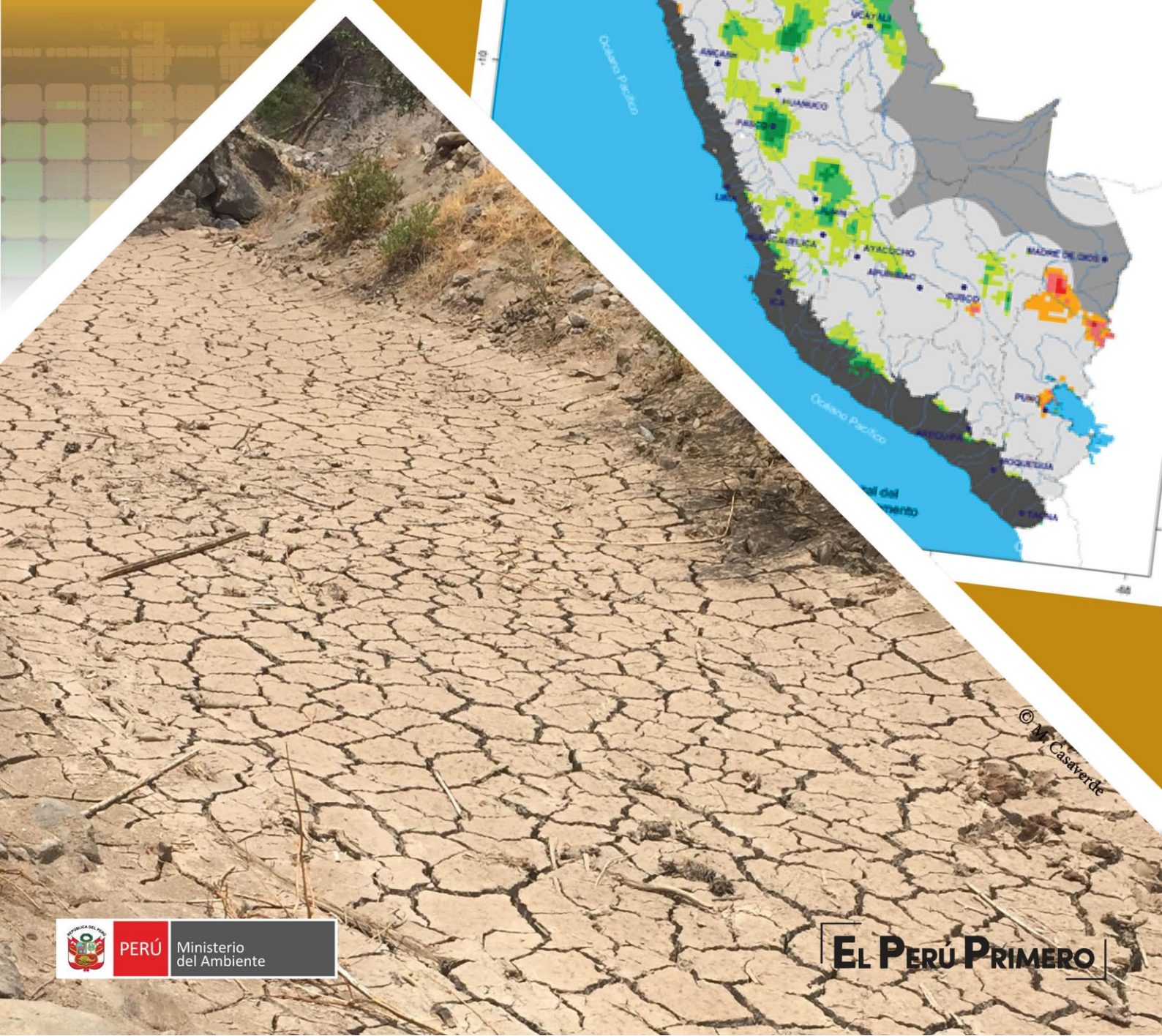
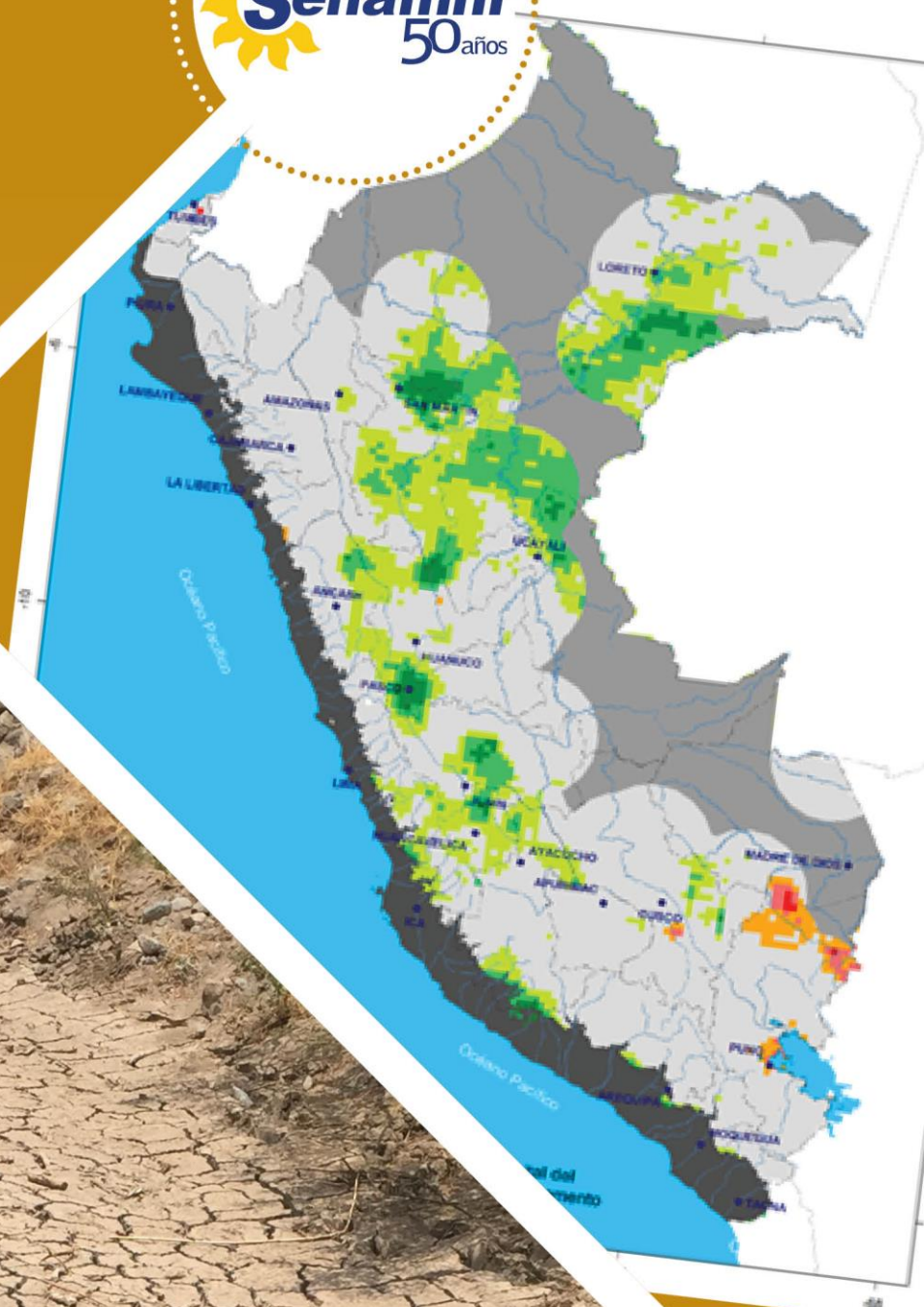


# MONITOREO DE SEQUÍAS PARA SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA

Descripción de índices para el monitoreo de sequía hidrológica implementado en el SENAMHI



MONITOREO DE SEQUÍAS EN EL PERÚ  
Índice de Precipitación (SPI - 3 meses)



© M. Casaverde

**Síntesis:**

El presente reporte trata sobre el monitoreo de las sequías a nivel nacional de la Dirección de Hidrología; conlleva una serie metodologías de distintos indicadores estandarizados de sequías con énfasis en la sequía hidrológica, tiene como objetivo proporcionar una herramienta útil para tomadores de decisión del sector público.

# MONITOREO DE SEQUÍAS PARA SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA

Descripción de índices para  
el monitoreo de sequía hidrológica  
implementado en el SENAMHI







## **DIRECTORIO**

Dr. Ken Takahashi

Presidenta Ejecutiva del SENAMHI

Ing. Oscar G. Felipe Obando

Director de la Dirección de Hidrología del SENAMHI

Dr. Waldo Lavado

Subdirector de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del SENAMHI

### **Autor:**

Fis. Sofía Marisol Endara Huanca

Especialista en Hidrología

Subdirección de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del SENAMHI

### **Revisor del Estudio:**

Waldo Lavado

Subdirector de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del SENAMHI

Lima, Perú

Octubre 2019

**Citar como:**

Endara, S. (2019). Monitoreo de sequías para sistemas de alerta temprana. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

## CONTENIDO

Resumen	viii
Introducción	3
1.1 Impactos de las sequías en el Perú	5
1.2 Posibles efectos de la Sequía	6
Marco Teórico	7
2.1 Definición de la Sequía	7
2.1 Tipos de sequias	7
2.2 Indicadores de sequía en el SENAMHI	9
2.2.1 Índice Precipitación Estandarizado (SPI)	9
2.2.2 Índice de Precipitación Normal (IPN)	10
2.2.3 Índice de Escorrentía Potencial	11
2.2.4 Índice Caudal Estandarizado	11
Metodología	13
3.1 Información Utilizada	13
3.1.1 Datos Grillados de Precipitación (PISCO)	13
3.1.2 Datos de caudales mensuales	13
3.2 Monitoreo de sequías Hidrológicas	15
3.2.1 Modelo Hidrológico	16
3.2.1 Procedimientos para el cálculo de índices de sequía hidrológica	18
Resultados	24
4.1 Boletín de Sequía Hidrológico	24
4.2 Participación en Políticas pública, Gestión de Riesgo y Desastre y Observatorio nacional	24
4.2.1 Observatorio Nacional de sequías	24
4.2.2 Participación en Gestión de Riesgo y Desastre	25
Propuesta de Sistemas de alerta de Sequías en Perú	27
5.1 Sistema de alerta temprana en el Perú	27
5.2 Sistema de alerta temprana de sequías hidrológicas	27
5.2.1 Objetivo	27
5.2.2 Alcance	27
5.2.3 Etapas de protocola de SAT de Sequía hidrológica	28
Conclusiones	32
Recomendaciones	33
Referencias	34

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1</b> Secuencia de sucesos de sequía y sus efectos para tipos de sequía comúnmente aceptados. Todas las sequías son consecuencia del déficit de precipitación o de sequía meteorológica, que a su vez puede provocar otros tipos de sequía y de efectos. ....	8
<b>Figura 2.2</b> Función de distribución acumulada de las distribuciones de Pareto, Log-Logistic, Lognormal, Pearson Typo III, General Extreme Value y Weibull. Y ecuaciones utilizadas para obtener los parámetros acorde con el procedimiento L-moment. ....	12
<b>Figura 3.1</b> a) Estaciones utilizadas en PISCO, y distribución espacial de la precipitación. b) distribución espacial de la latitud en el Perú (Fuente: Aybar et al. 2019). ....	13
<b>Figura 3.2</b> Estaciones hidrológicas utilizadas para el monitoreo de sequías hidrológicas. ....	14
<b>Figura 3.3</b> Flujograma de trabajo del Monitoreo Sequías Hidrológicas. ....	16
<b>Figura 3.4</b> Ríos seleccionados para el modelo hidrológico GR2M y sus respectivas cuencas regiones de calibración. (Fuente: Llauca, 2019).....	17
<b>Figura 3.5</b> Índice de precipitación normal, marzo 2019, 3 meses (Fuente propia).....	18
<b>Figura 3.6</b> Anomalía de escurrimiento potencial, setiembre 2019, 5 meses (Fuente propia). ....	19
<b>Figura 3.7</b> Índice estandarizado de precipitación, marzo 2019, 3 meses (Fuente propia). ....	20
<b>Figura 3.8</b> Patrón espacial de la distribución de probabilidad para cada mes por cuencas (Fuente propia).....	21
<b>Figura 3.9</b> Esquema metodológico del Modelamiento hidrológico para la generación de caudales mensuales (Fuente propia).....	22
<b>Figura 3.10</b> Proceso de Monitoreo de sequía hidrológicas en el SENAMHI .....	23
<b>Figura 4.1</b> Boletín de sequías hidrológico .....	24
<b>Figura 4.2</b> Observatorio Nacional de Sequías. SPI-1 mes en base a PISCOpm V2.1.....	25
<b>Figura 4.3</b> Estructura del SINAGERD.....	26
<b>Figura 5.1</b> Componentes del Sistemas de alerta temprana; Fuente: INDECI.....	27

## Lista de Tablas

<b>Tabla 2.1</b> Categorías del SPI según el grado de sequedad y humedad.....	10
<b>Tabla 2.2</b> Categorías del IPN (%) según el grado de sequedad y humedad .....	11
<b>Tabla 3.1</b> Estaciones hidrológicas en la vertiente de Pacífico (VP), amazonas (VA) y del Titicaca (VT).15	
<b>Tabla 5.1</b> Etapas de SAT de sequías hidrológicas .....	28



## RESUMEN

La sequía por su lenta evolución, es una de los fenómenos naturales más costosos en cuanto a sus impactos. En el 2014 la Subdirección de Estudios e Investigaciones Hidrológicas (SEH) de la Dirección de Hidrología del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) implementaron el monitoreo de sequías en el Perú (**MSP**), el cual conlleva una serie de métodos de trabajo y metodologías para su monitoreo. Desde la recopilación y procesamiento de datos hasta los canales de difusión de sequías y principales usuarios.

El presente reporte, establece una sistematización de procesos para sistemas de alerta temprano de sequías, debido que en la actualidad sólo se cuenta con un observatorio nacional de sequías. Por otro lado, el presente documento es un punto de partida para el plan de sequías nacional, así como para la gestión de riesgos y desastres de sequías.

En las primeras secciones trata sobre: Antecedentes, impactos y marco teórico de sequías. Este último se presenta las tipologías de sequías y los principales eventos de sequías que más impactaron a nivel nacional. Seguidamente, el marco teórico trata sobre las definiciones y un panorama general de sequía, indicadores y esquema de clasificación utilizado en el SENAMHI, entre otros. La metodología indica los procedimientos para la implementación de índices de sequía hidrológica para el monitoreo y la difusión de las condiciones de sequía a nivel nacional.

Por último, se presenta una metodología general para sistemas de alerta temprana en sequías hidrológicas, el contribuirá en la preparación y mitigación de los efectos de la sequía.



## MONITOREO DE SEQUÍAS PARA SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA

### Descripción de índices para el monitoreo de sequía hidrológica implementado en el SENAMHI

#### 1. INTRODUCCIÓN

La sequía es uno de los principales fenómenos naturales más devastadores a nivel global, es considerada uno de los desastres naturales más dañino en términos económicos (Donald A. Wilhite, et. al, 2001). Diferente a otros peligros naturales, la sequía se desarrolla lentamente haciendo complejo determinar el inicio y el término del evento. Asimismo, debido a la ubicación del cinturón de fuego del Pacífico, presencia de la cordillera de los Andes y la corriente peruana, factores que determinan las condiciones climáticas del país y la forzante más trascendental como El Niño Oscilación Sur (Fase cálida: El Niño, Fase fría: La Niña) influyen en la variabilidad natural del clima de esta región. Por otro lado, la vulnerabilidad del país frente a los peligros naturales, la desertificación, deforestación y la compactación de los suelo, son factores externos que alteran el desarrollo natural de las precipitaciones y temperatura más aún con el cambio climático.

A nivel regional se han presentado diversos esfuerzos para contrarrestar las sequías, tanto en, reporte, estudios e investigaciones, las cuales conllevan un conjunto de metodologías de trabajo de análisis y monitoreo de las sequías, así como episodios de sequías extremas e impactos en los distintos sectores económicos. La Comunidad andina en el 2009 desarrolló un atlas de sequías en los países andinos en el cual menciona, cerca del 47% de total de áreas agropecuarias del Perú están expuestas a la sequías. De manera similar, UNESCO desarrolló el Atlas de Sequías en América Latina y el Caribe (ALC), resume el trabajo realizado en los últimos años por distintos autores, iniciado en el 2008 en el marco de las actividades en la región por UNESCO y CAZALAC y con el apoyo del gobierno Filandés y el Instituto de Recursos Hídricos (IWR) de los EEUU. Se lanzaron a la misión de generar un producto de frecuencias de sequías meteorológicas y como impactan a la región de ALC. Adicionalmente, se menciona que los estudios sobre sequías en el Perú viene adquiriendo una gran relevancia por las pérdidas que ocasionaron al desarrollo de las actividades productivas dependientes del recurso hídrico (UNESCO & CAZALAC, 2018).

El fenómeno el niño de 1982-1983 y el de 1997-1998 categorizados como Niños extremos cuyos impactos repercutieron a nivel global y uno de los principales moduladores de la variabilidad interanual, (Lagos et al., 2008). Estos impactos generaron en los años 1982-1983 y 1996-1997, disminución en la economía peruana, se registró 11.6% y 6.2% del PBI respectivamente. Sobre todo, la zona norte del Perú fue la más afectada por inundaciones. Sin embargo, en algunas zonas del Perú fueron afectadas por sequías, sobre todo la zona sur.

El monitoreo de la sequía se ha convertido en parte integral de la planeación, preparación y mitigación a escala local, regional incluso nacional. Las sequías más recientes en el Perú, desde que se implementó MSP en el 2014, describe de forma relativa la frecuencia y episodios y características de la sequía en nivel nacional. Asimismo, se han realizado distintas investigaciones respecto a períodos de retorno,

mapa de peligro, riesgo de sequía. Esto nos ha retroalimentado en mejorar y actualizar metodologías e índices en el monitoreo de sequías.

Los sistemas de alerta temprana de la sequía (SATS) han sido ideados para identificar tendencias en el clima y en el abastecimiento de agua y así detectar el inicio de una sequía o la probabilidad de que sobrevenga (OMM, 2006). Con el objetivo primordial de que los responsables de decisiones pudieran disponer, de dicha información en el momento oportuno y en el formato apropiado, de esa información. Es así a nivel global se han desarrollado distintos SATS, algunos más sofisticados que otros dependiendo de la gobernanza y las políticas asociados a estos sistemas de alerta temprana. Por mencionar algunos:

El monitoreo, SATS y predicción en Brasil es soportado por distintas instituciones, agencias, incluyendo las instituciones de tiempo y pronósticos climáticos, así como entidades pertenecientes al ministerio de ciencias, tecnologías e información, recursos hídricos, instituciones que provén información agrometeorológica e institutos de investigación como las universidades. A pesar del trabajo de varias agencias federales y estatales para el desarrollo del monitoreo/pronóstico y los sistemas de alerta temprana, la precisión y coordinación aún es un desafío (Gutiérrez, Engle, De Nys, Molejón, & Martins, 2014).

El monitor de sequías de Alemania fue fundado en 2014 como una plataforma online. Debido al episodio de sequía en el 2003 en Europa, la cual tuvo mayores implicancias en varios sectores socioeconómicos, incluyendo la energía, producción, salud, forestales y agricultura. Las pérdidas económicas fueron del orden de 1.5 billones de euros, sólo en agricultura. El monitoreo de sequías de Alemania (GDM, por sus siglas en inglés) utiliza un sistema de modelo operacional que consiste en 4 pasos: (1) datos de estaciones meteorológicas actualizadas por el servicio climático de Alemania, con control de calidad para la interpolación; (2) Estimación de humedad de suelo actualizada utilizando un modelo hidrológico de mesoescala; (3) Cálculo de cuantiles basado en un índice de humedad de suelo (SMI) basada de un registro histórico de datos de 60 años; y (4) Clasificación del SMI en cinco categorías de sequía desde anormalmente seco a sequía excepcional. Finalmente, se produce un mapa fácil de entender y publicado diariamente (Zink et al., 2016).

En el 2002 se formó un grupo de investigadores de México, Estados Unidos y Canadá, para implementar el Monitor de Sequías de Norteamérica (NADM, por sus siglas en inglés). De esta iniciativa se adapta la metodología para elaborar el monitor de sequías de México (MSM), el cual integra siete diferentes índices mediante un sistema de información geográfica; la experiencia del climatólogo con el consenso entre los usuarios y especialistas la contempla. Además se utiliza información histórica para un seguimiento objetivo y periódico, comparando con el actual en forma de índices y porcentajes con respecto a sus valores medios. El reto en juntar toda esta información en un solo producto, con valores estandarizados que permitan determinar la magnitud de la sequía (Lobato-Sánchez, 2016).

El monitoreo de sequías hidrológicas en el SENAMHI, es parte del monitoreo de sequías nacional y los productos derivados de este procesos son utilizados como datos de entrada al Observatorio Nacional de Sequías (ONS), el cual está integrado por distintas instituciones públicas y la academia para mitigar

los efectos de la sequía y mantener a los tomadores de decisión informados. En ese sentido, el SENAMHI se ve en la necesidad de implementar un sistema de alerta temprana de sequías para el monitoreo a tiempo real y poder prevenir un episodio de sequía. Este reporte recopila información, metodologías y procedimientos del monitoreo de sequías hidrológicas y plantea una propuesta para el SATS de la componente hidrológica.

## 1.1 Impactos de las sequías en el Perú

A nivel regional se han presentado varios episodios de sequías impactando a los principales sectores económicos como la agricultura, ganadería, salud, recursos hídricos, energía, entre otros. Sin embargo, estos impactos no se han registrado correctamente sobre todo los que se refieren al sector salud, energía debido a la temporalidad de sus efectos y presencia de factores externos como la pobreza, vulnerabilidad social, ambiental y la falta de información oportuna de entidades responsables de este fenómeno.

En esta sección se detallan algunos de los impactos registrados en su mayoría por el Ministerio de Agricultura (MINAGRI), Banco central de Reserva del Perú (BCRP) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y los episodios de la intensidad de la sequía fue identificada en el reporte de SENAMHI (Endara S., et. al, 2019).

**La sequía de 1982-1983** afectó a diferentes regiones en cada año. En 1982 se identificó una sequía moderada a severa intensidad que afectó los departamentos de Tumbes, Piura y Lambayeque. Asimismo, este evento originó período de escasez de agua en la zona norte del Perú durante el primer trimestre, limitando la actividad agropecuaria (BCRP, 1982). Mientras, la sequía del 1983 afectó principalmente los departamentos de Apurímac, Arequipa, Ayacucho, Cusco, Moquegua y Puno (zona sur del Perú) con categoría extrema.

Igualmente, fue considerada la sequía más fuerte de las últimas décadas en el Perú, que afectó a 3 grandes unidades fisiográficas: Pastizales altoandinos, praderas onduladas más bajas (jalca) y los valles encañonados; produciendo cuantiosas pérdidas en los cultivos y una disminución de los rendimientos agrícolas y pecuario. La situación más crítica se dio en el altiplano, en el departamento de Puno, entre el límite de Bolivia y el departamento de Cusco, entre las ciudades de Maranganí y Sicuani; afectando también el Altiplano Sur (Meseta de Collao) y los departamentos de Moquegua, Arequipa, Cusco, Tacna y Ayacucho (CMRRD, 2004).

**Sequía 1990** afectó a 19 departamentos del Perú en más de 50% del total de su superficie con condiciones de sequía de moderadas a extremas. Entre los impactos, el sector agropecuario registró una caída de 9% respecto al año anterior, debido a los efectos de la sequía que se prolongó durante toda la campaña agrícola, en gran parte del país y a las importaciones subsidiadas efectuadas en el primer trimestre del año, ocasionando una disminución del 14% en el subsector agrícola (BCRP, 1990).

**La sequía de 1991-1992** duró 14 meses, considerado como uno de los Niños más severos por sus efectos, fue uno de los episodios Niño más largos en los últimos 30 años. Catalogado de intensidad

moderada; la cobertura espacial fue casi a nivel nacional y derivó a una fuerte sequía (UNESCO & CAZALAC, 2018). Los impactos se presentaron con disminución de la producción y productividad agropecuaria debido a la pérdida de la superficie cultivable, dicho fenómeno afectó directamente a los rendimientos de los cultivos de maíz amiláceo y papa. En el primer caso, las mayores reducciones se presentaron en Ayacucho, Apurímac y Ancash. Mientras, el cultivo de papa la disminución de la producción se presentó en Junín, Ancash y Puno. (Banco Central de la Reserva del Perú, 1992).

**Sequía 2015-2016**, El Niño 2015-2016 se caracterizó por presentar déficit de lluvia durante octubre a noviembre del 2015 principalmente en zonas altas en el sur del Perú. En el departamento de cusco ocasionó pérdidas del 60% de los principales productos de primera necesidad. Por otro lado, la producción de arroz aumentó de 0.5%. La desaceleración respecto al año anterior se debió al impacto negativo del déficit hídrico que afectó la producción de las regiones de Piura, Lambayeque y la Libertad (BCRP, 2015)

## 1.2 Posibles efectos de la sequía

Las sequías pueden producir efectos e impactos como:

- La falta de precipitaciones pluviales y ataque de plagas, aparte de provocar pérdidas de las cosechas, colocando al productor campesino ante la hambruna.
- Los pocos productos agrícolas que se logran producir, son comercializados a precios menores que sus reales costos de producción, lo que acentúa la descapitalización del campo.
- La pérdida de cosecha provoca, además el aumento progresivo de la migración campo-ciudad. Este despoblamiento del campo aunado a las anteriores consideraciones de escasez alimentaria promueve las importaciones de alimentos sustitutos de la producción local.
- Las sequías generalmente escasea los pastos naturales principal fuente de alimentos de los animales, por lo que la población se ve obligada a sacrificar en forma masiva e indiscriminada a su ganado. Otras recurren a sacrificar a sus animales, rematándolos a precios inferiores a su costo, ante la posibilidad de seguir alimentándolos. De esta manera se pierde la capital invertido y especies nativas como la alpaca y vicuña.
- Eleva el índice de mortandad y morbilidad del ganado al proliferar enfermedades y se pierden las esperanzas de mejoramiento genético del ganado.
- Las sequías hidrológicas (disminución de niveles y caudales de los ríos) afecta el funcionamiento de hidroeléctricas y la producción de energía.
- En los valles costeros la disminución de caudales de los ríos producirá pérdidas de los cultivos sometidos a riego.
- En las ciudades, la escasez de agua repercute al abastecimiento de agua para consumo humano, que queda seriamente disminuido.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Definición de la sequía

Las distintas variables hidrometeorológicas y los factores socioeconómicos así como la naturaleza estocástica de las demandas de agua en diferentes regiones del mundo se está convirtiendo en un obstáculo para tener una definición de la sequía. Según (Yevjevich, 1967) sostiene que diferentes puntos de vista de la definición de la sequía es un dificultad para la investigación de este fenómeno. (Wilhite & Glantz, 1987) mencionaron que es importante distinguir entre la definición conceptual y operacional de la sequía. La definición conceptual, está expresada en términos relativos; La sequía es un fenómeno prolongado y seco. Por otro lado, la definición operacional nos indica; el intento de identificar el origen, severidad, y la culminación de los períodos de sequía. Generalmente la operacionalidad de la definición de sequía puede ser utilizada para analizar la frecuencia, severidad y duración para un periodo de retorno dado.

Asimismo, en (Mishra & Singh, 2009) muestra que algunos investigadores utilizan las siguientes definiciones:

- i. La organización meteorológica mundial (WMO, 1986), define la sequía como un “periodo sostenido y prolongado deficiencia de precipitación”.
- ii. La organización para la alimentación y la agricultura (FAO, 1986) de la ONU define a la sequía como, “El porcentaje de años cuando los cultivos fracasan por la falta de la humedad”.
- iii. *The encyclopedia of climate and weather* define a la sequía como un periodo extendido, una estación, un año o varios años, de deficiencia de lluvia relativo a un promedio estadístico multianual para una región.
- iv. (Palmer, 1965) describe a la sequía como una desviación significativa de las condiciones normales hidrológicas en un área.

No obstante, las definiciones de sequía varían, y depende de la variable utilizada. Por lo tanto, las definiciones de sequías pueden clasificarse en categorías, presentadas en la siguiente sección.

### 2.2 Tipos de sequías

Según la sociedad americana de meteorología (AMS) en el 2004 clasifica la sequía en 4 categorías (Wilhite & Glantz, 1985), así mismo la Organización meteorológica mundial adopta este concepto. Los cuales son:

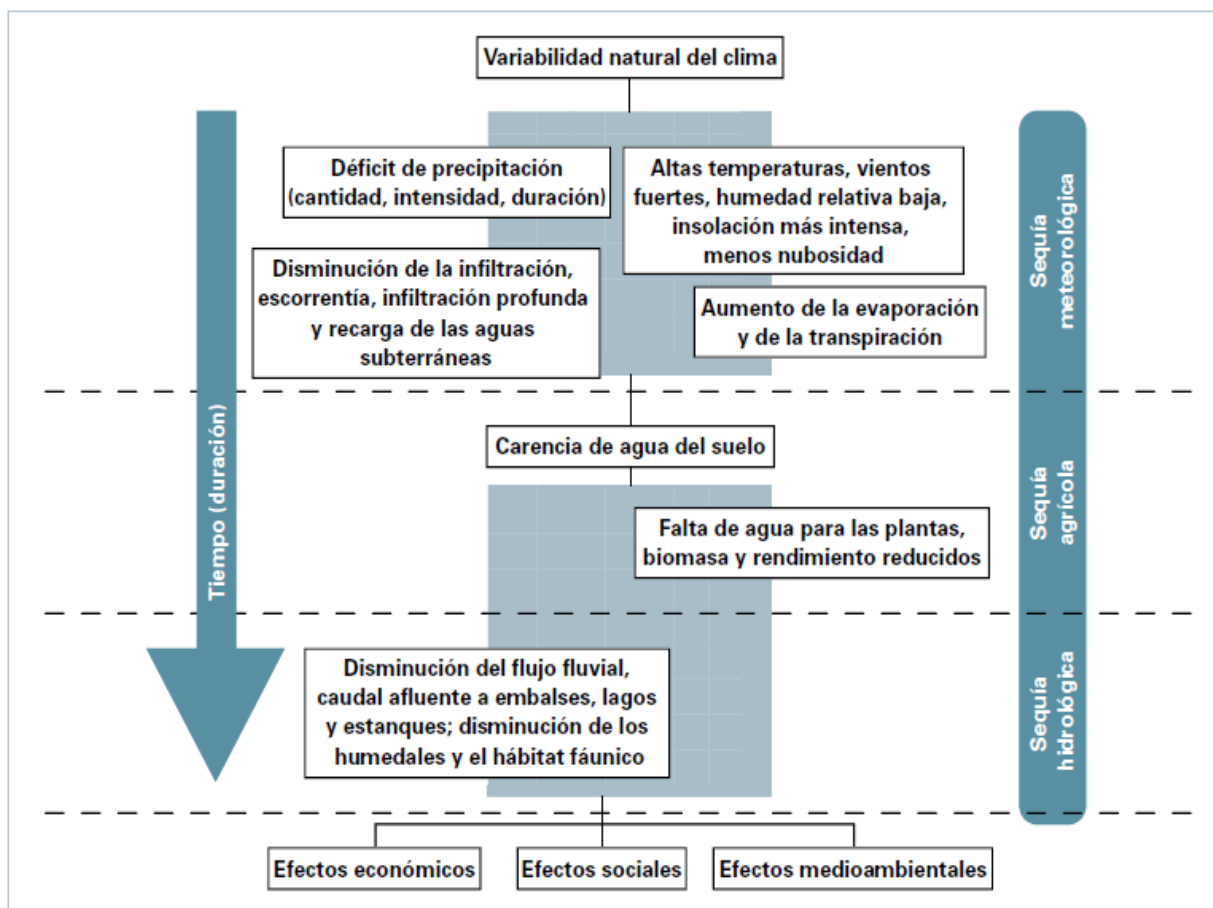
**Sequía meteorológica.**- es definida como un retraso en un determinado periodo de tiempo de la precipitación sobre una región. La precipitación ha sido comúnmente utilizado para el análisis de la sequía meteorológica (Pinkayan, 1966). Considerando a la sequía como el déficit de precipitación con respecto a valores promedios. Varios estudios de sequía vienen analizando datos de precipitación mensual. Otro enfoque, es analizar la duración, severidad e intensidad de la sequía.

**Sequías agrícola.**- Usualmente se refiere a un periodo con disminución en la humedad del suelo y por consiguiente la pérdida de los cultivos sin cualquier referencia a los recursos hídricos superficiales.

**Sequía hidrológica.**- está relacionada al periodo con inadecuado recursos hídrico superficial y subsuperficial para establecer los usos para gestionar los sistemas de recursos hídricos. Los datos de caudales vienen siendo aplicados en el análisis e sequía hidrológica (Keyantash & Dracup, 2002). Sin embargo existen investigaciones que hacen uso de las series de escorrentía superficial mensual, utilizando un índice de escorrentía estandarizado SRI (por sus siglas en inglés) (Shukla & Wood, 2008).

**Sequía socioeconómica.**- es asociada con fallas de los sistemas de recursos hídricos para optimizar las demandas de agua. La sequía socioeconómica ocurre cuando una demanda de una buena economía supera los suministros como resultado de un déficit de agua relacionado con clima.

En este sentido la siguiente figura muestra los tipos de sequía y su relación entre ellos, como el desfase en el tiempo Figura 2.1.



**Figura 2.1** Secuencia de sucesos de sequía y sus efectos para tipos de sequía comúnmente aceptados. Todas las sequías son consecuencia del déficit de precipitación o de sequía meteorológica, que a su vez puede provocar otros tipos de sequía y de efectos.

Fuente: Centro Nacional de Mitigación de Sequías, universidad de Nebraska-Lincoln, Estados Unidos de América.



## 2.3 Indicadores de sequía en el SENAMHI

### 2.3.1 Índice Precipitación Estandarizado (SPI)

El SPI fue desarrollado por (Mckee, Doesken, & Kleist, 1993) para cuantificar el déficit de precipitación para diferentes escalas temporales y evaluar el impacto del déficit de precipitación sobre la disponibilidad de los recursos hídricos. A través del índice SPI es posible cuantificar y comparar las intensidades de los déficits de precipitación entre zonas con climas muy diferentes y tiene la ventaja de poder integrarse sobre un amplio rango de escalas temporales, lo que hace que puede ser utilizado como indicador de diferentes tipos de sequía, tanto aquellas de corta duración y que producen efectos sobre los sectores agrícola, forestal y pecuario, como también las sequías de larga duración conducentes a sequías hidrológicas.

El cálculo del SPI consiste en utilizar las series de tiempo de precipitación mensual, y agregadas de 3, 6, 9, 12 y 24 meses. Por ejemplo, la escala de tiempo de 3 meses. La precipitación acumulada desde el mes  $j-2$  al mes  $j$  es asumida y se distribuye al mes  $j$  y la escala de tiempo de los 2 primeros meses de la serie es faltante. Los siguientes pasos es el procesos de normalización, en el cual una función de densidad de probabilidad adecuada es ajustada a la serie de tiempo. Entonces se puede aplicar la función de distribución acumulada, la cual finalmente transformada a una distribución normal estandarizada. Este procedimiento es repetitivo para todas las escalas de tiempo.

#### Función de Distribución Gamma

La función de densidad de probabilidad de una función de distribución Gamma está definida como,

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (2.1)$$

$$\hat{\beta} = (\bar{x} / \hat{\alpha}) \quad (2.2)$$

Donde  $\bar{x}$  es la precipitación promedio y A esta dado por:

$$A = \ln(\bar{x}) - n^{-1} \sum \ln(x) \quad (2.3)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de la distribución y pueden ser estimados con un procedimiento iterativo.

Para un mes dado y una escala de tiempo, la probabilidad acumulada  $G(x)$  de una cantidad de precipitación observada está dado por,

$$G(x) = \frac{1}{\hat{\beta} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}} e^{-x/\hat{\beta}} dx \quad (2.4)$$

Dado, que  $t=x/\beta$ , la expresión se reduce a la siguiente función, llamado función gamma incompleta:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt \quad (2.4)$$

La distribución gamma no está definida para  $x=0$ , y la probabilidad de la precipitación en cero  $q=P(x=0)$  viene a ser positiva, entonces la función probabilidad acumulada se convierte en:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (2.5)$$

Donde  $q$  es la probabilidad  $x=0$ , es decir, la frecuencia de ocurrencia de  $x=0$  en todas las series observadas. Cuando son transformadas en función de distribución estándar normal, el SPI se expresa como:

$$SPI = \begin{cases} -\left(t - \frac{c_0+c_1+c_2t^2}{1+d_1t+d_2t^2+d_3t^3}\right), & t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{H(x)^2}\right)}, & 0 < H(x) \leq 0.5 \\ t - \frac{c_0+c_1+c_2t^2}{1+d_1t+d_2t^2+d_3t^3}, & t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)}, & 0.5 < H(x) \leq 1 \end{cases} \quad (2.6)$$

Donde las constantes equivalen a:  $c_0 = 2.515517$ ,  $c_1 = 0.802853$ ,  $c_2 = 0.010328$ ,  $d_1 = 1.432788$ ,  $d_2 = 0.189269$  y  $d_3 = 0.001308$ .

Para la identificar la sequía se utilizó umbrales teóricos de SPI propuestos por la OMM, 2012 mostrados en la Tabla 2.1 muestra el esquema de clasificación de la sequía meteorológica SPI.

**Tabla 2.1 Categorías del SPI según el grado de sequedad y humedad**

Tipo de Sequía	SPI
Extremadamente seco	-2.0 y menor
Severamente seco	-1.5 a -1.99
Moderadamente seco	-1.0 a -1.49
Normal	-0.99 a 0.99
Húmedo	1.0 a 1.49
Muy húmedo	1.5 a 1.99
Extremadamente Húmedo	2.0 y mayor

Fuente OMM (2012).

### 2.2.2 Índice de Precipitación Normal (IPN)

El IPN es una de las medidas de desviación de las precipitaciones a largo plazo más sencillas de calcular. Se toma como "Normal", al valor promedio de la precipitación, en un lugar y período prolongado de tiempo. Puede ser calculado para un mes, una temporada o un año.

$$IPN(\%) = \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} \times 100 \quad (2.7)$$

(Du et al., 2013) clasifica los valores de IPN según el grado de sequedad o humedad en %. Para fines prácticos se ha utilizado el siguiente esquema de clasificación de IPN (%) construido en función al déficit de precipitación a impactos en la agricultura. Como se muestra la tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Categorías del IPN (%) según el grado de sequedad y humedad**

Tipo de Sequía	IPN (%)
Extremadamente seco	$-100 < \text{IPN} \leq -60$
Moderadamente seco	$-60 < \text{IPN} \leq -15$
Normal	$-15 < \text{IPN} \leq 15$
Húmedo	$15 < \text{IPN} \leq 60$
Muy húmedo	$60 < \text{IPN} \leq 100$
Extremadamente Húmedo	$\text{IPN} > 100$

### 2.3.3 Índice de Escorrentía Potencial

La anomalía de escorrentía potencial (AEP) fue desarrollado con el propósito de determinar a través del tiempo las anomalías de escurrimiento directo bajo supuesto de una superficie impermeable. Este índice puede calcularse a escala de tiempo de 1, 2, 3, ... y 12 meses.

### 2.3.4 Índice Caudal Estandarizado

Varias distribuciones de probabilidad vienen siendo utilizadas para la estimación de índices de sequía hidrológica. Una única distribución de probabilidad es usualmente seleccionada para ajustar las series de tiempo disponibles y/o variables (Vicente-Serrano et al., 2012). Por ejemplo, (Nalbantis & Tsakiris, 2009) utiliza la distribución log-normal para ajustar series de flujos de los ríos en Grecia. Otros autores vienen evaluando varias funciones de distribución para estimar los índices de sequía hidrológica.

El uso de una única función de distribución de probabilidad para diferentes sectores del río y meses, requiere una homogenización espacial alta sobre las series, la cual es improbable de ser encontrada en los ríos por sus características, físicas, climáticas, régimen hidrológicos, entre otros.

Para el monitoreo de sequías hidrológicas se utiliza el índice de caudal estandarizado SSI (Standardized Streamflow Index, por sus siglas en inglés) (Serrano, 2012). Consiste en utilizar un conjunto de distribuciones estandarizadas para distintas cuencas hidrológicas y para diferentes meses del año. Este enfoque proporciona resultados similares y la calidad en obtener los índices de sequía hidrológica. Asimismo, es un procedimiento flexible para el análisis de los regímenes hidrológicos.

La Figura 2.2 muestra la función de distribución acumulada ( $F_x$ ) para las 6 distribuciones de probabilidad. Este cálculo del  $F(x)$  es esencial para obtener el índice SSI. La Figura incluye las ecuaciones utilizadas para el cálculo de parámetros de 6 distribuciones de probabilidad. Este procedimiento utiliza el método de L-moment. Una vez que  $F(x)$  es calculado, el SSI (z-scores) puede fácilmente ser determinado por la aproximación de (Abramowitz & Irene, 1965). Por ejemplo:

$$SSI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (2.8)$$

Donde

$$W = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad \text{para } P \leq 0.5 \quad (2.9)$$

P es la probabilidad de excedencia a determinar el valor de x, y  $P=1-F(x)$ . Si  $P>0.5$ , P es reemplazado por  $1-P$  y el signo del resultado es inverso. Los valores  $C_0=2.515517$ ,  $C_1=0.802853$ ,  $C_2=0.010328$ ;  $d_1=1.432788$ ,  $d_2=0.189269$  y  $d_3=0.001308$  son constantes.

Distribution	$F(x)$	Parameter estimation	References
Generalized Pareto	$F(x) = 1 - [1 - \frac{x}{\alpha}(x - \varepsilon)]^{1/\kappa}$	$\kappa = \frac{(1-3\tau_3)}{(1+\tau_3)}$ $\alpha = \lambda_2(1 + \kappa)(2 + \kappa)$ $\varepsilon = \lambda_1 - \lambda_2(2 + \kappa)$	Hosking (1990)
Log-logistic	$F(x) = [1 + (\frac{\alpha}{x-\gamma})^\beta]^{-1}$	$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2}$ $\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)}$ $\gamma = w_0 - \alpha\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)$	Singh et al. (1993)
Lognormal	$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x-\mu)-\mu}{\sigma}\right)$ , where $\Phi$ is the standard normal cumulative distribution function	$\sigma = 0.999281z - 0.006118z^2 + 0.000127z^5$ $z = \sqrt{\frac{8}{3}}\Phi^{-1}\left(\frac{1+\tau_3}{2}\right)$ $\mu = \ln\left[\frac{\lambda_1}{\text{erf}\left(\frac{z}{a}\right)}\right] - \frac{\sigma^2}{2}$ erf is the Gauss error function: $\text{erf}\left(\frac{z}{a}\right) = 2\Phi\left(\frac{z}{a}\sqrt{2}\right) - 1$ $a = \lambda_1 - e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$	Hosking (1990)
Pearson Type III	$F(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \int_{\gamma}^x \left(\frac{x-T}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-T}{\alpha}\right)} dT$	If $\tau_3 \geq 1/3$ , then $\tau_m = 1 - \tau_3$ : $\beta = \frac{(0.36067\tau_m - 0.5967\tau_m^2 + 0.25361\tau_m^3)}{(1 - 2.78861\tau_m + 2.56096\tau_m^2 - 0.77045\tau_m^3)}$ If $\tau_3 < 1/3$ , then $\tau_m = 3\pi\tau_3^2$ : $\beta = \frac{(1 + 0.2906\tau_m)}{(\tau_m + 0.1882\tau_m^2 + 0.0442\tau_m^3)}$ $\alpha = \sqrt{\pi}\lambda_2 \frac{\Gamma(\beta)}{\Gamma(\beta+1/2)}$ $\gamma = \lambda_1 - \alpha\beta$	Hosking (1990)
GEV	$F(x) = e^{-[1 - \kappa\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)]^{\frac{1}{\kappa}}}$	$\kappa = 7.859C + 2.9554C^2$ $C = \frac{2}{3+\tau_3} - 0.6309$ $\alpha = \frac{\lambda_1\kappa}{\Gamma(1+\kappa)(1-2^{-\kappa})}$ $\mu = \lambda_1 + \frac{\alpha}{\kappa} [\Gamma(1 + \kappa) - 1]$	Hosking et al. (1985)
Weibull	$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\mu}{a}\right)^b}$	$b = \frac{1}{(7.859C + 2.9554C^2)}$ $C = \frac{2}{3+\tau_3} - 0.6309$ $a = \frac{\lambda_1}{\Gamma\left(1+\frac{1}{b}\right)\left(1-2^{-\frac{1}{b}}\right)}$ $m = \lambda_1 - a\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$	Hosking (1986)

**Figura 2.2** Función de distribución acumulada de las distribuciones de Pareto, Log-Logistic, Lognormal, Pearson Tipo III, General Extreme Value y Weibull. Y ecuaciones utilizadas para obtener los parámetros acorde con el procedimiento L-moment.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Información utilizada

##### 3.1.1 Datos Grillados de Precipitación (PISCO)

Los datos utilizados para el monitoreo de sequías hidrológicas es la base PISCO (*Peruvian Interpolate data of the SENAMHIH's Climatological and Hydrological Observations*) versión 2.1 producto de precipitación total mensual (PPm) de resolución espacial de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  (~10Km) desde enero de 1981 hasta al presente. El algoritmo de mezcla se basa en métodos geoestadísticos y de interpolación determinísticos incluyendo tres diferentes fuente de datos de precipitación: (i) Conjunto de datos de precipitación incompletos con control de calidad a nivel nacional, (ii) Climatologías de precipitación mezclados con datos de radar y observaciones y (iii) Precipitación estimada infrarroja del *Climate Hazard Group* (CHIRP) (Aybar et al., 2019).

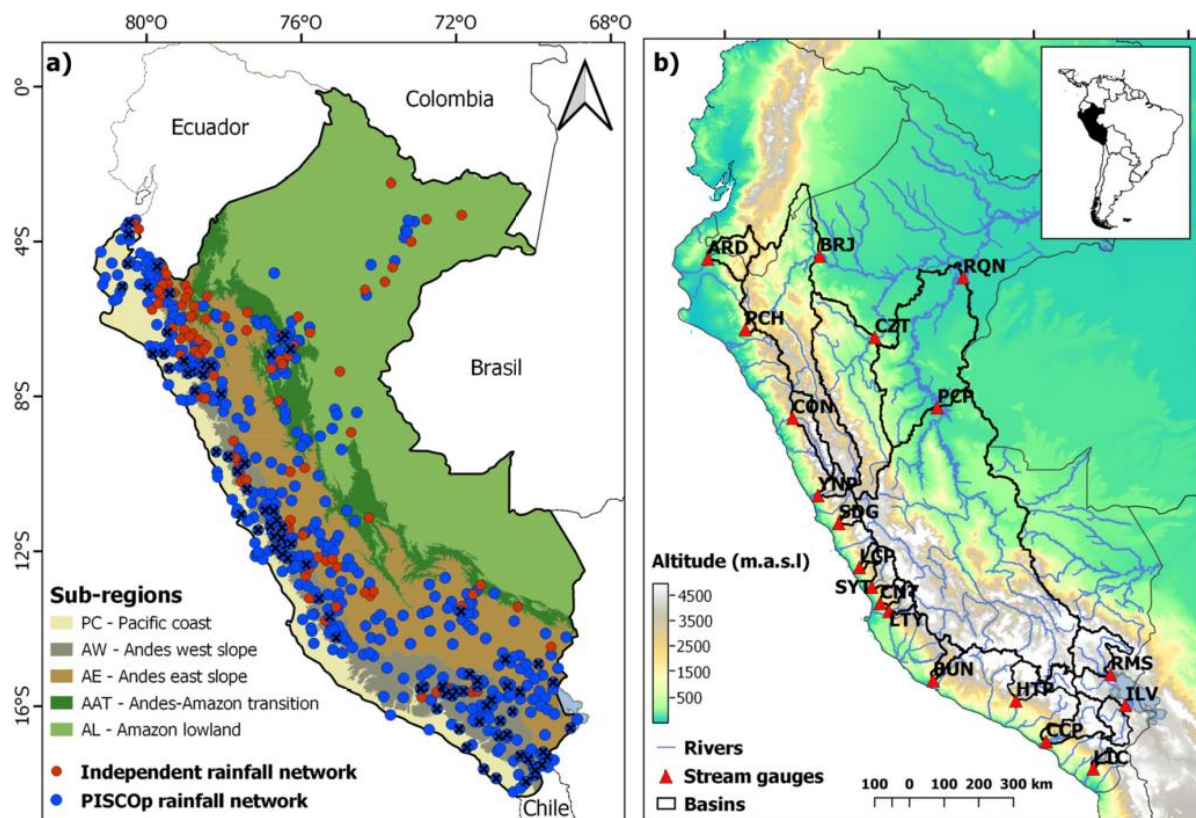
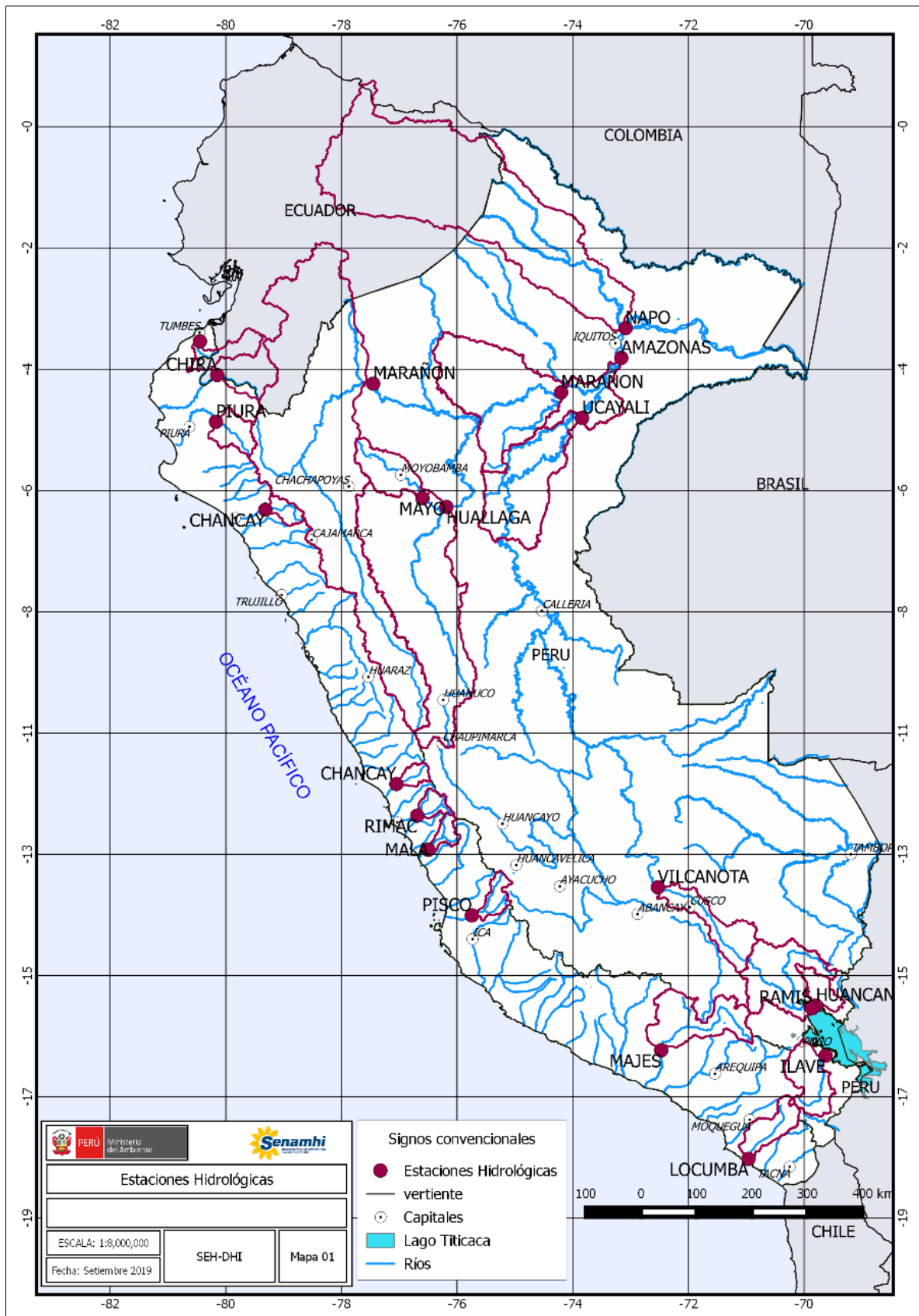


Figura 3.1 a) Estaciones utilizadas en PISCO, y distribución espacial de la precipitación. b) distribución espacial de la latitud en el Perú (Fuente: Aybar et al. 2019).

##### 3.1.2 Datos de caudales mensuales

Existen 21 estaciones hidrológicas en la vertiente del Pacífico (VP), vertiente del Amazonas (VA) y del Titicaca (VT) estas estaciones fueron seleccionadas por tener un registro largo de caudales más de 20 años de datos (Figura 3.2). Asimismo, estas estaciones son las más representativas de las cuencas hidrológicas analizadas a nivel mensual para el monitoreo de sequía hidrológicas.



**Figura 3.2** Estaciones hidrológicas utilizadas para el monitoreo de sequías hidrológicas.  
Fuente propia

**Tabla 3.1 Estaciones hidrológicas en la vertiente de Pacífico (VP), amazonas (VA) y del Titicaca (VT).**

	Estación	Nombre	Río	Latitud	Longitud
VP	E-TI	El Tigre	TUMBES	-3.7171	-80.4472
	E-CI	El Ciruelo	CHIRA	-4.3000	-80.1500
	P-ÑA	Pte. Ñacara	PIURA	-5.1097	-80.1697
	RAC	Racarumi	CHANCAY	-6.6333	-79.3167
	S-DOM	Sto. Domingo	CHANCAY	-11.3833	-77.0500
	CHO	Chosica	RIMAC	-11.9299	-76.6897
	L-CA	La Capilla	MALA	-12.5219	-76.4963
	LET	Letrayoc	Pisco	-13.6572	-75.7448
	LOC	Locumba	LOCUMBA	-17.8750	-70.9591
VT	HUAT	Huatiapa	MAJES	-15.9947	-72.4703
	ILA	Pte. llave	ILAVE	-16.0883	-69.6259
	HUAN	Pte. Huancané	HUANCANE	-15.2165	-69.7926
VA	RAM	Pte. Ramis	RAMIS	-15.2554	-69.8738
	K-105	Km-105	VILCANOTA	-13.1708	-72.5263
	BEL	BELLAVISTA	NAPO	-3.4875	-73.0847
	SHA	Shanao	MAYO	-6.4333	-76.6000
	BOR	Borja	MARAÑON	-4.4500	-77.4500
	CHA	Chazuta	HUALLAGA	-6.5833	-76.1833
	S-RE	San Regis	MARAÑON	-4.6000	-74.2000
	REQ	Requena	UCAYALI	-5.0431	-73.8358
	TAM	Tamishiyacu	AMAZONAS	-4.0033	-73.1608

### 3.2 Monitoreo de sequías hidrológicas

Para monitoreo de sequías hidrológicas comienza con el control de los datos de precipitación y caudales de las estaciones hidroclimatológicas del SENAMHI, se actualiza la base PISCOpm V2.1 (precipitación mensual). Seguidamente se calcula los índices de sequías y se redacta el boletín mensual y este es publicado en la página WEB del SENAMHI <https://www.senamhi.gob.pe/?p=sequias>. En el siguiente esquema se resumen el flujograma de trabajo.

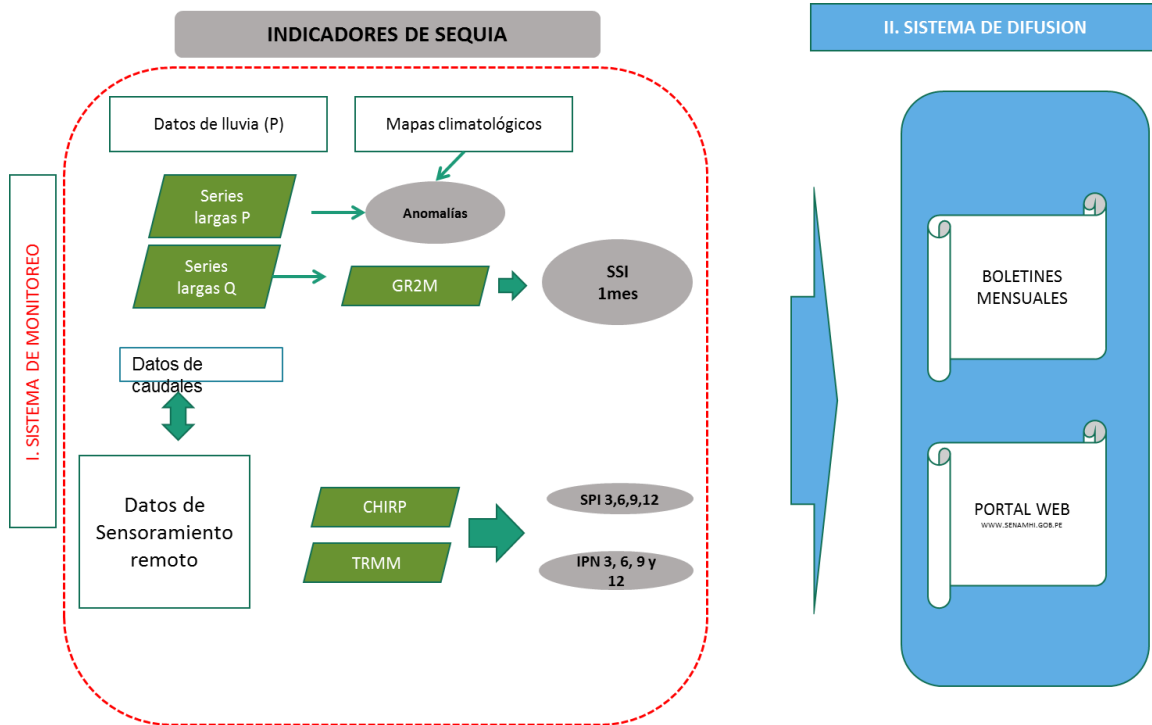
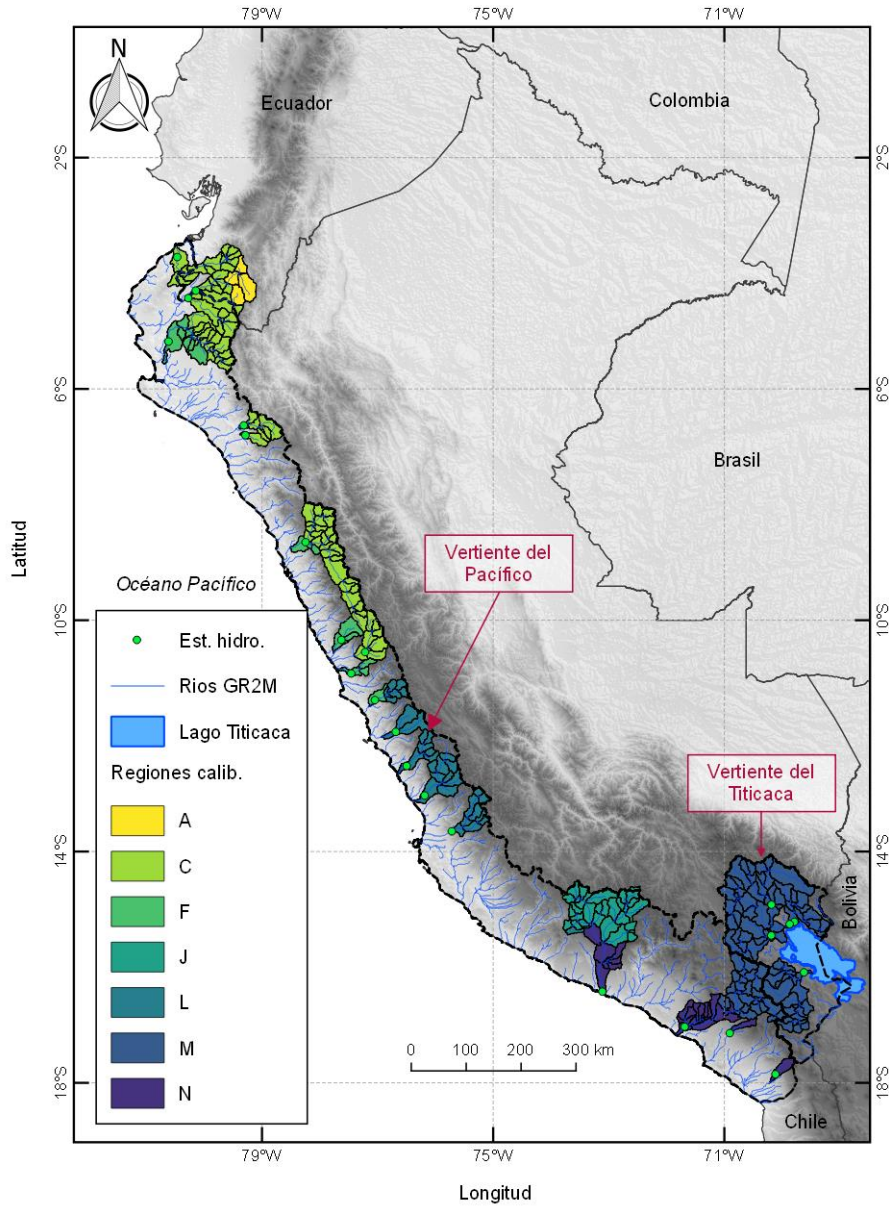


Figura 3.3 Flujograma de trabajo del Monitoreo Sequías Hidrológicas

### 3.2.1 Modelo hidrológico

En el Perú, la baja cantidad de estaciones hidrométricas y su corto registro dificultan el monitoreo continuo de caudales a nivel nacional. Para ello se generaron caudales mensuales 781 subcuencas de la vertiente del Pacífico y del Titicaca, aplicando el modelo GR2M y un esquema de regionalización conformada por siete regiones de calibración. Los modelos se forzaron con datos de precipitación y evapotranspiración potencial del producto PISCO, y se calibraron y validaron a partir de 21 puntos de control hidrométrico considerando la métrica de Kling-Gupta (KGE). Los resultados muestran valores de  $KGE > 0.50$  durante la regionalización, y una adecuada representación de la estacionalidad de escorrentía. Finalmente, se obtuvieron las salidas del modelo para el periodo enero 1981 – diciembre 2016; y se generó una base de datos grillada de caudales mensuales para subcuencas de la vertiente del Pacífico y del Titicaca denominada PISCO-HyM\_GR2M, tal como se muestra en la siguiente figura; la cual contribuirá, entre otros fines, al monitoreo de sequías hidrológicas en el territorio peruano.





**Figura 3.4** Ríos seleccionados para el modelo hidrológico GR2M y sus respectivas cuencas regiones de calibración. (Fuente: Llauca, 2019)

### 3.2.1 Procedimientos para el cálculo de índices de sequía hidrológica

#### 3.2.1.1 Índice de precipitación normal

El IPN es calculado para cada grilla del producto PISCOpm v2.1 precipitación mensual, la normal utilizada para el cálculos de las climatologías es de 1981 al 2010 para cada mes del año y período de acumulación (1, 3, 5, 6, 9 y 12 meses). Luego de obtener el IPN para el mes se realiza el mapeo de las variables a nivel nacional para su difusión.

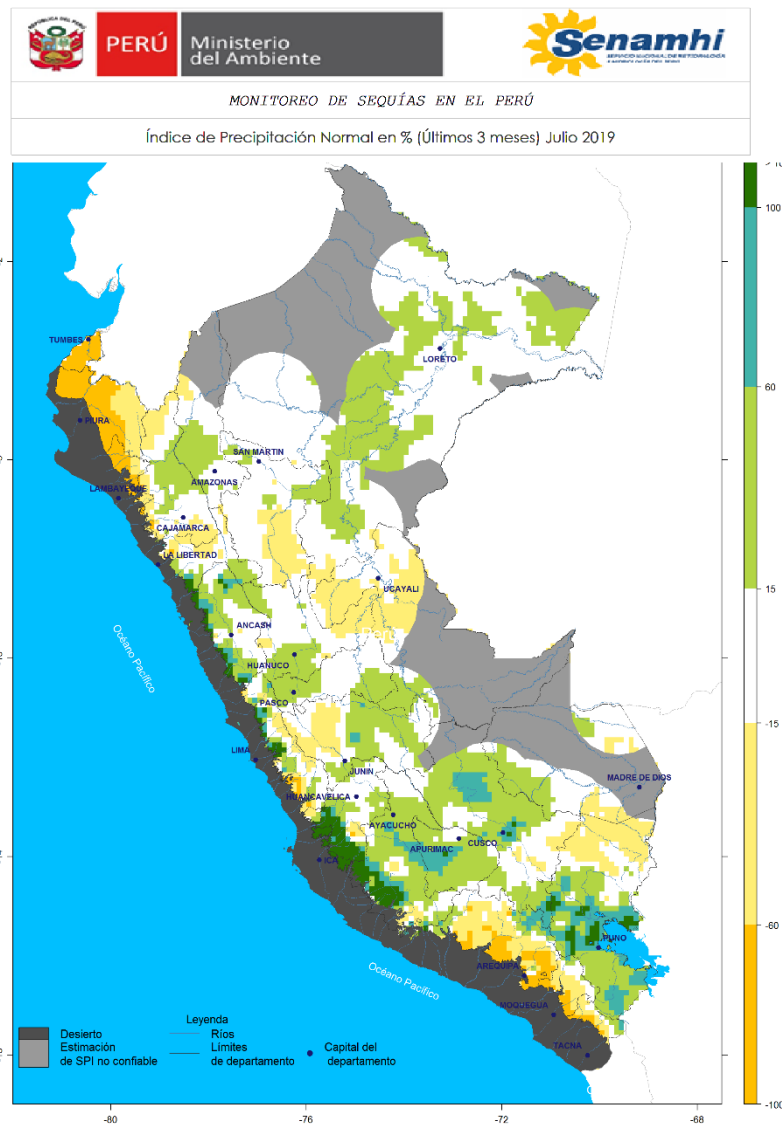


Figura 3.5 Índice de precipitación normal, marzo 2019, 3 meses (Fuente propia).

#### 3.2.1.2 Anomalías de escorrentía potencial

El AEP es calculado para cada grilla del producto PISCOpm v2.1 precipitación mensual, la normal utilizada para el cálculos de las climatologías es de 1981 al 2010 para cada mes del año y período de acumulación de 5 meses. Luego de obtener el AEP para el mes actual se realiza el mapeo de las variables a nivel nacional para su difusión.

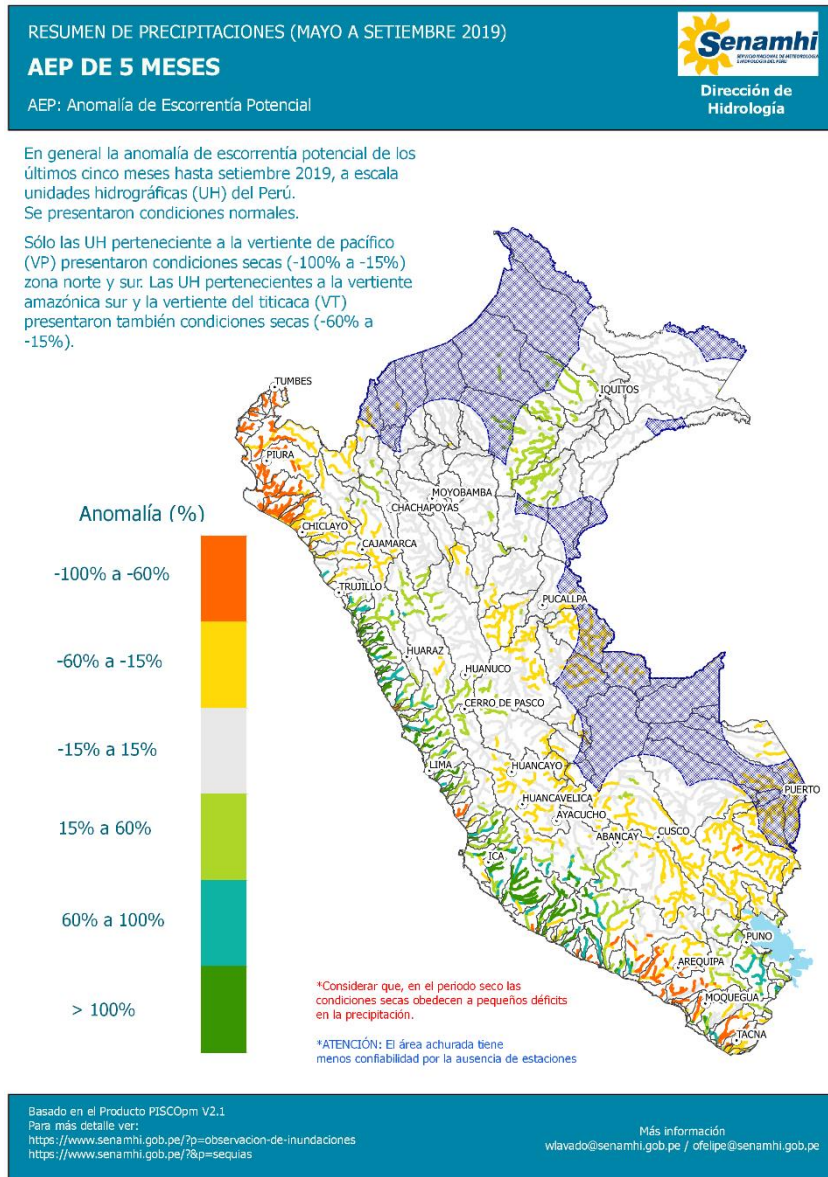




Figura 3.6 Anomalía de escurrimiento potencial, setiembre 2019, 5 meses (Fuente propia).

### 3.2.1.3 Índice de precipitación estandarizado

El SPI es calculado para cada grilla del producto PISCOpm v2.1 precipitación mensual, la normal utilizada para el cálculos de las climatologías es de 1981 al 2010 para cada mes del año y período de acumulación (1, 3, 6, 9,12 y 24 meses). Luego de obtener el SPI para el mes actual se realiza el mapeo de las variables a nivel nacional para su difusión.

	<b>PERÚ</b>	Ministerio del Ambiente	
MONITOREO DE SEQUÍAS EN EL PERÚ			
Índice Estandarizado de Precipitación (SPI - 3 meses) Marzo 2019			

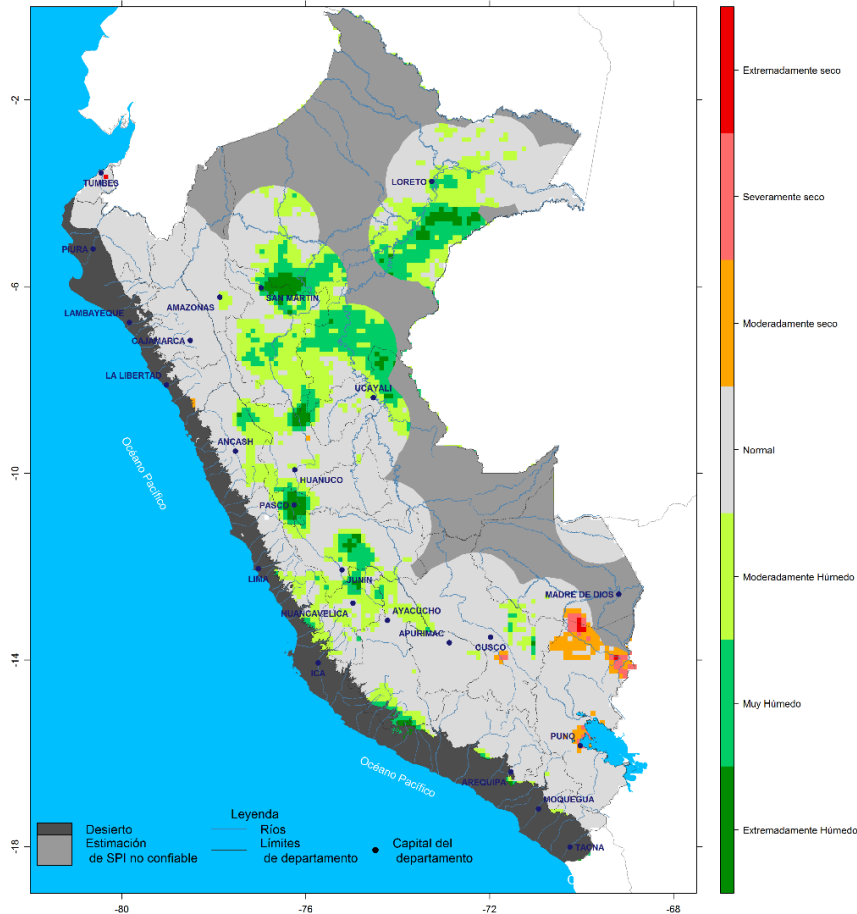


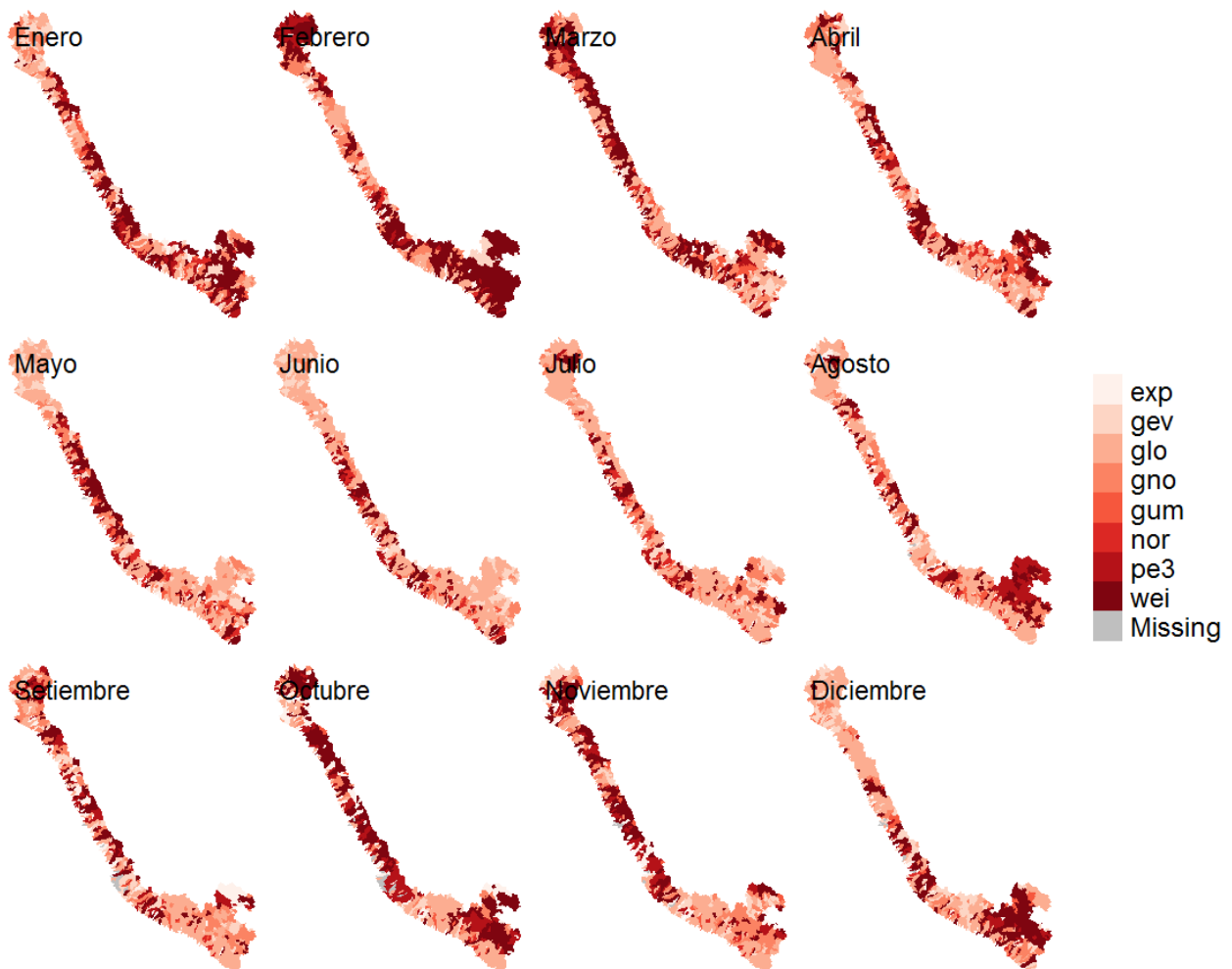
Figura 3.7 Índice estandarizado de precipitación, marzo 2019, 3 meses (Fuente propia).

### 3.2.1.4 Índice de caudal estandarizado

Una vez obtenido las series de caudales mensuales a partir de modelo hidrológico, se calcula la función de distribución de probabilidad (FDP) que mejor se ajuste a los series de tiempo (Figura 3.8) en este análisis se observa la variabilidad de la función de probabilidad de ajuste a cada serie de tiempo y para cada mes del año.

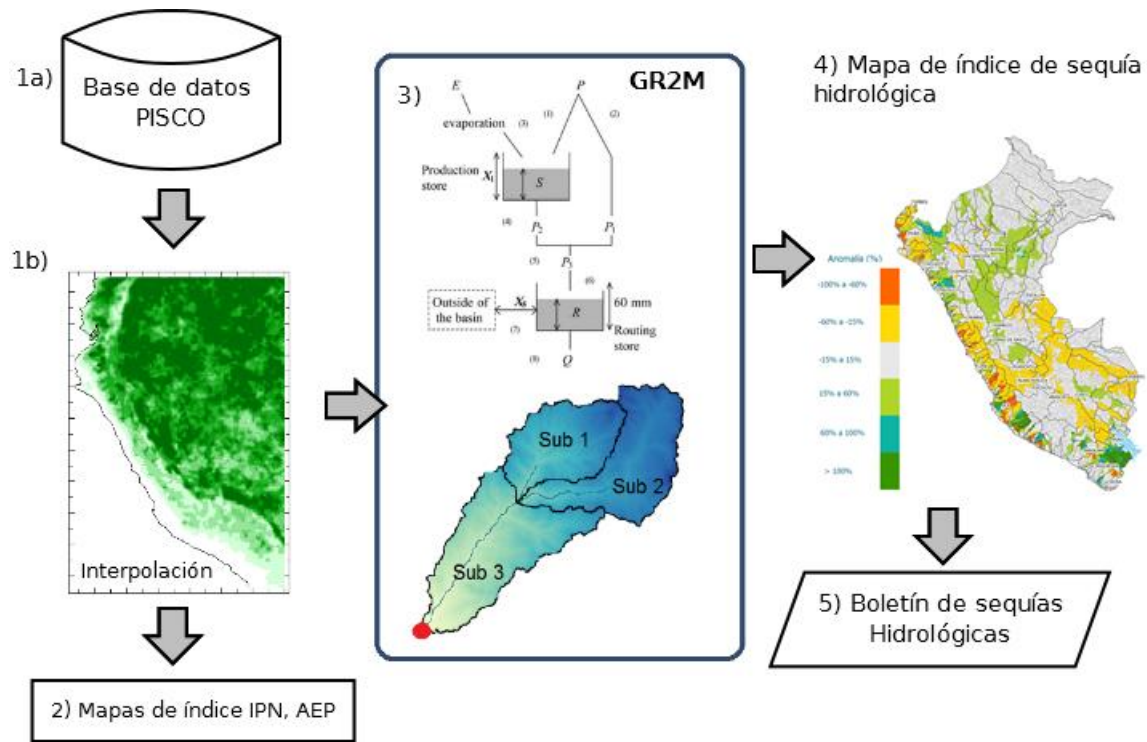
Para diciembre y enero el patrón es muy parecido, se ajusta a una Weibull en el sur de VP y VT. Mientras en el norte de la VP se ajusta a una GEV. Del mismo modo, para los meses de Febrero a Abril los patrones de FDP se comparten de manera muy similar. Para la estación de otoño-invierno de Mayo a Agosto se repite el mismo patrón de FDP. A excepción de agosto en la VT donde el patrón cambia. Finalmente, para los meses de setiembre a noviembre se repite el patrón de distribución de FDP.

SSI para las distintas cuencas. La escala temporal es de 1 mes para el monitoreo de sequía hidrológica. Asimismo, este resultado es comparado con el SSI de estaciones hidrológicas para 21 ríos del Perú. Posteriormente, se analiza los resultados y se redacta el boletín de sequía, enfocado en la vertiente del pacífico y del Titicaca.

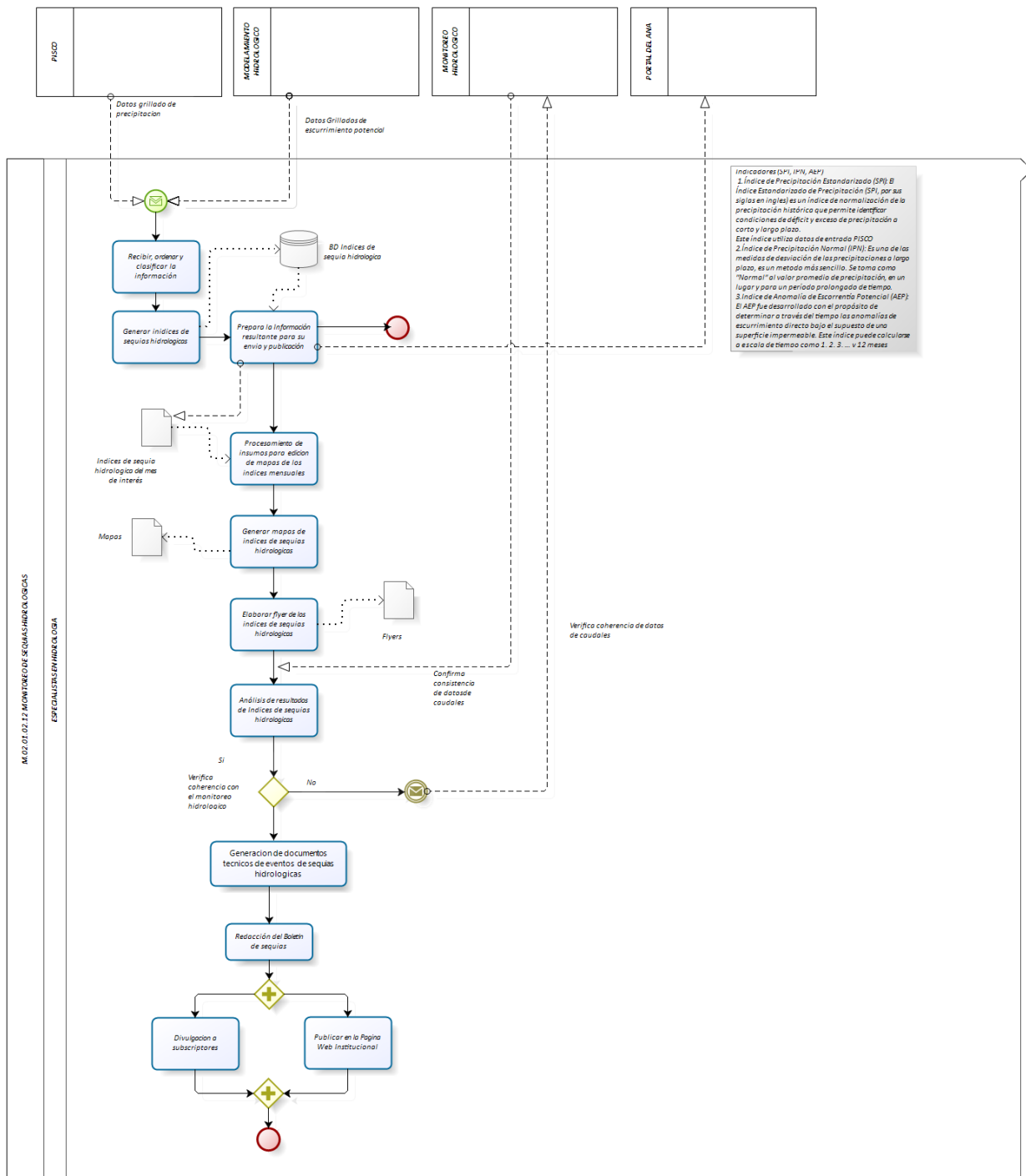


**Figura 3.8** Patrón espacial de la distribución de probabilidad para cada mes por cuencas (Fuente propia).

Los datos de caudales mensuales son actualizados con la base PISCOpm 2.1 siguiendo el esquema (Figura 3.9).



**Figura 3.9** Esquema metodológico del Modelamiento hidrológico para la generación de caudales mensuales (Fuente propia)



**Figura 3.10** Proceso de Monitoreo de sequía hidrológicas en el SENAMHI  
 Fuente: Elaboración propia

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Boletín de sequía hidrológico

El Boletín hidrológico nacional es una publicación de periodicidad mensual; muestra información sobre la situación actual del déficit hídrico y anomalías de precipitación. Es actualizado y publicado mensualmente en la página WEB del SENAMHI.

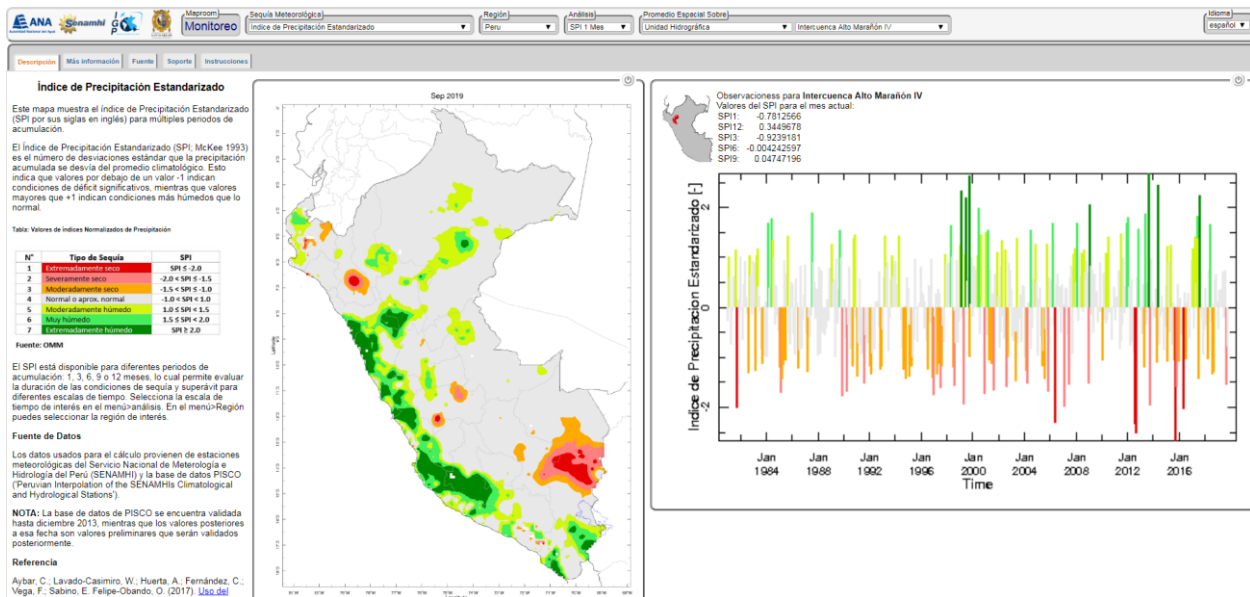


### 4.2 Participación en políticas pública, gestión de riesgo y desastre y observatorio nacional

#### 4.2.1 Observatorio nacional de sequías

El observatorio Nacional de Sequías (ONS) ha sido creado desde el 2014 con el objetivo de monitorear las sequías a nivel nacional desde un enfoque multidisciplinario; asimismo cuenta con un grupo especializado de trabajo GET – sequías, las cuales integra varias instituciones públicas y la academia; ANA, IGP, SENAMHI, PRODUCE, MINAGRI, INDECI, CENEPRED, UNMSM, entre otras. Asimismo, el GET-sequias se encarga de mantener informada a la población y autoridades; a su vez asesora, recomienda y coordina acciones para reducir los impactos de la sequía.





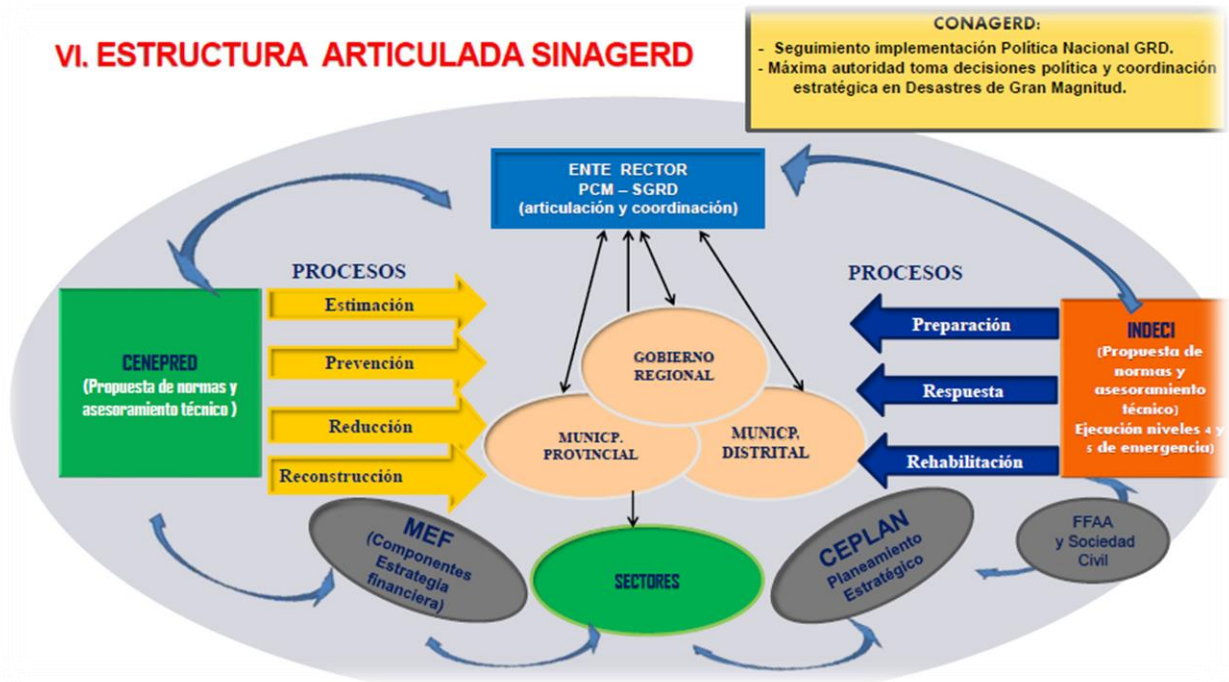
**Figura 4.2** Observatorio Nacional de Sequías. SPI-1 mes en base a PISCOpm V2.1  
Fuente: <http://ons.snirh.gob.pe/Peru/maproom/Monitoring/Meteorological/SPI.html>

#### 4.2.2 Participación en gestión de riesgo y desastre

La gestión de riesgo y desastre (GRD) como Política de Estado se realizó en julio del 2002. Suscrito como acuerdo nacional con la participación de las principales organizaciones políticas y de la sociedad civil (CENEPRED). Esto marcó un gran hito en el país sobre todo en la defensa civil (INDECI) que se centrada más en la asistencia y recuperación después que sucediera el desastre y no en la prevención y/o mitigación. Sin embargo, a partir del 2011 se desarrolla un enfoque moderno de GRD, se crea la Ley del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo y Desastre (SINAGERD) como una sistema interinstitucional, sinérgico, descentralizado, transversal y participativo. La Ley define 5 lineamientos concentrados en la definición de: (i) El Plan Nacional de Gestión del Riesgo y Desastre; (ii) La Estrategia de Gestión Financiera del Riesgo de Desastres; (iii) Los Mecanismos de coordinación, Decisión, Comunicación y Gestión de la información en situaciones de impacto de desastres; (iv) El Sistema Nacional de Información para la GRD; y la (v) Radio nacional de Defensa Civil y del Medio Ambiente. Esto permite al Estado trabajar transversalmente con los entes del gobierno pudiendo incorporar a los entes locales. Dado esta línea base se elaboró el Plan Nacional de Gestión de Riesgo de Desastre (PLANGERD) 2014-2021. Donde la sequía es considerada como un peligro de origen natural y uno de los principales peligros del país.

El SINAGERD está compuesto por los siguientes actores: (i) Presidencia de Consejo de Ministros (PCM), quien asume la función de ente rector; (ii) Consejo Nacional de GRD, presidido por el Presidente de la República; (iii) CENEPRED; (iv) INDECI; (v) Gobiernos regionales y locales; (vi) Centro Nacional de Planeamiento Estratégico (CEPLAN); (vii) Entidades públicas, fuerzas armadas, Policía Nacional del Perú, entidades privadas y sociedad civil. La creación de CENEPRED actúa como organismo preventivo y las instituciones técnicas científicas como apoyo técnico en control del análisis, prevención y modelización de escenarios. Por otro lado INDECI, actúa en forma coordinada con actores locales y descentralizados en las acciones de atención y rehabilitación.

## VI. ESTRUCTURA ARTICULADA SINAGERD



**Figura 4.3** Estructura del SINAGERD

Fuente: Secretaría de Riesgo y Desastre

## 5. PROPUESTA DE SISTEMAS DE ALERTA DE SEQUÍAS EN PERÚ

### 5.1 Sistema de alerta temprana en el Perú

Los sistemas de alerta temprana (SAT) son cruciales para la preparación y mitigación de los efectos de los fenómenos naturales. Asimismo, es un conjunto de capacidades, instrumentos y procedimientos articulados para generar y difundir información de alerta de manera oportuna, con el fin de permitir que las personas, comunidades y organizaciones expuestas a un peligro se preparen y actúen de forma apropiada y anticipada para reducir o evitar la pérdida de vidas (INDECI, 2019) <https://www.indeci.gob.pe/preparacion/sat/sistema-de-alerta-temprana/>.

Existen cuatro componentes en la estructura de un SAT, mediante la R.M.N. 173-2015/PCM el cual se aprobó los “lineamientos para la conformación y funcionamiento de una Red de alerta temprana (RNAT) y la conformación, funcionamiento y fortalecimiento de los SAT”. En este sentido el SENAMHI, como ente generador de información, productos y servicios climatológicos e hidrológicos podría contribuir en las dos primeras componentes del SAT (Figura 5.1).



Figura 5.1 Componentes del Sistemas de alerta temprana; Fuente: INDECI.

### 5.2 Sistema de alerta temprana de sequía hidrológica

#### 5.2.1 Objetivo

Con base en el monitoreo continuo de las variables de precipitación, anomalías de escorrentía potencial, caudales mensuales a partir de estaciones hidrológicas, modelos hidrológicos, datos de almacenamiento de reservorio, pronóstico de caudales mensuales. Se establecen umbrales que permitan la elaboración de informes de preaviso, aviso, alerta y emergencia durante el monitoreo y verificación de los episodios de sequía hidrológica en la vertiente de Pacífico y Titicaca.

#### 5.2.2 Alcance

El protocolo inicia como resultado del déficit de precipitación por cuencas hidrológicas y de índice de sequía hidrológicos y de almacenamiento de reservorios. Para los meses de temporada de lluvia (Octubre - Marzo).

### 5.2.3 Etapas de protocolo de SAT de Sequía hidrológica

Las etapas del protocolo del SAT de sequías establecen las siguientes etapas de preaviso, aviso, alerta y emergencia.

**Tabla 5.1 Etapas de SAT de sequías hidrológicas**

Etapas del SAT Sequías	
Preaviso	
Aviso	
Alerta	
Emergencia	

#### Etapa de monitoreo

Es la etapa donde se realiza el monitoreo de las condiciones hídricas, mapas de déficit o superávit de precipitación y anomalías de escorrentía potencial, acumulados de lluvia decadiaria y vigilancia de caudales con énfasis en la vertientes de pacífico y Titicaca.

En esta etapa de emite el boletín de sequías nacional 12 veces al año en temporadas de lluvia y seca.

#### Etapa de preaviso

Si ocurre a) y b) o a) y c)

- Si durante los meses de época lluviosa se prevé más de un mes con déficit de precipitación en la VP o VT.
- Si el cálculo de anomalías de escorrentía potencial se encuentra en déficit o menos de la normal en la VP o en la VT.
- Si existe déficit de caudales mensuales en la VP o VT en categoría moderada.

#### Etapa aviso

Si ocurre a) y b) o a) y c)

- Si existe advertencia del EL NIÑO fase cálida (probabilidad mayor a 60%).
- Si existe durante los meses de la época lluviosa uno o más meses con déficit de precipitación o anomalías de escorrentía potencial negativas.
- Si existe déficit de caudales mensuales en la VP o VT (categoría severa y extrema).

#### Etapa de alerta

Si al menos 2 de estas condiciones ocurre:

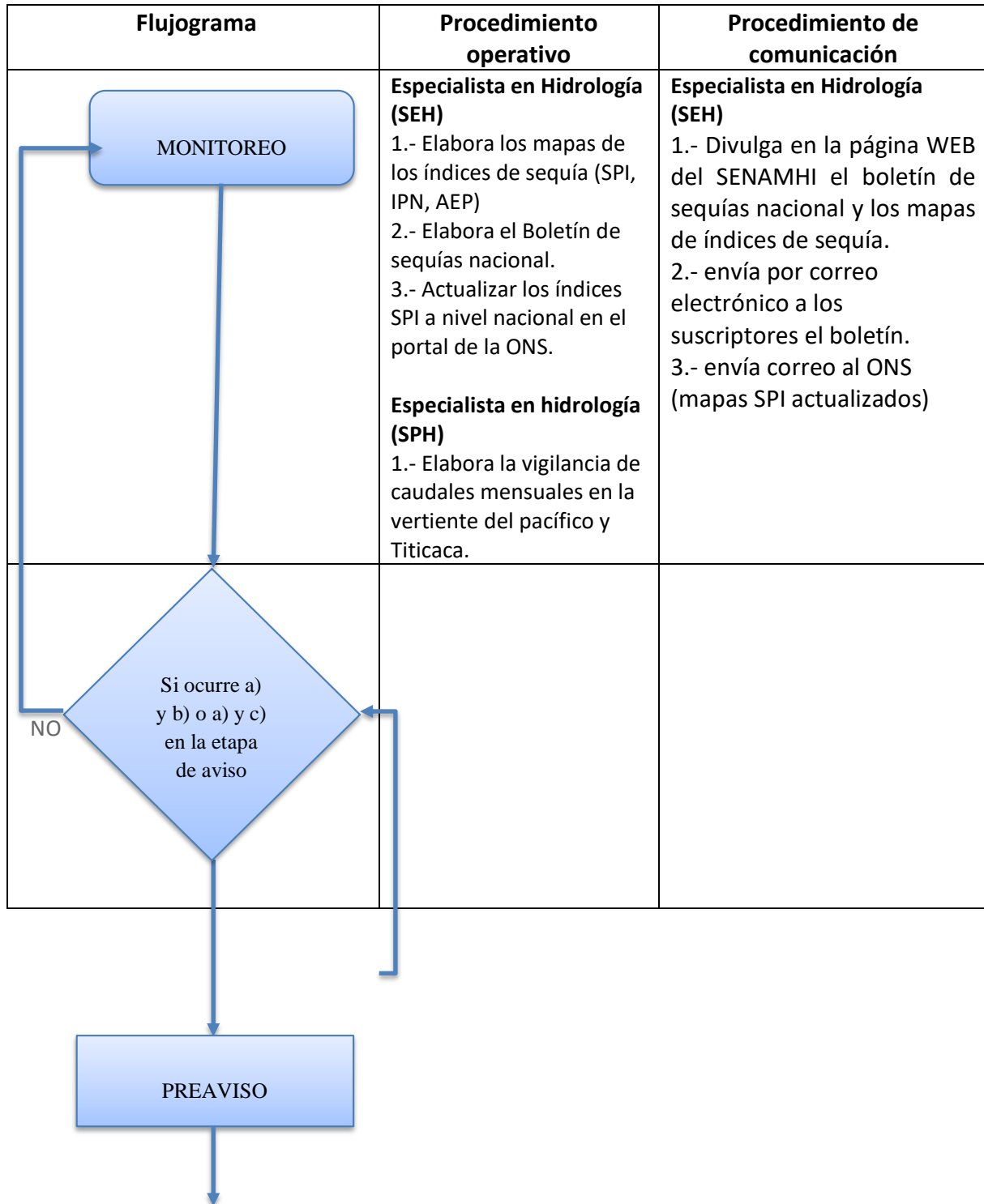
- El fenómeno del NIÑO ya está desarrollándose en fase cálida
- Se está desarrollando una sequía meteorológica y agrícola acumulados de 3 meses
- Existe déficit de caudales mensuales de los modelos hidrológicos y de estaciones hidrométricas.
- El almacenamiento de los principales reservorios del país está por debajo del 50% de su capacidad de almacenamiento.

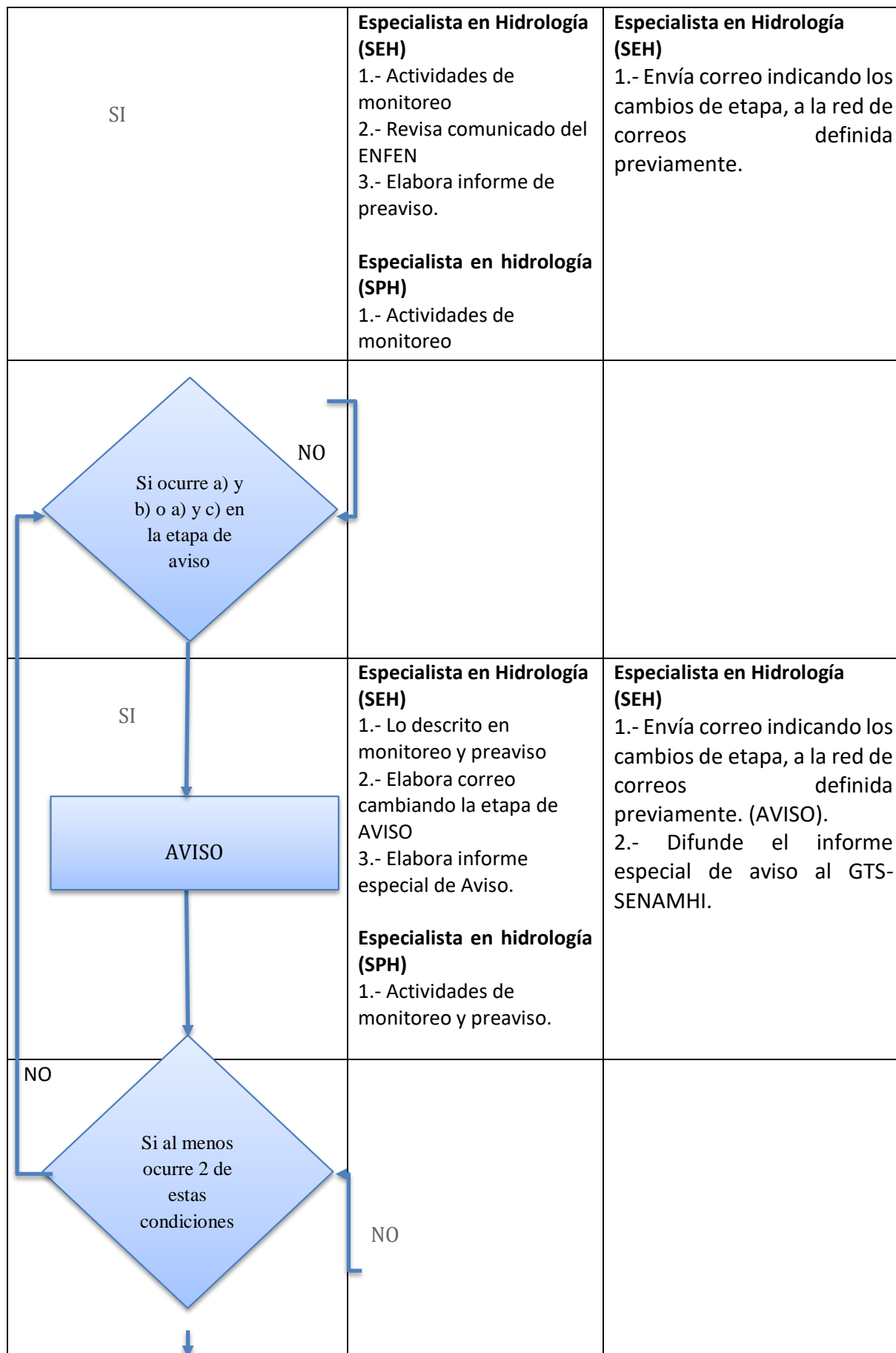
#### Etapa emergencia

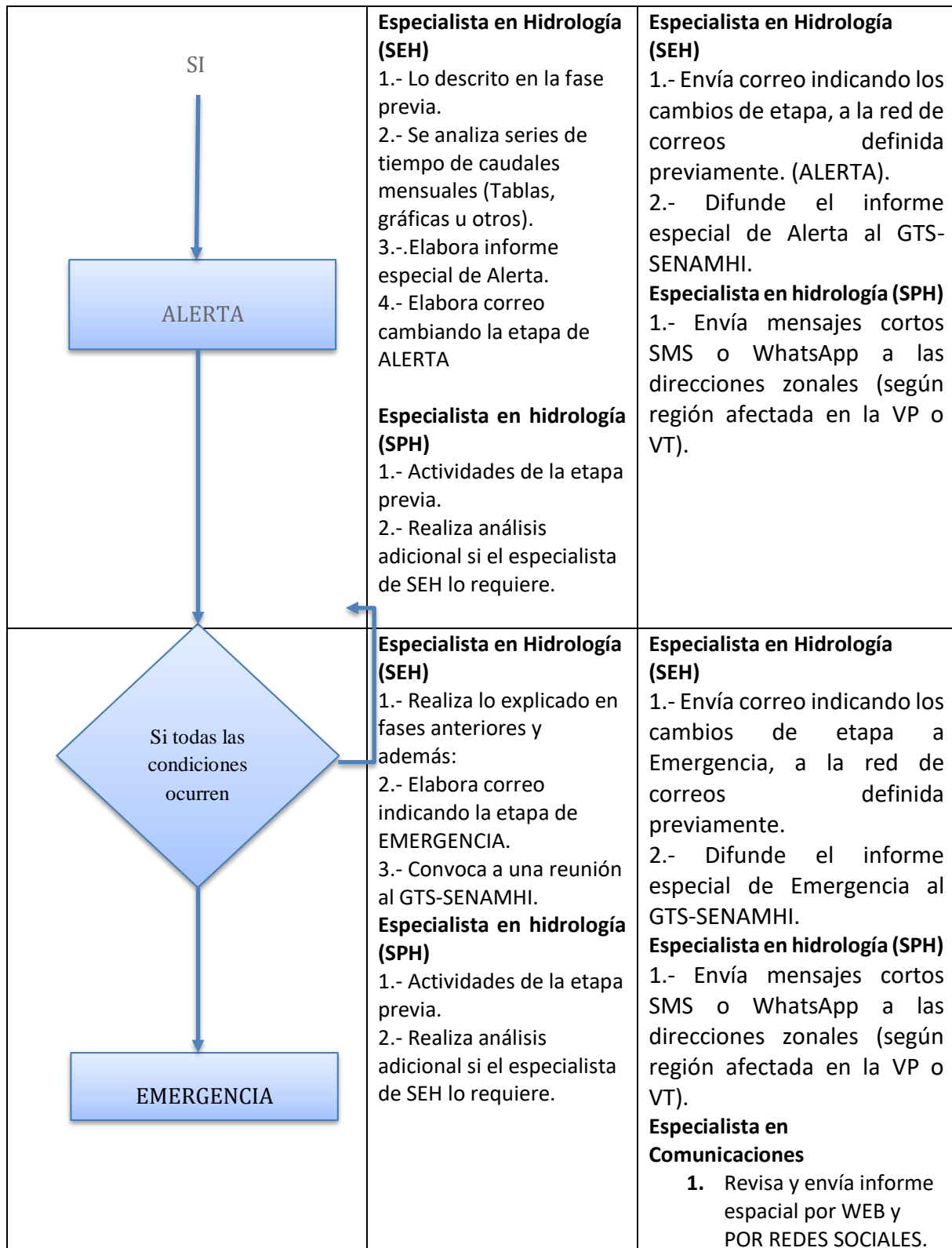
Si todas las condiciones ocurre:

- El fenómeno del NIÑO ya está desarrollándose en fase cálida

- b) Se está desarrollando una sequía meteorológica y agrícola más de 3 meses
- c) Existe déficit de caudales mensuales de los modelos hidrológicos y de estaciones hidrométricas.
- d) El almacenamiento de los principales reservorios del país está por debajo del 50% de su capacidad de almacenamiento.







## 6. CONCLUSIONES

- Se presentó la metodología actual sobre la elaboración del Monitoreo de sequías en el Perú por el Servicio Nacional Meteorología e Hidrología. El cual consolida una serie de procedimientos, metodologías de la implementación de índices de sequía para su monitoreo. Proporciona un esquema organizado para ser aplicado a nivel nacional o regional. Asimismo, sirve de entrada al sistema de alerta temprana para sequías hidrológicas. El uso de esta información se extiende a prácticamente todos los sectores socioeconómicos, con los que permite atender programas, planes y estrategias nacionales de la gestión de las sequías asimismo para la GRD.
- La sequía es un fenómeno de lenta evolución, es difícil determinar cuándo nos encontramos en un episodio de sequía, en muchos casos se detecta cuando ya está presente, llegando a tener impactos negativos en el país. Por ello, es necesario mejorar los procesos de monitoreo de sequías, con implementación de nuevos índices, pronósticos y mejorar los umbrales del monitoreo y SAT de sequías.
- Con la información de pronósticos mensuales de precipitación es posible implementar pronósticos de índices de sequía hidrológicos para mejorar el sistema de vigilancia de la sequía. Asimismo, este producto podría mejorar los protocolos de SAT de sequías en los niveles de aviso, alerta y emergencia.
- Con la información hidrológica y climatológica confiable es posible avanzar hacia la perspectiva de SAT integrado para sequías agrícolas e hidrológicas ya que en el país existe una fuerte actividad agrícola, pecuaria y de recursos hídricos las mismas que abastecen a los agricultores y uso poblacional a nivel nacional.



## 7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar una plataforma que sirva para la visualización y análisis del monitoreo de sequías y del SATS. Que sea útil para los usuarios, tomadores de decisión, entre otros.
- La participación de instituciones técnicas como el Ministerio de agricultura, energía, producción, salud y otros sectores mejoraría la definición de umbrales de los índices con información de impactos históricos de los episodios de sequía e implementar un repositorio de impactos para los episodios futuros. Por ello, se recomienda continuar con la participación del SENAMHI en el grupo especializado de trabajo de sequías y Observatorio Nacional de Sequías.

## 8. REFERENCIAS

- Abramowitz, M., & Irene, S. (1965). *Handbook of Mathematical Functions*. Washington.
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2019). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 0(0), 1. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Banco Central de la Reserva del Perú. (1992). Memoria 1992.1. Recuperado a partir de <http://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Memoria/1992/Memoria-BCRP-1992-1.pdf>
- Banco Central de Reserva del Perú. (1990). Memoria 1990 Produccion precios. Recuperado a partir de <http://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Memoria/1990/Memoria-BCRP-1990-1.pdf>
- Banco Central Reserva del Perú. (1982). Memoria 1982. *Memorias*. Recuperado a partir de <http://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Memoria/Memoria-BCRP-1982.pdf>
- CMRRD. (2004). Diagnóstico para la Estrategia Nacional de Reducción de Riesgos para el Desarrollo Volumen 1: Aspectos Físico Espaciales. Recuperado a partir de [http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA\\_PUBLICAR/PCM/Diagnostico\\_Estrategia\\_Nacional\\_de\\_Reducion\\_de\\_Riesgos\\_-\\_Vol.1\\_Aspectos\\_fisicos.pdf](http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA_PUBLICAR/PCM/Diagnostico_Estrategia_Nacional_de_Reducion_de_Riesgos_-_Vol.1_Aspectos_fisicos.pdf)
- Donald A. Wilhite, Michel J. Hayes, Cody Knutson, and K. H. S. (2001). Planning for drought: moving from crisis to risk management. Nebraska: American Water Resources Association.
- Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P., & Huang, Y. (2013). A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23(1), 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.010>
- Endara S., Acuña J., Vega F., Febre C., Correa K., A. G. (2019). Caracterización espacio temporal de la sequía en los departamentos altoandinos del Perú. Lima, Perú: SENAMHI. Recuperado a partir de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-78.pdf>
- FAO. (1986). Guidelines : land evaluation for extensive grazing. Roma: FAO Soils Bulletin.
- Gutiérrez, A. P. A., Engle, N. L., De Nys, E., Molejón, C., & Martins, E. S. (2014). Drought preparedness in Brazil. *Weather and Climate Extremes*, 3, 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2013.12.001>
- Keyantash, J., & Dracup, J. A. (2002). The quantification of drought: An evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1167–1180. <https://doi.org/10.1093/bams/83.8.1167>
- Lagos, P., Silva, Y., Nickl, E., Mosquera, K., Lagos, P., Silva, Y., ... Ni, K. M. El. (2008). El Niño? related precipitation variability in Peru, (3), 231–237.
- Lobato-Sánchez, R. (2016). El monitor de la sequía en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*,

7(5), 197–211.

- Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *AMS 8th Conference on Applied Climatology*, (January), 179–184. <https://doi.org/citeulike-article-id:10490403>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2009). Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty, *114*(December 2008), 1–18. <https://doi.org/10.1029/2008JD010986>
- Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, *23*(5), 881–897. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1>
- Organización meteorologica mundial. (2006). Vigilancia y alerta temprana de la sequía. *Información meteorologica y climatica para el desarrollo agricola sostenible.*, 1006, 28.
- Palmer, W. C. (1965). *palmer.pdf*. Washington.
- Perú, B. C. de la R. del. (2015). Memoria 2016. Recuperado a partir de <http://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Memoria/2015/memoria-bcrp-2015-1.pdf>
- Pinkayan, S. (1966). CONDITIONAL PROBABILITIES OF OCCURRENCE OF WET AND DRY YEARS OVER A LARGE CONTINENTAL AREA, *12*(April).
- Shukla, S., & Wood, A. W. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, *35*(2), 1–7. <https://doi.org/10.1029/2007GL032487>
- UNESCO, & CAZALAC. (2018). *Atlas de Sequías de América Latina y el Caribe 2018*. Recuperado a partir de [www.unesco.org/open-access/terms-use](http://www.unesco.org/open-access/terms-use)
- Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., & Morán-Tejeda, E. (2012). Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, *17*(2), 318–332. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000433](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433)
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). The Role of Definitions Understanding : the Drought Phenomenon : The Role of Definitions. Water.
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1987). UNDERSTANDING THE DROUGHT PHENOMENON : THE ROLE OF DEFINITIONS. Donald, A., Wilhite, Easterling Willam, E., Deobarah, A., (Eds.), *Planning of Drought: Towards a Reduction of Societal Vulnerability*, Westview Press, Wood, Boulde.
- World Meteorological Organization. (1986). Report on drought and countries affected by drought during 1974-1985. WMO/TD- N° 133; WCP- N° 118.
- Yevjevich, V. (1967). August 1967 23, (August).
- Zink, M., Samaniego, L., Kumar, R., Thober, S., Mai, J., Schafer, D., & Marx, A. (2016). The German drought monitor. *Environmental Research Letters*, *11*(7). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074002>

