es igual a las otras regiones de 1 a 8 eventos por años, y de forma específica en la sierra norte y centro algunas estaciones en fechas muy puntuales presentan eventos de 8 a 16 por año.

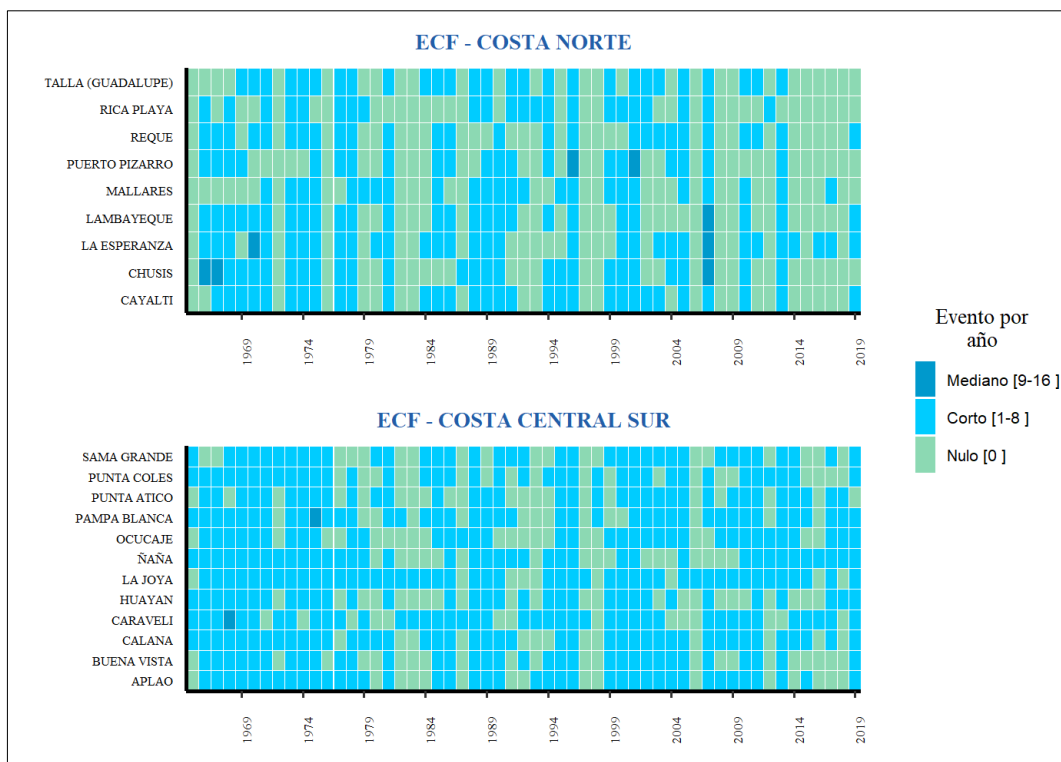


Figura 8: Serie de tiempo clasificada para el índice ECF para la región costa

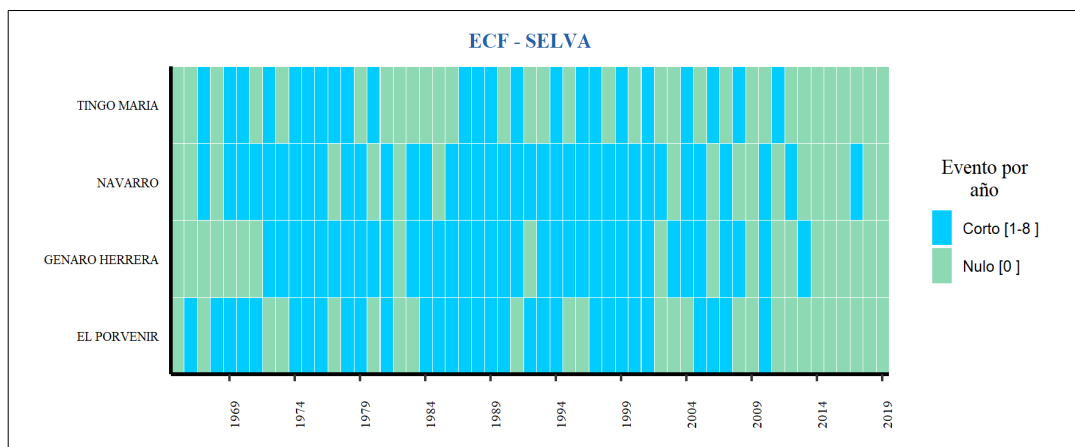


Figura 9: Serie de tiempo clasificada para el índice ECF para la región selva

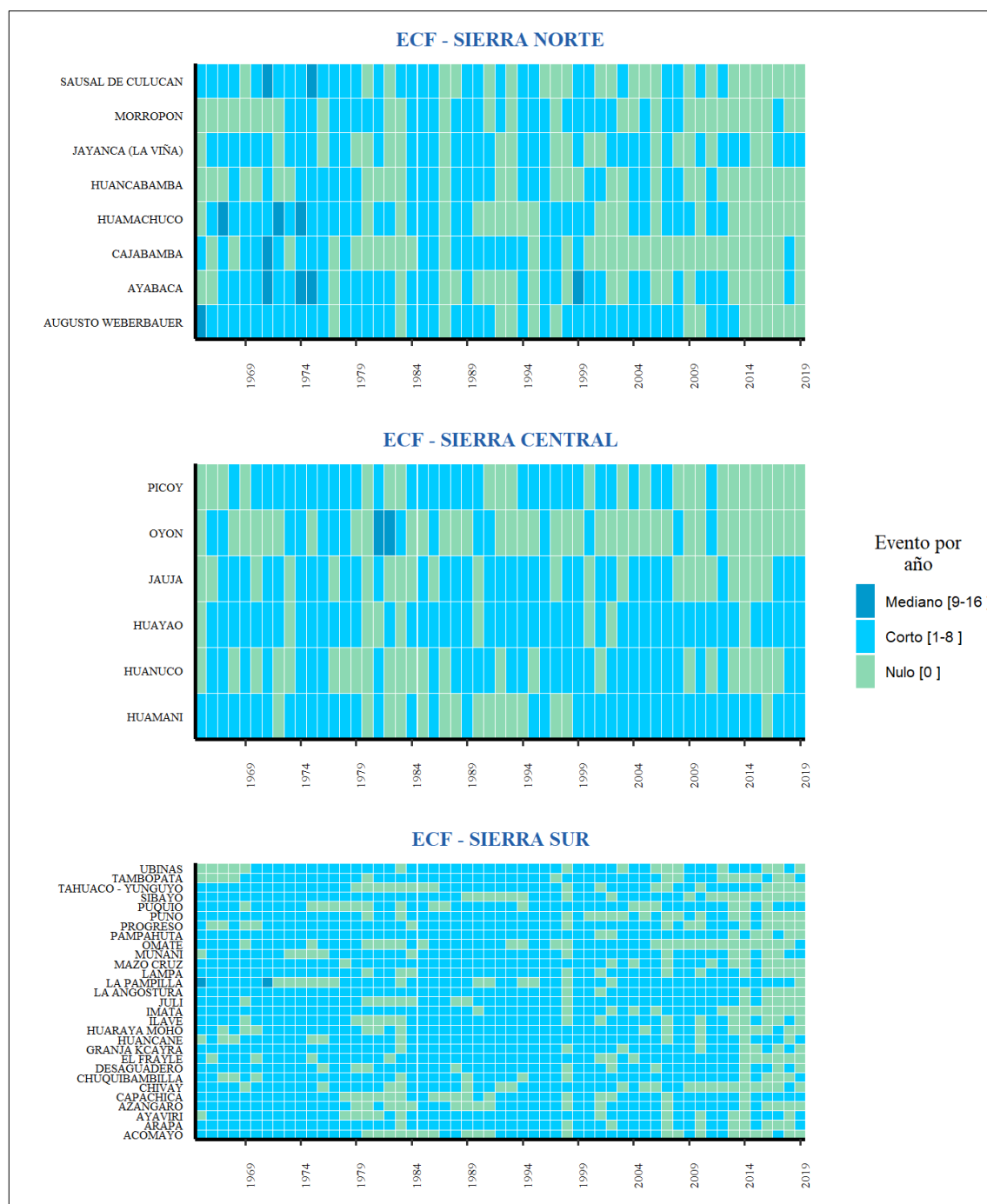


Figura 10. Serie de tiempo clasificada para el índice ECF para la región sierra

De forma general en la Tabla 6 se presentan la frecuencia con que se presentaron los eventos en cada uno de las regiones para cada índice calculado

Tabla 6: Frecuencia de eventos presentados por Región

	Costa Norte	Costa Centro Sur	Sierra Norte	Sierra Sur	Sierra Central	Selva
CSDI 5	23.2 %	18 %	14.5 %	30.3 %	8.3 %	5.7 %
CSDI 10	21 %	17.4 %	15 %	32.9 %	9.2 %	4.6 %
ECF	12.4 %	19 %	11.8 %	46.3 %	7 %	3.6 %

Para el cálculo de tendencias climáticas anuales de los índices CSDI y ECF para el periodo 1965 – 2019.

En la Tabla 7 se muestra los valores calculados de tendencias para el periodo anual para los índices CSDI 5 y CSDI 10, teniendo en cuenta los parámetros utilizados para su cálculo especificados en la metodología (Tabla 4), obteniéndose para el periodo anual valores de tendencia para las mismas 75 estaciones con la cual se obtuvo el valor de su índice, donde sus unidades serán representadas como días/década. Asimismo, se ha representado la significancia estadística en cada uno de los valores de tendencia a través de la coloración en el valor obtenido, es decir los valores con una coloración roja es para dato significativo ($p\text{-value} \leq 0.05$) y color negro para dato no significativo ($p\text{-value} > 0.05$). En esta misma tabla, los resultados de tendencias muestran de forma general que la mayoría de las estaciones meteorológicas presentan valor de tendencia cero, es decir que la tasa de cambio tanto para el índice CSDI 5 y CSDI 10 es nulo durante el periodo de estudio seleccionado. Por otro lado, entre aquellas estaciones meteorológicas que presentan valor de tendencia diferentes de cero se pueden resaltar: Aplao (-1.25 día/década), Cayalti (-1.82 día/década), Cajabamba (-2.5 día/década), La angostura (-2.86 día/década), Imata (-1.03 día/década) y El fraile (-0.48 día/década) para el índice CSDI 10 y todas con tendencia negativa, mientras que para el índice CSDI 5 todas las estaciones analizadas presentan valor nulo.

Tabla 7: Tendencias anuales de 1965 a 2019 para el índice CSDI 5 y CSDI 10

Estación	Región	CSDI 5	CSDI 10
		Tendencia (día/década)	Tendencia (día/década)
Buena vista	Costa central sur	0	0
Huayán	Costa central sur	0	0
Ocucaje	Costa central sur	0	0
Caraveli	Costa central sur	0	0
La joya	Costa central sur	0	0
Calana	Costa central sur	0	0
Aplao	Costa central sur	0	-1.25
Pampa blanca	Costa central sur	0	0
Punta coles	Costa central sur	0	0
Sama grande	Costa central sur	0	0
Rica playa	Costa norte	0	0
Puerto Pizarro	Costa norte	0	0
Mallares	Costa norte	0	0
La esperanza	Costa norte	0	0
Chusis	Costa norte	0	0
Lambayeque	Costa norte	0	0
Cayalti	Costa norte	0	-1.82
Talla (Guadalupe)	Costa norte	0	0
Reque	Costa norte	0	0
Genaro herrera	Selva	0	0
El porvenir	Selva	0	0
Rioja	Selva	0	0
Navarro	Selva	0	0
Tingo María	Selva	0	0
Huánuco	Sierra central	0	0
Recuay	Sierra central	0	0
Jauja	Sierra central	0	0
Oyón	Sierra central	0	0
Picoy	Sierra central	0	0
Matucana	Sierra central	0	0
Marcapomacocha	Sierra central	0	0
Huayao	Sierra central	0	0
Huamani	Sierra central	0	0
Pilchaca	Sierra central	0	0
Morropón	Sierra norte	0	0
Ayabaca	Sierra norte	0	0
Sausal de Culucán	Sierra norte	0	0
Huancabamba	Sierra norte	0	0
Augusto Weberbauer	Sierra norte	0	0
Jayanca	Sierra norte	0	0
Llama	Sierra norte	0	0
San marcos	Sierra norte	0	0

continuación ...

Cajabamba	Sierra norte	0	-2.5
Huamachuco	Sierra norte	0	0
Granja kcayra	Sierra sur	0	0
Urubamba	Sierra sur	0	0
Anta ancachuro	Sierra sur	0	0
Acomayo	Sierra sur	0	0
Puno	Sierra sur	0	0
Puquio	Sierra sur	0	0
La angostura	Sierra sur	0	-2.86
Sibayo	Sierra sur	0	0
Chivay	Sierra sur	0	0
Pampahuta	Sierra sur	0	0
Chuquibambilla	Sierra sur	0	0
Imata	Sierra sur	0	-1.03
Ayaviri	Sierra sur	0	0
Progreso	Sierra sur	0	0
Lampa	Sierra sur	0	0
Cabanillas	Sierra sur	0	0
Azangaro	Sierra sur	0	0
Arapa	Sierra sur	0	0
Muñani	Sierra sur	0	0
Huancané	Sierra sur	0	0
Huaraya moho	Sierra sur	0	0
Capachica	Sierra sur	0	0
Tambopata	Sierra sur	0	0
La pampilla	Sierra sur	0	0
El frayle	Sierra sur	0	-0.48
Ubinas	Sierra sur	0	0
Mazo cruz	Sierra sur	0	0
Ilave	Sierra sur	0	0
Juli	Sierra sur	0	0
Tahuaco - Yunguyo	Sierra sur	0	0
Desaguadero	Sierra sur	0	0

En la Tabla 8 se muestran las tendencias para las distintas estaciones para el aspecto CWN del índice ECF, una columna de nombre “Tendencia”, representa la magnitud de la tendencia del índice, asimismo dentro de la columna se representa la significancia obtenida de la prueba de Mann-Kendall por medio de coloración en los números, donde se le asignó un color rojo al valor para dato significativo ($p\text{-value} \leq 0.05$) y color negro para no significativo ($p\text{-value} > 0.05$); por otra parte la columna de nombre “Acumulado” presenta la sumatoria

anual del número de eventos de Olas de Frío para el periodo de estudio (1965 – 2019) en cada una de las estaciones analizadas. En la tabla se observa que la tendencia presenta valores diferentes de cero en una gran cantidad de estaciones meteorológicas, varias con valores significantes y tendencias negativas que oscilan de entre -0.2 a -0.7 eventos/década, además la mayor cantidad de eventos de olas de frío se presentan en la región sierra (más de 100 eventos promedios en todo el periodo), y los menores eventos en la región selva (en promedio 60 en todo el periodo).

Tabla 8: Tendencias anuales de 1965 a 2019 para el aspecto CWN del índice ECF

Estación	Región	Tendencia (evento/década)	Acumulado
Buena vista	Costa central sur	0	99
Huayán	Costa central sur	0	87
Ñaña	Costa central sur	0	116
Ocucaje	Costa central sur	0	97
Caraveli	Costa central sur	0	97
La joya	Costa central sur	0	113
Calana	Costa central sur	-0.4	118
Punta atico	Costa central sur	0	95
Aplao	Costa central sur	-0.3	116
Pampa blanca	Costa central sur	0	114
Punta coles	Costa central sur	-0.2	100
Sama grande	Costa central sur	0	110
Rica playa	Costa norte	0	63
Puerto Pizarro	Costa norte	0	85
Mallares	Costa norte	0	73
La esperanza	Costa norte	0	124
Chusis	Costa norte	0	108
Lambayeque	Costa norte	0	94
Cayalti	Costa norte	0	88
Talla (Guadalupe)	Costa norte	0	87
Reque	Costa norte	0	99
Genaro herrera	Selva	0	83
El porvenir	Selva	0	59
Navarro	Selva	0	63
Tingo María	Selva	0	33
Huánuco	Sierra central	0	54
Jauja	Sierra central	0	80
Oyón	Sierra central	0	50
Picoy	Sierra central	0	67
Huayao	Sierra central	0	109
Huamani	Sierra central	0	105

continuación ...

Morropón	Sierra norte	0	80
Ayabaca	Sierra norte	-0.5	114
Sausal de Culucán	Sierra norte	-0.4	108
Huancabamba	Sierra norte	0	51
Augusto Weberbauer	Sierra norte	-0.7	123
Jayanca	Sierra norte	0	112
Cajabamba	Sierra norte	0	70
Huamachuco	Sierra norte	-0.8	122
Granja kcayra	Sierra sur	-0.6	126
Acomayo	Sierra sur	0	88
Puno	Sierra sur	-0.6	106
Puquio	Sierra sur	0	87
La angostura	Sierra sur	-0.8	139
Sibayo	Sierra sur	-0.6	103
Chivay	Sierra sur	-0.3	92
Pampahuta	Sierra sur	-0.6	139
Chuquibambilla	Sierra sur	0	101
Imata	Sierra sur	-0.7	117
Ayaviri	Sierra sur	0	117
Progreso	Sierra sur	0	97
Lampa	Sierra sur	-0.3	101
Azangaro	Sierra sur	-0.2	90
Arapa	Sierra sur	-0.3	113
Muñani	Sierra sur	0	95
Huancané	Sierra sur	0	101
Huaraya moho	Sierra sur	0	98
Capachica	Sierra sur	0	124
Tambopata	Sierra sur	0	102
La pampilla	Sierra sur	0	137
El frayle	Sierra sur	-0.4	109
Omate	Sierra sur	-0.3	74
Ubinas	Sierra sur	0	101
Mazo cruz	Sierra sur	-0.3	105
Ilave	Sierra sur	-0.3	111
Juli	Sierra sur	0	89
Tahuaco - Yunguyo	Sierra sur	-0.3	101
Desaguadero	Sierra sur	0	106

Por otro lado la Figura 11 y la Figura 12, muestran la distribución espacial de los valores de tendencia para los índices CSDI 5 y CSDI 10 respectivamente, donde la magnitud de la tendencia ha sido representada en una rampa de colores, además para denotar si la tendencia

es ascendente (positiva) o descendente(negativa) se presentó por la forma de triángulo con dirección hacia arriba (Δ) que señala una tendencia positiva y dirección hacia abajo que señala una tendencia negativa (∇); además el borde de color negro en los triángulos representa un valor de tendencia no significativa y el borde de color rojo representa un valor de tendencia significativa ($p\text{-valor} \leq 0.05$). En estas figuras se observa claramente que predomina en todo el país las magnitudes de tendencia cero para los datos del periodo anual, no obstante teniendo en cuenta lo mencionado por Borse y Agnihotri (2020), quienes señalan que un valor de Zmk positivo indica un aumento de tendencia y por el contrario un valor negativo de Zmk indica un descenso de tendencia, se puede observar que a nivel nacional se presentan descensos en la tendencia en aproximadamente más del 70% de estaciones meteorológicas para ambos índices.

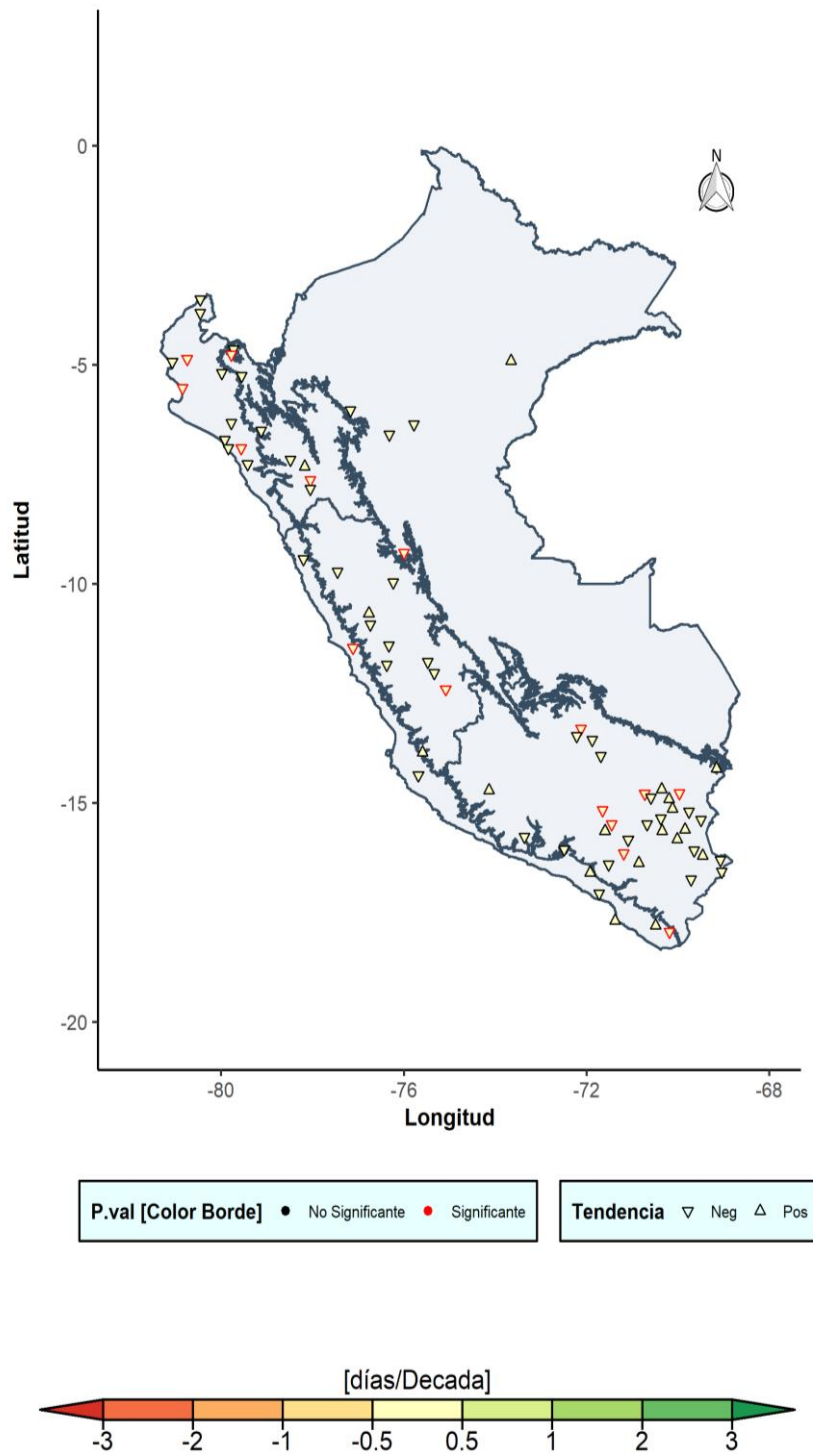


Figura 11: Distribución espacial de la tendencia anual del CSDI 5 para el periodo 1965 – 2019

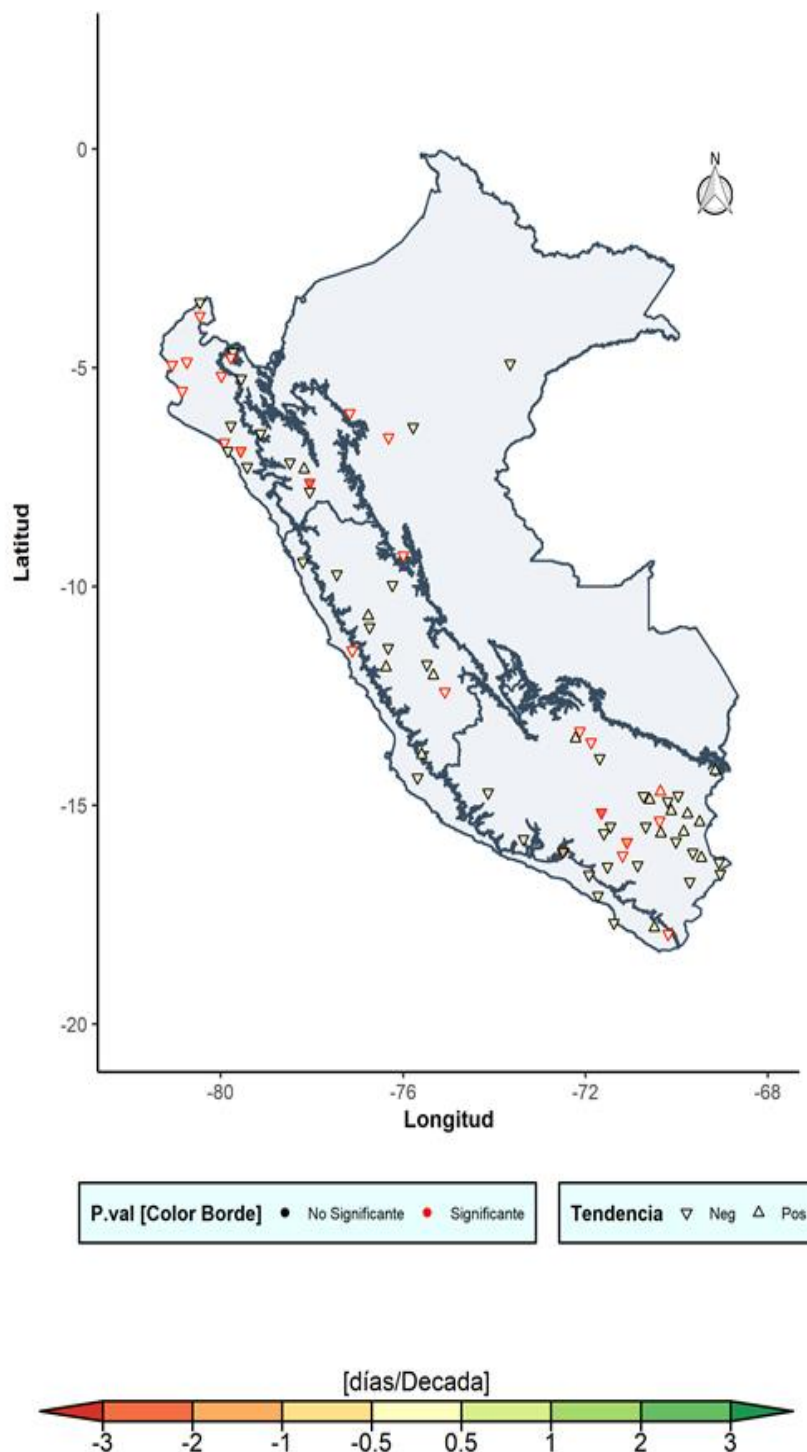


Figura 12: Distribución espacial de la tendencia anual del CSDI 10 para el periodo 1965 – 2019

Finalmente, en la Figura 13 se muestra la distribución espacial de la cantidad de eventos acumulados de Olas de Frío, donde se puede observar que los sectores de la sierra sur y costa norte presentan la mayor cantidad de eventos acumulados (mayores a 80) durante el periodo

de estudio, mientras que la sierra centro y costa centro – sur presentan entre 40 a 80 eventos acumulados de olas de frío.

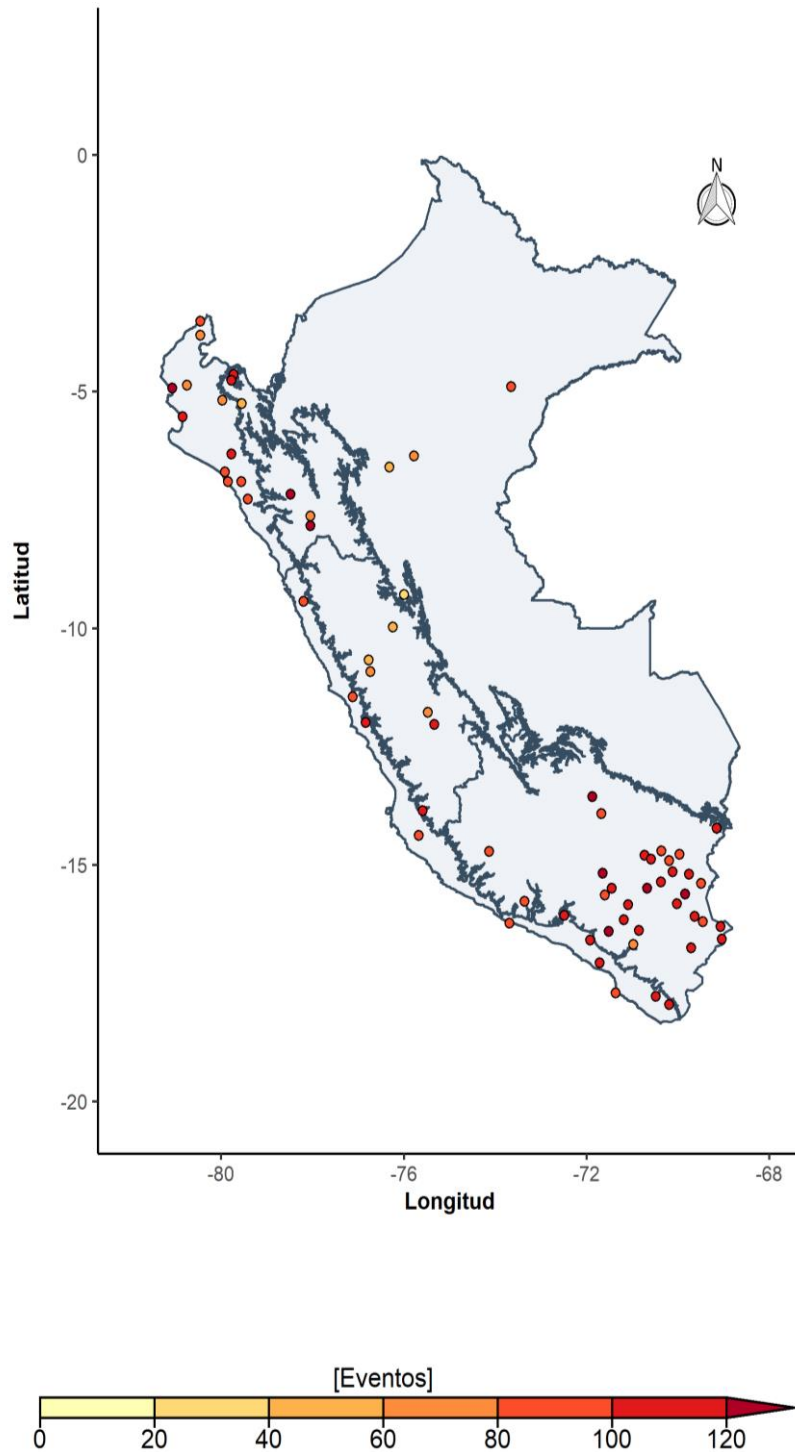


Figura 13: Distribución espacial del número de eventos de olas de frío del índice ECF para el periodo 1965 – 2019

La Figura 14 muestra la distribución espacial de las magnitudes de tendencia del aspecto CWN del índice ECF para el periodo 1965 al 2019, la cual resalta que la magnitud de la tendencia del índice es significativa en la sierra sur, sierra norte y costa norte con valores que oscilan entre -1 a -0.1, y que además poseen tendencia descendente.

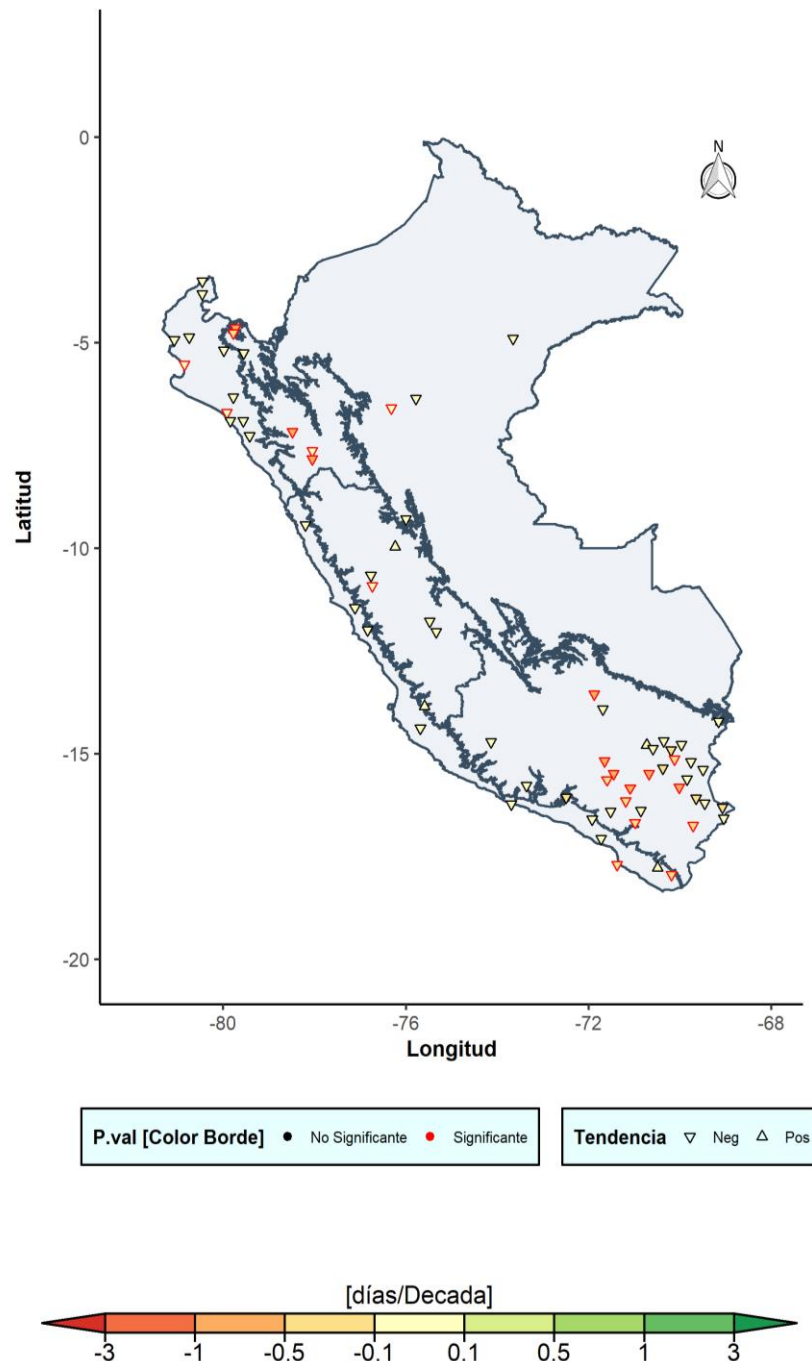


Figura 14: Distribución espacial de tendencia del índice ECF para el periodo 1965 – 2019

c) Algunas propuestas laborales que pueden contribuir a mejorar los resultados:

Realizar estudios en la SMN que correlacionen los resultados obtenidos para los índices aplicados a olas de frío con la temperatura del suelo o algún indicador de condición de la vegetación obtenido de una serie histórica de imágenes satelitales.

Desarrollar un aplicativo web interactivo que permita la visualización de los resultados obtenidos en el estudio para las estaciones convencionales con el fin de propagar la información a más usuarios, investigadores y tomadores de decisiones que trabajan en cambio climático y tópicos afines.

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS E IMPACTOS

Con el desarrollo del estudio se logró cumplir con los objetivos que se detallan a continuación:

- a) Calcular los índices de extremos climáticos Cold Spell Duration Index (CSDI) y el índice Excess Cold Factor (ECF) para la región Norte, Centro y Sur del Perú; los cuales según los resultados mostrados en la anterior sección el CSDI 10 presentó mayor detección de eventos por año de olas de frío a comparación del CSDI 5, lo que recalca la importancia del umbral que se escoge como manifiesta WMO (2015) al referirse a eventos climáticos extremos, además, la Sierra presentó el mayor número de eventos de olas de frío, seguido de la Costa y Selva. Vale recalcar que según lo analizado la frecuencia de olas de frío en la Sierra fue continua, mientras en la Costa solo en un periodo histórico se dio esta frecuencia continua de olas de frío y en la selva se caracterizó por la alta presencia de eventos nulos, adicionalmente, los resultados del índice ECF(en específico el aspecto CWN), mostraron que predomina la presencia de eventos cortos (1 a 8 eventos por año) de Olas de frío en todo el Perú y solo de manera puntual y muy poco frecuente para Costa y Sierra se observó eventos medianos (8 a 16 eventos por año), recalcando así que esto no es usual según lo observado históricamente.
- b) Calcular la tendencia para los índices CSDI y ECF en las estaciones meteorológicas del Perú; donde según los resultados, la tasa de cambio es nula para la mayoría de estaciones, es decir sin tendencia al incremento o disminución, sin embargo, seis estaciones (de las 75) mostraron tendencia de disminución en el índice CSDI 10, en contraste, la tendencia en el índice ECF si mostró tendencia de disminución en más de 20 estaciones, la mayoría de estas significativas y concentradas en Sierra sur, sierra norte y costa norte, por lo que se puede ver en general que existe una tendencia al descenso en los eventos de olas de frío, esto concuerda con los efectos de cambio climático, donde se proyecta a que habrá cada vez menos olas de frío y mayor cantidad de olas de calor (Alemu y Dioha, 2020).

Por consiguiente, el logro de objetivos permitió cumplir con la meta establecida, sin embargo, se detectaron en este proceso ciertas limitaciones como fue la recopilación de datos inicial para su procesamiento y el tiempo que esto demandó al verificar en planillas, este fue una parte de trabajo manual que requirió horas y concentración, por lo que en posteriores estudios se sugiere sean desarrollados por más de un consultor, otra limitación que se tiene es la baja cantidad de estaciones meteorológicas en selva lo que permite un análisis más escueto en comparación a lo observado en Costa y Sierra, por último se detectó que existen a nivel internacional pocos estudios que inciden en olas de frío, en su mayoría se concentran en olas de calor, y aún más en inglés, por lo que los estudios publicados en español son pocos frecuentes.

En lo que respecta a los recursos humanos, materiales y económicos, se puede determinar que el recurso humano no fue suficiente, por cómo se manifestó hubo etapas que requería gran cantidad de tiempo para una sola persona y la carga fue intensa, en lo material el equipo y software brindados si fueron suficientes y por el lado de los recursos económicos fueron insuficientes al no poder contratar a un consultor adicional para realizar el estudio por al menos dos personas.

Los principales beneficios obtenidos con el desarrollo y culminación del estudio fueron de carácter social y económico, dado que la generación de esta nueva información histórica de olas de frío promueve la investigación y apoyo financiero a estudios de eventos de extremos climáticos, así como brindar información para un público que va desde investigadores hasta tomadores de decisiones, incluso esta información es de vital importancia para evitar pérdida económicas en la producción de cultivos, localizar geográficamente las regiones que están sometidas a estas olas de frío con mayor frecuencia y en base a ello desarrollar planes de contingencia para evitar la afectación de la salud en la población, así como pérdidas en determinadas actividades socioeconómicas. El principal beneficio económico fue el apoyo financiero que se logró capturar por parte del sector privado para continuar con estudios de eventos extremos climáticos próximamente. Además, el desarrollo del estudio permitió obtener conocimientos relevantes como parte de la experiencia profesional en: analítica de datos, mapeo de patrones espaciales, incremento en habilidades de programación, revisión y búsqueda bibliográfica en diferentes bases de datos, redacción de contenidos, planeamiento de actividades y gestión del tiempo.

En la instrucción recibida durante la etapa de estudiante en la Carrera de Meteorología recibí cursos fundamentales que priorizaban la práctica tales como técnicas de programación, estadística, sistemas de información geográfica, redacción técnica además de los cursos propios de la carrera, esta instrucción recibida me permitió realizar actividades profesionales como el desarrollo de informes técnicos, implementación y desarrollo de estudios de investigación en variabilidad climática y cambio climático, pronósticos meteorológicos y agrometeorológicos, capacitación a usuarios de información climática, diseño de fichas climáticas históricas, entre otros. Es decir, la instrucción recibida en la carrera si fue de suma utilidad para mi desarrollo profesional, sin embargo, las tecnologías avanzan de forma vertiginosa y mi experiencia profesional me ha permitido detectar nuevas habilidades que se necesitan para contribuir en el desarrollo de la meteorología en el Perú. En la actualidad los datos son el mayor capital con el que cuentan las instituciones y la realización de análisis exhaustivos permite generar información que posteriormente se transforma en conocimiento, por lo que una propuesta de contenidos para potenciar las capacidades de los futuros meteorólogos podría basarse en:

- Técnicas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo para estudios climáticos.
- Ciencia de datos orientados al cambio climático.
- Sensoramiento remoto del cambio climático.
- Técnicas para el desarrollo de escenarios climáticos.
- Meteorología de radar
- Meteorología tropical.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, se resume las principales conclusiones del estudio con respecto a los objetivos:

- a) Respecto a los cálculos de los índices Cold Spell Duration Index (CSDI) y Excess Cold Factor (ECF):
 - Entre los índices CSDI 5 y CSDI 10, este último fue el que mostró un mayor desempeño para la detección de eventos de olas de frío.
 - Según el índice ECF los eventos de olas de frío en el Perú son considerados como eventos cortos (1 – 8 días), de manera inusual se generan eventos medianos (9 – 16 días) de olas de frío.
 - Las olas de frío suceden con mayor frecuencia en la Sierra Sur (mayor a 30%), luego en la costa (entre 12% a 20 %) y muy esporádicamente en la Selva (menos del 8 %).
- b) Respecto a las tendencias de los índices Cold Spell Duration Index (CSDI) y Excess Cold Factor (ECF) calculados:
 - En la mayoría de estaciones meteorológicas analizadas, la magnitud de la tendencia del periodo 1965 a 2019 de los índices CSDI 5 y CSDI 10 utilizados es nula.
 - Las tendencias en el índice ECF es nula en la mayoría de casos y negativa en otros, manifestando así una tendencia al descenso en estos eventos de olas de frío.

Finalmente, a modo de recomendación se puede mencionar que es necesario que se comparen más índices/indicadores de olas de frío en otros estudios, así como otras pruebas estadísticas y que pueda relacionarse la ocurrencia de estos eventos de olas de frío con indicadores de condición del suelo y/o vegetación a fin de ampliar el conocimiento sobre el efecto de las olas de frío en los ecosistemas.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, E. (2012). *Control de Calidad con AndesQC*.
http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&id=180&lang=es
- Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T. C., & Wieringa, J. (2003). Guidelines on Climate Metadata and Homogenization. *World Meteorological Organization*, 1186.
- Alemu, Z. A., & Dioha, M. O. (2020). Climate change and trend analysis of temperature: the case of Addis Ababa, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 9(1).
<https://doi.org/10.1186/s40068-020-00190-5>
- Alexander, L., & Herold, N. (2016). *ClimPACT2: Indices and Software* (Issue February).
- Ali, R. O., & Abubaker, S. R. (2019). Trend analysis using mann-kendall , sen ' s slope estimator test and innovative trend analysis method in Yangtze river basin , china : review. *International Journal of Engineering & Technology*, 8(2), 110–119.
- Añel, J. A., Fernández-González, M., Labandeira, X., López-Otero, X., & De la Torre, L. (2017). Impact of Cold Waves and Heat Waves on the Energy Production Sector. *Atmosphere*, 8(11), 1–13. <https://doi.org/10.3390/atmos8110209>
- Arya, D. S., & Murumkar, A. R. (2014). Trend and Periodicity Analysis in Rainfall Pattern of Nira Basin, Central India. *American Journal of Climate Change*, 03(01), 60–70.
<https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.31006>
- Basarir, A., Arman, H., Hussein, S., Murad, A., Aldahan, A., & Al-Abri, M. A. (2018). Trend detection in annual temperature and precipitation using mann–kendall test—a case study to assess climate change in Abu Dhabi, United Arab Emirates. In S. Fırat, J. Kinuthia, & A. Abu-Tair (Eds.), *Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017)* (Vol. 7, pp. 3–12). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64349-6_1
- Bayley, G. V., & Hammersley, J. M. (1946). The " Effective " Number of Independent Observations in an Autocorrelated Time Series. *Journal of the Royal Statistical Society*, 8(2), 184–197. <https://doi.org/10.2307/2983560>

- Borse, K., & Agnihotri, P. G. (2020). Trends of Rainfall, Temperature and Rice Yield of Nashik Region of Maharashtra. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(5), 395–398. <https://doi.org/10.35940/ijitee.e2276.039520>
- Ceccherini, G., Russo, S., Ameztoy, I., Patricia Romero, C., & Carmona-Moreno, C. (2016). Magnitude and frequency of heat and cold waves in recent decades: The case of South America. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(3), 821–831. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-821-2016>
- Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 349(3–4), 350–363. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009>
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1–4), 182–196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). Annex III: Glossary. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the fifth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change*. (pp. 186–202).
- Karmeshu, N. (2012). Trend Detection in Annual Temperature & Precipitation using the Mann Kendall Test – A Case Study to Assess Climate Change on Select States in the Northeastern United States (Ms Thesis). In *Scholarly Commons* (Vol. 8). http://repository.upenn.edu/mes_capstones/47
- Kumar, S. (2017). *Trends of Extreme Weather Events and Their Impact on Crops in Bihar*. 17(2), 224–229.
- Lavaysse, C., Naumann, G., Alfieri, L., Salamon, P., & Vogt, J. (2018). Predictability of the European heat and cold waves. *Climate Dynamics*, 52(3–4), 2481–2495. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4273-5>
- Mahdi, S. S., & Dhekale, B. S. (2016). Long term climatology and trends of heat and cold waves over southern Bihar, India. *Journal of Earth System Science*, 125(8), 1557–1567. <https://doi.org/10.1007/s12040-016-0762-2>
- Mahmood, R., Jia, S., & Zhu, W. (2019). Analysis of climate variability, trends, and prediction in the most active parts of the Lake Chad basin, Africa. *Scientific Reports*, 9(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42811-9>

- Malcheva, K. (2017). Cold waves on the territory of Bulgaria in the period 1952-2011. *Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology*, 22(3-4), 16-31.
- Marengo, J. A. (1983). Estudio agroclimático en la zona de Jenaro Herrera (Requena , Loreto) y climático en la Selva Baja Norte del Perú. *Revista Forestal Del Perú*, 12(1-2), 1-26.
https://www.researchgate.net/publication/285650896_Estudio_agroclimatico_en_la_zona_de_Jenaro_Herrera_Requena_Loreto_y_climatico_en_la_Selva_Baja_Norte_del_Peru
- Matthes, H., Rinke, A., & Dethloff, K. (2015). Recent changes in Arctic temperature extremes: Warm and cold spells during winter and summer. *Environmental Research Letters*, 10.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/114020>
- Mestre, O., Domonkos, P., Picard, F., Auer, I., Robin, S., Lebarbier, E., Böhm, R., Aguilar, E., Guijarro, J., Vertachnik, G., Klancar, M., Dubuisson, B., & Stepanek, P. (2013). HOMER: A homogenization software - methods and applications. *Idojaras*, 117(1), 47-67.
- Moberg, A., Jones, P. D., Lister, D., Walther, A., Brunet, M., Jacobeit, J., Alexander, L. V., Della-Marta, P. M., Luterbacher, J., Yiou, P., Chen, D., Tank, A. M. G. K., Saladié, O., Sigró, J., Aguilar, E., Alexandersson, H., Almarza, C., Auer, I., Barriendos, M., ... Xoplaki, E. (2006). Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901-2000. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(22).
<https://doi.org/10.1029/2006JD007103>
- Nairn, J., & Fawcett, R. (2013). Defining heatwaves: heatwave defined as a heat-impact event servicing all community and business sectors in Australia. In *CAWCR technical report* (Issue 60). <https://doi.org/551.5250994>
- Nairn, J., Fawcett, R., & Ray, D. (2009). Defining and predicting excessive heat events, a national system. *Understanding High Impact Weather, CAWCR Modelling Workshop*, 83-86.
- Perkins, S. E., & Alexander, L. V. (2013). On the Measurement of Heat Waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500-4517. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1>
- Sánchez, D. E. (2015). *Análisis espacial y temporal de las olas de frío en la Región de Murcia. Cartografía del riesgo de heladas en la Huerta de Murcia*. 1589-1597.
- Sedlmeier, K., Imfeld, N., Maurer, F., Gubler, S., Spirig, C., & Schwierz, C. (2018). ClimIndVis : an R package to generate climate indices products. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 1.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.2307/2285891>

- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2015). *IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS DE OLAS DE FRÍO EXTREMAS EN LA AMAZONIA PERUANA*.
- Song, X., Du, L., Tian, X., & Xue, M. (2019). Characteristics of Cold Wave Action in Handan of Hebei Province from 1976 to 2016. *Arid Meteorology*, 37(5), 754–761.
- Spinoni, J., Lakatos, M., Szentimrey, T., Bihari, Z., Szalai, S., Vogt, J., & Antofie, T. (2015). Heat and cold waves trends in the Carpathian Region from 1961 to 2010. *International Journal of Climatology*, 35(14), 4197–4209. <https://doi.org/10.1002/joc.4279>
- Tank Klein, A., Zwiers, F., & Zhang, X. (2009). Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. In *World Meteorological Organization* (Issue WCDMP-No. 72). File Attachment
- Task Team on the Definition of Extreme Weather and Climate Events, & World Meteorological Organization. (2018). *Guidelines on the Definition and Monitoring of Extreme Weather and Climate Events: Final Draft*.
- Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M., & Challinor, A. J. (2014). Climate variability and vulnerability to climate change: A review. *Global Change Biology*, 20(11), 3313–3328. <https://doi.org/10.1111/gcb.12581>
- Tomczyk, A. M., Pólrólniczak, M., & Kolendowicz, L. (2018). Cold Waves in Poznań (Poland) and Thermal conditions in the City during Selected cold waves. *Atmosphere*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/atmos9060208>
- U.S. Department of Energy. (2014). *Visual Sample Plan Version 7.0 User's Guide*. https://vsp.pnnl.gov/help/Vsample/Design_Trend_Mann_Kendall.htm
- Von Storch, H. (1999). Misuses of Statistical Analysis in Climate Research. In H. von Storch & A. Navarra (Eds.), *Analysis of Climate Variability* (pp. 11–16). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-662-03744-7_2
- Vousoughi, F. D., Dinpashoh, Y., Aalami, M. T., & Jhajharia, D. (2012). Trend analysis of groundwater using non-parametric methods (case study: Ardabil plain). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(2), 547–559. <https://doi.org/10.1007/s00477-012-0599-4>
- World Meteorological Organization. (2015). *Guidelines on the Definition and Monitoring of Extreme Weather and Climate Events: First Review*. <https://doi.org/10.1109/CSCI.2015.171>
- World Meteorological Organization. (2018). *Guía de prácticas climatológicas* (2018th ed., Issue

- 153). World Meteorological Organization.
- Yin, H., & Sun, Y. (2018). Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCCDI indices. *Advances in Climate Change Research*, 9(4), 218–226. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2019.01.001>
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., & Cavadias, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, 16(9), 1807–1829. <https://doi.org/10.1002/hyp.1095>
- Yue, S., & Wang, C. Y. (2002). Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water Resources Research*, 38(6), 4-1-4–7. <https://doi.org/10.1029/2001wr000861>
- Yue, S., & Wang, C. Y. (2004). The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resources Management*, 18(3), 201–218. <https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000043140.61082.60>
- Zhang, X., Harvey, K. D., Hogg, W. D., & Yuzyk, T. R. (2001). Trends in Canadian streamflow. *Water Resources Research*, 37(4), 987–998. <https://doi.org/10.1029/2000WR900357>
- Zhang, X., Hegerl, G., Zwiers, F. W., & Kenyon, J. (2005). Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes. *Journal of Climate*, 18(11), 1641–1651. <https://doi.org/10.1175/JCLI3366.1>

IX. ANEXOS

Anexo 1: Errores no sistemáticos encontrados en el control de calidad

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	PERIODO DE OBSERVACIÓN			BASE DE DATOS			FLAGS (errores)	VALOR CORRECTO		
	Año	Mes	Día	tmax	tmin	rr		tmax	tmin	rr
Morropón	2014	5	3	3	22	-	Tmax>Tmin	32		
Morropón	2014	5	19	33.8	203	-	Tmax>Tmin		20.3	
Sausal de Culucán	2014	1	1	128.3	18.1	-	FL tmax tmin	28.3		
Tabaconas	2014	4	5	2	15	-	Tmax>Tmin	20		
San Miguel	2014	1	27	342	21.7	-	FL tmax tmin	34.2		
San Miguel	2014	4	15	344	20.6	-	FL tmax tmin	34.2		
Huarmaca	2014	6	17	212	13.2	-	FL tmax tmin	21.2		
Lancones	2014	4	20	3	21.6	-	Tmax>Tmin	33		
Chalaco	2014	6	1	19.3	19.5	-	Tmax>Tmin		9.5	
PacayPampa	2014	4	15	7	11.8	-	Tmax>Tmin	27		
Sondorillo	2015	12	22	265	15.5	-	FL tmax tmin	26.5		
Cayalti	2014	2	20	29.4	212	-	Tmax>Tmin		21.2	
Cayalti	2014	2	27	3.2	22.2	-	Tmax>Tmin	33.2		
Talla (Guadalupe)	2014	1	1	19.2	20	-	Tmax>Tmin	29.2		
Talla (Guadalupe)	2014	7	31	254	15.4	-	FL tmax tmin	25.4		
Cutervo	2014	2	22	174.6	11	-	FL tmax tmin	17.6		
Augusto Weberbauer	2014	2	23	22	124	-	Tmax>Tmin		12.4	
Augusto Weberbauer	2014	4	17	212	6.9	-	FL tmax tmin	21.2		
Namora	2014	5	23	1.2	10.8	-	Tmax>Tmin	17.2		
San Marcos	2017	6	3	5.6	9.4	-	Tmax>tmin	25.6		
Cajabamba	2016	10	8	27.1	87.6	-	Tmax>Tmin			
Magdalena	2016	12	23	253.1	17	-	FL tmax tmin	23.1		
Callancas	2015	10	25	283	16	-	FL tmax tmin	28.3		
Callancas	2016	6	20	2	14.8	-	Tmax>Tmin	27		
Callancas	2016	6	22	6.6	15	-	Tmax>Tmin	26.6		
Cachicadán	2017	1	5	2.6	7	-	Tmax>Tmin	20.6		
Cachicadán	2017	1	6	2.4	6.7	-	Tmax>Tmin	20.4		
Huamani	2014	7	20	12	25	-	Tmax>Tmin	25	12	
Huamani	2015	9	14	3.1	14.6	-	Tmax>Tmin	30.1		

continuación ...

Hacienda Bernales	2014	5	5	3	15.4	-	Tmax>Tmin	23		
Hacienda Bernales	2016	11	10	27.8	158.4	-	Tmax>Tmin		-99.9	
Rio grande	2014	1	4	34	185.8	-	Tmax>Tmin		18.8	
Ocucaje	2014	1	18	374.4	19.6	-	FL tmax tmin	37.4		
Puquio	2015	6	23	2.2	4.4	-	Tmax>Tmin	22.2		
Fonagro (chinchá)	2014	1	13	3.1	20.8	-	Tmax>Tmin	30.1		
Huac-huas	2014	1	9	10.6	74	-	Tmax>Tmin		7.4	
Tambo	2014	1	9	17.5	74.2	-	Tmax>Tmin		7.2	
Choclococha	2015	12	21	1.06	1.8	-	Tmax>Tmin			
Pampa blanca	2014	1	27	3.04	17	-	Tmax>Tmin	30.4		
Pampa blanca	2016	1	31	31	186	-	Tmax>Tmin		18.6	
Cotahuasi	2014	1	15	3.8	11	-	Tmax>Tmin	23.8		
Punta atico	2016	1	8	24.4	26	-	Tmax>Tmin		20	
Aplao	2014	3	14	3.4	17.2	-	Tmax>Tmin	30.4		
Pampa Blanca	2014	2	23	8.6	18.2	-	Tmax>Tmin	28.6		
Pampa Blanca	2016	3	12	30.8	32	-	Tmax>Tmin		22	
Chiguata	2014	3	21	214	4.8	-	FL tmax tmin	21.4		
Machahuay	2014	1	1	17.9	53	-	Tmax>Tmin		5.3	
Machahuay	2014	1	21	188	7.1	-	FL tmax tmin	18.8		
Machahuay	2014	2	18	2.1	5	-	Tmax>Tmin	20.1		
Machahuay	2014	2	19	2.1	7.6	-	Tmax>Tmin	20.1		
Pillones	2014	2	11	13	-48	-	FL tmax tmin		-4.8	
Moquegua	2015	3	24	24.5	26	-	Tmax>Tmin		-99.9	
Omate	2018	12	1	6.5	7.3	-	Tmax>Tmin	26.5		
Palca	2014	10	16	2.6	9.8	-	Tmax>Tmin	21.6		
Santa Clotilde	2014	1	7	3.5	22	-	Tmax>Tmin	30.5		
Maniti	2014	12	11	20.8	21.4	-	Tmax>Tmin		-99.9	
Maniti	2017	10	30	22.8	24.2	-	Tmax>Tmin	-99.9		
Rioja	2014	4	16	3.5	16.9	-	Tmax>Tmin	30.5		
Rioja	2014	4	27	9.5	19.4	-	Tmax>Tmin	29.5		
Navarro	2014	3	10	326	21.3	-	FL tmax tmin	32.6		
Campanilla	2014	3	14	32.7	203	-	Tmax>Tmin		20.3	
Pongo de Caynarachi	2014	1	3	316	21.5	-	FL tmax tmin	31.6		
Soritor	2014	4	16	3.6	17.8	-	Tmax>Tmin	30.6		
Jepelacio	2014	3	11	256	18.8	-	FL tmax tmin	25.6		
Pelejo	2014	4	13	3.6	22.6	-	Tmax>Tmin	33.6		
Huánuco	2014	2	11	213.7	15.8	-	FL tmax tmin	23.7		

continuación ...

El Maronal	2016	8	23	304	18.8	-	FL tmax tmin	30.4		
Jauja	2014	1	21	204	5.8	-	FL tmax tmin	20.4		
La Oroya	2018	10	27	4.6	5.6	-	Tmax>Tmin	14.6		
Ricrán	2014	3	9	12	55	-	Tmax>Tmin		5.5	
Curahuasi	2014	1	15	234	11.8	-	FL tmax tmin	23.4		
Curahuasi	2014	6	6	4.8	8.8	-	Tmax>Tmin	24.8		
Urubamba	2014	1	16	212	9	-	FL tmax tmin	21.2		
Urubamba	2014	4	22	215	8.5	-	FL tmax tmin	21.5		
Ccatcca	2018	1	23	1	5	-	Tmax>Tmin	14		
Colquepata	2014	1	15	1	5.5	-	Tmax>Tmin	16		
Colquepata	2014	4	4	16	35	-	Tmax>Tmin		3.5	
Cabanillas	2014	1	10	15.5	42	-	Tmax>Tmin		4.2	
Cabanillas	2014	1	18	145	5.2	-	FL tmax tmin	14.5		
Capachica	2014	1	5	4.6	5.4	-	Tmax>Tmin	14.6		
Tambopata	2014	1	27	29	214	-	Tmax>Tmin		21.4	
Isla Soto	2014	1	11	16.7	52	-	Tmax>Tmin		5.2	
Juli	2014	3	9	16.2	43.2	-	Tmax>Tmin		4.2	
Desaguadero	2014	1	13	1.5	5	-	Tmax>Tmin	15		
Putina	2016	1	6	48.4	1.8	-	FL tmax tmin	18.4		
Cuyo	2018	4	24	0	6	-	Tmax>Tmin	-99.9		

Anexo 2: Estaciones meteorológicas observadas y eliminadas

Cód. Estación	Temperatura Máxima		Temperatura Mínima		Observaciones
	Homogenizada	Real	Homogenizada	Real	
COSTA NORTE					
130	x		x		Se elimina los años de 1982 a 1986 de temperatura mínima por inconsistencia en su serie de tiempo
132	x		x		Se elimina los años 1970 a 1973 en la temperatura mínima y de 1972 a 1974 en la temperatura máxima, ambos presentan inhomogeneidad en su serie de tiempo
320	x		x		Observar los picos de temperatura cuando se tenga los resultados de los índices climáticos calculados.
COSTA SUR – CENTRO					
539	x		x		Se elimina el 2009 y 2010 en la temperatura mínima por inhomogeneidad en su serie.
833	x		x		Eliminar 1991 en temperatura mínima por inconsistencia en su serie.

continuación...

846	x			x	Observar los picos de temperatura cuando se tenga los resultados de los índices climáticos calculados.
875	x			x	Eliminar los años 1966 y 1967 de temperatura mínima por inconsistencia en la serie.
SELVA					
281	x			x	Se eliminar toda la serie de temperatura mínima, debido a que se observa un crecimiento exponencial en aproximadamente 30% en poco tiempo, y es muy inconsistente en su serie.
310	x			x	Eliminar el año 1977 de temperatura mínima debido a inhomogeneidad presentada.
386	x			x	Eliminar el año 1966 y 2018 de temperatura máxima, y el año 1965 de temperatura mínima.
SIERRA CENTRO					
503	x			x	Observar los años de 2001 a 2003 en los índices climáticos que usarán la temperatura máxima.
548	x			x	Eliminar de 1976 a 1984 en temperatura máxima, y de 1998 a 2001 en temperatura mínima, debido a la inhomogeneidad que se presenta.
549	x			x	Eliminar el año 1965 a 1983 en temperatura máxima, y el año 1986 en temperatura mínima por inconsistencia y presentar muchos datos faltantes.
635	x			x	Observar inicios de 1977 en temperatura máxima cuando se realice el análisis de índice climático basando en esta variable.
640	x			x	Eliminar el año 1991 de temperatura mínima, por un descenso brusco anómalo.
648	x			x	Eliminar de 1998 a 2013 en temperatura máxima debido a la inhomogeneidad en la serie, y observar el 2013 en temperatura mínima.
SIERRA NORTE					
235	x			x	Eliminar los años 1965 a 1900, 2001 y 2008 de temperatura máxima, y de 1000 965,971 en temperatura mínima.
237	x			x	Se elimina toda la estación, debido a que se presenta demasiadas inconsistencias tanto en las series de temperatura máxima y temperatura mínima para todo el registro histórico.
238	x			x	Observar el año 1971 en temperatura máxima, y el año 1971 y 2010 en temperatura mínima cuando se realice el análisis de índices climáticos.
341				x	Eliminar la temperatura máxima debido que presentan inhomogeneidad en varios puntos en su serie de tiempo.
370				x	Eliminar la temperatura máxima por presentar mucha inhomogeneidad en su serie de tiempo, y eliminar el año 1966 de temperatura mínima.
373	x			x	Eliminar de 1980 a 1984 en la temperatura máxima, y de 1979 a 1984 en la temperatura mínima, ello se debe a la inhomogeneidad que se presenta en su serie se tiene.
374	x			x	Eliminar el año 1965 en temperatura máxima y temperatura mínima.

continuación...

SIERRA SUR					
683	x		x		Eliminar de 1980 a 1986 en temperatura máxima.
684			x		Eliminar toda la temperatura máxima, debido a que se presenta mucha inconsistencia entre 1987 a 1993.
687	x		x		Eliminar el año 1989 en la temperatura mínima por presentar inhomogeneidad en su serie.
736	x		x		Eliminar el año 1986 en temperatura mínima por la presencia de inconsistencia en sus datos.
780		x		x	Eliminar los años de 1976 a 1986 en temperatura máxima por la presencia de inhomogeneidad en sus series.
785	x		x		Eliminar de 1973 a 1976 en temperatura máxima por la presencia de inhomogeneidad en sus datos.
790	x		x		Eliminar el año 2014 en temperatura mínima.
839	x		x		Eliminar de 1972 a 1977 en temperatura mínima debido a la inhomogeneidad en su serie de tiempo.

Anexo 3: Estaciones convencionales calculadas para los índices CSDI 5, CSDI 10 y CWN-ECF para un periodo anual

Estación	Región	Índices calculados
Buenvista	Costa central sur	CSDI-ECF
Huayán	Costa central sur	CSDI-ECF
Nana	Costa central sur	CSDI-ECF
Ocucaje	Costa central sur	CSDI-ECF
Caraveli	Costa central sur	CSDI-ECF
La joya	Costa central sur	CSDI-ECF
Calana	Costa central sur	CSDI-ECF
Punta atico	Costa central sur	CSDI-ECF
Aplao	Costa central sur	CSDI-ECF
Pampa Blanca	Costa central sur	CSDI-ECF
Puntacoles	Costa central sur	CSDI-ECF
Samagrande	Costa central sur	CSDI-ECF
Ricaplaya	Costa norte	CSDI-ECF
Puerto Pizarro	Costa norte	CSDI-ECF
Mallares	Costa norte	CSDI-ECF
La esperanza	Costa norte	CSDI-ECF
Chusis	Costa norte	CSDI-ECF
Lambayeque	Costa norte	CSDI-ECF
Cayalti	Costa norte	CSDI-ECF
Talla	Costa norte	CSDI-ECF
Reque	Costa norte	CSDI-ECF
Genaro herrera	Selva	CSDI-ECF
El porvenir	Selva	CSDI-ECF

continuación...

Rioja	Selva	CSDI
Navarro	Selva	CSDI-ECF
Tingo María	Selva	CSDI-ECF
Huánuco	Sierra central	CSDI-ECF
Recuay	Sierra central	CSDI
Jauja	Sierra central	CSDI-ECF
Oyón	Sierra central	CSDI-ECF
Picoy	Sierra central	CSDI-ECF
Matucana	Sierra central	CSDI
Marcapomacocha	Sierra central	CSDI
Huayao	Sierra central	CSDI-ECF
Huamani	Sierra central	CSDI-ECF
Pilchaca	Sierra central	CSDI
Morropón	Sierra norte	CSDI-ECF
Ayabaca	Sierra norte	CSDI-ECF
Sausal de Culucán	Sierra norte	CSDI-ECF
Huancabamba	Sierra norte	CSDI-ECF
Augusto Weberbauer	Sierra norte	CSDI-ECF
Jayanca	Sierra norte	CSDI-ECF
Llama	Sierra norte	CSDI
San marcos	Sierra norte	CSDI
Cajabamba	Sierra norte	CSDI-ECF
Huamachuco	Sierra norte	CSDI-ECF
Granja kcayra	Sierra sur	CSDI-ECF
Urubamba	Sierra sur	CSDI
Anta ancachuro	Sierra sur	CSDI
Acomayo	Sierra sur	CSDI-ECF
Puno	Sierra sur	CSDI-ECF
Puquio	Sierra sur	CSDI-ECF
La angostura	Sierra sur	CSDI-ECF
Sibayo	Sierra sur	CSDI-ECF
Chivay	Sierra sur	CSDI-ECF
Pampahuta	Sierra sur	CSDI-ECF
Chuquibambilla	Sierra sur	CSDI-ECF
Imata	Sierra sur	CSDI-ECF
Ayaviri	Sierra sur	CSDI-ECF
Progreso	Sierra sur	CSDI-ECF
Lampa	Sierra sur	CSDI-ECF
Cabanillas	Sierra sur	CSDI
Azangaro	Sierra sur	CSDI-ECF
Arapa	Sierra sur	CSDI-ECF
Muñani	Sierra sur	CSDI-ECF

continuación...

Huancané	Sierra sur	CSDI-ECF
Huarayamoho	Sierra sur	CSDI-ECF
Capachica	Sierra sur	CSDI-ECF
Tambopata	Sierra sur	CSDI-ECF
La pampilla	Sierra sur	CSDI-ECF
El frayle	Sierra sur	CSDI-ECF
Omate	Sierra sur	CSDI-ECF
Ubinas	Sierra sur	CSDI-ECF
Mazo Cruz	Sierra sur	CSDI-ECF
Ilave	Sierra sur	CSDI-ECF
Juli	Sierra sur	CSDI-ECF
Tahuaco-Yunguyo	Sierra sur	CSDI-ECF
Desaguadero	Sierra sur	CSDI-ECF

X. ASEGURAMIENTO

CONSTANCIA

Se autoriza el uso de la información generada del Estudio "Olas de frío" en la "Modalidad de Titulación por Trabajo de Suficiencia Profesional - UNALM" del Meteorólogo Guiseppe Arturo Vásquez Villano identificado con DNI N°44847865, quien citará los créditos respectivos. El estudio fue desarrollado por el consultor el Sr. Vasquez en marco del **Proyecto Apoyo a la Gestión del Cambio Climático Fase II (GCC-II)** – Convenio SENAMHI-LIBELULA, financiado por la Cooperación Suiza para el Desarrollo (COSUDE).

Lima, 14 de junio del 2021

M.Sc. Delia Acuña Azarte
Coordinadora de la Componente climática GCC-II