

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“OPERATIVIDAD DEL MONITOREO Y PRONÓSTICO  
METEOROLÓGICO DE CONDICIONES ATMOSFÉRICAS  
FAVORABLES A INCENDIOS FORESTALES EN EL PERÚ”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL  
TÍTULO DE:**

**INGENIERA METEORÓLOGA**

**VANNIA JAQUELINE ALIAGA NESTARES**

**LIMA – PERÚ**

**2021**

---

**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**

**“OPERATIVIDAD DEL MONITOREO Y PRONÓSTICO  
METEOROLÓGICO DE CONDICIONES ATMOSFÉRICAS  
FAVORABLES A INCENDIOS FORESTALES EN EL PERÚ”**

Presentado(a) por:

**VANNIA JAQUELINE ALIAGA NESTARES**

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título profesional de:

**INGENIERA METEORÓLOGA**

**Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:**

---

Mg. Sc. Eusebio Cisneros Tarmeño  
PRESIDENTE

---

Mestre. Jerónimo García Villanueva  
MIEMBRO

---

Mg. Alessandri Canchoa Quispe  
MIEMBRO

---

Ing. Franklin Delio Unsihuay Tovar  
ASESOR

## **DEDICATORIA**

*A mi mamá, mi abuelita y abuelito (QEPD). Lo que soy es gracias a ustedes.*

*A Diego y mi familia, por su amor y apoyo incondicional.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Al grupo de trabajo de Incendios Forestales de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), con quienes venimos trabajando arduamente en el tema desde el 2017.*

*Al SENAMHI, que permite mi desempeño profesional y el uso de los resultados de este proyecto para la obtención de mi título profesional de Ingeniera Meteoróloga.*

*A Nelson Quispe, director de la oficina en la que trabajo, quien me confió la responsabilidad del tema de incendios forestales.*

*A Franklin Unsihuay, mi asesor en este trabajo, por su apoyo, confianza y cariño.*

*A Diego Rodríguez, por su constante apoyo en el trabajo conjunto que desempeñamos.*

# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN EJECUTIVO</b> .....	<b>viii</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>II. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
2.1. Incendio Forestal (IF).....	4
2.2. Tipos de Incendios Forestales .....	4
2.3. Causas de los Incendios Forestales .....	5
2.4. Consecuencias Ecológicas de los de Incendios Forestales: .....	5
2.5. La Meteorología y los Incendios Forestales: .....	6
2.6. Incendios Forestales en el Perú.....	7
2.7. Detección de Focos de Calor utilizando Imágenes de Satélite .....	11
2.8. Causas de los incendios forestales en el Perú .....	13
2.9. Consecuencias de los incendios forestales en el Perú.....	13
2.10. Variación Temporal de los Incendios Forestales en Perú .....	15
2.11. Relación entre el ENSO y los Incendios Forestales en Sudamérica .....	17
2.12. <i>Fire Weather Index</i> (FWI) o Índice Meteorológico de Incendios Forestales .....	18
<b>III. METODOLOGÍA</b> .....	<b>20</b>
3.1. Reuniones con instituciones vinculadas al análisis y manejo de IF.....	20
3.2. Identificación de Variables Meteorológicas de superficie .....	21
3.3. Determinación de Patrones Sinópticos de Circulación Atmosférica .....	22
3.4. Aplicación del Índice Meteorológico de Incendios Forestales ( <i>Fire Weather Index</i> ) (FWI).....	22
3.5. Generación de Productos y Servicios.....	23
3.6. Publicación en la web de los productos y servicios .....	23
3.7. Presentaciones interinstitucionales.....	23

<b>IV. RESULTADOS .....</b>	<b>25</b>
4.1. Contexto Laboral .....	25
4.2. Determinación y Análisis del Problema .....	27
4.3. Proyecto de Solución.....	27
4.4. Evaluación del Proyecto .....	28
<b>V. ANÁLISIS DE RESULTADOS E IMPACTOS .....</b>	<b>62</b>
<b>VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>66</b>
6.1. Conclusiones .....	66
6.2. Recomendaciones .....	66
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>67</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>70</b>
<b>IX. ASEGURAMIENTO.....</b>	<b>75</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Lista de los países de Sudamérica y sus respectivas áreas; media anual de los focos de calor, área dividida por la media anual de los focos de calor (densidad), y frecuencia de incidencia. ....	15
Tabla 2: Media mensual de número de focos de calor registrados por el satélite AQUA en los países de América del Sur entre el 2003 y 2017. ....	17
Tabla 3: Acumulados, normales y anomalías mensuales y semanales de precipitación previa al IF en estaciones seleccionadas. Período considerado para la normal: 1981-2010. ....	35
Tabla 4: Cantidad y porcentaje de IF entre junio y noviembre del 2016, según nivel de FWI y área afectada. ....	38
Tabla 5: Nivel de importancia del escenario climatológico. La escala varía del 1 al 5. Donde 1, indica poca importancia y 5, muy importante para los incendios forestales. ....	52
Tabla 6: Nivel de importancia a las probabilidades. ....	52
Tabla 7: Escala final del potencial atmosférico asociado a incendios forestales. ....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: La gran tríada del fuego .....	6
Figura 2: Serie histórica de IF en el Perú desde el 2003 al 2016. ....	8
Figura 3: Mapa de peligro por incendios forestales. ....	9
Figura 4: Distribución espacial de las Áreas Naturales Protegidas y el resumen en cada categoría de probabilidad de alerta de fuego, para cada país. ....	10
Figura 5: Mapa del peligro del fuego para los andes peruanos. ....	11
Figura 6: Código de colores para la interpretación RGB del producto Temperatura de Fuego de GOES-16.....	12
Figura 7: Composición de color verdadero de la imagen diaria MODIS del satélite Aqua capturada el 24 de agosto del 2010. La cuenca del Amazonas en el lado este de la Cordillera de los Andes está completamente cubierta de humo por la quema de biomasa. ....	14
Figura 8: Transporte de la pluma de humo desde la cuenca del Amazonas hacia los Andes centrales. (a) Formación de una mega-pluma de humo resultante de la unión de emisiones de quema de biomasa (puntos rojos representan las ubicaciones de los eventos de fuego; las nubes aparecen de color blanco brillante y el humo aparece en color grisáceo). Las imágenes son del MODIS diario en la composición de color verdadero del satélite Aqua capturadas el 23 de agosto del 2010. (b) La densidad de las trayectorias muestran el patrón promedio de las trayectorias de las masas de aire durante la temporada de quema de biomasa desde el 2000 hasta el 2016. Las trayectorias de las masas de aire en un paso de cada 6 horas fueron analizadas cada septiembre (pico de la estación de fuego en Sudamérica) desde el 2000 hasta el 2016, resultando en un total de 2040 trayectorias. Estas fueron obtenidas usando el modelo HYSPLIT/NOAA. La densidad de trayectorias fue obtenida usando el software ARCGIS. Los círculos azules representan los glaciares en Sudamérica y las estrellas negras indican el origen de las trayectorias localizadas dentro de las regiones con una mayor densidad de eventos de fuego. ....	14

Figura 9: Número anual de focos de calor detectado por el Satélite AQUA en Chile y Perú entre el 2003 y 2017. La línea de regresión indica tendencia lineal positiva en ambos países. ....	16
Figura 10: Variación interanual del área afectada por incendios forestales en los andes peruanos. FUENTE: Manta, Kometter and Navia. (2018). ....	16
Figura 11: Flujo del proceso para la obtención del Índice Meteorológico de Incendios Forestales – FWI. ....	19
Figura 12: Mapa de distribución espacial de las localidades afectadas por incendios forestales seleccionados en el norte del Perú (estrellas) y las estaciones meteorológicas convencionales seleccionadas de SENAMHI (puntos negros). ....	29
Figura 13: Gráficos de variación temporal diaria de Precipitación, Evaporación, Horas de Sol, Humedad Relativa y Relación de Mezcla a las 13 horas, Temperatura máxima (T <sub>máx</sub> ) y Temperatura Mínima (T <sub>mín</sub> ) durante 3 meses en las estaciones meteorológicas de (c) Cutervo y (d) Incahuasi. El período de ocurrencia del incendio forestal está resaltado por un cuadro naranja. ....	30
Figura 14: Mapa de distribución espacial de las localidades afectadas por incendios forestales seleccionados en el centro del Perú (estrellas) y las estaciones meteorológicas convencionales seleccionadas de SENAMHI (puntos negros). ....	31
Figura 15: Gráficos de variación temporal diaria de Precipitación, Evaporación, Humedad Relativa y Relación de Mezcla a las 13 horas, Temperatura máxima (T <sub>máx</sub> ) y Temperatura Mínima (T <sub>mín</sub> ) durante 3 meses en la estación meteorológica de (c) Yanahuanca y (d) San Rafael. El período de ocurrencia del incendio forestal está resaltado por un cuadro naranja. ....	32
Figura 16: Mapa de distribución espacial de las localidades afectadas por incendios forestales seleccionados en el sur del Perú (estrellas) y las estaciones meteorológicas convencionales seleccionadas de SENAMHI (puntos negros). ....	33
Figura 17: Gráficos de variación temporal diaria de Precipitación, Evaporación, Horas de Sol, Humedad Relativa y Relación de Mezcla a las 13 horas, Temperatura máxima (T <sub>máx</sub> ) y Temperatura Mínima (T <sub>mín</sub> ) durante 3 meses en las estaciones meteorológicas de (c) Curahuasi (d) Pauza. El período de ocurrencia del incendio forestal está resaltado por un cuadro naranja. ....	33

Figura 18: (a) Corriente en chorro y circulación de vientos en 250 hPa [ms <sup>-1</sup> ], (c) Humedad Relativa [%] y vientos promedio [ms <sup>-1</sup> ] entre 400 y 600 hPa, y (b, d) sus anomalías.; correspondientes al 18 de noviembre de 2016. La región afectada por el incendio forestal está dentro del recuadro azul. ....	36
Figura 19: Correlación entre el FWI y el área de cobertura vegetal afectada por todos los IF. ....	38
Figura 20: Mapa de precipitación acumulada diaria pronosticada. ....	39
Figura 21: Mapa de temperatura máxima diaria pronosticada. ....	39
Figura 22: Mapa de humedad relativa a las 13 horas (mínima del día) pronosticada (sombreado, %). Focos de calor del satélite polar (puntos rojos). ....	40
Figura 23: Mapa de conteo diario de días con ausencia de lluvia. Valor mínimo considerado: 5mm. ....	40
Figura 24: Mapa del Índice meteorológico de Incendios Forestales (FWI). ....	41
Figura 25: Imagen de Temperatura del Fuego - composición RGB de GOES-16, para las 14:00UTC del 24 de julio de 2020. ....	41
Figura 26: Meteorograma para los siguientes 15 días de temperatura y humedad a 2m, velocidad y dirección del viento a 10m, precipitación y contenido de humedad a 5km para la grilla que representa a 15.75°S – 71.75°W. ....	42
Figura 27: Ejemplo del pronóstico eventual emitido el 19 de octubre de 2020 para un IF ocurrido en la localidad de Río Tambo – Junín. ....	43
Figura 28: Modelo de un pronóstico diario emitido el 27 de noviembre de 2020. ....	45
Figura 29: Modelo de un pronóstico semanal emitido el 19 de noviembre de 2020. ....	48
Figura 30: Modelo de pronóstico trimestral, emitido a inicios de diciembre de 2020. ....	51
Figura 31: Visualización del FWI en la plataforma web de IF de SENAMHI. El recuadro rojo permite visualizar la ruta cómo se encuentra el producto. ....	55
Figura 32: Visualización del pronóstico numérico de variables meteorológicas en la plataforma web de IF de SENAMHI. a) Forma de mapas diarios. b) Forma de meteorogramas puntuales. El recuadro rojo permite visualizar la ruta cómo se encuentra el producto. ....	56
Figura 33: Visualización de los mapas de ausencia de lluvia en la plataforma web de IF de SENAMHI. El recuadro rojo permite visualizar la ruta cómo se encuentra el producto. ....	57
Figura 34: Visualización de las imágenes de satélite del GOES16 en plataforma web de IF de SENAMHI. El recuadro rojo permite visualizar la ruta cómo se	

	encuentra el producto. El recuadro azul permite identificar la guía de interpretación del producto.....	58
Figura 35:	Visualización de los datos en tiempo real en la plataforma web de IF de SENAMHI. El recuadro rojo permite visualizar la ruta cómo se encuentra el producto.....	59
Figura 36:	Visualización de los boletines en la plataforma web de IF de SENAMHI. El recuadro rojo permite visualizar la ruta cómo se encuentra el producto. ....	60
Figura 37:	Visualización de los archivos en la plataforma web de IF de SENAMHI. El recuadro rojo permite visualizar la ruta cómo se encuentra el producto. ....	61
Figura 38:	Flujograma del proceso operativo para el monitoreo y pronóstico de condiciones atmosféricas favorables a IF en Perú.....	62
Figura 39:	Organigrama que describe los procesos, productos, servicios y responsables del sistema de Vigilancia Atmosférica de Incendios Forestales en el Perú. ....	63

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo describe el proceso, así como los resultados de la Vigilancia Atmosférica de Incendios Forestales en el Perú que se realiza en la Subdirección de Predicción Meteorológica (SPM) de la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica (DMA) del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

Los incendios forestales en Perú han ido en aumento en los últimos años y principalmente desde el 2016, vienen presentando problemas tanto ecológicos, como socioeconómicos; por ello surgió la necesidad de establecer un sistema de vigilancia de variables atmosféricas que propicien la ocurrencia y propagación de estos, con el objetivo de reducir los riesgos en las regiones vulnerables al peligro generado por la ocurrencia de incendios forestales, mediante la anticipación de ellos.

Para implementar el sistema de Vigilancia Atmosférica se siguieron pasos tales como: reuniones de coordinación con las instituciones vinculadas al control y manejo de incendios forestales y así identificar las necesidades de estas; identificación de las variables meteorológicas responsables de las condiciones óptimas para la ocurrencia de incendios forestales; identificación de patrones sinópticos que favorezcan la ausencia de humedad, y por ende, los incendios forestales; cálculo y análisis del Índice Meteorológico de Incendios Forestales (FWI, por sus siglas en inglés) y su aplicación en el Perú; generación de productos y servicios especializados para incendios forestales; publicación de estos en la plataforma web; y las presentaciones institucionales para la mejora continua de los productos y servicios especializados brindados.

Mediante la aplicación de los pasos mencionados en el párrafo anterior, actualmente se cuenta con una plataforma web denominada “Vigilancia Atmosférica de Incendios Forestales”, en la cual se realiza el monitoreo y pronóstico de condiciones favorables para la ocurrencia de incendios forestales. Esta plataforma tiene actualización en tiempo real y cuenta con productos generados de forma automática, como aquellos que son realizados con análisis de profesionales meteorólogos, ingenieros forestales, entre otros. Está disponible para el público en general, pero es utilizada, principalmente, por las instituciones tomadoras de decisiones.

**Palabras clave:** Incendios Forestales, Vigilancia Atmosférica, SENAMHI.

## I. INTRODUCCIÓN

La realización del presente trabajo fue motivada por la necesidad de obtener el título profesional de Ingeniera Meteoróloga, y así, mejorar el desarrollo profesional y aspirar a cargos jerárquicos, tanto en el ámbito público como privado.

Actualmente, la autora de este trabajo se desempeña profesionalmente en el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), el cual es un organismo público especializado fundado en 1969. Tiene como misión el proveer productos y servicios meteorológicos, hidrológicos y climáticos confiables y oportunos para contribuir a la reducción de los impactos negativos producidos por los fenómenos naturales de origen hidrometeorológico (SENAMHI, 2021). En este sentido, uno de los servicios meteorológicos que brinda SENAMHI es el pronóstico de tiempo, cuyo responsable es la Subdirección de Predicción Meteorológica (SPM) de la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica (DMA).

Las principales actividades que desempeña un egresado en meteorología en la SPM son: la vigilancia diaria de variables y condiciones meteorológicas en el Perú; la realización del pronóstico del tiempo en diversas escalas temporales y espaciales, desde un pronóstico a muy corto plazo (de 1 a 2 horas), corto plazo (3 a 24 horas) y plazo extendido (días); la emisión de avisos meteorológicos de un evento o fenómeno meteorológico que genere peligro a la población; la difusión de los pronósticos y avisos meteorológicos a la población mediante los medios de comunicación; la atención a usuarios, de forma personalizada, en dudas meteorológicas; la realización de boletines informativos de condiciones del tiempo pasado y futuro con fines específicos; la realización de informes técnicos de situaciones meteorológicas en el pasado que generaron problemas socioeconómicos; así como la realización y/o participación en investigaciones científicas básicas y/o aplicadas sobre la dinámica de sistemas atmosféricos.

Por otro lado, uno de los problemas principales, que afecta actualmente al Perú, es la ocurrencia de Incendios Forestales (IF), y aunque la causa principal para su generación es la negligencia de la actividad humana en el uso del fuego (99%), principalmente utilizado para

el cambio de uso de suelo, con la finalidad de mejorar el pastoreo o de remover restos de la cosecha y otros desperdicios (Manta y León, 2004; Manta, Kometter and Navia, 2018), y el 1% restante es atribuido a causas naturales como la ocurrencia de rayos sin presencia de lluvia, exceso de calentamiento de semillas que contienen aceites naturales o erupciones volcánicas; su propagación y control se encuentra directamente relacionada al comportamiento de variables atmosféricas.

En ese contexto, en el área de la SPM de la DMA de SENAMHI se identificó la necesidad de generar productos y servicios especializados destinados al monitoreo y pronóstico de condiciones atmosféricas que favorecen la ocurrencia y propagación de IF. Es por ello que se conformó el grupo de trabajo de Vigilancia Atmosférica de Incendios Forestales, el cual es liderado por la autora de este trabajo y está conformado por meteorólogos con experiencia en pronóstico del tiempo y en gestión de riesgo de desastres.

Para ello, es necesario que el meteorólogo que conforma este grupo de trabajo utilice lo aprendido en su formación académica, respecto a herramientas y técnicas de pronóstico del tiempo, dinámica y termodinámica de los sistemas atmosféricos, meteorología sinóptica y estadística climatológica, principalmente.

Este grupo viene trabajando desde el 2017 hasta la actualidad y ha desarrollado una serie de actividades que permitieron obtener: un Estudio de Condiciones Atmosféricas Favorables a la Ocurrencia de Incendios Forestales en Perú, la evaluación del índice Meteorológico de Incendios Forestales (FWI, por sus siglas en inglés) aplicado a Perú, y una plataforma web con productos actualizados de monitoreo en tiempo real y pronóstico meteorológico y climático de condiciones atmosféricas que condicionarían la ocurrencia de IF.

En ese sentido, en la presente monografía de Titulación por Suficiencia Profesional se han planteado los siguientes objetivos:

**Objetivo general:**

Describir el proceso operativo de la vigilancia atmosférica de condiciones favorables a la ocurrencia y propagación de incendios forestales en el Perú.

**Objetivos específicos:**

- Describir el comportamiento de las principales variables atmosféricas y el principal patrón sinóptico que favorece la ocurrencia y propagación de incendios forestales en el Perú.
- Describir el comportamiento del Índice Meteorológico de Incendios Forestales en el Perú.
- Mostrar y explicar los productos especializados de monitoreo y pronóstico atmosférico de incendios forestales que son realizados por el grupo de trabajo de Vigilancia Atmosférica de Incendios Forestales y se encuentran en la plataforma web de SENAMHI.

## **II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Incendio Forestal (IF)**

SERFOR (2018) define a un IF como aquel fuego no deseado de cualquier origen, que no es estructural, que se propaga sin control en los recursos forestales, causando daños ecológicos, económicos y sociales.

Los IF, en los últimos años, se presentan en todos los 18 departamentos de los andes peruanos y la temporada de ocurrencia se ha prolongado de 4 a 12 meses al año, siendo agosto, septiembre y octubre los meses con mayor frecuencia de ocurrencia de incendios al año (Manta, Kometter and Navia, 2018).

### **2.2. Tipos de Incendios Forestales**

De acuerdo a la capa vegetal que afectan, CONAF (2011) y CONAFOR (2010) clasifican a los IF de la siguiente forma:

#### **2.2.1. Superficiales:**

Son los más comunes y queman el sotobosque (arbustos, gramíneas, árboles jóvenes, pastizales, hojas, ramas, ramillas, etc). Alcanzan hasta metro y medio de altura. Su velocidad de propagación dependerá del tipo y condición del combustible, topografía y tiempo atmosférico.

#### **2.2.2. Aéreo, de copas o de corona:**

Se originan producto de un fuego de superficie, que luego avanza por las copas de los árboles y/o arbustos. La velocidad de propagación y desprendimiento calórico es alta, convirtiéndose en los más destructivos, peligrosos y difíciles de controlar. Consumen toda la vegetación.

#### **2.2.3. Subterráneos:**

El fuego quema raíces, la capa de humus del suelo, la micro-fauna y las raíces. Se caracteriza por una combustión sin llamas, con poco humo, y se propaga bajo el suelo. La velocidad de propagación en este caso es lenta.

En un incendio forestal generalmente se presentan combinaciones de los tipos de IF señalados, y casi nunca se da solo un tipo de incendios.

### **2.3.Causas de los Incendios Forestales**

USAID (2015) en SERFOR (2018) manifiesta que en el Perú las causas de los IF se diferencian por regiones:

#### 2.3.1. Región Amazónica:

Debido al crecimiento del sector agrícola comercial en cultivos como la palma africana, cacao y frutales, los agricultores cambian el uso del suelo de las tierras boscosas para ampliar la actividad agrícola. Asimismo, la apertura de carreteras motiva la agricultura migratoria, que a la par de generar deforestación, también causan IF en las áreas deforestadas.

#### 2.3.2. Región Andina:

La quema de pastos para su renovación anual, como fuente de alimento para el ganado, es una de las causas principales de los IF en esta región. Asimismo, la quema provocada en áreas boscosas para ampliar terrenos agrícolas genera IF en ecosistemas andinos, donde la composición vegetal favorece la propagación del fuego. Por otro lado, regiones de humedales también sufren IF, por fuegos provocados por la quema de su especie principal, la totora.

#### 2.3.3. Región Interandina (ceja de selva):

El uso de fuego en el manejo de las “chacras” genera los principales IF en esta región; ello asociado a su complicada topografía favorece la propagación rápida de los mismos y la dificultad en su control.

#### 2.3.4. Región Norte:

La actividad apícola en esta región tiene una práctica común de efectuar quemadas a la altura de la base de los árboles para ahuyentar abejas, acción que genera IF en los bosques secos. Esto, asociado a la quema de rastrojos y pastos para la preparación del terreno para la agricultura o quema de residuos sólidos en los botaderos informales, también genera IF.

### **2.4.Consecuencias Ecológicas de los de Incendios Forestales:**

De acuerdo a CONAF (2011), las principales causas de los IF son las socioeconómicas, también generan consecuencias ecológicas como:

Cambios en el Tiempo y Clima: Cambios en los regímenes de viento, disminución de la humedad ambiental, incremento de la temperatura, aumento de la radiación solar y el efecto invernadero.

Cambios en el Suelo: Deterioro de las propiedades físicas y cambio en las propiedades químicas y biológicas del suelo, destrucción del estrato de materia orgánica no incorporada y erosión de los suelos.

Agua y Cuencas Hidrográficas: Alteración en los cursos de agua, escurrimiento superficial de agua, alteración del ciclo hidrológico, deterioro en la calidad del agua, crecida de ríos y generación de inundaciones.

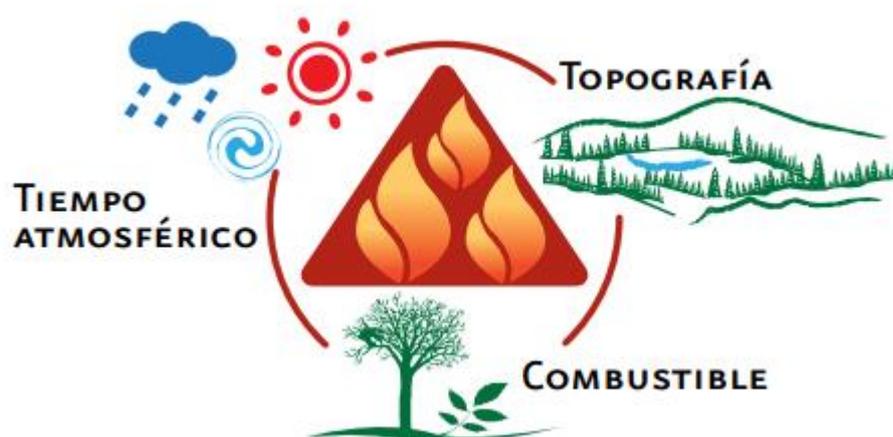
Vida Silvestre: Destrucción de formaciones vegetales, migraciones de animales, desequilibrios ecológicos y debilitamiento de ecosistemas.

Aire y Atmósfera: alteraciones físico-mecánicas de la atmósfera, incorporación de contaminantes y generación de humo.

### **2.5.La Meteorología y los Incendios Forestales:**

De acuerdo al CONAFOR (2010), para que se produzca un IF se necesitan tres elementos que conforman el triángulo del fuego: calor, oxígeno y combustible.

Y las condiciones que influyen en la forma y propagación del fuego se resumen en la gran tríada conformada por: Tiempo atmosférico, Topografía y Combustible (Figura 1):



**Figura 1:** La gran tríada del fuego  
**FUENTE:** CONAFOR (2010)

Estas condiciones se pueden agrupar en:

Permanentes: Composición de los combustibles, las especies vegetales y la topografía.

Transitorias: Las variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección de viento, así como precipitaciones.

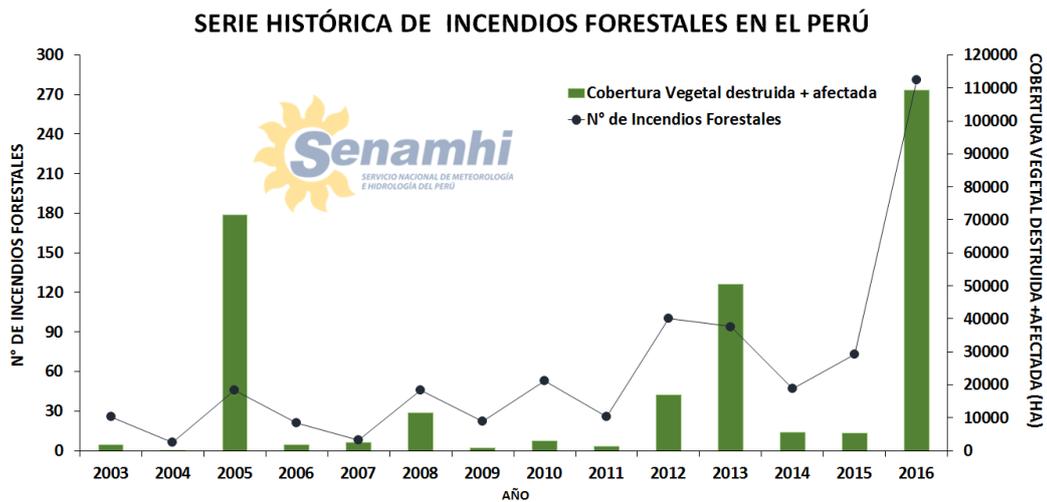
Las condiciones permanentes ayudan a conocer las probabilidades de que el fuego se produzca, y las transitorias permiten prever los alcances del IF.

## **2.6. Incendios Forestales en el Perú**

El Perú tiene alto riesgo de ocurrencia y propagación de IF debido a las prácticas agrícolas relacionadas a la quema de residuos agrícolas para renovación de pastos para ganadería, quema de chacras o ampliación de terrenos agrícolas, en la región altoandina; para la demanda de tierras para actividades extractivas o ampliación de carreteras, en la región Amazónica; y para la actividad apícola, en la región norte (USAID, 2015) en SERFOR (2018).

En este contexto, para que una quema se descontrola y llegue a ocasionar un incendio forestal, son importantes las condiciones atmosféricas (Manta, Kometter and Navia, 2018). Por ello, el pronóstico oportuno de las variables atmosféricas que favorezcan la propagación de un incendio forestal en el Perú, y la difusión adecuada de este pronóstico a las autoridades competentes, cobra cada vez mayor importancia, puesto que de esta manera se puede alertar con anticipación las áreas con condiciones favorables a los IF.

SENAMHI (2018) manifiesta que durante el 2016 se presentó la mayor cantidad de IF registrados en Perú desde el 2003 (Figura 2). Sin embargo, en ese año, el SENAMHI no había realizado ningún estudio previo que haya identificado la relación de las variables meteorológicas en el comportamiento de los IF. A su vez, no se contaba con una plataforma en la que se dispongan, para autoridades y público en general, los productos operativos de pronóstico de condiciones atmosféricas favorables a IF.

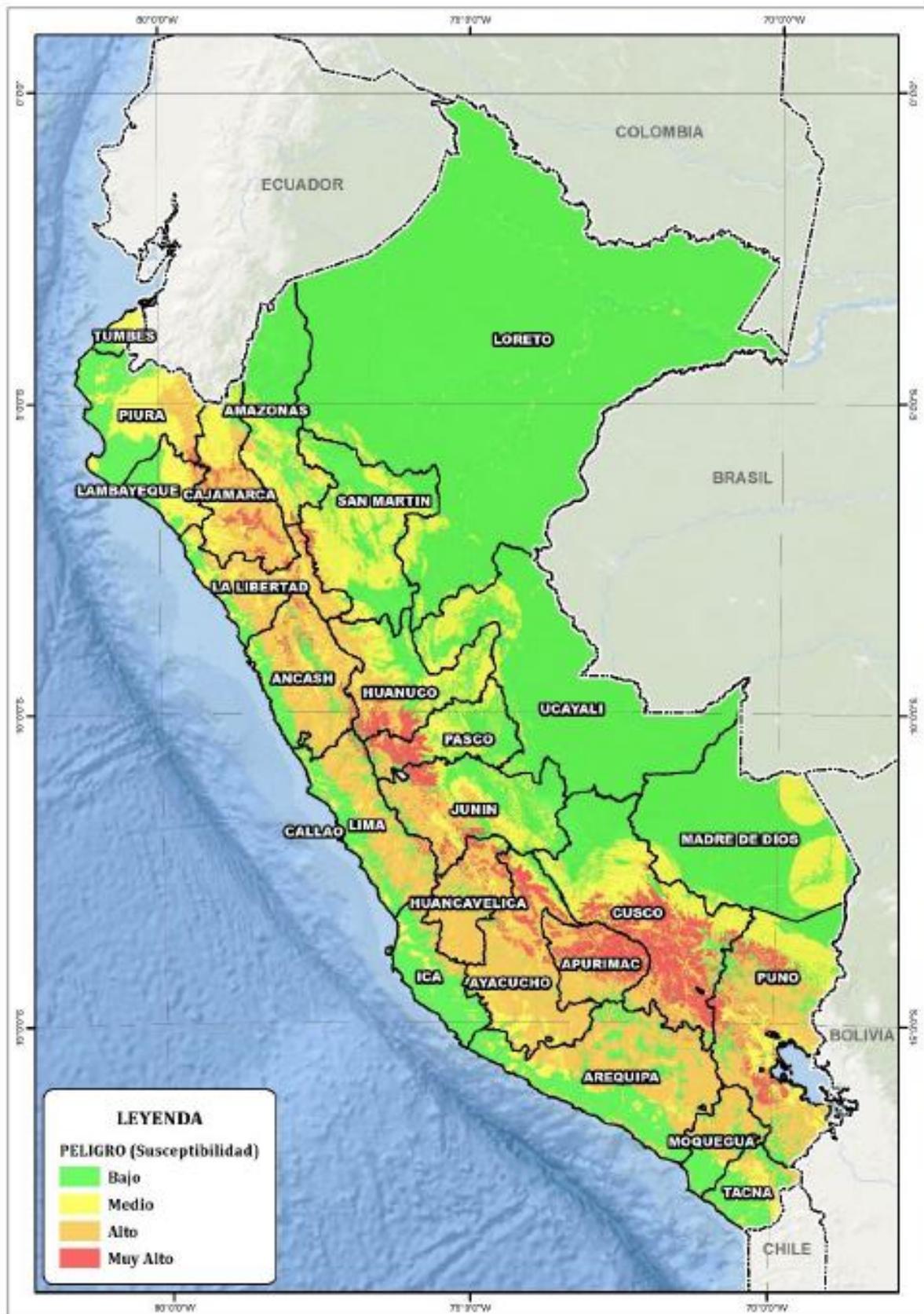


**Figura 2:** Serie histórica de IF en el Perú desde el 2003 al 2016  
**FUENTE:** SENAMHI (2018)

Aunque actualmente los IF pueden ocurrir en cualquier temporada del año (Manta, Kometter and Navia, 2018), la temporada de ocurrencia también ayuda a determinar la extensión y propagación del incendio. En el 2016, en Perú, la mayor cantidad de incendios se presentó en noviembre, puesto que el déficit de precipitaciones en este mes fue cercano al 60%, principalmente en la región norte (SENAMHI, 2018).

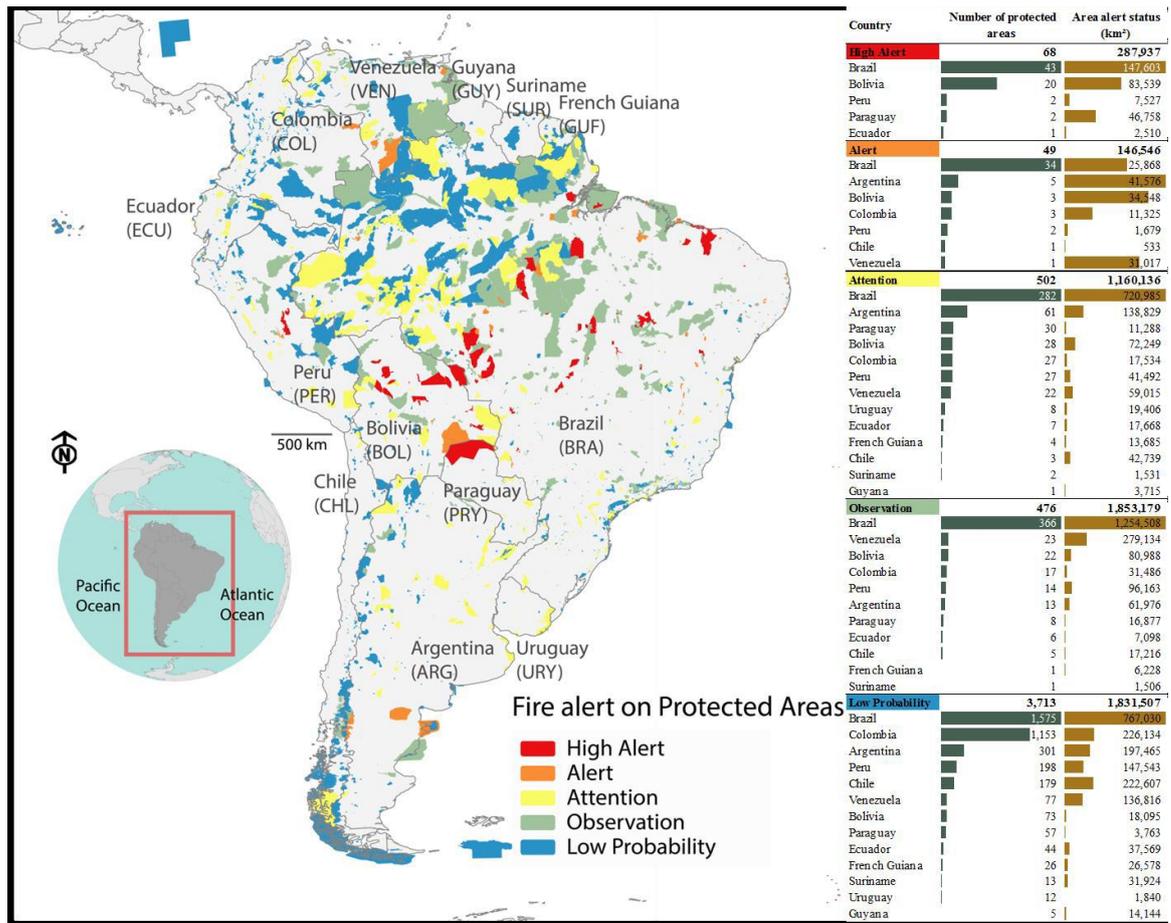
Asimismo, se ha observado que el proceso de transición entre El Niño y La Niña, se comporta como un posible indicador de un incremento severo de IF entre julio y noviembre (Zubieta et al., 2019)

De acuerdo al mapa de peligros por incendios forestales realizado por CENEPRED (2018), las regiones con peligro muy alto son Cusco, Apurímac, Puno, Ayacucho, Junín, Pasco y Huánuco, principalmente (Figura 3).



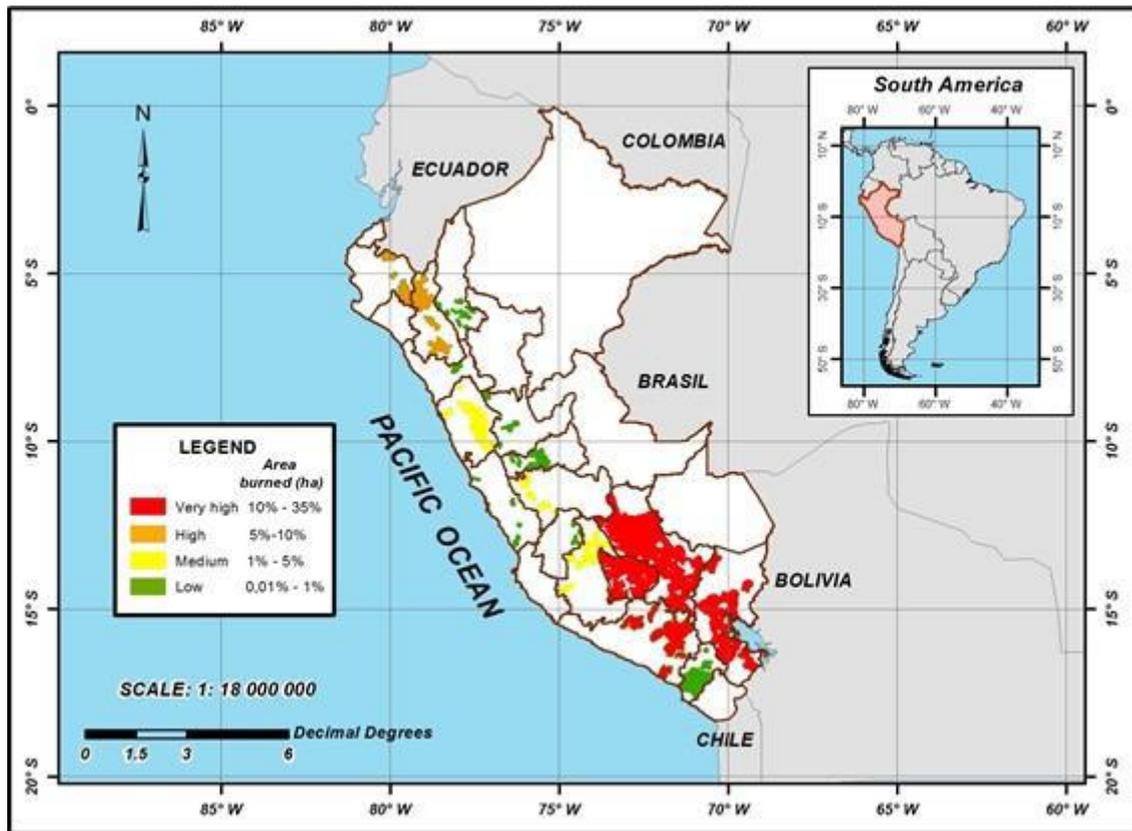
**Figura 3:** Mapa de peligro por incendios forestales  
**FUENTE:** CENEPRED (2018)

De acuerdo a la categorización de la probabilidad de ocurrencia de eventos de fuego en las Áreas Naturales Protegidas (ANP) en Sudamérica, considerando las ocurrencias de fuego, la probabilidad de ocurrencia de precipitación por debajo del promedio y la probabilidad de una mayor temperatura que el promedio, realizada por Anderson, et al. (2020), se concluye que en el Perú se tienen 2 ANP en la categoría de Alerta Alta (**High Alert**), 2 en Alerta (**Alert**), 27 en Atención (**Attention**), 14 en Observación (**Observation**) y 198 en la categoría de Baja Probabilidad (**Low Probability**) (Figura 4).



**Figura 4:** Distribución espacial de las Áreas Naturales Protegidas y el resumen en cada categoría de probabilidad de alerta de fuego, para cada país  
**FUENTE:** Anderson, et al. (2020)

En Manta, Kometter and Navia. (2018) se analizaron datos de incendios forestales registrados entre 1973 y 2014 en 18 departamentos de la sierra peruana, y de los cuales, en 9 de ellos se tiene peligro de fuego muy alto, alto y medio. Sin embargo, son los departamentos de Cusco, Apurímac, Puno y Arequipa que presentan el nivel más alto (Figura 5).



**Figura 5:** Mapa del peligro del fuego para los andes peruanos  
**FUENTE:** Manta, Kometter and Navia. (2018)

## 2.7. Detección de Focos de Calor utilizando Imágenes de Satélite

### 2.7.1. Satélite Geoestacionario

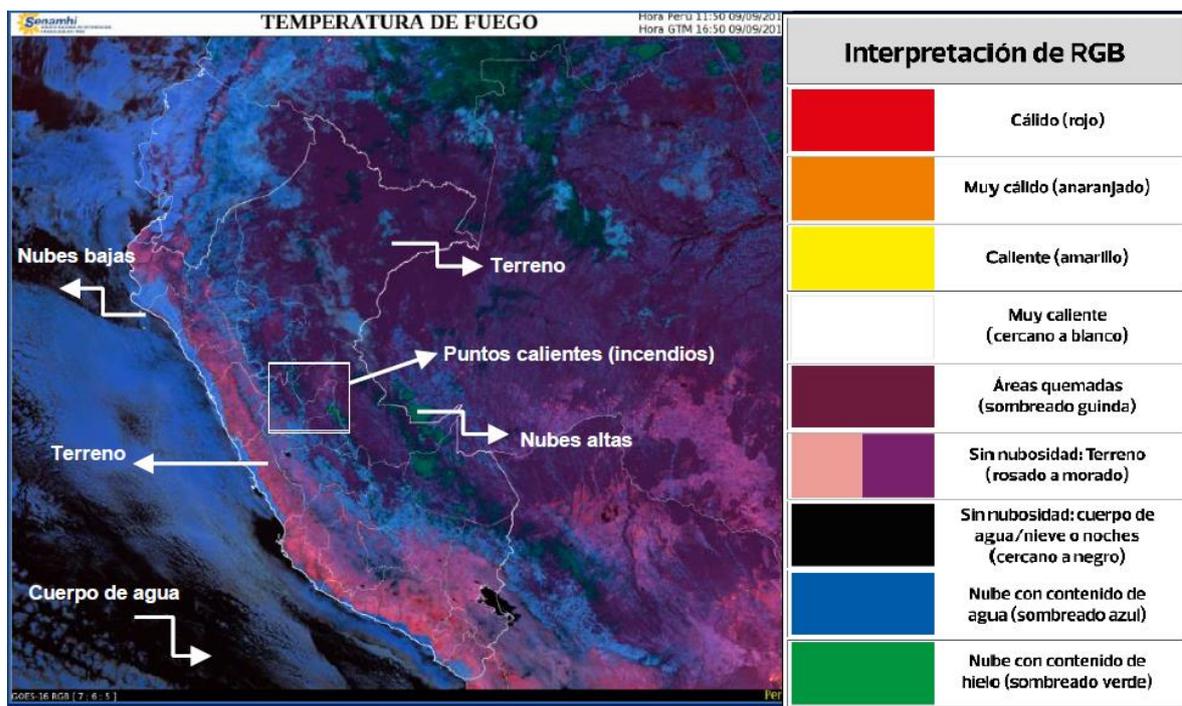
El satélite geoestacionario GOES 16 tiene seis diferentes instrumentos a bordo, y uno de ellos, el *Advanced Baseline Imager* (ABI, por sus siglas en inglés), es un radiómetro de imágenes pasivas multicanal que toma imágenes del tiempo meteorológico, los océanos y su entorno con 16 bandas espectrales (2 visibles, 4 infrarrojos cercanos y 10 infrarrojos) (Losos, 2021). Sin embargo, cada una de estas bandas pueden ser combinadas entre ellas para destacar la presencia y evolución de importantes fenómenos meteorológicos como niebla, polvo, fuego, humo, nieve, etc. A Esta composición de espectros del ABI se le conoce como composición RGB puesto que se combina dos o más canales de ABI, o diferencias de canales u otras operaciones complejas en las componentes Rojo (*Red*), Verde (*Green*) y Azul (*Blue*) (GOES-R, 2021; COMET, 2017).

Una de estas composiciones es la Temperatura de Fuego RGB, el cual permite identificar dónde se encuentran los fuegos más intensos que están ocurriendo y diferenciarlos de los

fuegos menos calientes. Para lograr ello, utiliza la banda 3.9  $\mu\text{m}$  (Red) que contribuye a determinar la superficie terrestre fría o caliente, así como el agua, la nieve y las nubes; la banda 2.2  $\mu\text{m}$  (Green) que contribuye con la identificación de partículas de hielo y agua, así como la nieve y el océano; y la banda 1.6  $\mu\text{m}$  (Blue) que permite identificar las nubes de agua y hielo, así como la nieve y los océanos (VISIT, 2018).

El principal uso de este producto es la detección de los focos de calor asociados a fuego y la estimación de su intensidad. Sin embargo, este producto tiene limitaciones en la identificación de incendios puesto que solo se pueden detectar en áreas con cielo despejado y los oculta cuando hay cielo cubierto. Asimismo, puede dar falsos positivos debido a la temperatura de las superficies áridas o regiones muy secas (VISIT, 2018).

Para la interpretación de estas imágenes, es recomendable considerar el siguiente código de colores (Figura 6) (SENAMHI, 2019):



**Figura 6:** Código de colores para la interpretación RGB del producto Temperatura de Fuego de GOES-16  
**FUENTE:** SENAMHI (2019)

### 2.7.2. Satélite Polar

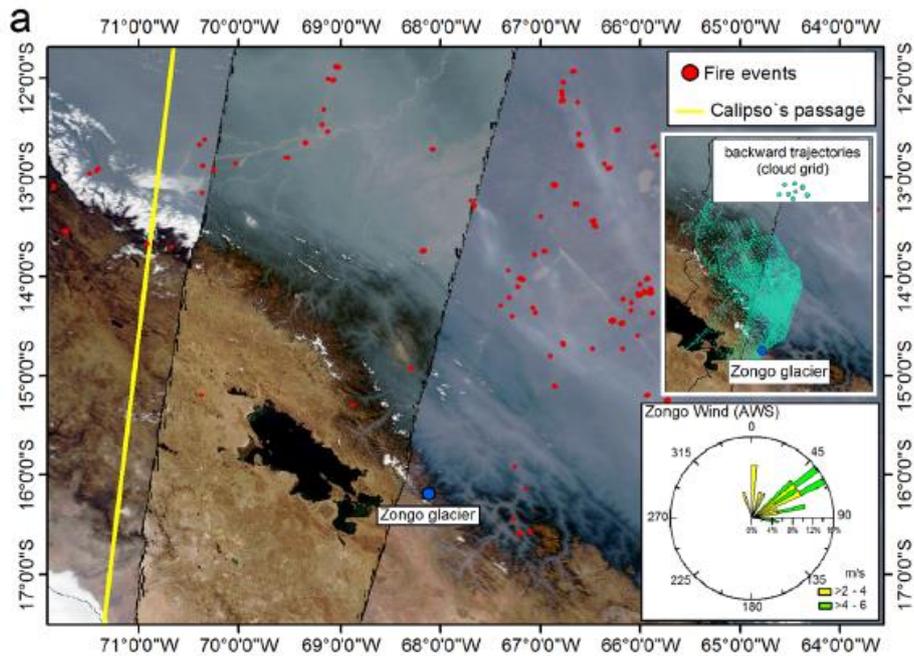
La detección de focos de calor a través de imágenes de satélite utiliza la detección de cuerpos cálidos, superiores a 47°C. Sin embargo, es necesario el uso de algoritmos eficientes, puesto que no todos los cuerpos cálidos detectados representan, exclusivamente, fuego; en algunos casos, los volcanes, o las fábricas pueden representar falsos positivos. Por otro lado, existen limitaciones en la detección del fuego por imágenes de satélite, principalmente por el tamaño o por la duración de un incendio, puesto que si el fuego es muy pequeño no va poder ser detectado por una imagen de satélite AQUA (30m x 1m), o si el fuego inicia y termina en el período de tiempo en el que el satélite no pasó por el área analizada. Adicionalmente a ello, la presencia de nubes densas, así como la ocurrencia de fuego bajo superficies de vegetación densa o en regiones montañosas que son opuestas al área de visión del satélite generarán que la cantidad de incendios forestales detectados en realidad sea mucho menor a todos los ocurridos (White, 2019).

### **2.8.Causas de los incendios forestales en el Perú**

Una de las principales causas del incremento de incendios forestales en el Perú podría ser el incremento en la tasa de deforestación de la Amazonía peruana (White, 2019). Por ejemplo, Allen (2020) menciona que en agosto de 2019 se triplicaron los incendios forestales en la Amazonía en comparación a agosto de 2018 y hubo más incendios que en cualquier agosto desde 2010, lo cual se relaciona con que en julio de 2019 hubo casi 4 veces la tasa de deforestación promedio entre 2016 y 2018.

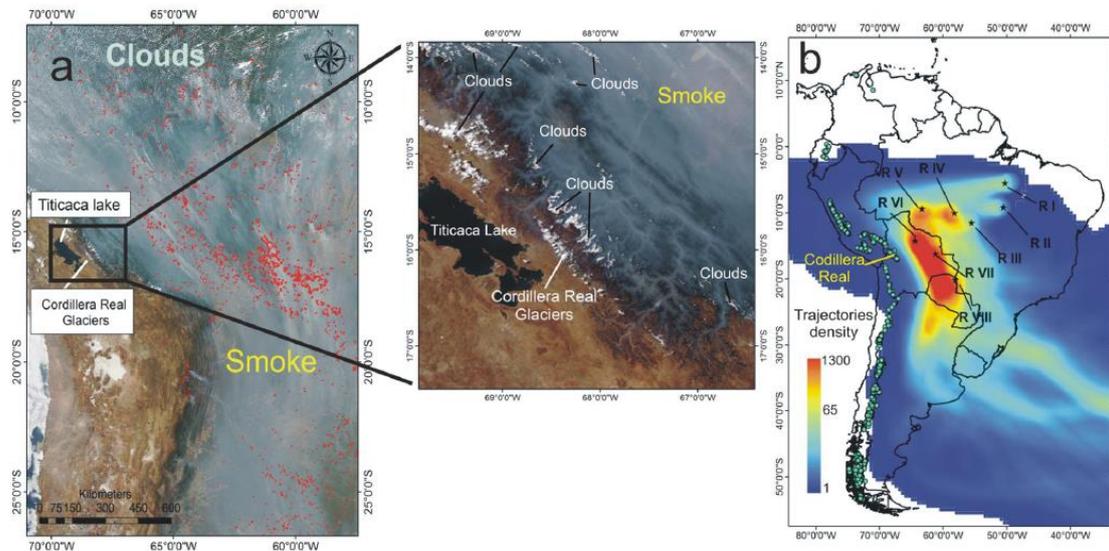
### **2.9.Consecuencias de los incendios forestales en el Perú**

La ocurrencia de los incendios forestales en la Amazonía de Brasil y Bolivia es una de las principales fuentes de carbono negro hacia los andes centrales de Sudamérica, lo cual acelera el derretimiento de glaciares, tales como el Glaciar Zongo (Bolivia). Esto se encuentra asociado al viento del este y noreste predominante (Figura 7), que representa el desplazamiento de las plumas de humo desde la Amazonía hacia los glaciares andinos. Asimismo, el promedio de la densidad de trayectorias desde 2000 hasta 2016 manifiesta que la mayor densidad de ellas se encuentra al lado este de la Cordillera (Figura 8) (Magalhaes, et al. 2019).



**Figura 7:** Composición de color verdadero de la imagen diaria MODIS del satélite Aqua capturada el 24 de agosto del 2010. La cuenca del Amazonas en el lado este de la Cordillera de los Andes está completamente cubierta de humo por la quema de biomasa

**FUENTE:** Magalhaes, et al. (2019)



**Figura 8:** Transporte de la pluma de humo desde la cuenca del Amazonas hacia los Andes centrales. (a) Formación de una mega-pluma de humo resultante de la unión de emisiones de quema de biomasa (puntos rojos representan las ubicaciones de los eventos de fuego; las nubes aparecen de color blanco brillante y el humo aparece en color grisáceo). Las imágenes son del MODIS diario en la composición de color verdadero del satélite Aqua capturadas el 23 de agosto del 2010. (b) La densidad de las trayectorias muestran el patrón promedio de las trayectorias de las masas de aire durante la temporada de quema de biomasa desde el 2000 hasta el 2016. Las trayectorias de las masas de aire en un paso de cada 6 horas fueron analizadas cada septiembre (pico de la estación de fuego en Sudamérica) desde el 2000 hasta el 2016, resultando en un total de 2040 trayectorias. Estas fueron obtenidas usando el modelo HYSPLIT/NOAA. La densidad de trayectorias fue obtenida usando el software ARCGIS. Los círculos azules representan los glaciares en Sudamérica y las estrellas negras indican el origen de las trayectorias localizadas dentro de las regiones con una mayor densidad de eventos de fuego

**FUENTE:** Magalhaes, et al. (2019)

## 2.10. Variación Temporal de los Incendios Forestales en Perú

Generalmente los incendios forestales en Perú ocurren entre mayo y noviembre (SENAMHI, 2018). En un caso específico, en Amazonas, ocurren desde junio hasta diciembre. Estos incendios están asociados al cambio de la temporada de lluvias a la temporada seca, así como a los factores meteorológicos como el incremento de la temperatura, la disminución de la humedad y bajo régimen de precipitaciones, además del cambio climático (Barboza et al., 2020)

Entre el 2003 y 2017 (15 años), un total de 4 953 769 focos de calor fueron detectados en Sudamérica (White, 2019), de los cuales, el 2.7% se presentó en Perú. Sin embargo, si se considera la ocurrencia de focos de calor por área, el Perú se caracteriza por presentar una media anual de 1 foco de calor por cada 144 km<sup>2</sup>, lo cual lo caracteriza con una “Alta” frecuencia de incidencia (Tabla 1).

**Tabla 1:** Lista de los países de Sudamérica y sus respectivas áreas; media anual de los focos de calor, área dividida por la media anual de los focos de calor (densidad), y frecuencia de incidencia

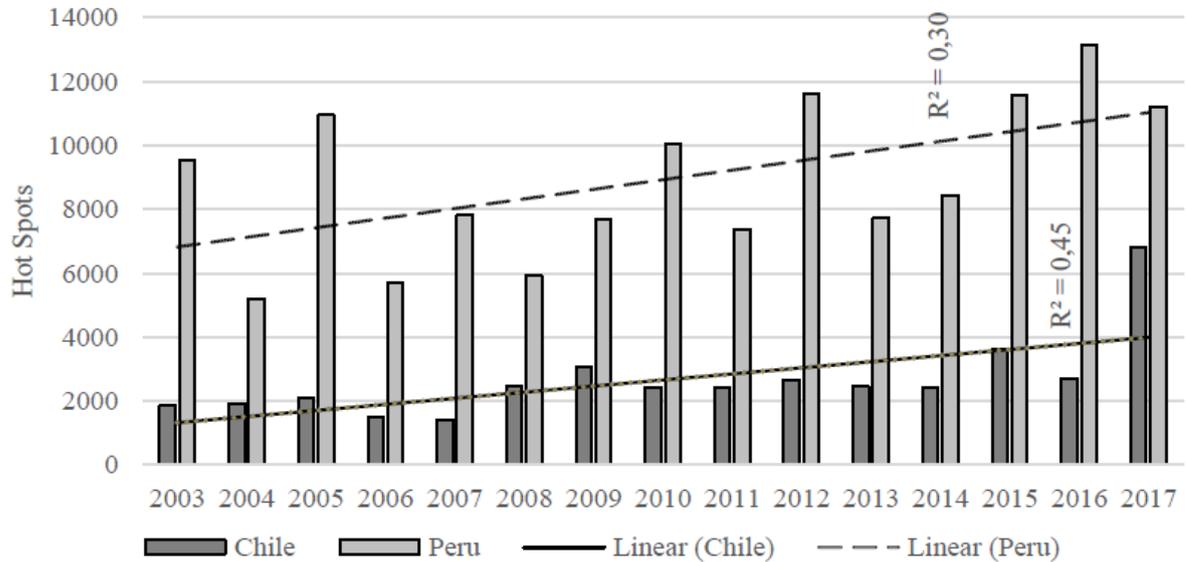
País	Área (km <sup>2</sup> )	Media anual del número de focos de calor (FC)	Media anual de la densidad de los focos de calor (km <sup>2</sup> /FC)	Frecuencia de incidencia*
Paraguay	406 750	20 737	20	Muy Alto
Bolivia	1 098 580	31 747	35	Muy Alto
Brasil	8 511 965	195 596	44	Muy Alto
Venezuela	912 050	19 047	48	Muy Alto
Argentina	2 766 890	34 122	81	Alto
Colombia	1 138 910	13 475	85	Alto
Perú	1 285 220	8 924	144	Alto
Ecuador	283 560	1 869	152	Medio
Guyana	214 999	948	227	Medio
Chile	756 950	2 657	285	Medio
Uruguay	176 220	516	341	Bajo
Guyana Francesa	91 000	233	391	Bajo
Surinam	163 270	380	430	Bajo

\* De acuerdo con la clasificación de White y White (2016)

**FUENTE:** White (2019)

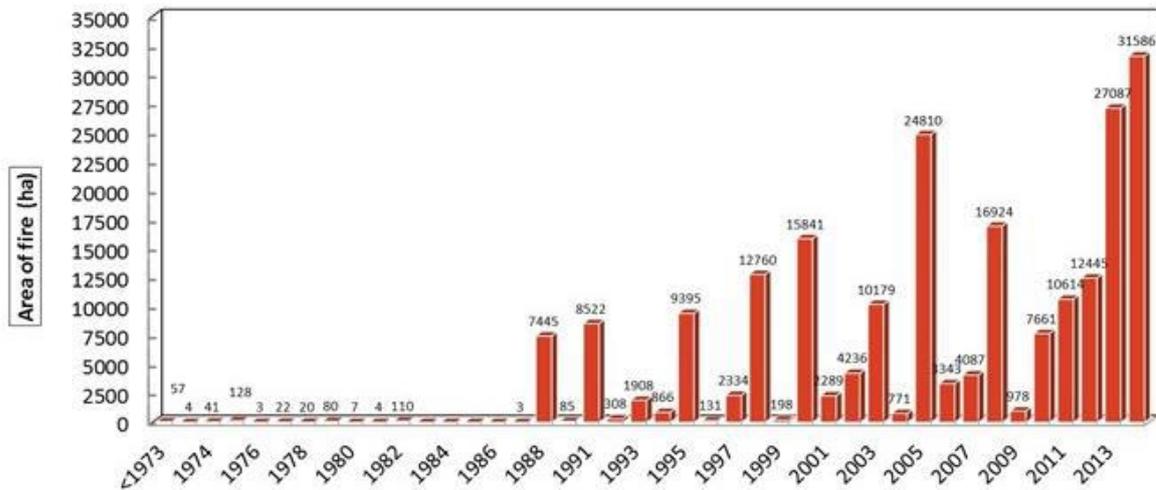
En esos 15 años de análisis, a nivel de toda Sudamérica no se observó una tendencia clara en el análisis interanual de los focos de calor, sin embargo, se concluyó que el 2004 fue el año con la mayor cantidad de detección de focos de calor, mientras que el 2013 fue al año con menor valor. Por otro lado, los resultados fueron diferentes si se consideran los análisis

en cada país. Es así que la ocurrencia de focos de calor muestra una clara tendencia positiva a lo largo de los años tanto en Perú como en Chile (Figura 9).



**Figura 9:** Número anual de focos de calor detectado por el Satélite AQUA en Chile y Perú entre el 2003 y 2017. La línea de regresión indica tendencia lineal positiva en ambos países  
**FUENTE:** White (2019)

Esa misma tendencia positiva interanual en el Perú en los últimos 42 años (1973-2014) se encontró en Manta, Kometter and Navia. (2018), tanto en número de incendios forestales como en área afectada (Figura 10)



**Figura 10:** Variación interanual del área afectada por incendios forestales en los andes peruanos  
**FUENTE:** Manta, Kometter and Navia. (2018)

En un análisis mensual, septiembre es el mes con el mayor récord de focos de calor en Sudamérica. Asimismo, este mes sigue siendo el de mayor frecuencia de ocurrencia en países como Perú, Brasil, Bolivia, y Paraguay (Tabla 2).

**Tabla 2:** Media mensual de número de focos de calor registrados por el satélite AQUA en los países de América del Sur entre el 2003 y 2017

País	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Argentina	1593	1280	1331	991	519	1003	3208	8704	8570	3874	1992	1056
Bolivia	164	98	110	183	309	682	2267	8794	11672	5779	1350	340
Brasil	3223	1824	2035	1722	2419	5379	12221	40347	63586	34600	18371	9865
Chile	454	219	744	523	224	62	25	37	73	87	80	129
Colombia	2520	3919	3303	574	141	141	294	526	512	406	433	705
Ecuador	54	32	18	21	14	20	32	107	193	276	766	337
Guyana Francesa	3	1	2	2	1	0	0	4	40	125	50	6
Guyana	89	65	110	106	18	4	5	21	101	225	134	69
Paraguay	751	828	1002	697	281	506	1707	5331	5828	2267	1039	499
Perú	173	111	46	56	87	178	625	2529	3408	1120	452	139
Surinam	12	9	22	15	4	0	1	9	58	164	70	16
Uruguay	42	15	30	44	39	41	51	76	64	33	40	38
Venezuela	3336	3852	5351	2622	737	175	157	238	359	445	589	1185
Sudamé- rica	12414	12253	14104	7557	4793	8191	20593	66723	94464	49401	25366	14384

Adaptado de White (2019).

## 2.11. Relación entre el ENSO y los Incendios Forestales en Sudamérica

Alrededor del 85% de los incendios forestales ocurridos en Sudamérica con causados por la mano del hombre, sin embargo, algunos factores naturales agravan el riesgo de incendios, su intensidad y severidad. Estos factores pueden ser climáticos y relacionados con el ENSO (Manta and Sanhueza, 2020)

Incendios grandes en Iguaque, andes tropicales de Colombia, han mostrado relación consistente con la dinámica del ENSO, puesto que durante La Niña (LN) incrementa la biomasa y con esto, el riesgo de incendios forestales durante las sequías de El Niño (EN) (Aguilar-Garavito et al., 2020). De forma más general, en la región norte de Sudamérica (Ecuador, Colombia y Perú), la actividad del fuego es mayor cuando se dan acumulaciones de combustible en épocas de precipitaciones superiores al promedio, seguidas de condiciones de altas temperaturas que favorecen la desecación del combustible (Armenteras et al., 2020).

Por otro lado, Chen et al. (2017) manifiesta que, de forma global, en los bosques tropicales, la reducción en las precipitaciones y el almacenamiento del agua terrestre incrementó las emisiones del fuego en 133% durante y después de EN, en comparación a LN.

## 2.12. *Fire Weather Index (FWI) o Índice Meteorológico de Incendios Forestales*

El FWI es un índice basado en las condiciones de tiempo meteorológico y consta de tres códigos de humedad del combustible y tres índices de comportamiento del fuego (Van Wagner, 1987). Estos representan la variación diaria del contenido de agua en los combustibles con diferente tiempo de respuesta a los cambios en las condiciones del tiempo meteorológico (Mestre and Manta 2014) y la acción del viento en el comportamiento del fuego (SENAMHI, 2018).

De acuerdo al *National Wildfire Coordinating Group* (NWCG, 2020), existe 3 códigos de humedad y 3 índices de comportamiento del fuego en el sistema canadiense de FWI forestal (Figura 11).

### 2.12.1. Códigos de Humedad del Combustible

Existen 3 categorías o códigos, y son, generalmente, representados por códigos sin unidades en lugar del contenido de humedad (% o peso seco).

Código del Contenido de Humedad del Combustible Fino o *Fine Fuel Moisture Code* (FFMC): representa el contenido de humedad del combustible en el estrato superior del suelo y es un indicador de la facilidad de ignición e inflamación del combustible fino en un bosque. Es equivalente a la humedad contenida en las últimas 16 horas.

Código del Contenido de Humedad en la Hojarasca o *Duff Moisture Code* (DMC): representa la humedad del material orgánico descompuesto que se encuentra debajo de estrato superior. Puede ser un indicador del estrés por humedad del combustible vivo. Es equivalente a la humedad contenida en los combustibles por un período equivalente a los últimos 15 días.

Código de Sequía o *Drought Code* (DC): representa el secado profundo en el suelo e indica los efectos de una sequía estacional en las capas profundas, compactas y orgánicas; por ende, aproxima las condiciones de humedad del combustible para un equivalente de los últimos 53 días.

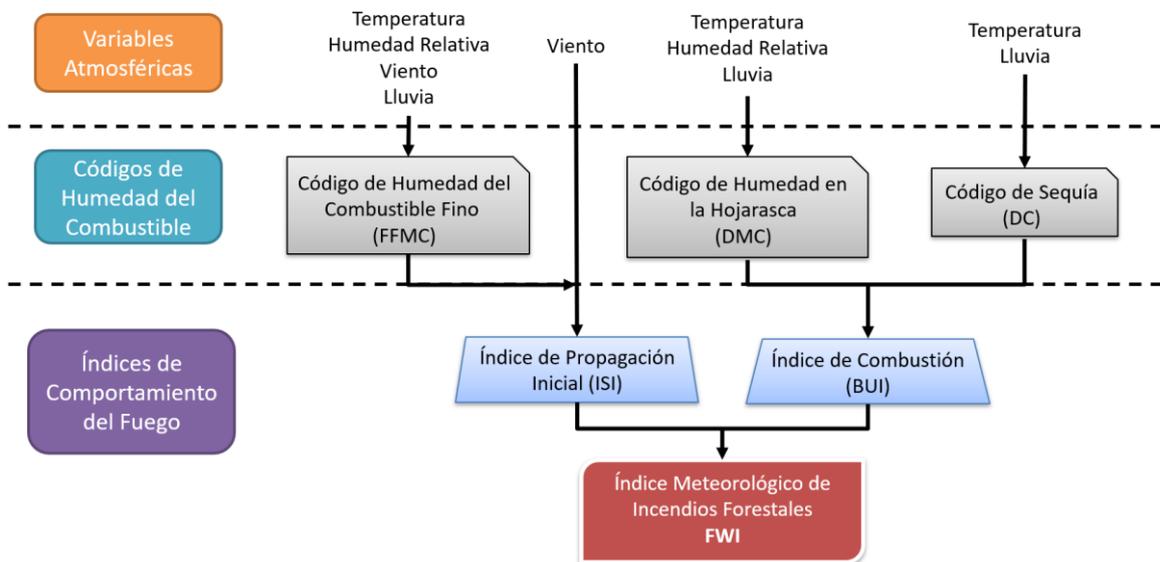
### 2.12.2. Índices de Comportamiento del Fuego

Existen 3 índices y son los siguientes:

Índice de Propagación Inicial o *Initial Spread Index* (ISI): integra la humedad del combustible fino y la velocidad el viento superficial para estimar el potencial de propagación. Este índice es clave para las predicciones del comportamiento del fuego.

Índice de Combustión o *Buildup Index* (BUI): combina el DMC y DC actual para producir un potencial estimado de calor liberado en los combustibles más pesados.

Índice Meteorológico de Incendios Forestales o *Fire Weather Index* (FWI): integra el ISI y el BUI para producir un índice de potencial de la intensidad de fuego general. Con condiciones secas de combustible, en un indicador clave de potencial extremo de comportamiento del fuego.



**Figura 11:** Flujo del proceso para la obtención del Índice Meteorológico de Incendios Forestales – FWI  
**FUENTE:** National Wildfire Coordinating Group (NCWG)

### **III. METODOLOGÍA**

La implementación del sistema de monitoreo y pronóstico operativo diario de condiciones atmosféricas favorables a incendios forestales (IF) para el Perú se inició el 2017 en el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) debido a que en los incendios ocurridos durante el 2016 en el territorio peruano se vio la necesidad de contar con un servicio especializado de vigilancia atmosférica de incendios forestales.

En ese proceso de implementación, se siguieron los siguientes pasos:

#### **3.1.Reuniones con instituciones vinculadas al análisis y manejo de IF.**

En la última década, el 2016 fue uno de los años con mayor frecuencia de incendios forestales en el Perú. Esto generó que a partir de finales de ese año se organizaran varias instituciones para coordinar el manejo de los incendios forestales, considerando su prevención antes de la ocurrencia de un IF, manejo del fuego durante la ocurrencia de un IF y proceso de recuperación de áreas quemadas después de la ocurrencia del mismo. En ese contexto, desde el 2016 el SENAMHI participó en varias reuniones interinstitucionales con el objetivo de la identificación de necesidades meteorológicas, por parte de las instituciones, para el monitoreo y pronóstico de condiciones favorables a incendios forestales, así como recalcar la cooperación del SENAMHI en la disminución del riesgo por IF en el Perú. A continuación, se enlistan y detallan las principales instituciones con las que se realizaron las reuniones de coordinación.

- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR): es el organismo adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MINAGRI) cuya misión es ejercer la rectoría técnica y normativa para gestionar y promover la sostenibilidad y competitividad del sector forestal y de fauna silvestre en beneficio de la población y el ambiente, de manera articulada y eficaz (SERFOR, 2021).
- Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP): es el organismo adscrito al Ministerio del Ambiente (MINAM) cuya misión es conducir el Sistema de Nacional Áreas Naturales Protegidas del Perú con una perspectiva

- ecosistémica, integral y participativa, con la finalidad de gestionar sosteniblemente su diversidad biológica y mantener los servicios ecosistémicos que brindan beneficios a la sociedad (SERNANP, 2021).
- Dirección General de Ordenamiento Territorial Ambiental (DGOTA) – MINAM: tiene el propósito de fomentar el desarrollo equilibrado y competitivo del territorio, basado en su ocupación sana y ordenada, así como en el uso sostenible de los recursos naturales para garantizar el bienestar común y elevar la calidad de vida de las personas (MINAM, 2021).
- Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI): es el organismo adscrito al Ministerio de Defensa (MINDEF) que conduce los procesos de la gestión reactiva en el marco del SINAGERD en provecho de la población en general, sus medios de vida y el patrimonio del Estado en forma inmediata, permanente y eficiente (INDECI, 2021).
- Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN): es el centro encargado de monitorear, validar y proporcionar información oficial sobre peligros, emergencias y desastres para la oportuna toma de decisiones (INDECI, 2021).
- Cuerpo General de Bomberos Voluntario del Perú: es la autoridad competente en materia de prevención, control y extinción de incendios, realiza acciones de atención de accidentes vehiculares y emergencias médicas, rescate y salvataje de vidas expuestas a peligro.

### **3.2. Identificación de Variables Meteorológicas de superficie**

El siguiente paso consistió en la identificación y determinación de las principales variables atmosféricas que favorecen la propagación de IF en las diferentes regiones del país. Para lograr ello, se realizó un análisis temporal y espacial de las variables registradas en estaciones meteorológicas ubicadas en un radio menor a 20 km de incendios forestales que afectaron más de 100 has de cobertura vegetal durante la temporada de incendios del 2016, y se identificaron aquellas variables que presentaron un comportamiento diferente a su normal o a su tendencia, en las diversas regiones del país.

Las variables que se analizaron en cada estación meteorológica fueron siete, de acuerdo a la disponibilidad en cada estación: precipitación acumulada diaria, evaporación (efectiva o potencial), horas de sol, humedad relativa y relación de mezcla a las 13 horas, así como temperatura máxima y mínima del día.

El período que se consideró para el análisis comprendió el mes previo, el mismo mes y el mes siguiente a la ocurrencia del IF.

Con fines de comparación se trabajaron con las normales de temperatura máxima y mínima, así como con las anomalías decadiarias (diez días) y mensuales de precipitación previas a la ocurrencia del IF. El período para la determinación de las normales estaba comprendido entre los años 1981 y 2010.

### **3.3. Determinación de Patrones Sinópticos de Circulación Atmosférica**

Las variables que se consideraron en el análisis atmosférico en niveles altos y medios de la tropósfera fueron viento en 250 hPa, viento y relación de mezcla en 500 hPa, así como velocidad vertical y humedad relativa entre 700 y 100 hPa de las 00:00 UTC del reanálisis ERA-Interim con resolución de 1°, en el dominio de Sudamérica (Berrisford et al., 2011).

Se realizaron composiciones de forma mensual entre los días con incendio forestal (DCIF) y días sin incendio forestal (DSIF) durante los eventos de IF registrados desde julio hasta noviembre del 2016. Asimismo, se realizaron las diferencias entre ambos casos de composiciones.

Por otro lado, se realizó el análisis sinóptico, así como de las anomalías (considerando la normal entre 1981 y 2010), en un día con máxima frecuencia de IF, considerado como caso de estudio.

### **3.4. Aplicación del Índice Meteorológico de Incendios Forestales (Fire Weather Index) (FWI)**

Utilizando datos diarios de precipitación, temperatura máxima, humedad relativa y vientos del modelo atmosférico del *Global Forecast System* (GFS) con 0.25° de resolución espacial, se calculó el FWI para los días en los cuales se presentó IF en el territorio peruano durante el 2016. Las fórmulas para la determinación de los códigos e índices para el cálculo del FWI se encuentran en la sección ANEXOS. Asimismo, se consideró los umbrales establecidos en SENAMHI (2018), los cuales son: Bajo (0-6); Moderado (6-12); Alto (12-18); Muy Alto (18-24) y Extremo (>24).

Para evaluar la efectividad del FWI, se realizó un análisis de correlación entre el valor del FWI y el área de cobertura vegetal afectada por cada IF que ocurrió entre junio y noviembre del 2016. Para este análisis, los incendios forestales se clasificaron en tres grupos: incendios

que afectaron menos de 100 has, aquellos que afectaron entre 100 y 1000 has, y aquellos que afectaron más de 1000 has.

### **3.5. Generación de Productos y Servicios**

Considerando las necesidades de las entidades que trabajan con IF, se planteó la generación de productos y servicios meteorológicos, tanto de monitoreo como de pronóstico de condiciones favorables a incendios forestales.

Para lograr ello, se requirió de un equipo de profesionales en meteorología y en ingeniería forestal.

Se consideró como principales procesos al monitoreo diario y al pronóstico meteorológico. El primer proceso consiste en la generación automática de herramientas en las cuales se muestren las variables identificadas como importantes para el monitoreo atmosférico para las condiciones favorables para IF. El segundo proceso, el pronóstico meteorológico, consiste en la emisión de diversos productos de pronóstico especializados para prever las condiciones atmosféricas favorables para la ocurrencia de incendios forestales.

Los productos y servicios emitidos tienen una retroalimentación constante con los principales usuarios de los mismos: las instituciones que manejan IF. Asimismo, estas instituciones manifiestan el interés de la emisión de nuevos productos, y estos luego de ser evaluados por el equipo de trabajo pueden ser puestos a disposición de público usuario.

### **3.6. Publicación en la web de los productos y servicios**

Una vez propuestos los productos y servicios de la vigilancia atmosférica favorables a la ocurrencia de IF en el Perú, estos requerían ser difundidos de forma oportuna hacia el usuario principal. En ese sentido, la publicación en la página web del SENAMHI se tornó la primera opción. Asimismo, esta acción permitiría tener acceso a varias instituciones de manejo de IF, tanto peruanas como internacionales, a los productos y servicios especializados.

### **3.7. Presentaciones interinstitucionales**

Constantemente, el grupo de trabajo de SENAMHI realiza presentaciones a las instituciones vinculadas con el manejo del fuego ante un IF. En estas, se presentan los productos de la

página web y se recibe información que retroalimenta nuestro sistema de vigilancia meteorológica. Además, se recibe requerimientos de nuevos productos, los cuales se evalúan para su generación e implementación.

## **IV. RESULTADOS**

### **4.1.Contexto Laboral**

“El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) es una entidad adscrita al Ministerio del Ambiente, que tiene como misión generar y proveer información y conocimiento meteorológico, hidrológico y climático para la sociedad peruana de manera oportuna y confiable, contribuyendo de esta manera a la reducción de los impactos negativos producidos por los fenómenos naturales de origen hidrometeorológico.” (SENAMHI, 2021)

El SENAMHI cuenta con 4 direcciones de línea: la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica (DMA), la Dirección de Hidrología (DHI), la Dirección de Agrometeorología (DAM) y la Dirección de Redes de Observación y Datos (DRD).

“Además, el SENAMHI cuenta con 13 direcciones zonales, las cuales son unidades desconcentradas responsables de planear, organizar, dirigir, ejecutar y administrar las actividades meteorológicas, hidrológicas, agrometeorológicas y afines; así como las económico-financieras, dentro de su circunscripción geográfica y en el ámbito de su competencia.” (SENAMHI, 2021)

En este contexto, la DMA es el órgano de línea responsable de conducir, normar, formular, proponer y ejecutar planes, programas, proyectos estudios e investigaciones en el área de la meteorología; así como la realización de monitoreo y pronóstico de los fenómenos meteorológicos en el corto plazo, pronóstico del clima y el desarrollo de escenarios del Cambio Climático. Su labor incluye el pronóstico numérico operativo y la evaluación y monitoreo de las variables atmosféricas y la vigilancia permanente de las condiciones meteorológicas que puedan favorecer la contaminación del aire (SENAMHI, 2021).

Para cumplir con sus funciones, la DMA cuenta con cuatro subdirecciones: la Subdirección de Predicción Meteorológica (SPM), la Subdirección de Predicción Climática (SPC), la Subdirección de Modelamiento Numérico (SMN) y la Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico (SEA).

La SPM es el área en la que se desempeñaron las actividades que son contempladas en este trabajo. Esta SPM es la encargada de realizar el monitoreo y predicción meteorológica de corto y muy corto plazo. Realiza estudios e investigaciones de su especialidad. Depende jerárquicamente de la DMA. Esta tiene las siguientes funciones de acuerdo al reglamento de organización y funciones del SENAMHI:

- a) Formular y proponer planes, procedimientos, directivas, instructivos, protocolos y otras normas para realizar el monitoreo y predicción meteorológica en coordinación con los órganos de la entidad, así como promover su implementación;
- b) Formular y proponer a la DMA notas técnicas en la materia de su competencia.
- c) Desarrollar el diagnóstico, vigilancia y predicción meteorológica, así como realizar los estudios e investigaciones apropiados;
- d) Ejecutar el monitoreo relacionado a la prevención de la ocurrencia de eventos meteorológicos de corto y muy corto plazo, así como procesos asociados a la variabilidad climática y Cambio Climático, en coordinación con las Direcciones Zonales;
- d) Ejecutar el monitoreo meteorológico basado en sistemas integrados y en técnicas de sensoramiento remoto, para elaborar avisos y pronósticos meteorológicos, a nivel nacional, y en diferentes escalas espaciales y temporales;
- e) Formular y ejecutar estudios, proyectos e investigaciones sobre vigilancia y predicción meteorológica, en coordinación con entidades públicas, privadas y los Órganos de la entidad;
- f) Aprobar propuestas de modelaje numérico, con fines de elaboración de pronósticos meteorológicos, estudios de campo, para su implementación operativa por el SENAMHI.
- g) Formular y proponer a la DMA los avisos asociados a la gestión de riesgos frente a emergencia y desastres, en coordinación con las Direcciones Zonales;
- h) Emitir opinión y absolver las consultas de carácter técnico-científico solicitadas por la DMA;
- i) Brindar asistencia técnica, a las entidades públicas, privadas y Órganos de la entidad, sobre temas de su competencia;
- j) Participar en comisiones y/o eventos multisectoriales nacionales e internacionales representando al SENAMHI y/o a la DMA;
- k) Otras funciones que le sean asignadas por la DMA, en el ámbito de su competencia.

## **4.2.Determinación y Análisis del Problema**

El egresado de meteorología, en la SPM, debe atender y buscar solución a los siguientes problemas, principalmente:

- a) La necesidad de realizar el monitoreo relacionado a la prevención de la ocurrencia de eventos meteorológicos en diferentes escalas de tiempo (muy corto, corto y mediano plazo) y espacio (local, zonal, regional, nacional). Este monitoreo, basado en sistemas integrados de datos y en técnicas de sensoramiento remoto, es la clave principal para la elaboración de avisos asociados a la gestión de riesgos frente a emergencia y desastres y pronósticos meteorológicos.

Estos avisos y pronósticos pueden ser, tanto de forma general o de forma especializada. El primer caso se refiere al comportamiento de diferentes variables o eventos meteorológicos en sí, tales como el incremento o ausencia de precipitaciones, incremento o descenso de temperatura, incremento de viento, friajes, olas de calor y frío, etc. El segundo caso se refiere a una serie de eventos meteorológicos que afecten a otros eventos, tales como el efecto del viento para dispersión de cenizas ante la erupción de volcanes, o de contaminantes ante la ocurrencia de un incendio urbano.

- b) La necesidad de brindar asistencia técnica a entidades públicas y privadas sobre temas meteorológicos, con el objetivo de generar alianzas y formular y ejecutar estudios, proyectos e investigaciones sobre vigilancia y predicción meteorológica, en coordinación con estas entidades.

Relacionado a estos problemas principales, luego de los IF ocurridos el 2016 en el territorio peruano, se detectó la necesidad de un servicio meteorológico especializado, tanto de pronóstico y avisos meteorológicos de condiciones meteorológicas favorables para la ocurrencia y propagación de IF.

## **4.3.Proyecto de Solución**

Como solución del problema a la necesidad de un servicio meteorológico especializado para incendios forestales se planearon las siguientes actividades específicas:

- a) A mediados del 2017, se realizaron diversas reuniones entre las entidades involucradas con incendios forestales y el SENAMHI con el objetivo de identificar las necesidades de productos meteorológicos por parte de las entidades.

- b) A fines del 2017 se consideró la realización del Estudio de Condiciones Atmosféricas Favorables a Incendios Forestales (SENAMHI, 2018) con los objetivos de: identificar las principales variables meteorológicas que se relacionan directamente con la ocurrencia de IF en el Perú, identificar las principales circulaciones sinópticas en la tropósfera media y alta que propician la generación de estos, y evaluar el comportamiento del FWI en los IF que afectaron más de 100 has de cobertura vegetal durante el 2016.
- c) A inicios del 2018 se consideró implementar el FWI como una herramienta de pronóstico de condiciones atmosféricas favorables a incendios forestales, así como el comportamiento de otras variables atmosféricas de importancia para IF.
- d) A mediados del 2018 se coordinó la implementación de la plataforma web de acceso abierto con los productos de monitoreo y pronóstico para IF.
- e) A mediados del 2019 se implementaron productos de pronóstico diario, con análisis de un profesional meteorólogo, de condiciones atmosféricas para IF.
- f) En el 2020 se implementaron los productos de pronóstico semanal y mensual, con análisis de un profesional meteorólogo.

#### **4.4.Evaluación del Proyecto**

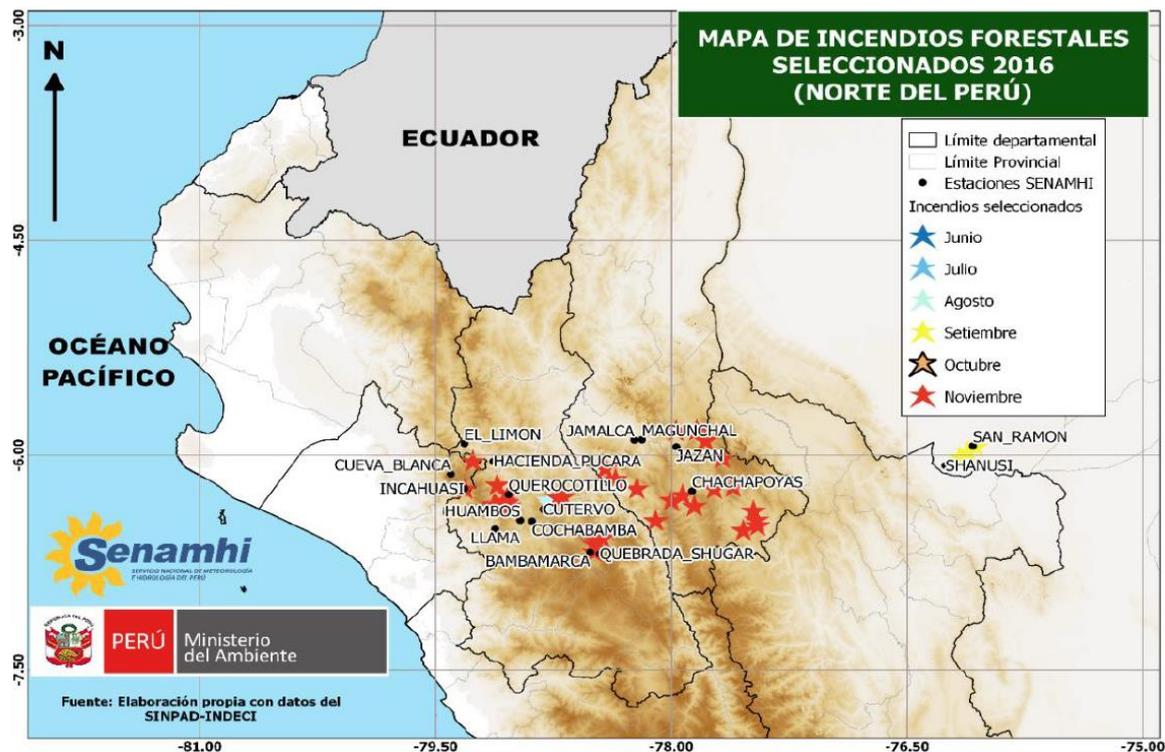
##### **4.4.1. Reuniones de coordinación con instituciones vinculadas al análisis y manejo de IF.**

Como resultado de las reuniones interinstitucionales se identificaron las siguientes necesidades: la falta de monitoreo diario y pronóstico de variables meteorológicas que tengan impacto en la propagación de incendios forestales (temperatura, humedad relativa, precipitación, etc), así como de un índice que considere estas variables; la ausencia de detección de focos de calor con una escala de tiempo mayor que la brindada por SERFOR (2 veces por día), para poder detectar así el inicio y fin de un incendio forestal; la ausencia de un monitoreo en tiempo real de la dirección y velocidad del viento, para poder determinar la propagación de un IF considerable; y la falta de pronósticos con análisis de un profesional para regiones específicas (con mayor tendencia a ocurrencia de incendios forestales).

##### **4.4.2. Identificación de Variables Meteorológicas de superficie**

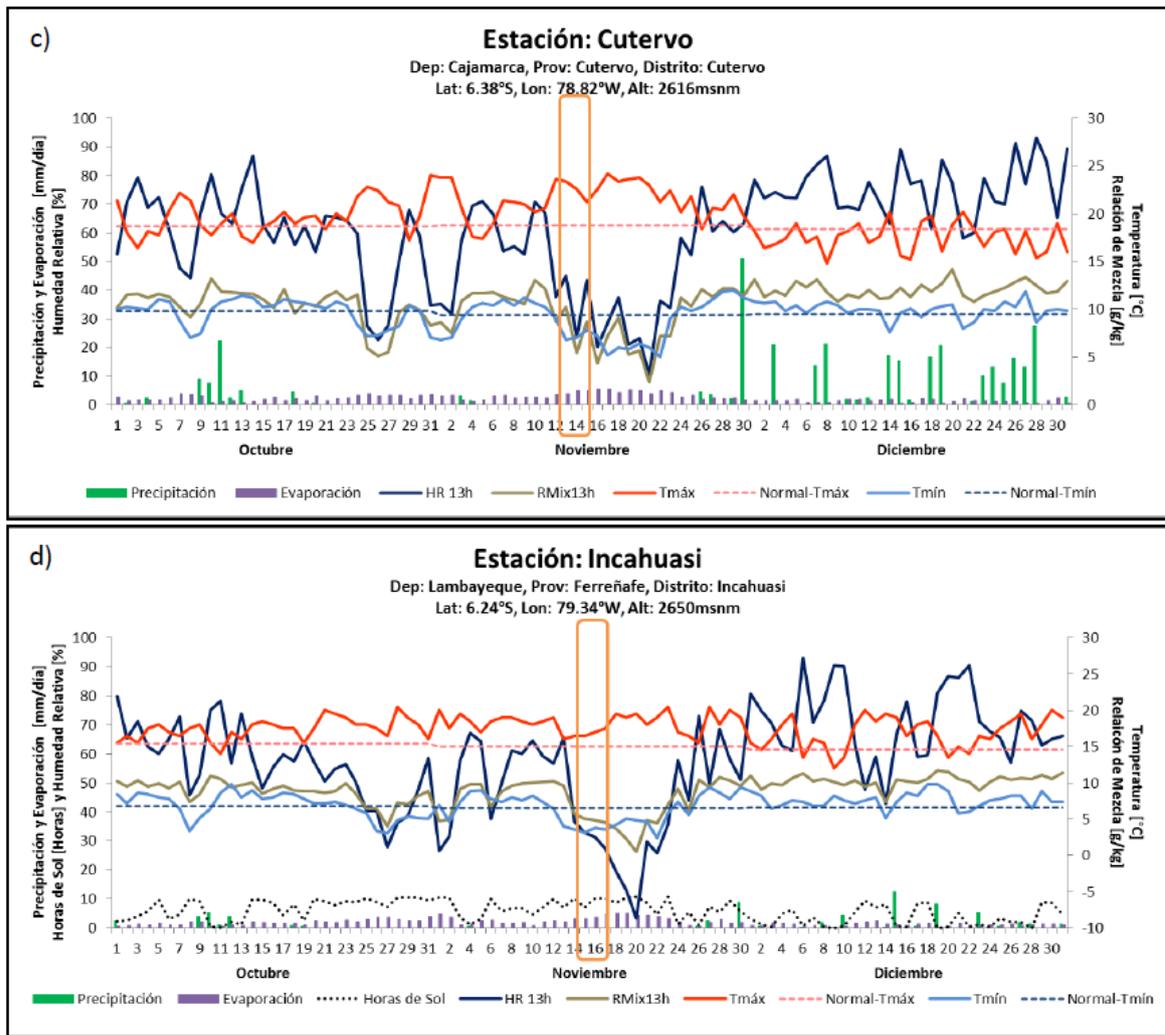
Posteriormente, cuando se realizó el Estudio de Condiciones Favorables a Incendios Forestales (SENAMHI, 2018), se identificaron las siguientes variables meteorológicas con un comportamiento diferente a lo normal previo y durante la ocurrencia de un IF de moderada extensión (más de 100 hectáreas de cobertura vegetal afectada):

En la región norte se identificó que la mayoría de los IF reportados el 2016 se presentaron en noviembre (Figura 12) y el comportamiento más representativo de las variables fue el incremento de temperatura máxima (superior a su normal) y la disminución de la temperatura mínima (inferior a su normal), lo cual manifiesta la sequedad en la atmósfera, asimismo se observa incremento de evaporación en comparación a otros meses, así como la disminución de la relación de mezcla durante el inicio del incendio y en los siguientes diez días y la disminución de saturación atmosférica, llegando a valores de humedad relativa inferiores a 40%. Además, se observa la ausencia de precipitaciones por más de diez días consecutivos, y alrededor de 10 horas de sol (Figura 13)



**Figura 12:** Mapa de distribución espacial de las localidades afectadas por incendios forestales seleccionados en el norte del Perú (estrellas) y las estaciones meteorológicas convencionales seleccionadas de SENAMHI (puntos negros)

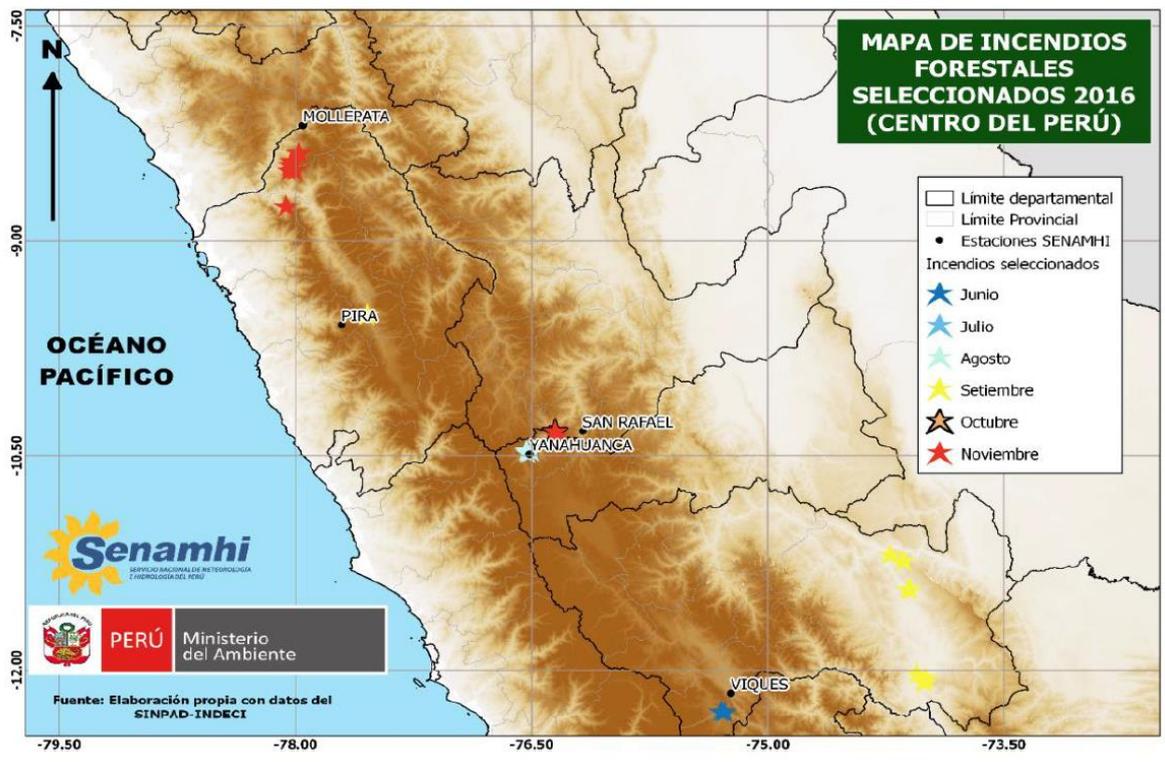
**FUENTE:** Figura 6.3 de SENAMHI (2018)



**Figura 13:** Gráficos de variación temporal diaria de Precipitación, Evaporación, Horas de Sol, Humedad Relativa y Relación de Mezcla a las 13 horas, Temperatura máxima (Tmáx) y Temperatura Mínima (Tmín) durante 3 meses en las estaciones meteorológicas de (c) Cutervo y (d) Incahuasi. El período de ocurrencia del incendio forestal está resaltado por un cuadro naranja

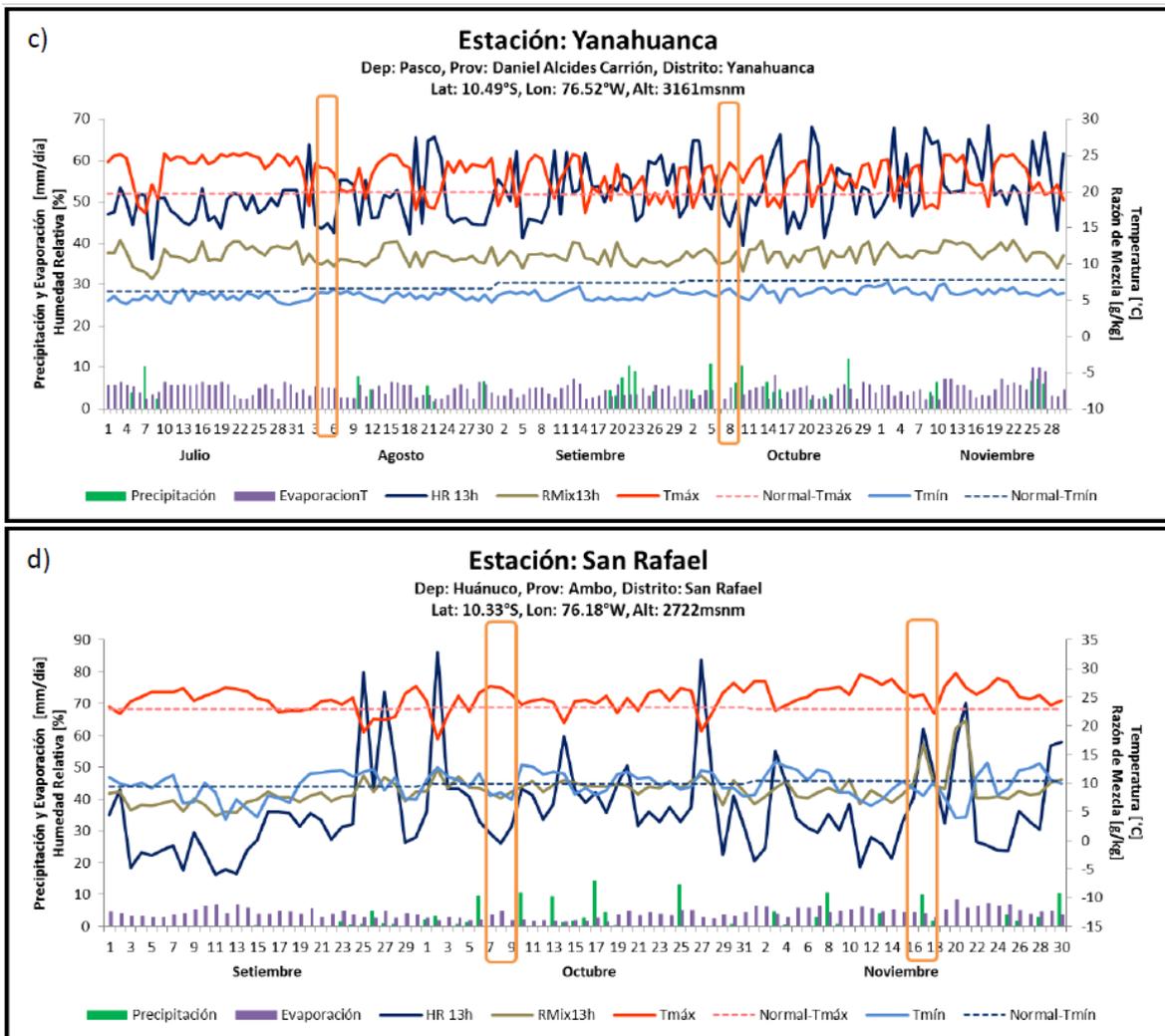
**FUENTE:** Figura 6.4. de SENAMHI (2018)

En la región centro se presentaron menos IF que en la región norte, y ocurrieron desde junio hasta noviembre en frecuencias similares (Figura 14). Respecto a las condiciones atmosféricas reportadas en las estaciones de Yanahuanca y San Rafael, para el 5 de agosto y 8 de octubre, respectivamente, se observa que la temperatura máxima se presentó sobre su normal, y la mínima, bajo su normal, señalando el bajo contenido de humedad en la atmósfera superior, así como disminución de la humedad relativa y relación de mezcla en superficie durante los días de ocurrencia del IF, lo cual coincide con lo ocurrido en el norte del país. Además, previo al IF del 5 de agosto, fue resaltante la cantidad de días sin lluvia de forma continua (25 días) (Figura 15).



**Figura 14:** Mapa de distribución espacial de las localidades afectadas por incendios forestales seleccionados en el centro del Perú (estrellas) y las estaciones meteorológicas convencionales seleccionadas de SENAMHI (puntos negros)

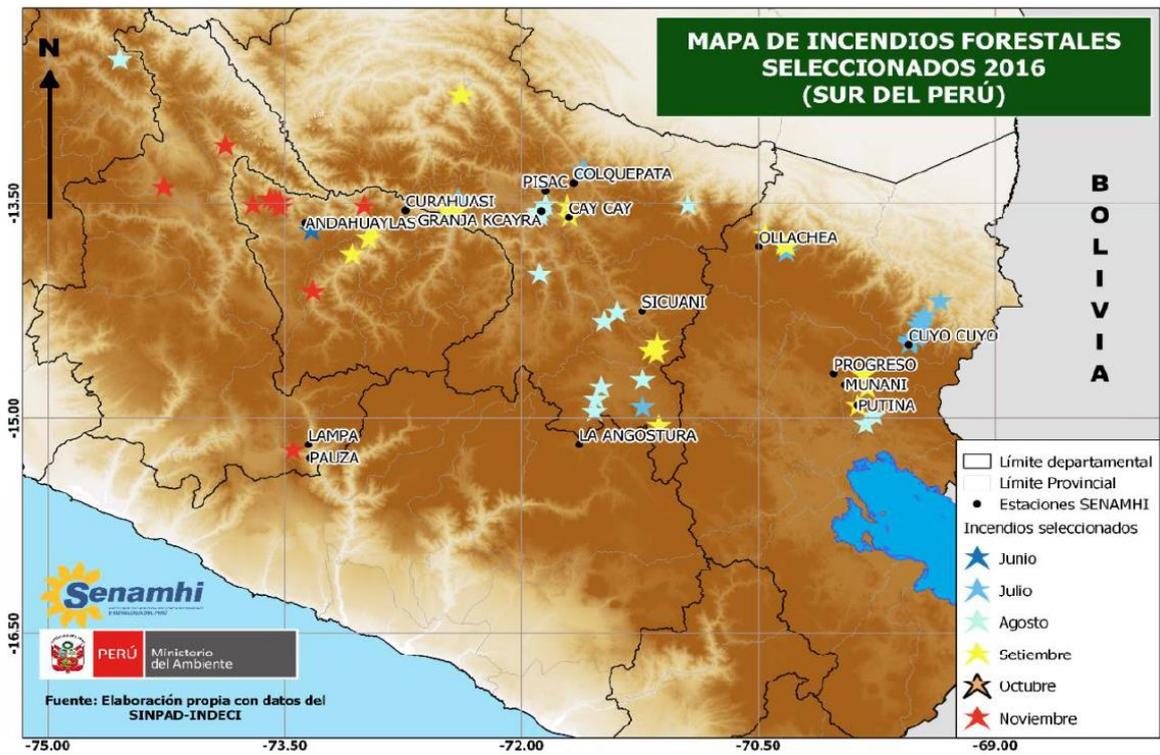
**FUENTE:** Figura 6.5 de SENAMHI (2018)



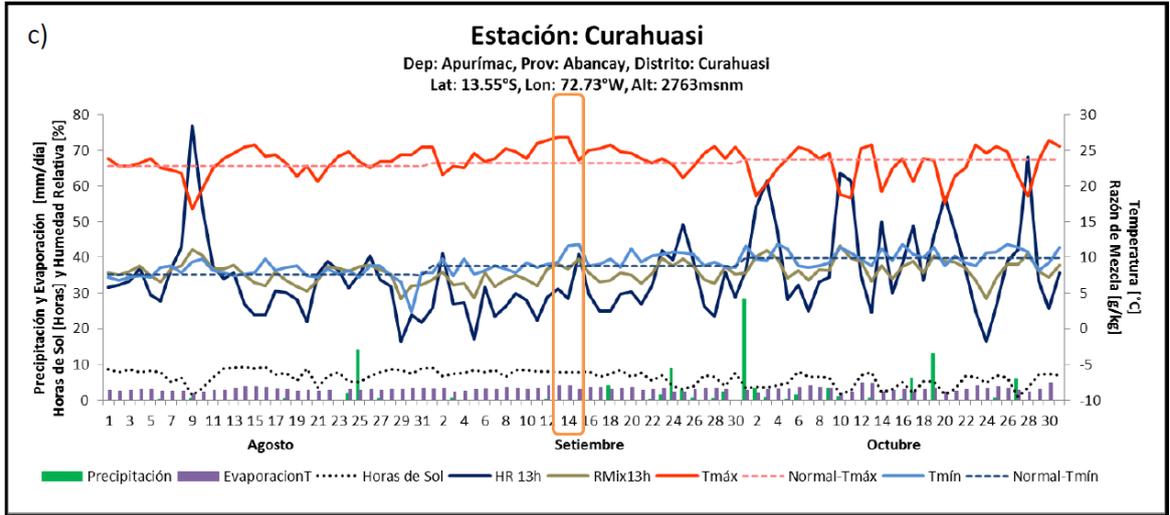
**Figura 15:** Gráficos de variación temporal diaria de Precipitación, Evaporación, Humedad Relativa y Relación de Mezcla a las 13 horas, Temperatura máxima (Tmáx) y Temperatura Mínima (Tmín) durante 3 meses en la estación meteorológica de (c) Yanahuanca y (d) San Rafael. El período de ocurrencia del incendio forestal está resaltado por un cuadro naranja

**FUENTE:** Figura 6.6 de SENAMHI (2018)

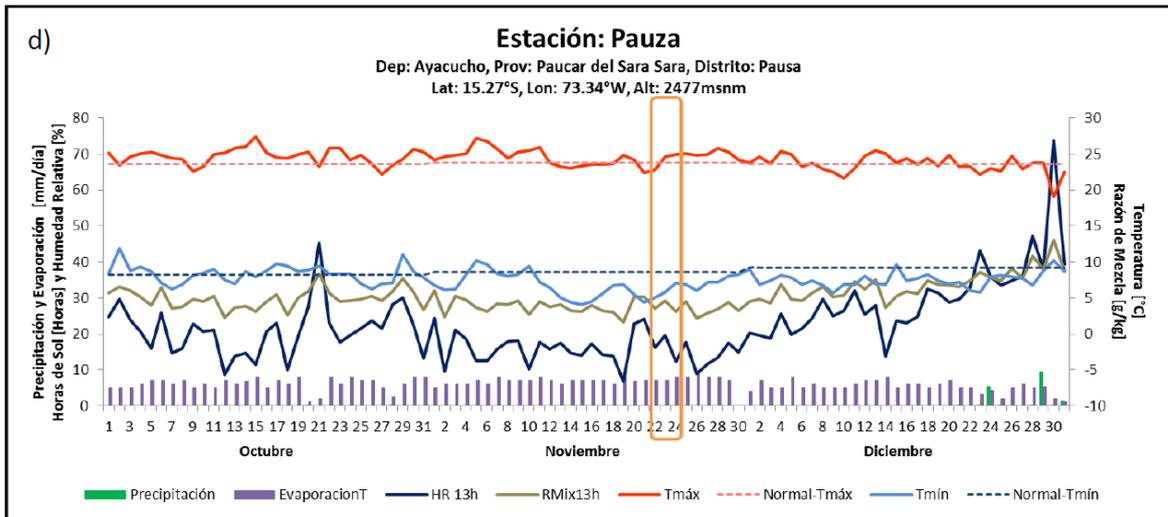
En la región sur, la mayor frecuencia de IF se presentó entre julio y noviembre, a excepción de octubre (Figura 16). Lo reportado en las estaciones meteorológicas de Curahuasi y Pauza para los IF ocurridos el 14 de noviembre y 23 de noviembre de 2016, respectivamente, manifiesta un comportamiento similar a lo ocurrido en el centro del Perú, donde lo más representante fue la cantidad de días sin lluvia antes del IF, alrededor de 10, sin embargo, el resto de variables no presentaron un comportamiento marcado (Figura 17).



**Figura 16:** Mapa de distribución espacial de las localidades afectadas por incendios forestales seleccionados en el sur del Perú (estrellas) y las estaciones meteorológicas convencionales seleccionadas de SENAMHI (puntos negros)  
**FUENTE:** Figura 6.7 de SENAMHI (2018)



**Figura 17:** Gráficos de variación temporal diaria de Precipitación, Evaporación, Horas de Sol, Humedad Relativa y Relación de Mezcla a las 13 horas, Temperatura máxima (Tmáx) y Temperatura Mínima (Tmín) durante 3 meses en las estaciones meteorológicas de (c) Curahuasi (d) Pauza. El período de ocurrencia del incendio forestal está resaltado por un cuadro naranja  
**FUENTE:** Figura 6.8 de SENAMHI (2018)



**Figura 17:** Continuación.

Tal como se pudo observar en el análisis anterior, la principal variable que se repite en los IF ocurridos en todas las fechas y regiones es la ausencia de precipitación de forma consecutiva días previos al IF generando anomalías porcentuales negativas de hasta 100%. La tendencia más clara y en la mayoría de las estaciones, en las tres regiones, se observa en la decadiaria (diez días) anterior a la ocurrencia del IF, en la cual se presentan anomalías negativas de entre 50 y 100% en el norte y sur, y anomalías negativas de entre 23 y 100% en el centro, a excepción de la estación San Rafael, en la cual se presentó anomalía positiva de 50%. Esa tendencia de anomalías negativas también se manifiesta de forma mensual, principalmente en la región norte, y en algunas estaciones del centro y sur (Tabla 3).

**Tabla 3:** Acumulados, normales y anomalías mensuales y semanales de precipitación previa al IF en estaciones seleccionadas. Período considerado para la normal: 1981-2010

Región	Estación	Reporte de Incendio Forestal (IF)	Mes 2016	Normal decadiaria anterior (D-1) al día del IF [mm/sem]	Acumulado decadiaria anterior al día del IF [mm/sem]	Anomalía decadiaria (D-1) [%]	Normal mes anterior (M-1) al día del IF [mm/mes]	Acumulado mes anterior al día del IF [mm/mes]	Anomalía mensual (M-1) [%]
Norte	Cutervo	29	Ago	4.7	2.3	-51	19.0	8.8	-54
	San Ramón	1	Set	30.5	0.0	-100	91.0	45.2	-50
	Shanusi	1	Set	38.8	0.5	-99	113.8	41	-64
	Cutervo	14	Nov	37.7	1.4	-96	121.0	9.4	-92
	H. Pucara	14 y 16	Nov	23.7	0.0	-100	72.4	2.6	-96
	Querocotillo	14 y 19	Nov	23.7	2.5	-89	70.5	13.9	-80
	Cueva Blanca	16	Nov	17.8	0.0	-100	70.8	11	-84
	El Limón	16	Nov	10.7	0.0	-100	35.1	0	-100
	Incahuasi	16	Nov	14.9	0.0	-100	42.0	2.1	-95
	Jamalca	16-22	Nov	42.3	5.3	-87	135.7	20.5	-85
	Chachapoyas*	16-22	Nov	28.9	3.0	-90	114.3	25.9	-77
	Magunchal	16-22	Nov	28.5	1.0	-96	93.0	12.3	-87
	Jazán*	16-22	Nov	29.8	0.8	-97	98.4	39.6	-60
	Bambamarca	18	Nov	30.0	14.2	-53	100.0	36.3	-64
	Q. Shugar	18	Nov	35.2	2.8	-92	105.3	25.5	-76
Llama	19	Nov	9.9	0.0	-100	37.4	6.2	-83	
Cochabamba	19	Nov	20.0	0.0	-100	82.4	4.1	-95	
Huambos	19	Nov	18.9	0.0	-100	70.1	17.2	-75	
Centro	Viques	29	Jun	3.2	0.0	-100	10.0	0	-100
	Yanahuanca	5	Ago	1.0	0.0	-100	10.4	12.5	20
	Pira	6	Set	0.5	0.0	-100	2.0	0	-100
	San Rafael*	8	Oct	11.9	17.8	50	36.4	26.4	-27
	Yanahuanca	8	Oct	19.6	15.1	-23	42.9	53.5	25
	Mollepata	15	Nov	11.8	2.1	-82	43.7	3.5	-92
	San Rafael*	17	Nov	25.5	18.3	-28	76.1	41.7	-45
Sur	Ollachea	19	Jul	7.2	2.7	-63	21.0	54.7	160
	Cuyo Cuyo	23 y 31	Jul	7.4	0.7	-91	21.5	19.2	-11
	Colquepata	29	Jul	2.5	0.0	-100	9.1	12.2	34
	Pisac	1	Ago	0.6	0.0	-100	4.4	7.3	66
	G. Kcayra	01 y 11	Ago	0.3	0.0	-100	3.1	4.5	45
	Cay Cay	01 y 11	Ago	0.6	0.0	-100	3.5	8.1	131
	Putina	8	Ago	0.9	0.0	-100	2.3	0	-100
	La Angostura	9	Ago	0.9	0.0	-100	2.3	0	-100
	Sicuani*	22	Ago	3.1	1.4	-55	5.2	1.4	-73
	Putina	11	Set	5.5	0.0	-100	12.3	4.4	-64
	Muñani	11	Set	3.9	0.2	-95	9.7	2.4	-75
	Progreso	11	Set	4.1	0.0	-100	8.9	14.8	66
	Sicuani*	12	Set	5.0	0.0	-100	9.2	6.9	-25
	Curahuasi	14	Set	2.1	0.1	-95	7.3	17.2	136
	Andahuaylas*	14	Set	6.2	0.0	-100	19.4	16.1	-17
Ollachea	17 - 18	Set	16.0	0.0	-100	41.6	7	-83	
Lampa	23	Nov	1.9	0.0	-100	3.2	0	-100	
Pauza	23	Nov	1.0	0.0	-100	1.9	0.3	-84	

\* Estaciones que solo cuentan con información desde 1993 hasta el 2010, para la obtención de las normales climáticas de precipitación.

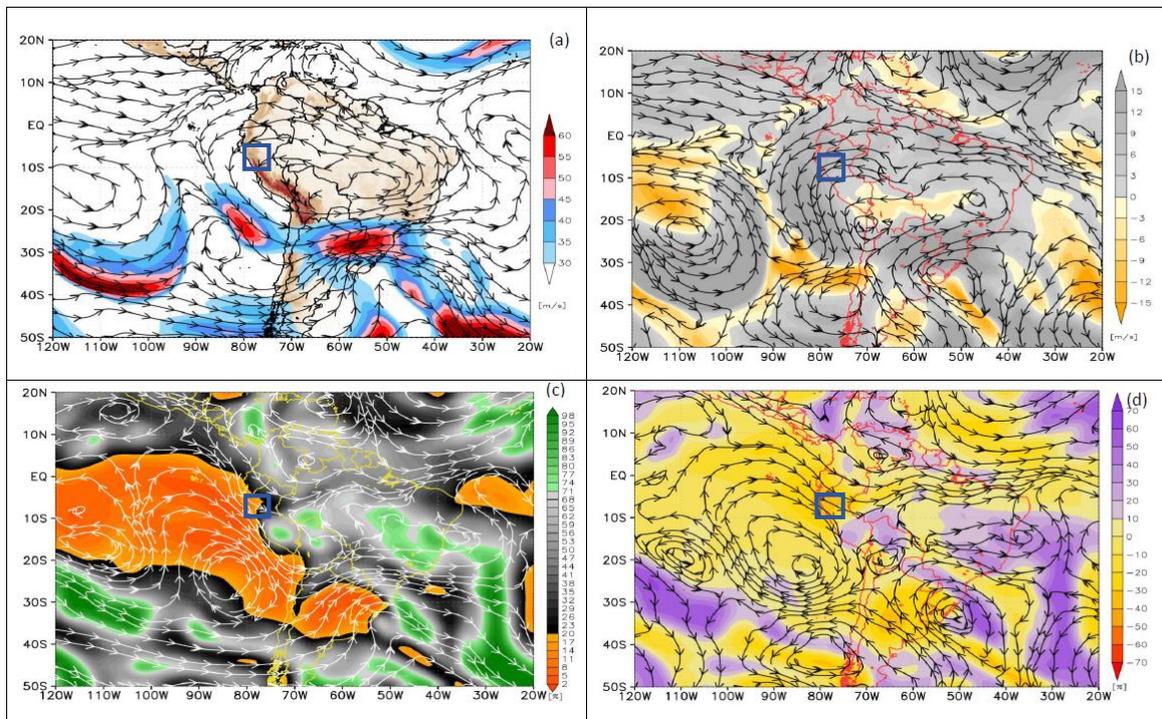
FUENTE: Tabla 6.1 de SENAMHI (2018)

#### 4.4.3. Determinación de Patrones Sinópticos de Circulación Atmosférica

Otro resultado del estudio fue la identificación de la circulación sinóptica predominante durante la ocurrencia de los IF. Para ello, se escogió un caso representativo durante el 18 de

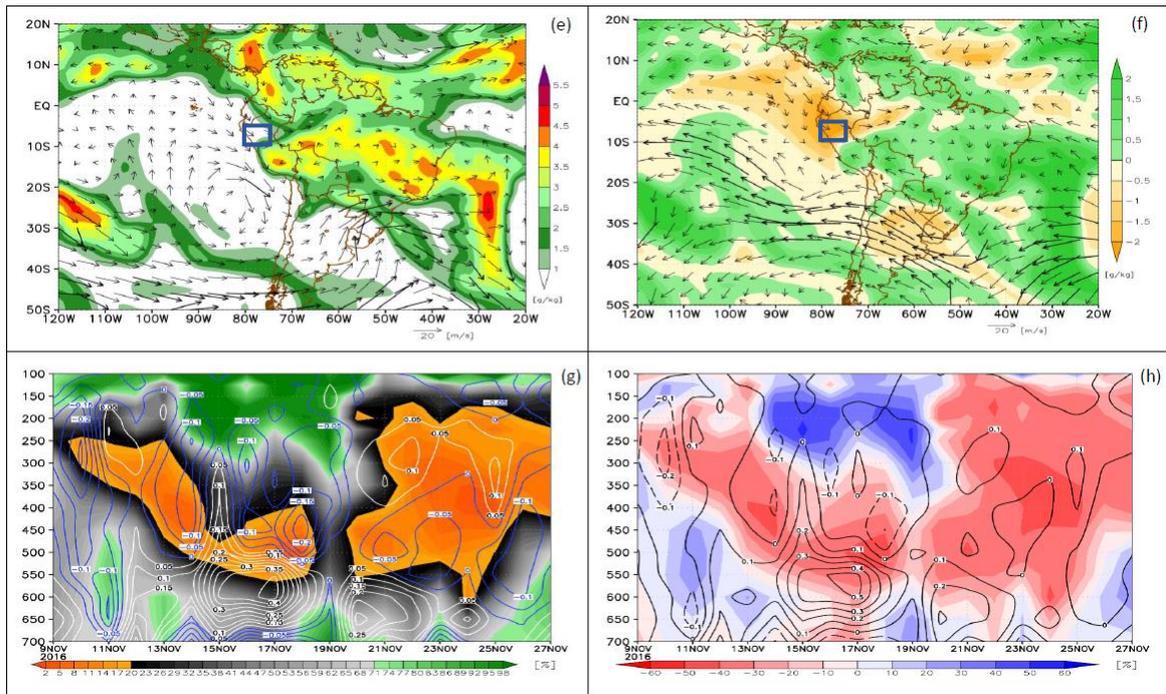
noviembre de 2016 en la región norte, ya que esa fecha representa el centro del período con mayor ocurrencia de IF en esa región (9-27 de noviembre).

En niveles altos (250 hPa) se presenta un sistema con giro antihorario con núcleo sobre 50°W y 15°S generando vientos anómalamente intensos del este sobre la región norte del Perú. En niveles medios (400-600 hPa) se observa un sistema anómalo con circulación horaria sobre el Pacífico cercano a Perú, el cual generó vientos del noreste advectando masa de aire seca desde el Pacífico ecuatorial hacia la región norte y centro del país, generando anomalías de humedad relativa de hasta -40% y de relación de mezcla en 500 hPa inferiores a -2g/Kg, llegando incluso hasta la Amazonía brasileña. El corte vertical de humedad relativa y velocidad vertical en el período analizado permitió identificar que la condición anómalamente seca se presentó en todo el perfil atmosférico y la subsidencia desde los 400 hPa hacia niveles inferiores (Figura 18).



**Figura 18:** (a) Corriente en chorro y circulación de vientos en 250 hPa [ms<sup>-1</sup>], (c) Humedad Relativa [%] y vientos promedio [ms<sup>-1</sup>] entre 400 y 600 hPa, y (b, d) sus anomalías.; correspondientes al 18 de noviembre de 2016. La región afectada por el incendio forestal está dentro del recuadro azul

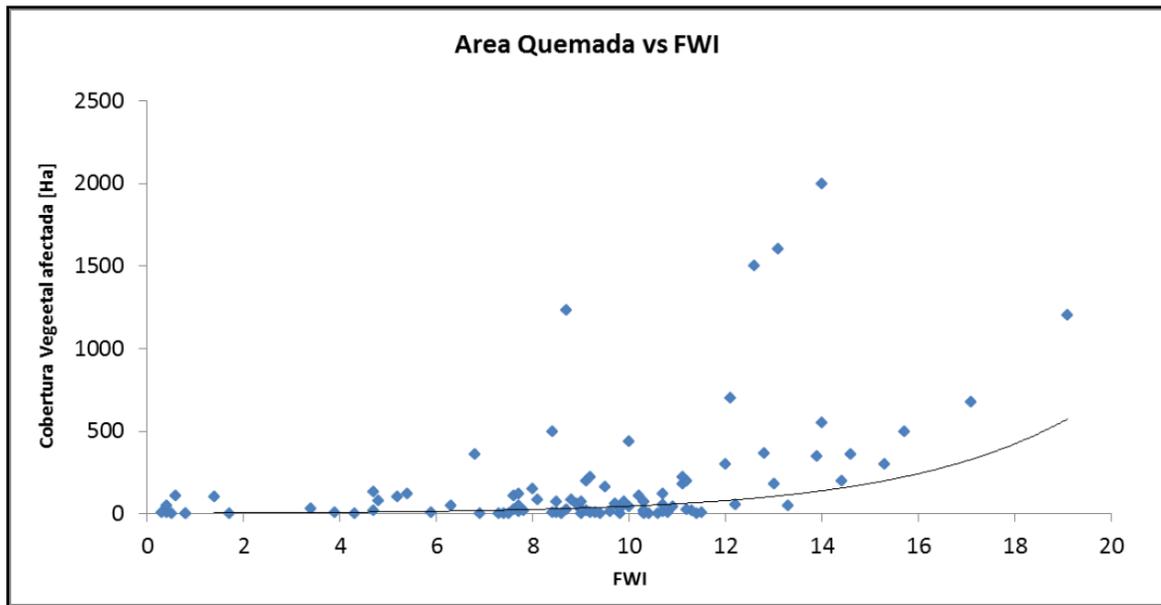
FUENTE: Figura 6.10 de SENAMHI (2018)



**Figura 18:** (Continuación) (e) Relación de mezcla [ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] y vientos [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] en 500 hPa, (g) Corte Vertical entre 700 y 100 hPa de Humedad Relativa [%] y Velocidad Vertical [ $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ], y (f y h) sus anomalías. La región afectada por el incendio forestal está dentro del recuadro azul  
**FUENTE:** Figura 6.10 de SENAMHI (2018)

#### 4.4.4. Aplicación del Índice Meteorológico de Incendios Forestales (Fire Weather Index) (FWI)

Como último objetivo del estudio de condiciones atmosféricas favorables a Incendios Forestales (SENAMHI, 2018), se realizó el análisis de correlación lineal entre los resultados del FWI generado con información de análisis del modelo GFS y el área de cobertura vegetal afectada por los IF (Figura 19). Se encontró que existe correlación directa, principalmente en IF que afectaron entre 100 y 1000 hectáreas de cobertura vegetal y valores de FWI entre 6 y 18 (categorías Moderado y Alto, respectivamente), con un coeficiente de correlación de 0,6; es decir, a mayor valor de área afectada por un IF, mayor valor de FWI.



**Figura 19:** Correlación entre el FWI y el área de cobertura vegetal afectada por todos los IF  
**FUENTE:** Figura 6.15 de SENAMHI (2018)

Cabe destacar que la cantidad de área afectada por los IF no depende estrictamente de las condiciones atmosféricas (pero sí es un factor principal), ya que también depende de la respuesta de control del IF, así como del lugar de ocurrencia (ej. si tiene mayor pendiente, la propagación es mayor). En ese sentido, en el estudio se encontró que, la mayoría de IF (alrededor de 70%) que afectaron menos de 100 has ocurrieron con valores de FWI entre 0 y 12; por otro lado, en la mayoría (67%) de IF que afectaron entre 100 y 1000 has se tuvo valores de FWI de entre 12 y 18; y en todos los IF que afectaron más de 1000 has, el valor del FWI fue superior a 18 (Tabla 4).

**Tabla 4:** Cantidad y porcentaje de IF entre junio y noviembre del 2016, según nivel de FWI y área afectada

FWI	Total	ha<100	100<ha<1000	ha>1000	% IF (ha<100)	% IF (100≤ha<1000)	% IF (ha≥1000)
FWI≤6	18	13	5	0	72	28	0
6<FWI≤12	60	44	15	1	73	25	2
12<FWI≤18	15	2	10	3	13	67	20
18<FWI≤24	1	0	0	1	0	0	100

**FUENTE:** Tabla 6.2 de SENAMHI (2018)

#### 4.4.5. Generación de Productos y Servicios

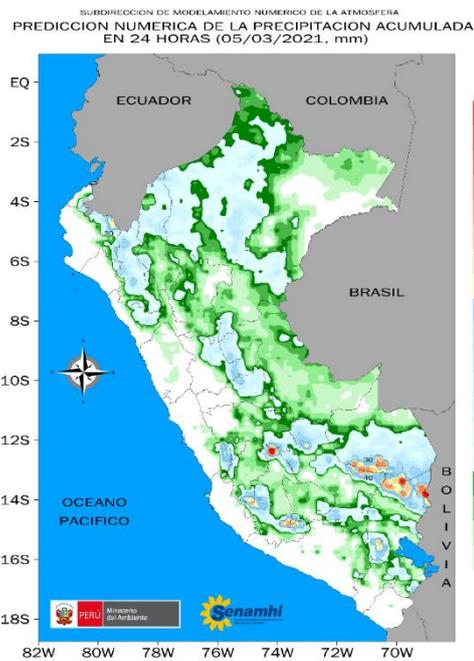
Luego de la identificación de las necesidades de pronóstico especializado de las entidades que trabajan en la prevención, control y manejo de IF; de las principales variables atmosféricas y circulaciones sinópticas que favorecen la ocurrencia de un IF; así como de la

efectividad del FWI; se plantearon diversos productos y servicios para la vigilancia atmosférica de Incendios Forestales. Estos productos se encuentran agrupados en dos actividades principales, monitoreo diario y pronóstico meteorológico, las cuales se detallan a continuación:

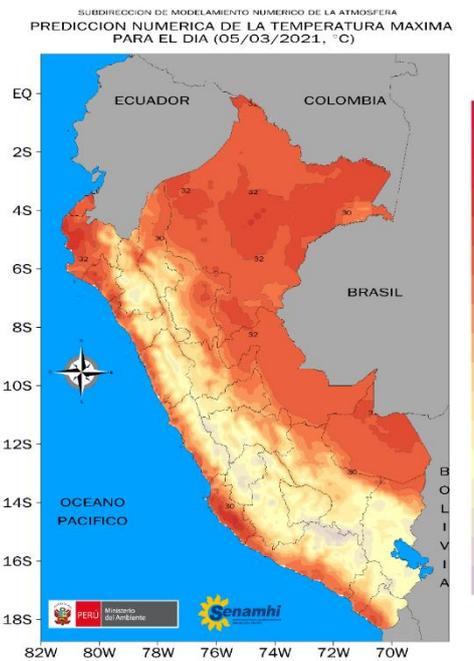
a) Monitoreo Diario

Esta actividad es realizada de forma rutinaria por los pronosticadores de la SPM. Para ello, se utilizan los productos generados de forma automática, los cuales se detallan a continuación: mapas de precipitación diaria, temperatura máxima y humedad relativa (13:00 hora local) pronosticada para el día, mapas de días continuos sin lluvia, el FWI, y las imágenes de satélite de temperatura del fuego con GOES-16. A continuación, se detallan estos productos.

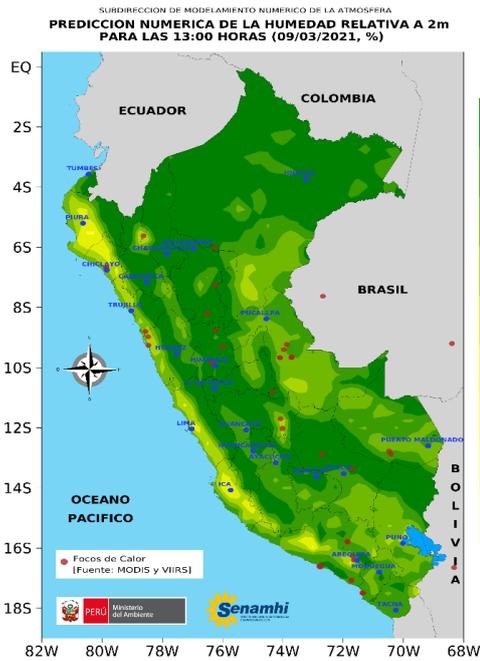
- Mapas de precipitación, temperatura máxima y humedad relativa mínima diaria: Estos mapas se generan de forma diaria a las 07:00 am y representan el pronóstico de precipitación acumulada diaria (Figura 20), temperatura máxima diaria (Figura 21) y humedad relativa a las 13 horas (~mínima diaria) (Figura 22), obtenidos con el modelo ETA de 22 km de SENAMHI (precipitación y temperatura) y GFS de 0.25° (humedad relativa).



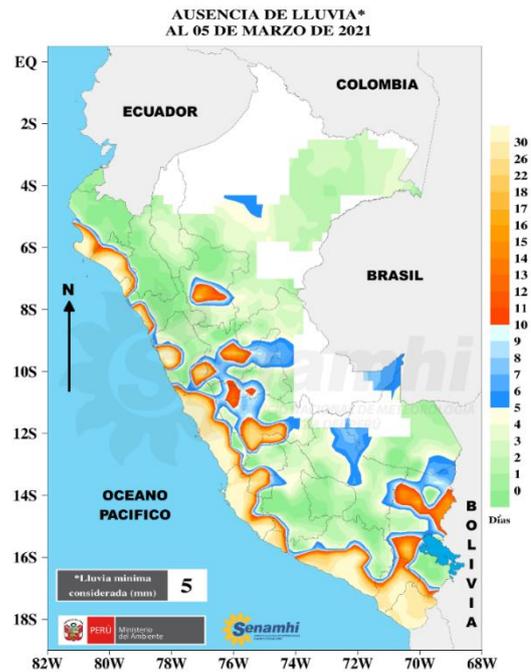
**Figura 20:** Mapa de precipitación acumulada diaria pronosticada



**Figura 21:** Mapa de temperatura máxima diaria pronosticada

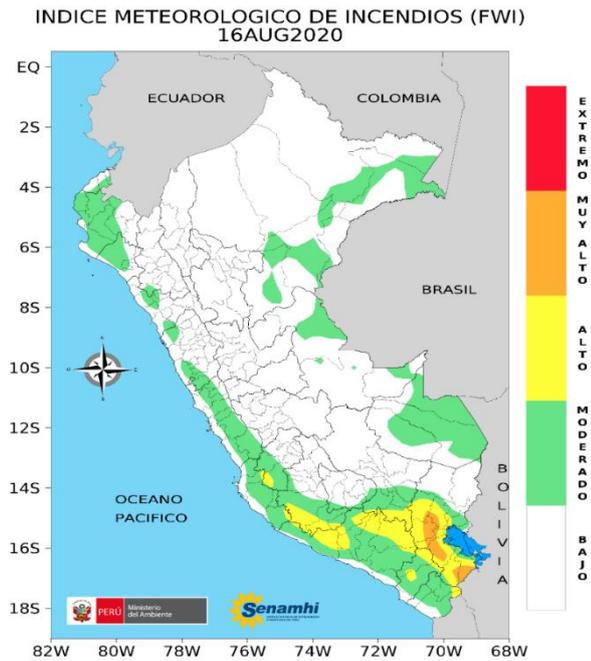


**Figura 22:** Mapa de humedad relativa a las 13 horas (mínima del día) pronosticada (sombreado, %). Focos de calor del satélite polar (puntos rojos)



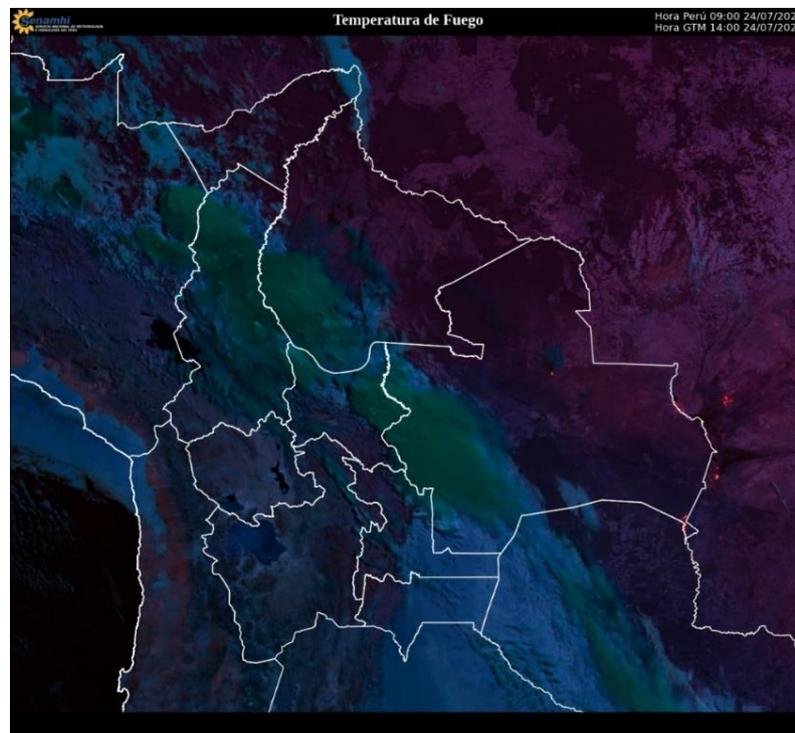
**Figura 23:** Mapa de conteo diario de días con ausencia de lluvia. Valor mínimo considerado: 5mm

- Mapas de ausencia de lluvia: Estos mapas se generan de forma diaria a las 09:00 am a partir de los datos de la red de estaciones (automáticas y convencionales) de SENAMHI, así como las estaciones de la red de aeropuertos y aeródromos del Perú y países limítrofes. Representan el conteo de días sin lluvia o precipitación, de forma continua, considerando un valor mínimo de 5mm (
- Figura 23), 2mm y 1mm.
- Índice Meteorológico de Incendios Forestales (FWI): Estos mapas se actualizan diariamente a las 09:00 am, y presenta el pronóstico del FWI para el día actual (Figura 24). Se realiza con los datos del modelo GFS 0.25° y representa las áreas donde, de iniciarse un IF, este tendría mayor facilidad para propagarse y sería más difícil de extinguir. Se utiliza a menudo para indicar la dificultad del control de incendios en función de la intensidad del fuego del incendio y la capacidad de lucha contra incendios (Servicio Meteorológico de Malasia, 2017). Tiene una escala desde bajo hasta extremo, considerando los siguientes valores para Perú: Bajo (0-6); Moderado (6-12); Alto (12-18); Muy Alto (18-24); Extremo (>24) (SENAMHI, 2018).



**Figura 24:** Mapa del Índice meteorológico de Incendios Forestales (FWI)

- Temperatura de Fuego – Composición RGB de GOES-16: Este producto permite identificar los posibles IF en áreas con poca o nula cobertura nubosa (Figura 25). Se generan cada 10 minutos durante las 24 horas del día.

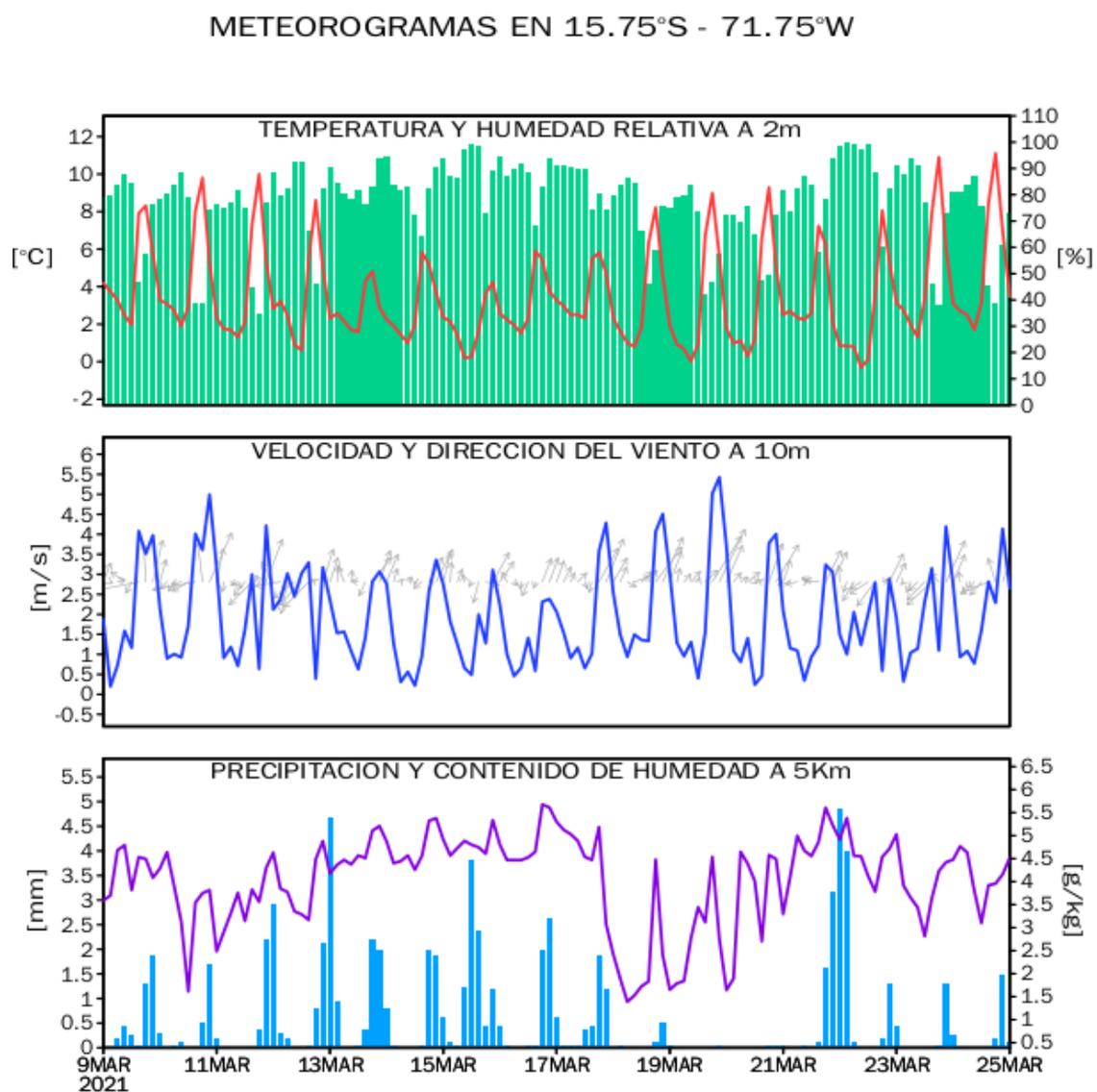


**Figura 25:** Imagen de Temperatura del Fuego - composición RGB de GOES-16, para las 14:00UTC del 24 de julio de 2020

b) Pronóstico Meteorológico

- Pronóstico numérico.

Se utilizan los modelos ETA de 22 km y GFS de 0.25° para generar pronósticos de precipitación, temperatura y humedad relativa a 2m de la superficie, velocidad y dirección del viento a 10m, humedad en niveles medios y FWI. Estos pronósticos tienen dos formatos: mapas considerando todo el Perú, utilizados para el FWI diario y el pronóstico para los siguientes 9 días; y meteorogramas de forma puntual, para el resto de variables, con un pronóstico para los siguientes 15 días con un intervalo de cada 3 horas (Figura 26).



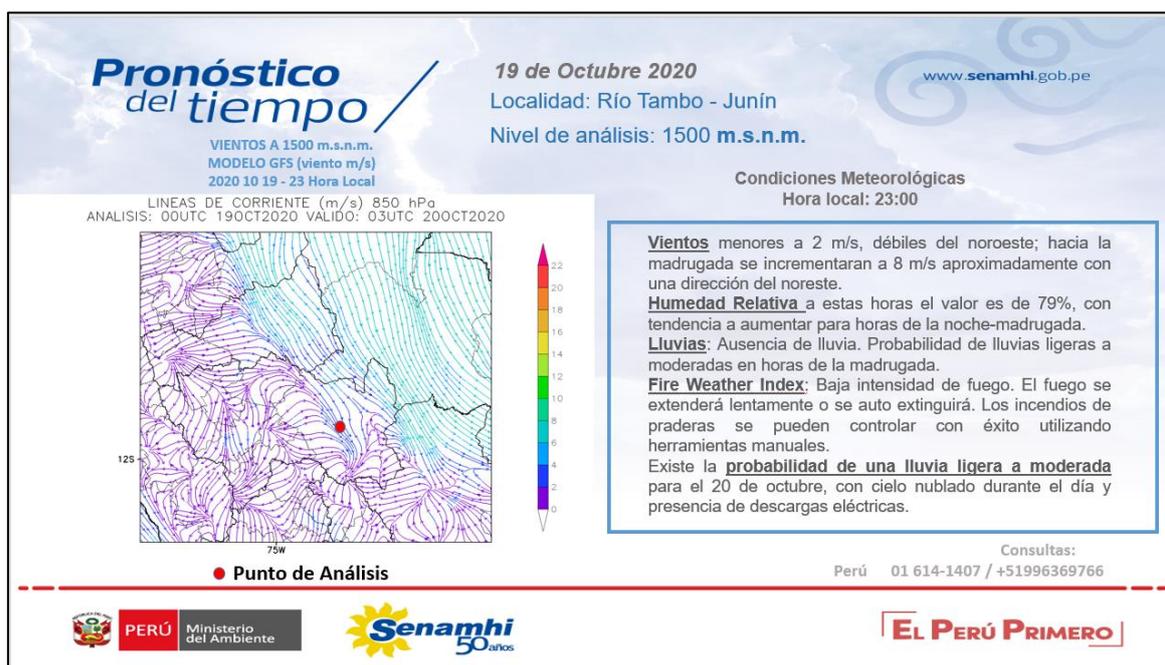
**Figura 26:** Meteorograma para los siguientes 15 días de temperatura y humedad a 2m, velocidad y dirección del viento a 10m, precipitación y contenido de humedad a 5km para la grilla que representa a 15.75°S – 71.75°W

- Pronóstico Analizado

Este pronóstico se realiza en temporada seca (mayo-noviembre) con el análisis del meteorólogo pronosticador responsable de las condiciones atmosféricas favorables para incendios forestales, tanto del SENAMHI de Perú como de Bolivia. Asimismo, se complementa con la información de focos de calor emitida por SERFOR. Se emiten 4 tipos de pronóstico, los cuales se diferencian por la frecuencia de emisión: Eventual (durante la ocurrencia de un IF considerable), diario, semanal y mensual. Estos servicios se difunden mediante correo y redes sociales. A continuación, se detallarán cada uno de estos servicios.

a) Eventual:

Este servicio se implementó el 2020 y surgió como requerimiento de SERFOR para el control de IF considerables. Consiste en un pronóstico de vientos, humedad, precipitación y FWI para las próximas horas en la localidad donde está ocurriendo un IF de gran extensión y difícil control. Se realiza una vez solicitado por SERFOR y se emite en un plazo máximo de dos horas luego de la solicitud. En la Figura 27 se muestra un ejemplo del mismo.



**Figura 27:** Ejemplo del pronóstico eventual emitido el 19 de octubre de 2020 para un IF ocurrido en la localidad de Río Tambo – Junín

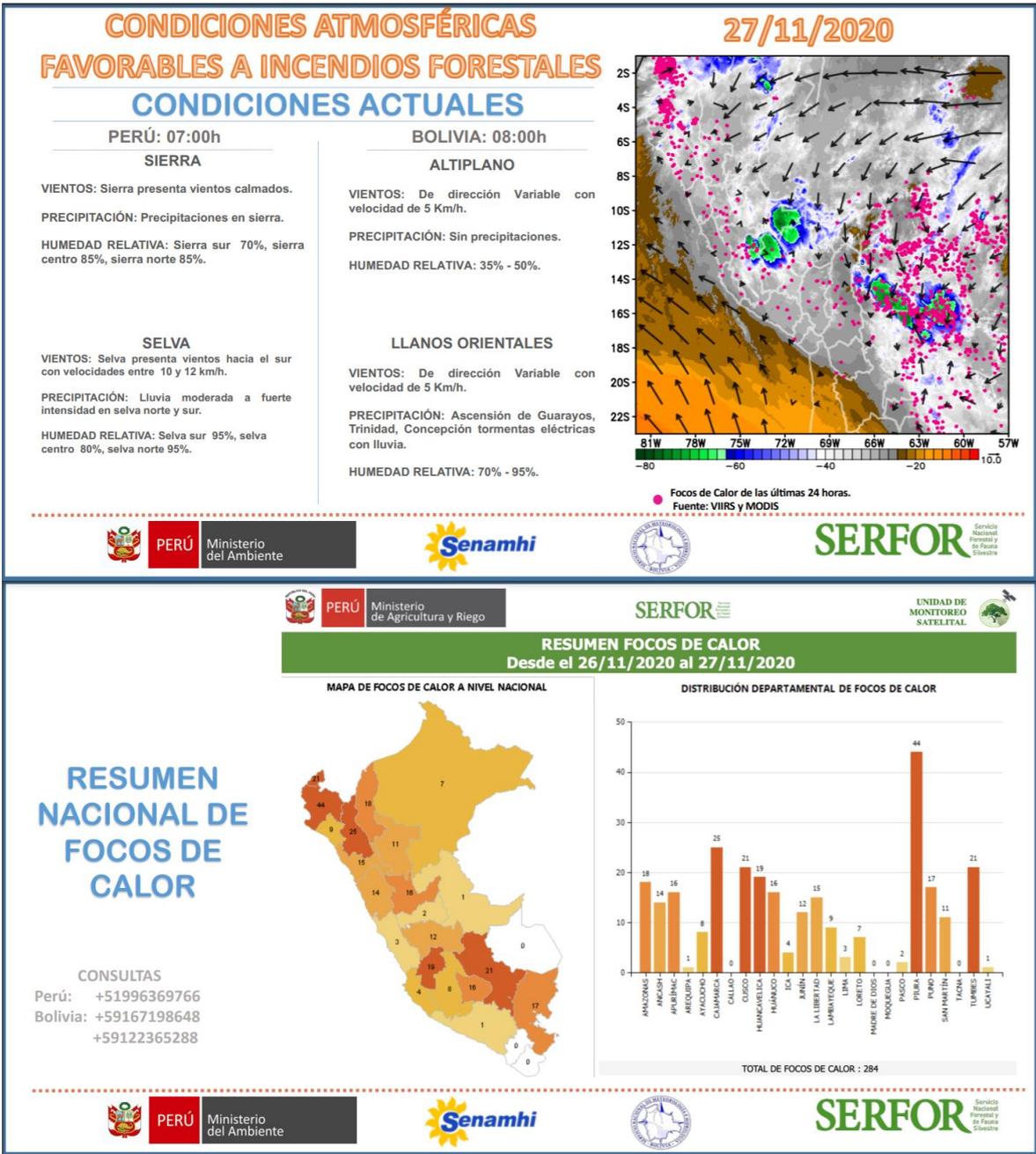
b) Diario

Este servicio fue implementado el 2019 a raíz de los incendios forestales ocurridos en la Amazonía brasileña, boliviana y paraguaya, que generaron transporte de humo y

contaminantes hacia Perú, así como peligro de generación de IF en la Amazonía peruana. Cabe destacar que el 2019 fue el año en el cual se observó un incremento notable de IF en la Amazonía comparado a años anteriores, pero la tendencia va en aumento, siendo el 2020 uno de los años con mayor registro desde que se tiene información satelital (Babić et al, 2021). Es por ello que este servicio cobra importancia y se emite diariamente a las 10:00 horas, se realiza de manera conjunta, luego de una coordinación diaria con el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia y el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR).

Requiere del análisis de un profesional capacitado en el uso de las herramientas básicas para el pronóstico del tiempo como: imágenes de satélite, datos de estaciones meteorológicas, radiosondeos, modelos numéricos e índices meteorológicos para incendios forestales. Asimismo, el profesional meteorólogo participa de la reunión diaria de condiciones sinópticas y regionales que se desarrolla con los otros meteorólogos de las Direcciones Zonales de SENAMHI y la SPM, reunión que denominada como “Briefing Meteorológico”.

Luego del análisis, el pronosticador emite el pronóstico de nubosidad, humedad, precipitación y vientos (principales variables meteorológicas necesarias para la predicción de condiciones atmosféricas favorables a incendios forestales) para el día de emisión, así como para el día siguiente, considerando como área de cobertura a la sierra y selva peruana (SENAMHI-Perú) y boliviana (SENAMHI-Bolivia). Además, se muestra el resumen de focos de calor a nivel nacional, el cual es realizado por SERFOR. En la Figura 28 se puede observar un ejemplo de este tipo de servicio.



**Figura 28:** Modelo de un pronóstico diario emitido el 27 de noviembre de 2020

**FUENTE:** <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02256SENA-259.pdf>

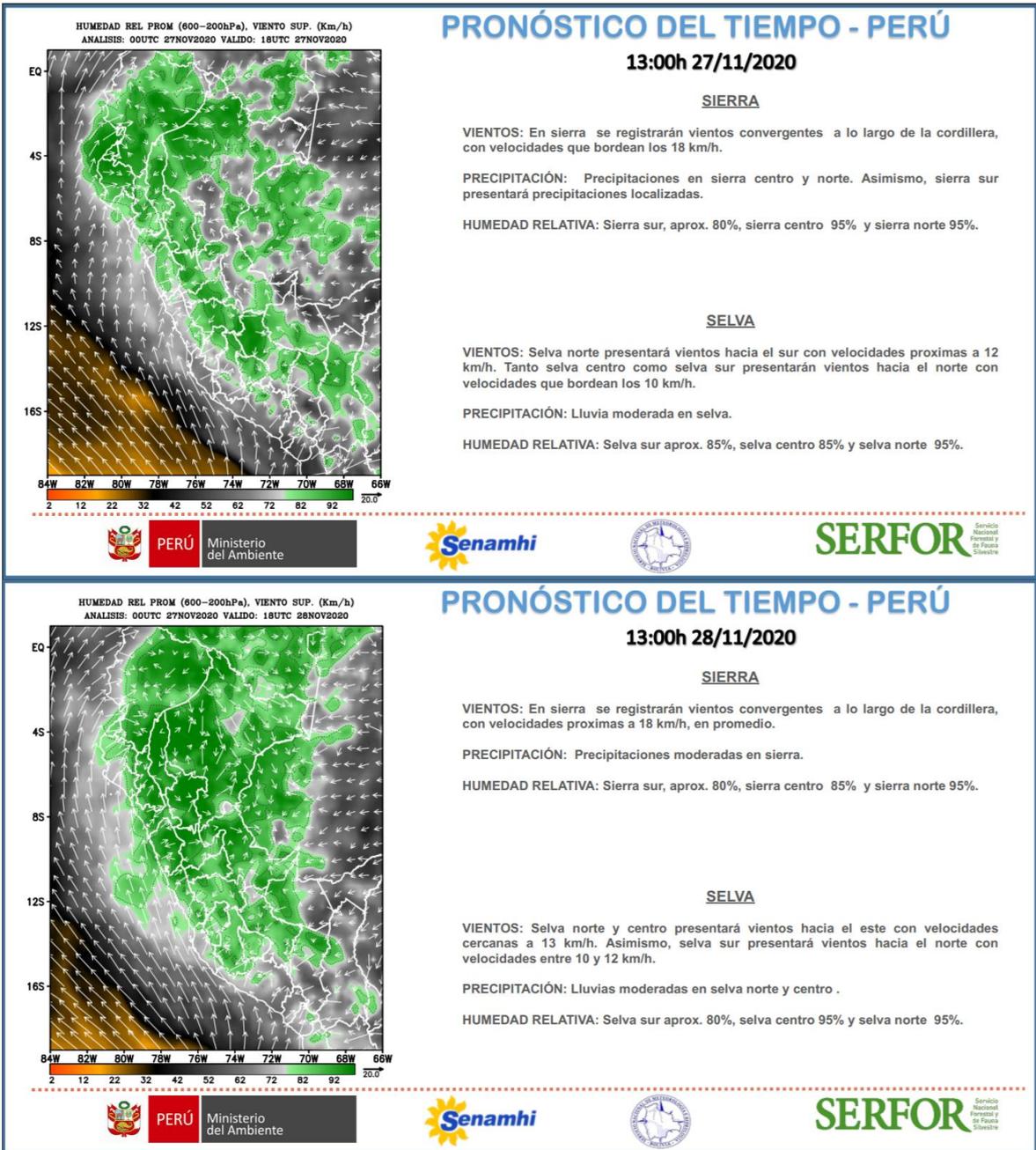


Figura 28: (Continuación)

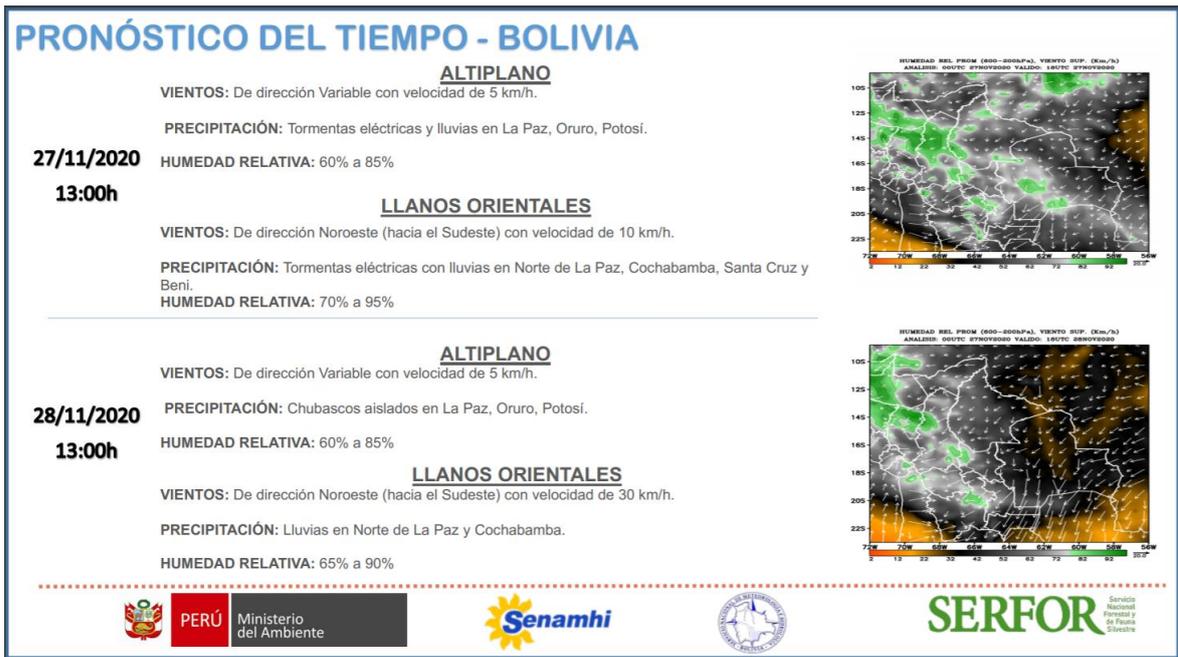


Figura 28: (Continuación)

c) Semanal

Es un boletín que se comenzó a emitir el 2020, de manera semanal los días jueves, en el que se resume la información de focos de calor de la semana anterior (SERFOR), se da un reporte de incendios forestales de la semana anterior, obtenidos de la base de datos del SINPAD-INDECI, y se realiza una proyección de las condiciones atmosféricas favorables a incendios forestales para la semana siguiente, así como el área en el territorio nacional donde existe una mayor probabilidad de su ocurrencia debido a factores meteorológicos.

Para la determinación del área con condiciones favorables a incendios forestales de la siguiente semana, primero se realiza el análisis de las regiones con mayor cantidad de incendios durante la semana pasada (área propensa a repetirse IF), luego se realiza una discusión sinóptica entre los meteorólogos pronosticadores con experiencia el pronóstico atmosférico de IF, y luego se define en un software SIG el área consensuada. Posteriormente se realiza un análisis en formato texto, el cual va acompañado de las imágenes necesarias para el boletín.

Esta área también se comparte en formato *shape* para que pueda ser utilizado por varias instituciones en el análisis de riesgos por IF para la siguiente semana. En la Figura 29 se observa un ejemplo del este tipo de servicio.



# BOLETÍN SEMANAL DE CONDICIONES ATMOSFÉRICAS FAVORABLES A INCENDIOS FORESTALES

## INFORME

Del 12 al 18 de noviembre 2020

## CONDICIONES FAVORABLES

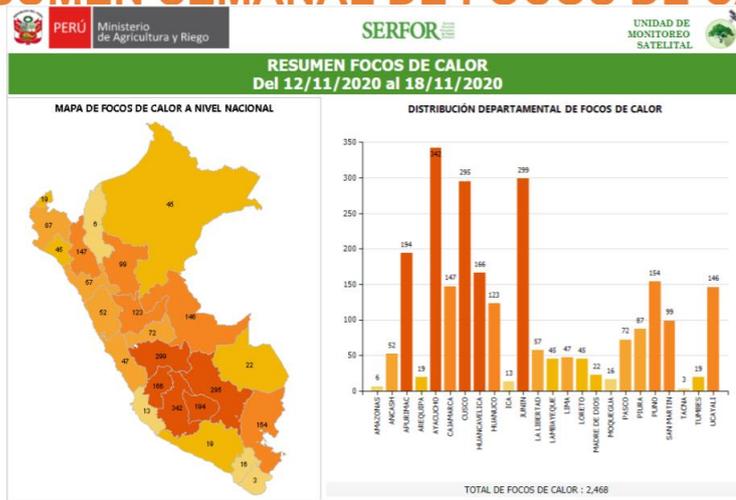
Del 19 al 25 de noviembre 2020



Fuente: Jaime Morales Lampa, Puno



## RESUMEN SEMANAL DE FOCOS DE CALOR



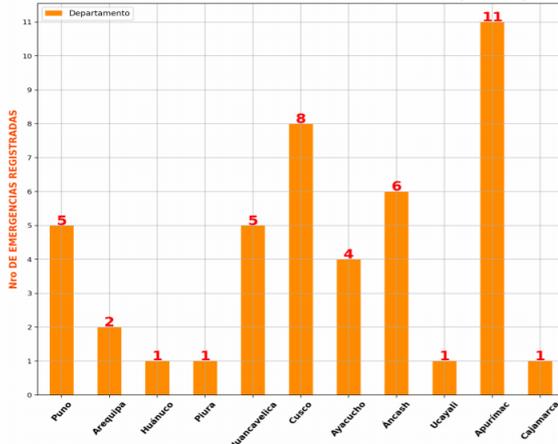
[www.senamhi.gob.pe](http://www.senamhi.gob.pe) // /2

Figura 29: Modelo de un pronóstico semanal emitido el 19 de noviembre de 2020

FUENTE: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02257SENA-16.pdf>

# RESUMEN SEMANAL DE INCENDIOS FORESTALES

EMERGENCIAS REGISTRADAS POR INCENDIOS FORESTALES DEL 12/11 AL 18/11 2020



ELABORACIÓN: SENAMHI

FUENTE : INDECI



Semana del 12 al 18 de noviembre 2020

## REGIÓN NORTE

Durante la semana de análisis se registraron incendios forestales en Piura y Cajamarca ambos con 1. Asimismo, SERFOR contabilizó para Piura 87 focos de calor y para Cajamarca, 147.

## REGIÓN CENTRO

Con respecto a la zona centro, Áncash registró 6 incendios forestales, mientras que Huánuco y Ucayali registraron 1. A su vez, SERFOR contabilizó 52 focos de calor para Áncash; Huánuco, 123 y Ucayali, 146.

## REGIÓN SUR

Por otro lado, la zona sur registró un mayor número de incendios forestales, Apurímac con 11; Cusco, 8; Puno y Huancavelica, 5; Ayacucho, 4 y Arequipa, 2. SERFOR en su resumen de focos de calor contabilizó para Apurímac, 194; Cusco, 295; Puno, 154; Huancavelica, 166; Ayacucho, 342 y Arequipa con 19.

[www.senamhi.gob.pe](http://www.senamhi.gob.pe) /// 2

# CONDICIONES FAVORABLES A INCENDIOS FORESTALES

Para la semana del 19 al 25 de noviembre 2020

**EN LA COSTA**, la región interior presentará condiciones favorables desde Tumbes hasta Lambayeque, con vientos hacia el noreste con velocidades próximas a 40 km/h.

**EN LA SIERRA**, se esperan condiciones atmosféricas favorables para Huancavelica, Ayacucho, Arequipa, Moquegua, Tacna, Apurímac, Cusco y Puno; donde se registrarán vientos que convergen a lo largo de la cordillera con velocidades entre 40 y 50 km/h, en promedio. Además, estas regiones tendrán humedad relativa por debajo del 40%.



[www.senamhi.gob.pe](http://www.senamhi.gob.pe) /// 3

Figura 29: (Continuación)

<p>Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica Gabriela Rosas <a href="mailto:grosas@senamhi.gob.pe">grosas@senamhi.gob.pe</a></p> <p>Subdirección de Predicción Meteorológica Nelson Quispe <a href="mailto:nquispe@senamhi.gob.pe">nquispe@senamhi.gob.pe</a></p>	<p>El boletín semanal de incendios forestales lo encuentras en: <a href="https://www.senamhi.gob.pe/site/incendio/">https://www.senamhi.gob.pe/site/incendio/</a></p> <p>Para para mayor información sobre los avisos meteorológicos, visite este link : <a href="http://www.senamhi.gob.pe/avisos">http://www.senamhi.gob.pe/avisos</a></p> <p>Próxima actualización: <b>26/11/2020</b></p>
--	--

---

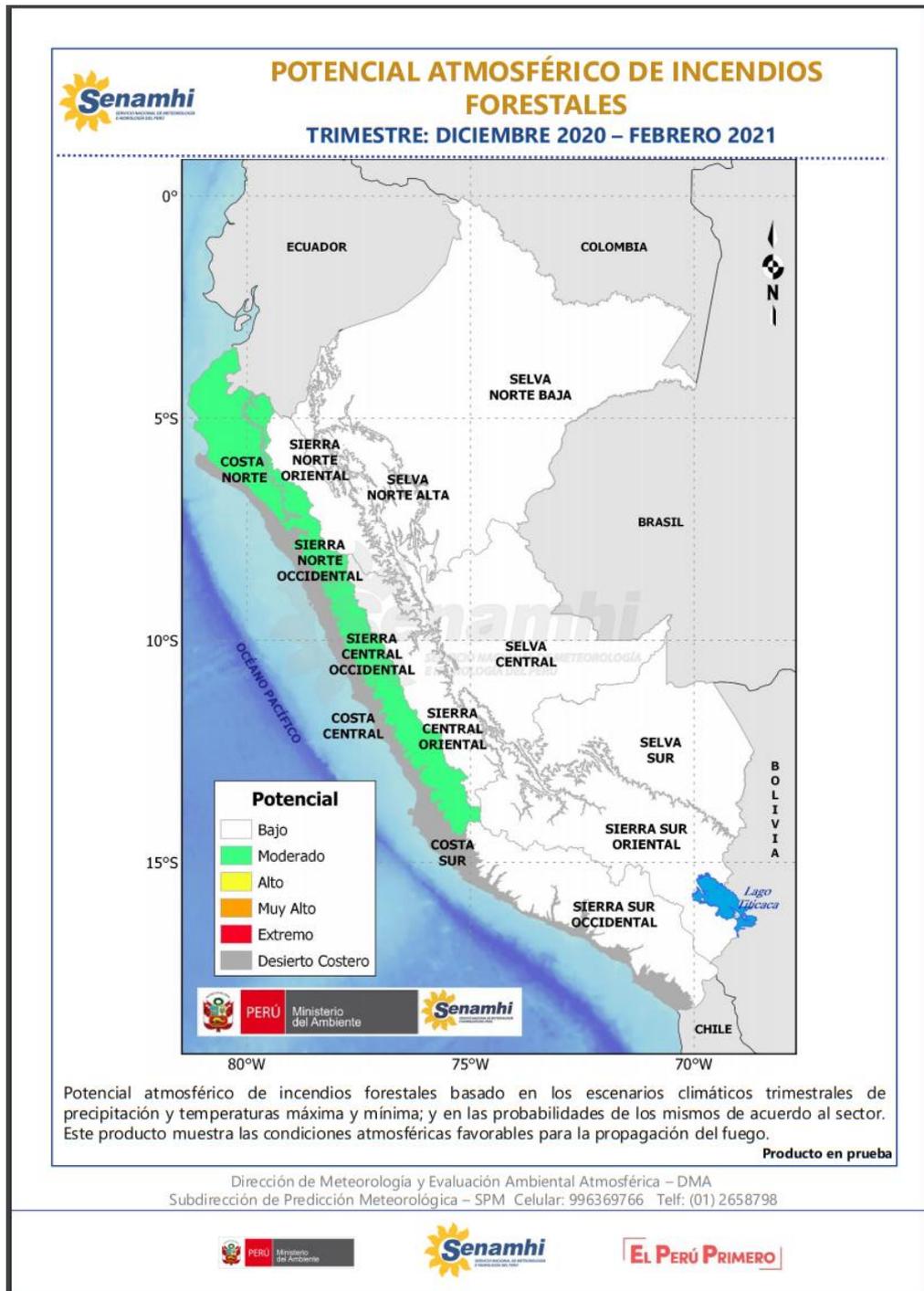
 <p>Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI Jr. Cahuide 785, Jesús María Lima 11 - Perú</p>	 <p><b>Pronóstico:</b> 996369766 (Whatsapp: Atención las 24 horas)</p> <p><b>Consultas y sugerencias:</b> <a href="mailto:pronosticador@senamhi.gob.pe">pronosticador@senamhi.gob.pe</a></p>
--	---

**Figura 29:** (Continuación)

d) De Emisión Mensual

Es un servicio que se emite a principio de cada mes, y comenzó a emitirse en octubre del 2020, en el que se muestra el potencial atmosférico de incendios forestales basado en los escenarios climáticos trimestrales de precipitación y temperaturas máxima y mínima; y en las probabilidades de los mismos de acuerdo al sector.

El mismo se presenta en un mapa en el que se distinguen trece sectores a nivel nacional: Costa Norte, Costa Central, Costa Sur, Sierra Norte Oriental, Sierra Norte Occidental, Sierra Central Occidental, Sierra Central Oriental, Sierra Sur Occidental, Sierra Sur Oriental, Selva Norte Alta, Selva Norte Baja, Selva Central y Selva Sur (Figura 30).



**Figura 30:** Modelo de pronóstico trimestral, emitido a inicios de diciembre de 2020  
**FUENTE:** <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02259SENA-3.pdf>

Para la emisión de este servicio se considera la metodología planteada por Ita (2020), y se describe a continuación:

Primero, se realizó un análisis de idoneidad de sitio o *Site Suitability Analysis*. Este método consiste en la identificación del mejor lugar para la ocurrencia de algo o determinar el mejor lugar para ubicar una escuela, etc. Para ello, se factorizan múltiples variables, a las cuales

se les asigna un nivel de importancia, para determinar las ubicaciones que mejor cumplen con los criterios establecidos para el sitio de interés.

Se emplearon los productos de pronóstico trimestral de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima emitidos por la Subdirección de Predicción Climática (SPC) de SENAMHI. Este pronóstico es emitido por sectores climáticos (costa norte, costa centro, costa sur, sierra occidental norte, etc).

Se asignaron niveles de importancia a los escenarios trimestrales de los pronósticos climáticos, los cuales están asociados a la ocurrencia y/o propagación de IF en el Perú (SENAMHI, 2018) y se pueden observar en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Nivel de importancia del escenario climatológico. La escala varía del 1 al 5. Donde 1, indica poca importancia y 5, muy importante para los incendios forestales

<b>Escenario</b>	<b>TN</b>	<b>TX</b>	<b>PP</b>
Bajo lo normal	5	1	5
Normal	3	3	3
Sobre lo normal	1	5	1

\* TN: Temperatura mínima, TX: Temperatura máxima, PP: precipitación

**FUENTE:** Tabla 1 de Ita (2020).

Luego, se otorgó niveles de importancia a las probabilidades de los pronósticos climáticos (Tabla 6).

**Tabla 6:** Nivel de importancia a las probabilidades

<b>Probabilidad</b>	<b>Importancia</b>
< 40 (no significativo)	0
40 - 50	1
50 - 60	2
60 - 70	3
70 - 80	4
> 80	5
Periodo seco*	5

\*Solo para precipitación

**FUENTE:** Tabla 2 de Ita (2020).

Asimismo, se consideró pesos para la ponderación de cada variable, considerando el nivel de importancia identificados en SENAMHI (2018).

**Pesos para la ponderación:**

- Precipitación: 0.5
- T. máxima: 0.25
- T. mínima: 0.25

Todos estos pesos y niveles de importancia permitieron generar la siguiente ecuación para el Potencial Trimestral de Incendios Forestales (PTIF) en el Perú:

$$PTIF = PP * Prob_{pp} * 0.5 + TN * Prob_{tn} * 0.25 + TX * Prob_{tx} * 0.25$$

Donde: PP, TN y TX, se obtienen de la Tabla 5 y Prob<sub>pp</sub>, Prob<sub>tn</sub> y Prob<sub>tx</sub>, de la Tabla 6.

e) Para finalizar, se estableció una escala para el resultado del potencial trimestral de Incendios Forestales con el mismo código de colores del FWI (Tabla 7). Asimismo, cabe destacar que no se consideró la costa para la emisión de este producto, debido a que esta región no presenta áreas extensas de vegetación que podría verse afectado por un IF, debido a su clima seco. Por ello, en el producto final se agregó una máscara a esta región (Figura 30).

**Tabla 7:** Escala final del potencial atmosférico asociado a incendios forestales

Valores	Escala
< 5	Bajo
[5 – 10>	Moderado
[10 – 15>	Alto
[15 - 20>	Muy Alto
> 20	Extremo

**FUENTE:** Tabla 3 de Ita (2020)

#### 4.4.6. Presentaciones interinstitucionales

Este penúltimo paso se da de forma constante con las entidades involucradas en la gestión de riesgos de IF. Mediante todas las reuniones que se tuvieron desde el 2017 hasta la actualidad han surgido varias mejoras para nuestros productos y servicios. Asimismo, también se tienen reuniones constantes con el grupo de trabajo de SENAMHI en IF, en las cuales se discuten y proponen cambios y mejoras para los productos y servicios. Las principales mejoras que se obtuvieron considerando este paso se listan a continuación:

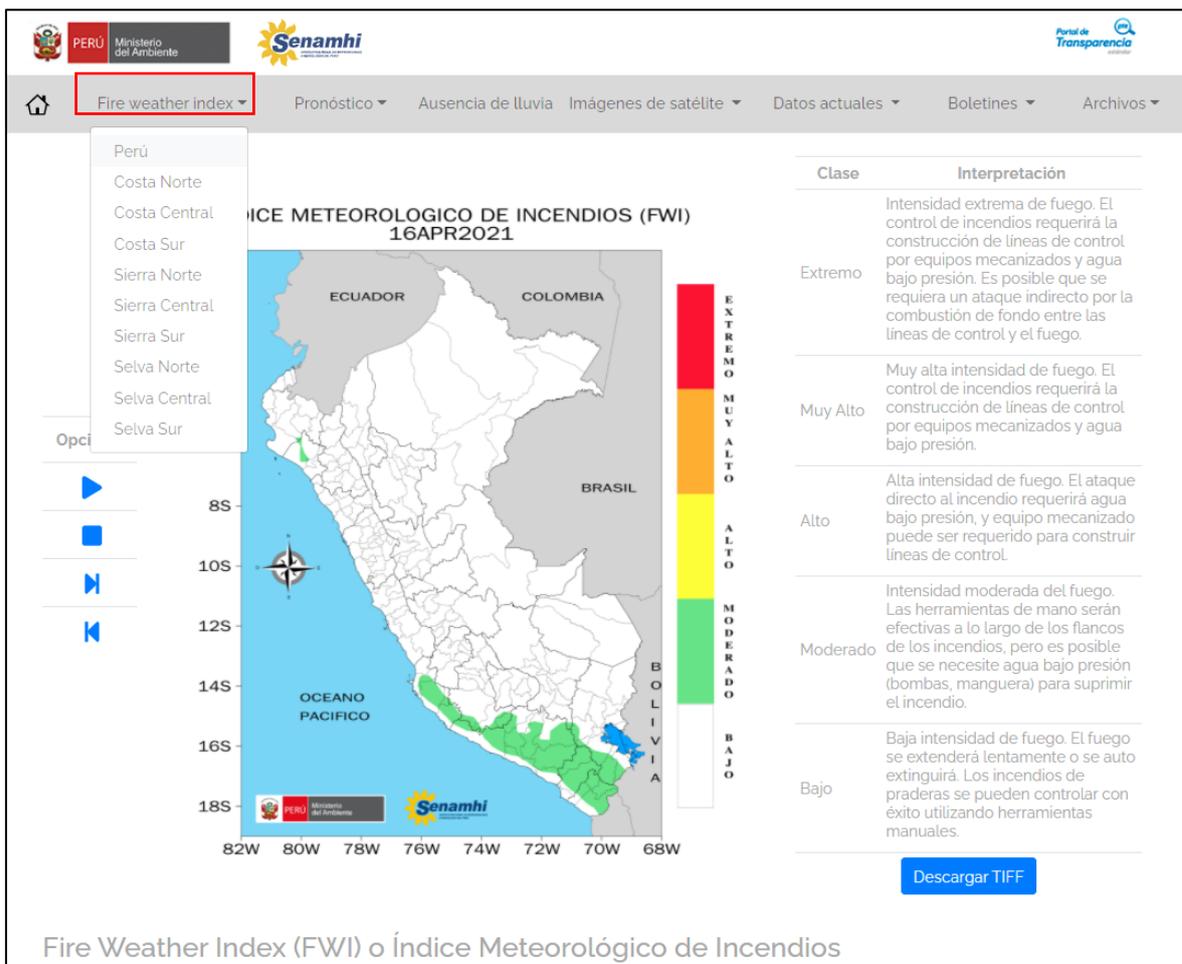
- Descargas de los mapas en formato tiff y/o shape: Esto fue un requerimiento de la mayoría de las instituciones puesto que requieren los mapas de forma georreferenciada para su utilización directa.
- FWI de forma regional: Permitiría tener una mejor visualización del área del FWI para una región adecuada.
- Vientos de forma horaria: Este requerimiento surgió de la Compañía de Bomberos del Perú, de SERNANP y SERFOR, puesto que solicitaban tener las condiciones de viento en tiempo real durante la ocurrencia de un IF para el control del fuego.
- Temperatura de fuego de forma regional: Se solicitó que las imágenes de satélite del producto de Temperatura del Fuego se regionalicen en costa norte, centro, sur, sierra norte, centro, etc, con el objetivo de una mejor visualización y vigilancia de los focos de calor identificados por GOES-16.
- Agregar los focos de calor en los mapas de humedad: Se vio conveniente agregar los focos de calor identificados por SERFOR o VIIRS/MODIS de forma diaria a los mapas de humedad de las 13 horas emitidos por SENAMHI, para un mejor análisis de las regiones con probables IF.
- Emisión de notas de prensa: Cuando se observan condiciones atmosféricas favorables para IF de forma continua se decide emitir notas de prensa para que se difunda a todas las autoridades y la población en general.

#### 4.4.7. Publicación en la plataforma web de los productos y servicios

Como último paso, los productos y servicios anteriormente descritos son publicados en la web oficial del SENAMHI, mediante una plataforma especializada para la “Vigilancia Atmosférica de Incendios Forestales”, en el siguiente link: <https://www.senamhi.gob.pe/site/incendio/>.

A continuación, se presentan las principales ventanas que se encuentran en dicha plataforma web.

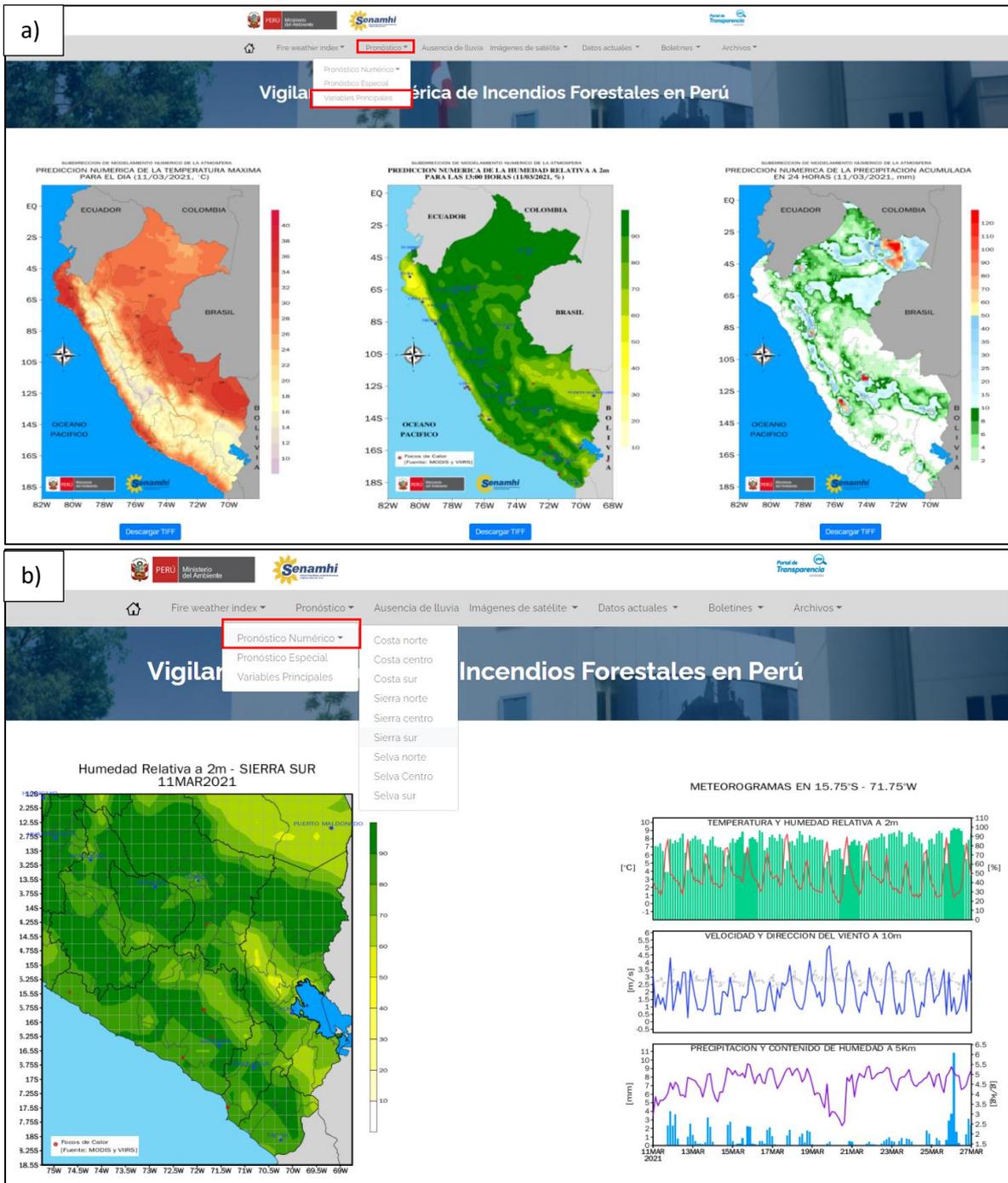
- a) Índice Meteorológico de Incendios Forestales (FWI), con la regionalización para 9 regiones del país, el pronóstico para hoy y los siguientes 9 días, así como la posibilidad de descarga en formatos TIFF (Figura 31) y Shape (IDESEP<sup>1</sup>-SENAMHI).



**Figura 31:** Visualización del FWI en la plataforma web de IF de SENAMHI. El recuadro rojo permite visualizar la ruta cómo se encuentra el producto

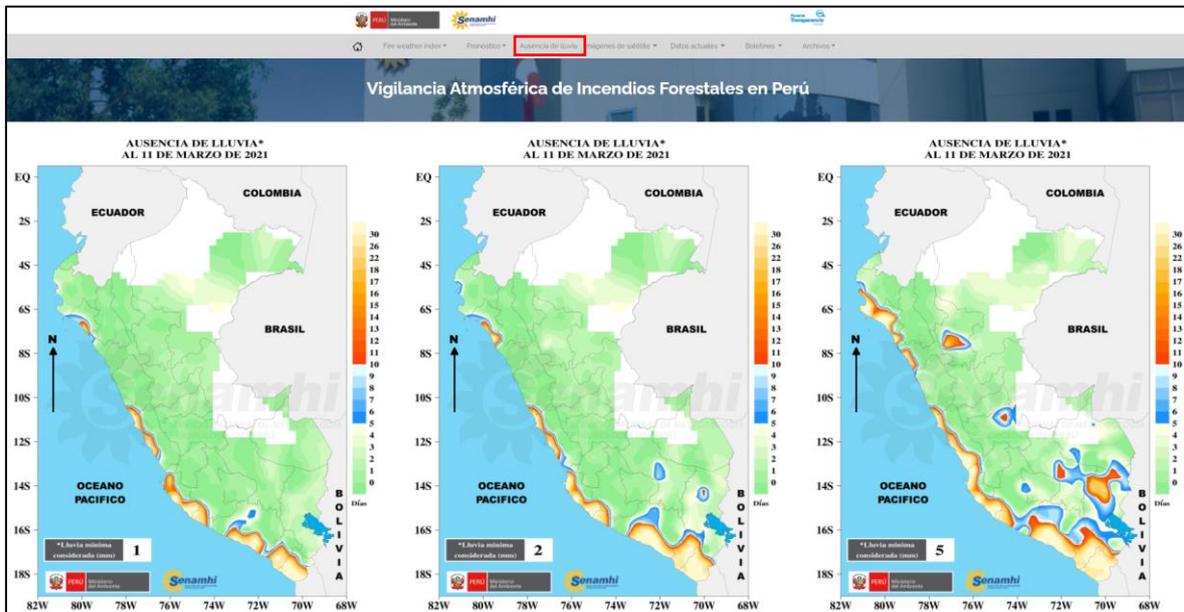
- b) Pronóstico Numérico de variables meteorológicas: Este pronóstico permite tener un mapa diario (Figura 32a) y un meteorograma con pronóstico para los siguientes 15 días por cada punto de grilla en todo el Perú (considerando el modelo GFS de 0.25°), y está dividido en 9 regiones: costa norte, centro, sur, sierra norte, etc (Figura 32b).

<sup>1</sup> IDESEP-SENAMHI: Infraestructura de Datos Espacial del SENAMHI (<https://idesep.senamhi.gob.pe/portalidesepe/>)



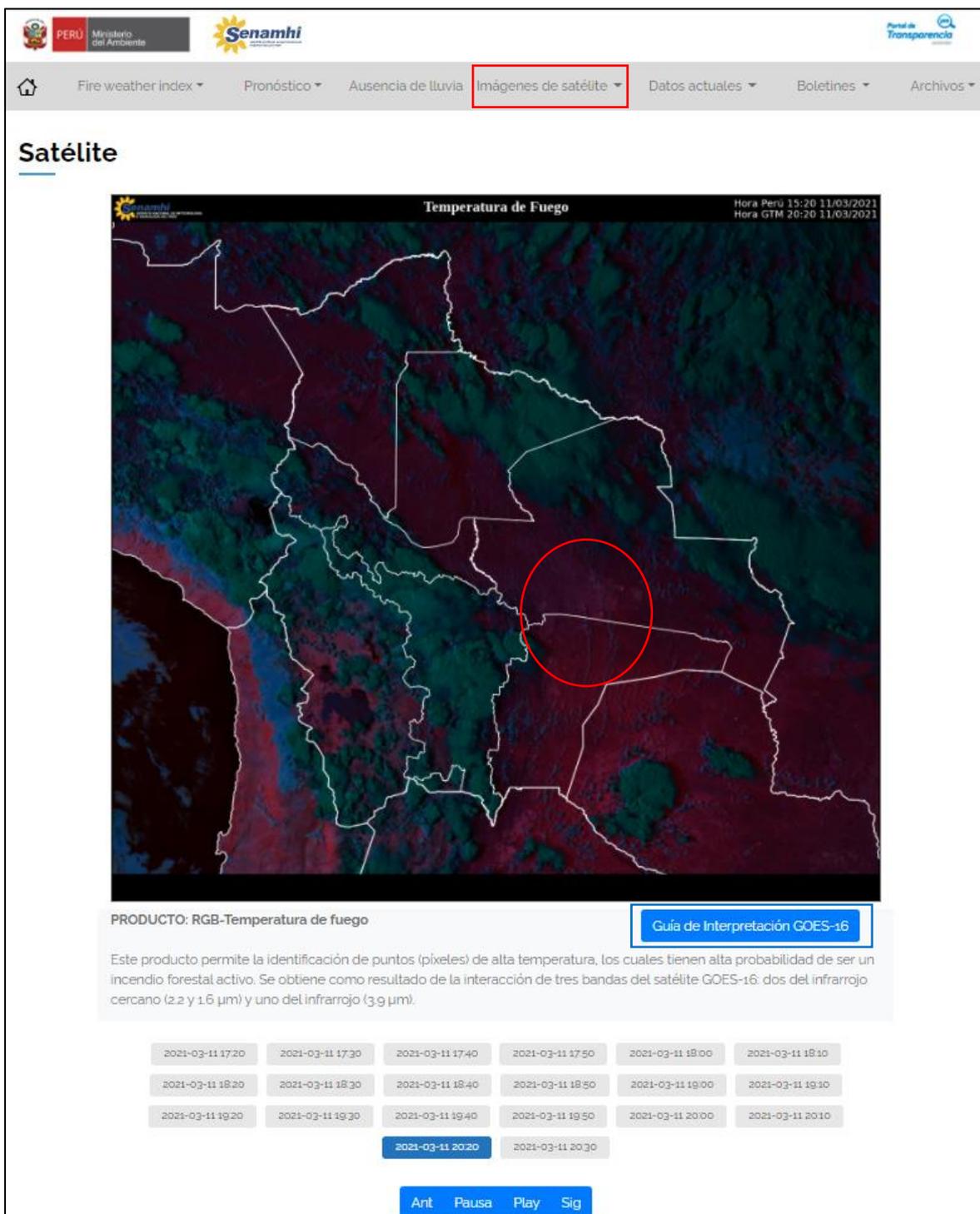
**Figura 32:** Visualización del pronóstico numérico de variables meteorológicas en la plataforma web de IF de SENAMHI. a) Forma de mapas diarios. b) Forma de meteorogramas puntuales. El recuadro rojo permite visualizar la ruta cómo se encuentra el producto

c) Mapas de ausencia de lluvia: Se muestran los tres mapas de izquierda a derecha, con un valor mínimo de lluvia de 1, 2 y 5 mm (Figura 33), respectivamente.



**Figura 33:** Visualización de los mapas de ausencia de lluvia en la plataforma web de IF de SENAMHI. El recuadro rojo permite visualizar la ruta cómo se encuentra el producto

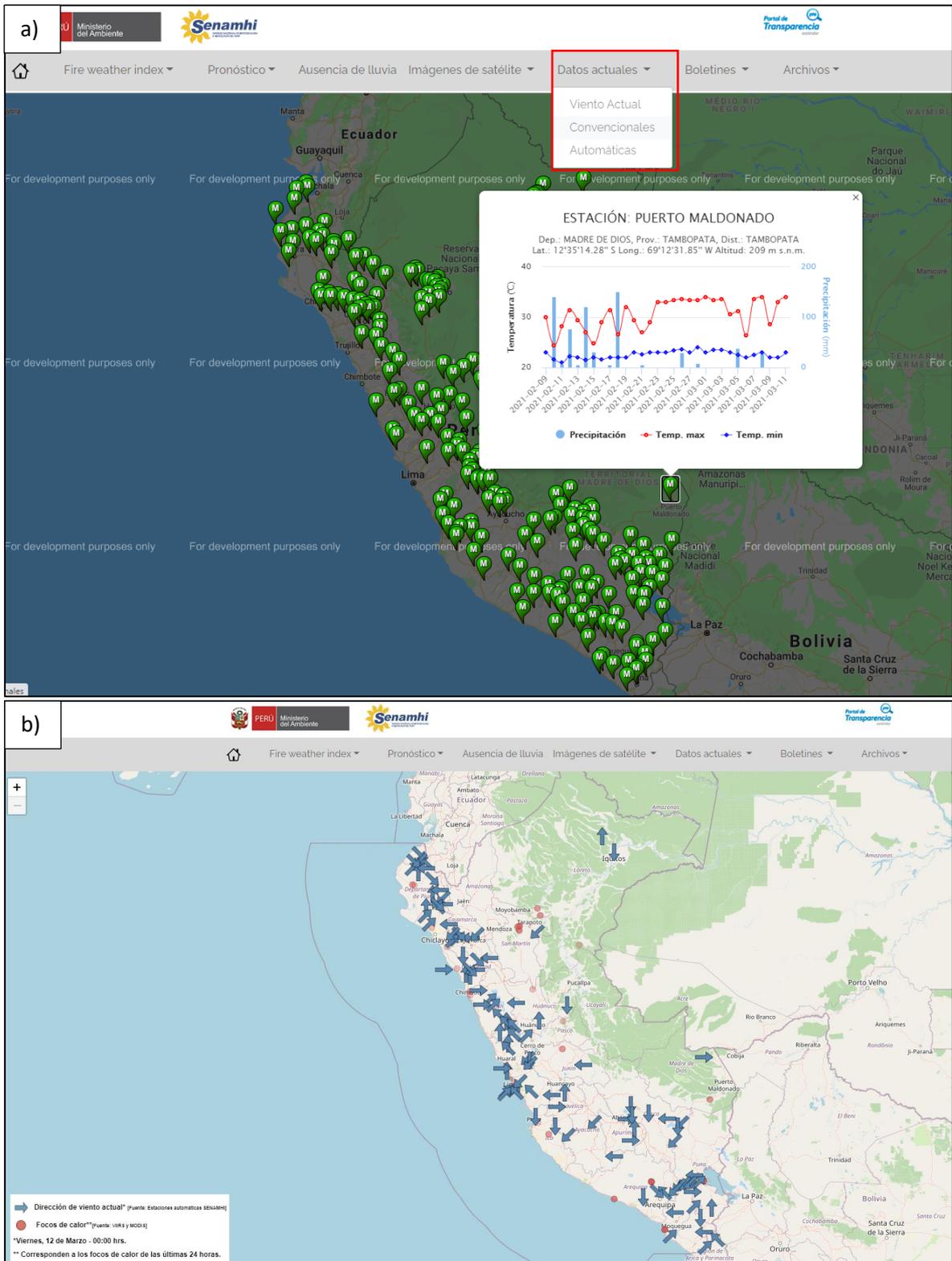
d) Imágenes de satélite: En la plataforma web se pueden visualizar tanto las imágenes de vapor de agua en niveles altos (Canal  $6.19\mu\text{m}$ ), como las de infrarrojo (Canal  $10,33\mu\text{m}$ ) y las de temperatura de fuego (Composición RGB) (Figura 34). Se observan las últimas 20 imágenes disponibles, con el objetivo de realizar animaciones. Asimismo, se observa la guía de interpretación de la imagen de Temperatura del Fuego.



**Figura 34:** Visualización de las imágenes de satélite del GOES16 en plataforma web de IF de SENAMHI. El recuadro rojo permite visualizar la ruta cómo se encuentra el producto. El recuadro azul permite identificar la guía de interpretación del producto

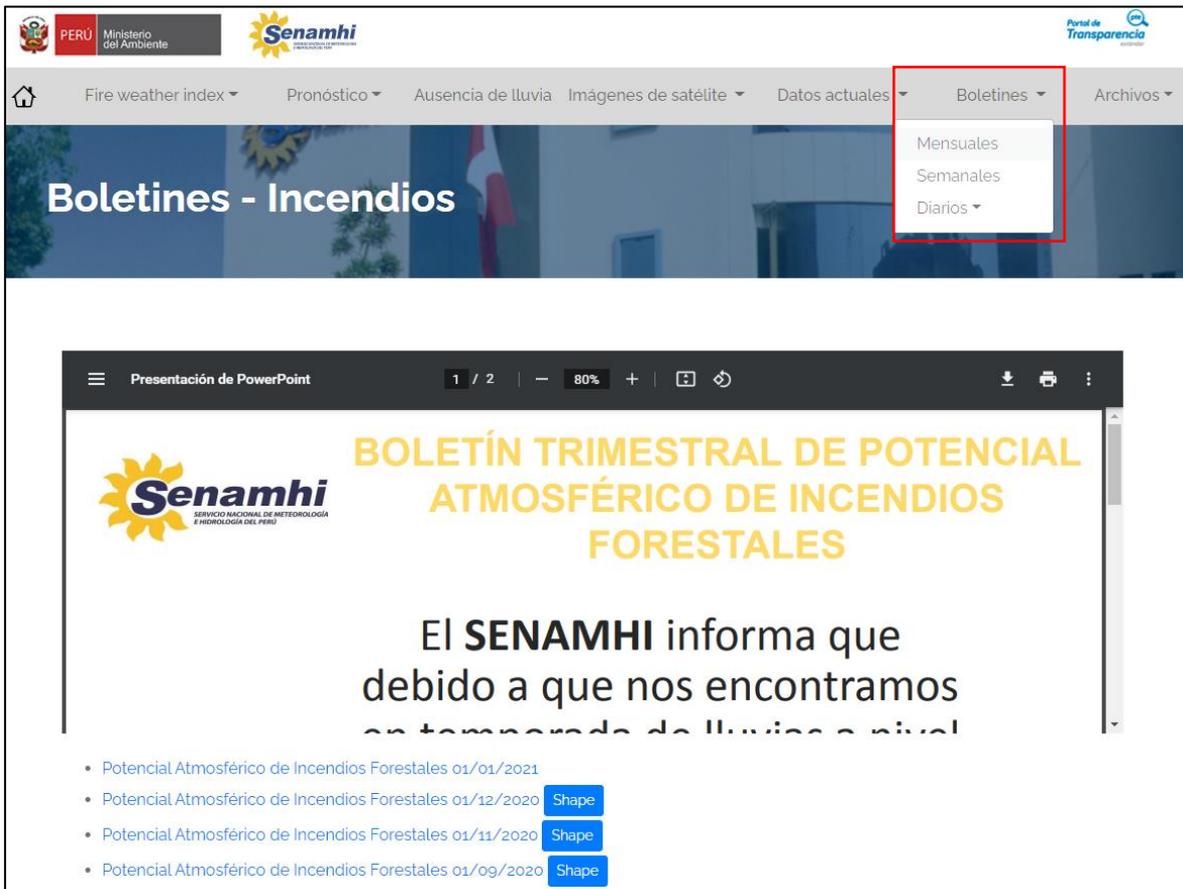
e) Datos Actuales: Este espacio de la plataforma permite visualizar los datos de precipitación, temperatura máxima y mínima de las estaciones automáticas y convencionales de la red de SENAMHI (Figura 35a) y la dirección de los vientos de las

estaciones automáticas de la red de SENAMHI, con una actualización horaria. Además, está acoplado con los focos de calor de las últimas 24 horas (Figura 35b).



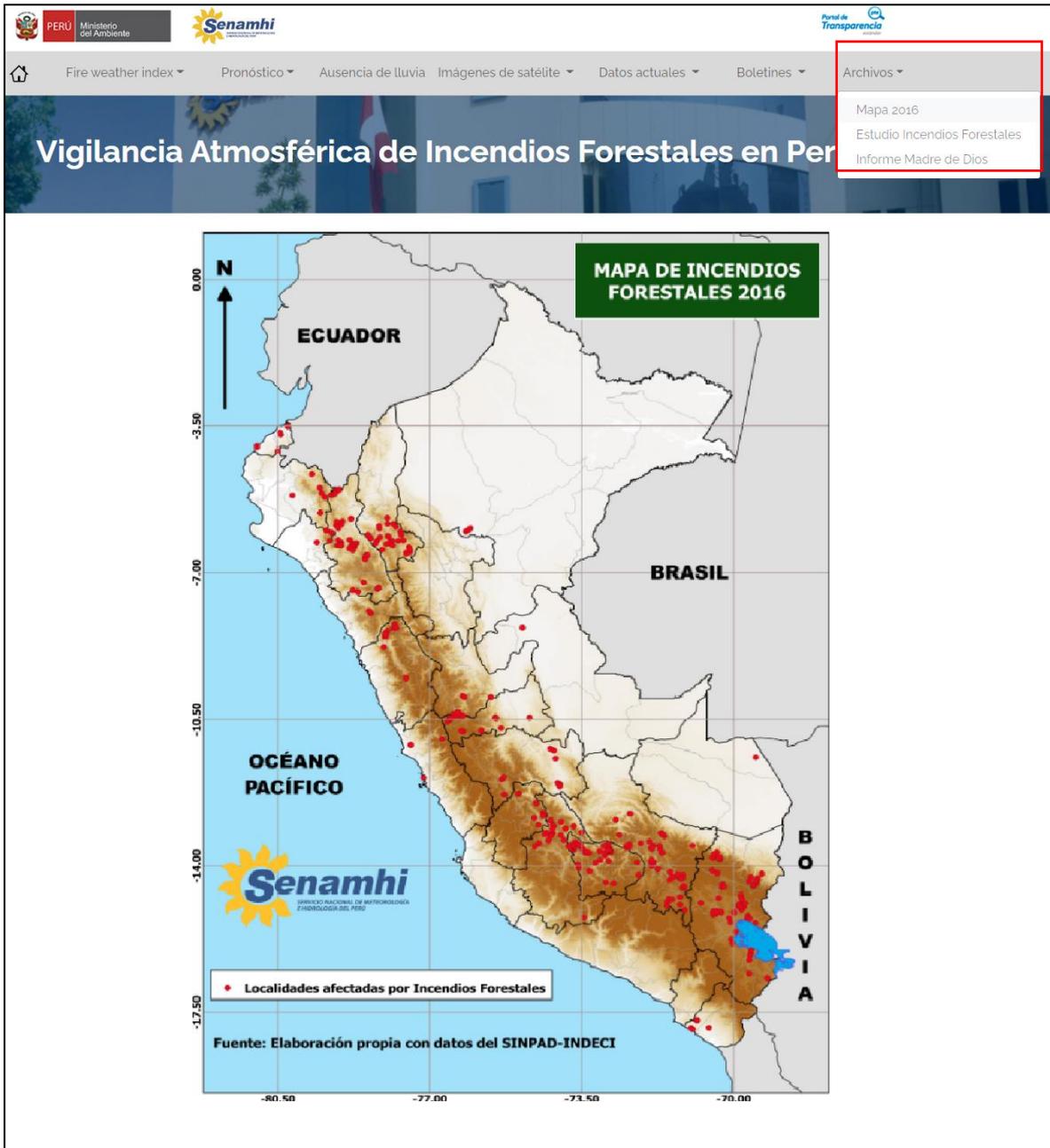
**Figura 35:** Visualización de los datos en tiempo real en la plataforma web de IF de SENAMHI. El recuadro rojo permite visualizar la ruta cómo se encuentra el producto

f) Boletines: En este espacio se pueden encontrar, tanto los boletines mensuales (Figura 36), semanales y diarios.



**Figura 36:** Visualización de los boletines en la plataforma web de IF de SENAMHI. El recuadro rojo permite visualizar la ruta cómo se encuentra el producto

g) Archivos: En este espacio se adhieren los archivos que se encuentran relacionados con IF, tales como el mapa de IF reportados durante el 2016 (Figura 37), el estudio de Condiciones Atmosféricas Favorables a Incendios Forestales (2018) y el Informe sobre la situación de los IF en la Amazonía y su efecto en Madre de Dios (2019).

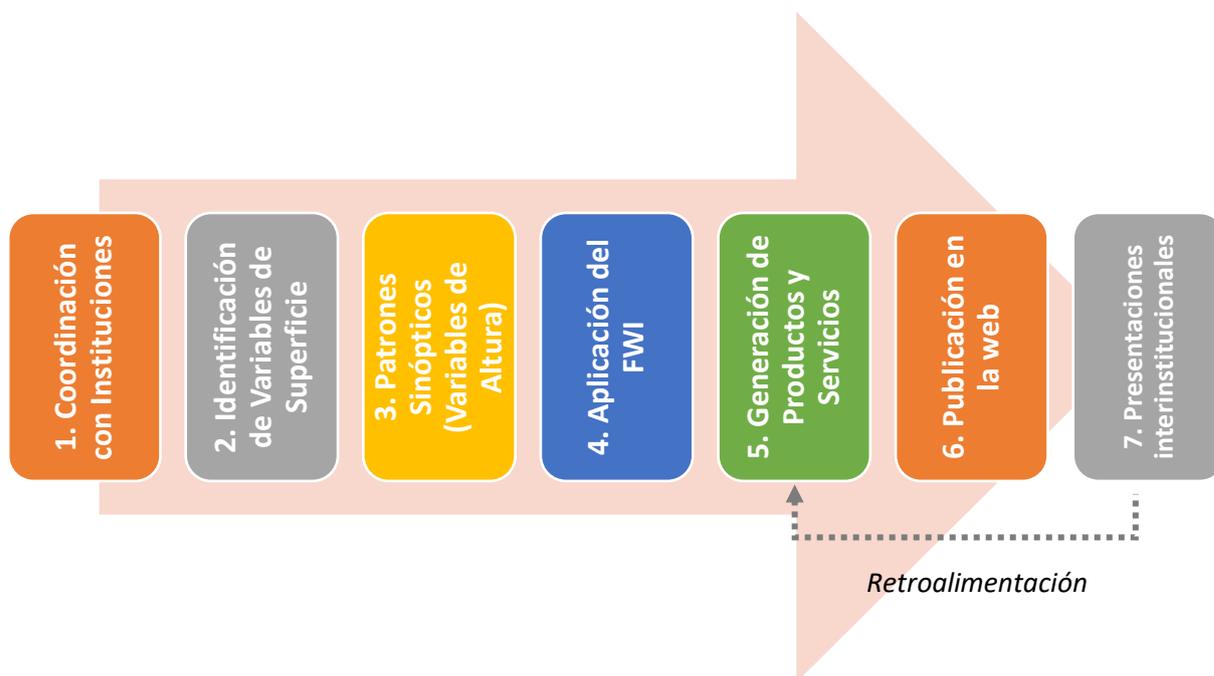


**Figura 37:** Visualización de los archivos en la plataforma web de IF de SENAMHI. El recuadro rojo permite visualizar la ruta cómo se encuentra el producto

## V. ANÁLISIS DE RESULTADOS E IMPACTOS

En el presente Trabajo de Suficiencia Profesional se logró cumplir con los objetivos planteados, los cuales están acorde con los resultados obtenidos y las funciones desempeñadas por el grupo de trabajo de incendios forestales de SENAMHI, el cual es liderado por mi persona.

Como objetivo general, se logró identificar y describir cuál es el proceso operativo, que hemos establecido con el grupo de trabajo en SENAMHI, para el monitoreo y pronóstico de condiciones atmosféricas favorables a la ocurrencia de incendios forestales en el Perú. Este proceso se resume en la Figura 38.



**Figura 38:** Flujograma del proceso operativo para el monitoreo y pronóstico de condiciones atmosféricas favorables a IF en Perú

Asimismo, como primer objetivo específico, se describió el comportamiento de las principales variables atmosféricas favorables a la ocurrencia y propagación de incendios forestales en el Perú, los cuales son la ausencia de lluvia por, por lo menos, 10 días

consecutivos; el incremento de la temperatura máxima, la disminución de la temperatura mínima, y la disminución de la humedad atmosférica.

Como segundo objetivo específico, se determinó la utilidad del FWI para la delimitación de áreas con peligro atmosférico de generación y propagación de incendios forestales en el Perú. Como los resultados fueron positivos, actualmente se utiliza dicho índice para el monitoreo diario y pronóstico, tanto diario como semanal. Asimismo, las Direcciones Zonales de SENAMHI realizan un boletín regionalizado considerando al FWI como herramienta principal.

Además, como tercer objetivo específico, se mostró y explicó los productos relacionados al monitoreo y pronóstico atmosférico de incendios forestales. Todos ellos se esquematizan en el organigrama de la Figura 39, en el cual se pueden identificar también los procesos y las entidades responsables y colaboradoras de la emisión de los mismos.



**Figura 39:** Organigrama que describe los procesos, productos, servicios y responsables del sistema de Vigilancia Atmosférica de Incendios Forestales en el Perú

Para el logro de estos objetivos planteados dentro del marco de la Vigilancia Atmosférica de Incendios Forestales, se presentaron diversas limitaciones; sin embargo, la principal fue la falta de recursos humanos de manera constante, puesto que el personal destinado al análisis de condiciones atmosféricas para incendios forestales también desempeña otras actividades

de la SPM, como la emisión de avisos meteorológicos, la participación en el COEN, la generación de notas técnicas y estudios, entre otros. En ese sentido, desde el 2020, el Programa Presupuestal 0068 (Programa Presupuestal de Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres), del cual SENAMHI es parte, considera a los Incendios Forestales como peligro priorizado (PCM, 2020). Esto permite garantizar la sostenibilidad de la vigilancia atmosférica para IF.

La implementación de esta plataforma web de Vigilancia Atmosférica de Incendios Forestales permitió obtener beneficios sociales, los cuales son:

- Tener a disposición de las autoridades tomadoras de decisiones a nivel nacional, así como de la población en general, los productos y servicios especializados para el monitoreo y pronóstico de condiciones atmosféricas para Incendios Forestales en Perú y Bolivia.
- Contar con una plataforma organizada de monitoreo meteorológico para Incendios Forestales que permite avisar de forma oportuna el peligro por incendios forestales.
- Permitir interactuar de manera conjunta con el Servicio Meteorológico de Bolivia, en un tema que compete a ambos países limítrofes como es el peligro por Incendios Forestales.
- Permitir la coordinación conjunta y constante con la institución responsable del manejo de Incendios Forestales en Perú, SERFOR.
- Posicionar al SENAMHI como la entidad responsable de la vigilancia atmosférica de incendios forestales.
- Destinar recursos al país, tanto humanos como económicos, a un problema de escala mundial, el peligro por el incremento de incendios forestales en zonas tropicales, en un contexto de cambio climático.

Asimismo, en el desarrollo de este trabajo que comenzó a mediados del 2017, se han obtenido una serie de conocimientos, los cuales se resumen en:

- Organización de la información disponible, clasificando las variables y productos con mayor utilidad para fines específicos, en este caso, Incendios Forestales.
- Mejora en el uso de herramientas de visualización de datos meteorológicos como *Grid Analysis Display System* (GrADS), aplicando programación para la generación automática de imágenes y archivos en formato *tiff* y *shape*.
- Uso de los productos disponibles de las imágenes del satélite GOES-16 y MODIS, priorizando las necesarias para la detección de focos de calor.

- Análisis de datos de estaciones meteorológicas para la selección de variables principales para Incendios Forestales.
- Uso de reanálisis y modelos numéricos para el análisis y pronóstico de condiciones atmosféricas para incendios forestales.
- Uso de técnicas estadísticas para el análisis de datos atmosféricos para Incendios Forestales.
- Conocimiento del comportamiento del fuego y su interacción con variables meteorológicas durante la ocurrencia de un IF.
- Dirección y trabajo en equipo para poder implementar y sostener la plataforma web.
- Coordinación de manera constante a nivel interinstitucional, manifestando la responsabilidad de SENAMHI en el tema meteorológico de Incendios Forestales.

La formación recibida durante la carrera universitaria de meteorología en la Universidad Nacional Agraria La Molina permite sentar las bases para el desarrollo de pronósticos especializados en cualquier ámbito de la gestión de riesgos de desastres; en este caso, Incendios Forestales. Estas bases se forman, principalmente, durante el aprendizaje de herramientas y técnicas de pronóstico del tiempo, dinámica y termodinámica de los sistemas atmosféricos, meteorología sinóptica y estadística climatológica. Sin embargo, se recomienda fortalecer las capacidades orientadas a la gestión de riesgo y el pronóstico por impactos, de tal manera que el meteorólogo recién egresado pueda trabajar en cualquier institución y de manera conjunta con profesionales de diversas áreas involucradas en la gestión de riesgo de desastres meteorológicos. Asimismo, el fortalecimiento de las capacidades de investigación y participación en proyectos permitirá complementar la formación del profesional.

## **VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. Conclusiones**

Se logró identificar y describir cuál es el proceso operativo para el monitoreo y pronóstico de condiciones atmosféricas favorables a la ocurrencia de incendios forestales en el Perú.

Se describió el comportamiento de las principales variables atmosféricas favorables a la ocurrencia y propagación de incendios forestales en el Perú, y son: ausencia de lluvia por 10 días consecutivos, incremento de la temperatura máxima, disminución de la temperatura mínima, disminución de la humedad atmosférica.

Se determinó la utilidad del FWI para la delimitación de áreas con peligro atmosférico de generación y propagación de incendios forestales en el Perú.

Se mostró y explicó los productos relacionados al monitoreo y pronóstico atmosférico de incendios forestales en el SENAMHI.

### **6.2. Recomendaciones**

Luego de establecido el proceso operativo de monitoreo y pronóstico de condiciones atmosféricas favorables a incendios forestales, se recomienda continuar con la implementación de otras herramientas, tales como los avisos meteorológicos de peligro atmosférico de ocurrencia y propagación de incendios forestales.

Asimismo, se recomienda establecer un proceso de verificación a los productos generados e implementados en la vigilancia atmosférica de incendios forestales, con el objetivo de mejorarlos.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar-Garavito Mauricio, Isaacs-Cubides Paola, Ruiz-Santacruz J. Sebastian, Cortina-Segarra Jordi (2020) Wildfire dynamics and impacts on a tropical Andean oak forest. *International Journal of Wildland Fire* 30, 112-124. <https://doi.org/10.1071/WF20030>
2. Allen, M. (2020). Amazon fires contribute to Andean glacier melting, *Eos*, 101, <https://doi.org/10.1029/2020EO138434>. Published on 13 January 2020. <https://eos.org/articles/amazon-fires-contribute-to-andean-glacier-melting>
3. Anderson, L., Burton, C., Dos Reis, J., Pessôa, A., M.; Selaya, G.; Bett, P., Jones, C., Williams, K., Taylor, I., Wiltshire, A., Aragão, L. (2020). Identification of priority areas for reducing the likelihood of burning and forest fires in South America August to October 2020. 16p. São José dos Campos, Brasil. DOI: 10.13140/RG.2.2.13727.79523
4. Babić, S., Čížmek, L., Maršavelski, A. et al. Utilization of the zebrafish model to unravel the harmful effects of biomass burning during Amazonian wildfires. *Sci Rep* 11, 2527 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81789-1>
5. Barboza Castillo, E.; Turpo Cayo, E.Y.; de Almeida, C.M.; Salas López, R.; Rojas Briceño, N.B.; Silva López, J.O.; Barrera Gurbillón, M.Á.; Oliva, M.; Espinoza-Villar, R. Monitoring Wildfires in the Northeastern Peruvian Amazon Using Landsat-8 and Sentinel-2 Imagery in the GEE Platform. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2020, 9, 564. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100564>
6. CENEPRED, 2018. Caracterización del peligro por incendios forestales. [http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca/5614\\_escenarios-de-riesgo-por-incendios-forestales-caracterizacion-del-peligro-por-incendios-forestales.pdf](http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca/5614_escenarios-de-riesgo-por-incendios-forestales-caracterizacion-del-peligro-por-incendios-forestales.pdf)
7. Chen, Y., Morton, D.C., Andela, N. et al. A pan-tropical cascade of fire driven by El Niño/Southern Oscillation. *Nature Clim Change* 7, 906–911 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0014-8>
8. COMET, 2017. Multispectral Satellite Applications: RGB Products Explained. [https://www.meted.ucar.edu/satmet/multispectral\\_topics/rgb/index.htm](https://www.meted.ucar.edu/satmet/multispectral_topics/rgb/index.htm)
9. CONAF (2011). Manual con Medidas para la Prevención de Incendios Forestales. Recuperado de: <https://bit.ly/386u6N6>

10. CONAFOR (2010). Incendios forestales: Guía práctica para comunicadores. Recuperado de: <https://bit.ly/34TTyU6>
11. GOES-R, 2021. SATELLITE IMAGERY RGBs: ADDING VALUE, SAVING TIME. <https://www.goes-r.gov/featureStories/satelliteImageryRGBs.html>
12. INDECI. 2021. Centro de Operaciones de Emergencia Nacional – COEN. <https://www.gob.pe/10140-instituto-nacional-de-defensa-civil-centro-de-operaciones-de-emergencia-nacional-coen>
13. Ita, T. 2020. INFORME TÉCNICO: SERVICIOS DE ASISTENCIA TÉCNICA EN METEOROLOGÍA PARA LA EXPLORACIÓN DE PREDICTIBILIDAD DE CONDICIONES ATMOSFÉRICAS FAVORABLES A INCENDIOS FORESTALES. Locación de Servicios para SPM – DMA – SENAMHI.
14. Losos, 2021. Beginner’s Guide to GOES-R Series Data How to acquire, analyze, and visualize GOES-R Series data [https://www.goes-r.gov/downloads/resources/documents/Beginners\\_Guide\\_to\\_GOES-R\\_Series\\_Data.pdf](https://www.goes-r.gov/downloads/resources/documents/Beginners_Guide_to_GOES-R_Series_Data.pdf)
15. Magalhães, N.d., Evangelista, H., Condom, T. et al. (2019). Amazonian Biomass Burning Enhances Tropical Andean Glaciers Melting. Sci Rep 9, 16914 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53284-1>
16. Manta and Sahuza, 2020. CRISIS| RESPONSE+ 57 VOL 6 ISSUE 1 ([https://www.academia.edu/4262066/wildfires\\_in\\_South\\_America](https://www.academia.edu/4262066/wildfires_in_South_America))
17. Manta y León (2004). Los Incendios Forestales en el Perú: Grave Problema por Resolver. FLORESTA 34 (2), Mayo/Agosto, 2004, 179-186, Curitiba, Pr. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v34i2.2392>
18. Manta, M.; Kometter, R.; Navia, A. (2018). Evaluation of wildfire danger in the Peruvian Andes: First step for its reduction and adaptation. Advances in Forest Fire Research, 1: 44-56. DOI: 10.14195/978-989-26-16-506\_4
19. MINAM. 2021. Quiénes Somos. <https://www.minam.gob.pe/ordenamientoterritorial/quienes-somos/>
20. NCWG. 2020. Fire Weather Index (FWI) System. <https://www.nwcg.gov/publications/pms437/cffdrs/fire-weather-index-system#TOC-Fire-Weather-Index-NFDRS-Crosswalk>
21. PCM (Presidencia del Consejo de Ministros). 2020. EL PROGRAMA PRESUPUESTAL 0068 Y EL FONDO PARA INTERVENCIONES ANTE LA OCURRENCIA DE DESASTRES NATURALES-FONDES. [https://www.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2020/12/PPT\\_FONDES-PCM-DIA-1-03.12.2020.pdf](https://www.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2020/12/PPT_FONDES-PCM-DIA-1-03.12.2020.pdf)

22. SENAMHI (2021). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Ministerio del Ambiente ¿Qué hacemos? Recuperado de: <https://bit.ly/34UR4EY>
23. SENAMHI. 2019. Guía de Interpretación del GOES-16. Producto GRB-Temperatura del Fuego. [https://www.senamhi.gob.pe/pdf/deteccion\\_fuego\\_guia.pdf](https://www.senamhi.gob.pe/pdf/deteccion_fuego_guia.pdf)
24. SENAMHI. Aliaga, V.; Quispe, N; Ramos, I; Rodriguez, D. (2018). Estudio de condiciones atmosféricas favorables a los incendios forestales en el Perú. 81pp. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/199>
25. SERFOR (2018). Plan de Prevención y Reducción de Riesgos de Incendios Forestales. Periodo 2019-2022. Recuperado de: <https://bit.ly/3kNVFOC>
26. SERFOR. 2021. Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. <https://www.gob.pe/serfor>
27. SERNANP. 2021. Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. <https://www.gob.pe/sernanp>
28. VAN WAGNER, C.E. 1987: Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Can. For. Serv., Ottawa, ON. For. Tech. Rep 35, 48pp. <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/19927.pdf>
29. VISIT (Virtual Institute for Satellite Integration Training), 2018. [http://rammb.cira.colostate.edu/training/visit/quick\\_guides/](http://rammb.cira.colostate.edu/training/visit/quick_guides/)
30. White, B. (2019). Satellite detection of wildland fires in South America. FLORESTA 49 (4), octubre/diciembre, 2019, 851 – 858, Curitiba, Pr.
31. Zubieta, R., Prudencio, F., Alarco, G., Reupo, J. 2019. Ocurrencia de incendios forestales en el Perú durante eventos El Niño.

## VIII. ANEXOS

De acuerdo con Van Wagner (1987), los códigos para calcular el FWI son:

1) **El Código del Contenido de Humedad de Combustibles Finos o *Fine Fuel Moisture Code* (FFMC)**. Para calcular este código se necesita la precipitación acumulada del día anterior ( $r_o$ ), la humedad relativa (H), viento horizontal a diez metros (W) y temperatura (T) del mediodía y el FFMC del día anterior ( $F_o$ ), siendo el sistema de ecuaciones para su cálculo el siguiente:

$$m_o = \frac{147.2(101-F_o)}{59.5+F_o} \quad (7.1)$$

$$r_f = r_o - 0.5, \quad r_o > 0.5 \quad (7.2)$$

$$m_r = m_o + 42.5r_f(e^{-100(251-m_o)}) \left(1 - e^{-\frac{6.93}{r_f}}\right), \quad m_o \leq 150 \quad (7.3a)$$

$$m_r = m_o + 42.5r_f(e^{-100(251-m_o)}) \left(1 - e^{-\frac{6.93}{r_f}}\right) + 0.0015(m_o)r_f^{0.5}, \quad m_o > 150 \quad (7.3b)$$

$$E_d = 0.942H^{0.679} + 11e^{(H-100)/10} + 0.18(21.1 - T)(1 - e^{-0.115H}) \quad (7.4)$$

$$E_w = 0.618H^{0.753} + 10e^{(H-100)/10} + 0.18(21.1 - T)(1 - e^{-0.115H}) \quad (7.5)$$

$$k_o = 0.424 \left[1 - \left(\frac{H}{100}\right)^{1.7}\right] + 0.0694W^{0.5} \left[1 - \left(\frac{H}{100}\right)^8\right] \quad (7.6a)$$

$$k_d = k_o \times 0.581e^{0.0365T} \quad (7.6b)$$

$$k_l = 0.424 \left[1 - \left(\frac{100-H}{10}\right)^{1.7}\right] + 0.0694W^{0.5} \left[1 - \left(\frac{100-H}{100}\right)^8\right] \quad (7.7a)$$

$$k_w = k_l \times 0.581e^{0.0365T} \quad (7.7b)$$

$$m = E_d + (m_o - E_d) \times 10^{-k_d} \quad (7.8)$$

$$m = E_w - (E_w - m_o) \times 10^{-k_w} \quad (7.9)$$

$$FFMC = F = 59.5(250 - m)/(147.2 + m) \quad (7.10)$$

Así, el FFMC es calculado de la siguiente manera:

1. Se calcula  $m_o$  a partir de  $F_o$  mediante la ecuación 7.1.
2. SI  $r_o > 0.5$  calcular  $r_f$  mediante la ecuación 7.2.

3. Se calcula  $m_r$  a partir de  $r_f$  y  $m_o$  mediante la ecuación 7.3a o 7.3b según sea el caso.
4. Luego,  $m_r$  pasa a ser el nuevo  $m_o$ .
5. Se calcula  $E_d$  mediante la ecuación 7.4.
6. Si  $m_o > E_d$ , se calcula  $k_d$  mediante las ecuaciones 7.6a y 7.6b y se calcula  $m$  mediante la ecuación 7.8.
7. Si  $m_o < E_d$ , se calcula  $E_w$  mediante la ecuación 7.5.
8. Si  $m_o < E_w$  se calcula  $k_w$  mediante las ecuaciones 7.7a y 7.7b y se calcula  $m$  mediante la ecuación 7.9.
9. Si  $E_d \geq m_o \geq E_w$  se considera  $m = m_o$ .
10. Se calcula  $F$  mediante la ecuación 7.10. Este es el FFMC del día.

2) **El Código del Contenido de Humedad en la Hojarasca o *Duff Moisture Code* (DMC)**. Para calcular este código se necesita la precipitación acumulada del día anterior ( $r_o$ ), la humedad relativa (H) y temperatura (T) del mediodía y el DMC del día anterior ( $P_o$ ), siendo el sistema de ecuaciones para su cálculo el siguiente:

$$r_e = 0.92r_o - 1.27, \quad r_o > 1.5 \quad (7.11)$$

$$M_o = 20 + e^{(5.6348 - \frac{P_o}{43.43})} \quad (7.12)$$

$$b = \frac{100}{0.5 + 0.3P_o}, \quad P_o \leq 33 \quad (7.13a)$$

$$b = 14 - 1.3 \ln P_o, \quad 33 < P_o \leq 65 \quad (7.13b)$$

$$b = 6.2 \ln P_o - 17.2, \quad P_o > 65 \quad (7.13c)$$

$$M_r = M_o + 1000r_e / (48.77 + br_e) \quad (7.14)$$

$$P_r = 244.72 - 43.43 \ln(M_r - 20) \quad (7.15)$$

$$K = 1.894(T + 1.1)(100 - H)L_e \times 10^{-6} \quad (7.16)$$

$$DMC = P = P_o \text{ (or } P_r) + 100K \quad (7.17)$$

Así, el DMC es calculado de la siguiente manera:

1. Si  $r_o > 1.5$ , se calcula  $r_e$  mediante la ecuación 7.11,  $M_o$  a partir de  $P_o$  mediante la ecuación 7.12,  $b$  mediante la ecuación 7.13a, 7.13b o 7.13c según sea el caso,  $M_r$  mediante la ecuación 7.14 y se convierte  $M_r$  en  $P_r$  mediante la ecuación 7.15.  $P_r$  se convierte en el nuevo  $P_o$ .
2. Se utiliza el factor de longitud del día  $L_e$  correspondiente al mes.

3. Se calcula K mediante la ecuación 7.16.
4. Se calcula P a partir P<sub>o</sub> (o P<sub>r</sub>) mediante la ecuación 7.17. Este es el DMC del día.

Existen tres restricciones para el uso de las ecuaciones del DMC: 1) Las ecuaciones 7.11-7.15 no son utilizadas a menos que  $r_o > 1.5$ ; esto es, la rutina para lluvia se debe omitir cuando el tiempo está seco. 2) P<sub>r</sub> teóricamente no puede ser menor a cero. Valores negativos que resulten del paso 1 deben llevarse al valor cero. 3) Valores de T menores a -1.1 no deben ser utilizados en la ecuación 7.16. Si  $T < -1.1$ , debe utilizarse  $T = -1.1$ .

3) El **Código de Sequía o Drought Code (DC)**. Para calcular este código se necesita la precipitación acumulada del día anterior ( $r_o$ ), la temperatura (T) del mediodía y el DC del día anterior ( $D_o$ ), siendo el sistema de ecuaciones para su cálculo el siguiente:

$$r_d = 0.83r_o - 1.27, \quad r_o > 2.8 \quad (7.18)$$

$$Q_o = 800e^{-D_o/400} \quad (7.19)$$

$$Q_r = Q_o + 3.937r_d \quad (7.20)$$

$$D_r = 400 \ln\left(\frac{800}{Q_r}\right) \quad (7.21)$$

$$V = 0.36(T + 2.8) + L_f \quad (7.22)$$

$$DC = D = D_o \text{ (or } D_r) + 0.5V \quad (7.23)$$

Así, el DC es calculado de la siguiente manera:

1. Si  $r_o > 7.8$  se calcula  $r_d$  mediante la ecuación 7.18,  $Q_o$  a partir de  $D_o$  mediante la ecuación 7.19,  $Q_r$  mediante la ecuación 7.20 y se convierte  $Q_r$  a  $D_r$  mediante la ecuación 7.21.  $D_r$  se convierte en el nuevo  $D_o$ .
2. Se utiliza el factor de longitud del día  $L_f$  correspondiente al mes.
3. Se calcula V mediante la ecuación 7.22.
4. Se calcula D a partir de  $D_o$  (o  $D_r$ ) mediante la ecuación 7.23. Este es el DC del día.

Existen cuatro restricciones para el uso de las ecuaciones del DC: 1) Las ecuaciones 7.18-7.21 no son utilizadas a menos que  $r_o > 7.8$ ; esto es, en tiempo seco la rutina de lluvia se debe omitir. 2)  $D_r$  teóricamente no puede ser menor que cero. Valores negativos del paso 1 deben llevarse al valor cero. 3) Valores de T menores a -2.8 no deben ser utilizados en la ecuación 7.22. SI  $T < -2.8$ , debe utilizarse  $T = -2.8$ . 4) V no puede ser negativo. Si la ecuación 7.22 produce un resultado negativo, debe utilizarse  $V = 0$ .

Se debe tomar en consideración que los códigos antes mencionados fueron desarrollados para un bosque de pinos maduros de dosel cerrado.

Por otro lado, los índices de comportamiento del fuego son:

1) El **Índice de Propagación Inicial** o *Initial Spread Index (ISI)*. Combina los efectos del viento y FFMC en la dispersión sin la influencia de las cantidades de combustible disponibles para la combustión. Para calcular este índice se necesita el valor del viento horizontal a diez metros ( $W$ ) correspondiente al mediodía, siendo las ecuaciones para su cálculo:

$$f(W) = e^{0.05039W} \quad (7.24)$$

$$f(F) = 91.9e^{-0.1386m} \left[ 1 + \frac{m^{5.31}}{4.93 \times 10^7} \right] \quad (7.25)$$

$$ISI = R = 0.208f(W)f(F) \quad (7.26)$$

2) El **Índice de Combustión** o *Buildup Index (BUI)*. Combina DMC y DC, siendo la ecuación para su cálculo:

$$BUI = U = \frac{0.8PD}{P + 0.4D}, \quad P \leq 0.4D \quad (7.27a)$$

$$BUI = U = P - \left[ 1 - \frac{0.8D}{P + 0.4D} \right] [0.92 + (0.0114P)^{1.7}], \quad P > 0.4D \quad (7.27b)$$

3) El **Índice Meteorológico de Incendios** o *Fire Weather Index (FWI)* es una escala numérica de la intensidad de fuego que combina el ISI y el BUI. (Dimitrakopoulous et al., 2011; Souto, 2013), siendo la ecuación para su cálculo:

$$f(D) = 0.626U^{0.809} + 2, \quad U \leq 80 \quad (7.28a)$$

$$f(D) = 1000 / (25 + 108.64e^{-0.023U}), \quad U > 80 \quad (7.28b)$$

$$B = 0.1Rf(D) \quad (7.29)$$

$$\ln S = 2.72(0.434 \ln B)^{0.647}, \quad B > 1 \quad (7.30a)$$

$$FWI = S = B, \quad B \leq 1 \quad (7.30b)$$

Así, el ISI, BUI y FWI son calculados de la siguiente manera:

1. Se calcula  $f(W)$  y  $f(F)$  mediante las ecuaciones 7.24 y 7.25.
2. Se calcula  $R$  mediante la ecuación 7.26. Este es el ISI del día.

3. Se calcula  $U$  mediante la ecuación 7.27a si  $P \leq 0.4D$ , o mediante la ecuación 7.27b si  $P > 0.4D$ . Este es el BUI del día.
4. Se calcula  $f(D)$  mediante la ecuación 7.28a para los valores de  $U$  hasta 80. Si  $U > 80$ , se usa la ecuación 7.28b.
5. Se calcula  $B$  mediante la ecuación 7.29.
6. Si  $B > 1$ , se calcula  $S$  a partir de su logaritmo, dada la ecuación 7.30a. Si  $B \leq 1$ , debe utilizarse  $S = B$  de acuerdo a la ecuación 7.30b.  $S$  es el FWI del día.

## IX. ASEGURAMIENTO



### SUBDIRECCION DE PREDICCIÓN METEOROLÓGICA

**PROVEIDO N° D000522-2020-SENAMHI-SPM**

**EXPEDIENTE : SPM00020200000055**

FECHA

**17/11/2020**

**ASUNTO:** Permiso para uso de resultados del trabajo en SENAMHI para titulación por suficiencia profesional, solicita elevar a Gerencia General. Elevo

**Atender en 0 días**

**REFERENCIA :** PROVEIDO N° 001127-2020-DMA Permiso para uso de resultados del trabajo en SENAMHI para titulación por suficiencia profesional, solicita elevar a Gerencia General. Elevo

DEPENDENCIA DESTINO	TRAMITE	PRIORIDAD	INDICACIONES
SUBDIRECCION DE PREDICCIÓN METEOROLÓGICA DAVILA VILCA CHRISTIAN ANDRES	ATENDER	NORMAL	Realizar las recomendaciones o disposición de la Presidencia Ejecutiva del Senamhi. La directora de la Unidad de Modernización (UM) es la señora Sonia Huamán Lozano.
SUBDIRECCION DE PREDICCIÓN METEOROLÓGICA RODRIGUEZ ZIMMERMANN DIEGO FERNANDO	ATENDER	NORMAL	Realizar las recomendaciones o disposición de la Presidencia Ejecutiva del Senamhi. La directora de la Unidad de Modernización (UM) es la señora Sonia Huamán Lozano.
SUBDIRECCION DE PREDICCIÓN METEOROLÓGICA ALIAGA NESTARES VANNIA JAQUELINE	ATENDER	NORMAL	Realizar las recomendaciones o disposición de la Presidencia Ejecutiva del Senamhi. La directora de la Unidad de Modernización (UM) es la señora Sonia Huamán Lozano.
SUBDIRECCION DE PREDICCIÓN METEOROLÓGICA PUZA RIVAS MITZA ANISSA	ATENDER	NORMAL	Realizar las recomendaciones o disposición de la Presidencia Ejecutiva del Senamhi. La directora de la Unidad de Modernización (UM) es la señora Sonia Huamán Lozano.
SUBDIRECCION DE PREDICCIÓN METEOROLÓGICA LANCHIPA CISNEROS PAULO CESAR	ATENDER	NORMAL	Realizar las recomendaciones o disposición de la Presidencia Ejecutiva del Senamhi. La directora de la Unidad de Modernización (UM) es la señora Sonia Huamán Lozano.
SUBDIRECCION DE PREDICCIÓN METEOROLÓGICA JULCA BOCANEGRA ELIDA ROSARIO	ATENDER	NORMAL	Realizar las recomendaciones o disposición de la Presidencia Ejecutiva del Senamhi. La directora de la Unidad de Modernización (UM) es la señora Sonia Huamán Lozano.

**QUISPE GUTIERREZ NELSON**  
SUBDIRECTOR DE PREDICCIÓN METEOROLÓGICA