
ESTUDIO DE CONDICIONES ATMOSFÉRICAS FAVORABLES A LOS INCENDIOS FORESTALES EN EL PERÚ

PREPARADO POR:

ALIAGA NESTARES, Vannia
QUISPE GUTIÉRREZ, Nelson
RAMOS PARADO, Isabel
RODRIGUEZ ZIMMERMANN, Diego

Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica
Subdirección de Predicción Meteorológica

SENAMHI-PERU

LIMA, MARZO 2018

CONTENIDO

.....	1
ESTUDIO DE LA PROBABILIDAD ATMOSFÉRICA DE INCENDIOS FORESTALES EN EL PERÚ	6
1. RESUMEN	6
2. INTRODUCCIÓN	8
2.1. Definición de incendio forestal	8
2.2. Los Incendios Forestales en el Perú	9
2.3. Influencia del Clima y de la Variabilidad Climática Regional en los incendios forestales de los Andes Tropicales.....	14
2.4. Causas inmediatas de los incendios forestales	15
2.5. Consecuencias de los incendios forestales	16
2.6. Ambiente del fuego que influye en el comportamiento del incendio forestal.....	17
2.7. Índice Meteorológico de Incendios o Fire Weather Index (FWI)	21
4. OBJETIVOS	26
5. DATOS Y MÉTODOS	26
5.1. Ubicación geográfica de los incendios forestales ocurridos en Perú el 2016	26
5.2. Selección de incendios forestales	26
5.3. Análisis de las condiciones meteorológicas durante la ocurrencia de incendios forestales en Perú en el 2016	26
5.4. Análisis de la circulación atmosférica predominante durante la ocurrencia de incendios forestales en Perú en el 2016.....	27
5.5. Aplicación del FWI en incendios forestales ocurridos en Perú en el 2016	28
6. RESULTADOS	31
6.1. Ubicación geográfica de incendios forestales en Perú el 2016.....	31
6.2. Selección de los episodios de incendios forestales.....	31
6.3. Análisis de las condiciones meteorológicas favorables a la ocurrencia de incendios forestales en Perú en el 2016.....	34
6.4. Análisis de la circulación atmosférica durante la ocurrencia de incendios forestales en Perú en el 2016	49
6.5. Aplicación del FWI en incendios forestales ocurridos en Perú en el 2016	52
7. CONCLUSIONES	57
8. RECOMENDACIONES	58
9. GLOSARIO DE TÉRMINOS	59
10. BIBLIOGRAFÍA	62
11. ANEXOS	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.- Cantidad de reportes de emergencias por IF entre el 2003 y el 2016.....	9
Figura 2.2.- Serie histórica de IF en la sierra peruana desde 1973 al 2011.....	10
Figura 2.3.- Serie histórica de los focos de calor activos en el Perú.	11
Figura 2.4.- Índice Estandarizado de Precipitación (SPI – 3 meses) para noviembre del 2016.....	12
Figura 2.5.- Diagramas de dispersión de (a) número mensual de píxeles de fuego activos vs media mensual de temperatura, (b) número mensual de píxeles de área quemada vs media mensual de precipitación, y (c) número mensual de píxeles de fuego activo vs media mensual de precipitación. Estación seca, abril hasta setiembre, incluyendo meses con incendios y meses sin incendios. Correlación de Spearman (rs), P-values, y df están dados para cada conjunto de puntos. Fuente: All et al. (2017).	14
Figura 2.6.- Triángulo del ambiente de fuego establece la relación entre el tiempo atmosférico, combustible y topografía.	17
Figura 2.7.- Cobertura vegetal del Perú.	19
Figura 2.8.- Mapa topográfico (izquierda) y de la clasificación climática (derecha). Fuente: SENAMHI	20
Figura 2.9.- Estructura esquemática del FWI.	25
Figura 6.1.- Mapa de distribución espacial de las localidades afectadas por incendios ocurridos en el 2016 en Perú (puntos rojos), Fuente: SINPAD - INDECI.	32
Figura 6.2.- Mapa de distribución espacial de las localidades afectadas por incendios forestales seleccionados en el 2016 en Perú (puntos rojos) y las estaciones meteorológicas convencionales seleccionadas de SENAMHI (puntos negros).	33
Figura 6.3.- 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).	34
Figura 6.4.- Gráficos de variación temporal diaria de Precipitación, Evaporación, Horas de Sol, Humedad Relativa y Relación de Mezcla a las 13 horas, Temperatura máxima (T _{máx}) y Temperatura Mínima (T _{mín}) durante 3 meses en las estaciones meteorológicas de (a) Cutervo y (b) San Ramón. El período de ocurrencia del incendio forestal está resaltado por un cuadro naranja.	35
Figura 6.5.- 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).	40
Figura 6.6.- Gráficos de variación temporal diaria de Precipitación, Evaporación, Humedad Relativa y Relación de Mezcla a las 13 horas, Temperatura máxima (T _{máx}) y Temperatura Mínima (T _{mín}) durante 3 meses en la estación meteorológica de (a) Viques y (b) Pira. El período de ocurrencia del incendio forestal está resaltado por un cuadro naranja.	41
Figura 6.7.- 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).	44

Figura 6.8.- Gráficos de variación temporal diaria de Precipitación, Evaporación, Horas de Sol, Humedad Relativa y Relación de Mezcla a las 13 horas, Temperatura máxima (T _{máx}) y Temperatura Mínima (T _{mín}) durante 3 meses en las estaciones meteorológicas de (a) Cuyo Cuyo (b) Granja Kayra y (c) Curahuasi. El período de ocurrencia del incendio forestal está resaltado por un cuadro naranja.	45
Figura 6.9.- Anomalías mensuales de precipitación desde (a) junio hasta (f) noviembre del 2016. 48	
Figura 6.10.- (a) Corriente en chorro y circulación de vientos en 250 hPa [ms^{-1}], (c) Humedad Relativa [%] y vientos promedio [ms^{-1}] entre 400 y 600 hPa, y (b y d) sus anomalías; correspondientes al 18 de noviembre de 2016. La región afectada por el incendio forestal está dentro del recuadro azul.	50
Figura 6.11.- FWI para los días a) 13 (antes del evento), b) 14 (inicio del evento) y c) 23 (después del evento) de noviembre del 2016.	53
Figura 6.12.- Correlación entre el FWI y el área de cobertura vegetal afectada por los IF con un área efectiva menor a 100ha.	54
Figura 6.13.- Correlación entre el FWI y el área de cobertura vegetal afectada por los IF con un área efectiva entre 100 y 1000 ha.....	55
Figura 6.14- Correlación entre el FWI y el área de cobertura vegetal afectada por los IF con un área efectiva entre 0 y 1000 ha.....	55
Figura 6.15.- Correlación entre el FWI y el área de cobertura vegetal afectada por todos los IF. ...	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1.- Cantidad de reportes de emergencias por IF por departamento entre el 2003 y el 2016.	13
Tabla 5.1.- Factores de ajuste mensuales de la longitud del día para el Código de humedad de Hojarasca (Le) en relación con las latitudes de referencia, excluyendo la región ecuatorial ^a	28
Tabla 5.2.- Factores de ajuste mensuales de la longitud del día para el Código de Sequía (Lf) para los hemisferios norte y sur, excluyendo la región ecuatorial ^a	29
Tabla 6.1.- Acumulados, normales y anomalías mensuales y semanales de precipitación previa al IF en estaciones seleccionadas.....	47
Tabla 6.2.- Cantidad y porcentaje de IF entre junio y noviembre del 2016, según nivel de FWI y área afectada.....	57
Tabla 6.3.- Cantidad y porcentaje de IF entre junio y noviembre del 2016, según nivel de FWI y área afectada, considerando FWI=12 como límite.	57

ESTUDIO DE LA PROBABILIDAD ATMOSFÉRICA DE INCENDIOS FORESTALES EN EL PERÚ

1. RESUMEN

El Incendio Forestal (IF), definido como aquel fuego no deseado de cualquier origen, que se propaga sin control en los recursos forestales, causando daños ecológicos, económicos y sociales (SERFOR, 2017), es uno de los principales desastres antrópicos en el Perú. A pesar de no ser tan frecuente en el país, como en latitudes medias, daña numerosas áreas forestales, incluyendo terrenos agrícolas y áreas naturales protegidas, y a su vez genera efectos negativos en la flora y fauna, y salud de las personas, ya que los ecosistemas peruanos no se encuentran adaptados al fuego. Considerando los años que se tiene registro, el 2016 se caracterizó por un aumento significativo de ocurrencia de IF, afectando 109 391 hectáreas (has) en todo el Perú (INDECI, 2016¹). El mes con mayor número e intensidad de IF fue noviembre, debido a la falta de preparación en su manejo, así como a la deficiencia de precipitaciones, ya que este mes fue el más seco de los últimos 20 años en la sierra nor-occidental, y de los últimos 30 años en la sierra centro – occidental (SENAMHI, 2016).

Para que se produzca un IF se necesitan tres elementos: calor, oxígeno y combustible (material vegetal vivo o muerto); que coincidan en un lugar y tiempo determinado. Estos elementos están altamente relacionados con los factores meteorológicos (temperatura, humedad del aire, precipitación y viento) y físicos (tipo de vegetación, topografía, humedad del suelo, etc.) de la región donde ocurre el IF.

El objetivo de este estudio se centró en evaluar las condiciones meteorológicas y circulación atmosférica favorable a la ocurrencia y/o propagación de un IF, usando datos in situ de las estaciones meteorológicas cercanas a las localidades con reporte de IF, reanálisis y modelos meteorológicos. En este contexto, se analizó el comportamiento del índice meteorológico de incendios forestales (FWI, por sus siglas en inglés) en el Perú, un índice utilizado en países tanto de latitudes medias como tropicales, con el fin de aplicarlo para el monitoreo y aviso de condiciones meteorológicas favorables a la propagación de incendios forestales.

En este proceso se concluyó que, considerando las variables registradas en estaciones meteorológicas, el principal factor que favoreció la propagación de un IF en Perú en el 2016 fue la ausencia de precipitación durante, por lo menos, diez días continuos (decadaria), generando un

¹ Información obtenida del resumen anual compartido interinstitucionalmente por INDECI.

acumulado anómalamente bajo, en hasta 100%, durante la decadiaria antes de cada evento de IF. En algunas estaciones meteorológicas, este comportamiento de ausencia de precipitaciones y/o acumulados por debajo de su normal, se extendió hasta por un mes. Este período con déficit de lluvias o ausencia de las mismas que se presenta aleatoriamente durante el ciclo de lluvias es conocido como veranillo. El segundo factor importante fue la baja humedad relativa atmosférica que se presentó por presencia de una masa seca (baja relación de mezcla) y/o por aumento de temperatura. Además, la mayoría de días con IF, así como durante días previos, se presentó con incremento de temperatura máxima, de cantidad de horas de sol y de evaporación, y con disminución de temperatura mínima, condiciones que indicaron indirectamente la ausencia de humedad.

A nivel sinóptico, durante el caso de estudio del 18 de noviembre del 2016, la circulación atmosférica en niveles altos estuvo caracterizada por vientos del este con mayor velocidad que lo normal sobre Perú. En niveles medios, los vientos del oeste sobre el norte del Perú, la baja humedad atmosférica y la subsidencia se presentaron como principales características.

La aplicación del FWI con el modelo de pronóstico de GFS de 0.25° permitió determinar que los IF en el 2016 que afectaron menos de 100 has se dieron, en su mayoría, con un valor de FWI entre 6 y 8 (bajo a moderado); aquellos IF que afectaron entre 100 y 1000 has se dieron con FWI entre 10 y 15 (moderado a alto); y finalmente, los IF que afectaron áreas mayores a 1000 has se dieron con FWI entre 8 y 20 (moderado a muy alto). Con estos resultados se estableció que el FWI durante el 2016 identificó correctamente, en la mayoría de los casos, áreas con peligro de incendio, sin embargo, este aún puede ser mejorado utilizando un modelo con mayor resolución.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Definición de incendio forestal

Se mencionará a continuación algunas definiciones de los IF, usadas por diferentes instituciones:

- El reglamento de Capacidad de Uso Mayor de Suelo, DS N°017 (2009), considera un IF a aquel fuego descontrolado que afecta los bosques nativos, a las plantaciones forestales y otra vegetación que se desarrolla en tierras forestales de producción y protección; así como sobre la vegetación silvestre y de ambientes acuáticos emergentes, que se desarrollan en las tierras de protección, cualquiera sea su ubicación en el territorio nacional (Manta y León, 2004; Manta, 2017).
- El Servicio Nacional de Flora y de Fauna Silvestre (SERFOR), define que un IF es 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 sociales².
- El Servicio Nacional de Áreas Protegidas (SERNANP), lo define como un fuego que se da en bosques naturales o plantados producidos por la acción del ser humano o causado por la naturaleza y que avanza sin ningún control, ocasionando daños ecológicos, climáticos, económicos y sociales.

Las tres definiciones coinciden que un IF es un fuego descontrolado debido a cualquier origen, que afectan los diferentes tipos de bosques. Existen tres tipos de IF según la capa vegetal que afectan (SERFOR, 2017):

- a) De superficie: Son los más comunes y queman el sotobosque. Su velocidad de propagación dependerá del tipo y condición del combustible, topografía y tiempo atmosférico. De acuerdo a Manta (2017), estos incendios dañan principalmente los pastizales y la vegetación que se encuentra en la superficie hasta los 1.5 metros de altura, y es el tipo más común en la sierra peruana.
- b) Aéreo, de copas o corona: Se originan producto de un fuego de superficie, que luego avanza por las copas de los árboles y/o arbustos. Manta (2017) indicó que la velocidad de

² Definición obtenida del plan preliminar de prevención de riesgos de incendios forestales del Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR, 2017).

propagación y desprendimiento calórico es alta. Este tipo de IF afecta gravemente los bosques, ya que destruye la vegetación y la fauna silvestre.

- c) **Subterráneos:** El fuego quema las raíces, la capa de humus del suelo y la micro-fauna. Se caracteriza por una combustión sin llamas y la velocidad de propagación en este caso es lenta.

Un IF casi nunca es de un solo tipo; generalmente se dan combinaciones de ellos; por ejemplo, de superficie y copas.

2.2. Los Incendios Forestales en el Perú

2.2.1. Registros de los Incendios Forestales

El Perú aún no cuenta con un registro histórico normalizado de IF que sea utilizado operativamente. Sin embargo, existen diversas fuentes de datos de IF, cada una con características diferentes y por ello, limitaciones diversas. A continuación se describen cada una de ellas:

a. **Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI:** A través del Sistema Nacional para la Respuesta y Rehabilitación – SINPAD, el INDECI registra, utilizando internet, datos de incendios forestales, así como de otras emergencias en todo el Perú; sin embargo solo cuenta con información desde el 2003 en adelante (Figura 2.1) y la información registrada es aquella que fue reportada en el sistema, por ello puede obviar algunos IF (aquellos que no fueron reportados). Sin embargo, es la mejor fuente de información de IF con la que se cuenta actualmente y por ello fue utilizada en este estudio.

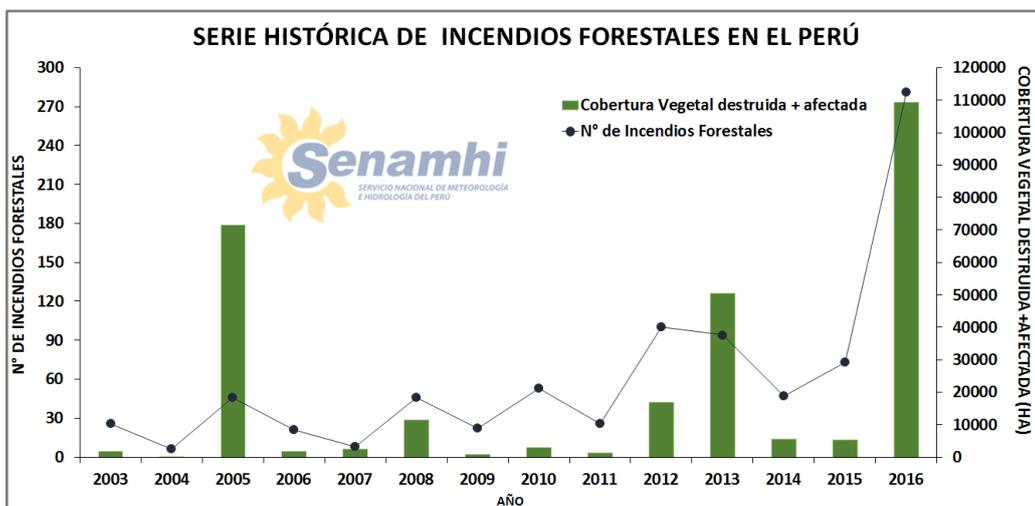


Figura 2.1.- Cantidad de reportes de emergencias por IF entre el 2003 y el 2016.
Fuente: Elaboración propia con datos de SINPAD - INDECI (2017)

b. Universidad Nacional Agraria la Molina – UNALM: De acuerdo a Manta (2017), la base de datos de la UNALM, a través de la facultad de Ciencias Forestales guarda registros de IF en la sierra peruana desde 1973 hasta el 2011. El formato de registro es el propuesto por Manta y Goldammer (2010)³. Sin embargo, la información no se encuentra disponible online y aquella a la que se tiene acceso sólo contabiliza el total de IF por año (Figura 2.2).

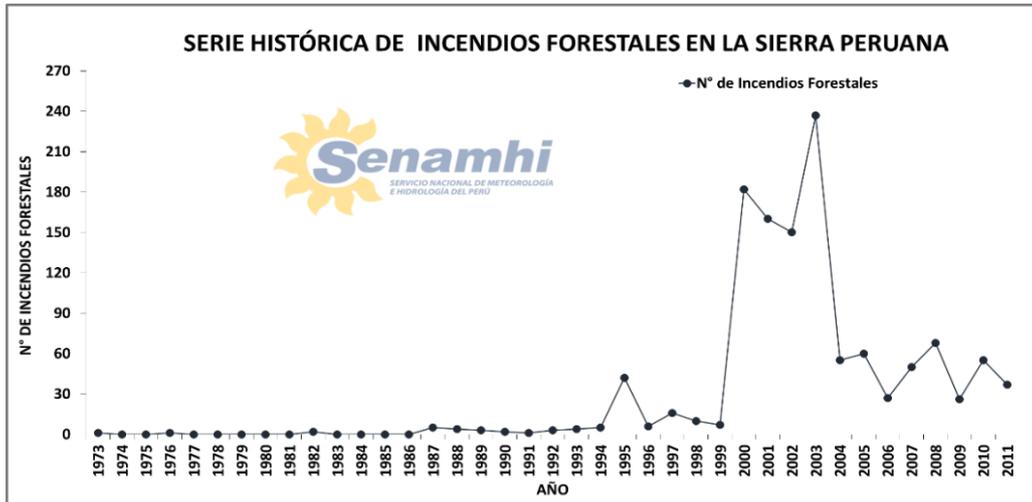


Figura 2.2.- Serie histórica de IF en la sierra peruana desde 1973 al 2011.

Fuente: Elaboración propia con datos de la fuente de la base de datos de la UNALM, disponibles en el libro titulado: “Contribución al conocimiento de la prevención de los incendios forestales en la sierra peruana” (Manta, 2017).

c. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales – INPE, Brasil: En su sitio web de “Queimadas” registra la ocurrencia de fuego en la vegetación considerando el monitoreo operativo de focos de calor activos detectados por satélites, sin embargo, la limitación que presenta esta fuente de datos es que al considerar focos de calor (temperatura), no todos terminan siendo incendios forestales, ya que solo pueden ser quemas, y estas pueden ser controladas. Los datos son actualizados cada tres horas, todos los días del año, y el acceso a la información es libre vía online, mediante el siguiente link: <http://www.inpe.br/queimadas/portal> (INPE, 2017) (Figura 2.3).

d. Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas - SERNANP: Registran datos de los incendios forestales ocurridos en todas las áreas protegidas, sin embargo aún se encuentra en sistematización, por lo que para este informe no se ha tomado como referencia.

³ Como es referenciado en Manta (2017).

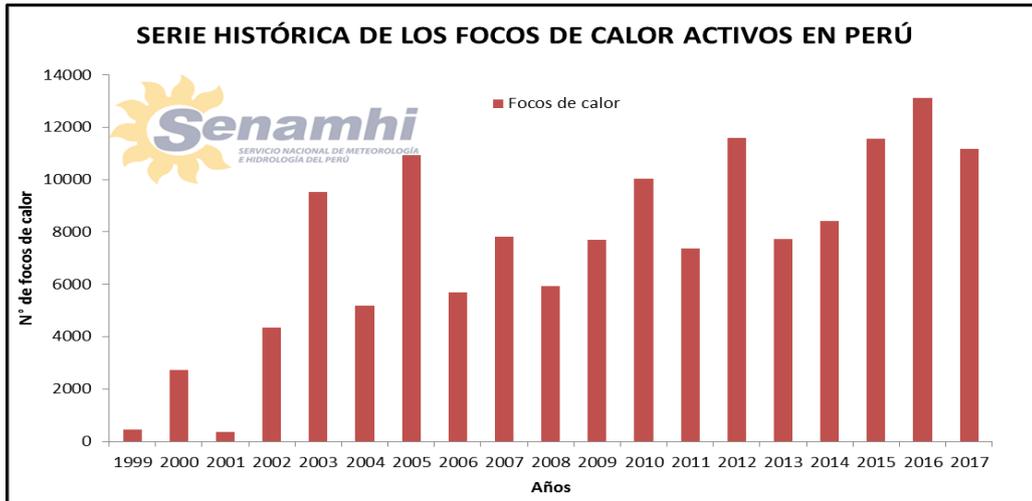


Figura 2.3.- Serie histórica de los focos de calor activos en el Perú.
 Fuente: Elaboración propia con datos del sitio web de “Queimadas” de INPE.

2.2.2. Tendencia de los Incendios Forestales

Los tres conjuntos de datos relacionados con IF descritos en la sección anterior manifiestan una tendencia positiva con el tiempo de ocurrencia de incendios forestales en el Perú, y por ende, de las áreas afectadas.

De acuerdo a lo registrado en el SINPAD – INDECI y en el INPE, los mayores registros se alcanzaron en el 2016 con 281 IF y 109 391 has afectadas, y el factor principal para que esto ocurriera es que este año se caracterizó por un déficit de precipitaciones en la sierra peruana, principalmente durante noviembre, que fue considerado como el noviembre más seco de los últimos 20 años en la sierra nor-occidental, mientras que el más seco de los últimos 30 años en la sierra centro – occidental, junto con el año 2014 (SENAMHI, 2016).

El 2005 también fue un año con altas ocurrencias de IF, registrándose 46 IF y 71 438 has de áreas afectadas y destruidas. Marengo et al. (2008) indicaron que en el 2005 se registró una fuerte sequía en la cuenca amazónica, lo que favoreció a la ocurrencia de incendios y a la permanencia de ellos en el territorio. Esta sequía afectó gran área del oeste de la cuenca amazónica debido al elevado calentamiento del Atlántico y fue reportado como una de las sequías más intensas de los últimos 100 años hasta el 2005. Otros episodios de sequía en la Amazonía que son recordados con especial énfasis son los del año 2010 y 2015 (Panisset et. al., 2017), sin embargo en esos años no se registró un número importante de IF en Perú (de acuerdo a lo reportado por INDECI) puesto que afectaron las regiones centro y este de la cuenca amazónica, respectivamente, y de esa forma no afectaron a Perú directamente.

Al considerar el monitoreo de déficit de precipitación en el Perú mediante el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) que realiza el SENAMHI a nivel

trimestral, se destaca que en noviembre (Setiembre-Octubre-Noviembre, por ser trimestral) de 2016 se reportaron condiciones extremadamente secas en la sierra peruana (DE)⁴ (Figura 2.4d), lo cual fue similar al 2005 (Figura 2.4a), 2010 (Figura 2.4b) y 2015 (Figura 2.4c), pero fue más intenso en el 2016.

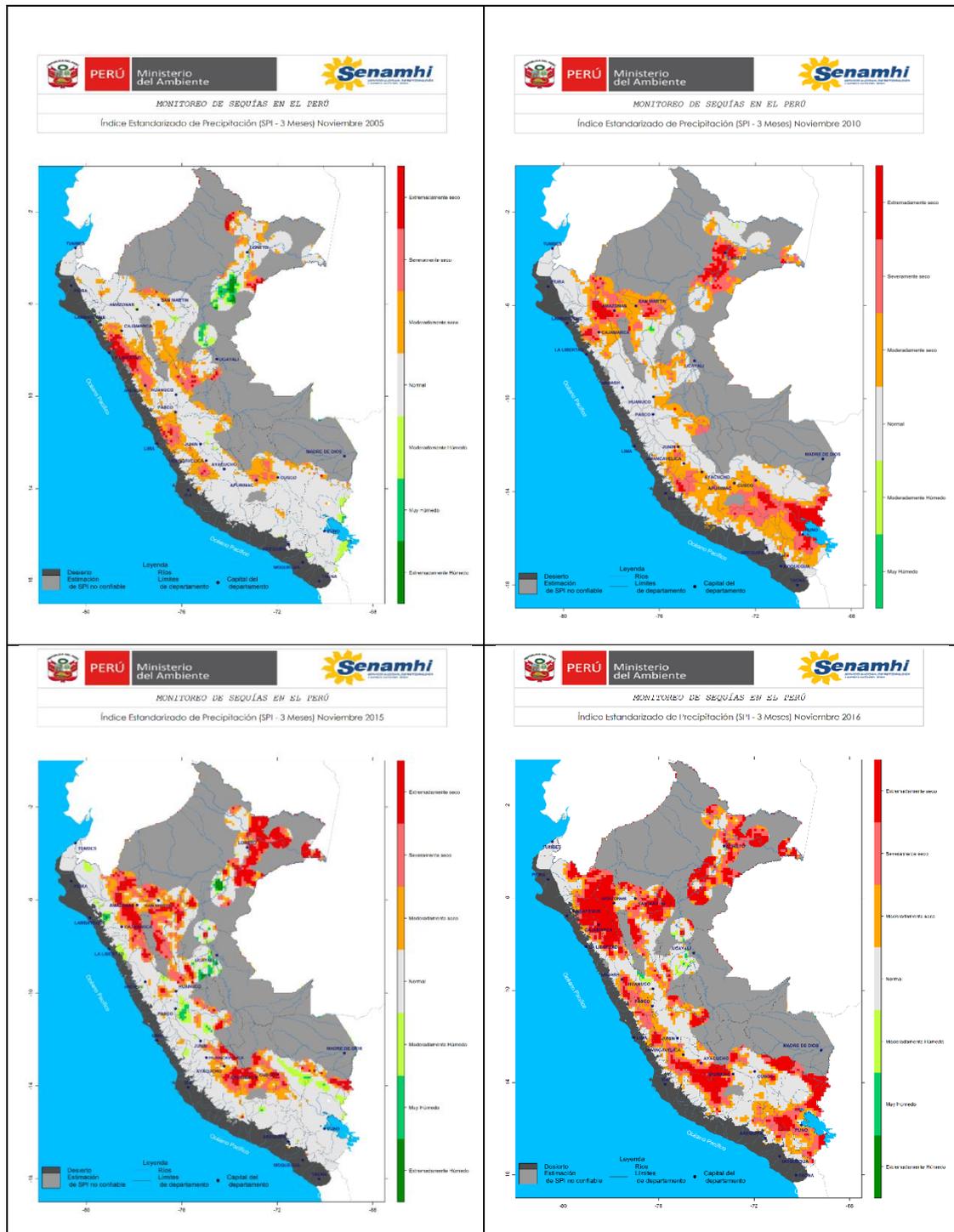


Figura 2.4.- índice Estandarizado de Precipitación (SPI – 3 meses) para noviembre del 2016
Fuente: <http://www.senamhi.gob.pe/?p=sequias>

⁴ Considerando la categorización realizada por McKee (1993)

Por otro lado, la serie histórica registrada en la base de datos de la UNALM (Figura 2.2) también muestra un incremento de IF en la sierra peruana en los últimos años al igual que lo observado en la Figura 2.1. Sin embargo, los valores no coinciden con lo reportado por SINPAD, esto posiblemente se deba a las diferencias en los formularios de reporte.

La Figura 2.3 también muestra tendencia positiva de focos de calor, con valores mayores registrados en el 2016, y en el 2005, similar a lo registrado en la base de datos de SINPAD.

Los IF en la sierra peruana son más frecuentes en los departamentos de Cusco, Puno y Apurímac (Tabla 2.1). Cabe indicar que, en el 2016, de acuerdo a los reportes de emergencias en el SINPAD, se alcanzaron récords históricos de IF, es así que Cajamarca, Cusco, Apurímac, Amazonas, Huancavelica, Pasco y Puno tuvieron un número de IF nunca antes visto. Asimismo, las áreas naturales de la región norte fueron afectadas, principalmente en noviembre, entre ellas estuvieron el Parque Nacional de Cutervo, el Bosque de Protección Pagaibamba (Cajamarca), Refugio de vida silvestre Laquipampa, Santuario histórico del bosque de Pómac (Lambayeque), Reserva Nacional de Tumbes (Tumbes).

Tabla 2.1.- Cantidad de reportes de emergencias por IF por departamento entre el 2003 y el 2016.

Fuente: SINPAD - INDECI (2017)

UBICACIÓN	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	TOTAL
AMAZONAS			3				1	1	2	2			2	31	42
ANCASH			4	1		1	2		2	4				7	21
APURIMAC	3		7	6	1	11	7	13		2	8	15	8	50	131
AREQUIPA	1		1							3	3				8
AYACUCHO			1			1	3	4	2	2	1	3	12	20	49
CAJAMARCA			1				4	11		7			2	23	48
CALLAO														1	1
CUSCO	10	3	15	6	1	6	3	9	13	19	39	12	19	41	196
HUANCAVELICA								2			1	1		7	11
HUÁNUCO			2					1				1	1	2	7
JUNIN			5		1			1		2	2			5	16
LA LIBERTAD														3	3
LAMBAYEQUE				1		4			1					4	10
LIMA METROPOLITANA												1	2		3
LIMA PROVINCIAS									1	2		1		2	6
LORETO			1		1					2			1	1	6
MADRE DE DIOS			3	2						32				1	38
MOQUEGUA	3	3	1								1	1			9
PASCO								2		1		3	11	23	40
PIURA			3			4			4	7	1		1	6	26
PUNO	5		4			3		1		1	38	6	7	43	108
SAN MARTIN	1		2	1	2	2	1	7	1	8			2		27
TACNA												1		3	4
TUMBES					1	14	1	1		3				7	27
UCAYALI	3		12	3									2	1	21
Total general	26	6	65	20	7	46	22	53	26	97	94	45	70	281	858

2.3. Influencia del Clima y de la Variabilidad Climática Regional en los incendios forestales de los Andes Tropicales

All et al. (2017) realizaron un análisis de correlación entre datos climáticos de temperatura y precipitación de la estación de Recuay – Áncash (3404 msnm) y el acumulado mensual de píxeles de fuego activos y área quemada obtenidos del *National Aeronautics and Space Administration's Moderate Resolution Imaging Spectrometer* (MODIS) para la Cordillera Blanca peruana entre el 2002 y 2014; y demostraron que si existe una correlación negativa significativa entre los datos climáticos y el comportamiento del fuego, tal como se observa en la Figura 2.5. La correlación es más significativa entre la precipitación y el número de píxeles de fuego activo (Figura 2.5c) que entre la temperatura y el fuego, observándose que a valores mayores de precipitación menor es la ocurrencia de fuego activo, e incluso sobre los 40 mm de acumulado mensual ya no existe fuego activo.

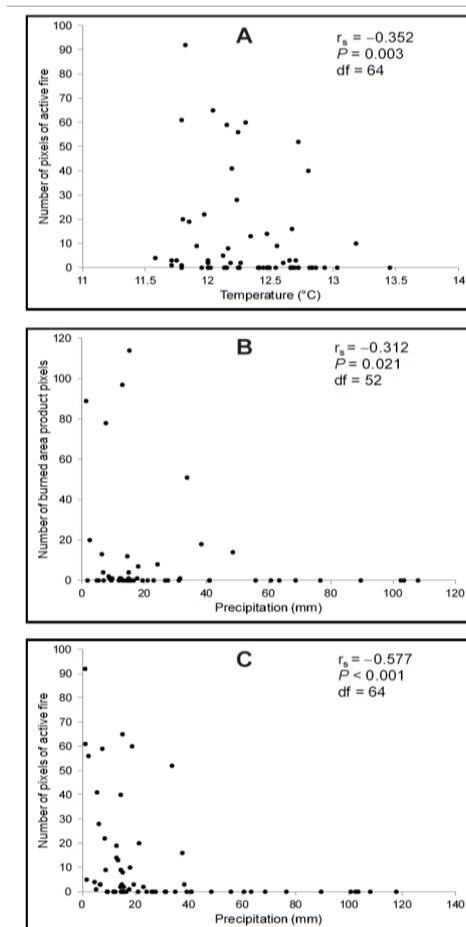


Figura 2.5.- Diagramas de dispersión de (a) número mensual de píxeles de fuego activos vs media mensual de temperatura, (b) número mensual de píxeles de área quemada vs media mensual de precipitación, y (c) número mensual de píxeles de fuego activo vs media mensual de precipitación. Estación seca, abril hasta setiembre, incluyendo meses con incendios y meses sin incendios. Correlación de Spearman (r_s), P-values, y df están dados para cada conjunto de puntos. Fuente: All et al. (2017).

Román-Cuesta et al. (2014) muestran un estudio para examinar la tendencia del fuego en los Andes para tres ecosistemas: Puna, Páramo y Yunga para el período comprendido entre 1982 y 2006. Ellos concluyeron que existe una cuasi cíclica y sincronizada respuesta del fuego al forzamiento climático regional en Perú, Ecuador y Bolivia, pero no en Colombia ni Venezuela. Además, ellos observaron que aunque la sincronización del fuego con la variación climática regional existió, no se percibió una relación significativa con la variabilidad del ENSO, posiblemente porque el ENSO está más relacionado con la variación de la temperatura que con la precipitación.

Otra conclusión importante del estudio de Román-Cuesta et al. (2014) fue la asociación de los incendios en los ecosistemas de vegetación corta como pastizales con una variabilidad tipo “diente de sierra” en la precipitación, con un incremento de la precipitación un año antes al año pico de incendio forestal, y disminución de la precipitación durante el año del incendio. Esto es explicado con la interacción de la disponibilidad de combustible, ya que el exceso de precipitación estimula el crecimiento del combustible fino debido al incremento de la productividad de las plantas y la disminución de incendios, dejando así más combustible disponible a la ignición y dispersando más el fuego durante el siguiente año.

2.4. Causas inmediatas de los incendios forestales

USAID (2015) a través de un estudio de diagnóstico, distinguió las causas antrópicas de los IF por regiones:

- a) Región Amazónica: Demanda de tierras por el sector agrícola (palma africana, cacao, frutales), las actividades extractivas (minería, extracción del petróleo), se suma a ello las nuevas vías terrestres. Esto genera el cambio de uso de suelo y la aplicación de fuego para la eliminación de la vegetación, ocasionalmente este fuego se sale de control y ocasiona los IF.
- b) Región Andina: Se requieren pastos renovados que son más apetecibles para el ganado y la ampliación de terrenos agrícolas. Para lograr estos objetivos es frecuente que se utilice la quema; sin embargo estas prácticas no controladas pueden generar IF. Asimismo, existen especies exóticas como el Eucalipto y el Pino, que contienen aceites volátiles en sus hojas, por ende facilitan la expansión de los IF.
- c) Región Interandina: Localizada entre la región andina y la Amazonía, está amenazada por el uso de fuego en las chacras, principalmente, ya que la topografía del lugar favorece a la disponibilidad de combustible y la velocidad de propagación del fuego

- d) Región norte: Los incendios son ocasionados por los “mieleros”, dedicados a coleccionar la miel de abeja, quienes queman la base del árbol para ahuyentar a las abejas. Además, existe un tipo de pasto “Passiflora” que cuando la temperatura se eleva, los frutos eclosionan y pueden causar incendios forestales. Asimismo, la preparación de terrenos para las campañas agrícolas, generan los IF en los bosques secos.

Por otro lado, en las áreas naturales protegidas, el 50% de IF ocurre por el cambio de uso de suelos, 41% por quema de pastos como actividad ancestral, 3% por la quema para obtener leña y 3% por negligencia (SERNANP, 2016⁵). Las causas de los IF en el Perú, son casi en su totalidad de origen antrópico, debido a las diferentes actividades económicas de cada región.

2.5. Consecuencias de los incendios forestales

SERFOR (2017) mencionó que los IF dañan la cobertura vegetal, agua, flora, fauna silvestre, y la salud. También contaminan la atmósfera y alteran el tiempo meteorológico. Algunas consecuencias se presentarán a continuación:

- En el suelo y agua, la pérdida de cobertura vegetal, altera el ciclo hidrológico del agua, erosión del suelo al quedar expuesto a los efectos del viento y de la lluvia.
- En la flora y fauna, los IF generan cambios en la estructura de los bosques y las composiciones florísticas, cambio de hábitat de la flora y fauna. SERFOR (2017) reportó que como efecto inmediato de los incendios en el entorno de bosque húmedo (incendios a la altura del suelo), la muerte o daño de numerosos animales, entre los que encontramos primates, perezosos, pecaríes, venados, loros, tucanes, serpientes, lagartijas, entre otros.
- En la atmósfera y la salud, los IF causan un incremento del dióxido de carbono (CO₂), y disminución del oxígeno (O₂); a su vez tienen un impacto sobre el cambio climático, ya que liberan abundantes gases de efecto de invernadero. Asimismo, la suspensión del humo luego durante y luego del incendio afecta las vías respiratorias y causa la irritación de la vista de la población.
- En la economía, luego de un IF se observa un deterioro del paisaje y patrimonios culturales, lo cual ocasiona reducción del turismo y reparaciones de los patrimonios. También, la destrucción de la madera genera un impacto negativo en la economía de las poblaciones de la zona afectada.

⁵ Referenciado en SERFOR, 2017.

2.6. Ambiente del fuego que influye en el comportamiento del incendio forestal

Desde el punto de vista meteorológico y climático, el fuego, causado por desastres naturales o actividad humana, se torna un peligro cuando se dispersa sobre áreas naturales amplias destruyendo vegetación, vida silvestre, y/o propiedades, liberando humo y contaminantes a la atmósfera. Puede tener impactos positivos sumados a los negativos, ya que puede ser usado por humanos para modificar el paisaje, limpiar bosques para utilizarlos en agricultura, mejorar la calidad de los pastizales, y ayudar en la regeneración rápida de las especies de plantas. El fuego puede convertirse en incendio forestal y puede ser causado por descuido humano o relámpagos, muchas veces precedido por una sequía. Esto puede ser empeorado por fuertes vientos que ayudan a dispersar el fuego sobre grandes áreas. Las regiones más susceptibles a un incendio forestal son aquellos que tienen una marcada estación seca con altas temperaturas (Smith, 2006).

Los tres componentes del triángulo del ambiente de fuego comprenden el tiempo atmosférico, la topografía y el combustible, y son los que controlan el comportamiento del fuego.

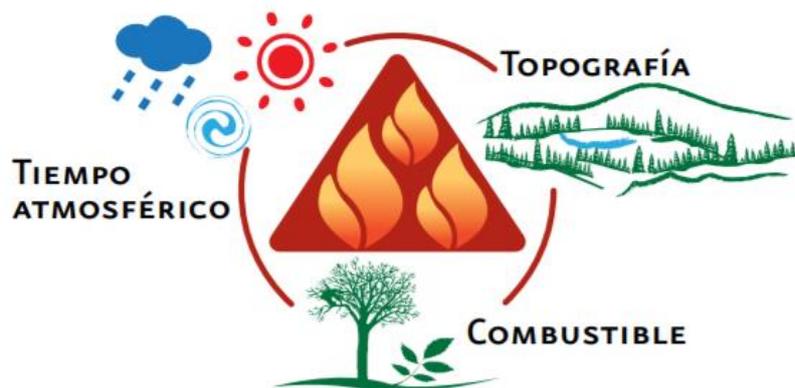


Figura 2.6.- Triángulo del ambiente de fuego establece la relación entre el tiempo atmosférico, combustible y topografía.

Fuente: Comisión Nacional Forestal de México (2010)

Tiempo atmosférico:

Los IF están relacionados con las condiciones atmosféricas tales como temperaturas elevadas, baja humedad relativa, días consecutivos sin lluvias, cantidad de precipitación, dirección y velocidad de viento, García y García (1987). En un área donde los combustibles son abundantes y secos, altas temperaturas y un día ventoso son condiciones favorables y potenciales para la ocurrencia de IF extremos.

Los factores meteorológicos pueden cambiar rápidamente espacialmente y temporalmente, debido a los cambios de masas de aire, ciclo diurno (noche y día) y efectos locales como la topografía. Los factores que influyen son los siguientes:

- Temperatura
- Humedad relativa
- Estabilidad atmosférica
- Velocidad y dirección del viento
- Precipitación

Combustible:

El combustible es el estado de la vegetación (seco, húmedo), la densidad del bosque, la abundancia de combustible y leña. En general, el estado de humedad de la vegetación depende de la precipitación de días o meses previos, la cual es almacenada como humedad en el suelo (Espinoza et al, 2016). Asimismo, durante años “El Niño” con precipitaciones abundantes en la costa y sierra norte occidental, se presenta crecimiento de la vegetación en el ecosistema de bosque seco, por lo que luego de las lluvias existe abundante combustible. Por otro lado, el Perú cuenta con diferentes tipos de bosques (Figura 2.7), los cuales presentan diferentes propiedades que pueden ser favorables a la propagación de IF, como su capacidad de combustible.

Topografía:

La topografía es el factor más constante del triángulo. Perú posee la cordillera de los Andes que determina la orografía del Perú, generando así diferentes tipos de clima. Los factores topográficos son:

- Altitud
- Posición de la ladera
- Orientación
- Rugosidad del terreno
- Pendiente de la ladera

El más importante de estos factores es la pendiente de la ladera, ya que los cambios en la pendiente producen efectos directos en el comportamiento del fuego; a lo largo de la sierra peruana, y en el límite entre sierra y selva existen fuertes pendientes. El grado de inclinación afecta la cantidad disponible de combustible y la velocidad de propagación de los IF, mientras más pronunciada sea la pendiente mayor será el grado de precalentamiento al que pueden estar sometidos los combustibles y a la vez mayor la velocidad de propagación (Figura 2.8).

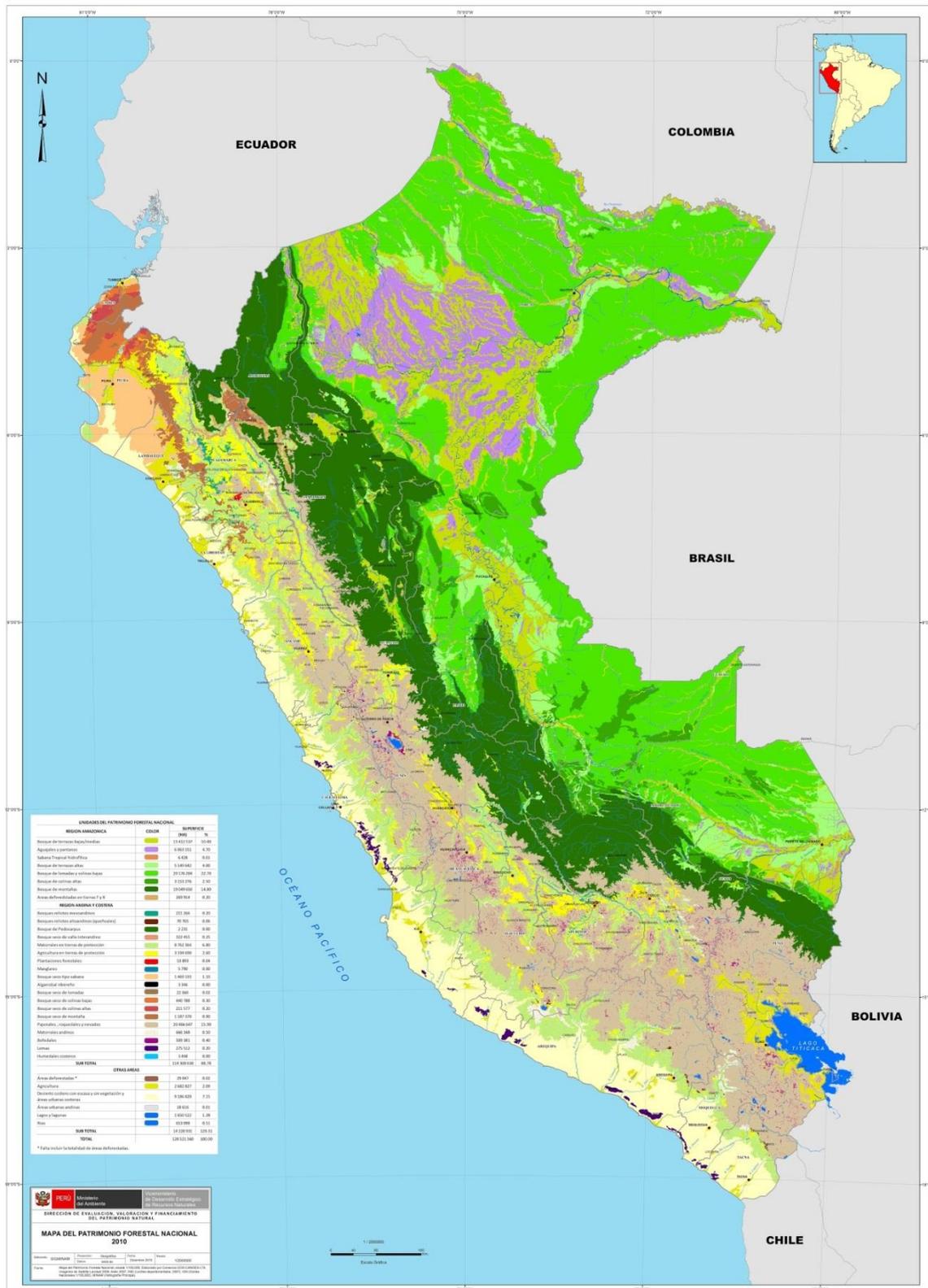


Figura 2.7.- Cobertura vegetal del Perú.
Fuente: MINAM (2010)

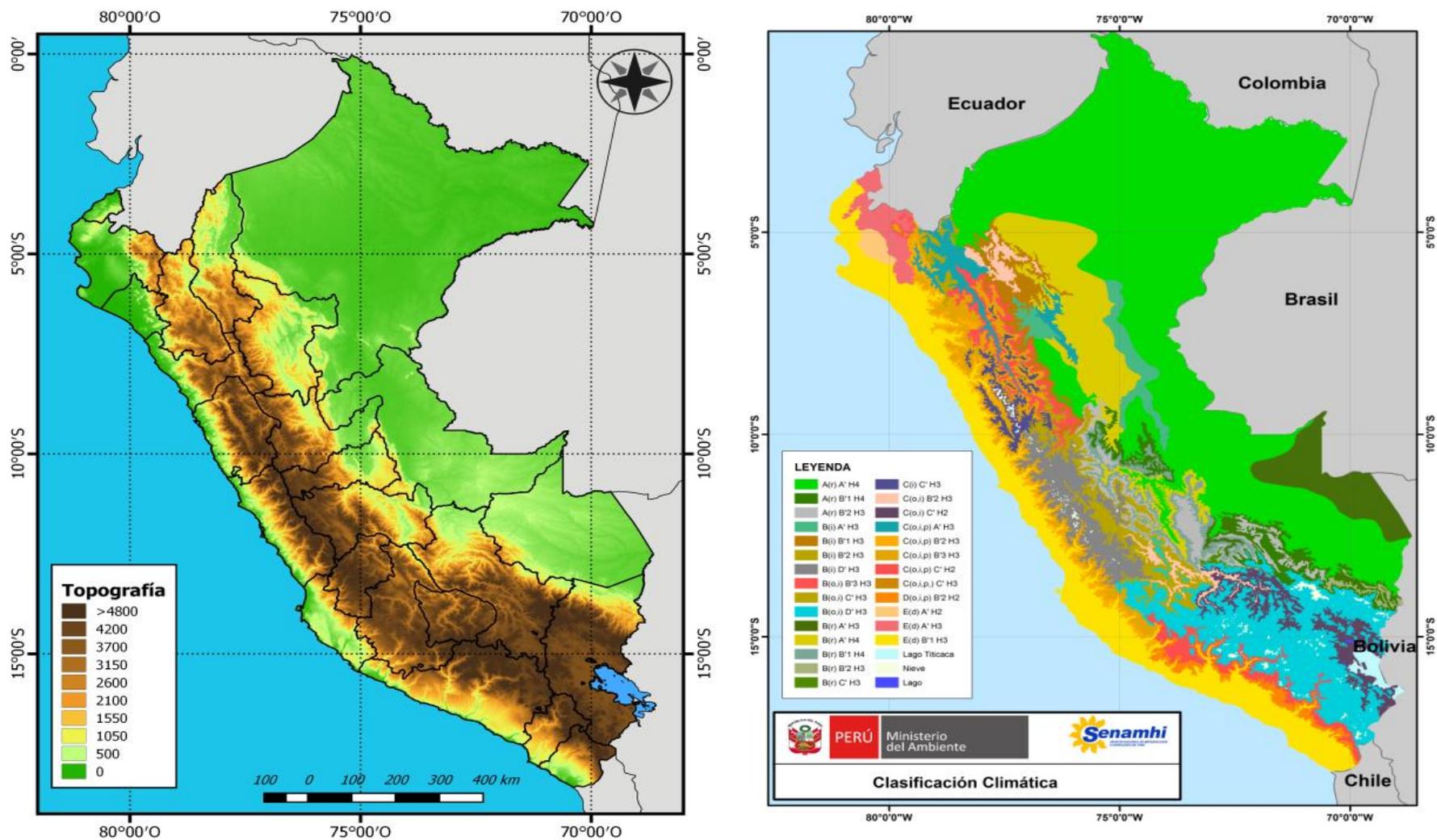


Figura 2.8.- Mapa topográfico (izquierda) y de la clasificación climática (derecha). Fuente: SENAMHI

2.7. Índice Meteorológico de Incendios o Fire Weather Index (FWI)

El FWI es un índice basado en las condiciones de tiempo meteorológico y consta de tres códigos y tres índices que se refieren a 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.

De acuerdo a Van Wagner (1987), estos códigos son:

1. El Código del Contenido de Humedad de Combustibles Finos o Fine Fuel Moisture Code (FFMC), es una escala numérica del 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 con una capa de peso seco de 0.25 kg m^{-2} . 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:

$$m_o = \frac{147.2(101-F_o)}{59.5+F_o} \quad (2.1)$$

$$r_f = r_o - 0.5, \quad r_o > 0.5 \quad (2.2)$$

$$m_r = m_o + 42.5r_f(e^{-100(251-m_o)}) \left(1 - e^{-\frac{6.93}{r_f}}\right), \quad m_o \leq 150 \quad (2.3a)$$

$$m_r = m_o + 42.5r_f(e^{-100(251-m_o)}) \left(1 - e^{-\frac{6.93}{r_f}}\right) + 0.0015(m_o)r_f^{0.5}, \quad m_o > 150 \quad (2.3b)$$

$$E_d = 0.942H^{0.679} + 11e^{(H-100)/10} + 0.18(21.1 - T)(1 - e^{-0.115H}) \quad (2.4)$$

$$E_w = 0.618H^{0.753} + 10e^{(H-100)/10} + 0.18(21.1 - T)(1 - e^{-0.115H}) \quad (2.5)$$

$$k_o = 0.424 \left[1 - \left(\frac{H}{100}\right)^{1.7}\right] + 0.0694W^{0.5} \left[1 - \left(\frac{H}{100}\right)^8\right] \quad (2.6a)$$

$$k_d = k_o \times 0.581e^{0.0365T} \quad (2.6b)$$

$$k_l = 0.424 \left[1 - \left(\frac{100-H}{10}\right)^{1.7}\right] + 0.0694W^{0.5} \left[1 - \left(\frac{100-H}{100}\right)^8\right] \quad (2.7a)$$

$$k_w = k_l \times 0.581e^{0.0365T} \quad (2.7b)$$

$$m = E_d + (m_o - E_d) \times 10^{-k_d} \quad (2.8)$$

$$m = E_w - (E_w - m_o) \times 10^{-k_w} \quad (2.9)$$

$$FFMC = F = 59.5(250 - m)/(147.2 + m) \quad (2.10)$$

Así, el FFMC es calculado de la siguiente manera:

1. Se calcula m_o a partir de F_o mediante la ecuación 2.1.
2. Si $r_o > 0.5$ calcular r_f mediante la ecuación 2.2.
3. Se calcula m_r a partir de r_f y m_o mediante la ecuación 2.3a o 2.3b según sea el caso.
4. Luego, m_r pasa a ser el nuevo m_o .
5. Se calcula E_d mediante la ecuación 4.
6. Si $m_o > E_d$, se calcula k_d mediante las ecuaciones 2.6a y 2.6b y se calcula m mediante la ecuación 8.
7. Si $m_o < E_d$, se calcula E_w mediante la ecuación 2.5.
8. Si $m_o < E_w$ se calcula k_w mediante las ecuaciones 2.7a y 2.7b y se calcula m mediante la ecuación 2.9.
9. Si $E_d \geq m_o \geq E_w$ se considera $m = m_o$.
10. Se calcula F mediante la ecuación 2.10. Este es el FFMC del día.

2. El Código del Contenido de Humedad en la Hojarasca o *Duff Moisture Code (DMC)* es una escala numérica de la humedad promedio y del consumo de combustible de una capa orgánica compactada de 7 cm de profundidad, que pesa aproximadamente 5 kg m^{-2} . También se utiliza como un indicador de la receptividad del suelo del bosque a la ignición por el rayo. 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:

$$r_e = 0.92r_o - 1.27, \quad r_o > 1.5 \quad (2.11)$$

$$M_o = 20 + e^{(5.6348 - \frac{P_o}{43.43})} \quad (2.12)$$

$$b = \frac{100}{0.5 + 0.3P_o}, \quad P_o \leq 33 \quad (2.13a)$$

$$b = 14 - 1.3 \ln P_o, \quad 33 < P_o \leq 65 \quad (2.13b)$$

$$b = 6.2 \ln P_o - 17.2, \quad P_o > 65 \quad (2.13c)$$

$$M_r = M_o + 1000r_e / (48.77 + br_e) \quad (2.14)$$

$$P_r = 244.72 - 43.43 \ln(M_r - 20) \quad (2.15)$$

$$K = 1.894(T + 1.1)(100 - H)L_e \times 10^{-6} \quad (2.16)$$

$$DMC = P = P_o (\text{or } P_r) + 100K \quad (2.17)$$

Así, el DMC es calculado de la siguiente manera:

1. Si $r_o > 1.5$, se calcula r_e mediante la ecuación 2.11, M_o a partir de P_o mediante la ecuación 2.12, b mediante la ecuación 13a, 13b o 13c según sea el caso, M_r mediante la ecuación 2.14 y se convierte M_r en P_r mediante la ecuación 2.15. 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 2.16.
4. Se calcula P a partir P_o (o P_r) mediante la ecuación 2.17. Este es el DMC del día.

Existen tres restricciones para el uso de las ecuaciones del DMC: 1) Las ecuaciones 2.11-2.15 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_r 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 2.16. Si $T < -1.1$, debe utilizarse $T = -1.1$.

3. El Código de Sequía o Drought Code (DC) es una escala numérica del contenido de humedad promedio de la capa más profunda del suelo e indica los efectos de una sequía estacional en las capas profundas, compactas y orgánicas que pesan alrededor de 25 kg m^{-2} . 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:

$$r_d = 0.83r_o - 1.27, \quad r_o > 2.8 \quad (2.18)$$

$$Q_o = 800e^{-D_o/400} \quad (2.19)$$

$$Q_r = Q_o + 3.937r_d \quad (2.20)$$

$$D_r = 400 \ln\left(\frac{800}{Q_r}\right) \quad (2.21)$$

$$V = 0.36(T + 2.8) + L_f \quad (2.22)$$

$$DC = D = D_o(\text{or } D_r) + 0.5V \quad (2.23)$$

Así, el DC es calculado de la siguiente manera:

1. Si $r_o > 2.8$ se calcula r_d mediante la ecuación 2.18, Q_o a partir de D_o mediante la ecuación 2.19, Q_r mediante la ecuación 2.20 y se convierte Q_r a D_r mediante la ecuación 2.21. 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 2.22.
4. Se calcula D a partir de D_o (o D_r) mediante la ecuación 23. Este es el DC del día.

Existen cuatro restricciones para el uso de las ecuaciones del DC: 1) Las ecuaciones 2.18-2.21 no son utilizadas a menos que $r_o > 2.8$; 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 2.22. Si $T < -2.8$, debe utilizarse $T = -2.8$. 4) V no puede ser negativo. Si la ecuación 2.22 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 movimiento son:

1. El Índice de Propagación Inicial o *Initial Spread Index (ISI)* es una escala numérica de la tasa esperada de dispersión del fuego. 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:

$$f(W) = e^{0.05039W} \quad (2.24)$$

$$f(F) = 91.9e^{-0.1386m} \left[1 + \frac{m^{5.31}}{4.93 \times 10^7} \right] \quad (2.25)$$

$$ISI = R = 0.208f(W)f(F) \quad (2.26)$$

2. El Índice de Combustión o *Buildup Index (BUI)* es una escala numérica de la cantidad total de combustible disponible para la combustión y combina DMC y DC, siendo la ecuación para su cálculo:

$$BUI = U = \frac{0.8PD}{P + 0.4D}, \quad P \leq 0.4D \quad (2.27a)$$

$$BUI = U = P - \left[1 - \frac{0.8D}{P + 0.4D} \right] [0.92 + (0.0114P)^{1.7}], \quad P > 0.4D \quad (2.27b)$$

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. (Dimitrakopoulos et al., 2011; Souto, 2013), siendo la ecuación para su cálculo:

$$f(D) = 0.626U^{0.809} + 2, \quad U \leq 80 \quad (2.28a)$$

$$f(D) = 1000/(25 + 108.64e^{-0.023U}), \quad U > 80 \quad (2.28b)$$

$$B = 0.1Rf(D) \quad (2.29)$$

$$\ln S = 2.72(0.434 \ln B)^{0.647}, \quad B > 1 \quad (2.30a)$$

$$FWI = S = B, \quad B \leq 1 \quad (2.30b)$$

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

1. Se calcula $f(W)$ y $f(F)$ mediante las ecuaciones 2.24 y 2.25.
2. Se calcula R mediante la ecuación 2.26. Este es el ISI del día.
3. Se calcula U mediante la ecuación 2.27a si $P \leq 0.4D$, o mediante la ecuación 2.27b si $P > 0.4D$. Este es el BUI del día.
4. Se calcula $f(D)$ mediante la ecuación 2.28a para los valores de U hasta 80. Si $U > 80$, se usa la ecuación 2.28b.
5. Se calcula B mediante la ecuación 2.29.
6. Si $B > 1$, se calcula S a partir de su logaritmo, dada la ecuación 2.30a. Si $B \leq 1$, debe utilizarse $S = B$ de acuerdo a la ecuación 2.30b. S es el FWI del día.

Asimismo, el proceso se puede apreciar de manera esquemática (flujograma) en la Figura 2.9, en esta se puede observar la relación existente entre las variables de entrada, los códigos y los índices que resultan en el FWI. Sin embargo, tanto el BUI como el ISI también pueden ser analizados por si mismos para evaluar la probabilidad de que se genere o propague un incendio forestal, permitiendo el primero ver el material combustible disponible que puede consumir el incendio forestal y el segundo la capacidad de propagación del incendio debido al comportamiento del viento horizontal.

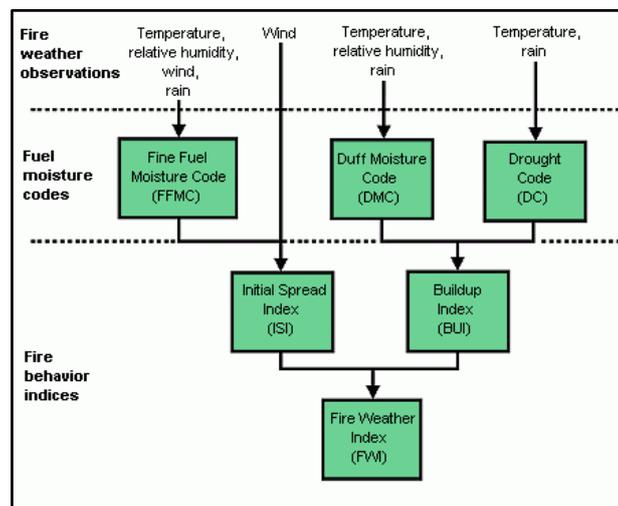


Figura 2.9.- Estructura esquemática del FWI.

Fuente: <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi>

4. OBJETIVOS

- 4.1. Analizar la distribución espacial y temporal de los incendios forestales ocurridos en Perú en el 2016.
- 4.2. Evaluar las condiciones meteorológicas, con datos observados, de las localidades con incendios forestales en el 2016.
- 4.3. Analizar la circulación atmosférica durante los incendios forestales en Perú en el 2016.
- 4.4. Aplicar y evaluar el Índice Meteorológico de Incendios - FWI en eventos de incendios forestales en Perú en el 2016.

5. DATOS Y MÉTODOS

5.1. Ubicación geográfica de los incendios forestales ocurridos en Perú el 2016

Se recopiló información del Sistema de Información Nacional para la Respuesta y la Rehabilitación – SINPAD del Instituto Nacional de Defensa Civil – INDECI, de las emergencias por incendios forestales reportadas a INDECI en el Perú durante el año 2016. Esa información fue plasmada sobre un mapa topográfico del Perú, con el objetivo de observar y analizar su distribución geográfica, así como se los clasificó por mes de ocurrencia, para analizar su distribución temporal.

5.2. Selección de incendios forestales

Una vez localizados todos los IF ocurridos en el 2016 en Perú, se seleccionaron aquellos que afectaron por lo menos 100 hectáreas (ha) de cobertura natural, según el consolidado 2016 del INDECI.

5.3. Análisis de las condiciones meteorológicas durante la ocurrencia de incendios forestales en Perú en el 2016

Para el análisis de las condiciones meteorológicas se analizaron variables meteorológicas en estaciones convencionales seleccionadas de la red de observación del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI.

Para la selección de las estaciones meteorológicas se consideró aquellas que se localizaron en un radio menor o igual a 10 km de cada episodio de incendio forestal seleccionado, y en el caso

de los episodios que no contaban con estaciones en un rango de 10 km, se seleccionaron las estaciones localizadas dentro de un radio de 20 km.

Se analizaron siete variables meteorológicas, de acuerdo a la disponibilidad en cada estación, y fueron: temperatura máxima y mínima, precipitación, evaporación (efectiva, medida en tanque; y potencial, medida en evaporímetro de Piché), horas de sol, relación de mezcla y humedad relativa a las 13:00 hora local, estas dos últimas fueron calculadas a partir de los datos de temperaturas de bulbo seco y húmedo registrados en estación.

El análisis de todas las variables en conjunto en cada estación meteorológica permitió determinar las condiciones atmosféricas que predominaron previamente y durante un incendio forestal, por ende, permitió conocer el patrón de comportamiento de dichas variables que permitirán alertar con días de anticipación las condiciones atmosféricas favorables a que una quema se convierta en un incendio forestal.

Asimismo se obtuvieron anomalías de precipitación tanto durante la decadiaria (diez días) anterior [D-1] como durante el mes anterior [M-1] al incendio forestal. Los valores de las normales, con las cuales se obtuvieron las anomalías de precipitación, se generaron a partir de datos diarios desde 1981 hasta 2010, de acuerdo a lo recomendado por la Organización Meteorológica Mundial – OMM (Baddour, 2011).

5.4. Análisis de la circulación atmosférica predominante durante la ocurrencia de incendios forestales en Perú en el 2016

Para el análisis de la circulación atmosférica favorable a la ocurrencia y propagación de IF en Perú en el 2016 se utilizaron datos de temperatura, viento (componente zonal y meridional), humedad relativa y movimiento vertical de las 00:00 UTC de reanálisis ERA-Interim con resolución horizontal de 1°, 37 niveles de presión (desde 1000 hasta 1hPa), y en el dominio de Sudamérica (Berrisford *et al.*, 2011).

El análisis de circulación atmosférica se basó en: la identificación de la corriente en Chorro y la caracterización del flujo de viento en 250 hPa (~12 km sobre el nivel del mar (snm)), la humedad relativa promedio entre 600 y 400 hPa (~4 y 6 km snm), la relación de mezcla y el viento en 500 hPa (~5 km snm), así como la humedad relativa y la velocidad vertical entre 700 y 100 hPa (~3 y 12 km snm). El análisis se realizó en un estudio de caso en el incendio reportado el

18 de noviembre en Cajamarca. Asimismo se generaron las anomalías de dichas variables, considerando el período de 1981 al 2010 para la obtención de las normales climáticas.

También se realizaron composiciones agrupando los días con IF y los días sin IF en cada mes, desde julio hasta noviembre del 2016 por la importancia de estos durante la temporada seca (no se consideró junio porque solo se tuvo un incendio en ese mes). El análisis de la circulación sinóptica se realizó en cada composición y en la diferencia de estas. Para estimar el nivel de significancia de la diferencia entre las composiciones se utilizó el test de T-Student con dos colas.

5.5. Aplicación del FWI en incendios forestales ocurridos en Perú en el 2016

Se reescribió la programación del índice meteorológico de incendios forestales (FWI) para que pueda ser calculado y graficado en *Grid Analysis Display System* (GrADS) para el territorio nacional. Debido a que el índice fue originalmente desarrollado para Canadá, cuya ubicación latitudinal difiere significativamente del Perú, los factores de ajuste mensual de longitud del día para el código de humedad de hojarasca (Le) fueron modificados para adaptarlos a las condiciones nacionales, tomando como referencia los estándares asociados a nuestra latitud como fueron establecidos por Alexander M.E. en 1993, los cuales se detallan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1.- Factores de ajuste mensuales de la longitud del día para el Código de humedad de Hojarasca (Le) en relación con las latitudes de referencia, excluyendo la región ecuatorial^a

Latitud de referencia	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct.	Nov	Dic
~46° N ^b	6.5	7.5	9	12.8	13.9	13.9	12.4	10.9	9.4	8	7	6
20° N	7.9	8.4	8.9	9.5	9.9	10.2	10.1	9.7	9.1	8.6	8.1	7.8
20° S	10.1	9.6	9.1	8.5	8.1	7.8	7.9	8.3	8.9	9.4	9.9	10.2
40° S	11.5	10.5	9.2	7.9	6.8	6.2	6.5	7.4	8.7	10	11.2	11.8
Le ^a = 9.0 para todos los meses en las zonas comprendidas entre la latitud de 10° N y 10° S. Estándar canadiense ^b (Van Wagner and Pickett 1985; Van Wagner 1987)												

Por otro lado, como el país se encuentra en el hemisferio opuesto fue necesario intercambiar los factores de ajuste mensual de longitud del día para el código de sequía (Lf) debido a la diferencia en el trimestre que corresponde a cada estación, este cambio se realizó tal como lo describe también Alexander M.E. (1993) y se encuentra indicado en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2.- Factores de ajuste mensuales de la longitud del día para el Código de Sequía (Lf) para los hemisferios norte y sur, excluyendo la región ecuatorial ^a

Hemisferio Referencial	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct.	Nov	Dic
Norte ^b	-1.6	-1.6	-1.6	0.9	3.8	5.8	6.4	5	2.4	0.4	-1.6	-1.6
Sur	6.4	5	2.4	0.4	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	0.9	3.8	5.8

Lf^a = 1.4 para todos los meses en las zonas comprendidas entre la latitud de 10° N y 10° S.
Estándar canadiense^b (Van Wagner and Pickett 1985; Van Wagner 1987)

Se debe mencionar que debido a la ubicación geográfica del Perú se tuvo que utilizar dos sistemas de constantes, uno para aplicar el FWI en el sector norte y otro para el sur, tomando como línea divisoria la latitud de 10°S para aplicar los valores apropiados.

Para emular lo que sería la labor de monitoreo se calculó el FWI para todo el país utilizando datos grillados del modelo GFS de temperatura, viento (componente zonal y meridional) y humedad relativa en superficie de las 00:00 UTC con resolución espacial de 0.25° y temporal de 6 horas para diferentes períodos donde se presentaron IF continuos, para evaluar la efectividad de estos índices en señalar áreas propensas a IF. Cabe señalar que debido a que se utilizan datos de precipitación acumulada del día anterior en las fórmulas del FWI, no es posible obtener mapas para el primer día de pronóstico mediante esta metodología.

Finalmente, para poder evaluar los resultados fue necesario establecer rangos de valores para el FWI que permitiera distinguir el nivel de peligro que se podía esperar de un incendio forestal para un área determinada, para esto se tomó en cuenta los valores obtenidos para las fechas analizadas y las escalas utilizadas en otros centros meteorológicos como: Argentina, Canadá y Malasia.

Tomando en cuenta lo antes mencionado se establecieron los siguientes niveles para el FWI: **Bajo (0-6); Moderado (6-12); Alto (12-18); Muy Alto (18-24); Extremo (>24)**, tomando como modelo el argentino (Dentoni, 2007) pero modificando los rangos ya que los valores que alcanza el FWI en nuestro territorio son menores.

Con estas consideraciones en mente, se evaluaron los valores del FWI para las zonas y días de los incendios reportados en el 2016. Este análisis se realizó tanto de manera espacial (mapas) como de forma estadística (puntos). El análisis espacial se realizó desde un día antes hasta un día después de cada evento de IF, pero solo se muestra un evento en este estudio, y para el análisis estadístico se analizaron los valores del FWI de todos los incendios en conjunto desde junio hasta noviembre del 2016.

Para este último, se realizó un análisis de correlación entre el nivel de FWI obtenido en cada punto donde fue reportado el IF y la cantidad de hectáreas de cobertura vegetal afectada por dicho IF, para luego analizar su distribución y comportamiento, además de establecer la variación de la intensidad del FWI en relación a la extensión de los incendios. Para este análisis, se consideraron tres grupos de IF, aquellos incendios que afectaron áreas menores a 100 ha, aquellos con un área entre 100 y 1000 ha, y finalmente, aquellos que excedieron las 1000 ha.

6. RESULTADOS

6.1. Ubicación geográfica de incendios forestales en Perú el 2016

La Figura 6.1 representa la distribución geográfica de las 391 localidades afectadas por los 281 incendios, categorizados como forestales en el SINPAD, ocurridos en Perú durante el 2016.

Se observa que la mayoría de IF se presentó en la región oriental de la Cordillera de los Andes, con mayor frecuencia en las regiones norte y sur del Perú, afectando principalmente a los departamentos de Puno (66 localidades), Apurímac (65), Cusco (59), Cajamarca (48), Amazonas (31) y Ayacucho (20).

6.2. Selección de los episodios de incendios forestales

De los 281 episodios de IF ocurridos en el Perú el 2016, se escogieron 76 episodios, los cuales incendiaron por lo menos 100 hectáreas de cobertura vegetal. Estos episodios afectaron 138 localidades en el Perú y están representadas en la Figura 6.2, acompañadas de las 37 estaciones meteorológicas convencionales de SENAMHI, cuyos datos se utilizaron para el análisis de las condiciones atmosféricas favorables previas y durante la ocurrencia de un IF.

Se observa que la mayoría de localidades afectadas por IF cuenta con una estación meteorológica cercana, sin embargo, existen regiones que no serán analizadas porque no se cuenta con estaciones alrededor, como el este de Junín, Huancavelica, el norte de Ayacucho, ni el sur de Cusco.

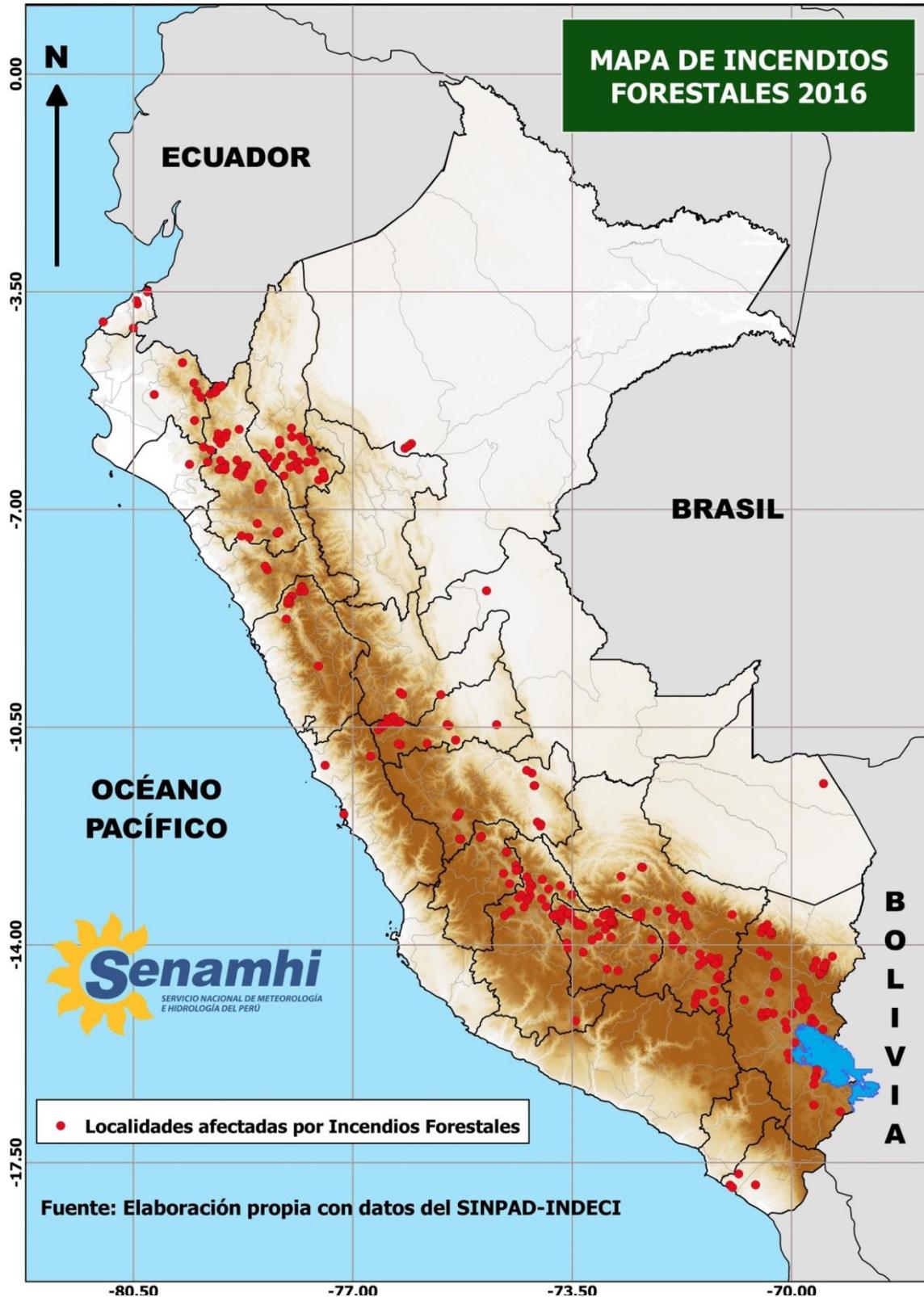


Figura 6.1.- Mapa de distribución espacial de las localidades afectadas por incendios ocurridos en el 2016 en Perú (puntos rojos), Fuente: SINPAD - INDECI.

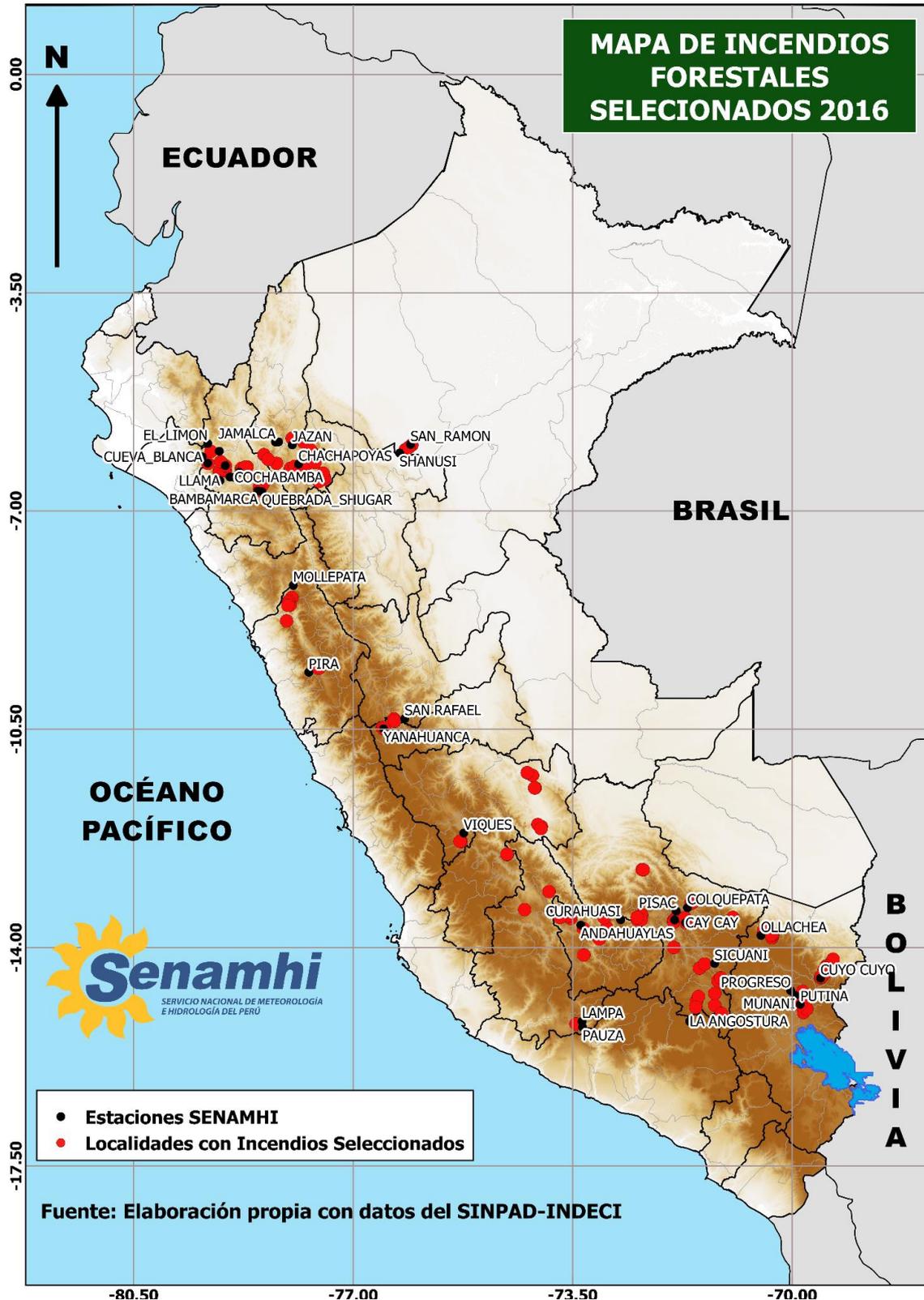


Figura 6.2.- Mapa de distribución espacial de las localidades afectadas por incendios forestales seleccionados en el 2016 en Perú (puntos rojos) y las estaciones meteorológicas convencionales seleccionadas de SENAMHI (puntos negros).

Fuente: SINPAD – INDECI

6.3. Análisis de las condiciones meteorológicas favorables a la ocurrencia de incendios forestales en Perú en el 2016

Las Figura 6.3, 6.5 y 6.7 representan la distribución de las localidades del norte, centro y sur del Perú, respectivamente, afectadas por los IF seleccionados. Fueron clasificados por mes de ocurrencia, con el objetivo de analizar su variación espacial. También se observa la distribución de las estaciones meteorológicas convencionales de la red de monitoreo de SENAMHI que fueron escogidas para el análisis de las condiciones meteorológicas reportadas en estación.

En el norte (Figura 6.3), la mayoría de los IF ocurrieron en noviembre y se concentraron en la región andina, así como algunos en setiembre en la región amazónica. Se registraron 44 localidades afectadas que se encuentran distribuidas entre los departamentos de Lambayeque, Cajamarca, Amazonas y Loreto.

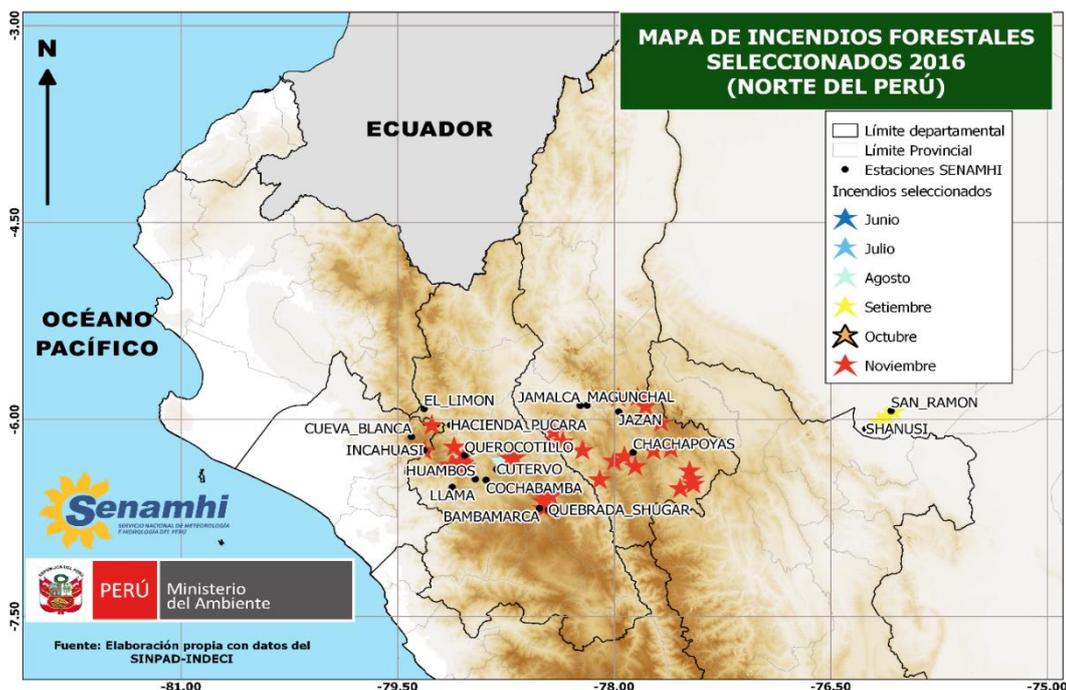


Figura 6.3.- Mapa de distribución espacial de las localidades afectadas por incendios forestales seleccionados en el norte del Perú (estrellas) y las estaciones meteorológicas convencionales seleccionadas de SENAMHI (puntos negros).

Los siguientes gráficos (Figura 6.4) representan la variación diaria, durante tres meses, de 7 variables meteorológicas (en la mayoría de los casos) en cada una de las 17 estaciones convencionales del norte del Perú que fueron escogidas para el análisis. Los gráficos más representativos están colocados en esta sección y los complementarios, en el Anexo 1. Las variables meteorológicas están representadas de la siguiente manera: **precipitación**, evaporación

efectiva – **EvaporaciónT** o evaporación potencial – **Evaporación**, **Horas de Sol**, **Humedad Relativa** – **HR 13h** y relación de mezcla a las 13 horas - **RMix13h**, temperatura máxima – **Tmáx** y temperatura mínima - **Tmín**. El día o período de ocurrencia de incendio forestal está marcado por un cuadro naranja.

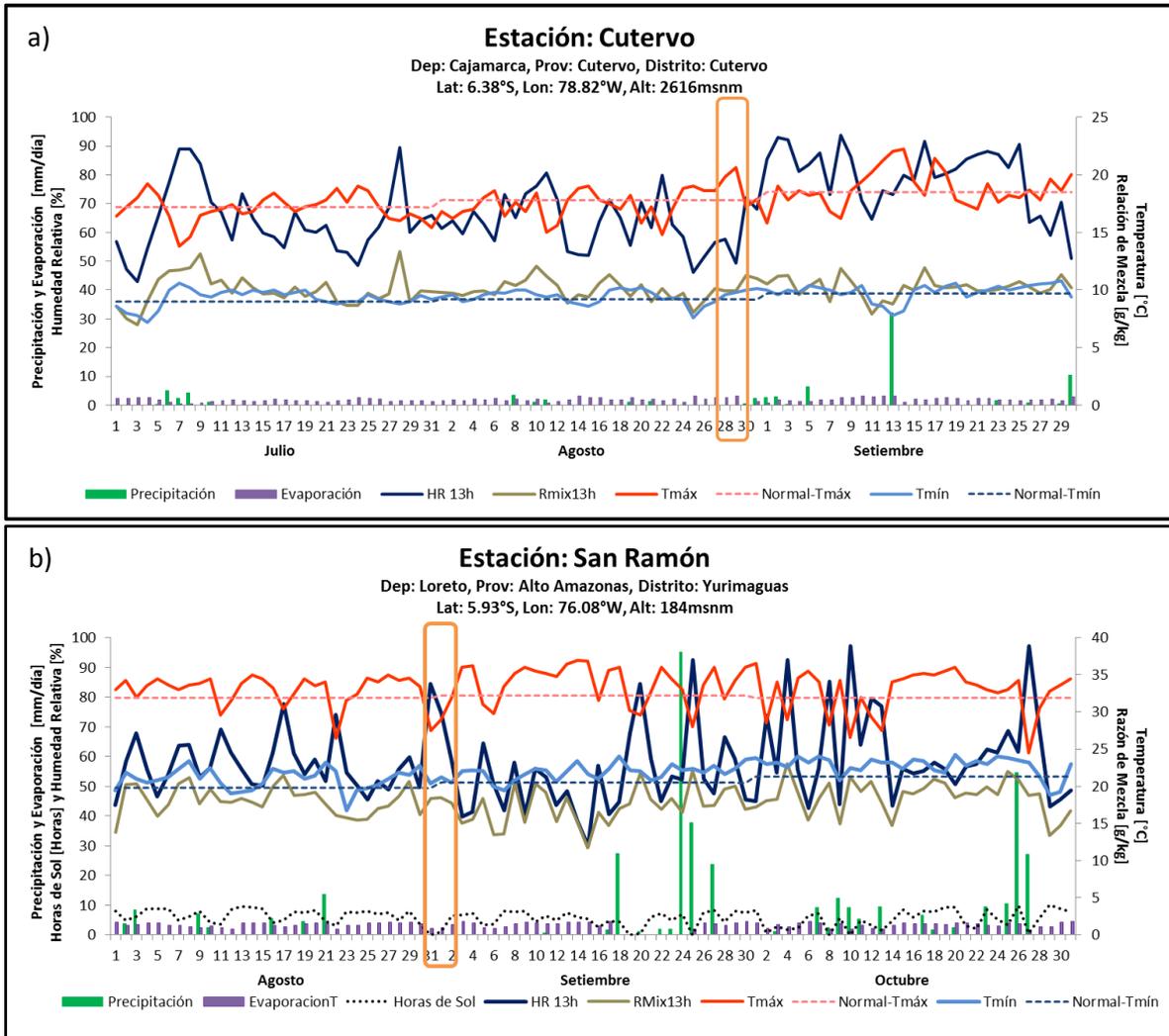


Figura 6.4.- Gráficos de variación temporal diaria de Precipitación, Evaporación, Horas de Sol, Humedad Relativa y Relación de Mezcla a las 13 horas, Temperatura máxima (Tmáx) y Temperatura Mínima (Tmín) durante 3 meses en las estaciones meteorológicas de (a) Cutervo y (b) San Ramón. El período de ocurrencia del incendio forestal está resaltado por un cuadro naranja.

Las condiciones atmosféricas resaltantes durante el IF reportado el 29 de agosto del 2016 en Cutervo (Figura 6.4a) fueron temperatura máxima alrededor de 20°C (superior a su normal), disminución de humedad relativa a las 13h como resultado del aumento de temperatura, y 21 días continuos sin lluvia antes de la ocurrencia del IF, considerando como el mínimo de precipitación el valor de 2.5mm/día para ser considerado día lluvioso en los trópicos, valor utilizado por el Departamento de Meteorología de la India (Ratan y Venugopal, 2013).

En San Ramón (Figura 6.4b), así como en Shanusi (ver Anexo 1), ambas estaciones ubicadas en Alto Amazonas - Loreto, los IF se registraron el 1 de Setiembre, y la condición significativa en ambos casos fue la ausencia de precipitaciones por más de 10 días previos a la ocurrencia del IF. Es así que el acumulado en la decadiaria (diez días) previa a la ocurrencia del IF fue inferior a su normal en por lo menos 99% y un mes antes del registro de IF, fue inferior en por lo menos 50% (ver Tabla 6.1).

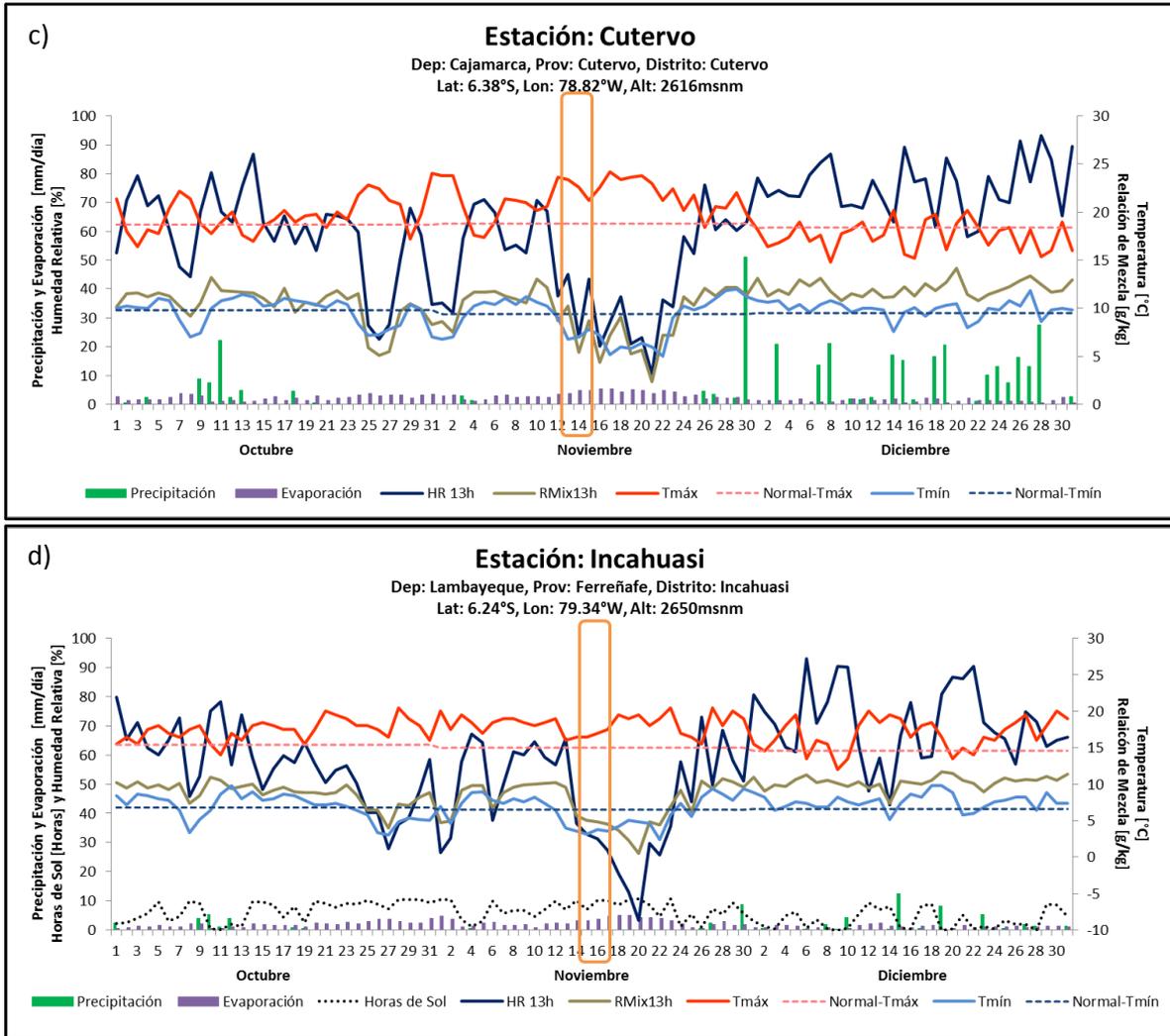


Figura 6.4.- (Continuación) Estaciones meteorológicas de (c) Cutervo y (d) Incahuasi.

Durante el IF del 14 de noviembre en Cutervo (Figura 6.4c), la temperatura máxima se presentó superior a su normal, la mínima, inferior a su normal, y se observa incremento de la evaporación en comparación a los otros meses. Estas condiciones termales dan un indicio de sequedad en la atmósfera, lo cual se manifiesta con el comportamiento de la relación de mezcla que tiene una disminución significativa durante la ocurrencia del IF y se mantiene así en los siguientes 10 días. Estas condiciones de incremento de temperatura máxima y de disminución de

humedad atmosférica generan la disminución de la saturación atmosférica, representada por la humedad relativa con valores inferiores a 40% durante el día de reporte del incendio, manteniéndose así durante los 10 días posteriores. Asimismo, se presentaron 11 días continuos sin lluvia previos a la ocurrencia del IF.

En Incahuasi, durante el IF del 16 de noviembre (Figura 6.4d), las condiciones atmosféricas fueron similares a las de Cutervo: incremento de temperatura máxima (sobre su normal), disminución de la mínima (inferior a su normal), incremento de la evaporación, disminución de la relación de mezcla y de la humedad relativa, y alrededor de 10 horas de sol.

Las condiciones en Bambamarca, Llama y Chachapoyas (Figura 6.4e, f y g), durante los IF registrados en noviembre, fueron similares a las registradas en las estaciones de Cutervo e Incahuasi (Figura 6.4c, y d), así como en Jazán, Cochabamba y Huambos (ver Anexo 1). La relación de mezcla a las 13h en estas estaciones meteorológicas tuvo un descenso significativo previo y durante los días de ocurrencia del incendio, presentándose con valores de 5g/kg aproximadamente, pero en días de no ocurrencia de incendio, los valores oscilaban entre 10 y 15 g/kg. Al incrementar la temperatura y disminuir la relación de mezcla, la humedad relativa a las 13h también disminuyó, llegando a 10% durante los días de IF.

En las estaciones de Quebrada Shugar, Magunchal y Querocotillo (Figura 6.4h, i y j), así como en Hacienda Pucara y Cueva Blanca (Anexo 1), se presentaron, por lo menos, 10 días continuos sin lluvia previos a los IF registrados a mediados de noviembre del 2016. Se presentaron lluvias ligeras durante los primeros días de noviembre que fueron menores a 5mm en Magunchal y Querocotillo y apenas superior a 5mm, pero inferior a 10mm en la estación de Quebrada Shugar. Los acumulados de precipitación en estas estaciones durante el mes anterior al reporte de IF, fue inferior a su normal, en por lo menos 76%, y en por lo menos 89% una decadiaria anterior (Ver Tabla 6.1).

Un caso particular presentan las estaciones de El Limón y Jamalca (Anexo 1) que con registros de IF el 16 de noviembre, la única característica en común que presentan con las otras estaciones es la ausencia de precipitaciones por más de 10 días continuos, sin embargo la característica de sequedad atmosférica o incremento de temperatura no es muy representativa.

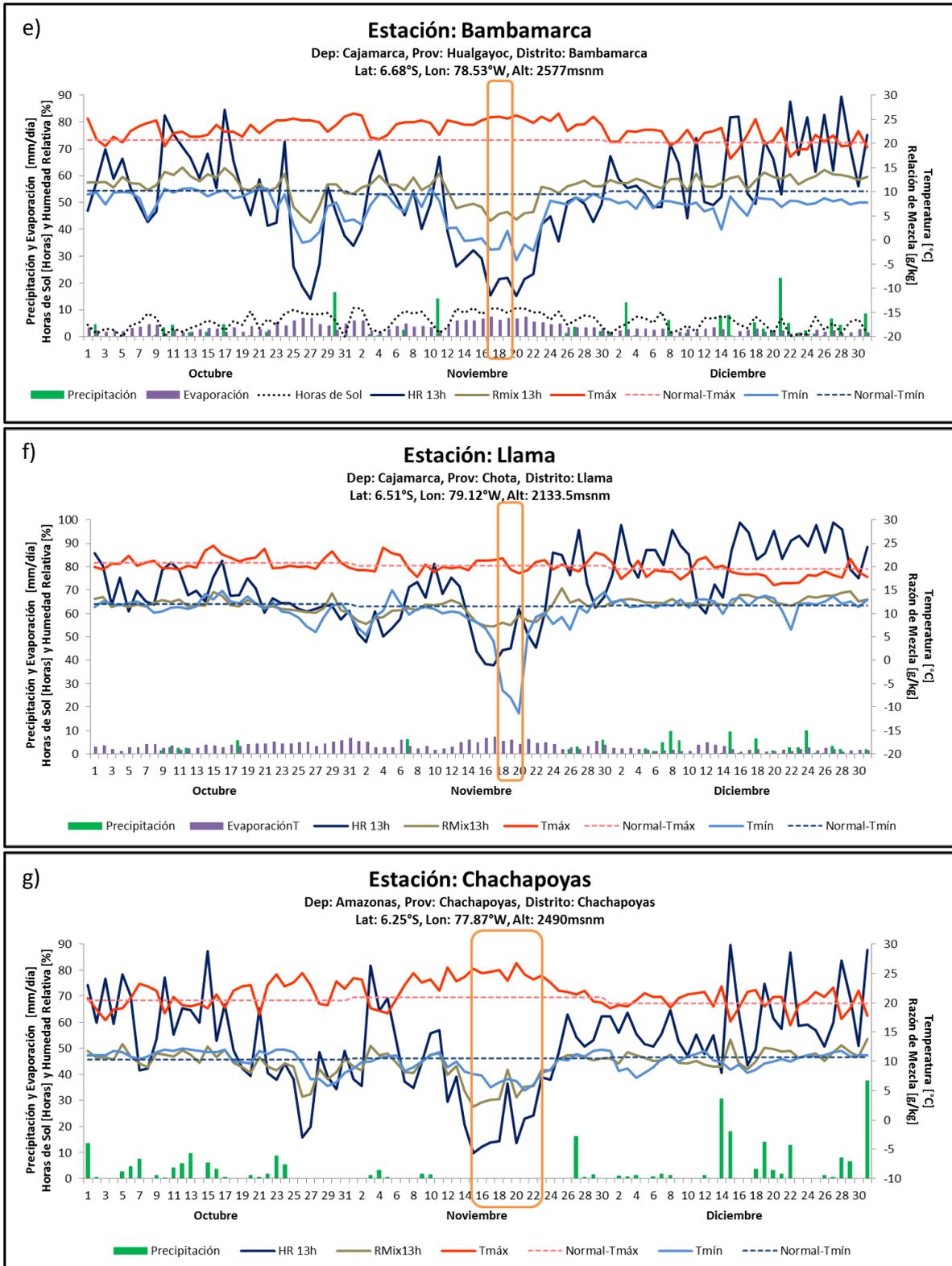


Figura 6.4.- (Continuación) Estaciones meteorológicas de: (e) Bambamarca, (f) Llama y (g) Chachapoyas.

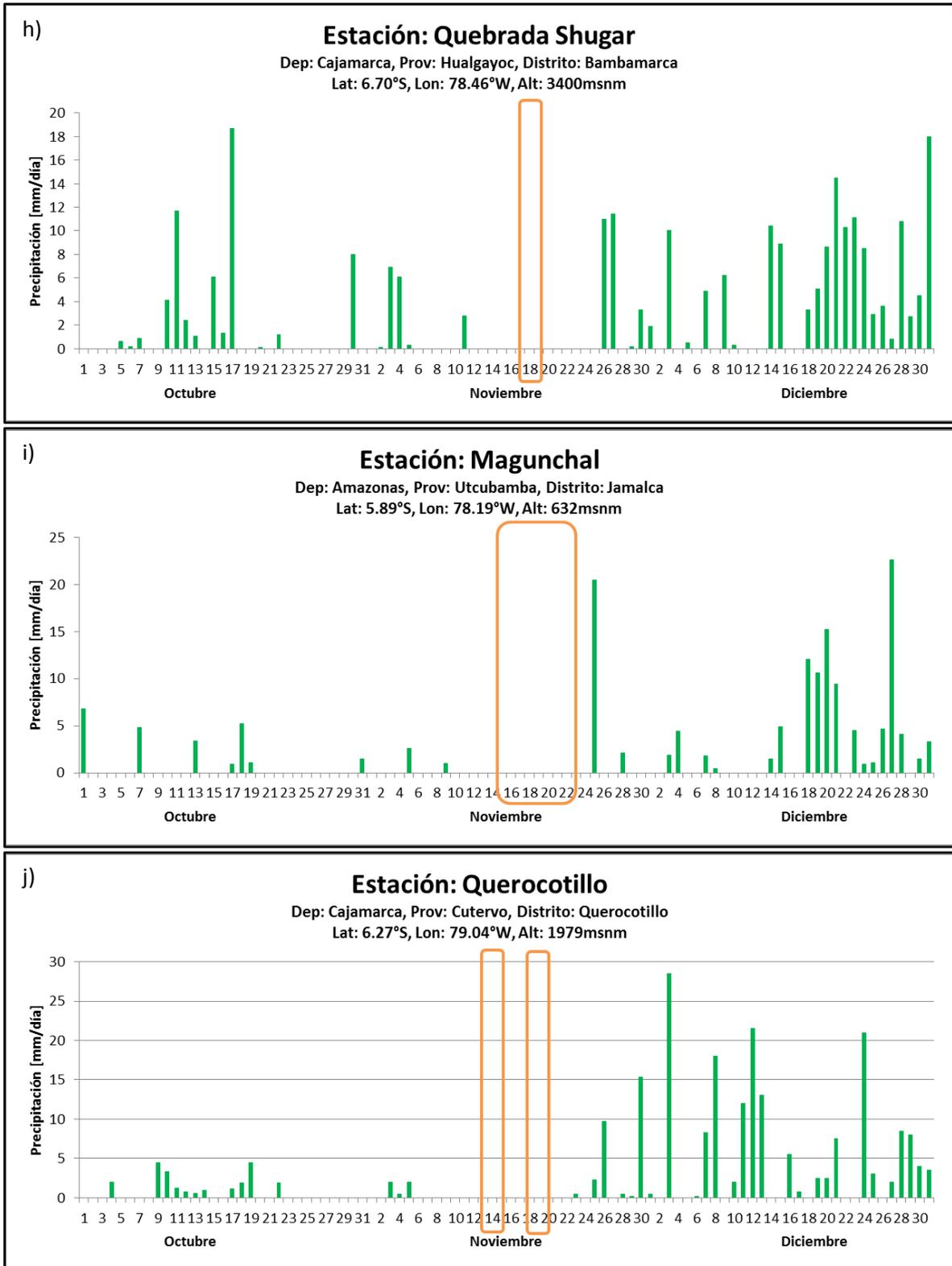


Figura 6.4.- (Continuación) Estaciones pluviométricas de: (h) Quebrada Shugar, (i) Magunchal y (j) Querocotillo.

En el centro del país 26 localidades fueron afectadas por los IF, las cuales se encuentran localizadas en 3 departamentos: Áncash, Pasco y Junín y las condiciones meteorológicas favorables a un IF son analizadas con lo reportado en 5 estaciones meteorológicas. La Figura 6.5 permite observar que la distribución, tanto temporal como espacial, de los IF en esta región no presentó una tendencia marcada, pues se registraron incendios desde junio hasta noviembre en sierra y en setiembre en selva. Además la densidad de incendios que afectaron por lo menos 100 ha de cobertura vegetal es menor a aquellas registradas en las otras regiones.

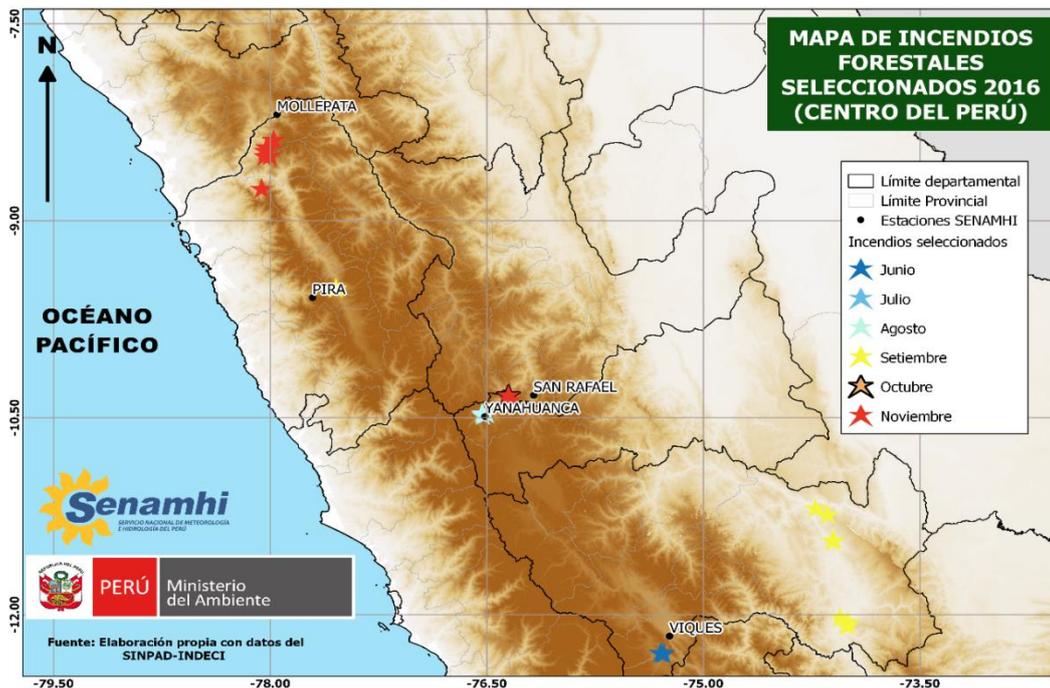


Figura 6.5.- Mapa de distribución espacial de las localidades afectadas por incendios forestales seleccionados en el centro del Perú (estrellas) y las estaciones meteorológicas convencionales seleccionadas de SENAMHI (puntos negros).

El incendio reportado el 29 de junio afectó dos localidades en la provincia de Huancayo (Junín) y las condiciones atmosféricas fueron analizadas con los datos reportados en la estación de Viques (Figura 6.6a). Se observa que durante la ocurrencia del incendio la temperatura máxima se presentó normal y la mínima, inferior a su normal. La evaporación y la relación de mezcla se presentaron similares a días anteriores y posteriores. Sin embargo, en esta estación es resaltante la cantidad de días sin lluvia previos a la ocurrencia del incendio, pues se presentan 37 días sin lluvia y solo el 22 de mayo se presentó precipitación superior a 15mm. El acumulado mensual de precipitación en junio es 0mm, así como una decadiaria antes y un mes antes al reporte del IF, los cuales presentan una anomalía inferior a su normal en 100% (ver Tabla 6.1).

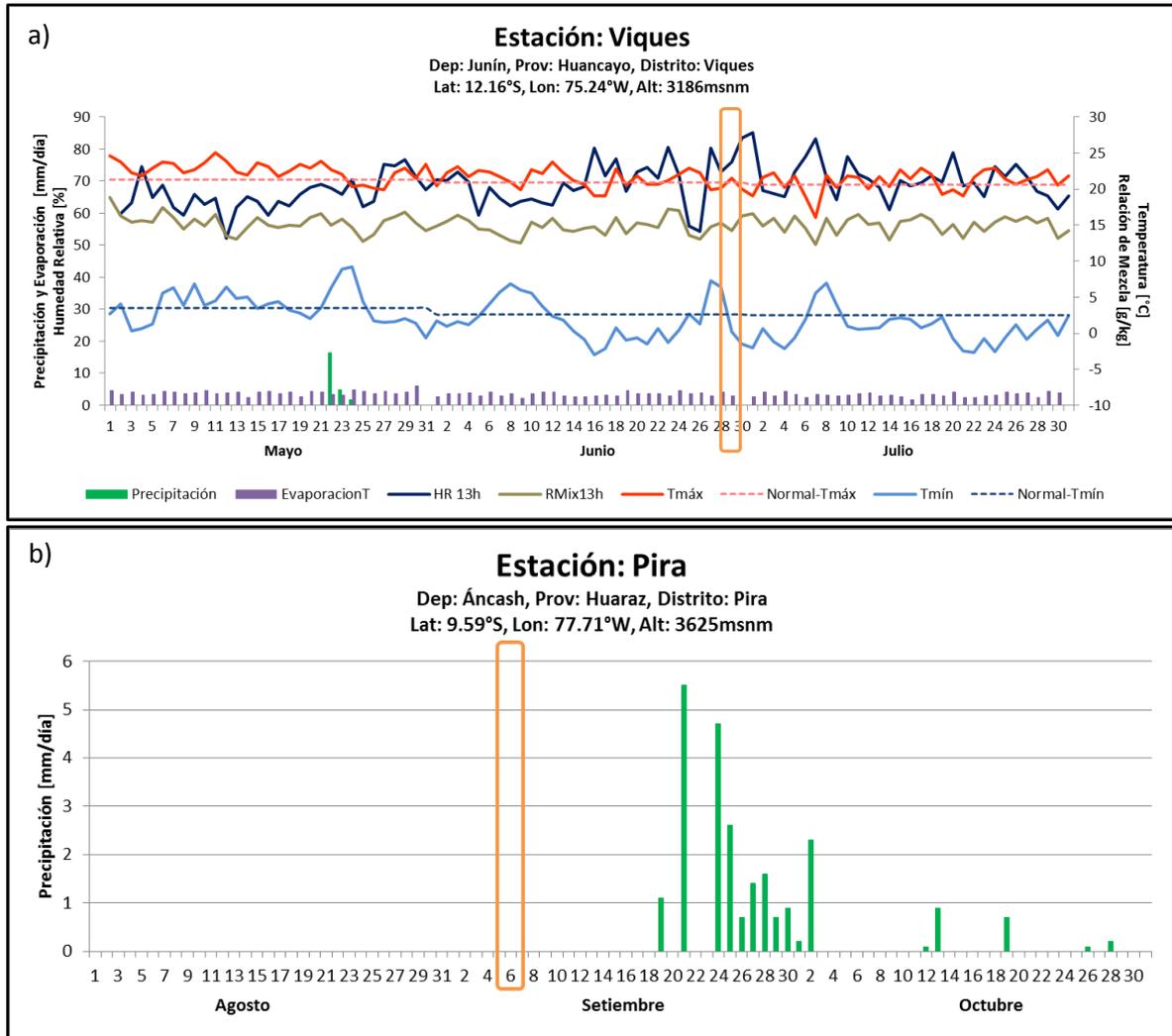


Figura 6.6.- Gráficos de variación temporal diaria de Precipitación, Evaporación, Humedad Relativa y Relación de Mezcla a las 13 horas, Temperatura máxima (Tmáx) y Temperatura Mínima (Tmín) durante 3 meses en la estación meteorológica de (a) Viques y (b) Pira. El período de ocurrencia del incendio forestal está resaltado por un cuadro naranja.

En Pira - Áncash, el IF se reportó el 6 setiembre, y las condiciones pluviométricas resaltan la ausencia de precipitaciones, por lo menos, durante 35 días antes de la ocurrencia del IF (Figura 6.6b), representando así un déficit de precipitación en 100% respecto a su normal mensual y decadiaria previos al 6 de setiembre (día de reporte del IF) (ver Tabla 6.1).

El 5 de agosto se reportaron IF en Yanahuanca y se observa que la condición atmosférica más resaltante fue la ausencia de precipitaciones por 25 días antes del reporte de IF (ver Figura 6.6c).

Las condiciones atmosféricas del incendio reportado el 8 de octubre del 2016 en la provincia de Daniel Alcides Carrión (Pasco) fueron analizadas con los registros de las estaciones San Rafael – Huánuco (Figura 6.6 d) y Yanahuanca – Pasco (Figura 6.6c) que se encuentran a 19 y 26km,

respectivamente, de la localidad afectada. La temperatura máxima se presentó sobre su normal, generando descenso de humedad relativa, y la temperatura mínima, inferior a su normal, en ambas estaciones, condiciones que coinciden con lo ocurrido en el norte del país. Además, tampoco se presentaron ausencias de precipitaciones días antes al IF, sin embargo la precipitación acumulada durante la decadiaria anterior al reporte del IF en Yanahuanca fue inferior a su normal en 23% y durante el mes anterior al IF fue inferior a su normal en 27% en San Rafael (ver Tabla 6.1).

Lo registrado en la estación San Rafael también permite analizar el incendio reportado el 17 de noviembre (Figura 6.6d), sin embargo no se observan condiciones atmosféricas favorables a sequedad atmosférica o semejantes a lo acontecido en otras estaciones meteorológicas. Pero al analizar los acumulados de precipitación decadiaria y mensual antes del reporte de IF, se observa que fue menor a su normal en 28 y 45% respectivamente (Tabla 6.1).

El IF ocurrido el 15 de noviembre del 2016 afectó a cinco localidades en la provincia de Pallasca (Áncash) y las condiciones meteorológicas son estudiadas con lo registrado en la estación Mollepata (La Libertad) (Figura 6.6e) que se encuentra a 23 km de distancia de la localidad más cercana afectada. Se observa que las condiciones favorables a la ocurrencia y propagación de los incendios se manifestaron semejantes a las estaciones del norte: incremento de temperatura máxima, disminución de temperatura mínima, ausencia de precipitación, incremento de evaporación y disminución de la relación de mezcla y humedad relativa. Desde el 5 de octubre no se reportaron precipitaciones importantes para considerar como día lluvioso, es así que se contabilizaron 41 días continuos sin precipitación, reportando acumulados decadiarios y mensuales anterior al IF inferiores a su normal en 82 y 92%, respectivamente (ver Tabla 6.1).

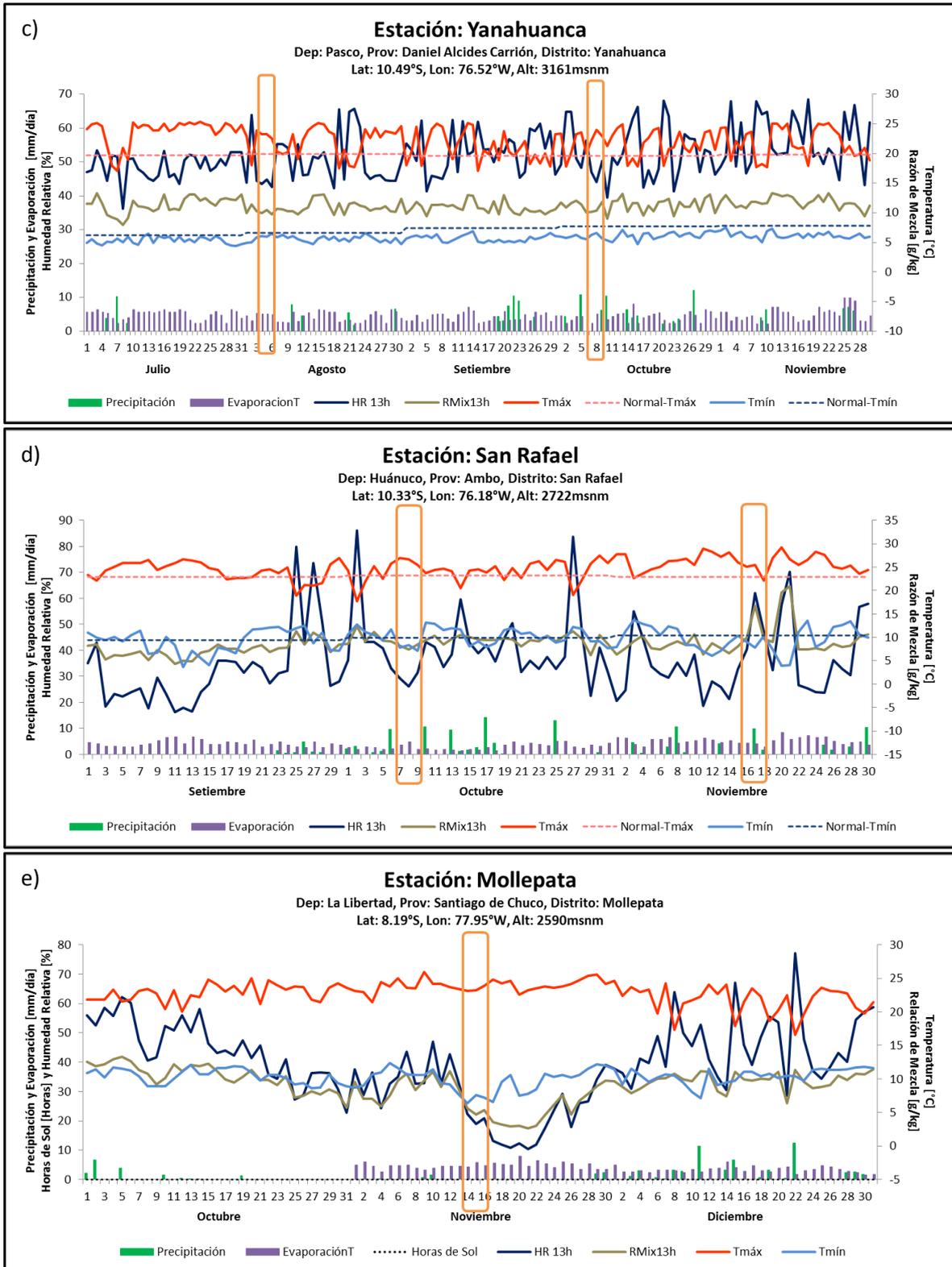


Figura 6.6.- (Continuación) Estaciones meteorológicas de (c) Yanahuanca, (d) San Rafael y (e) Mollepata⁶.

⁶ Estación que no cuenta con el registro de datos necesario para obtener la climatología de temperaturas ni con registros de evaporación en octubre del 2016

En la región sur del Perú, los incendios se presentaron desde julio hasta noviembre, a excepción de octubre, y afectaron 68 localidades en los departamentos de Apurímac, Cusco, Puno, Ayacucho y Huancavelica (Figura 6.7). Las condiciones meteorológicas son analizadas con las variables registradas en 15 estaciones.

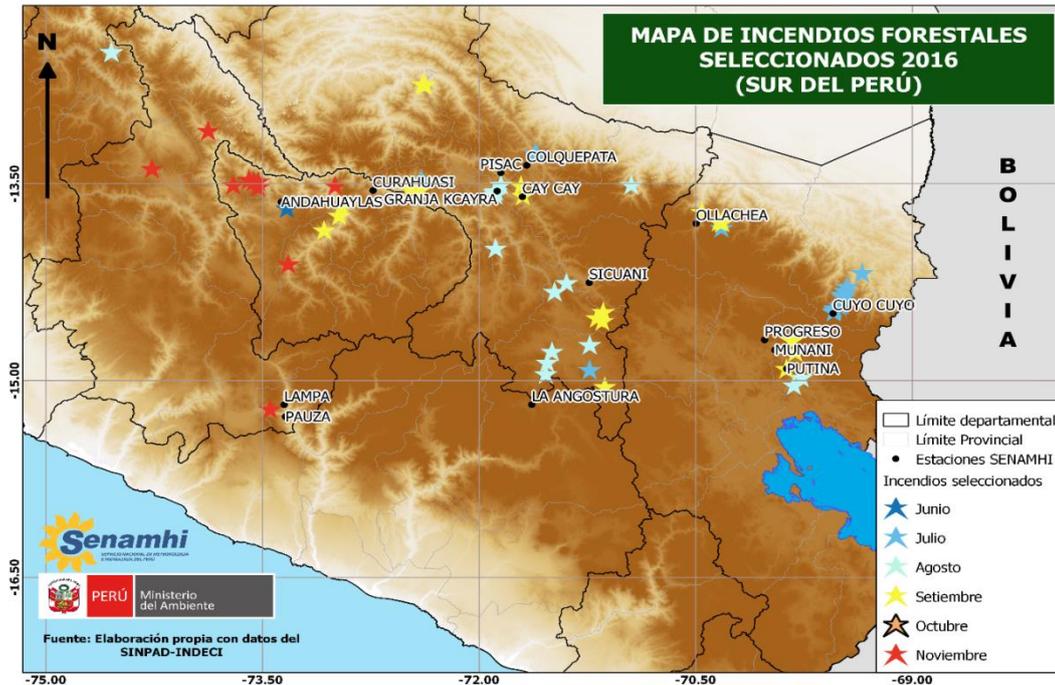


Figura 6.7.- Mapa de distribución espacial de las localidades afectadas por incendios forestales seleccionados en el sur del Perú (estrellas) y las estaciones meteorológicas convencionales seleccionadas de SENAMHI (puntos negros).

Las condiciones meteorológicas durante los IF ocurridos en el sur del Perú están representadas para julio, con los datos registrados en las estaciones de Cuyo Cuyo (Figura 6.8a), Ollachea y Colquepata (ver Anexo 2); para agosto, con lo registrado en Granja Kayra (Figura 6.8b), Pisac, Cay Cay, Putina, La Angostura y Sicuani (ver Anexo 2); para setiembre, con lo registrado en Curahuasi (Figura 6.8c), Putina, Muñani, Progreso, Sicuani, Andahuaylas y Ollachea (ver Anexo 2); y para noviembre, con lo registrado en Pauza (Figura 6.8d) y Lampa (figura no mostrada). Se manifiesta un comportamiento similar a lo ocurrido en el centro del Perú, donde lo más representativo es la cantidad de días sin lluvia antes del IF, alrededor de 10. Esto generó que el acumulado de precipitación de la decadiaria anterior al registro de IF sea inferior a su normal en por lo menos 55% (ver Tabla 6.1) en estas estaciones.

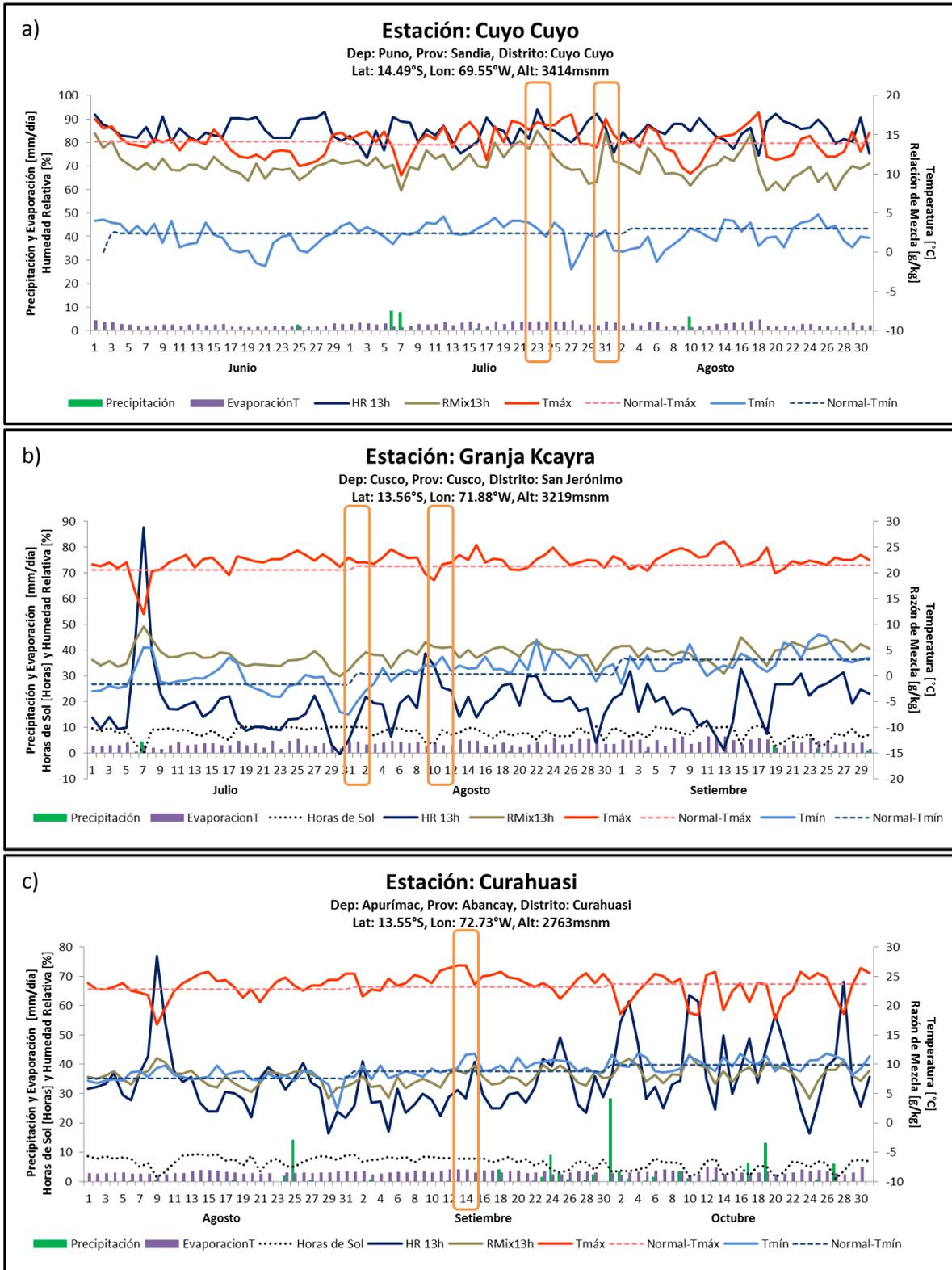


Figura 6.8.- Gráficos de variación temporal diaria de Precipitación, Evaporación, Horas de Sol, Humedad Relativa y Relación de Mezcla a las 13 horas, Temperatura máxima (Tmáx) y Temperatura Mínima (Tmín) durante 3 meses en las estaciones meteorológicas de (a) Cuyo Cuyo (b) Granja Kayra y (c) Curahuasi. El período de ocurrencia del incendio forestal está resaltado por un cuadro naranja.

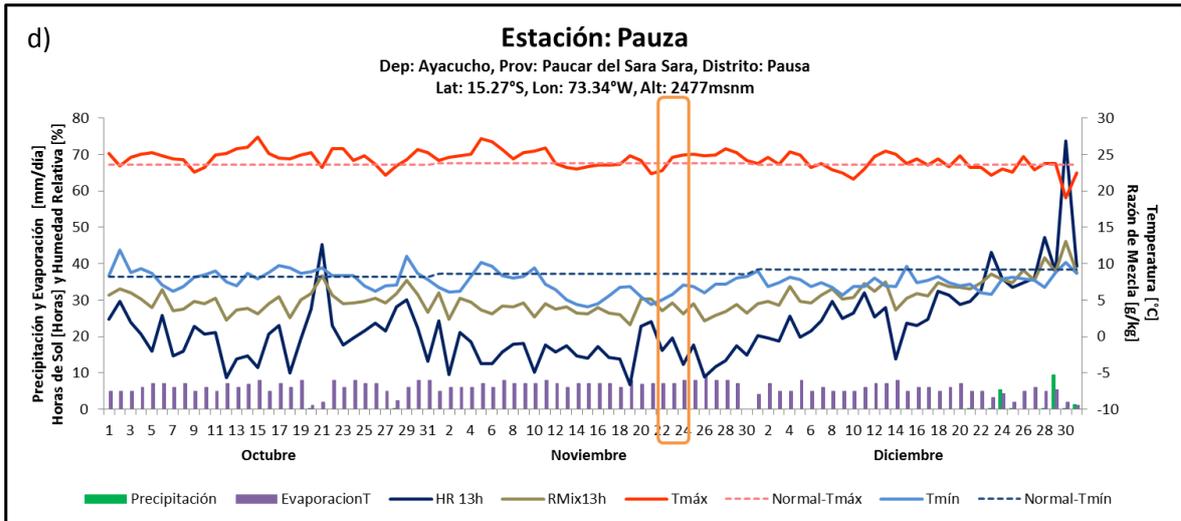


Figura 6.8.- (Continuación) Estación meteorológica de (d) Pauza.

Como se observa en el análisis temporal de las condiciones meteorológicas circundantes a las localidades donde se presentaron los IF en todo el Perú (Figura 6.4; 6.6 y 6.8), en la sierra norte, así como en parte del centro, pero no en el sur, se resalta la disminución de humedad relativa días previos, durante, y días posteriores la ocurrencia de los IF, generado por la presencia de una masa seca y/o por el incremento de temperatura máxima. El comportamiento de las temperaturas (máximas por encima de lo normal y mínimas por debajo) y la cantidad de horas de sol (alrededor de 10 horas de sol por día), indicaron también el bajo contenido de humedad atmosférica. Además, si la atmósfera está seca, absorbe más humedad de la superficie, por ello la evaporación incrementó durante estos días.

Por otro lado, lo común en todas las regiones y en la mayoría de las estaciones meteorológicas analizadas fue la ocurrencia de, por lo menos, 10 días sin lluvia previos al evento, generando anomalías decadiarias y/o mensuales previos al IF de hasta 100% por debajo de su normal. Esto se encuentra resumido en la Tabla 6.1, donde se observa que en el norte del país todas las estaciones presentaron anomalías negativas previas al evento, tanto decadiaria [D-1] como mensualmente [M-1]. En el centro y sur del país las anomalías negativas se presentaron en la decadiaria previa en todas las estaciones analizadas (a excepción de San Rafael para el IF de 8 de octubre), y sólo en algunas estaciones esto se mantuvo durante el mes previo.

Tabla 6.1.- Acumulados, normales y anomalías mensuales y semanales de precipitación previa al IF en estaciones seleccionadas.

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
	Sicuaní*	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
	Sicuaní*	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.

En todo lo anterior se observó que, en el 2016, los meses en los cuales se presentaron IF que afectaron más de 100 ha de cobertura vegetal fueron junio, julio, agosto, setiembre, octubre y noviembre. Además la variable meteorológica más representativa y que brindó las condiciones favorables a la ocurrencia de IF en todas las regiones analizadas fue la precipitación por debajo de lo normal. En la Figura 6.9 se presentan los mapas de anomalías mensuales de precipitación desde junio hasta noviembre del 2016 para todo el Perú. Se observa que noviembre (Figura 6.9f) fue el mes en el que casi no existieron anomalías positivas de precipitación en ninguna estación del país y en los otros meses predominaron las anomalías negativas.

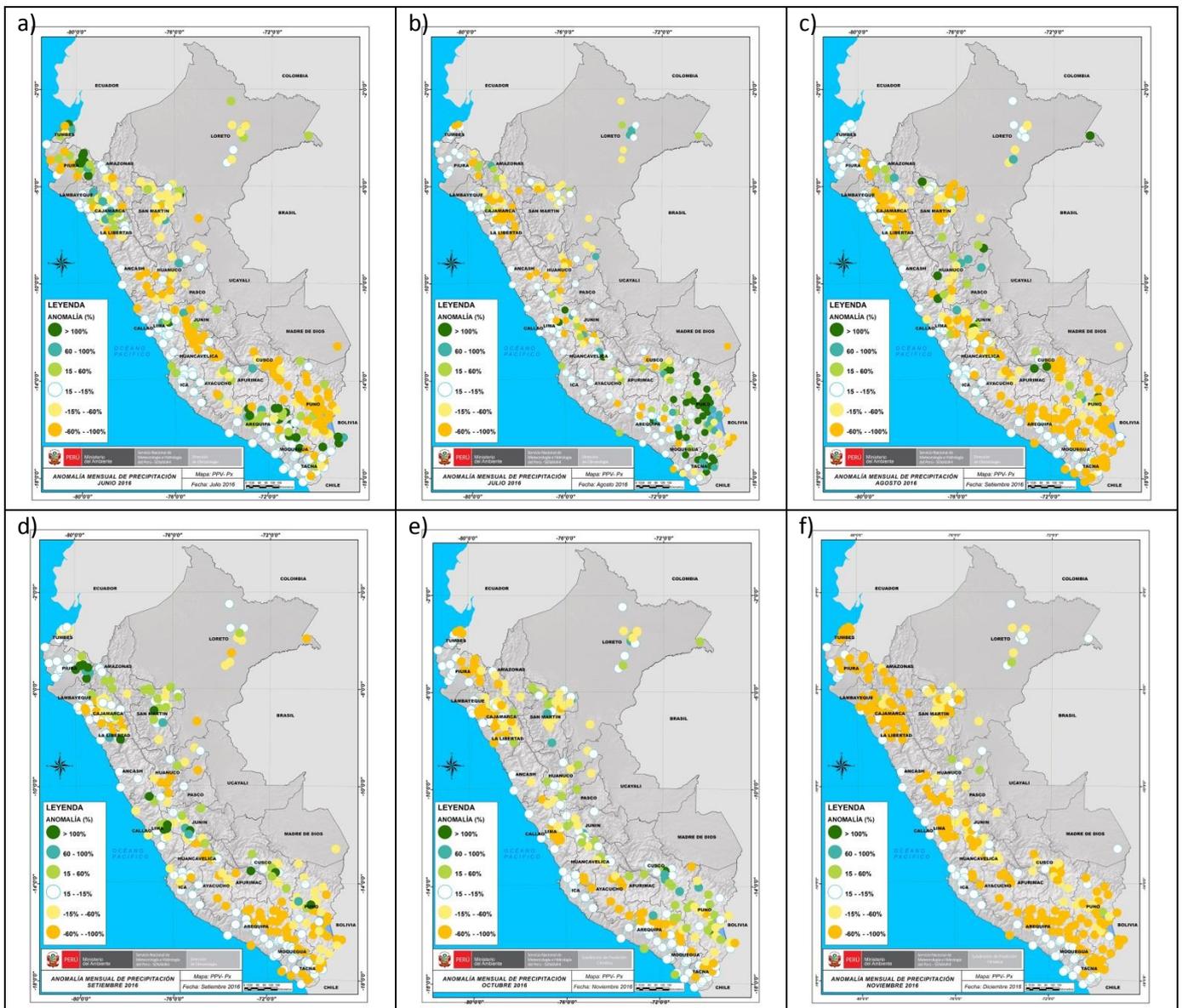


Figura 6.9.- Anomalías mensuales de precipitación desde (a) junio hasta (f) noviembre del 2016.

Fuente: <http://www.senamhi.gob.pe/?p=condiciones-climaticas>

6.4. Análisis de la circulación atmosférica durante la ocurrencia de incendios forestales en Perú en el 2016

Estudio de caso: 18 noviembre del 2016

Como el 18 de noviembre del 2016 representa el día medio del período de incendios reportados en noviembre en el norte del país (desde el 14 al 22 de noviembre), se realizó el análisis de la circulación atmosférica para esta fecha.

Los vientos anómalos del este en 250 hPa sobre el norte del país que generaron una circulación anticiclónica sobre continente con núcleo en 50°W y 15°S (Figura 6.10a y b) son la principal característica en este nivel. Esta circulación es intensificada con una vaguada sobre el Pacífico.

Entre 400 y 600 hPa, la anomalía de humedad relativa promedio permite determinar que la ocurrencia del IF del 18 de noviembre estuvo condicionada a valores de humedad relativa de 40 % por debajo de lo normal en las capas medias de la tropósfera y los vientos se dirigían del noroeste hacia el norte de Perú, transportando la masa más seca hacia esa región (ver Figura 6.10c y d). El comportamiento es similar al analizar relación de mezcla en 500 hPa (Figura 6.10e y f), se observa la sequedad del norte del país generada por los vientos anómalos del noroeste, que incluso afectan hasta la Amazonía brasileña con valores inferiores a $3\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

El corte vertical de humedad relativa y velocidad vertical desde el 9 hasta el 27 de noviembre, así como sus anomalías (Figura 6.10g y h) permite observar que la condición anómalamente seca se presentó en todo el perfil atmosférico, así como la subsidencia, con énfasis bajo los 500 hPa.

Asimismo, se realizaron análisis de circulación atmosférica tanto en las composiciones de días con incendios forestales (DCIF) y de días sin incendios forestales (DSIF), como en sus diferencias. Los resultados se encuentran en los Anexo 3, 4 y 5.

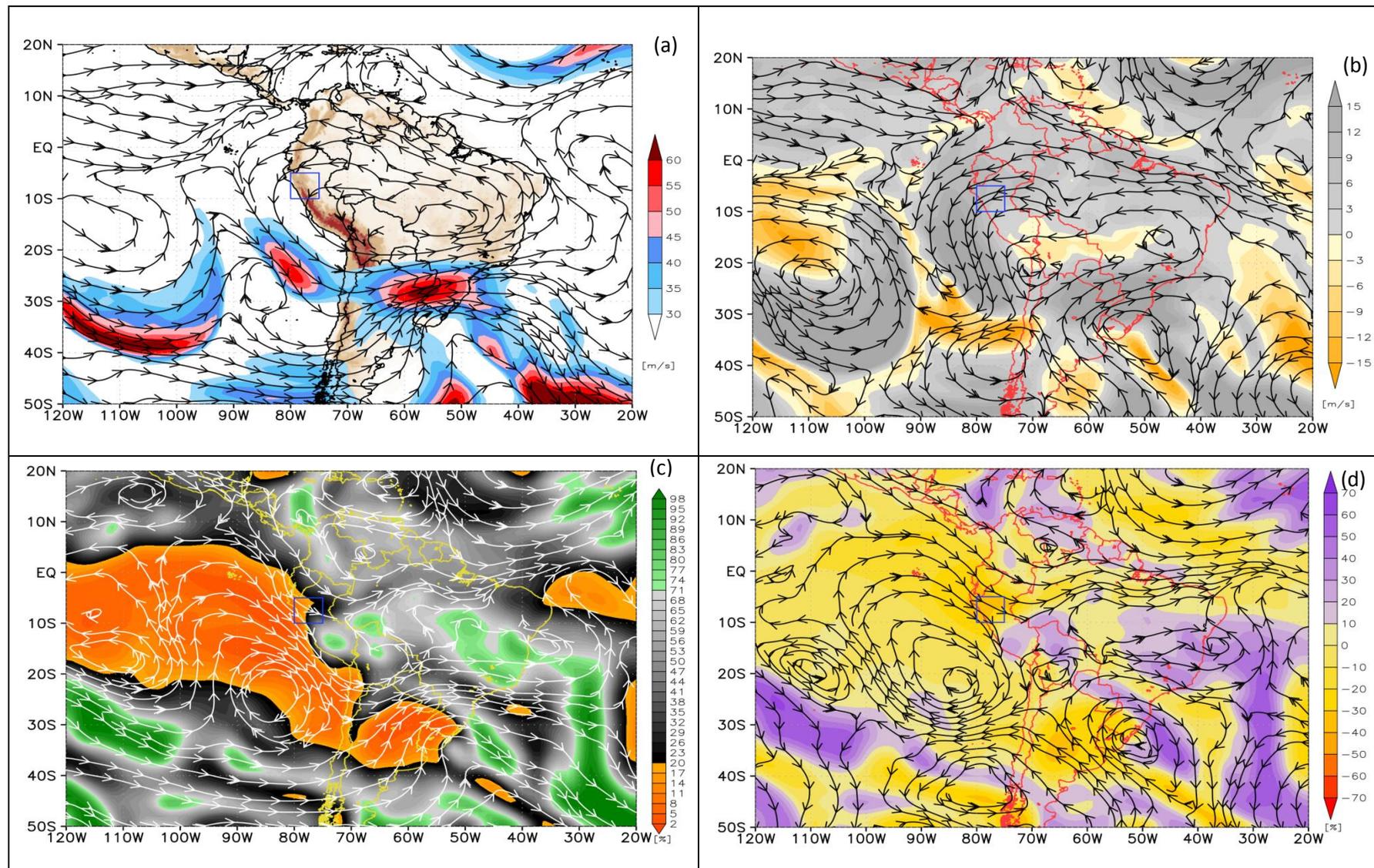


Figura 6.10.- (a) Corriente en chorro y circulación de vientos en 250 hPa [m/s^{-1}], (c) Humedad Relativa [%] y vientos promedio [m/s^{-1}] entre 400 y 600 hPa, y (b) y d) sus anomalías; correspondientes al 18 de noviembre de 2016. La región afectada por el incendio forestal está dentro del recuadro azul.

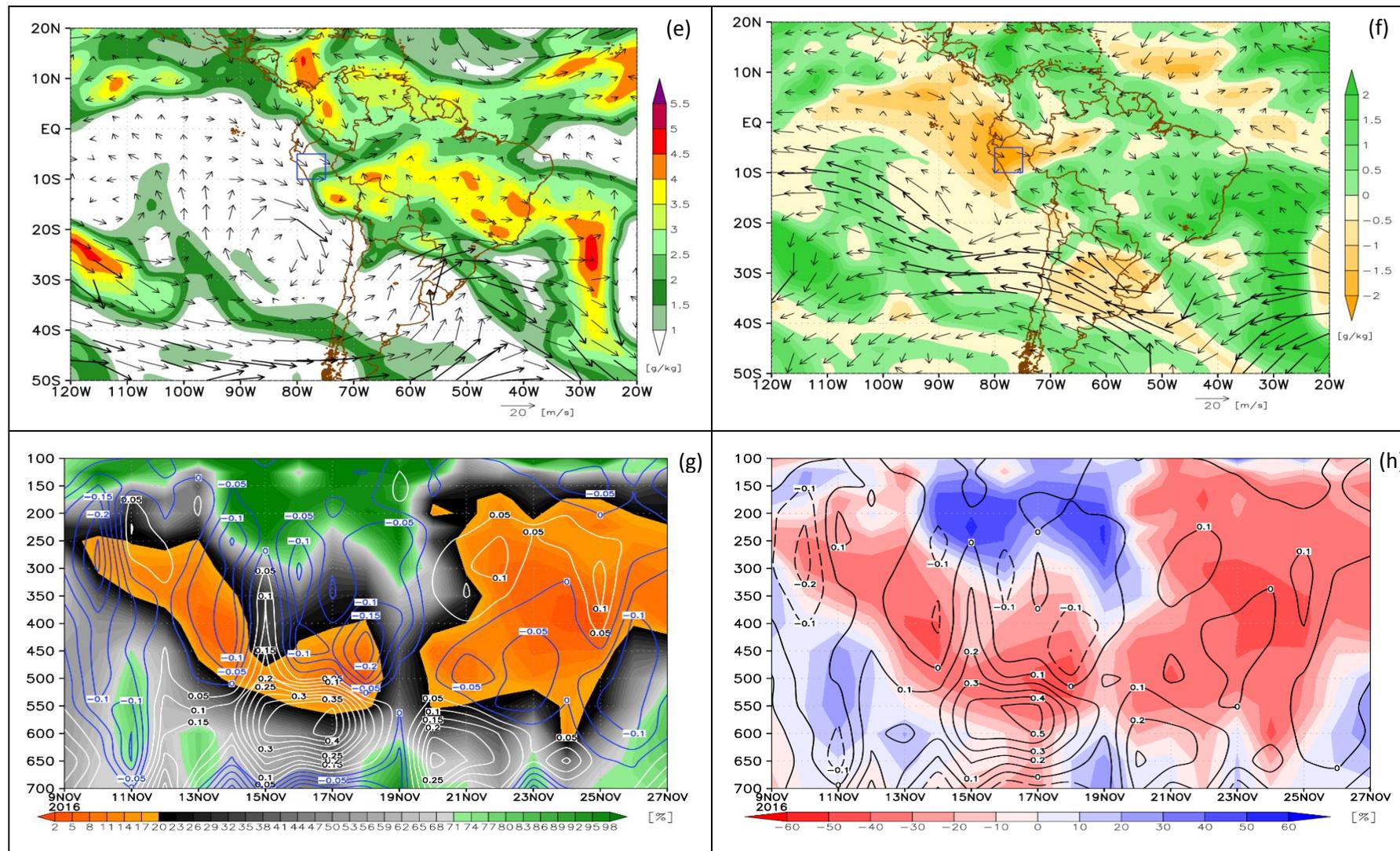


Figura 6.10.- (Continuación) (e) Relación de mezcla $[g \cdot kg^{-1}]$ y vientos $[ms^{-1}]$ en 500 hPa, (g) Corte Vertical entre 700 y 100 hPa de Humedad Relativa [%] y Velocidad Vertical $[Pa \cdot s^{-1}]$, y (f y h) sus anomalías; correspondientes al 18 de noviembre de 2016. La región afectada por el incendio forestal está dentro del recuadro azul.

6.5. Aplicación del FWI en incendios forestales ocurridos en Perú en el 2016

a) Análisis por área

Para evaluar el desempeño diario que tuvo el FWI en Perú durante el 2016, este se calculó para todo el Perú con datos del pronóstico de GFS con resolución horizontal de 0.25°.

En esta sección se muestran los resultados del FWI que se preveían para el día antes, el día de inicio y el día después de finalizado el evento ocurrido entre el 14 y 22 de noviembre (demás figuras en Anexo 6), mostrándose la ubicación geográfica de las localidades afectadas.

Al analizar los resultados se debe tomar en cuenta que estos índices pronostican el lugar o el momento en donde se va a generar un incendio forestal, sino los lugares donde, de iniciarse un IF, este tendría mayor facilidad para propagarse y sería más difícil de extinguir.

La Figura 6.11 muestra como el FWI se distribuye tanto en días previos, durante y después de un período de IF; se observa que los incendios coinciden con un área de riesgo moderado y alto; sin embargo, al mismo tiempo se ven otras áreas riesgo muy alto y extremo donde no se reportaron incendios, esto se da porque el FWI no es un índice que pronostique incendios, pero permite señalar las áreas susceptibles atmosféricamente a IF en las cuales se pueden concentrar el monitoreo de las condiciones atmosféricas, reduciendo el área donde se requiere mayor atención y facilitando así el pronóstico.

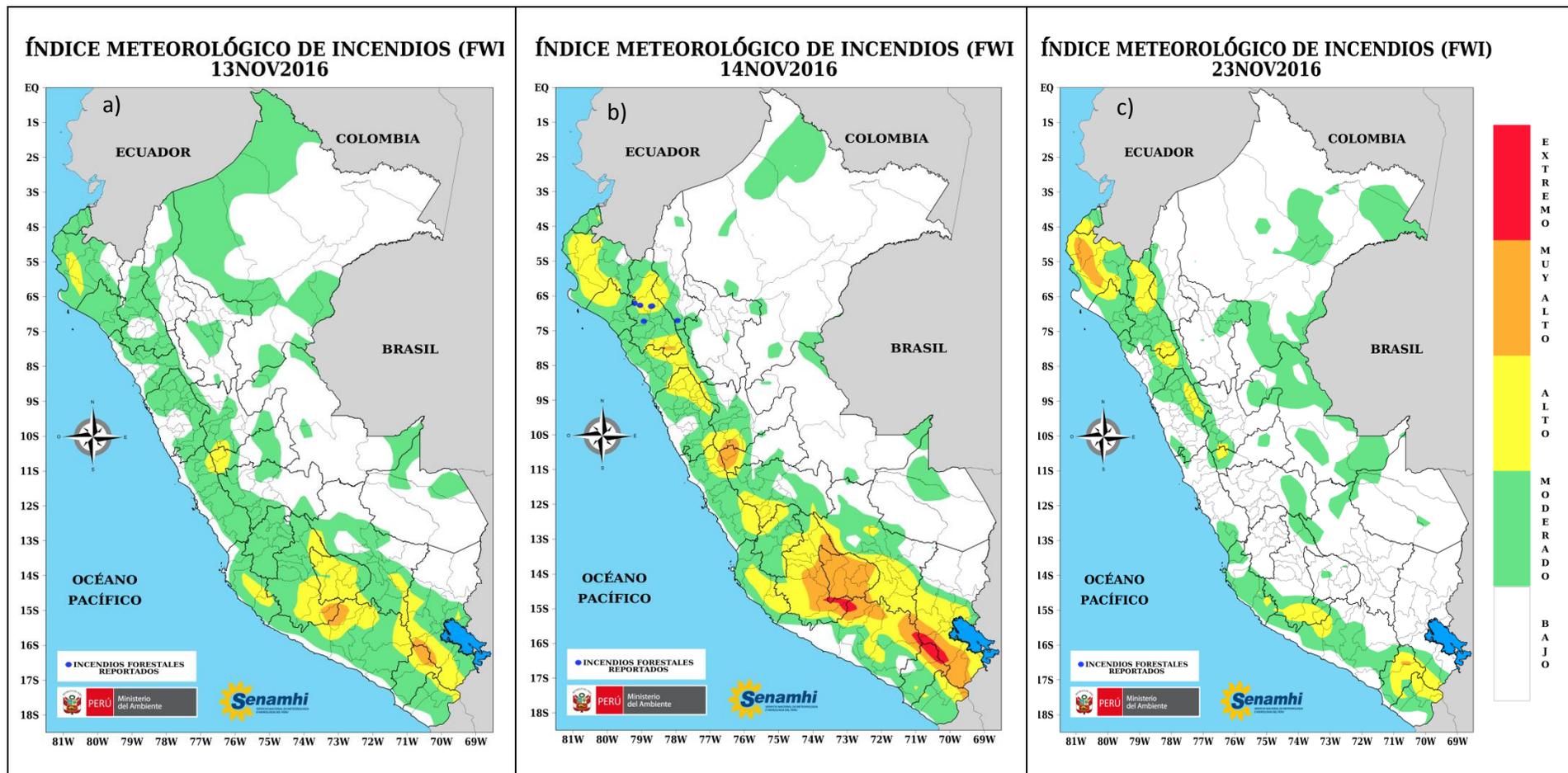


Figura 6.11.- FWI para los días a) 13 (antes del evento), b) 14 (inicio del evento) y c) 23 (después del evento) de noviembre del 2016.

b) Análisis estadístico

Con los valores puntuales de FWI a partir de los datos de pronóstico de GFS para las coordenadas de los IF ocurridos durante junio hasta noviembre del 2016, se realizó un análisis estadístico para establecer la correlación entre el FWI y el área de cobertura vegetal afectada por cada IF.

En la Figura 6.12 se observa la relación entre el FWI con el área quemada, para áreas menores a 100 ha. Con excepción de dos casos, todos los incendios se dieron con un FWI menor a 12, es decir de bajo a moderado, de estos el 75% se concentra en el nivel moderado y el 53% entre 8 y 11. Con este comportamiento se observa que, en términos generales, los incendios pequeños ocurren en zonas con FWI moderado, especialmente en el rango de 8 a 11 y en pocas ocasiones se dan con un FWI bajo (22%) o con un FWI alto (3%).

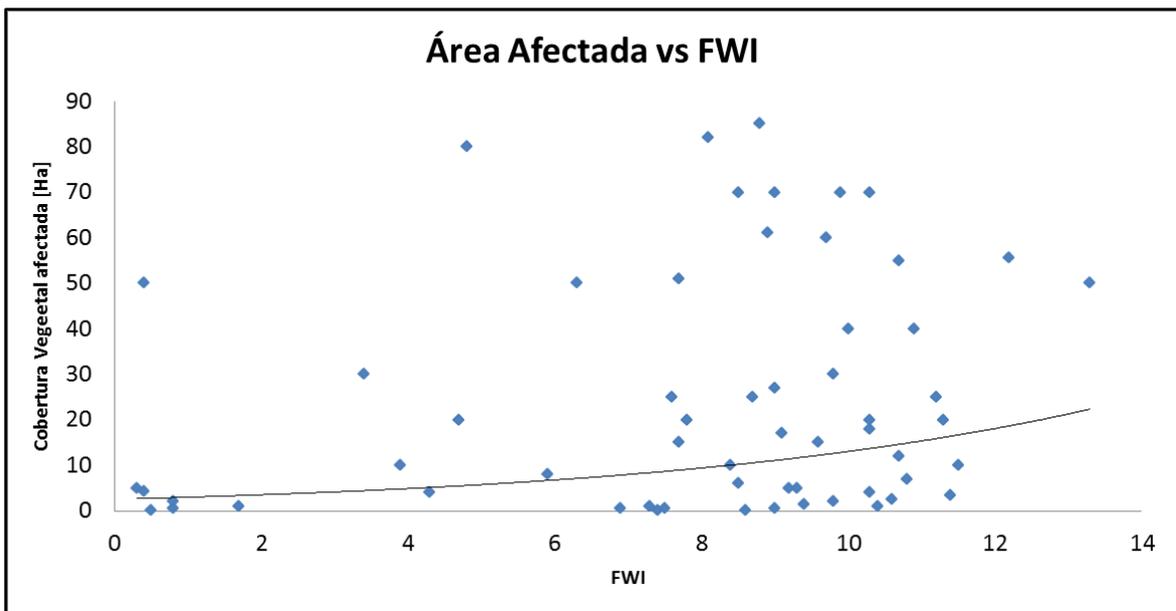


Figura 6.12.- Correlación entre el FWI y el área de cobertura vegetal afectada por los IF con un área efectiva menor a 100ha.

En la Figura 6.13 se observa la relación entre el FWI con el área quemada, para áreas mayores a 100 ha, pero menores a 1000 ha. Con excepción de cinco casos, todos los incendios se dieron con un FWI mayor a 6, es decir de moderado a alto, de estos el 60% se concentra en el nivel moderado (80% de este entre 8 y 12) y el 40% en el nivel alto (60% de este entre 14 y 18). Con este comportamiento se observa una relación directa con un coeficiente de correlación lineal de 0.6, en términos generales, los incendios grandes ocurren en zonas con FWI moderado a alto, especialmente en el rango de 10 a 18 y en pocas ocasiones se dan con un FWI bajo (16.7%).

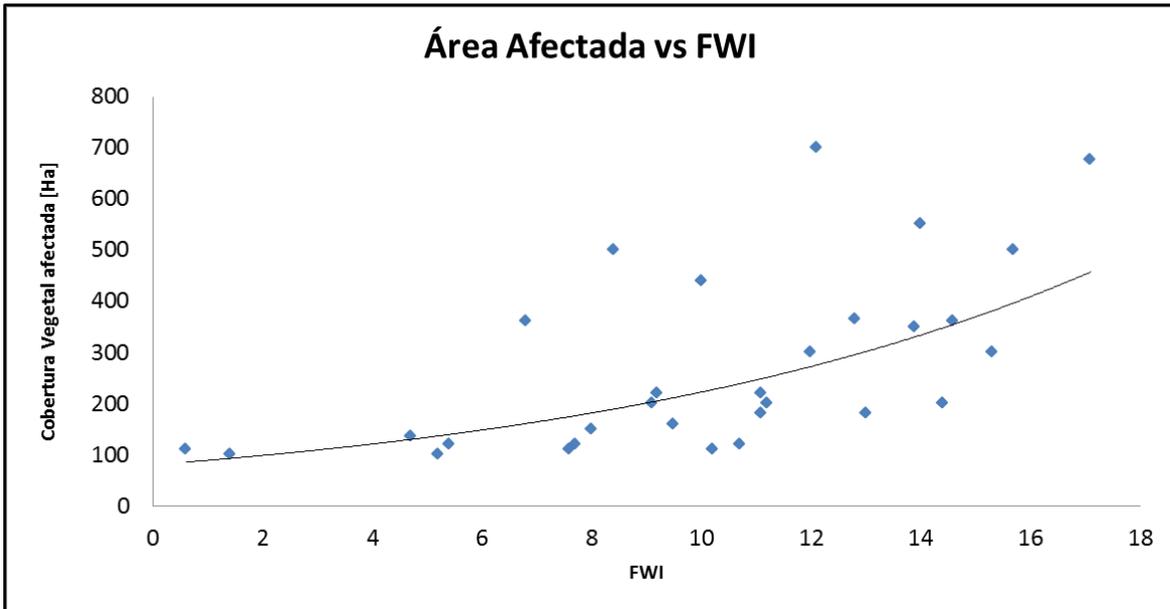


Figura 6.13.- Correlación entre el FWI y el área de cobertura vegetal afectada por los IF con un área efectiva entre 100 y 1000 ha.

En la Figura 6.14 se observa la relación entre el FWI con el área quemada, para los casos menores a 1000 ha. Si bien la correlación entre ambas variables no es significativa, al considerar todos los incendios si se puede observar una cierta tendencia a aumentar el FWI con respecto al área quemada. Además, el 70% de estos se dio en un área de por lo menos FWI moderado y solo 5% representa a incendios con área quemada mayor a 100 ha con un FWI bajo. Finalmente se aprecia que la mayoría de los incendios (66%) tiene un FWI de entre 6 a 12 (moderado).

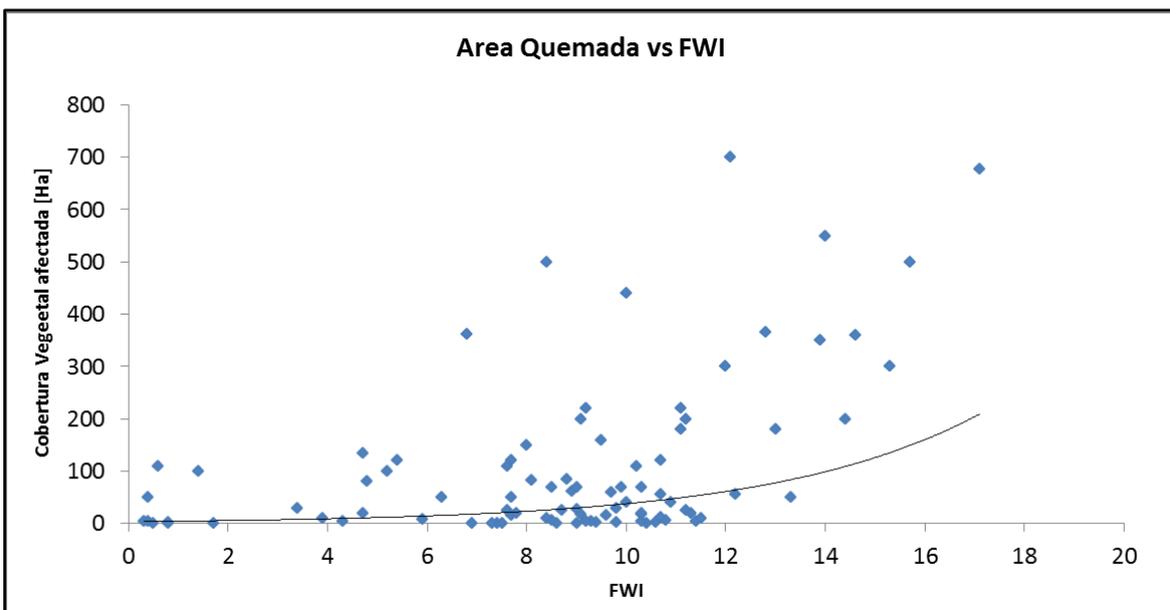


Figura 6.14- Correlación entre el FWI y el área de cobertura vegetal afectada por los IF con un área efectiva entre 0 y 1000 ha.

Mención aparte se da a los incendios con un área quemada mayor a 1000 ha, con solo 5 casos, con un FWI alto (60%) en su mayoría. Estos se pueden observar incluidos en la Figura 6.15.

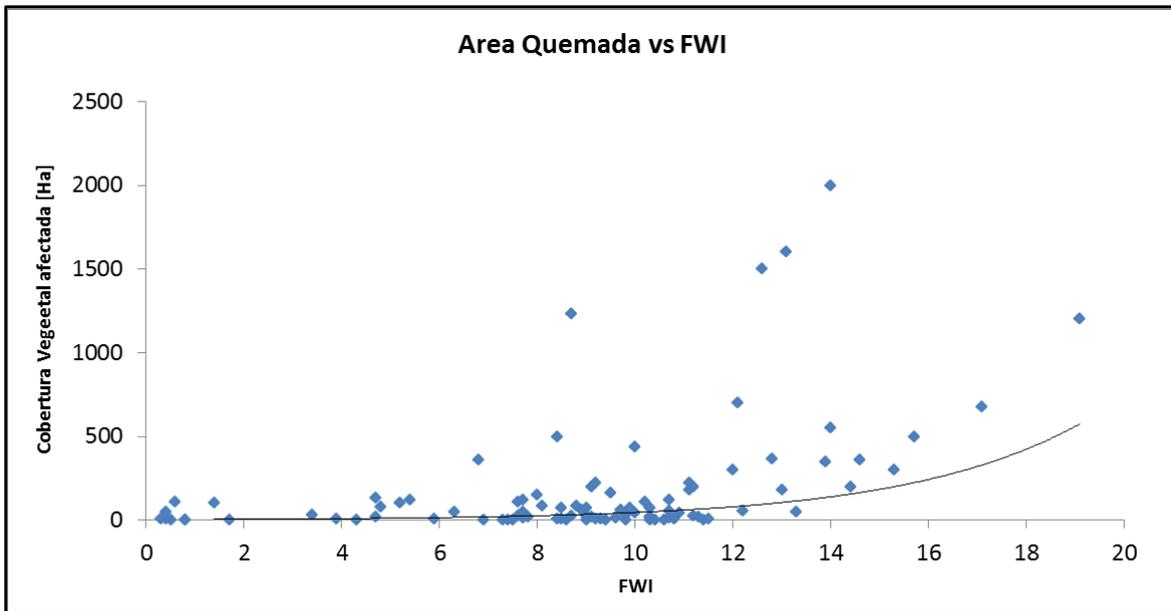


Figura 6.15.- Correlación entre el FWI y el área de cobertura vegetal afectada por todos los IF.

Por otro lado, si analizamos los resultados del FWI de forma resumida, como se ve en la Tabla 6.2, observamos que la mayoría de IF con un impacto menor a 100 ha se dan en condiciones de Bajo a Moderado, en tanto los incendios con un impacto de entre 100 y 1000 ha se dan en su mayoría con un FWI de categoría Alto, cabe mencionar que para la categoría Muy Alto solo se reportó un incendio y este tuvo un impacto mayor a 1000 ha.

Con los datos de la Tabla 6.2 también se puede determinar la probabilidad de ocurrencia de los IF de acuerdo al FWI que se obtenga, es así que si el FWI es Bajo ($FWI \leq 6$) y se diese un IF, existe un 72% de probabilidad que este afecte menos de 100 ha y 28% que afecte entre 100 y 1000 ha. Cuando el FWI es Moderado ($6 < FWI \leq 12$) y ocurriera un IF, existe 73% de probabilidad que el IF afecte menos de 100ha; 25%, entre 100 y 1000ha y; 2%, que el IF afecte más de 1000 ha. Si el FWI es Alto ($12 < FWI \leq 18$) y se reporta IF, la probabilidad de que el IF afecte menos de 100ha es 13%; entre 100 y 1000ha, 67% y, más de 1000 ha, 20%. Por último, cuando el FWI fue Muy Alto ($18 < FWI \leq 24$), solo se reportó un IF que afectó más de 1000ha.

Tabla 6.2.- 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

Mediante los resultados de la Tabla 6.2 se observa que el valor límite del FWI es 12, permitiendo concluir que si el FWI es menor a 12 y se presenta un IF, la probabilidad de que este afecte menos de 100 has de cobertura vegetal es 73%; entre 100 y 1000 has, 26%; y solo 1% que afecte más de 1000 has. Por el contrario, si el FWI es mayor a 12, la probabilidad de que el IF afecte menos de 100 has disminuye a 13%; pero que este afecte entre 100 y 1000 has, aumenta a 63%; y a 25% que afecte más de 1000 has (ver Tabla 6.3).

Tabla 6.3.- Cantidad y porcentaje de IF entre junio y noviembre del 2016, según nivel de FWI y área afectada, considerando FWI=12 como límite.

FWI	Total	ha<100	100<ha<1000	ha>1000	% IF (ha<100)	% IF (100≤ha<1000)	% IF (ha≥1000)
FWI≤12	78	57	20	1	73	26	1
FWI>12	16	2	10	4	13	63	25

7. CONCLUSIONES

Las condiciones climáticas a escala estacional y sinóptica, como las sequías, favorecen la ocurrencia y/o propagación de IF en la sierra peruana si es que afectan directamente la región. Esto sucedió en el 2005 y 2016 donde el SPI reportó condiciones extremadamente secas en la sierra peruana y los IF también tuvieron sus máximos registros en esos años. Sin embargo, durante el 2015, que fue considerado año con sequía extrema en la Amazonía, pero condiciones normales a húmedas en la sierra, de acuerdo al SPI, no fue un año favorable para los IF, pero el año posterior a este (2016) si se reportó un alto número de IF. Esto corrobora lo concluido por Román-Cuesta et al. (2014), y confirmado por Espinoza *et al.* (2016), que la asociación de los IF en los ecosistemas de vegetación corta (como la sierra) presenta una variabilidad tipo “diente de sierra” con la precipitación, ya que si la precipitación incrementa en un año, aumenta el combustible disponible para ser quemado durante el siguiente año, si este fuera seco.

El análisis de condiciones reportadas en estaciones meteorológicas permite concluir que la ausencia de precipitaciones durante 10 días consecutivos fue un requisito necesario, pero no

suficiente para la ocurrencia y propagación de IF que afecten más de 100 ha en el 2016 en Perú. Además, la baja humedad relativa atmosférica a las 13 horas fue otro factor favorable, generado principalmente por la presencia de una masa seca y/o por el incremento de temperatura máxima con valores por encima de lo normal. Esta condición de baja humedad estuvo relacionado también con temperaturas mínimas por debajo de su normal, incremento de horas de sol, de precipitación y de evaporación, lo cual concuerda con lo expresado por García y García (1987). Sin embargo, esta última condición se presentó solo en la sierra norte y centro del Perú.

El análisis de caso para el estudio de caso del 18 de noviembre del 2016 permite concluir que la ocurrencia de IF durante esta fecha en el norte del país se presentó con vientos del este más rápidos de lo normal en niveles altos, con vientos del noroeste transportando sequedad hacia la región en niveles medios, y con subsidencia y humedad relativa debajo de lo normal en hasta 60% en toda la capa troposférica durante 10 días antes y después del día central de IF.

El FWI calculado con datos de pronóstico del modelo GFS 0.25° para el año 2016 demostró que si el FWI es menor a 12, en caso de que se presente un IF, existe mayor probabilidad (73%) de que este afecte menos de 100 has de cobertura vegetal; y si el FWI es mayor a 12, la mayor probabilidad (63%) es que este afecte entre 100 y 1000 has, seguido de 25% de probabilidad de que este afecte más de 1000 has.

8. RECOMENDACIONES

- 8.1. Realizar un análisis climatológico y de variabilidad interanual de la circulación atmosférica durante la ocurrencia y no ocurrencia de IF. Para ello, considerar un mayor registro de IF.
- 8.2. Los parámetros de las ecuaciones para el cálculo del FWI corresponden a un bosque de pinos. Se recomienda ajustar estos para los diferentes tipos de bosques en el Perú.
- 8.3. Determinar y aplicar correcciones a los datos de los modelos atmosféricos utilizados para el cálculo del FWI.
- 8.4. Desarrollar o adaptar índices más simples para el peligro de IF, tomando como base el análisis de casos de estudio con datos de estación presentado, y compararlos con el FWI.
- 8.5. Adaptar estos índices para la estimación de peligros de IF a escala estacional incorporando variables que reflejen la humedad del suelo.

9. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Las definiciones del presente glosario han sido extraídas y en algunos casos ligeramente adaptadas del glosario de la Sociedad Meteorológica Americana (American Meteorological Society Glossary) que se encuentra disponible en el siguiente link: http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page.

Anomalía: La desviación de una variable (temperatura o precipitación por ejemplo) en una región determinada durante un período específico del valor promedio a largo plazo para la misma región.

Años Niño: Años donde se da un aumento significativo en la temperatura de la superficie del mar sobre el Pacífico ecuatorial oriental y central que ocurre a intervalos irregulares, generalmente oscila entre dos y siete años.

Las condiciones de El Niño, que a menudo se caracterizan por "eventos cálidos", con mayor frecuencia se desarrollan durante los primeros meses del año y decaen durante el año siguiente. El término fue originalmente aplicado por los pescadores del norte de Perú a una corriente costera anual cálida hacia el sur que se desarrolla poco después de la temporada de Navidad; de ahí el nombre español que se refiere a "el Niño Jesús". El nombre posteriormente se hizo más comúnmente utilizado en referencia a los calentamientos costeros ocasionales muy fuertes que están asociados con las lluvias torrenciales en las regiones costeras del desierto del sur de Ecuador, en el norte del Perú. La definición actual de El Niño se desarrolló después del descubrimiento de que los calentamientos costeros son simplemente parte de un fenómeno a gran escala que surge de las interacciones acopladas océano-atmósfera en una amplia extensión del Pacífico ecuatorial.

Dorsal: Un área alargada de relativamente alta presión atmosférica, casi siempre puede ser claramente identificada como un área de máxima curvatura anticiclónica del flujo del viento.

ENSO: El acrónimo de El Niño-Oscilación del Sur, acuñado a principios de la década de 1980 en reconocimiento del vínculo íntimo entre los eventos de El Niño y la Oscilación del Sur, que antes de fines de la década de 1960 habían sido vistos como dos fenómenos no relacionados. El fenómeno global océano-atmósfera al que se aplica este término se denomina a veces "ciclo ENSO".

Normal Climática: Como se usa habitualmente en meteorología, el valor promedio de un elemento meteorológico durante un período fijo de años que se reconoce como estándar para el país y el elemento en cuestión. A menudo, el público en general lo interpreta erróneamente como los patrones climáticos que uno debería esperar. En el sentido más amplio, las "normales" deberían consistir en un conjunto de estadísticas descriptivas, que incluyen medidas de tendencia central (por ejemplo, media, mediana), rango (por ejemplo, desviación estándar, rango intercuartílico, extremos), variación y frecuencia de ocurrencia. En la Conferencia Meteorológica Internacional en Varsovia en 1935, los años 1901-30 fueron seleccionados como el período estándar internacional para los normales. El uso internacional recomendado es recalcular las normales al final de cada década utilizando los 30 años anteriores. Esta práctica se utiliza para tener en cuenta los cambios lentos del clima y para agregar estaciones establecidas más recientemente a la red con las normales observadas. Los estándares deben basarse en observaciones reales si están disponibles; de lo contrario, se debería usar un método reconocido para "reducir" series más cortas al período normal en comparación con estaciones vecinas. Los métodos reconocidos de ajuste por heterogeneidades se deben usar para explicar las interrupciones o cambios graduales introducidos en el registro de datos por cambios en las horas de observación, en las prácticas de observación, en el sitio o los instrumentos utilizados, o por un cambio gradual en el carácter del país circundante, como el crecimiento de una ciudad. Los años cubiertos por una normal siempre se deben indicar claramente, ya que los promedios para diferentes períodos de la misma duración rara vez son los mismos.

Reanálisis: Procedimiento por el cual se proyecta el estado de la atmósfera como es conocido por el conjunto finito, imperfecto e irregular de observaciones, mediante una grilla regular que representa el estado de la atmósfera por la amplitud de funciones matemáticas estándar. Está realizado para un período climático y donde las ecuaciones del modelo atmosférico utilizado no cambian.

Relación de mezcla: Permite conocer la cantidad de vapor de agua que contiene el aire seco, es decir indica el contenido de humedad atmosférica. Es expresado en g/kg y expresa los gramos de vapor de agua en 1 kg de masa de aire seco.

SPI: Es el índice estandarizado de precipitación que se calcula con datos de precipitación mensual de 20 a 30 años. McKee et al (1993) utilizaron la clasificación que se muestra a continuación para definir las intensidades de sequía resultantes del SPI.

Intensidad	Categoría
$\geq +2$	Extremadamente Húmedo
1.5 a 1.99	Muy Húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente Húmedo
-0.99 a +0.99	Normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente Seco
-1.5 a -1.99	Severamente Seco
≤ -2.0	Extremadamente Seco

Tropósfera: Es la porción de la atmósfera desde la superficie de la tierra hasta la tropopausa; es decir, los 10-20 km más bajos (6-12 mi) de la atmósfera; la porción de la atmósfera donde se ocurren la mayoría de fenómenos atmosféricos. La troposfera se caracteriza por la disminución de la temperatura con la altura, el movimiento vertical apreciable del viento y el vapor de agua apreciable. Dinámicamente, la troposfera se puede dividir en las siguientes capas: capa límite de superficie, capa Ekman y atmósfera libre.

Vaguada: En meteorología, un área alargada de presión atmosférica relativamente baja; el opuesto de una dorsal. El eje de una vaguada es la línea de la vaguada. Este término se usa comúnmente para distinguir la condición previa de la circulación cerrada de una baja (o ciclón), pero una depresión a gran escala puede incluir una o más bajas, una depresión superior puede estar asociada con un baja de niveles bajos, y una baja puede tener una o más vaguadas distintas que irradian de ella.

10. BIBLIOGRAFÍA

American Meteorological Society. 2017: Meteorology Glossary. Mixing Ratio. http://glossary.ametsoc.org/wiki/Mixing_ratio.

Alexander, M.E. 1993: Standard specifications for Fire Weather Index System computer calculations. Natl. Rural Fire Auth., Wellington, NZ. Circ, **14**, 68-73.

All, J., Medler, M., Arques, S., Cole, R., Woodall, T., King, J., Yan, J. and Schmitt, C. 2017: Fire Response to Local Climate Variability: Huascarán National Park, Peru. *Fire Ecology*, **13:2**, 85-104. <http://fireecologyjournal.org/docs/Journal/pdf/Volume13/Issue02/all-315.pdf>.

Baddour, O. 2011: Climate Normals. WMO: Commission for Climatology Management Group Meeting. CCI/MG/2011/Doc. 10. Item 10. 8pp. http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/mg/documents/mg2011/CCI-MG-2011-Doc_10_climatenormals1.pdf

Berrisford, P., Dee, D., Poli, P., Brugge, R., Fielding, K., Fuentes, M., Kalberg P., Kobayashi, S., Uppala, S., y Simmons, A. 2011: ERA report series: The ERA-interim archive. Version 2.0. European Centre for Medium Range Weather Forecast. United Kingdom. 27pp.

Comisión Nacional Forestal, 2010: Incendios forestales: Guía práctica para comunicadores. Comisión Nacional Forestal, 54pp.

Dentoni, M.C., Muñoz, M.M. y Epele F. 2007: Implementación de un sistema nacional de evaluación de peligro de incendios: la experiencia argentina. Sevilla- España WildFire, 1-13.

Dimitrakopoulos, A. P., Bemmerzouk, A. M. and Mitsopoulos, I. D. 2011: Evaluation of the Canadian fire weather index system in an eastern Mediterranean environment. *Meteorological Applications*. Royal Meteorological Society, **18**, 83-93.

Espinoza, J., Segura, H. Ronchail, J., Drapeu, G., and Gutierrez-Cori, O. 2016. Evolution of wet-day and dry-day frequency in the western Amazon basin: Relationship with atmospheric circulation and impacts on vegetation. *Water Resources Research*, **52**, 1-17. DOI: 10.1002/2016WR019305.

García, L., y Garcia M.P. 1987: La meteorología y los incendios forestales. Servicio de extensión agraria, 24 pp.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. INPE. 2017. Queimadas. Queimadas e Incêndios Florestais - Monitoramento Orbital e Risco de Fogo. <http://www.inpe.br/queimadas/portal/informacoes/apresentacao>.

Manta, I. 2017: Contribución al conocimiento de la prevención de los incendios forestales en la sierra peruana. Fondo editorial de UNALM, 227pp.

Marengo JA, Nobre CA, Tomasella J, Oyama MD, Sampaio de Oliveira G, De Oliveira R, Camargo H, Alves LM, Brown IF. 2008. The drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climatology*, 21 (3): 495-516.

McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993: The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan17-23, 1993, Anaheim CA, pp.179-186.

Mestre, A. and Manta, M.I. 2014: A fire weather index as a basis for an early warning system in Spain. *International Journal of Wildland Fire*, **23**, 510-519. DOI: 10.1071/WF13003

National Wildfire Coordinating Group (NWCG), citado 2017: S-290 Intermediate Wildland Fire Behavior Course. [Available online en https://www.meted.ucar.edu/training_course.php?id=14.]

Panisset, J., Libonati, R., Gouveia, C., Machado-Silva, F., França, D., França, R. and Peres, L. 2017. Contrasting Patterns of the extreme drought episodes of 2005, 2010 and 2015 in the Amazon Basin. Short Communication. *International Journal of Climatology*, 38, 1096 - 1104. DOI: 10.1002/joc.5224

Ratan, R. and Venugopal, V. 2013: Wet and dry spell characteristics of global tropical rainfall. *Water Resources Research*, **49**, 3830-3841. DOI: 10.1002/wrcr.20275

Román-Cuesta, R. M., Carmona-Moreno, C., Lizcano, G., New, M., Silman, M., Knoke, T., Malhi, Y., Oliveras, I., Asbjornsen, H. and Vuille, M. 2014: Synchronous fire activity in the tropical high Andes: an indication of regional climate forcing. *Global Change Biology*. 1-14. DOI: 10.1111/gcb.12538

Smith, J. 2006. *The Facts on File Dictionary of Weather and Climate*. Revised Edition. USA. 273pp.

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre – SERFOR. 2017: Plan preliminar de prevención y reducción de Riesgo y Desastre, 35 pp.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI. 2016. Informe Técnico N° 006. Períodos secos y húmedos en la vertiente occidental de los Andes peruanos.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI. 2017. Clima. Sequías: Indicadores de Sequías. <http://www.senamhi.gob.pe/?p=sequias>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI. 2017. Clima. Condiciones Climáticas Actuales. <http://www.senamhi.gob.pe/?p=condiciones-climaticas>

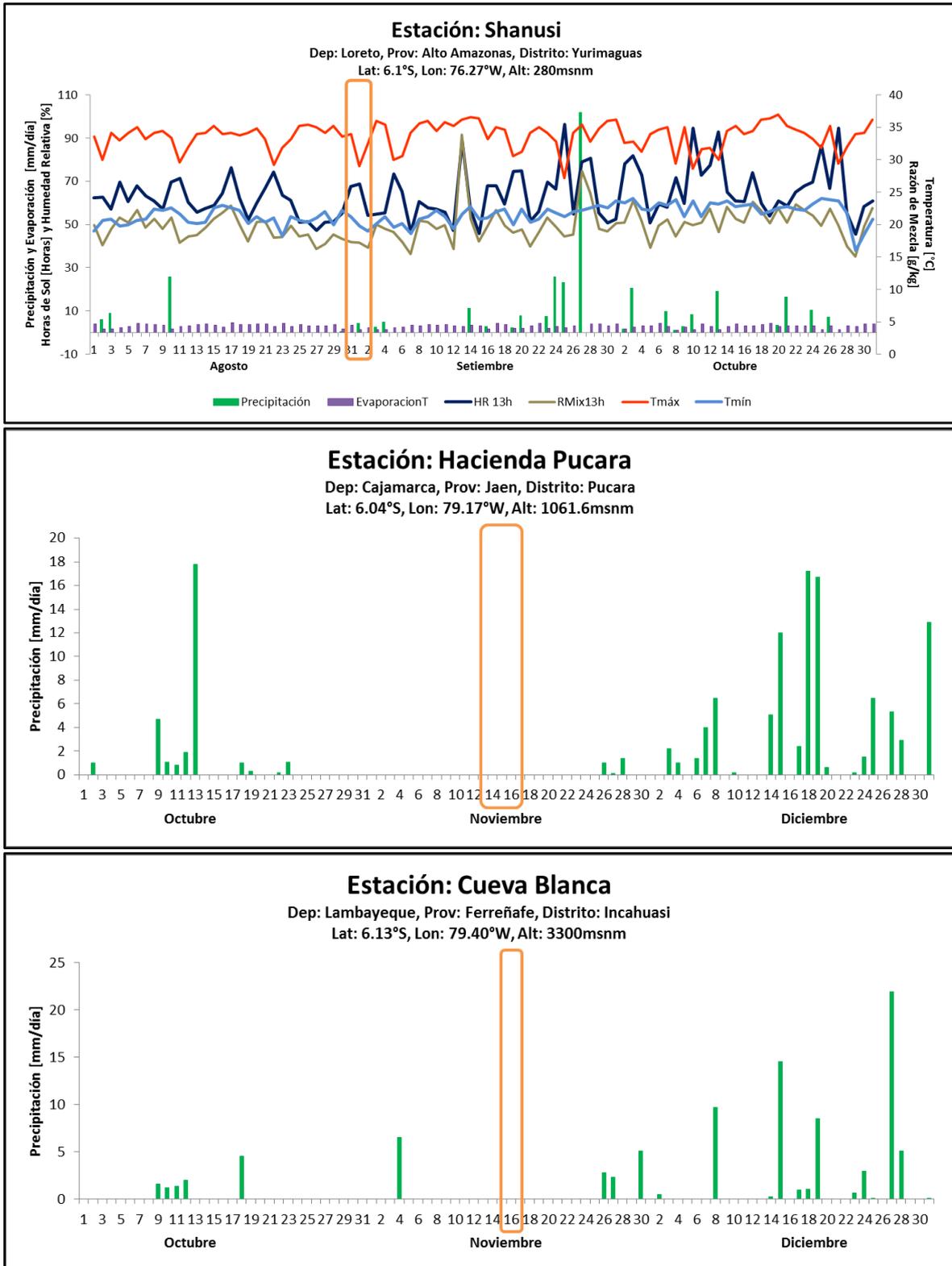
Van Wagner, C.E. 1987: Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Can. For. Serv., Ottawa, ON. For. Tech. Rep 35, 48pp. <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/19927.pdf>

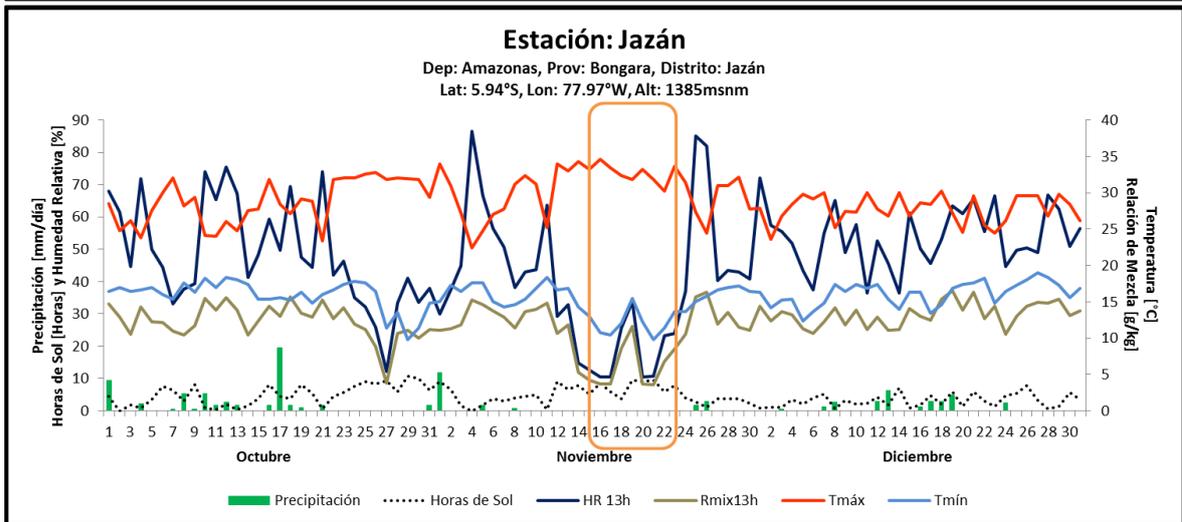
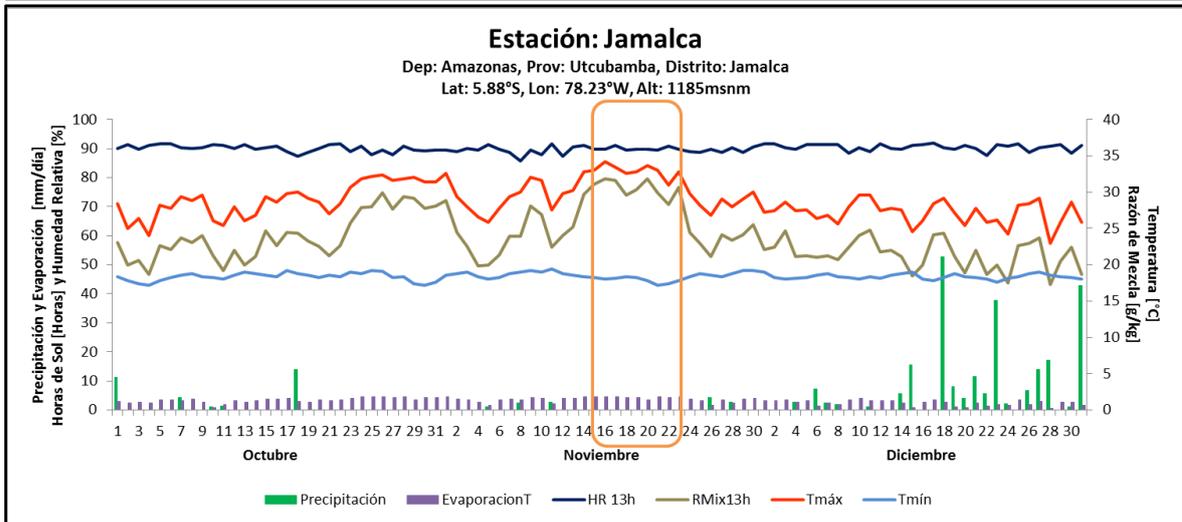
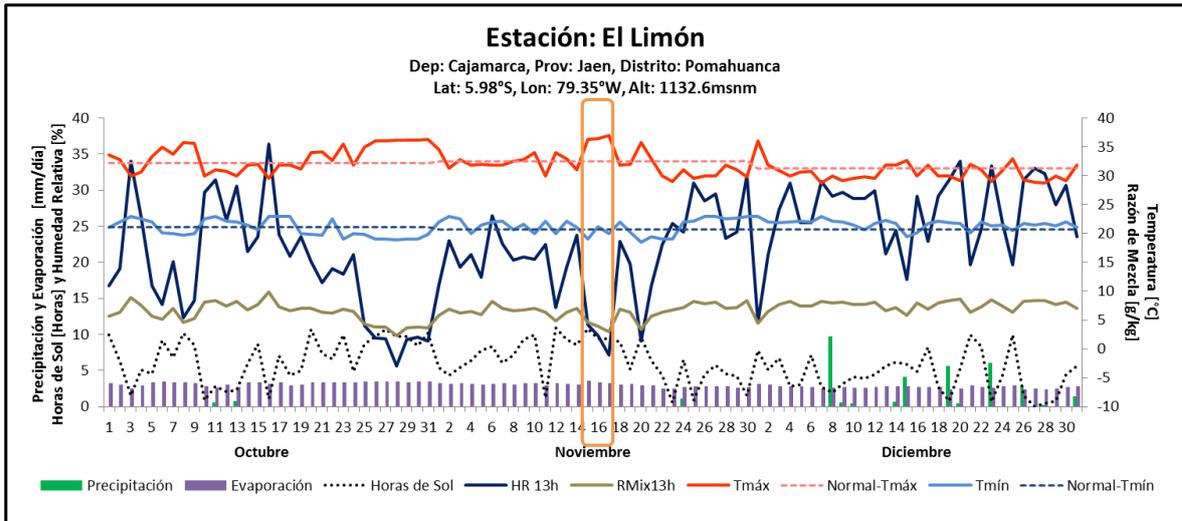
USAID, 2015: Reporte de Evaluación del Manejo de Incendios Forestales en el Perú.

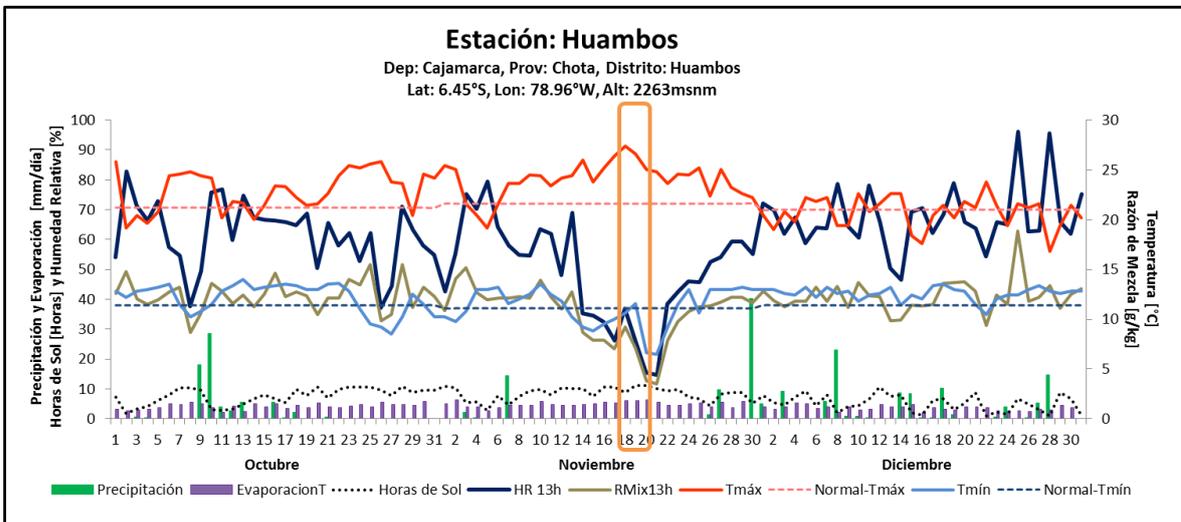
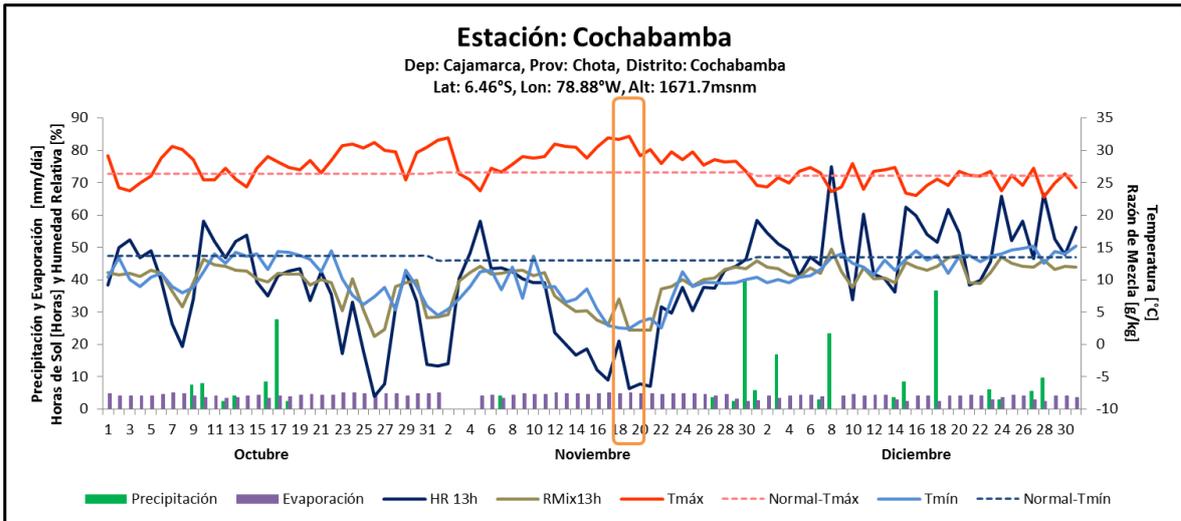
Van Wagner, C.E. and Pickett, T.L. 1985: Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Can. For. Serv., Ottawa, ON. For. Tech. Rep 33, 18pp.

11. ANEXOS

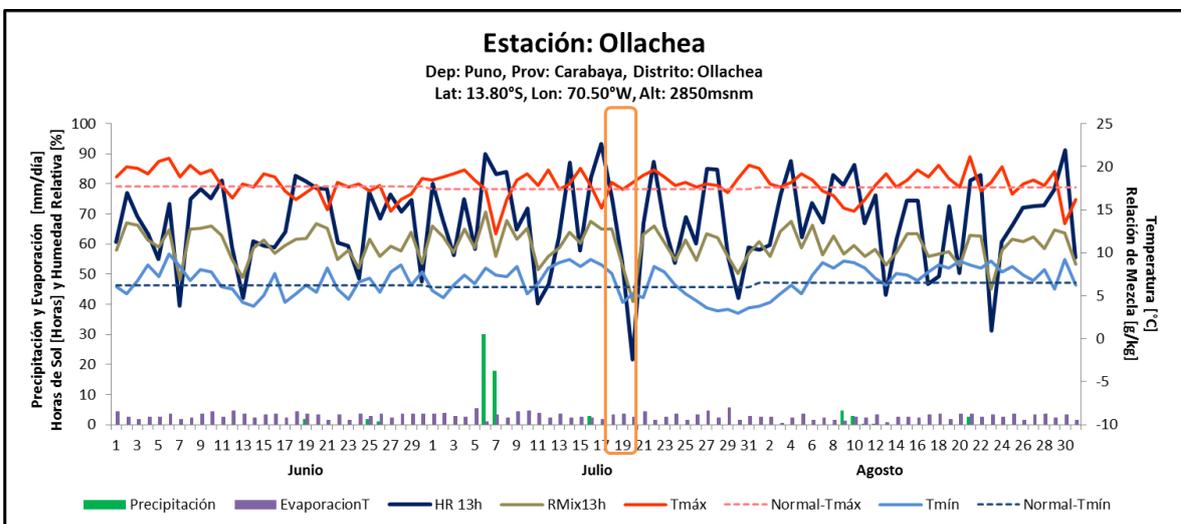
11.1. Condiciones Atmosféricas en Estaciones Convencionales

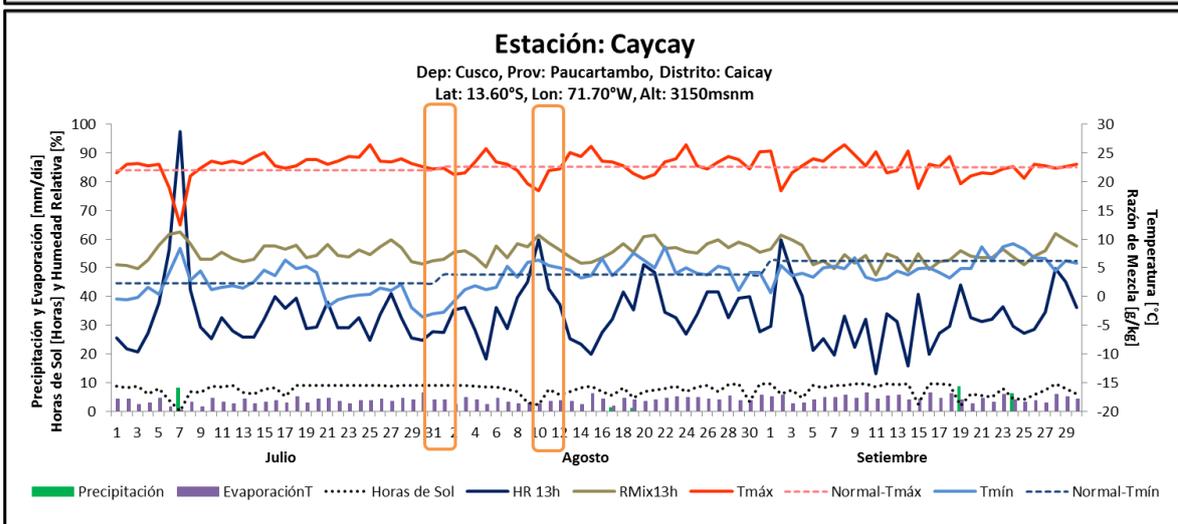
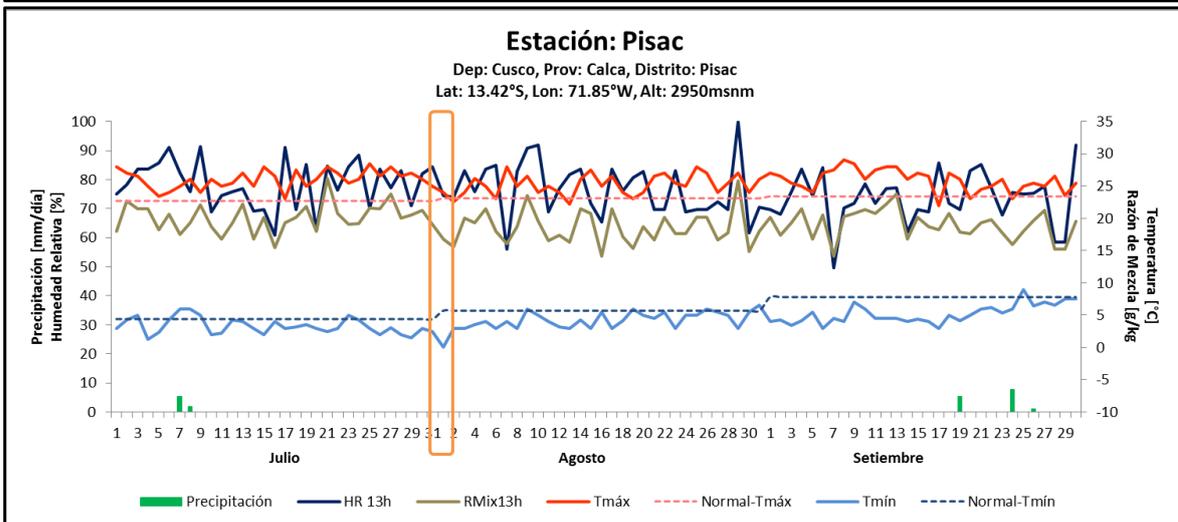
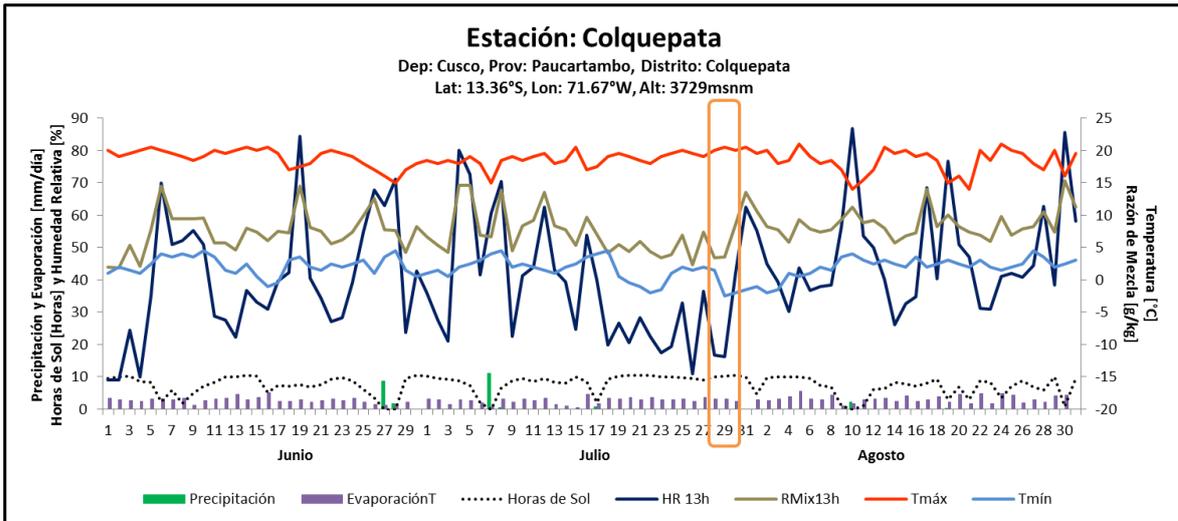


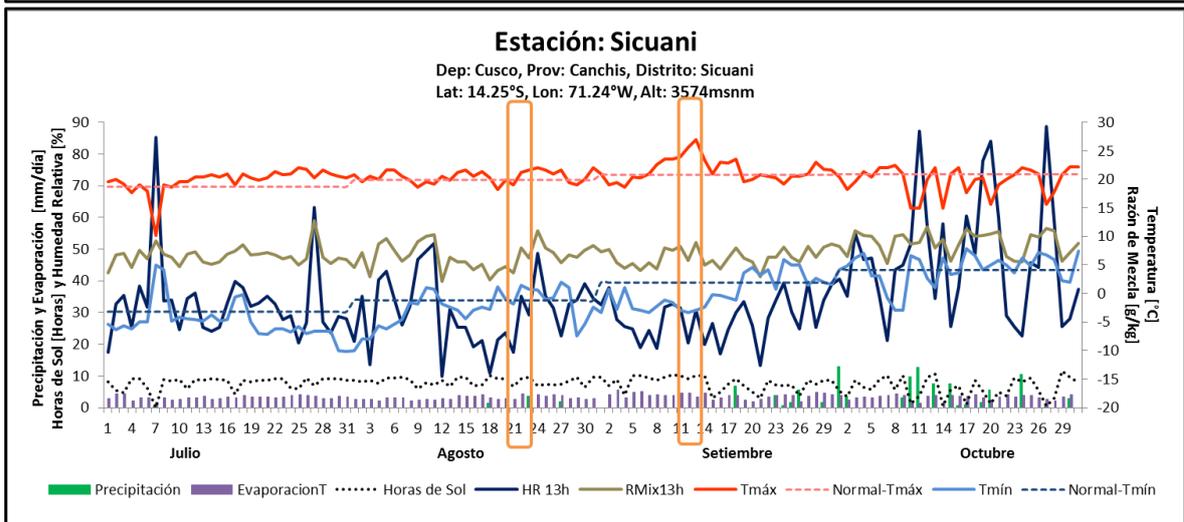
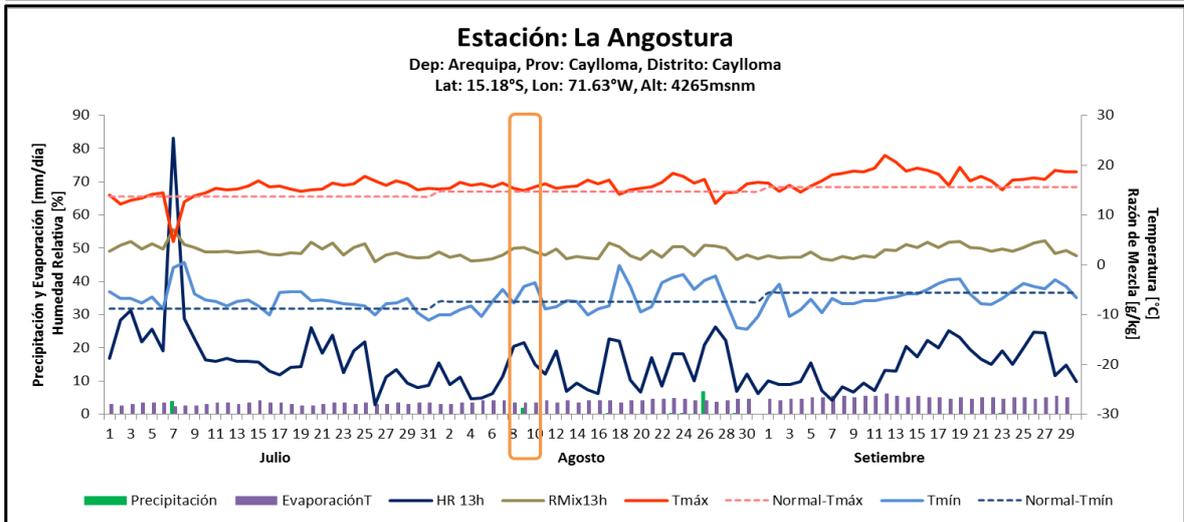
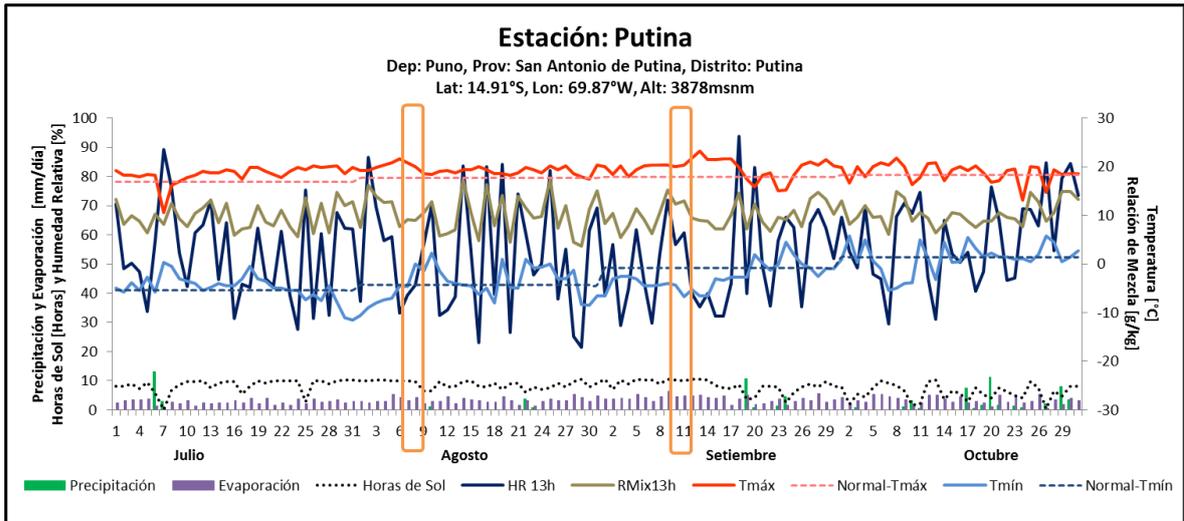


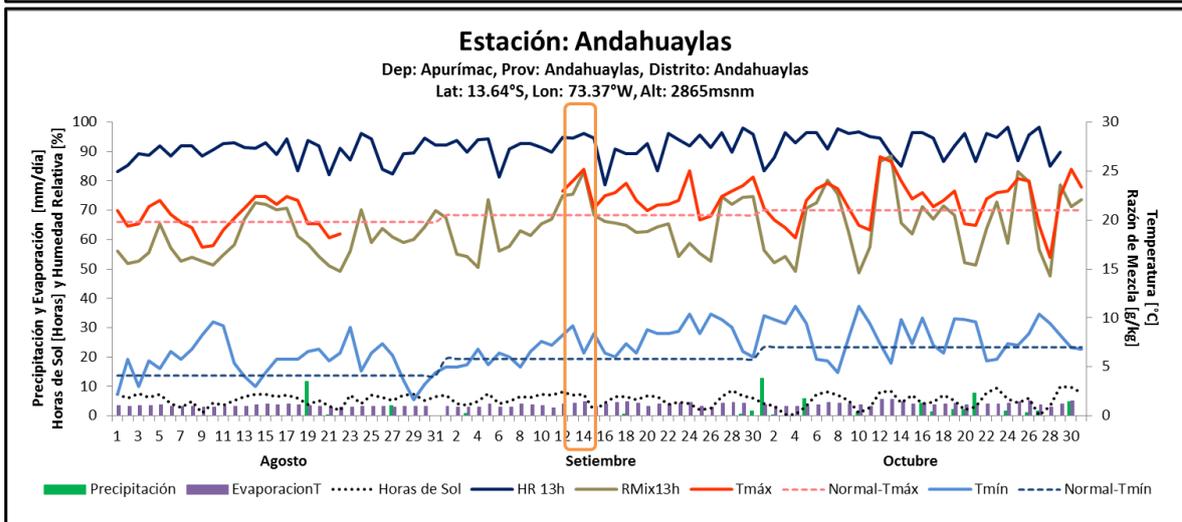
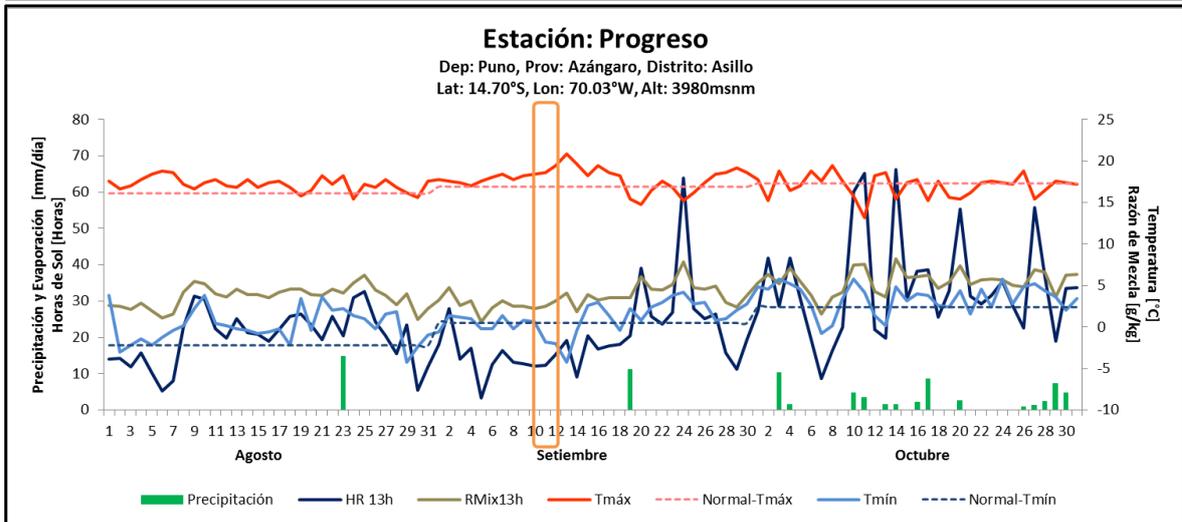
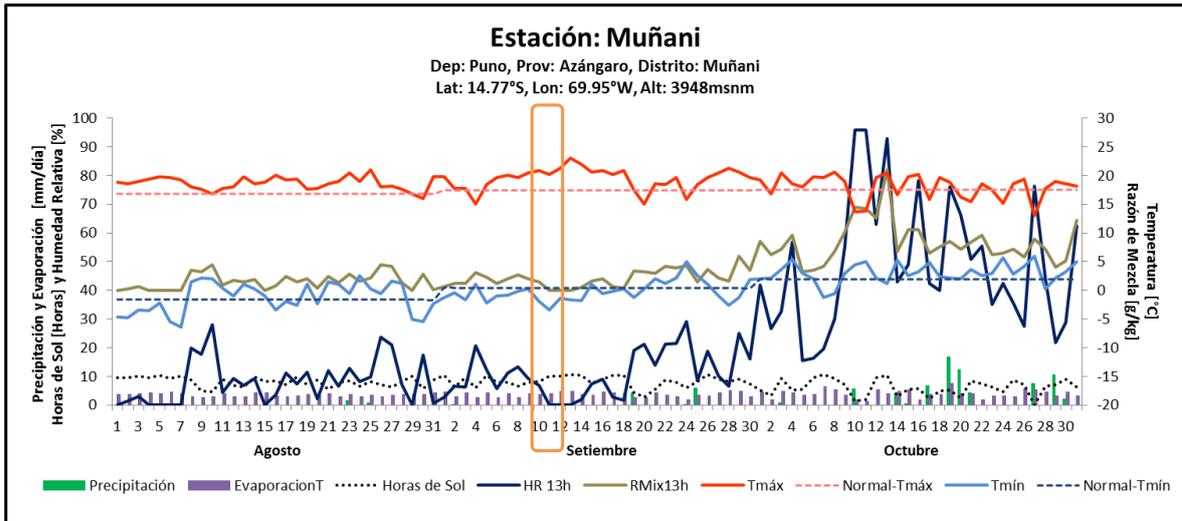


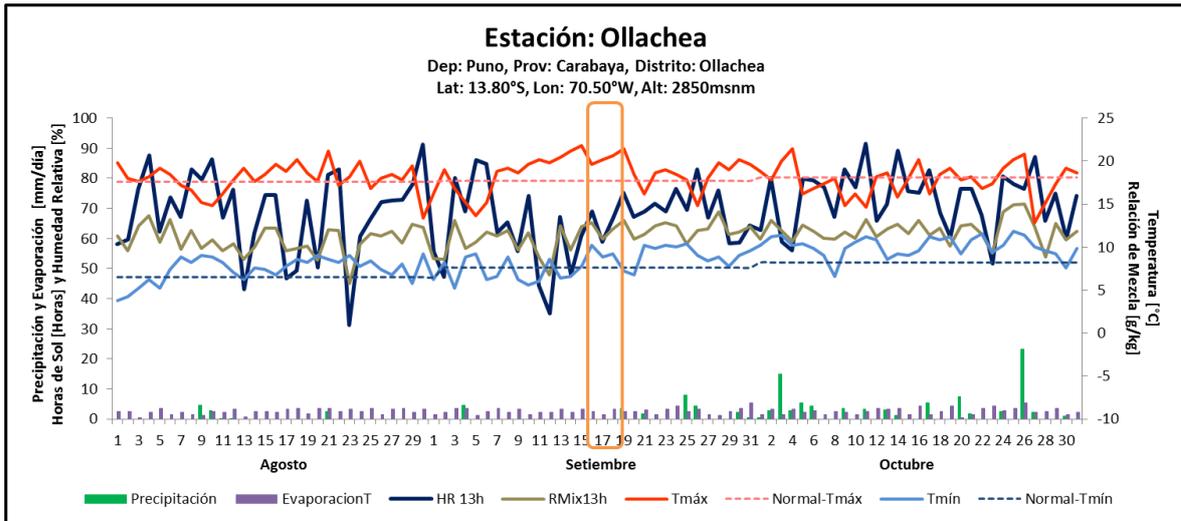
Anexo 1.- Gráficos de variación temporal diaria de Precipitación, Evaporación, Horas de Sol, Humedad Relativa y Relación de Mezcla a las 13 horas, Temperatura máxima (Tmáx) y Temperatura Mínima (Tmín) durante 3 meses en las estaciones meteorológicas del norte del Perú. El período de ocurrencia del incendio forestal está resaltado por un cuadro naranja.











Anexo 2: 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 del sur del Perú. El período de ocurrencia del incendio forestal está resaltado por un cuadro naranja.

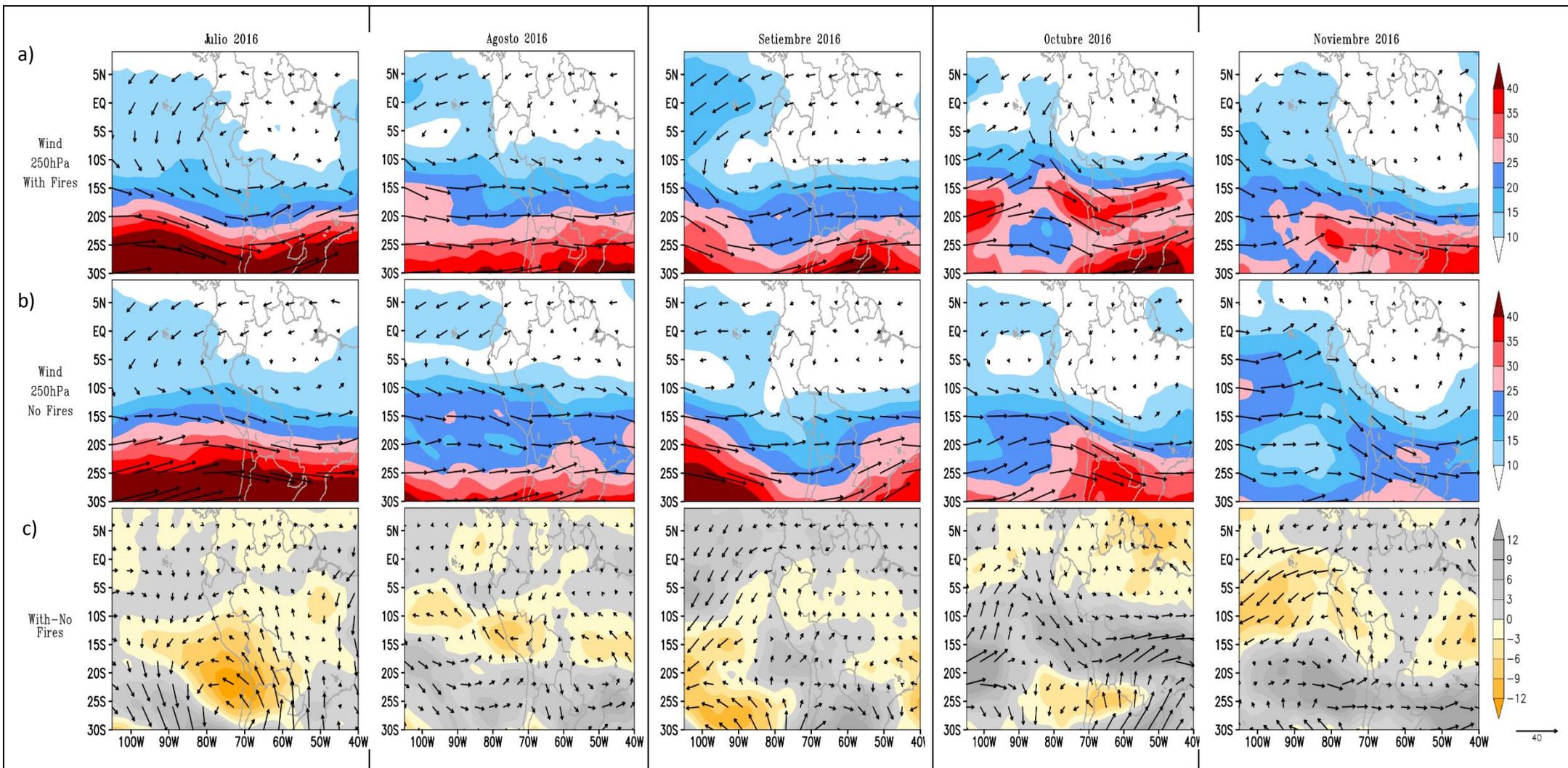
11.2. Composiciones atmosféricas

Considerando la variación espacial y temporal de los incendios forestales en el 2016 que afectaron por lo menos 100 ha de cobertura natural (Figura 6.3, 6.5 y 6.7), se observa que tanto en el norte y en el centro del Perú la mayoría de los incendios ocurrió en noviembre. En el sur la situación es diferente, porque se observa que se presentaron incendios desde julio hasta noviembre, aproximadamente en la misma proporción, a excepción de octubre. Este comportamiento variable de los IF nos condiciona a analizar la circulación atmosférica de forma mensual, considerando las composiciones para los días con incendio forestal (DCIF) y para los días sin incendio forestal (DSIF), y la diferencia de estas dos composiciones, en cada mes.

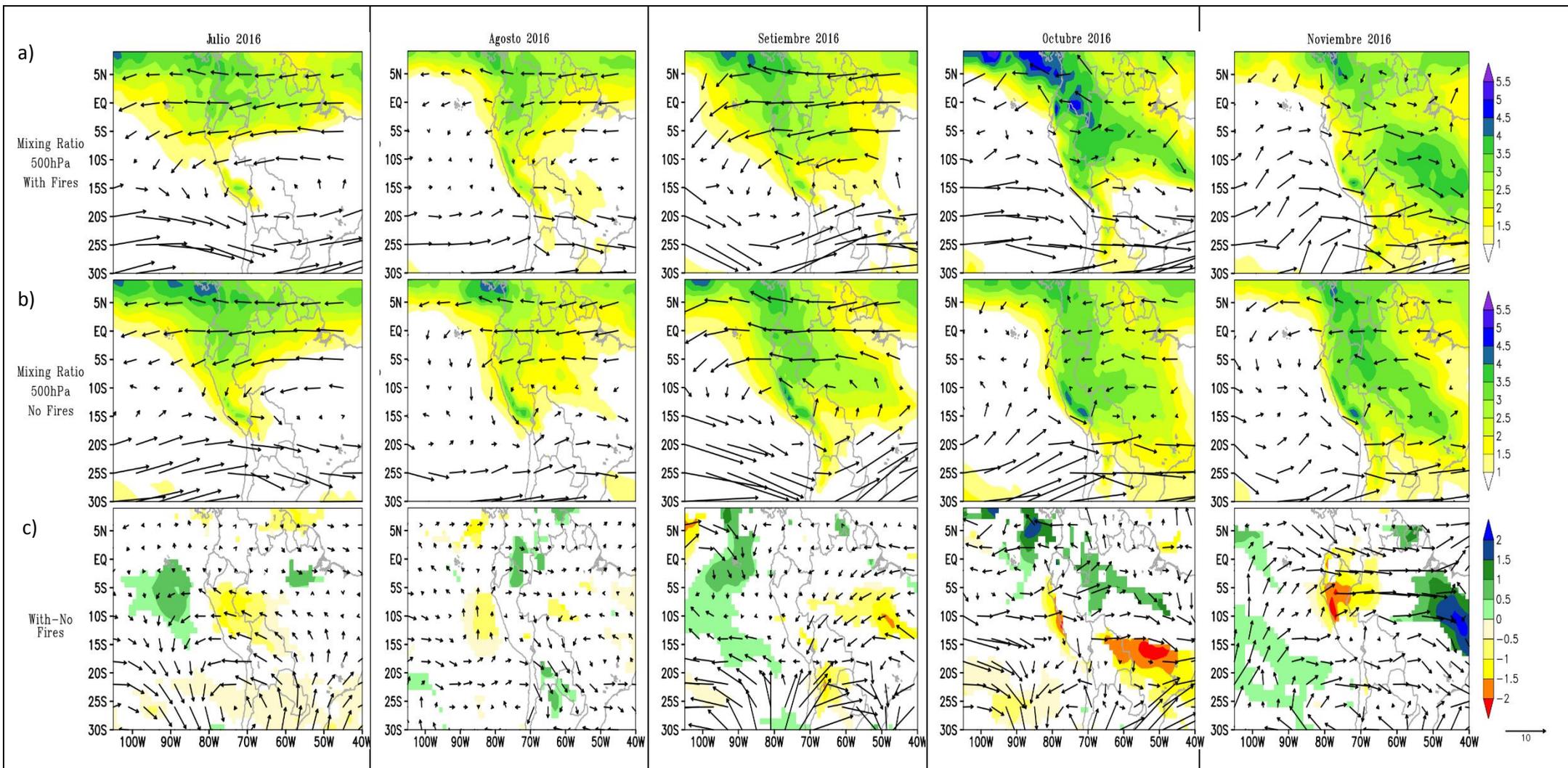
De acuerdo a lo observado en el Anexo 3, en 250 hPa la velocidad del viento es menor sobre Perú durante los DCIF que durante los DSIF (a excepción de octubre). Sin embargo, al analizar la circulación, no se observa un único patrón que sea significativo y común en todas las composiciones, ni en la diferencia de estas. Como noviembre de 2016 fue el mes con más IF en el Perú, el análisis de la circulación en este mes cobra mayor importancia. Se observa que durante los DCIF en noviembre, el jet subtropical se encontraba entre los 20 y 30°S, afectando solo el centro y sur del Perú con vientos del oeste mayores a 10m/s. Sin embargo, en el norte del país los vientos se presentaron del este y con velocidad menor a 10 m/s. Por el contrario, durante los DSIF, el jet se encontró al sur de los 30°S, pero la circulación entre los 0 y 20°S formó una vaguada cuya parte delantera afectaba a Perú con inestabilidad.

A diferencia de los vientos en niveles altos, la relación de mezcla en 500 hPa (Anexo 4) sobre Perú si presentó un comportamiento diferenciado durante los DCIF en comparación con los DSIF, menor relación de mezcla durante la primera situación. Este comportamiento es significativo al 90% de confianza, principalmente durante julio y noviembre del 2016. La circulación en 500 hPa durante los DCIF en noviembre y setiembre (meses con mayor frecuencia de IF en todo el Perú) presentó vientos del oeste al norte del Perú que no permitieron el ingreso de la humedad del este proveniente de la Amazonía como ocurría en los DSIF.

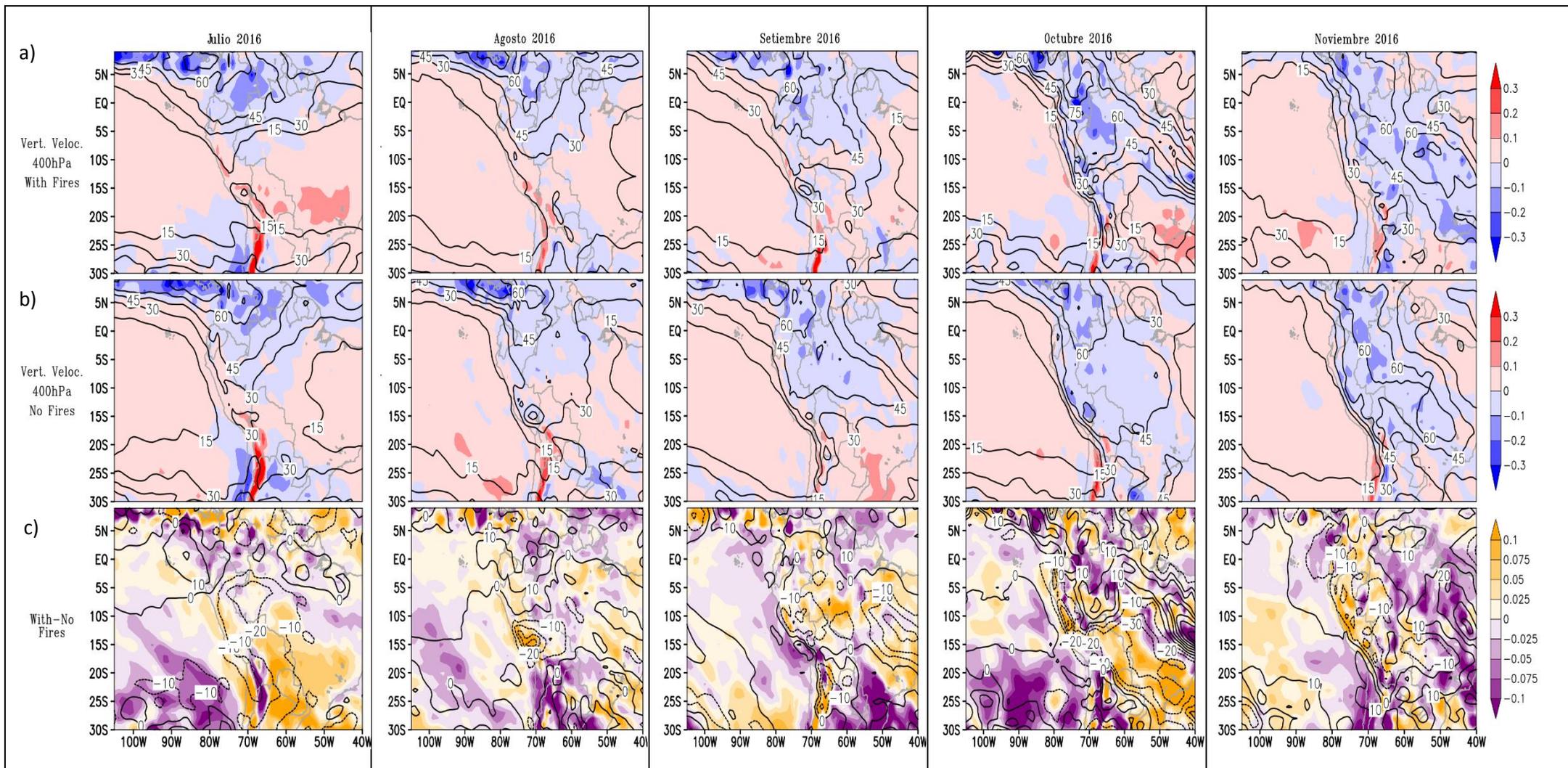
En la Anexo 5 se observa que la velocidad vertical positiva, que indica subsidencia, y la baja humedad relativa (inferior a 30%) sobre Perú en 400 hPa fueron características de los DCIF en todos los meses. Esto impidió el desarrollo de nubes de precipitación por la estabilidad que trae consigo la subsidencia y por la baja humedad relativa con la que se presentó la capa atmosférica. Por el contrario, durante los DSIF se presentó velocidad vertical negativa, que indica levantamiento vertical o ascenso de masa atmosférica, y humedad relativa superior a 30%. Estos son los principales ingredientes para inestabilidad atmosférica.



Anexo 3.- Composiciones de velocidad (sombreado - ms-1) y vectores de viento horizontal (flechas - ms-1) en 250hPa en (a) días con incendio, (b) días sin incendio y (c) la diferencia de estas composiciones.

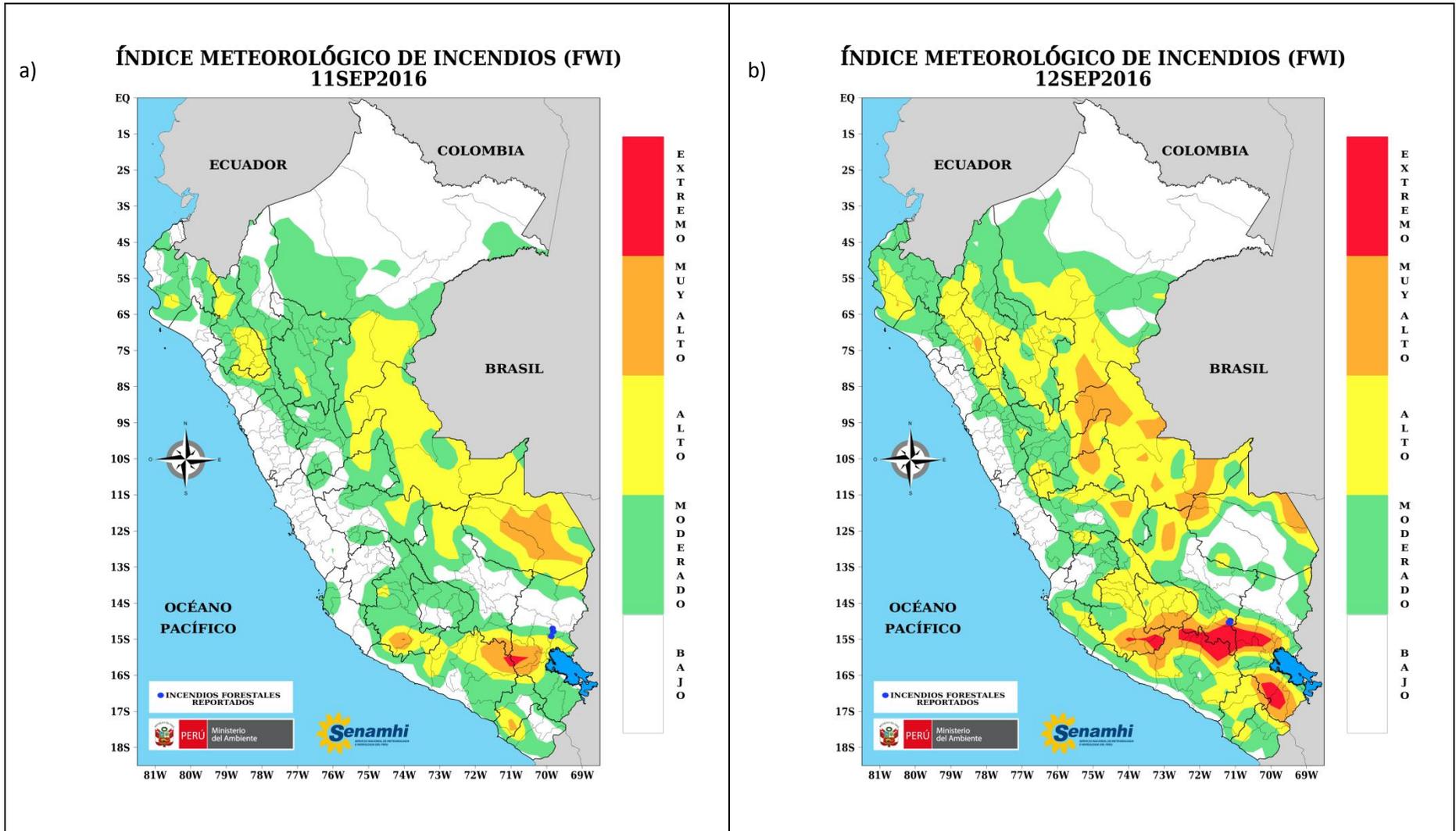


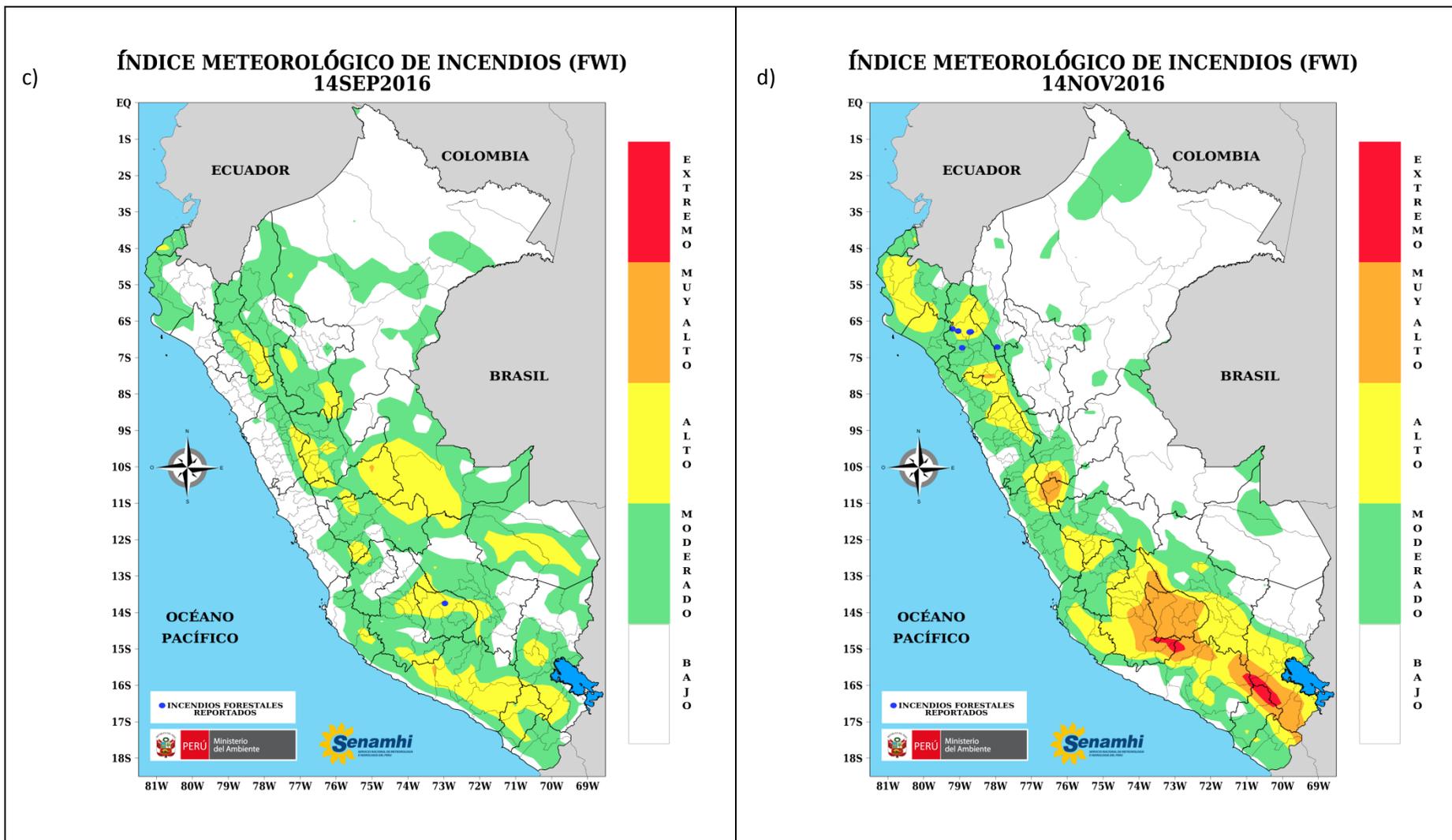
Anexo 4.- Composiciones de relación de mezcla (sombreado – g.kg^{-1}) y vectores de viento horizontal (flechas – ms^{-1}) en 500hPa en (a) días con incendio, (b) días sin incendio y (c) la diferencia de estas composiciones. Solamente las diferencias de relación de mezcla que pasan el test T-Student al 90% de significancia están sombreados (abajo). Los grados de libertad no están corregidos por persistencia.

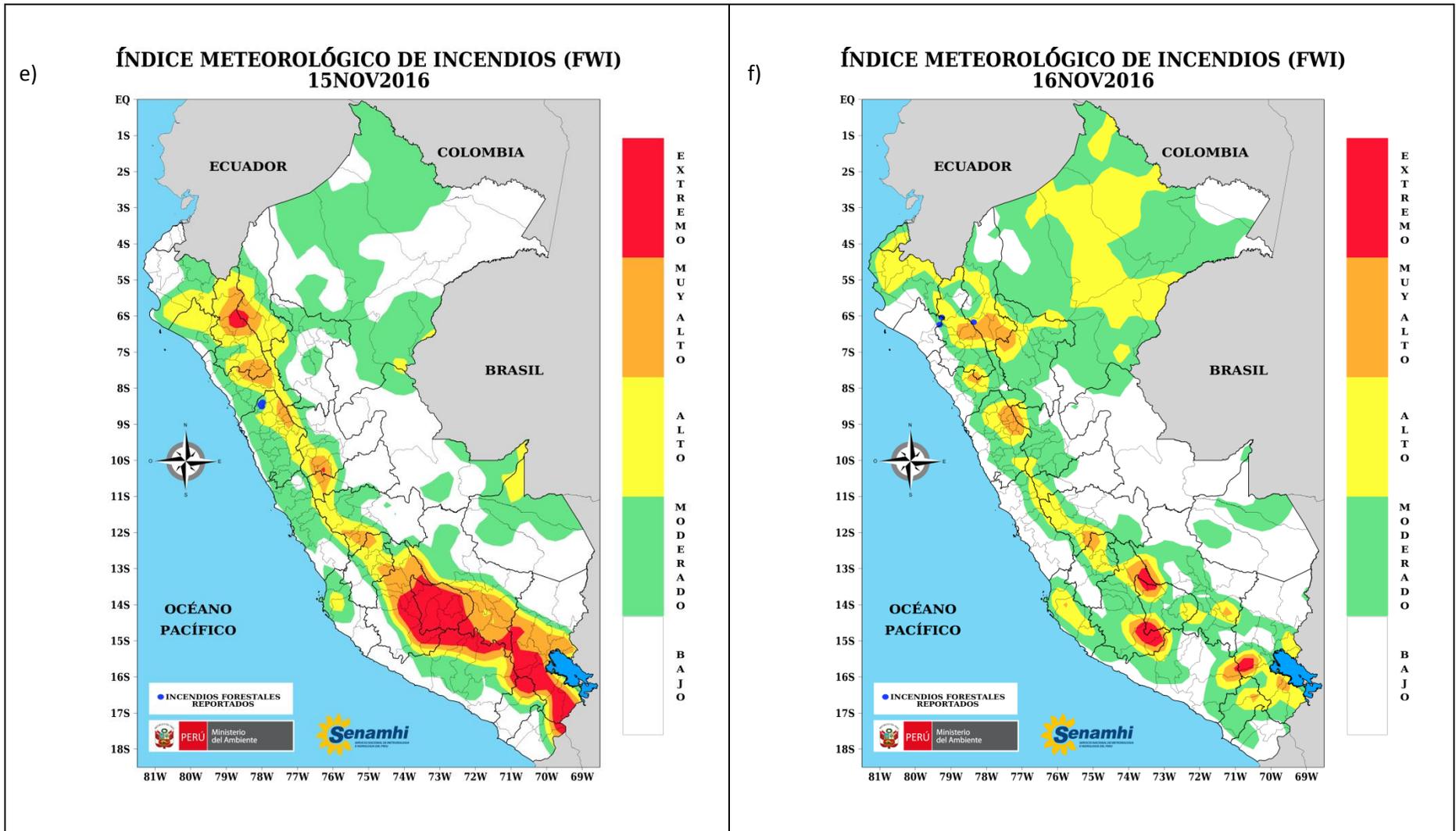


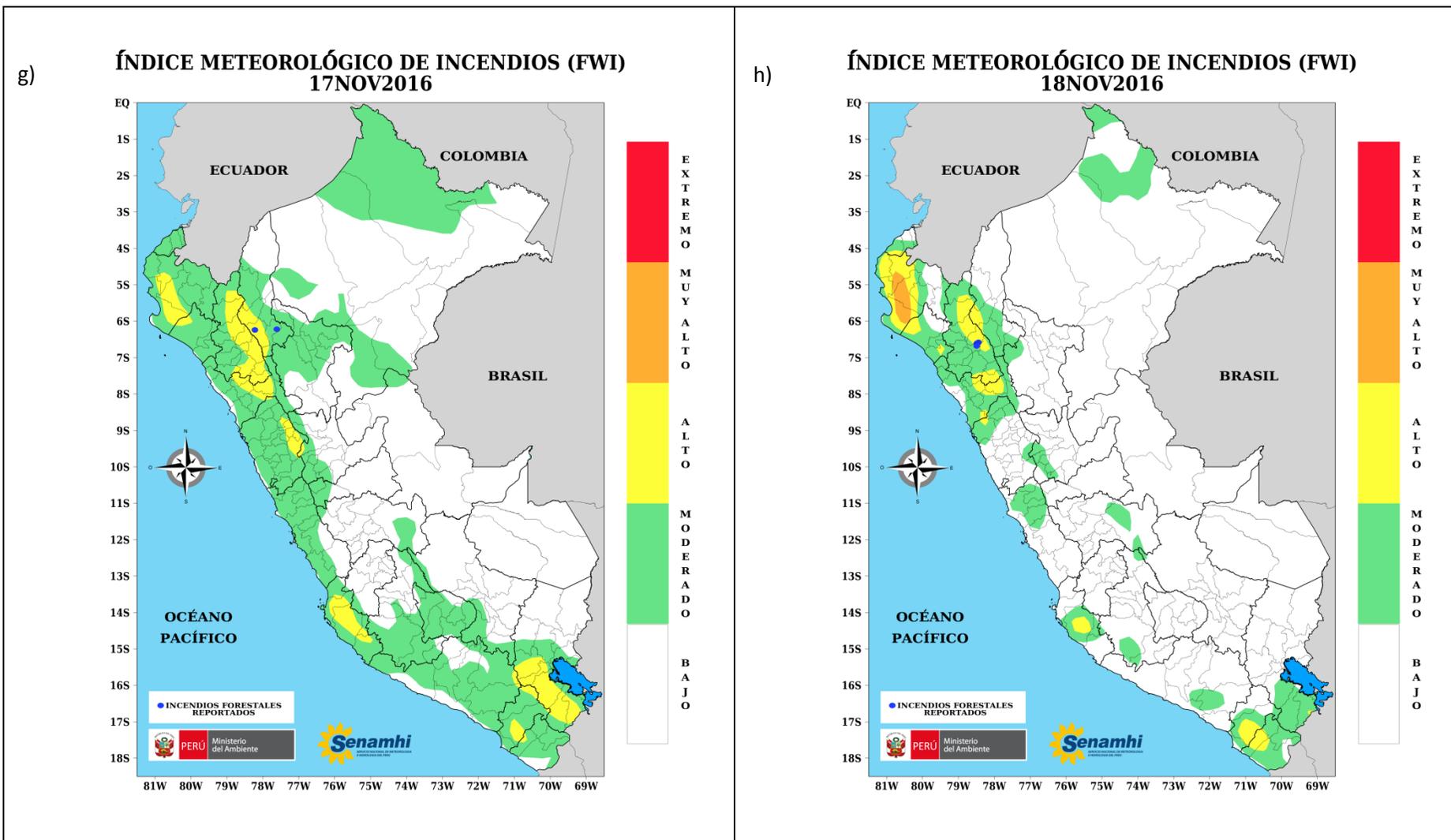
Anexo 5.- Composiciones de velocidad vertical (sombreado - $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) y humedad relativa (contornos - %) en 400 hPa en (a) días con incendio, (b) días sin incendio y (c) la diferencia de estas composiciones.

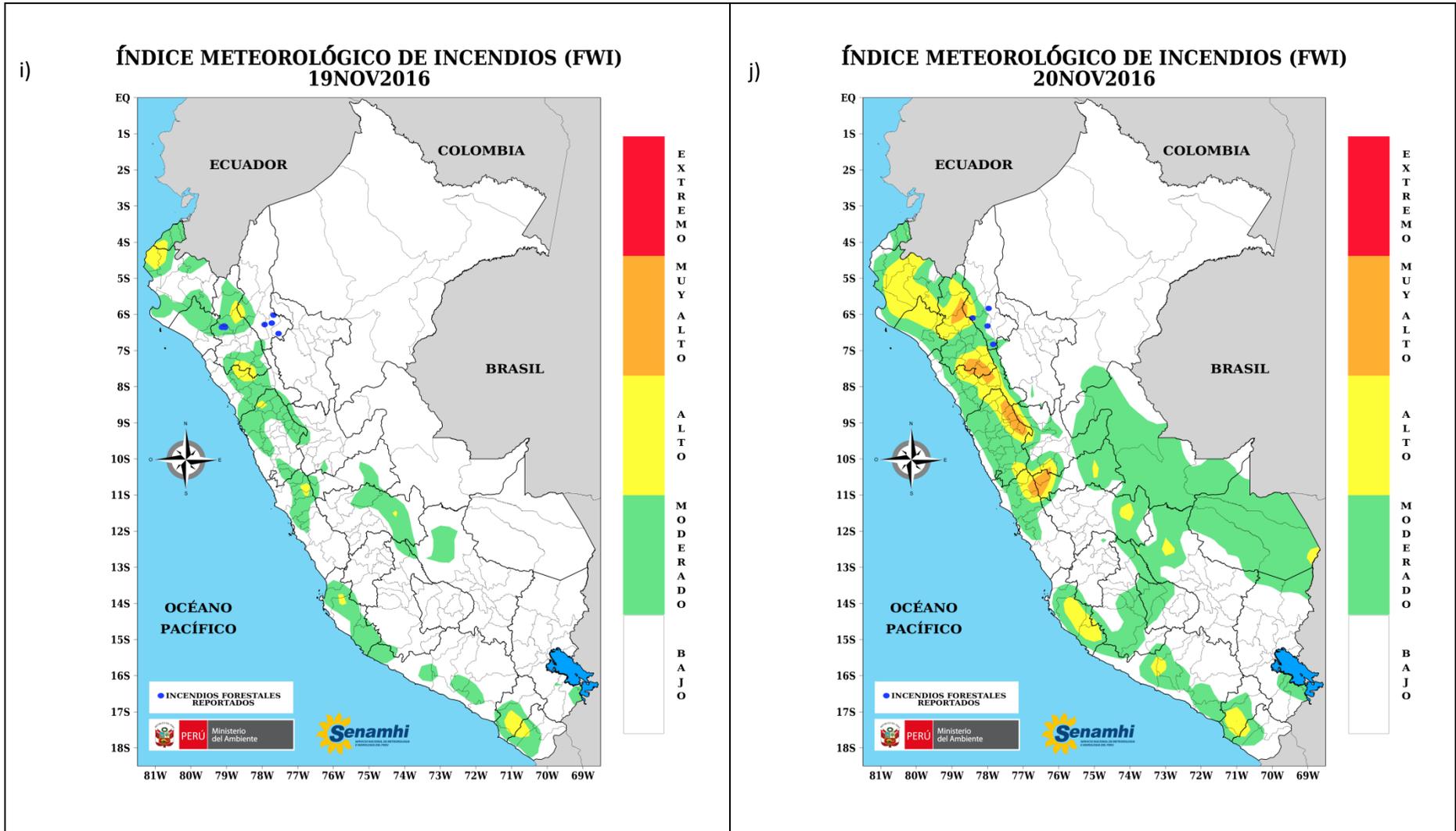
11.3. FWI

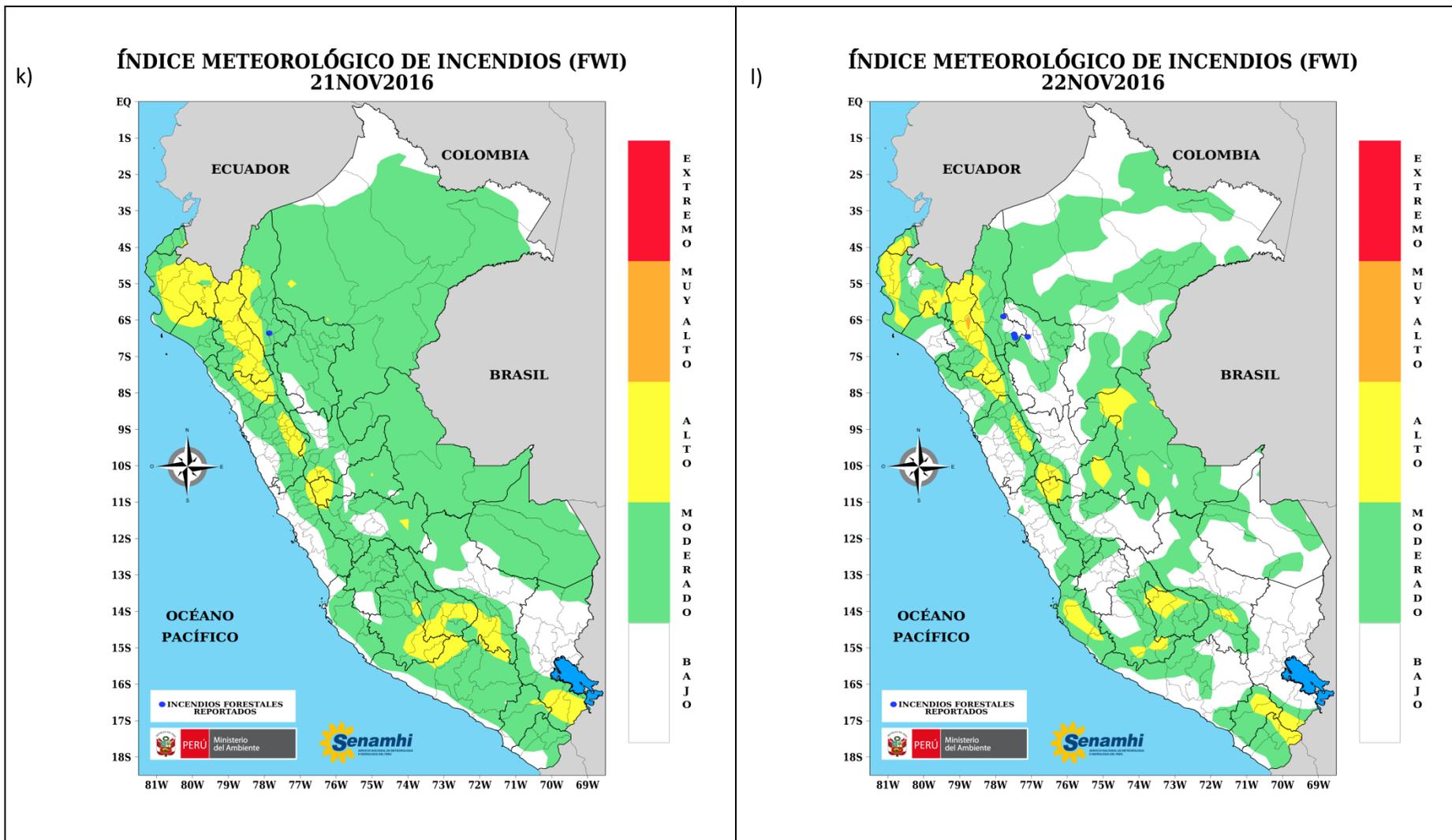












Anexo 6.- Mapas de FWI en los días de incendios forestales reportados en noviembre de 2016. Los puntos azules representan la ubicación de las localidades afectadas.