

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**ESTUDIO METODOLÓGICO PARA EL MONITOREO DE ALERTAS
TEMPRANAS DE DEFORESTACIÓN BASADO EN FOCOS DE
CALOR EN LA AMAZONÍA PERUANA**

Presentado por:

ALEJANDRA ZAMORA RIOS

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL
TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL

Lima - Perú

2016

DEDICATORIA

*A todos aquellos que trabajan
en el bosque
y para el bosque.*

AGRADECIMIENTOS

A la Organización de Tratado de Cooperación Amazónica: por hacer posibles iniciativas como el Proyecto Monitoreo de la Cobertura Forestal en la Región Amazónica que ha permitido la creación de Salas de Observación en los países Amazónicos, una de ellas en Perú.

A Rocío Malleux, Coordinadora de la Sala de Observación Perú: por darme la oportunidad de trabajar en la Sala de Observación Perú, y por su apoyo y aportes durante la elaboración de la investigación presentada.

A Ethel Rubin de Celis, profesora, compañera de trabajo y amiga: por su constante preocupación por mi futuro profesional y sus revisiones a este documento.

Al profesor Carlos Vargas, patrocinador de este documento: por sus comentarios y su buena disposición en atender mis consultas.

A Urpi Briosó y Witman García, mi pequeño y gran equipo de trabajo de Alertas Tempranas de Deforestación de la Amazonía.

A mis profesores: Jorge Chavez, Gilberto Dominguez, Carlos Chuquicaja, Milo Bozovich, Juan Carlos Ocaña y Neptalí Bustamante por incentivar me a obtener el Título profesional.

A mi hermosa familia, Yimmy y Adriano: por volver geniales los días buenos y mejores los días malos.

RESUMEN

Esta investigación fue realizada en el año 2015 como parte de las actividades de la Sala de Observación Perú de la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica y con el objetivo de establecer una metodología para el reporte de alertas tempranas de deforestación basado en el uso de focos de calor. Para tal fin, se planeó desarrollar estudios de validación donde se midiera la eficacia de los focos de calor contrastándolos con las cicatrices del paso del fuego dejadas en la superficie del terreno, vistas desde una imagen satelital. Previamente, se realizó un análisis histórico de los focos de calor en el Perú (2000 – 2015) para determinar las zonas, los meses y los sensores de donde se tomarían los focos de calor para las validaciones. La primera validación se realizó con focos de calor MODIS, contrastándolos con imágenes de satelitales Rapid Eye del año 2011-2012. La segunda validación se realizó con los focos de calor VIIRS (NPP-750m y NPP-375m) y MODIS (Aqua y Terra), contrastándolos con imágenes satelitales Landsat del 2015. Los resultados arrojaron un 93.2% de afectividad para los focos MODIS, 98.4% para los NPP-750m y 98.8% para los NPP-375m. El 48% de errores frecuentes se dieron en playas de ríos, el 38% en bosques y el 14% en zonas urbanas. Otras observaciones indicaron que áreas de 0.5ha fueron detectadas por los focos de calor de ambos sensores y que la probabilidad de detección de eventos aumenta cuando se usan los cuatro satélites en simultáneo. Finalmente, se estableció un protocolo para los reportes el cual incluye un enmascaramiento de las zonas de error frecuente y presenta una metodología para reducir los focos de calor a eventos, de manera que se evite la repetición de alertas.

Palabras claves:

alertas tempranas / focos de calor / monitoreo bosques / incendio forestal / Amazonía

ABSTRACT

This research was conducted throughout 2015 in the framework of the activities of the “Sala de Observación Peru” of the Amazon Cooperation Treaty Organization with the aim of establishing a methodology for reporting near-real-time deforestation alerts based on the active fire data. Due to this, it was planned to perform validation studies where the effectiveness of the active fire data were measured, contrasting fire scars left on the soil surface viewed from a satellite image. Previously, an historical analysis of active fire data in Peru (2000 - 2015) was performed to identify areas, months and sensors where hot spots for the validations would be taken. The first validation was performed with MODIS active fire data, contrasting with Rapid Eye satellite images from 2011-2012. The second validation was performed with VIIRS (NPP-750m and NPP-375m) and MODIS (Terra and Aqua) active fire data, contrasting with Landsat satellite scenes of 2015. The results showed a 93.2% of effectiveness for MODIS active fire data, 98.4% for NPP-750m and 98.8% for NPP-375m. 48% of frequent errors occurred at rivers’ beaches, 38% at forest and 14% at urban areas. Other observations indicated that areas of 0.5ha were detected by active fire data from both sensors and the probability of detection of events increases when the four satellites are used simultaneously. Finally, a protocol was established to consolidate the methodology, which includes a masking of the areas of frequent error and provides a methodology to reduce fire data to events, so as to avoid repetition of alerting.

Keywords:

near-real-time alert / active fire product / forest monitoring / wildfire / Amazon

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
1.	Quemas e incendios forestales en el Perú:	3
2.	Definición de los focos de calor	4
3.	Principio físico de la detección de fuego	5
4.	Características de los incendios forestales	7
5.	Errores de omisión y comisión.....	8
6.	Distorsión de los pixeles	9
7.	Tamaño mínimo del área de quema detectada	11
8.	Portales web para descarga de focos de calor:	12
9.	Sensores utilizados para la detección de focos de calor.....	15
9.1.	Sensor MODIS – Satélites Aqua y Terra.....	15
9.2.	Sensor VIIRS – Satélite Suomi NPP	20
9.3.	Sensor GOES I-M - Satélite GOES	25
9.4.	Sensor AVHRR – Satélites NOAA	27
10.	Comparación de la información proporcionada por NASA e INPE	28
III.	MATERIALES Y METODOS.....	32
1.	Materiales	32
1.1.	Equipos	32
1.2.	Insumos	32
2.	Metodología	32
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
1.	ANÁLISIS HISTÓRICO DE LOS FOCOS DE CALOR.....	34
1.1.	Análisis general.....	35
1.2.	Focos de calor del Satélite NOAA.....	38

1.3.	Focos de calor del Satélite GOES	39
1.4.	Focos de calor de los Satélites Aqua y Terra.....	41
1.5.	Análisis de los focos de calor del Satélite Suomi NPP.....	42
1.6.	Análisis de los focos de calor por región.....	43
1.7.	Análisis de los focos de calor por mes.....	46
2.	VALIDACIÓN CON IMÁGENES RAPID EYE.....	46
2.1.	PROCEDIMIENTO.....	47
2.2.	CONTRASTE DE LOS FOCOS DE CALOR CON CADA IMAGEN	50
2.2.1.	LORETO (Cód. imagen 1937304)	51
2.2.2.	LORETO (Cód. imagen 1937205)	53
2.2.3.	MADRE DE DIOS (Cód. imagen 1933414).....	55
2.2.4.	MADRE DE DIOS (Cód. imagen 1933108).....	57
2.2.5.	CUSCO (Cód. imagen 1833324).....	59
2.2.6.	CUSCO (Cód. imagen 1833025).....	61
2.2.7.	UCAYALI (Cód. imagen 1835017)	63
2.2.8.	UCAYALI (Cód. imagen 1835113).....	65
2.2.9.	SAN MARTIN (Cód. imagen 1836210)	67
2.2.10.	SAN MARTIN (Cód. imagen 1835806)	70
2.2.11.	PASCO (Cód. imagen 1834215)	71
2.2.12.	HUÁNUCO (Cód. imagen 1835009)	73
2.2.13.	JUNÍN (Cód. imagen 1834015)	75
2.3.	RECuento DE LAS DETECCIONES	77
2.3.1.	Nivel de acierto de los focos de calor según fuente (NASA/INPE).....	77
2.3.2.	Evaluación de las zonas de errores frecuentes de los focos de calor.....	78
2.3.3.	Nivel de acierto de focos de calor por tipo de región (Selva alta/Selva baja).....	79
2.3.4.	Análisis de la relación de las variables FRP y porcentaje de confianza con el porcentaje de error.....	80

2.3.5.	Análisis de la distorsión de los pixeles MODIS	82
3.	VALIDACIÓN CON IMÁGENES LANDSAT	84
3.1.	PROCEDIMIENTO	85
3.2.	CONTRASTE DE LOS FOCOS DE CALOR CON CADA IMAGEN	87
3.2.1.	SAN MARTIN / LORETO (Landsat 008/064)	87
3.2.2.	LORETO – Landsat 007/064.....	92
3.2.3.	HUANUCO-UCAYALI – Landsat 007/066	94
3.2.4.	JUNIN – Landsat 006/068.....	97
3.2.5.	CUSCO – Landsat 004/069	99
3.2.6.	MADRE DE DIOS – Landsat 002/069	102
3.3.	RECUESTO DE LAS DETECCIONES	105
3.3.1.	Nivel de acierto de los focos de calor por satélite	105
3.3.2.	Evaluación de las zonas de errores frecuentes de los focos de calor.....	106
3.3.3.	Otras observaciones.....	108
4.	DISEÑO DE LA METODOLOGÍA PARA EL REPORTE DE ALERTAS TEMPRANAS DE DEFORESTACIÓN BASADA EN FOCOS DE CALOR	108
4.1.	APORTE DE LOS ESTUDIOS DE VALIDACIÓN PARA EL DISEÑO DE LA METODOLOGÍA.....	109
4.2.	ENMASCARAMIENTO DE LAS ZONAS QUE PRESENTAN ERROR FRECUENTE	111
4.3.	OBSERVACIONES REALIZADAS DURANTE LA SALIDA DE CAMPO..	113
4.4.	ELABORACION DEL PROTOCOLO PARA REPORTAR ALERTAS TEMPRANAS BASADAS EN FOCOS DE CALOR	118
Paso 1:	Descarga de los focos de calor	118
Paso 2:	Proyección al sistema de coordenadas del país	120
Paso 3:	Agregar la información del país	121
Paso 4:	Enmascaramiento de las zonas de error frecuente.....	124
Paso 5:	Eliminación de los focos de calor repetidos para un mismo evento.....	126

Paso 6: Análisis de la información.....	133
V. CONCLUSIONES	134
VI. RECOMENDACIONES	135
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
VIII. ANEXOS	142

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Temperatura de inicio de fuego en la vegetación.....	7
Cuadro 2: Variación del tamaño de pixel por tipo de satélite.....	11
Cuadro 3: Lista de páginas que proveen focos de calor para Perú y otros países.....	13
Cuadro 4: Características técnicas del sensor MODIS.....	15
Cuadro 5: Características de las bandas del sensor MODIS.....	16
Cuadro 6: Bandas de MODIS usadas en la detección del algoritmo MOD14.....	19
Cuadro 7: Características técnicas del sensor VIIRS.....	20
Cuadro 8: Características de las bandas del sensor VIIRS	21
Cuadro 9: Características de las bandas del satélite GOES.....	26
Cuadro 10: Características de los satélites NOAA.....	27
Cuadro 11: Comparación de la información proporcionada en el shapefile de focos de calor de la NASA e INPE.....	29
Cuadro 12: Cantidad de registros de focos de calor anuales por satélite, desde el 01/ene/2000 al 31/mayo/2015.....	35
Cuadro 13: Lista de imágenes Rapid Eye usadas para el primer estudio de validación....	49
Cuadro 14: Resumen de aciertos/errores - Escena de Loreto Rapid Eye 1937304.....	52
Cuadro 15: Focos de calor registrados por la NASA – Escena Rapid Eye 1937304.....	52
Cuadro 16: Resumen de aciertos/errores – Escena de Loreto Rapid Eye 1937205.....	53
Cuadro 17: Focos de calor registrados por la NASA – Escena Rapid Eye 1937205.....	54
Cuadro 18: Resumen de aciertos/errores – Escena de Madre de Dios Rapid Eye 1933414	55
Cuadro 19: Focos de calor registrados por la NASA – Escena de Rapid Eye 1933414....	56
Cuadro 20: Resumen de aciertos/errores – Escena de Madre de Dios Rapid Eye 1933108	57
Cuadro 21: Focos de calor registrados por la NASA –Escena Rapid Eye 1933108.....	57
Cuadro 22: Resumen de aciertos/errores – Escena de Cusco Rapid Eye 1833324.....	59
Cuadro 23: Focos de calor registrados por la NASA - Escena Rapid Eye 1833324	60
Cuadro 24: Resumen de aciertos/errores – Escena de Cusco Rapid Eye 1833025.....	61
Cuadro 25: Focos de calor registrados por la NASA - Escena Rapid Eye 1833025	61
Cuadro 26: Resumen de aciertos/errores – Escena de Ucayali Rapid Eye 1835017	64

Cuadro 27: Focos de calor registrados por la NASA –Escena de Ucayali Rapid Eye 1835017	64
Cuadro 28: Resumen de aciertos/errores – Escena de Ucayali Rapid Eye 1835113	65
Cuadro 29: Focos de calor registrados por la NASA –Escena de Ucayali Rapid Eye 1835113	66
Cuadro 30: Resumen de aciertos/errores – Escena de San Martín Rapid Eye 1836210....	68
Cuadro 31: Focos de calor registrados por la NASA –Escena de San Martín Rapid Eye 1836210	68
Cuadro 32: Resumen de aciertos/errores – Escena de Madre de Dios Rapid Eye 1933108	71
Cuadro 33: Focos de calor registrados por la NASA –Escena de San Martín Rapid Eye 1937304	71
Cuadro 34: Resumen de aciertos/errores – Escena de Pasco Rapid Eye 1834215	72
Cuadro 35: Focos de calor registrados por la NASA –Escena de Pasco Rapid Eye 1834215	72
Cuadro 36: Resumen de aciertos/errores – Escena de Huánuco Rapid Eye 1835009	73
Cuadro 37: Focos de calor registrados por la NASA –Escena de Huánuco Rapid Eye 1835009	74
Cuadro 38: Resumen de aciertos/errores – Escena de Junín Rapid Eye 1834015	75
Cuadro 39: Focos de calor registrados por la NASA –Escena de Junín Rapid Eye 1834015	76
Cuadro 40: Resumen del total de aciertos y errores de los focos de calor de NASA e INPE	77
Cuadro 41: Resumen de aciertos y errores de los focos de calor de NASA disgregado en Selva alta y Selva baja.	79
Cuadro 42: Confianza y FRP de las falsas alarmas (focos con error) del primer estudio de validación	80
Cuadro 43: Lista de los 20 focos con menor porcentaje de confianza.....	81
Cuadro 44: Lista de los 20 focos con menor valor de FRP.	81
Cuadro 45: Variación de la medida latitudinal (Scan) de pixel.	82
Cuadro 46: Variación de la medida longitudinal (Track) del pixel.	83
Cuadro 47: Lista de imágenes Landsat usadas para el segundo estudio de validación.	86
Cuadro 48: Resultados para la escena Landsat San Martín/Loreto – Landsat 008/064.....	87
Cuadro 49: Resultados para la escena Landsat Loreto – Landsat 007/064.....	92

Cuadro 50: Resultados para la escena Landsat Huánuco-Ucayali – Landsat 007/066	94
Cuadro 51: Resultados para la escena Landsat Junín – Landsat 006/068.....	98
Cuadro 52: Resultados para la escena Landsat Cusco – Landsat 004/069	100
Cuadro 53: Resultados para la escena Landsat Madre de Dios – Landsat 002/069.....	102
Cuadro 54: Resumen del total de aciertos y errores de los focos de calor de MODIS, NPP-750m y NPP-375m	105
Cuadro 55: Resultados de los registros tomados en la visita de campo.....	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ejemplo de la cicatriz de quema.....	4
Figura 2: Representación teórica de un foco de calor y la cicatriz de quema asociada a él.	5
Figura 3: Ejemplificación gráfica de la Ley de Wien.	6
Figura 4: Distribución de temperaturas (°C) en un frente de incendio.....	8
Figura 5: Ejemplificación de la distorsión de los pixeles en una imagen MODIS.	10
Figura 6: Distorsión del tamaño de pixel NOAA.....	10
Figura 7: Pruebas de validación realizadas por INPE/IBAMA el 27 y 28 de setiembre de 2012.	12
Figura 8: Plataforma de descarga de focos de calor de Queimadas – INPE.	14
Figura 9: Plataforma de descarga de focos de calor de FIRMS	14
Figura 10: Algoritmo MOD14 para la detección de focos de calor.	19
Figura 11: Variación de la longitud de los pixeles AVHRR, OLS y VIIRS a lo largo del escaneo.	22
Figura 12: Variación del área del pixel AVHRR, MODIS, OLS y VIIRS a lo largo del escaneo.	23
Figura 13: Comparación del composite global formado por NPP VIIRS y Aqua MODIS.	24
Figura 14: Registros de focos de calor para Perú, para los años 2013 y 2014.....	25
Figura 15: Imagen de GOES Este.	26
Figura 16: Vida útil de los satélites NOAA	28
Figura 17: Cantidad de registros de focos de calor anuales por satélite, desde el 01/ene/2000 al 31/may/2015	36
Figura 18: Comparación de los focos de calor de satélite Aqua de los años 2002-2014 (izquierda – morado) con las zonas de No Bosque en la Amazonía (derecha – rojo).....	37
Figura 19: Focos de calor reportados por los satélites NOAA desde el año 2001 hasta el 2015.	38
Figura 20: Distribución de los focos de calor reportados por NOAA para el año 2014 (amarillo) y el 2015 (rojo).	39
Figura 21: Focos de calor reportados por los satélites GOES desde el año 2002 hasta el 2014.	40

Figura 22: Focos de calor del año 2013 dados por el satélite GOES 13 y GOES 12. Capturas de Zona de Piura (imagen izquierda) y Ucayali y Huánuco (imagen derecha)....	40
Figura 23: Focos de calor reportados por el satélite GOES. Izquierda: Focos de calor del año 2014, toma de la costa norte. Derecha: Focos de calor del año 2015, toma de la región de Ica.	41
Figura 24: Gráfica de la evolución de los focos de los satélites TERRA y AQUA.....	41
Figura 25: Distribución de los focos de calor reportados por MODIS para el año 2014 (amarillo) y el 2015 (rojo).	42
Figura 26: Distribución de los focos de calor reportados por NPP para el año 2014 (imagen izquierda: amarillo) y el 2015 (imagen derecha: rojo NPP-750 y naranja NPP-375).....	43
Figura 27: Quince regiones con mayor cantidad de focos de calor (2006-2014) reportados por el satélite Aqua.	44
Figura 28: Densidad de Kernel de los focos de calor de los años 2011, 2012, 2013 y 2014	45
Figura 29: Variación de focos de calor del satélite Aqua por mes (2006-2014).....	46
Figura 30: Mapa de las escenas Rapid Eye a utilizar en el primer estudio de validación..	48
Figura 31: Escena Completa Rapid Eye 1937304 - Loreto.....	51
Figura 32: Errores en zonas de ríos – Escena de Loreto Rapid Eye 1937304	52
Figura 33: Escena completa Rapid Eye 1937205 - Loreto	53
Figura 34: Detalle de los focos de calor – Escena de Loreto Rapid Eye 1937205	54
Figura 35: Detalle de error en ríos – Escena de Loreto Rapid Eye 1937205	54
Figura 36: Escena completa Rapid Eye 1933414 – Madre de Dios.....	55
Figura 37: Detalle de focos de calor correspondientes a pixeles distorsionados - Rapid Eye 1933414.....	56
Figura 38: Detalle de correspondencia de focos de calor con cicatrices de quema - Rapid Eye 1933414.....	57
Figura 39: Escena Completa Rapid Eye 1933108 – Madre de Dios.....	58
Figura 40: Error en zonas de Bosque – Escena Rapid Eye 1933108.....	59
Figura 41: Escena Completa Rapid Eye 1833324 - Cusco	60
Figura 42: Detalle del contraste focos de calor vs cicatrices de quema – Rapid Eye 1833324	60
Figura 43: Escena Completa Rapid Eye 1833025 – Cusco.....	61

Figura 44: Detalle del contraste focos de calor vs cicatrices de quema – Rapid Eye 1833025	62
Figura 45: Detalle de tres vistas del contraste focos de calor vs cicatrices de quema – Rapid Eye 1833025	63
Figura 46: Escena Completa Rapid Eye 1835017 – Ucayali	63
Figura 47: Detalle del error en zonas de playas de ríos – Rapid Eye 1835017.....	64
Figura 48: Detalle del error en zonas pantanosas – Rapid Eye 1835017.....	65
Figura 49: Escena Completa Rapid Eye 1835113 – Ucayali	67
Figura 50: Escena Completa Rapid Eye 1836210 – San Martín.....	68
Figura 51: Detalle de error en zona de cultivo de palma - Rapid Eye 1836210 – San Martín	69
Figura 52: Detalle del contraste focos de calor vs cicatrices de quema – Rapid Eye 1836210.....	70
Figura 53: Escena Completa Rapid Eye 1835806 – San Martín.....	70
Figura 54: Detalle del contraste focos de calor vs cicatrices de quema – Rapid Eye 1835806.....	71
Figura 55: Escena Completa Rapid Eye 1834215 – Pasco	72
Figura 56: Detalle de error en zona de bosque - Rapid Eye 1834215 – Pasco	73
Figura 57: Escena Completa Rapid Eye 1835009 –Huánuco	74
Figura 58: Escena Completa Rapid Eye 1834015 - Junín.....	75
Figura 59: Detalle del error en zonas urbanas – Escena de Huánuco Rapid Eye 1835009	76
Figura 60: Detalle del contraste focos de calor vs cicatrices de quema – Rapid Eye 1834015	77
Figura 61: Comparación de aciertos/errores de los focos de calor de la NASA e INPE analizados.	78
Figura 62: Resultado del primer estudio de validación para focos de calor provenientes del INPE: acierto, errores y disgregado de errores.....	78
Figura 63: Curva de porcentaje acumulado (cantidad de pixeles) por medida latitudinal (Scan) del pixel.....	83
Figura 64: Mapa de escenas Landsat seleccionadas para el segundo estudio de validación	85
Figura 65: Escena completa SAN MARTIN / LORETO – Landsat 008/064 (LC80080642015260).	88

Figura 66: Detalle de cicatrices de quema captados por satélite MODIS y NPP-375M independientemente.....	89
Figura 67: Detalle de cicatrices de quema captados por varios satélites en simultáneo, solo por un satélite o por ninguno	89
Figura 68: Detalle del contraste de coloración de dos imágenes de la misma zona con diferente fecha (julio – izquierda, septiembre – derecha)	90
Figura 69: Detalle de la capa No Bosque al 2014 (en rojo) en contraste con la imagen analizada.....	90
Figura 70: Detalle de error en zonas urbanas. Escena Landsat 008/064.....	91
Figura 71: Detalle de una quema en curso. Imagen izquierda (julio 2015), imagen derecha (setiembre 2015).....	91
Figura 72: Escena completa LORETO – Landsat 007/064 (LC80070642015253).....	92
Figura 73: Detalle de error en zonas de ríos y playas. Escena Landsat 007/064	93
Figura 74: Detalle de nuevas áreas quemadas. Imagen izquierda (2014), imagen derecha (2015)	94
Figura 75: Escena completa HUANUCO-UCAYALI – Landsat 007/066 (LC80070662015253)	95
Figura 76: Detalle de cicatrices de quema encontradas – Escena Landsat 007/066	96
Figura 77: Detalle de errores de detección en los focos de calor MODIS.....	96
Figura 78: Detalle de errores en zonas de playas (izquierda) y zonas urbanas (derecha)..	97
Figura 79: Escena completa JUNÍN - Landsat 006/068 (LC80060682015278).....	97
Figura 80: Detalle de área mínima de quema detectada por los focos de calor - Escena 006/068	98
Figura 81: Detalle de cicatrices no detectadas – Escena 006/068.....	99
Figura 82: Escena completa CUSCO – Landsat 004/069 (LC80040692015264)	99
Figura 83: Detalles de cicatrices de gran tamaño en Selva Alta - Escena Landsat 004/069	100
Figura 84: Detalles de cicatrices no detectadas - Escena Landsat 004/069	101
Figura 85: Detalles de cicatrices no detectadas - Escena 004/069.....	101
Figura 86: Escena completa MADRE DE DIOS – Landsat 002/069 (LC80020692015314) y (LC80020692015266 – imagen de apoyo)	102
Figura 88: Detalle de cicatrices - Escena del 10/nov	103
Figura 87: Detalle de cicatrices - Escena del 23/set.....	103
Figura 89: Detalle de área mínima de cicatriz captada en esta escena.....	104

Figura 90: Detalle de cicatrices no captadas por ningún satélite.	104
Figura 91: Total de focos de calor analizados divididos en: aciertos, no válidos, errores.	105
Figura 92: Distribución de errores porcentual por satélite y tipo de error en el total de las escenas analizadas.	106
Figura 93: Distribución de errores por satélite y tipo de error en el total de las escenas analizadas.	107
Figura 94: 94a-Máscara en zonas de ríos y playas. 94b-Máscara en zonas urbanas.....	112
Figura 95: 95a-Máscara en el volcán Ubinas en Moquegua. 95b-Imagen satelital Digital Globe 2016 (Google 2016) del volcán Ubinas. 95c-Máscara en la Planta de Gas Las Malvinas en Cuzco. 95d-Imagen satelital Digital Globe 2016 (Google 2016) de la Planta de Gas Las Malvinas.	112
Figura 96: Trayecto realizado en la salida de campo Cuzco – Madre de Dios (ruta en rojo). Los triángulos amarillos son los puntos tomados en campo.	113
Figura 97: Mosaico fotográfico de la zona de incendio en cercanías a la laguna Huacarpay. Se observa la cicatriz del incendio en la cumbre de los cerros.	115
Figura 98: Escena Landsat 004/069 del 08 de octubre 2015 que muestra el incendio de la laguna Huacarpay en curso.	115
Figura 99: Escena Landsat 004/069 del 23 de octubre 2015 que muestra la cicatriz dejada por el incendio de la laguna Huacarpay.	116
Figura 100: Escenas Landsat 002/068 que registran tres evento. La superior es del 2014, la segunda es del 10 de noviembre 2015.....	117
Figura 101: Fotografía del evento 266, acontecido el 08/set/2015. Se evidencia vegetación ya crecida.....	117
Figura 102: Fotografía del evento 267, acontecido el 29/set/2015. Se evidencia vegetación ya crecida.....	117
Figura 103: Fotografía de evento 268, de fecha 29/set/2015. Se evidencia troncos aun quemándose.	118
Figura 104: Página de inicio del “Monitoreo de Queimadas e Incendios por satélite em tempo quase-real” del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Brasil	119
Figura 105: Página de descarga de los focos de calor de la Base de Datos de Queimadas - INPE	120
Figura 106: Proceso para proyectar los focos de calor descargados al sistema de coordenadas del país.....	121

Figura 107: Herramienta para intersectar los focos de calor con los límites políticos deseados.....	122
Figura 108: Herramienta para realizar el “Spatial Join” del shapefile de focos de calor con la información deseada.	123
Figura 109: Tabla de focos de calor con datos agregados del shapefile Bosque/No Bosque 2014	123
Figura 110: Proceso para habilitar la edición en la capa de focos de calor a enmascarar.	124
Figura 111: Proceso para aplicar la máscara de error a los focos de calor descargados ..	125
Figura 112: Proceso para eliminar los focos de calor dentro de la máscara.	125
Figura 113: Secuencia que ejemplifica funciona la eliminación de focos de calor repetidos para un mismo evento.....	126
Figura 114: Proceso para añadir un nuevo campo de datos a una tabla.....	127
Figura 115: Proceso para seleccionar elementos deseados dentro de una tabla de atributos.	128
Figura 116: Proceso para la creación de buffers	129
Figura 117: Proceso para convertir los buffers redondos en cuadrados.....	130
Figura 118: Proceso para seleccionar los buffers de los focos NPP-750m intersectados con NPP-375m	131
Figura 119: Proceso para exportar los elementos seleccionados a un nuevo shapefile. ..	131
Figura 120: Proceso para mostrar solo los elementos con atributos definidos por el usuario de un shapefile.....	132
Figura 121: Proceso para seleccionar los focos del NPP-750m a eliminar.....	133

LISTA DE ACRÓNIMOS

EOSDIS: Earth Observing System Data and Information System

FRP: Fire Radiative Power

IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Brasil)

GOES: Geostationary Operational Environmental Satellite

MINAGRI: Ministerio de Agricultura y Riego del Perú

MINAM: Ministerio del Ambiente del Perú

MODIS: Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (sensor de los satélites Aqua y Terra)

NASA: National Aeronautics and Space Administration (EEUU)

NGDC: National Geophysical Data Center

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

NPP-750m: Hace referencia al producto (focos de calor) derivados de las bandas de resolución espacial 750m del sensor VIIRS

NPP-375m: Hace referencia al producto (focos de calor) derivados de las bandas de resolución espacial 375m del sensor VIIRS

OTCA: Organización del Tratado de Cooperación amazónica

PNCB: Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático de Ministerio del Ambiente (MINAM)

SERFOR: Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI)

SNMCB: Sistema Nacional de Monitoreo de la Cobertura de Bosques

Suomi NPP: Suomi National Polar-orbiting Partnership

VIIRS: Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (sensor del satélite Suomi NPP)

I. INTRODUCCIÓN

A mediados del 2012 empezó la implementación del Proyecto Monitoreo de la Cobertura Forestal en la Región Amazónica de la Organización del Tratado de Países Amazónico (OTCA) en el Perú, teniendo entre sus principales metas la implementación de Salas de Observación en todos los países miembros de la OTCA. A la Sala de Observación Perú (SdO Perú) se le dio la misión de apoyar al Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) y al Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático (PNCB) del Ministerio de Medio Ambiente (MINAM) en la implementación de un Sistema Nacional de Monitoreo de la Cobertura de Bosques (SNMCB) encargado de reportar cifras oficiales sobre la situación de los bosques. Para tal fin, se conformó una Unidad Conjunta (SERFOR-MINAM-SdO Perú) para la implementación del sistema. Se empezó trabajando una línea base de deforestación del 2000 al 2010 para luego elaborar reportes con datos anuales.

Conforme se avanzó en la definición de la línea base, se fueron evidenciando otras necesidades de información de los Ministerios y también del proyecto. Por ello, se decidió de manera conjunta, que el sistema debe estar conformado por cuatro componentes: (1) Deforestación (el cual ya se venía trabajando), (2) Degradación, (3) Uso y Cambio de uso de suelo, y (4) Alertas tempranas de deforestación. Para todos los componentes, el ámbito de trabajo objetivo es el territorio nacional continental; sin embargo, se inició con el ámbito de la región amazónica por ser la región con mayor superficie de bosques en el país, por tener mayor cantidad de información y además ser el ámbito del proyecto OTCA.

El desarrollo del componente de Alertas Tempranas de deforestación cobró importancia ante la necesidad de reportar los avances de la deforestación tan pronto como ocurriesen de manera que se puedan tomar las acciones pertinentes y a tiempo para su remediación. Si bien existían algunas iniciativas puntuales en el país sobre el tema, la Unidad Conjunta aún no había generado ninguna información al respecto y era necesario definir un plan de acción y una metodología sustentada científicamente. En ese sentido, se fijaron dos líneas de trabajo: alertas tempranas de deforestación basadas en detección de cambios en la cobertura del bosque y alertas tempranas de deforestación basada en el uso de focos de calor. Se acordó que un especialista de la SdO Perú estuviera a cargo de la investigación de este último tema.

El uso de focos no permite determinar tamaño del área afectada pero permite indicar la presencia de fuego con solo horas de desfase de haber ocurrido el evento. Esto cobra mucha importancia en un país como el nuestro donde más del 70% de la deforestación es a pequeña escala (MINAM 2015) causada principalmente por la apertura de nuevas áreas para la agricultura y ganadería (FIP 2012) a través de la práctica de roza y quema (CSA-UPCH 2010). Esta quema es detectada por los satélites y se reporta como un foco de calor.

La investigación comenzó en marzo del 2015 y concluyó a finales de diciembre de 2015. La revisión bibliográfica en la cual se basó la investigación fue realizada entre marzo 2015 a mayo 2015. La documentación de los resultados obtenidos y la edición del texto se realizaron de enero hasta junio del 2016. Cabe mencionar que es importante tomar en cuenta las fechas dadas pues la tecnología en el campo de productos de información derivados de satélites varía rápidamente.

Este trabajo documenta toda la investigación realizada desde que se planteó la posibilidad de dar alertas de pérdida de bosque basadas en los focos de calor hasta que se alcanzó el objetivo de consolidar una metodología para el reporte de estas alertas. Entre los principales resultados se tiene el desarrollo de un análisis histórico de focos de calor en el país, los dos procesos de validación de los focos de calor para probar su nivel de acierto en el país, y la elaboración de un protocolo para el procesamiento de focos de calor descargados a fin de poder dar los reportes de las alertas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

1. QUEMAS E INCENDIOS FORESTALES EN EL PERÚ:

Existen diversos conceptos para definir quemas e incendios forestales. En el Perú tenemos algunos estudios que se han realizado entre los cuales podemos citar:

Manta y León (2004) definen que incendio forestal se refiere a aquellos fuegos que ocurren sobre la vegetación que se crece en tierras de producción forestal (F) y tierras de protección (X). Así mismo, se denomina pequeños incendios a aquellos menores de 1.5ha.

El Centro para la Sostenibilidad Ambiental de la Universidad Peruana Cayetano Heredia, en su Boletín sobre quemas agropecuarias e incendios forestales (CSA-UPCH 2010) dice que en la Sierra y la Selva del Perú, la presencia de fuego se debe principalmente a la práctica masiva de realizar quemas. La época usual para esta práctica es entre julio y diciembre, la que coincide con la época seca o verano regional y donde se encienden tanto pastos, purmas, como bosques recién tumbados. El objetivo de esta práctica es muy variado: desbrozar el suelo, fertilizarlo con la ceniza de las plantas, ahuyentar alimañas, e incluso, para atraer la lluvia. En apariencia, el fuego resulta ser más práctico y económico que desbrozar a mano o con maquinaria, o comprar fertilizante; sin embargo, a largo plazo o cuando la quema se torna fuera de control puede ocasionar costos en la calidad de vida de las personas y el ecosistema.

En diciembre de 2015, se dio el Seminario Regional sobre incendios forestales para Países Miembros de la OTCA (OTCA 2015) donde participaron representantes del Cuerpo General de Bomberos, de entidades encargadas de control de riesgos y funcionarios del gobierno regional y de los Ministerios encargados del tema de incendios forestales en cada país. Los países asistentes fueron Bolivia, Brasil, Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela. Uno de los temas discutidos fueron las definiciones de quema e incendio forestal. Pese a las ligeras variaciones en cada país se identificó dos principales diferencias entre ambos conceptos: la primera es que una quema está asociada a una vegetación agropecuaria y un incendio está asociado a una vegetación silvestre (bosques y otras coberturas forestales); la segunda es que una quema es un fuego bajo control y un incendio es un fuego descontrolado.

2. DEFINICIÓN DE LOS FOCOS DE CALOR

Los focos de calor o puntos calientes son anomalías térmicas localizadas a partir de imágenes satelitales que en general se corresponden a incendios (SIB/APN s.f.). Según la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO s.f.), un foco de calor o punto de calor es cualquier punto de la superficie terrestre que emita suficiente temperatura para que el pixel de una imagen de satélite lo reporte con una temperatura elevada en comparación con los pixeles vecinos, cumpliendo con los umbrales establecidos en el algoritmo de origen. Para su detección se utiliza un algoritmo contextual que compara la temperatura de brillo conjunta de un pixel candidato y sus vecinos, con valores umbrales típicos de incendios en las bandas de $4\ \mu\text{m}$ - $11\ \mu\text{m}$ (Giglio et al. 2003). El **foco de calor** se reporta como un punto, ubicado al centro de pixel activado. El **evento** que ocasionó que se active el pixel puede ser un incendio, una quema agrícola, fuegos industriales, volcanes activos u otros. El área quemada visualizada a través de una imagen se conoce también como **cicatriz de quema**. En la Figura 1 se observa dos imágenes satelitales donde se evidencian cicatrices de quema.

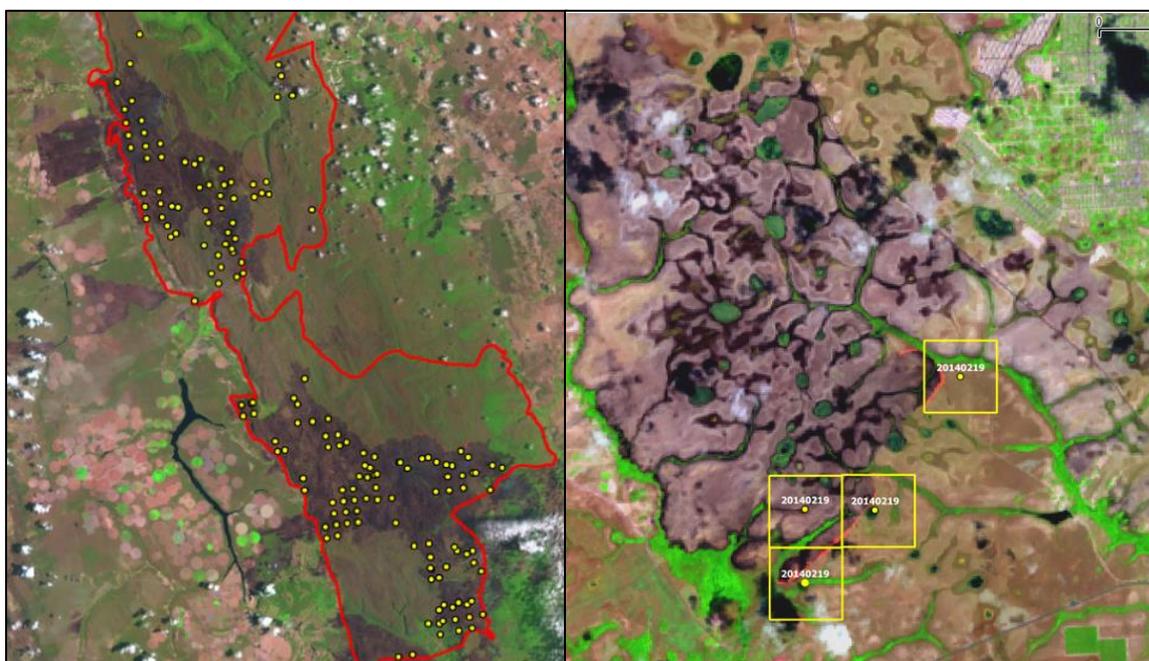


Figura 1: Ejemplo de la cicatriz de quema (color púrpura oscuro). Se observan los focos de calor (puntos amarillos) sobrepuestos a la imagen satelital.

Fuente: (CPTEC(a) 2014)

La Figura 2 es una representación teórica de los focos de calor y los eventos que los originan. Como se observa, el foco de calor es siempre el centro del pixel activo, independientemente del lugar dentro del pixel donde se produce el evento. El foco puede estar representando uno o varios eventos ocurriendo en el mismo pixel; un evento a gran escala puede activar varios pixeles al mismo tiempo y ser representados, en consecuencia, por varios focos de calor.

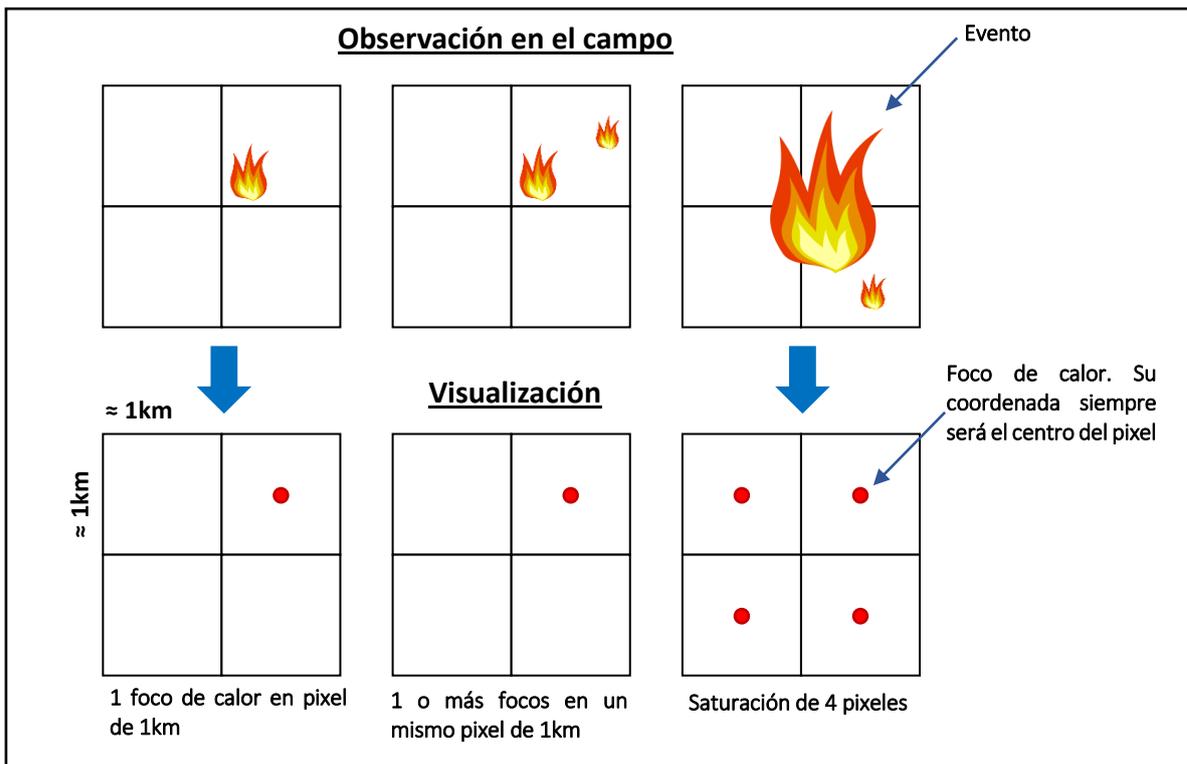


Figura 2: Representación teórica de un foco de calor y la cicatriz de quema asociada a él.

Fuente: (EOSDIS s.f.)

3. PRINCIPIO FÍSICO DE LA DETECCIÓN DE FUEGO

Los focos de calor se determinan en base a la información que nos brindan los sensores de los satélites, principalmente la banda termal. Esta banda detecta energía electromagnética en las longitudes de onda de 3.7µm a los 4.1µm. Esta energía es relacionada con la temperatura del cuerpo que la emite, de acuerdo a la ley de Wien.

La ley de desplazamiento de Wien establece que la longitud de onda para la cual es máxima la emisión del cuerpo negro es inversamente proporcional a su temperatura absoluta. (Pinilla Ruiz s.f.). Cuando aumenta la temperatura de un cuerpo negro, aumenta la energía radiada

por él en general y el pico de la curva de radiación se mueve a longitudes de onda más corta (Olmo y Nave 2012). Por ejemplo, las estrellas azules que alcanzan los 7000 K, tienen su máxima longitud de onda en el espectro azul (427-476 nm); mientras que nuestro sol que bordea los 5000 K tiene su máxima longitud de onda en el espectro amarillo (570-5814 nm). La ecuación que la representa la Ley de Wien es:

$$\lambda_{max} = \frac{c}{T}$$

ó

$$\lambda_{max} \cdot T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Donde:
 C: constante de Wien (2.898×10^{-3} m.K) en Kelvin por metro.
 T: Temperatura en Kelvin

La Figura 3 ejemplifica lo dicho. Se observa que las curvas cuyo pico tienen la mayor temperatura pertenecen a menores longitudes de onda.

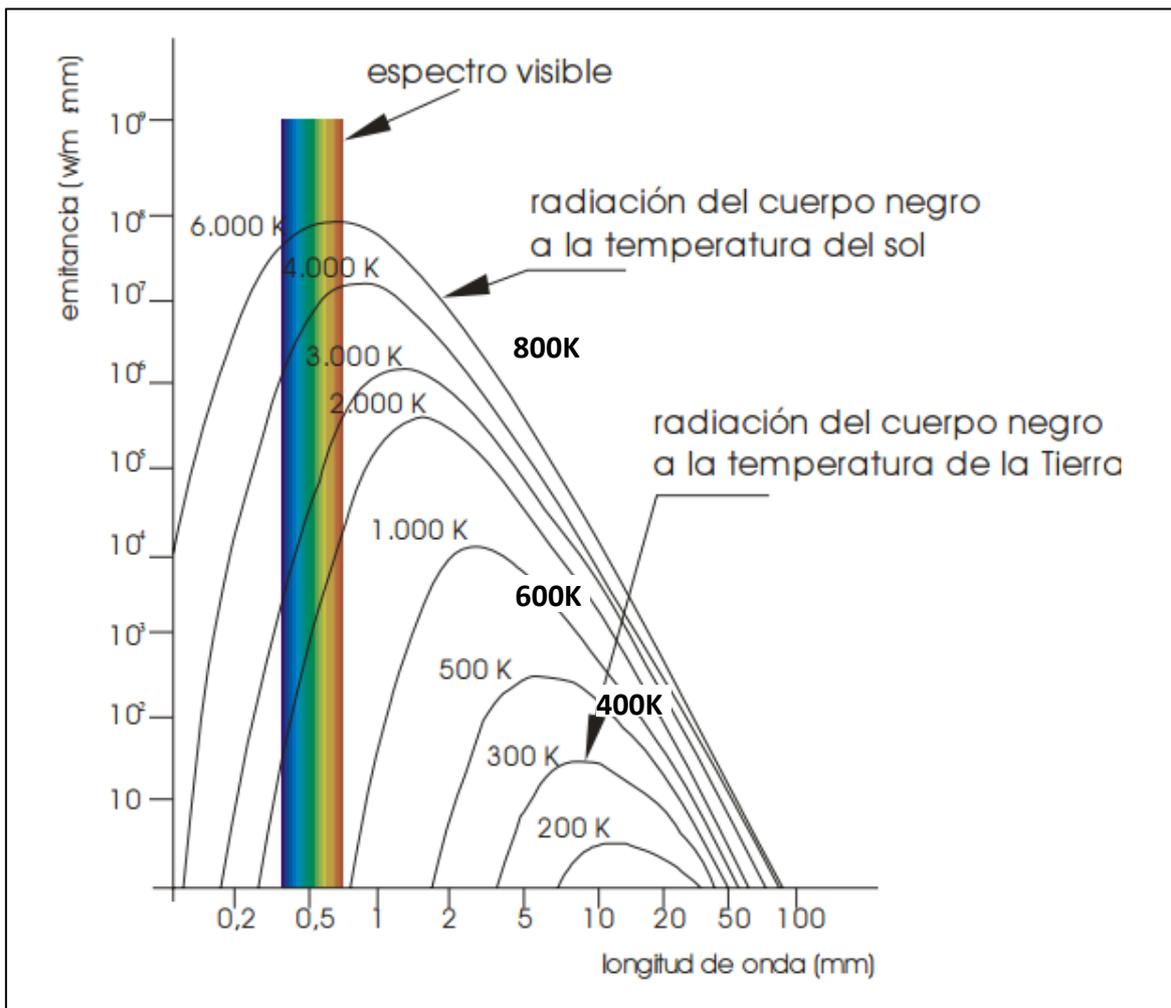


Figura 3: Ejemplificación gráfica de la Ley de Wien.

Fuente: (Pinilla Ruiz s.f.)

La ley de Wien es útil para la determinación de la temperatura de cualquier objeto radiante cuya temperatura es muy superior a la de su entorno (Olmo y Nave 2012). Esto lo podemos aplicar a incendios forestales o las quemas agrícolas; así, si se conoce su temperatura, se conocerá también su longitud de onda máxima y viceversa.

4. CARACTERÍSTICAS DE LOS INCENDIOS FORESTALES

Para el caso de los incendios forestales es necesario tomar en cuenta dos cosas: la temperatura necesaria para que inicie un incendio y la temperatura cuando el incendio está en curso. En el Cuadro 1 se observan las temperaturas de inicio del fuego en la vegetación. La temperatura de inflamación es la temperatura mínima a la cual, en presencia de una fuente de ignición (llama, chispa, etc), se da inicio a la combustión. La temperatura de auto ignición es aquella a la cual una sustancia inicia la combustión sin la presencia de una llama. La mezcla aire/combustible alcanza una temperatura que provoca que la energía acumulada sea suficientemente grande para activar la reacción de combustión, sin la necesidad de una aportación de energía adicional. La radiación se refiere a la propagación del calor por ondas electromagnéticas, sin requerir de un medio específico para su propagación. La conducción se refiere al mecanismo de transferencia de calor a través de medios sólidos por la vibración interna de las moléculas y de los electrones libres y por choques entre ellas. Las moléculas de la fracción de un sistema con temperatura alta transferirán parte de su energía (chocando) a las moléculas con menos energía en las regiones más frías del sistema (Arnaldos et al. 2004).

Cuadro 1: Temperatura de inicio de fuego en la vegetación

Mecanismo de transferencia de calor	Temperatura de la superficie de la madera	
	Temperatura de inflamación (°C)	Temperatura de autoignición (°C)
Radiación	300-410	600
Convección	450	490

Fuente: (Arnaldos et al. 2004)

En la siguiente imagen se observa la variación de la temperatura en pleno incendio. La temperatura del suelo oscila de 250 °C a 300 °C, la temperatura en la zona combustible (lo que está pronto a quemarse) es de 500 °C, la temperatura de la zona en llamas sufre muchas fluctuaciones pero se considera que va de 700 °C a más de 1000 °C, y finalmente en la columna de convección la temperatura va decreciendo como lo muestra la Figura 4.

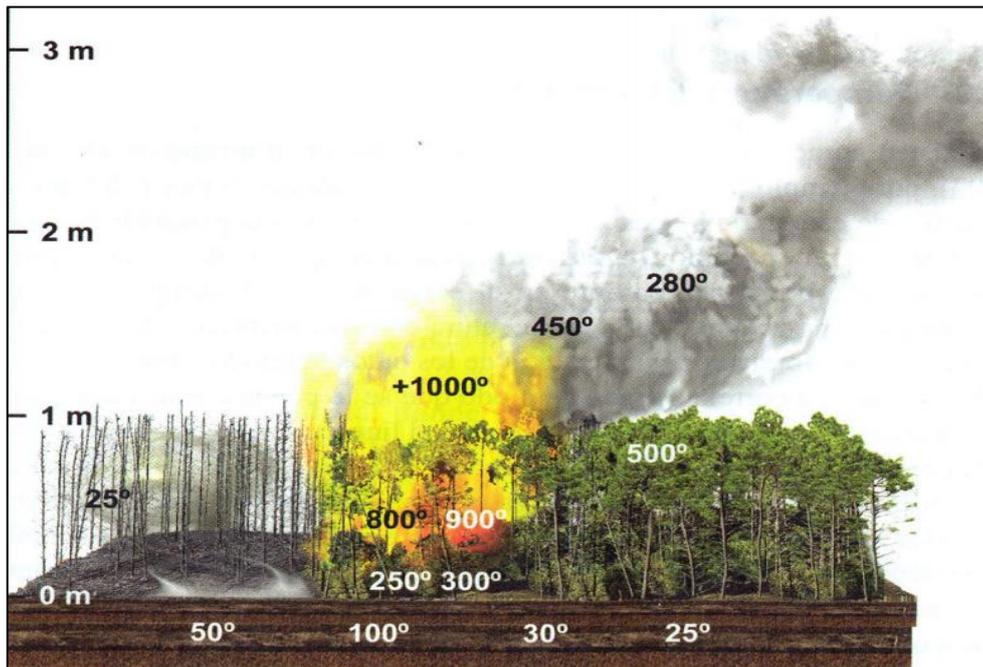


Figura 4: Distribución de temperaturas (°C) en un frente de incendio.

Fuente: (Arnaldos et al. 2004)

Si aplicamos la ley de Wien para la longitud de la banda termal (3.7 a 4.1 μm) observamos que estos sensores captan temperaturas 510 °C a 433 °C, es decir alrededor entre 706 K a 783 K. Cabe mencionar que los algoritmos para obtención de los focos de calor usan otras bandas para eliminar posibles errores, el más común es el brillo solar que suele confundirse con fuego.

5. ERRORES DE OMISIÓN Y COMISIÓN

Los **errores de comisión** o falsas alarmas se dan cuando no existe una cicatriz de quema asociada al foco de calor. En el punto 2 se mencionó que estas falsas alarmas pueden ser provocadas por un suelo muy caliente, grandes chimeneas, brillo solar, volcanes activos u otras fuentes de calor potentes. Sin embargo cada cierto tiempo, los algoritmos con los que

se obtienen los focos de calor se ajustan para reducir este tipo de error. Según las fuentes del INPE (Morelli 2014), el actual algoritmo de MODIS ha reducido las falsas alarmas de los focos de calor en Brasil a cero; o dicho de otra manera, todos sus focos representan un incendio o quema.

Sin embargo, persiste el **error de omisión** que se refiere a aquellos eventos no detectados. De acuerdo al INPE (CPTEC(a) 2014) y por las validaciones realizadas por IBAMA, este error asciende al 30% del total de casos. El error de omisión podría deberse a:

- El frente de fuego es menor a 30m.
- El incendio forestal no alcanza las copas de los árboles.
- Existen nubes cubriendo la zona.
- Quemadas de pequeñas duración ocurrida entre las tomas de imagen.
- La imagen de satélite no cubrió esa zona (por el paso de satélite).
- El fuego está en una ladera de la montaña cuando el satélite miraba hacia otro lado.
- El evento está en el área de distorsión de la imagen por lo que es posible que no se ubique el evento en el radio de búsqueda en campo.

6. DISTORSIÓN DE LOS PÍXELES

Cuando el INPE realizó la validación de campo durante el 2014 para comprobar los focos de calor proveniente de sensores MODIS, observó que el 80% de los eventos sucedió en un radio de 1km alrededor de las coordenadas indicadas por el foco de calor y no a 0.5km como se pensaría originalmente (Morelli 2014). Considerando que el pixel activado tiene 1km de longitud teórica y el foco de calor se representa como un punto al centro del mismo, es lógico pensar que el evento se produjo dentro del pixel, es decir en un radio de 0.5 km alrededor del punto; sin embargo, la experiencia en campo dice que es 1km. Esto puede tener lógica si se toma en cuenta la distorsión que sufren los píxeles de la imagen al alejarse del nadir.

Cuando el satélite captura una imagen, ésta siempre tiene una distorsión y esta distorsión se acrecienta a mayor distancia del centro de la toma. Esto es más evidente en satélites atmosféricos debido al gran tamaño de territorio que abarca cada escena y donde la curvatura de la tierra se hace más evidente. La Figura 5 es una ejemplificación de una imagen MODIS. En la imagen se observan tres escaneos consecutivos: el primero y el tercero se observan en

líneas gris claras y el segundo en negro. Se observa el “bow tie effect” (efecto de corbata de moño) donde los píxeles más alejados de la dirección de vuelo (nadir) sufren mayor distorsión. Esta distorsión del píxel es mayor en su longitud de scaneo (*scan*) que en la longitud de la dirección de vuelo (*track*). De hecho, los píxeles más alejados del nadir de los diferentes escaneos se solapan debido a este efecto.

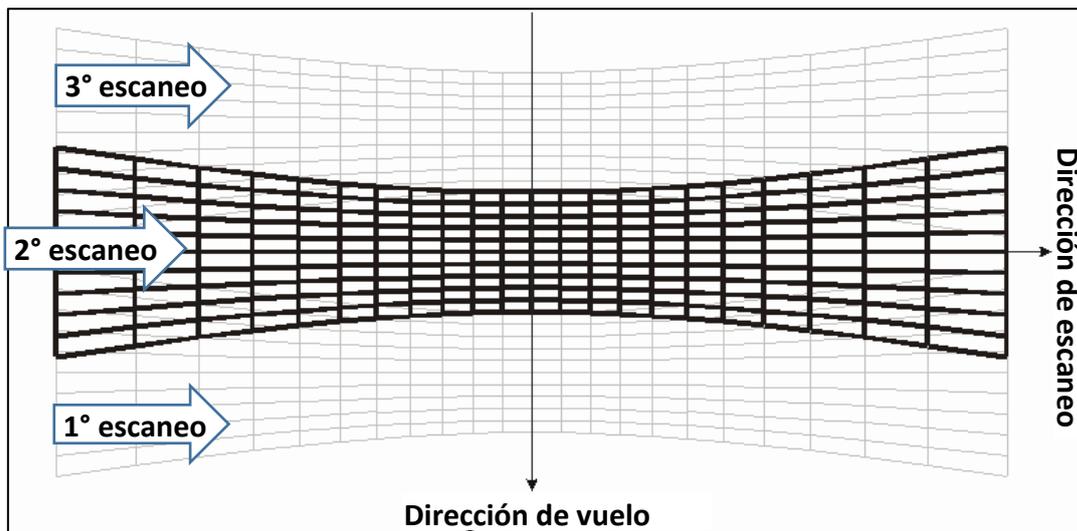


Figura 5: Ejemplificación de la distorsión de los píxeles en una imagen MODIS.

Fuente: (EOWEB s.f.)

En la Figura 6 se observa cómo se va distorsionando el píxel del satélite NOAA conforme se aleja del Nadir. En el Nadir (a la derecha), el tamaño de píxel es 1km en el *scan* y 1.166km en el *track*. Conforme se aleja del Nadir (a la izquierda), su distorsión aumenta hasta llegar a 6.5km en el *scan* y 2.47km en el *track*.

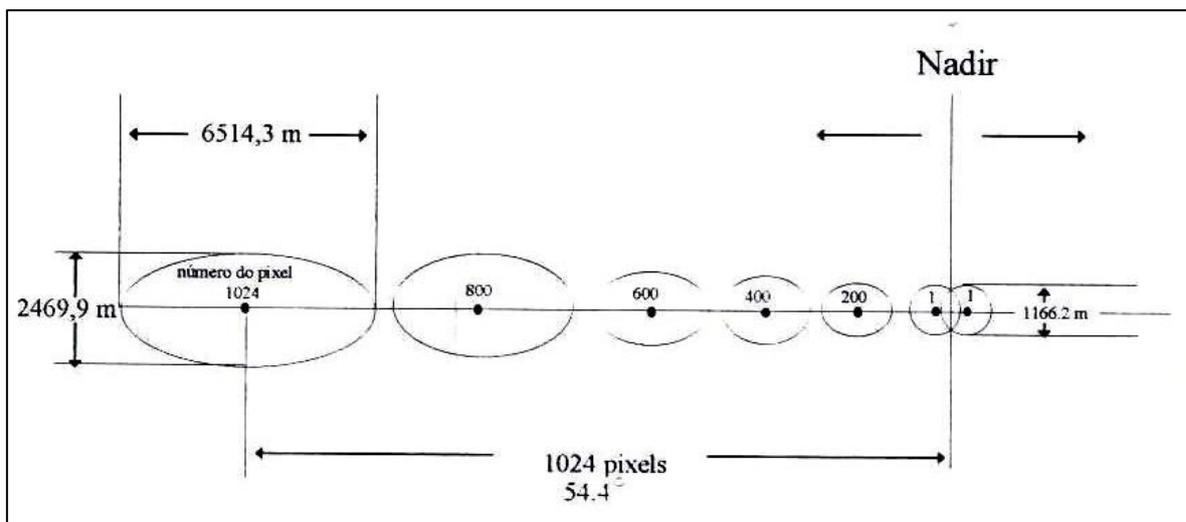


Figura 6: Distorsión del tamaño de píxel NOAA.

Fuente: (Tappan, G.; Miller, E. 1982)

En el Cuadro 2 se muestra las variaciones de tamaño a las que pueden llegar las imágenes del satélite de las cuales derivan los focos. En el caso del INPE, optan por cortar la imagen cuando su pixel alcanza cierta dimensión.

Cuadro 2: Variación del tamaño de pixel por tipo de satélite.

Satélite	Tamaño de pixel	Distorsión máxima del tamaño del pixel	Máximo tamaño de pixel al corte
NOAA	1.1km	7km	3.5km
MODIS	1km	4km	3km
GOES	4km	8km	
MSG	5km	9km	7km
NPP	0.75 km	1.6 km	

Fuente: (CPTEC(a) 2014)

7. TAMAÑO MÍNIMO DEL ÁREA DE QUEMA DETECTADA

Si estamos trabajando con imágenes MODIS o NOAA, el pixel activo tendrá 1 km² de área. Si se trabaja con GOES, esto aumenta a 9 km². Esto significa que en alguna parte de ese pixel ocurrió el evento detectado por el pixel, pero de ninguna manera significa que el evento abarca toda el área del pixel.

Estudios de validación de campo del INPE (Morelli 2014) en Brasil, indican que el área de fuego mínima que hace que un pixel se active varía según el satélite de detección. Para los de órbita polar (NOAA a 800km de distancia de la tierra y TERRA y AQUA a 730 km), un frente de fuego con cerca de 30 m de extensión por 1 m de ancho, puede ser detectado. Mientras que en los satélites estacionarios el área mínima puede llegar a ser el doble o triple. En la Figura 7 se muestran fotografías de las pruebas de validación realizadas por el INPE en conjunto con IBAMA.



Figura 7: Pruebas de validación realizadas por INPE/IBAMA el 27 y 28 de setiembre de 2012.

Fuente: (CPTEC(a) 2014)

NASA (EOSDIS s.f.), indica que el tamaño mínimo de fuego detectable está en función muchas variables (ángulo de escaneo, bioma, posición del sol, temperatura de la superficie de la tierra, cobertura de nubes, humo, dirección del viento, etc). Normalmente, MODIS detecta fuegos de 1000m² (0.1ha, un poco más grande que un pixel de Landsat), aunque en buenas condiciones de observación, se puede detectar fuegos de hasta 100m².

8. PORTALES WEB PARA DESCARGA DE FOCOS DE CALOR:

De acuerdo a la consultoría “Protocolo de análisis y desarrollo para la implementación del servicio de alerta temprana de deforestación, basado en imágenes MODIS con indicadores de fuegos y detección de cambios NDVI” (Geoservice Peru SAC 2014), existen diversas páginas que proveen de un portal SIG para focos de calor para Perú. En el Cuadro 3, se observan los enlaces que hasta ahora están vigentes.

Cuadro 3: Lista de páginas que proveen focos de calor para Perú y otros países.

	LINK
Nombre del portal: Institución: Link:	Monitoramento de Queimadas e Incêndios Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (Brasil) http://www.inpe.br/queimadas/
Nombre del portal: Institución: Link:	FIRECAST - Forest and Fire Monitoring & Forecast System Conservation International https://firecast.conservation.org/DataMaps/LiveView
Nombre del portal: Institución: Link:	Fire Information for Resources Managements System - FIRMS / Earth Observation Data - EARTHDATA National Aeronautics and Space Administration –NASA (USA) https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/firms
Nombre del portal: Institución: Link:	Global Fire Maps / Earth Observation Data - EARTHDATA National Aeronautics and Space Administration –NASA (USA) http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/imagery/firemaps.cgi
Nombre del portal: Institución: Link:	Global Forest Watch Fires Global Forest Watch http://fires.globalforestwatch.org/
Nombre del portal: Institución: Link:	GFIMS- Sistema Global de Gestión de Información sobre Fuegos FAO – Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura http://www.fao.org/nr/gfims/datos-de-incendios-activos/es/

Fuente: (Geoservice Peru SAC 2014) modificado para mostrar solo los enlaces vigentes.

La consultoría determinó que las páginas más adecuadas para proporcionar focos de calor a Perú son FIRMS/EarthData de la NASA (Estados Unidos) y Queimadas del INPE (Brasil). En la Figura 8 y 9 se aprecia los portales web específicos para la descarga de focos de calor de ambas instituciones.

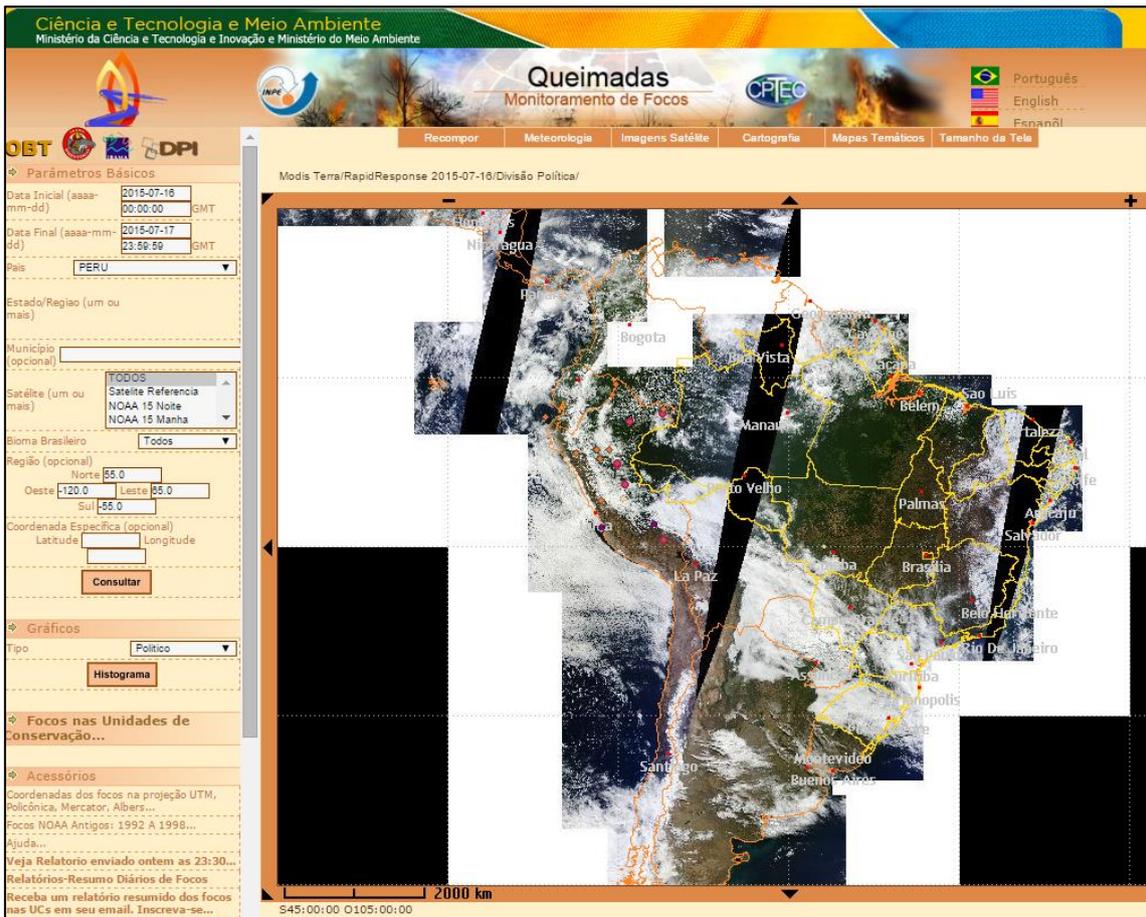


Figura 8: Plataforma de descarga de focos de calor de Queimadas – INPE.

Fuente: (INPE 2015)

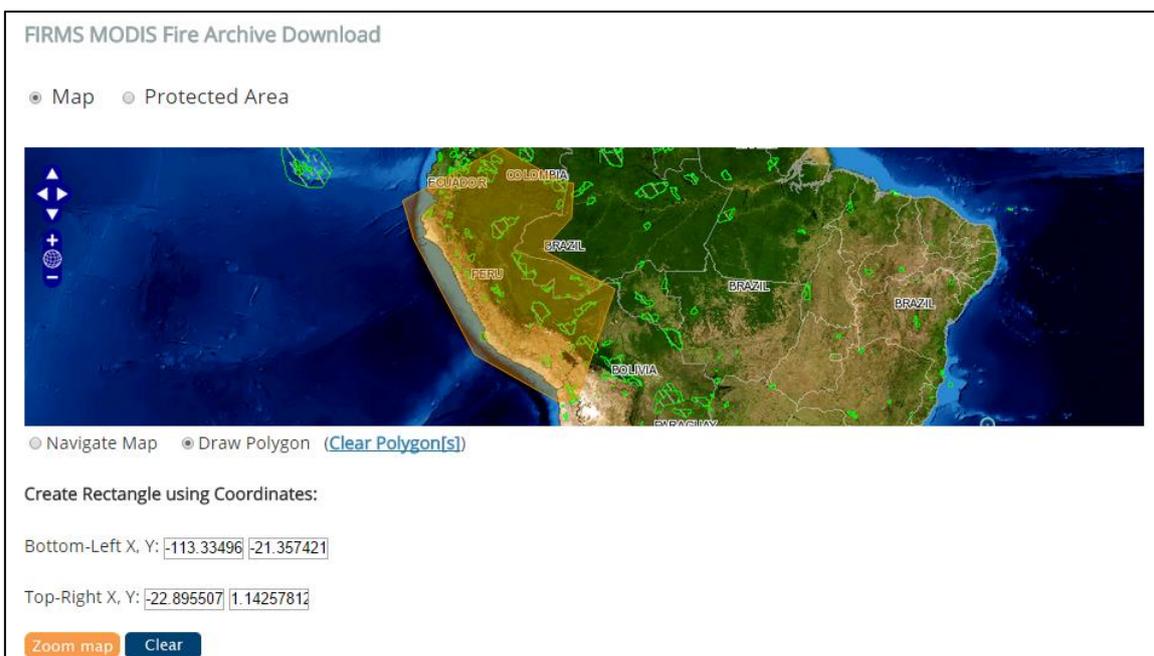


Figura 9: Plataforma de descarga de focos de calor de FIRMS

Fuente: (NASA(a) s.f.)

9. SENSORES UTILIZADOS PARA LA DETECCIÓN DE FOCOS DE CALOR

Se utilizan todos los satélites que tienen sensores ópticos que operan en la banda termal media de 4µm. Los sensores actuales utilizados para focos de calor en Perú son: AVHRR de los satélites polares NOAA, MODIS de los satélites polares de TERRA y AQUA, GOES Imager de los satélites geoestacionarios GOES y el sensor VIIRS del nuevo satélite Suomi-NPP.

9.1. SENSOR MODIS – SATÉLITES AQUA Y TERRA

Este sensor está a bordo de los satélites Aqua y Terra de la NASA. Es un sensor pasivo que transmite datos en 36 bandas que van desde el espectro visible hasta el infrarrojo térmico. Los datos del MODIS se usan para derivar varios productos: índices de vegetación, cobertura de la superficie terrestre, ocurrencia y temperatura de incendios, cobertura de nubes, concentración de aerosoles, etc. (NASA(b) s.f.).

Sus dos primeras bandas tienen una resolución espacial de 250, cubriendo el rojo e infrarrojo cercano. Las 5 bandas siguientes ofrecen 500m de resolución espacial, que abarcan el espectro visible y diversas bandas de la onda corta infrarroja. El resto de las bandas tienen una resolución de 1km, cubriendo principalmente el espectro del infrarrojo cercano, el infrarrojo medio y térmico. Hace observaciones de la tierra cada 1-2 días con un ancho de barrido de 2330km. Provee imágenes de alta resolución radiométrica de la radiación reflejada durante el día y de la emisión térmica diurna y nocturna. En el día toma datos de todas las bandas y en la noche sólo las correspondientes al térmico. El cuadro 4 y 5 muestran un resumen de sus características.

Cuadro 4: Características técnicas del sensor MODIS.

Fecha de lanzamiento	1999 (a bordo de Terra) 2002 (a bordo de Aqua)
Orbita	705 km
Ancho de franja	2330 km x 10 km
Resolución radiométrica	12 bits
Tiempo estimado de vida	6 años

Fuente: (NASA(d) s.f.)

Cuadro 5: Características de las bandas del sensor MODIS.

Banda	Ancho de banda ¹	Radiancia espectral (W/m ² -μm-sr)	Resolución espacial (m)	Uso
1	620 - 670	21.8	250m	Límites de la tierra, nubes y aerosoles
2	841 - 876	24.7		
3	459 - 479	35.3	500m	Propiedades de la tierra, nubes y aerosol
4	545 - 565	29.0		
5	1230 - 1250	5.4		
6	1628 - 1652	7.3		
7	2105 - 2155	1.0		
8	405 - 420	44.9	1000m	Color de océano / Fitoplacton / Biogeoquímica
9	438 - 448	41.9		
10	483 - 493	32.1		
11	526 - 536	27.9		
12	546 - 556	21.0		
13	662 - 672	9.5		
14	673 - 683	8.7		
15	743 - 753	10.2		
16	862 - 877	6.2	1000m	Vapor de agua atmosférico
17	890 - 920	10.0		
18	931 - 941	3.6		
19	915 - 965	15.0	1000m	Temperatura de la superficie y nubes
20	3660 - 3840	0.45(300K)		
21	3.929 - 3.989	2.38(335K)		
22	3.929 - 3.989	0.67(300K)		
23	4.020 - 4.080	0.79(300K)		
24	4.433 - 4.498	0.17(250K)		

25	4.482 - 4.549	0.59(275K)	1000m	Temperatura atmosférica
26	1.360 - 1.390	6.00	1000m	Vapor de agua en las nubes Cirrus
27	6.535 - 6.895	1.16(240K)		
28	7.175 - 7.475	2.18(250K)		
29	8.400 - 8.700	9.58(300K)		Propiedades de nubes
30	9.580 - 9.880	3.69(250K)		Ozono
31	10.780 - 11.280	9.55(300K)		Temperatura de la superficie y nubes
32	11.770 - 12.270	8.94(300K)		
33	13.185 - 13.485	4.52(260K)		Altitud máxima de nubes
34	13.485 - 13.785	3.76(250K)		
35	13.785 - 14.085	3.11(240K)		
36	14.085 - 14.385	2.08(220K)		
¹ Bandas del 1 al 19 están en nm; Bandas del 20 al 36 están en μm				

Fuente: MODIS (NASA(c) s.f.)

ALGORITMO DE DETECCIÓN DE FUEGOS DEL SENSOR MODIS

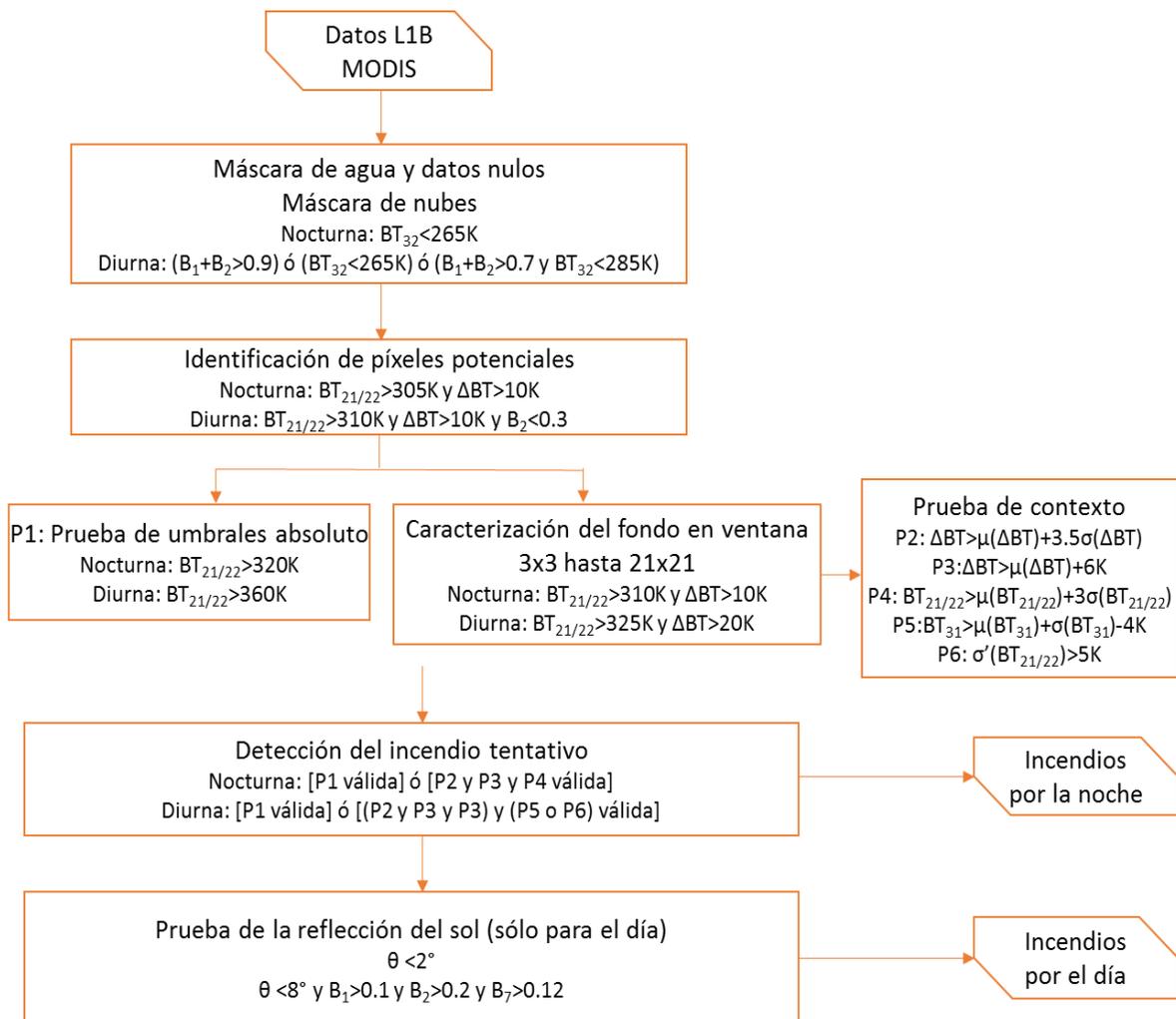
Tanto el INPE como FIRMS/NASA usan el mismo algoritmo para determinar los focos. Este algoritmo ha sido descrito por Giglio *et al.* (2003), producto MOD14 MODIS Fire Products, y se resume en los siguientes pasos básicos:

- a. Detección de píxeles de nubes y agua, para usarlos como máscara en los pasos subsiguientes.
- b. Separación de una imagen compuesta por las bandas infrarrojas en píxeles de diferentes tipos (Datos perdidos, nubes, agua, sin fuego, con fuego y desconocidos)
- c. Identificación de potenciales focos de calor, de aquellos píxeles que fueron clasificados como fuego.
- d. Prueba de umbral absoluto, selección de todos los píxeles más calientes (360K).
- e. Examen contextual de los píxeles. Verifica cuan caliente es un píxel en relación a sus vecinos.

- f. Detección preliminar de fuego
- g. Rechazo de píxeles de fuego que pueden estar distorsionados por destellos de sol

El producto final del algoritmo es una imagen raster con las siguientes categorías: datos nulos, datos no procesados, agua, nubes, puntos de no calor y puntos de calor. Con base a este raster se obtienen las coordenadas geográficas de cada uno de los píxeles detectados como puntos de calor.

El Cuadro 6 muestra las bandas de MODIS usadas en el algoritmo. Algunas se usan para determinar los umbrales superiores e inferiores de temperatura y otros para descartar las falsas alarmas. La Figura 10 muestra el esquema de aplicación del algoritmo seguido para la detección de puntos de calor.



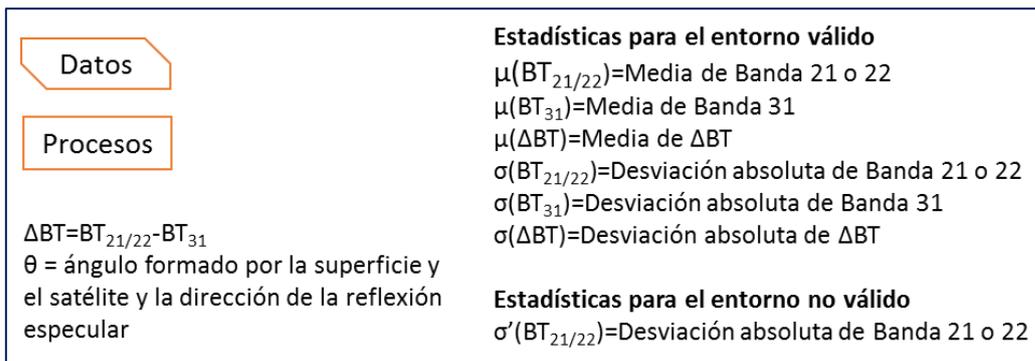


Figura 10: Algoritmo MOD14 para la detección de focos de calor.

Fuente: (Cruz, López y Rainer 2011)

Cuadro 6: Bandas de MODIS usadas en la detección del algoritmo MOD14

Numero de Banda	Longitud de onda central (μm)	Propósito de uso
1	0.620-0.670	Brillo solar y rechazo de falsa alarma costera; enmascaramiento de nubes
2	0.841-0.8766	Superficie brillante, brillo solar, y rechazo de falsa alarma costera; enmascaramiento de nubes
7	2.105-2.155	Brillo solar y rechazo de falsa alarma costera.
21	3.929-3.989	Canal de alto rango para detección de fuego activo
22	3.929-3.989	Canal de bajo rango para detección de fuego activo
31	10.780-11.280	Detección de fuego active, enmascaramiento de nubes
32	11.770-12.270	Enmascaramiento de nubes

Fuente: (Giglio et al. 2003)

El algoritmo MOD14 es usado actualmente por la NASA (EEUU), el INPE (Brasil) y CONABIO (Mexico); sin embargo hay ligeras variaciones en los focos de calor descargados como algunos metros de diferencia en su ubicación o una pequeña diferencia en la cantidad de focos de calor para un mismo periodo. En un reporte de CONABIO (Cruz, López y Rainer 2011), se explica que estas variaciones pueden suceder debido a la recepción de las imágenes y diferencias mínimas en la aplicaciones del algoritmo. Por lo observado, se infiere que también puede deberse a diferencia en el datum utilizado.

Actualmente, los archivos de focos de calor pertenecen a la Colección 5 de MODIS. Cada cierto tiempo, se reprocessa los archivos de MODIS para incorporan mejor calibraciones, refinamientos del algoritmos y nuevos productos. Estos archivos actualizados, son llamadas “colecciones”. Una nueva colección reemplaza a una antigua y se reprocessan todos los archivos históricos. El 2007 los focos de calor empezaron a reportarse con la colección 5. La colección 6 debe empezar a reportar datos a finales del 2015 y traerá, como mejoras, la reducción de falsas alarmas en la Amazonía causada por pequeñas aberturas de bosques y una máscara de nubes mejorada.

9.2. SENSOR VIIRS – SATÉLITE SUOMI NPP

El sensor VIIRS está a bordo del satélite Suomi NPP, lanzado en Octubre de 2011. Este satélite también está a cargo de la NASA y fue creado para monitoreo de la tierra, incorporando mejoras de sus predecesores AVHRR (NOAA) y MODIS (Aqua/Terra). (NASA(f) s.f.)

La órbita del Suomi NPP gira a 827 km de la Tierra y carga 5 sensores en su interior. El más importante es el VIIRS. Los datos del VIIRS son usados para medir cambios en el clima, propiedades de nubes y de aerosol, color del océano, temperatura de la superficie de la tierra y océano, movimiento y temperatura del hielo, fuego, y albedo terrestre. Las características del sensor se presentan en el Cuadro 7 y 8.

Cuadro 7: Características técnicas del sensor VIIRS

	Característica
Fecha de lanzamiento	2011
Orbita	824 km
Dimensiones de la franja	3000 km x 13 km
Resolución radiométrica	12 bits
Tiempo estimado de vida	7 años

Fuente: (NASA(e) s.f.)

Cuadro 8: Características de las bandas del sensor VIIRS

Bandas de VIIRS	Rango de Longitud de onda (um)	Explicación de la Banda	Nombre del rango	Resolución espacial
M1	0.402-0.422	Color del océano /aerosol	Visible	750m
M2	0.436-0.454			
M3	0.478-0.488			
M4	0.545-0.565			
M5 (B)	0.662-0.682			
M6	0.739-0.754	Atmosférico	IR cercano	
M7	0.846-0.885	Color del océano /aerosol		
M8	1.23-1.25	Tamaño de partículas de nubes	IR onda corta	
M9	1.371-1.386	Cobertura de nubes y cirrus		
M10 (R)	1.58-1.64	Fraciones de nieve		
M11	2.23-2.28	Nubes		
M12	3.61-3.79	SST / Fuegos	IR onda media	
M13	3.97-4.13	SST / Fuegos		
M14	8.4-8.7	Propiedades de cobertura de nubes	IR onda larga	
M15	10.26-11.26	SST / Fuegos		
M16	11.54-12.49	SST		
DNB	0.5-0.9	Imágenes	Visible	750m
I1 (B)	0.6-0.68	Imágenes	Visible	375 m

I2 (G)	0.85-0.88	NDVI	IR cercano
I3 (R)	1.58-1.64	Mapeo nieve	IR onda corta
I4	3.55-3.93	Visualización de nubes	IR onda media
I5	10.5-12.4	Visualización de nubes	IR onda larga

Fuente: (RAMMB s.f.)

Una de las ventajas del VIIRS es que presenta poca distorsión de sus píxeles a lo largo del escaneo, tal y como lo muestra las Figuras 11 y 12. Cuenta con un “esquema de agregación” (aggregation scheme) que busca obtener píxeles más uniformes a pesar del ángulo de escaneo. El resultado es que el “factor de crecimiento del píxel” máximo es de 2 (distorsión máxima de 200%), ya sea en el track (distancia longitudinal) o en el scan (longitud latitudinal). Si no se usara el esquema de agregación, el factor podría ser hasta de 6 en el scan. Además elimina algunos de los píxeles de mayor distorsión (eliminación del “bow-tie effect”).

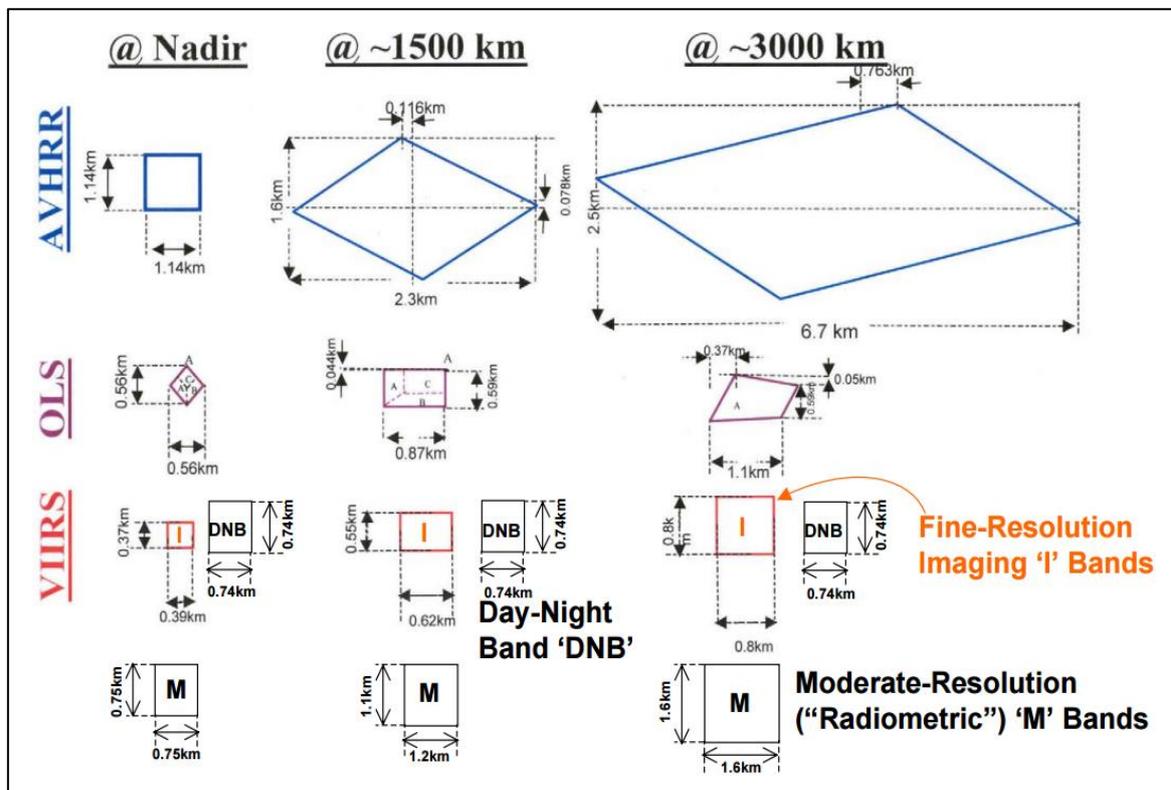


Figura 11: Variación de la longitud de los píxeles AVHRR, OLS y VIIRS a lo largo del escaneo.

Fuente: (Goldberg 2012)

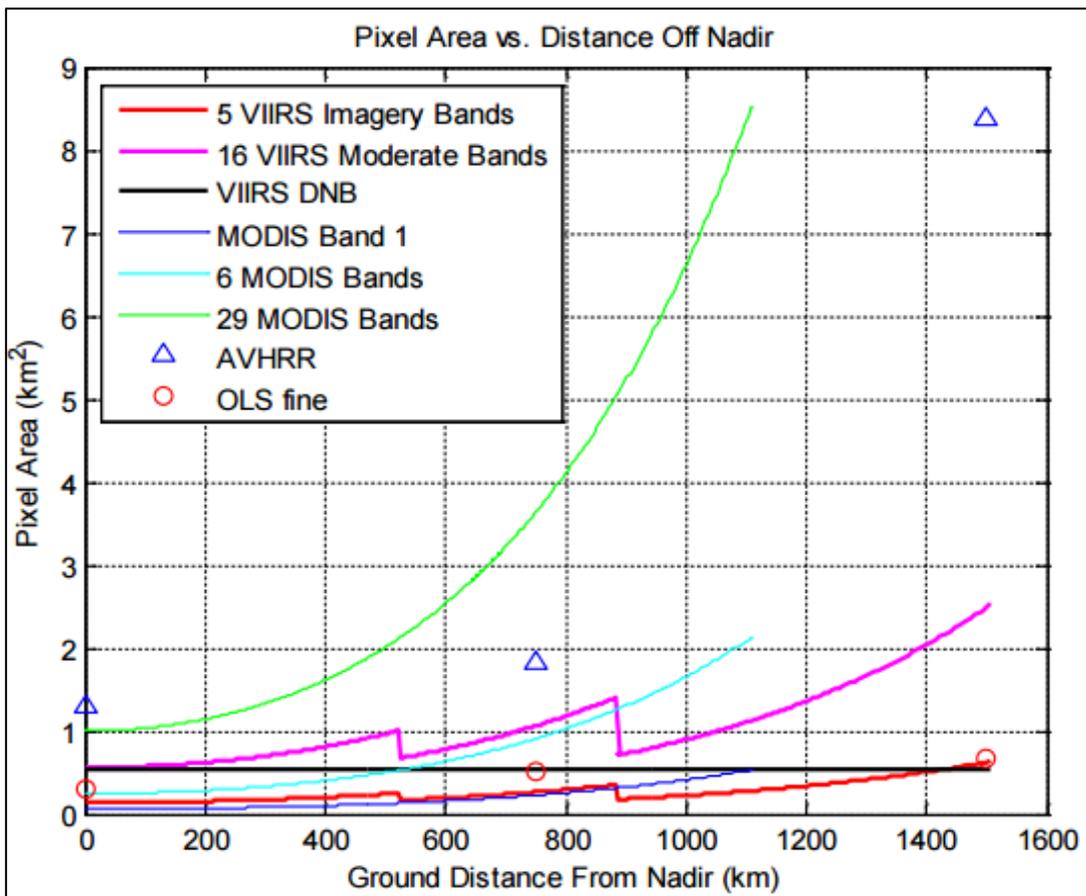


Figura 12: Variación del área del pixel AVHRR, MODIS, OLS y VIIRS a lo largo del escaneo. Fuente: (Goldberg 2012)

A diferencia del MODIS, el VIIRS no presenta “espacios en blanco” a bajas latitudes, como se observa en la Figura 13. Permite un 15% (aproximadamente) de traslape entre orbitas consecutivas en el ecuador, por ello provee una cobertura global total cada 12 horas y las latitudes medias tienen de 3 a 4 vistas al día (EARTHDATA 2016).

El sensor VIIRS incorpora canales sensibles al fuego, lo que permite la detección de incendios y su caracterización. Inicialmente se utilizó solo la banda M de resolución moderada (750m) pero desde inicios de 2015 se está utilizando la banda I (375m) por tener mayor resolución. El algoritmo para VIIRS está basado en el algoritmo usado para detección de fuegos en MODIS y sigue básicamente el mismo proceso. Este algoritmo utiliza las 5 bandas I y adicionalmente la banda M13 de 750m para complementar los datos. (W. Schroeder 2015)

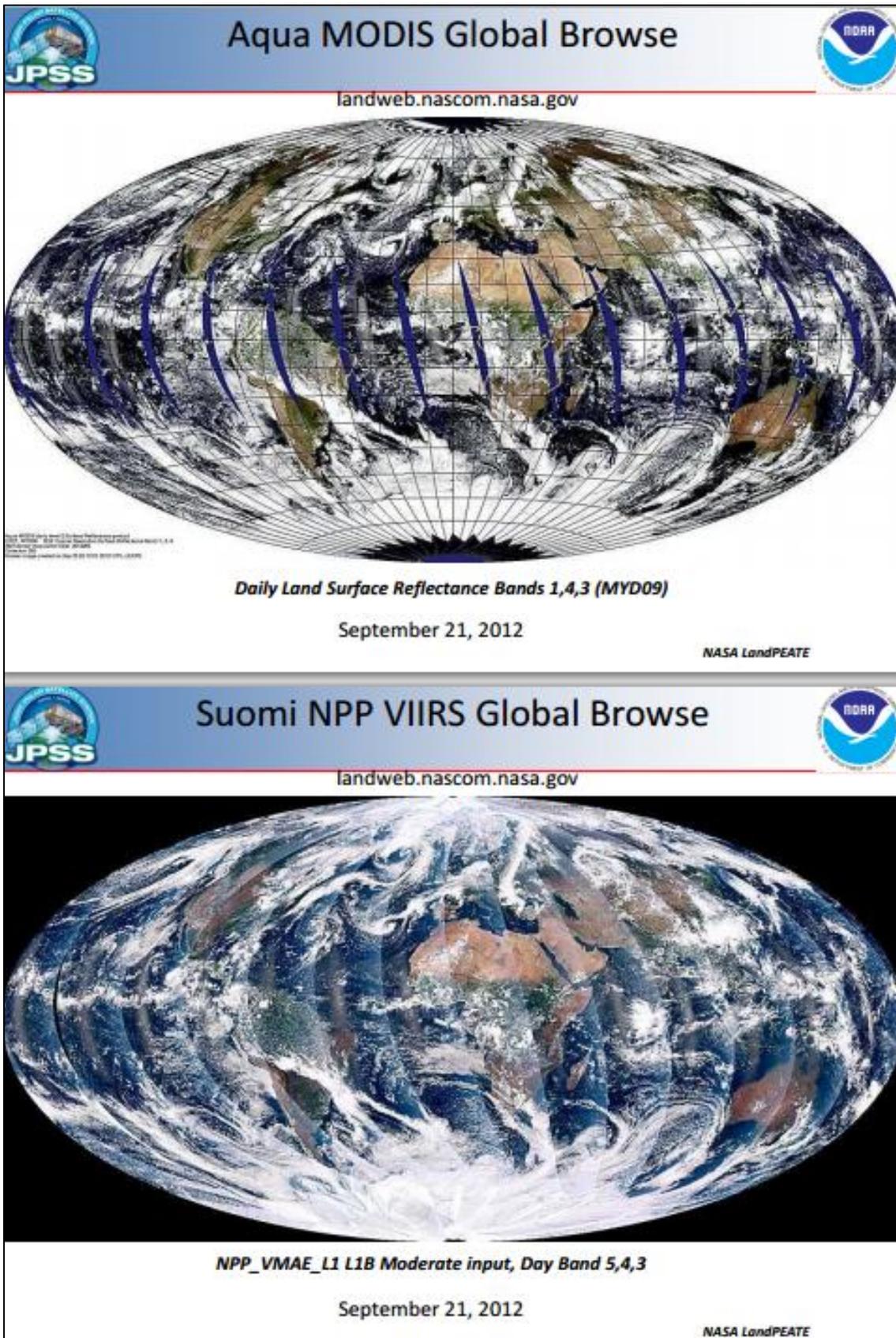


Figura 13: Comparación del composite global formado por NPP VIIRS y Aqua MODIS.

Fuente: (Csiszar 2012)

Después de su lanzamiento en 2012 se han venido haciendo mejoras en el procesamiento para asegurar la alta calidad de los productos de fuego VIIRS de manera que se continúe con el registro de datos MODIS. Cuando se comparó directamente el producto con MODIS en un estudio de 4 meses en el 2013, mostró que VIIRS produce aproximadamente 26% más detecciones que MODIS dentro de los 3 pixeles centrales de la zona de agregación de $\pm 31^\circ$ del ángulo de scaneo y 70% más detecciones fuera de esa zona, principalmente como resultado de la una superior scaneo de VIIRS y características de muestreo (Csiszar et al. s.f.)

Para la fecha en que se realizaron los estudios de validación (junio a noviembre 2015), los productos de fuego activo del VIIRS se encontraban en un estado “provisional”, es decir, no totalmente validados. Sin embargo, instituciones como el INPE y CONABIO ya habían incorporado en su sistema de alertas los focos de calor provenientes del NPP-750m desde noviembre de 2013, en el caso del INPE y enero del 2014 en el caso de CONABIO; e incorporaron los focos de calor del NPP-375m desde inicios del 2015. Actualmente, es el satélite que reporta más puntos de calor para nuestro país (Figura 14).

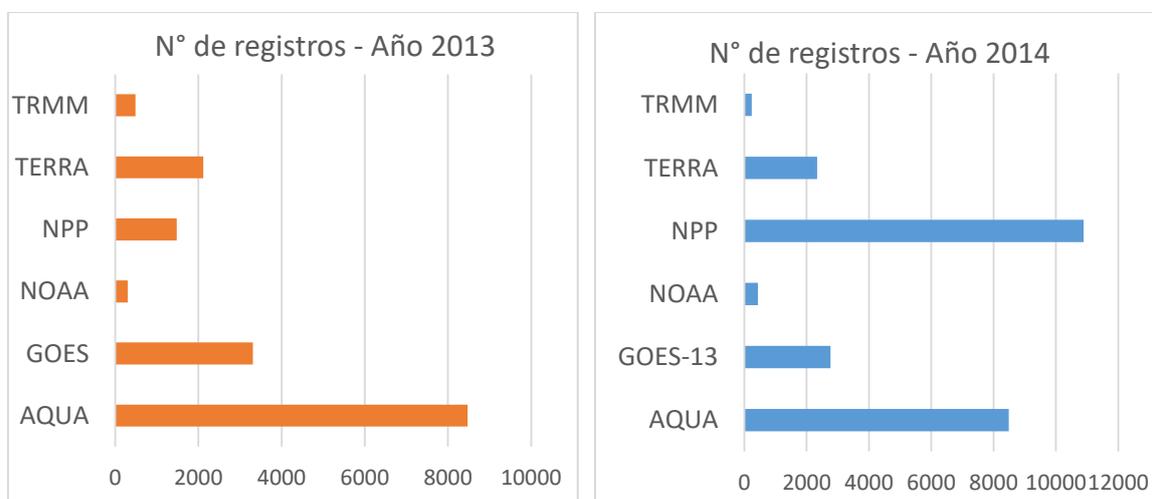


Figura 14: Registros de focos de calor para Perú, para los años 2013 y 2014.

9.3. SENSOR GOES I-M - SATÉLITE GOES

Los satélites GOES son un conjunto de satélites meteorológicos y geoestacionarios. Como todo satélite geoestacionario, vuela sobre el ecuador a una altitud aproximada de 36 000 km y su velocidad orbital coincide con la velocidad de rotación de la tierra. Actualmente hay

dos en órbita, el GOES Este y Oeste. El que reporta focos de calor para el Perú es el GOES Este o GOES-13, posicionado en la longitud 75° W. Su resolución espectral, para reportes de focos de calor, es de 4km y su resolución temporal es cada 15 minutos (The Comet Program s.f.). El Cuadro 9 muestra las características de las bandas del satélite GOES y la Figura 15 muestra la imagen del satélite GOES Este.

Cuadro 9: Características de las bandas del satélite GOES.

Sensor	Banda espectral	Resolución espectral	Resolución espacial
GOES	1. Visible	0.55 – 0.75 μm	1 km
	2. Onda corta	3.80 – 4.00 μm	4 km
	3. Humedad	6.50 – 7.00 μm	8 km
	4. Infrarrojo 1	10.20 – 11.20 μm	4 km
	5. Infrarrojo 1	11.50 – 12.50 μm	4 km

Fuente: (CPTEC(a) 2014)

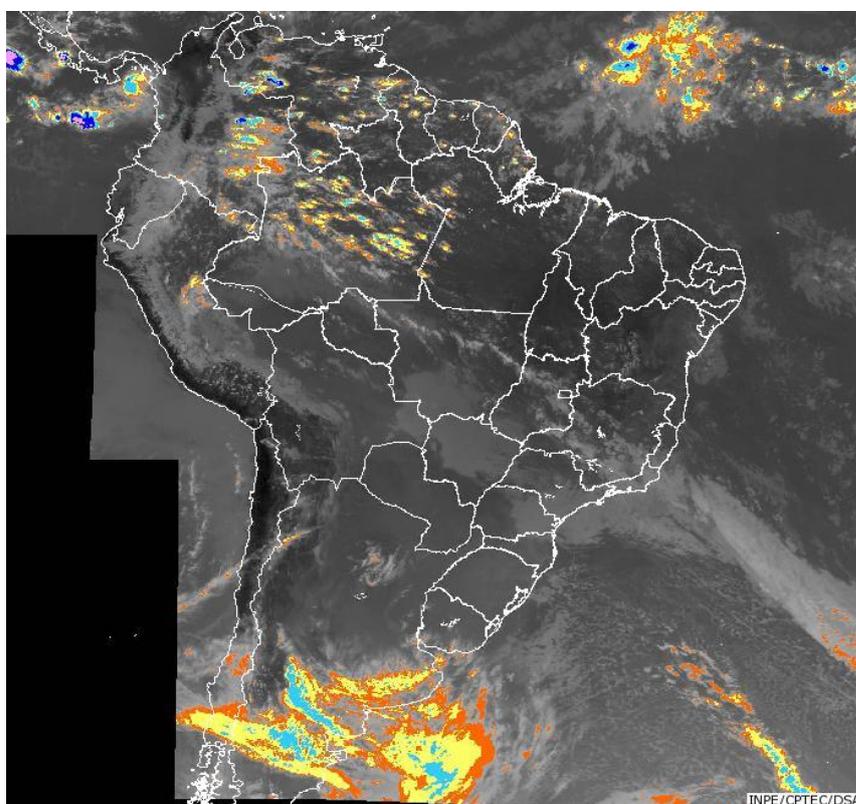


Figura 15: Imagen de GOES Este.

Fuente: (CPTEC(b) s.f.)

En cuanto a la utilidad relacionada al tema de incendios se puede decir que por la poca cantidad de bandas con las que cuentan, no son los más adecuados para la detección de este tipo de eventos ya que reportan muchas falsas alarmas. Los satélites de órbita polar cuentan con mejores instrumentos para la detección de fuegos (The Comet Program s.f.). Sin embargo, debido a su capacidad de tener imágenes frecuentes del mismo lugar, son importantes para el monitoreo de la propagación de incendios.

9.4. SENSOR AVHRR – SATÉLITES NOAA

El sensor AVHRR está a bordo de los la constelación de satélite POES/NOAA. Estos son satélites ambientales que incluyen una amplia gama de sensores. Se encuentran en una órbita aproximadamente a 870 km sobre la Tierra, cercana a los polos y es sincrónica con el Sol. La duración de la circulación es de 102min, lo cual resulta en 14.1 vueltas diarias alrededor de la Tierra. (NGDC s.f.). Para fines de reportar focos de calor, se usa el sensor AVHRR cuyas características aparecen en el Cuadro 10.

Cuadro 10: Características de los satélites NOAA.

Sensor	Bandas espectrales	Resolución espectral	Resolución espacial	Resolución temporal
AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)	1. Rojo	0.58 – 0.68 μm	1.1 km	Diaria (AM y PM)
	2. Infrarojo cercano	0.72 – 1.10 μm		
	3. Infrarojo medio	3.55 – 3.93 μm		
	4. Infrarojo termal	10.30 – 11.30 μm		
	5. Infrarojo termal	11.30 – 12.50 μm		

Fuente (CPTEC(a) 2014)

Ha habido muchos satélites NOAA, así como lo muestra la Figura 16. Sin embargo, los satélites NOAA están de salida y han dejado al sensor VIIRS como reemplazo. Actualmente hay dos que continúan reportando datos para Perú: NOAA 18 y NOAA 19.

Cuadro 11: Comparación de la información proporcionada en el shapefile de focos de calor de la NASA e INPE

Criterios	FIRMS/NASA	INPE
Facilidad para descarga de información	<p>Su plataforma permite buscar por fecha pero se debe dibujar un polígono de la región o ingresar las coordenadas de la zona deseada.</p> <p>Luego se debe esperar a que el archivo sea enviado al correo ingresado. El archivo luego debe filtrarse para eliminar los focos que no pertenezcan al país.</p>	<p>Su plataforma permite buscar por fecha y por país, y elegir el tipo de archivo en que se quiere la descarga. La descarga procede al ingresar un correo electrónico.</p>
Datum y Proyección	<p>Proyección Geográfica datum WGS84.</p>	<p>Proyección Geográficas datum SIRGAS 2000.</p>
Presentación de datos	<p>Dos tipos:</p> <p>_NRT (MCD14DL data): Son focos de calor en tiempo casi real procesados por la NASA. Los datos están disponibles luego de 3 horas del paso del satélite.</p> <p>_MCD14ML data: Son los focos de calor procesados por la Universidad de Maryland con tres meses de desfase y distribuidos por la NASA. Estos datos ya son científicos y estandarizados y reemplazan a los primeros cuando ya están disponible.</p> <p>La diferencia entre los focos _MCD14ML y los _NRT es normalmente menos que 100 metros; sin embargo, en situaciones particulares, la diferencia puede ser de varios kilómetros.</p>	<p>Un solo <i>shapefile</i>, tanto actuales como antiguos, sin diferenciar si ya tienen o no corrección.</p>

<p>Tabla de Atributos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Latitud/Longitud: La localización del centro del pixel donde se detectó un fuego, dada en grados con el Datum respectivo - ACQ_Date y Acq Time: fecha y hora UTC en que se registró el foco. - Satellite: Indica si la información proviene de Terra (T) o Aqua (A) - Brightness: La temperatura de brillo del pixel medida en Kelvin dada por la banda 21/22 - Scan/Track: Como ya se mencionó, el tamaño del pixel MODIS es 1km pero ese aumenta según el paso del escaneo. Scan y Track da la medida real del pixel. - Confidence: Da un nivel de calidad del foco de calor. Va de 0 a 100% - Versión: Es 5.0 (datos no corregidos) y 5.1 (datos corregidos) - Bright_T31: La temperatura de brillo del pixel medida en Kelvin, dada por la banda 31FRP: Representa el poder radiativo del fuego en MW (megawatts) 	<ul style="list-style-type: none"> - Latitud/Longitud: La localización del centro del pixel donde se detectó un fuego, dada en grados con el Datum respectivo - Data y HoraGMT: fecha y hora GMT en que se registró el foco. - Satélite: Varios satélites. Sus características se verán más adelante. - Precipitación: Cantidad de lluvia (mm) acumulado en los últimos 15 días en la región - NumDiasSemCHuva: Número de días que no hubo lluvia en la región - Risco: Potencialidad de ocurrencia de fuego en la región. Varía de Mínimo (0) a Crítico (1). - Municipio / UF / Regiao / País: En estas cuatro columnas el INPE pone la información de lo que sería el País, Región, Provincia y Distrito de cada país. Esta información falta actualizarse para Perú.
----------------------------------	--	--

<p>Satélites</p>	<p>- Solo Terra y Aqua. Se ha anunciado que a finales del 2015 estarán disponibles los focos de calor VIIRS del satélite Suomi NPP.</p>	<p>Actualmente presenta estos satélites para Perú</p> <ul style="list-style-type: none"> • NOAA 18: Pasa a las 9:30 y 23:30 horas GMT. • NOAA 19: Pasa a las 06:30 y 19 horas GMT. • GOES 13: Reporta el agrupamiento de todas las pasadas en el día (en promedio 1 pasada cada 15 minutos). • TERRA: Pasa a las 03:30 horas y 15:30 horas GMT. • AQUA: Pasa a las 06 horas y 18:30 horas GMT. • SUOMI NPP: Pasa a las 18 horas GMT.
-------------------------	---	--

Fuente: (NASA(g) 2015) y (INPE s.f.)

III. MATERIALES Y METODOS

1. MATERIALES

1.1. EQUIPOS

- Workstation Core i7, capacidad de almacenaje de 2T y 32G de RAM
- Laptop Core i7, capacidad de 1T y 8G de RAM
- Impresora HP LaserJet400
- Cámara fotográfica Canon Power Shoot 30X
- GPS Garmin MAP 64S

1.2. INSUMOS

- Imágenes Rapid Eye del año 2011-2012 (Ver punto 2.1)
- Imágenes Landsat del año 2015 (Ver punto 3.1)
- *Shapefiles* de los focos de calor de los satélites Aqua, Terra, Suomi NPP (a 375m y a 750m) de diferentes años descargados del portal de EOSDIS(NASA) e INPE
- *Shapefiles* de Perú: distritos, provincias, regiones, áreas naturales protegidas, concesiones forestales, reservas territoriales, capitales y poblados. (SERFOR/SERNANP 2015), Bosque/No Bosque al 2014 e Hidrografía al 2013 (PNCB-MINAM/SERFOR-MINAGRI/SdO-Perú 2015)
- Softwares: Arcgis v10.1, Microsoft Word 2013, Microsoft Excel 2013, Microsoft Power Point 2013

2. METODOLOGÍA

- a. **Revisión bibliográfica sobre el tema:** Se realizó la revisión entre marzo y mayo 2015. Se revisaron conceptos claves como quemas, incendios y focos de calor. Se investigó acerca de los principios físicos para la detección del fuego a través de imágenes satelitales, la interpretación correcta de los focos de calor, sus ventajas y limitantes, las páginas disponibles para la descarga diaria de focos de calor, satélites usados en la detección de incendios y los algoritmos asociados a estos.

- b. **Análisis histórico de los focos de calor en el Perú.** Se realizó en junio 2015. Se descargó los focos de calor de todos los satélites que brinda el INPE, del año 2000 a mayo 2015 para analizar la variación en cantidad de los focos de calor año tras año, el comportamiento de los focos de calor de cada satélite (distribución en el país y constancia en el tiempo. Con los focos del satélite Aqua del 2006 al 2014 se analizó la cantidad de focos de calor reportados por meses y las zonas de mayor densidad de focos de calor en el país. Además, se comparó la distribución histórica de los focos de calor Aqua en el país con la distribución de la zona no bosque en la Amazonía acumulada al 2014. Los resultados obtenidos sirvieron para diseñar la metodología a seguir en los estudios de validación.
- c. **Validación con imágenes Rapid Eye.** Se realizó entre a julio a setiembre 2015. Se validó los focos de calor MODIS (satélites Aqua y Terra) proporcionados por la NASA (Estados Unidos) y por el INPE (Brasil), contrastados con trece imágenes de alta resolución Rapid Eye de los años 2011-2012 pertenecientes a diferentes zonas de la Amazonía. Además se cuantificó el error de comisión también se observó la utilidad de las variables ofrecidas por la NASA en la tabla de atributos de los focos de calor descargados (FRP = Fire Radiative Power y el porcentaje de confianza), la distorsión de los pixeles MODIS y las zonas de error frecuente.
- d. **Validación con Imágenes Landsat.** Se realizó entre setiembre a noviembre 2015. Se validó los focos de calor MODIS, NPP-375m y NPP-750m descargados de la página del INPE, contrastados con seis imágenes Landsat de mediana resolución del año 2015 procedente de distintas escenas de la Amazonía. Además de cuantificar el error de comisión de los focos de calor de los distintos satélites, se observó las zonas de error frecuente y se tomaron observaciones adicionales que sirvieron para consolidar la metodología deseada.
- e. **Diseño de la metodología.** Se realizó en diciembre 2015. Se elaboró la máscara de zonas de error frecuente según los resultados del estudio de validación. Se realizó una salida de campo en la ruta Cuzco-Madre de Dios donde se evaluaron 44 focos de calor. Se ideó una metodología para pasar de cantidad de focos de calor registrados a cantidad de eventos. Finalmente, se consolidó un protocolo que contempla los pasos seguidos desde la descarga de focos de calor hasta su reporte.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. ANÁLISIS HISTÓRICO DE LOS FOCOS DE CALOR

El 70% de la deforestación es a pequeña escala (MINAM 2015) causada principalmente por la apertura de nuevas áreas para la agricultura y ganadería (FIP 2012) a través de la práctica de roza y quema (CSA-UPCH 2010). La limpieza del área a trabajar Esta práctica resulta económica para los pequeños propietarios que desean limpiar su área de producción. Si bien el fuego puede percibirse a largas distancias, no siempre es detectado ya sea debido a lo remoto del lugar donde ocurre, la geografía o falta de vigilancia. Pese a las deficiencias y limitaciones vistas en el capítulo II, los focos de calor permiten detectar la presencia de fuego y así también gran parte de la deforestación a un bajo costo, pues usa imágenes gratuitas, y en el corto plazo, pues los portales son actualizados hasta cinco veces en un día (INPE s.f.) por lo que en teoría se podría informar un incendio/quema a las pocas horas de haber comenzado.

En Perú, la efectividad de este tipo de monitoreo dependerá de las condiciones geográficas de la zona a monitorear. El INPE indica que el sistema de focos de calor para detección de incendios funciona excelente para el territorio brasileño (Morelli 2014) pero cabe mencionar que ellos tienen solo dos biomas principales, el cerrado y el bosque. Bolivia, según fuentes de la Sala de Observación Bolivia, usando datos del INPE, también presenta excelentes resultados aunque los errores de omisión están siempre presentes. Entonces, si analizamos el terreno de Perú, notamos que la selva baja es la más parecida al ecosistema brasilero, por lo que se puede inferir que los focos de calor en esta zona tendrían una alta precisión así como los tienen en Brasil. En la zona de selva alta, por efecto de la cordillera que entre otras cosas ocasiona alta nubosidad, habría mayor posibilidad de encontrar errores de omisión por la misma limitante de los satélites ópticos de no poder registrar cuando hay nubes (sobre todo de Amazonas a Huánuco). En la costa, el tipo de bosque cambia, teniendo manglares en Tumbes y bosque seco en la costa norte.

Pese a la eficacia comprobada de los focos de calor, se decidió que era necesario probar el nivel de acierto de los focos de calor en el Perú debido a sus características geográficas particulares. La investigación se iniciaría con la región Amazónica (ámbito de este

documento) pero luego se haría también para zonas altoandinas y costeras. Se determinó que la validación se haría en gabinete contrastando los focos de calor con sus correspondientes cicatrices en imágenes satelitales; sin embargo, como parte de otras actividades de la Sala de observación Perú se harían salidas de campo durante el último trimestre del 2015 donde podrían validarse algunos pocos puntos en campo.

La revisión bibliográfica sirvió para saber qué satélites daban focos de calor para Perú; sin embargo, hacer una validación con todos ellos demandaría mucho tiempo. Se decidió que un primer paso sería hacer un análisis histórico de los focos de calor de los diferentes satélites que reportan datos para Perú donde se observe su comportamiento a los largo del tiempo: estabilidad de los reportes, distribución en el territorio peruano y cantidad de focos reportados; de manera de seleccionar solo unos pocos satélites para los estudios de validación. Para esto, se usó los focos de calor descargado del INPE (2015), desde el año 2000 hasta fines de mayo de 2015. Además se analizaron los focos de calor para saber las zonas de alta concentración de focos de calor en la Amazonía peruana y para saber los meses de alta concentración de los mismos.

1.1. ANÁLISIS GENERAL

El Cuadro 12 muestra la cantidad de focos de calor para Perú por año, desde el 2000 hasta el 31 de mayo de 2015. Los diferentes satélites GOES y NOAA están resumidos en uno solo respectivamente, pero en el Anexo 1 se puede apreciar el disgregado tal cual se descargó de la base de datos del INPE. Se observa, que para el 2015, solo se encuentran activos los satélites Aqua, Terra, GOES, NOAA y NPP. De ellos, el NOAA reporta muy pocos focos y el NPP es el que más focos de calor reporta.

Cuadro 12: Cantidad de registros de focos de calor anuales por satélite, desde el 01/ene/2000 al 31/mayo/2015.

Año	AQUA	ATSR	GOES *	NOAA **	NPP	TERRA	TRMM	Total
2000		163	0	2748	0	1335		4246
2001		9	1	371	0	1701		2082
2002	5474	18	861	425	0	1757		8535
2003	11488	21	3550	2745	0	2058		19862

2004	6576	20	618	1528	0	1083		9825
2005	12081	97	1798	2194	0	2848		19018
2006	6200	46	4428	915	0	1430		13019
2007	8438	15	2157	569	0	1385	430	12994
2008	6433	26	1323	734	0	1012	536	10064
2009	8809		1218	264	0	2148	192	12631
2010	11556	90	3027	221	0	3279	342	18515
2011	8272	22	2505	71	0	2236	25	13131
2012	12990	4	5609	342	0	3604	527	23076
2013	8470		3307	302	1479	2120	487	16165
2014	8487		2764	435	10891	2340	237	25154
2015	2061		2947	138	4069	810		10025
Total	117335	531	36113	14002	16439	31146	2776	218342

* GOES es la suma de los focos de calor de GOES 8, 10, 12 y 13.

**NOAA es la suma de los focos de calor del NOAA 12, 14, 16, 17, 18 y 19

Fuente: Elaboración propia en base a datos del INPE (descarga de datos 05/jun/2015)

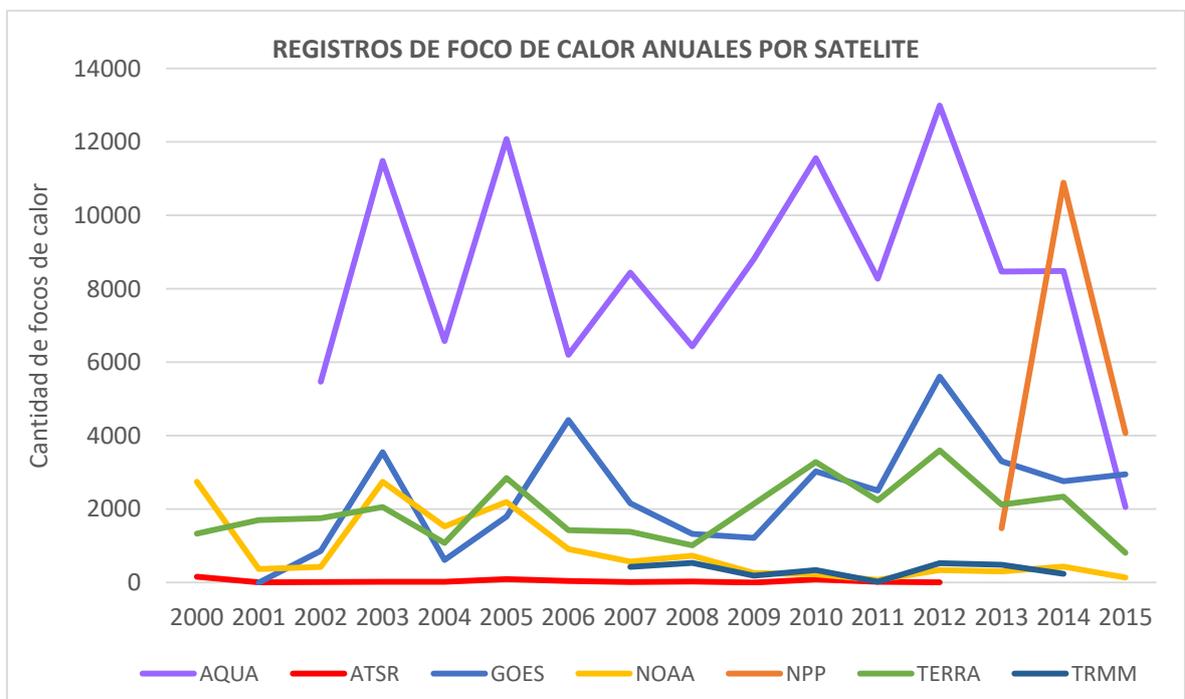


Figura 17: Cantidad de registros de focos de calor anuales por satélite, desde el 01/ene/2000 al 31/may/2015

Fuente: Elaboración propia en base a datos del INPE (descarga de datos 05/jun/2015)

En la Figura 17 se observa que la cantidad de focos de calor de los satélites Aqua, Terra y GOES se mantienen relativamente constante y superior a los demás satélites, aunque se debe tener en cuenta que el GOES en verdad representa a varios satélites del mismo grupo a lo largo del tiempo (Ver Anexo 1). Se observa también, que para el último año de análisis (2015), los satélites ATSR y TRMM ya no reportan datos para Perú. Además, Aqua es el satélite que más focos de calor reporta a lo largo del tiempo solo superado por el Suomi NPP desde el 2014.

La Figura 18 muestra una comparación entre el mapa de focos de calor de la región amazónica del satélite Aqua desde el 2002-2014 (izquierda) con el mapa de No Bosque de la Amazonía acumulado al 2014 (PNCB-MINAM/SERFOR-MINAGRI/SdO-Perú 2015).. Se observa que los focos de calor siguen un patrón similar al de las áreas de No Bosque por lo que la relación entre ambos es evidente. Se tomó los focos del Satélite Aqua por presentar la mayor cantidad de focos y estabilidad para el periodo de años analizados.

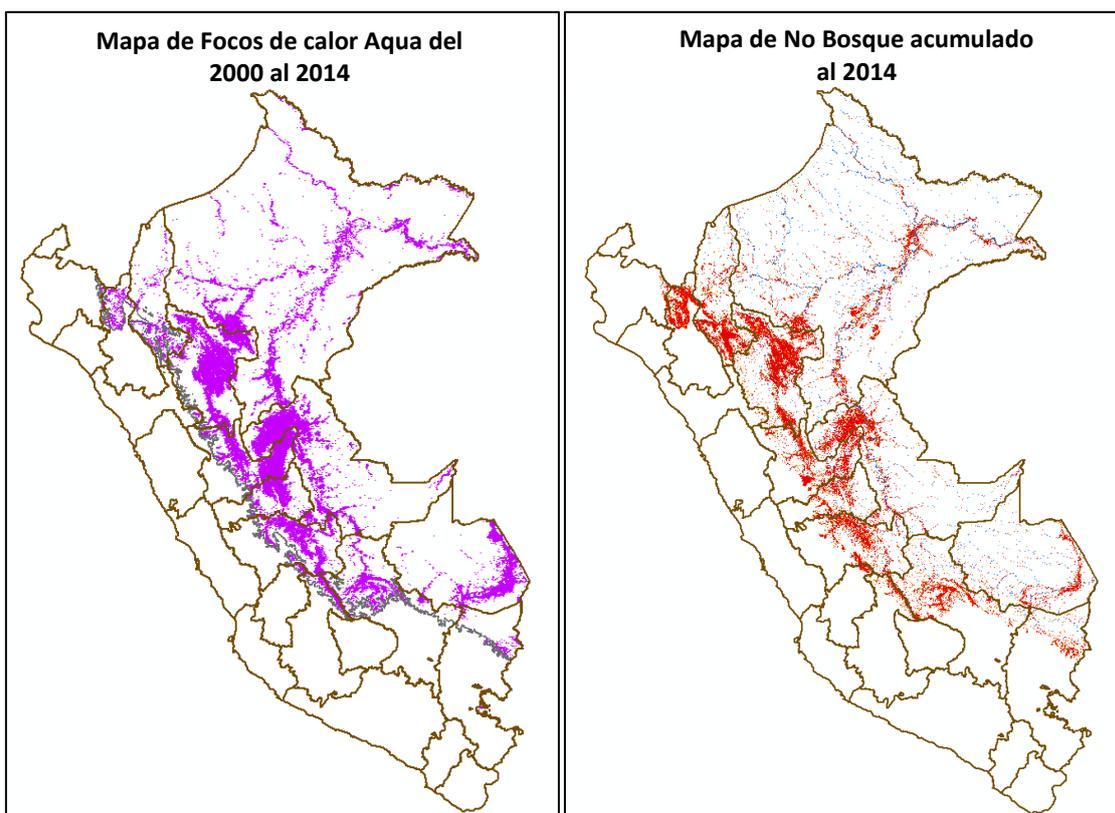


Figura 18: Comparación de los focos de calor de satélite Aqua de los años 2002-2014 (izquierda – morado) con las zonas de No Bosque en la Amazonía (derecha – rojo).

Fuente: Mapa de focos: elaboración propia. Mapa de No Bosque: (PNCB-MINAM/SERFOR-MINAGRI/SdO-Perú 2015)

1.2. FOCOS DE CALOR DEL SATÉLITE NOAA

El satélite NOAA era el satélite de referencia para el INPE hasta el 2007, luego pasó a serlo Aqua. Fueron elegidos como satélite de referencia porque su horario de pasaje fue estable a lo largo de los años, manteniendo por tanto el mismo patrón de muestreo temporal (INPE s.f.). En la Figura 19 se observa la variación en la cantidad de puntos de los satélites NOAA. Se observa que los últimos 5 años, la cantidad de focos reportados ha disminuido considerablemente.

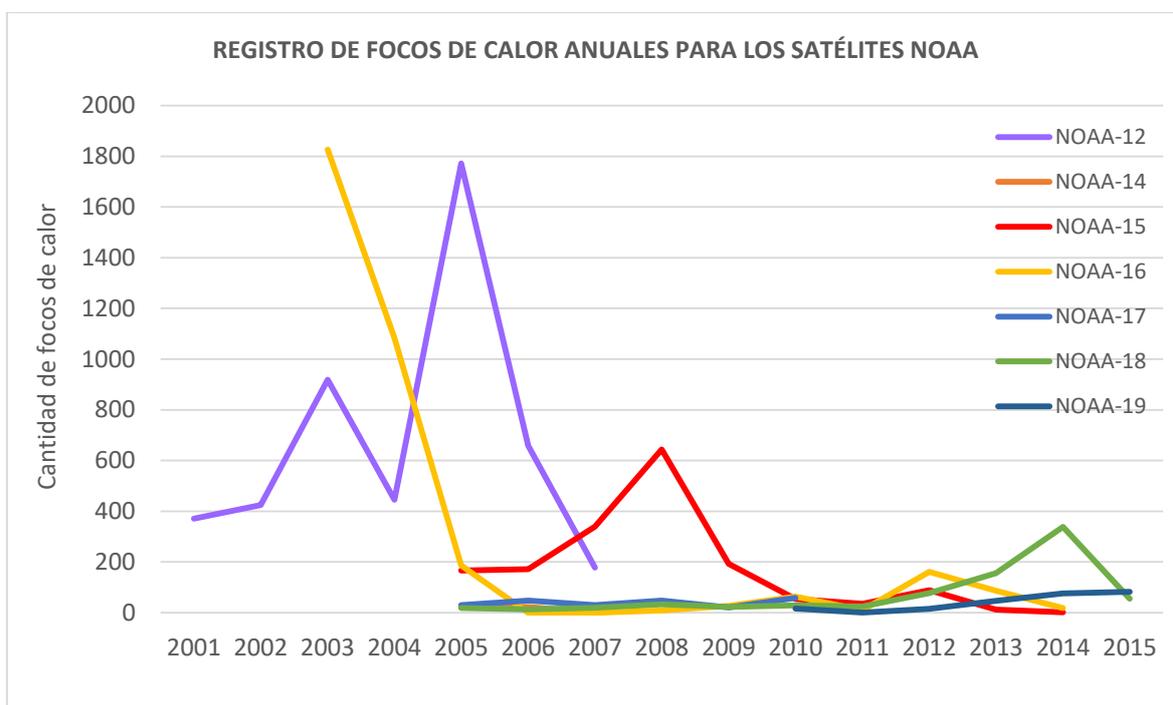


Figura 19: Focos de calor reportados por los satélites NOAA desde el año 2001 hasta el 2015.

Fuente: elaboración propia en base a datos del INPE (descarga de datos 05/jun/2015)

En la Figura 20 se observa la distribución de focos de calor a lo largo del país. Los puntos rojos son del año 2015 y los amarillos son los del 2014. La zona que más focos recolecta en el 2015 es Ucayali mientras que hay escasez de focos en los demás departamentos. En el año 2015 se observa en general una escasa cantidad de focos a lo largo del país.

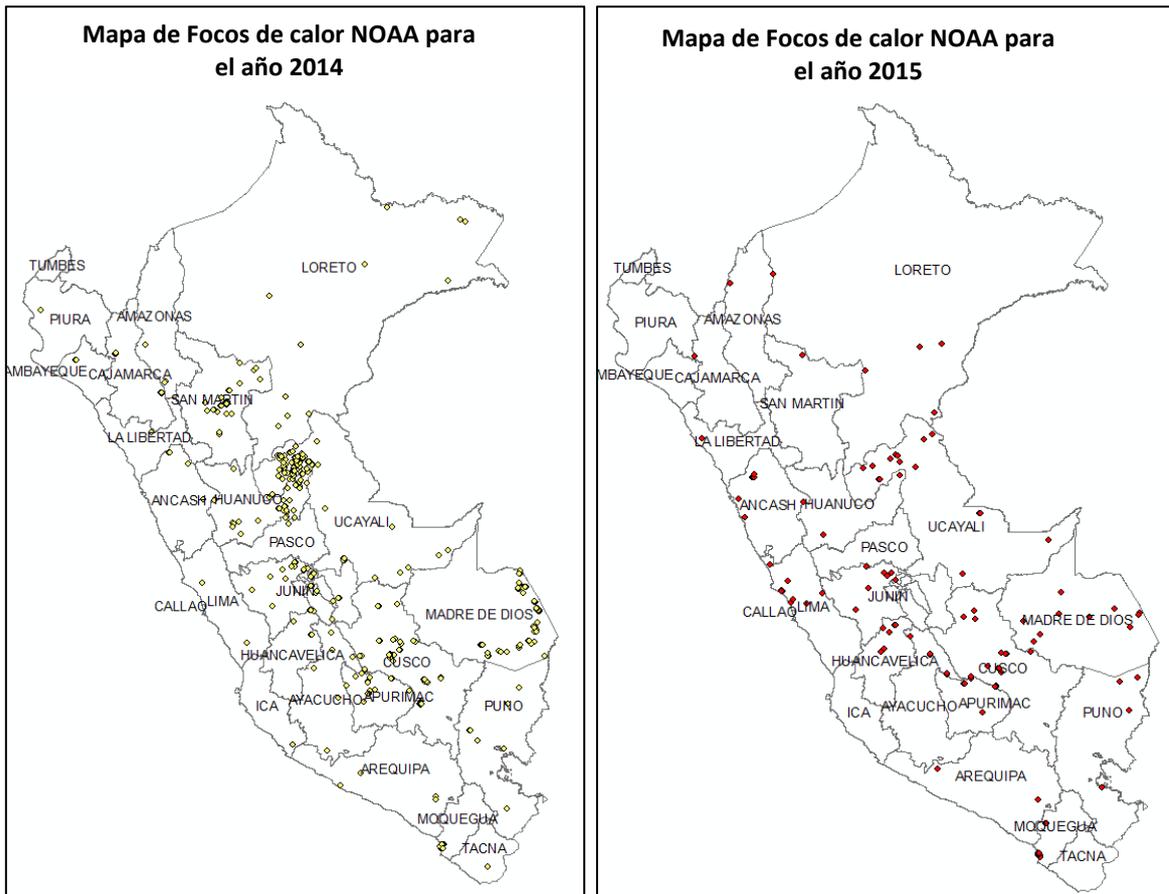


Figura 20: Distribución de los focos de calor reportados por NOAA para el año 2014 (amarillo) y el 2015 (rojo).

1.3. FOCOS DE CALOR DEL SATÉLITE GOES

El satélite GOES-08 inició reportes desde agosto de 2002 hasta marzo de 2003. El satélite GOES-10 mostró reportes desde mayo de 2007 hasta noviembre de 2009. El satélite GOES-12 inició reportes desde Julio del 2003 hasta agosto del 2013 pero con reportes irregulares: el 2007 solo se reportaron datos para 5 meses, el 2008 no hubo reportes y estos se retomaron recién en diciembre de 2009. El satélite GOES-13 inició reporte de Diciembre de 2011 hasta la actualidad. Se realizó una gráfica para detallar los focos de calor reportados por el satélite GOES año por año (Figura 21), donde se observa que la cantidad de focos es muy variada entre un año y otro. Esta variación puede explicarse por la ausencia de reporte en algunos meses y por otras anomalías que hace que se aumente en número los focos de calor.

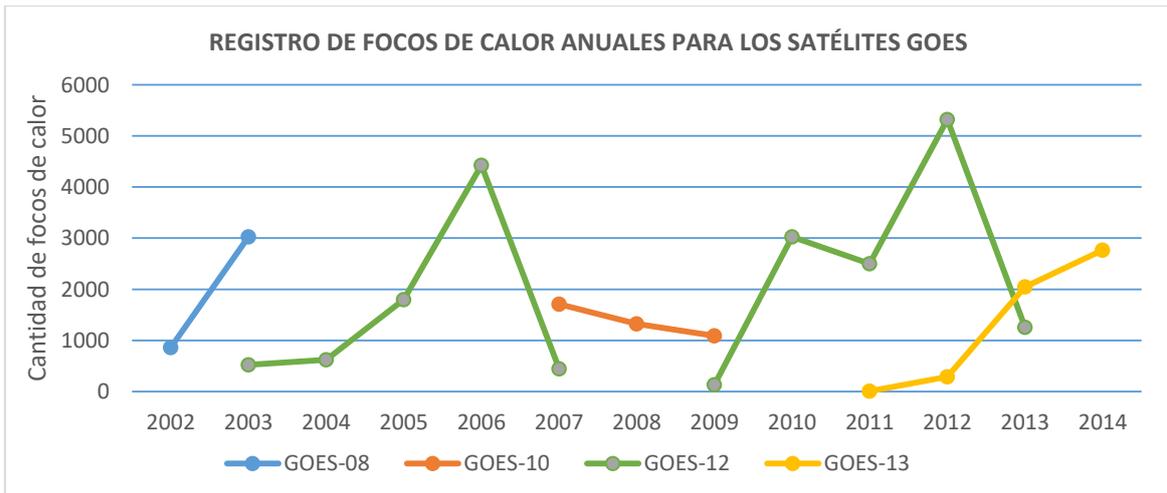


Figura 21: Focos de calor reportados por los satélites GOES desde el año 2002 hasta el 2014.

En la Figura 22 y 23 se observa las fallas mencionadas: aparecen focos repetitivos en forma de líneas de puntos continuadas, líneas verticales u horizontales. Estas fallas son constantes para los diversos satélites GOES que reportaron y reportan puntos de calor para Perú y se repiten en diversas regiones del país. Cabe mencionar que la mayor cantidad de esta falla se presenta en la zona de costa norte del país.

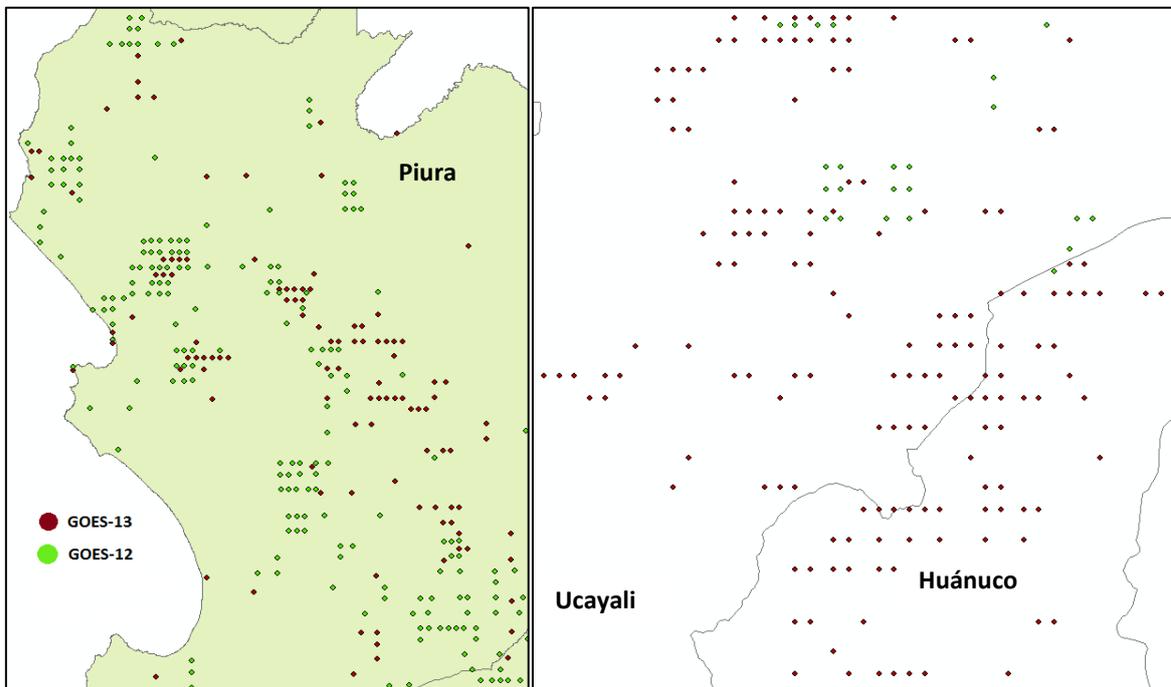


Figura 22: Focos de calor del año 2013 dados por el satélite GOES 13 y GOES 12. Capturas de Zona de Piura (imagen izquierda) y Ucayali y Huánuco (imagen derecha).

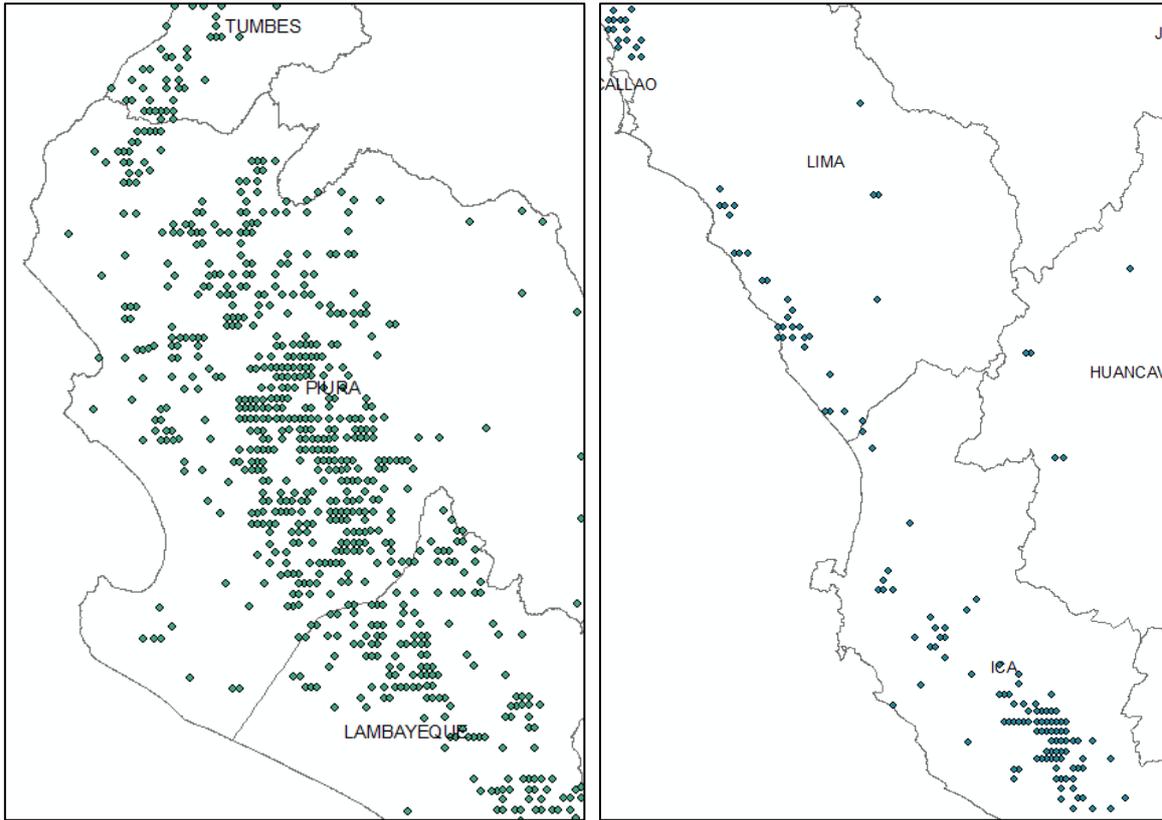


Figura 23: Focos de calor reportados por el satélite GOES. Izquierda: Focos de calor del año 2014, toma de la costa norte. Derecha: Focos de calor del año 2015, toma de la región de Ica.

1.4. FOCOS DE CALOR DE LOS SATÉLITES AQUA Y TERRA

En la Figura 24 se observa que a lo largo de los años, tanto el satélite Aqua como el Terra presentan constancia en el reporte de focos de calor pero el primero reporta mayor cantidad.

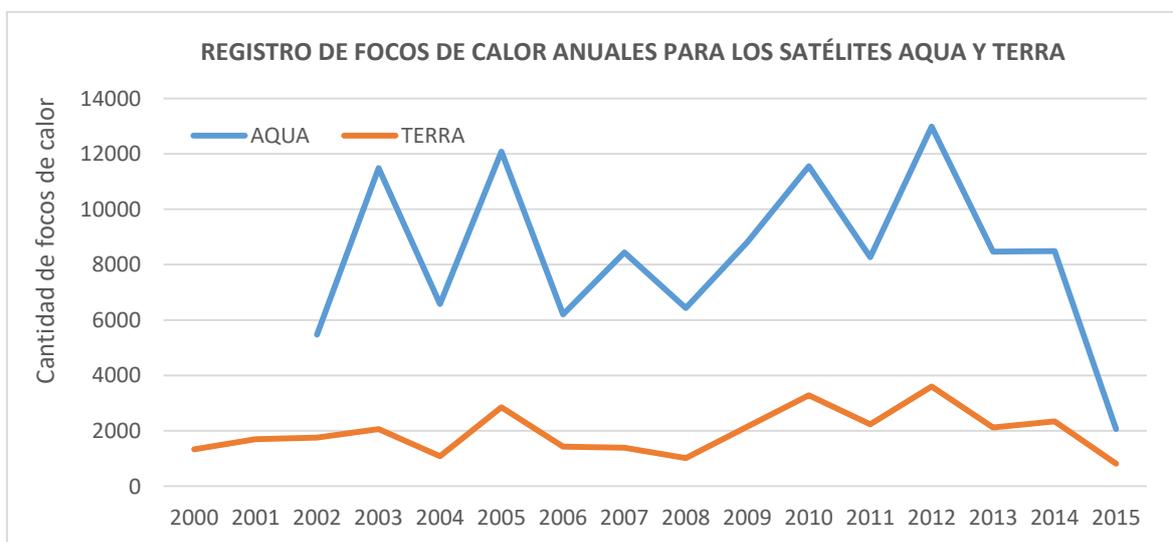


Figura 24: Gráfica de la evolución de los focos de los satélites TERRA y AQUA.

En la Figura 25 se observa la distribución de los focos de calor del sensor MODIS, para el año 2014 y 2015 en el país. Se observa que el sensor MODIS tiene una buena distribución a lo largo del país y presenta gran cantidad de focos.

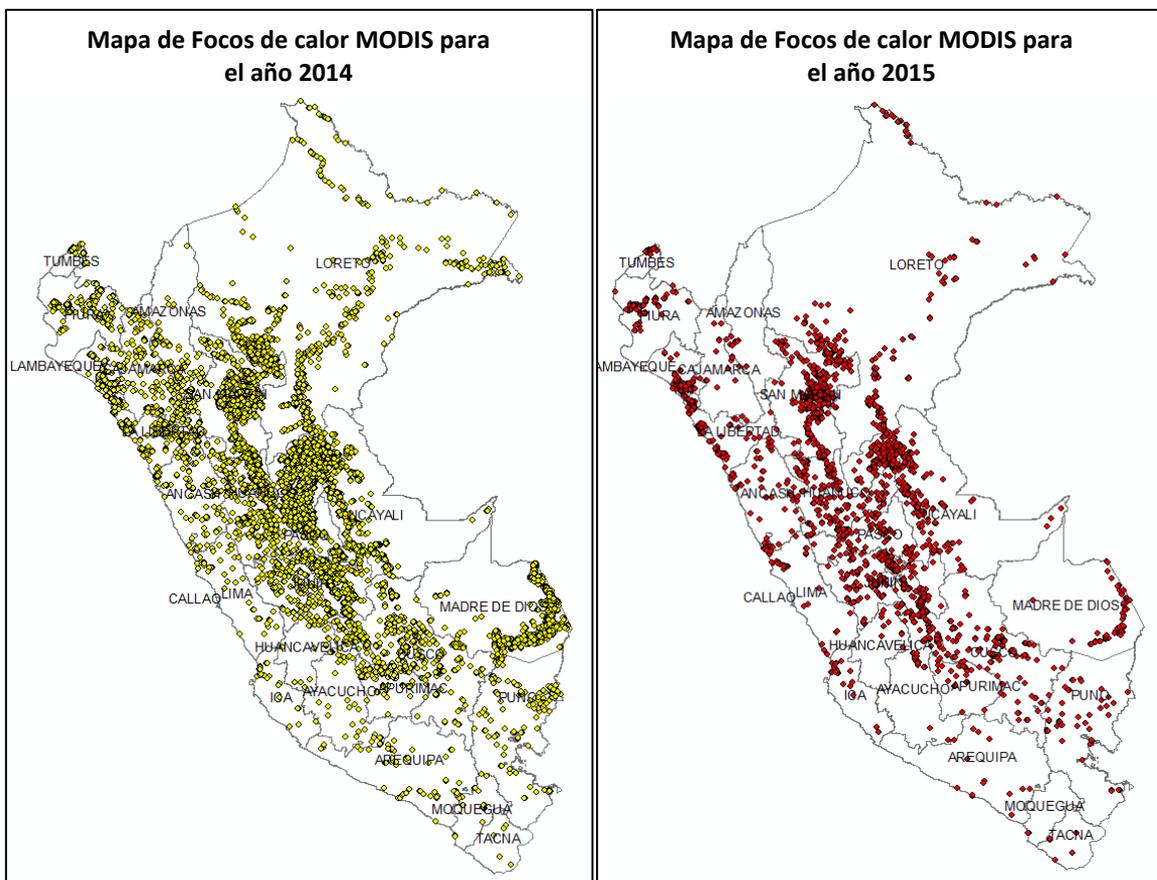


Figura 25: Distribución de los focos de calor reportados por MODIS para el año 2014 (amarillo) y el 2015 (rojo).

1.5. ANÁLISIS DE LOS FOCOS DE CALOR DEL SATÉLITE SUOMI NPP

El satélite Suomi NPP ha empezado a reportar desde finales de 2013 con la bandas M de 750m de resolución. Este año 2015, se ha sumado al reporte la banda I de 375m de resolución. En la Figura 26 se observa la distribución de sus focos en el país. Para el año 2014 solo aparecen focos de calor de la banda M (imagen izquierda). Para el año 2015 (imagen derecha) están los focos de calor sobrepuestos de la banda M y de la banda I. Se observa que la distribución de sus focos es bastante similar a la del MODIS pero presenta más puntos que este, debido a su menor resolución espacial y a las mejoras del sensor VIIRS respecto al MODIS. También se observa que el MODIS presenta mayor distribución de focos en la zona de costa y sierra sur.

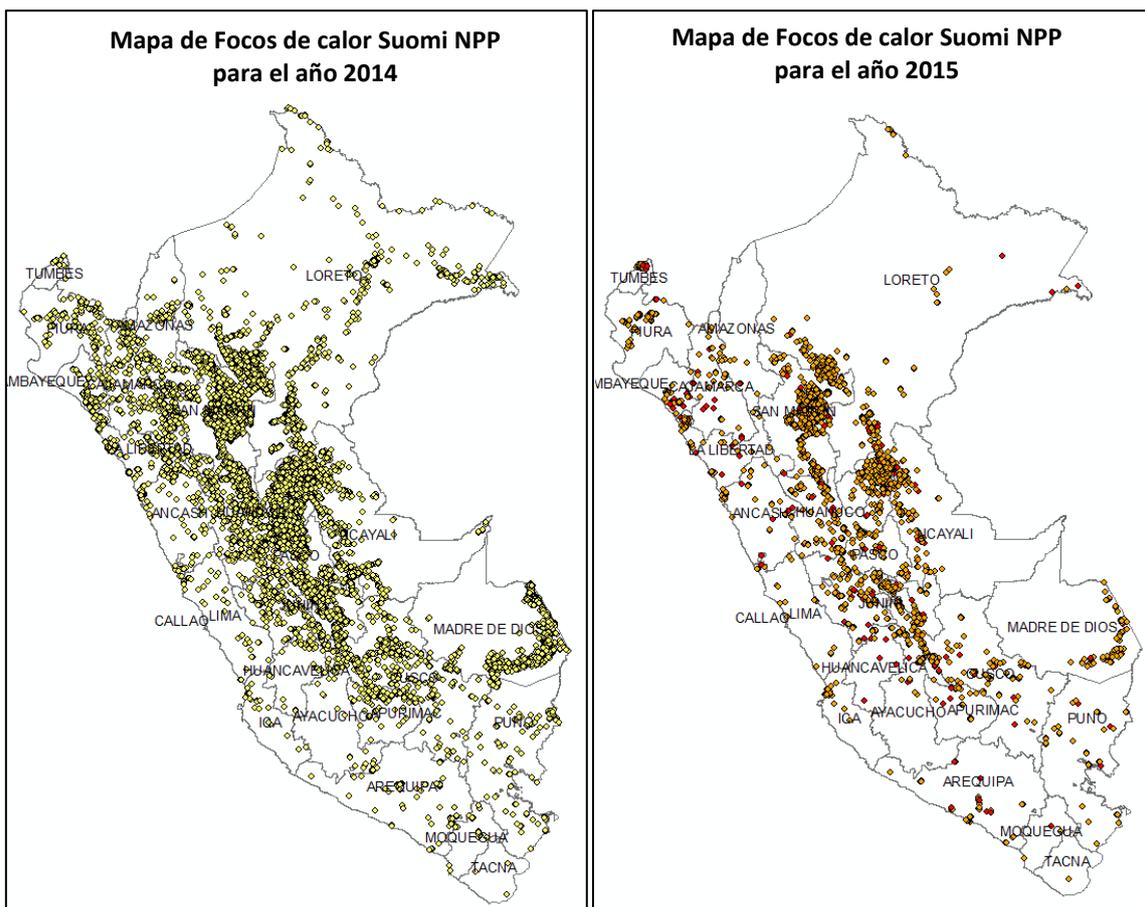


Figura 26: Distribución de los focos de calor reportados por NPP para el año 2014 (imagen izquierda: amarillo) y el 2015 (imagen derecha: rojo NPP-750 y naranja NPP-375).

1.6. ANÁLISIS DE LOS FOCOS DE CALOR POR REGIÓN

En la Figura 27 se observa que los departamentos que más focos de calor presentan a lo largo de los años son (en orden decreciente): Ucayali, San Martín, Huánuco, Madre de Dios, Loreto, Junín, Cusco y Pasco. Se observa que los focos de calor en la región Ucayali, Loreto, Huánuco y Pasco han subido un aumento notorio alrededor del año 2010. Se observa un aumento notable de focos de calor durante el año 2012.

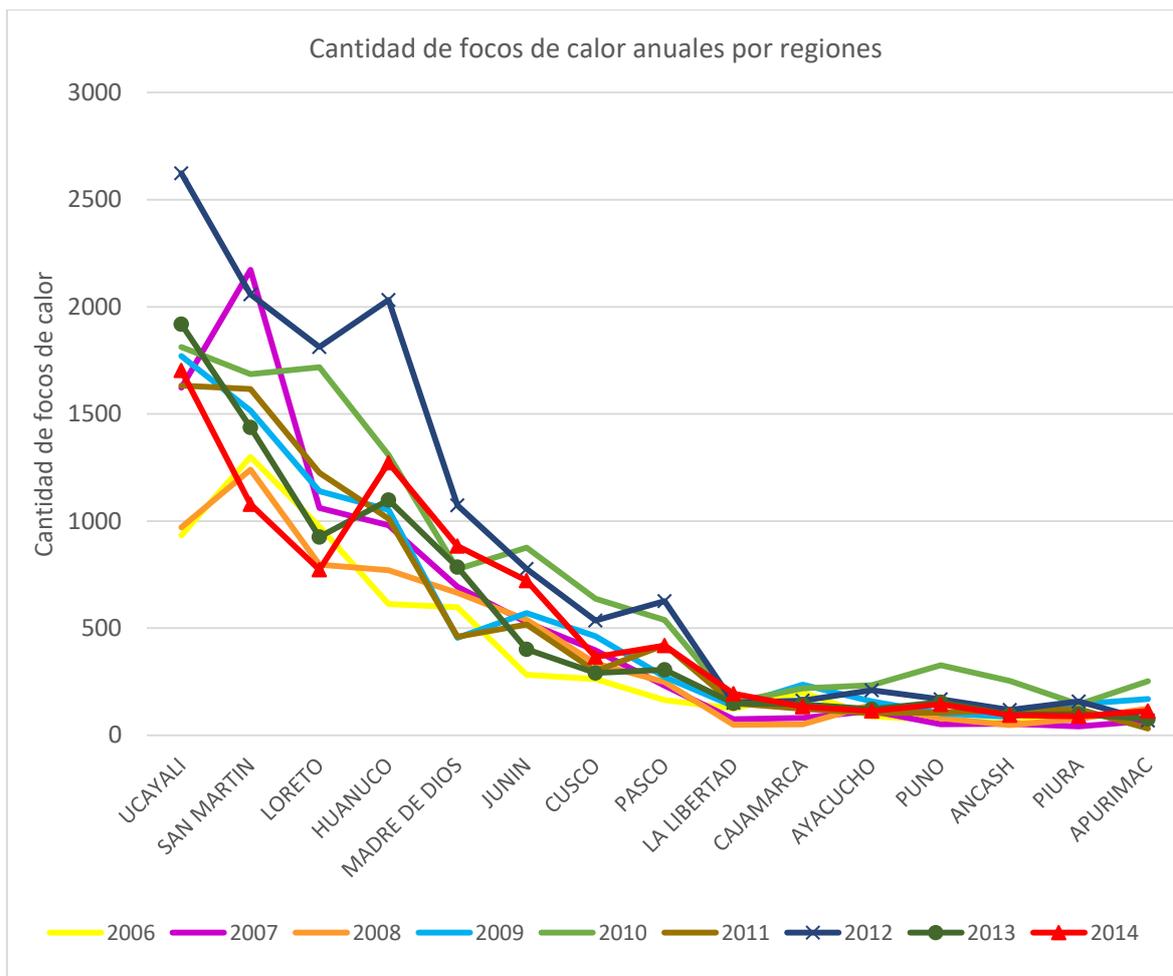


Figura 27: Quince regiones con mayor cantidad de focos de calor (2006-2014) reportados por el satélite Aqua.

En la Figura 28 se observa que las zonas de alta concentración de focos de calor se repiten en los años de análisis (2011-2014). Podemos identificar seis zonas de alta concentración: (1) a lo largo de la carretera interoceánica en Madre de Dios, (2) zona central de San Martín, (3) zona de Yurimaguas y Caynarachi, (4) zona de Puerto Inca-Padre Abad-Coronel Portillo-Oxapampa (5) zona de Chanchamayo-Satipo; y (6) tramo de la carretera Belaunde Terry que conecta Huánuco y San Martín.

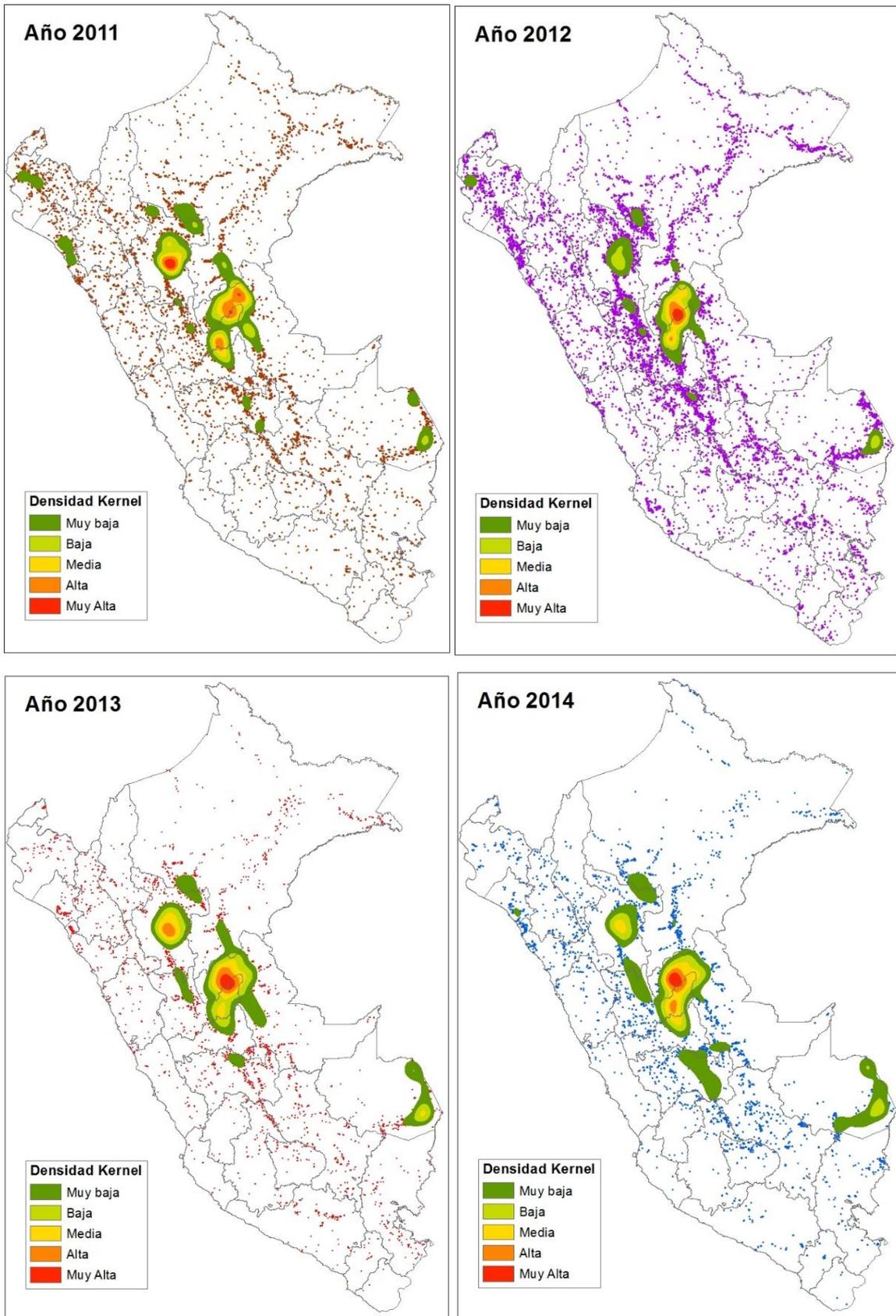


Figura 28: Densidad de Kernel de los focos de calor de los años 2011, 2012, 2013 y 2014

1.7. ANÁLISIS DE LOS FOCOS DE CALOR POR MES

En la Figura 29 se observa la ocurrencia de focos de calor por meses, tomando los años 2006 al 2014. De julio a noviembre son los meses que presentan mayor cantidad de focos de calor, sobresaliendo agosto y setiembre. Esto coincide con la época seca anterior al comienzo de lluvias (CSA-UPCH 2010).

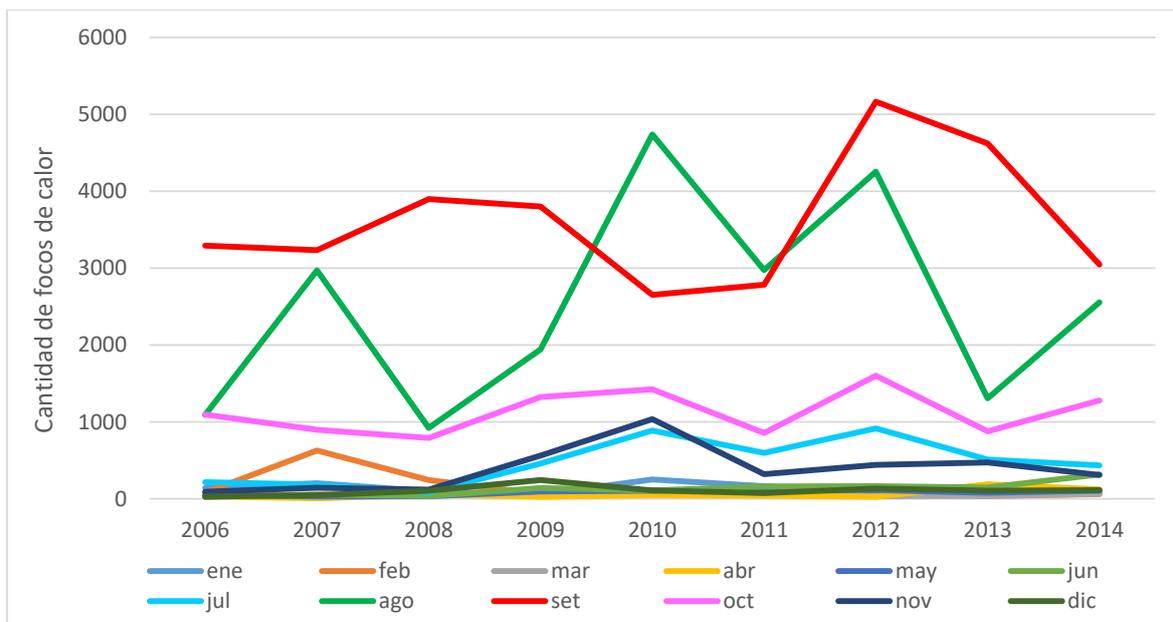


Figura 29: Variación de focos de calor del satélite Aqua por mes (2006-2014).

2. VALIDACIÓN CON IMÁGENES RAPID EYE

Este primer proceso de validación se llevó a cabo principalmente a exigencia de los Ministerios. Ya se contaba con una consultoría realizada para validar los focos de calor en la zona de San Martín (Geoservice Peru SAC 2014) donde se había comparado los focos de calor MODIS de la NASA y el INPE con imágenes Rapid Eye. El resultado del informe concluía que los focos de la NASA mostraron mayor efectividad que los del INPE y que era conveniente usarlos por la información adicional que contenía su tabla de atributos (específicamente por la variable “porcentaje de confianza”). Sin embargo, cuando se revisó los informes de consultoría se encontró que no mostraba sustento suficiente que justifique los resultados, más aún cuando la revisión bibliográfica realizada para el presente documento indicaba que:

- (a) Tanto el INPE como NASA utilizan el mismo algoritmo teniendo focos de calor prácticamente iguales. La investigación en Bolivia y México dice que pese a usar el mismo algoritmo existen ligeras variaciones pero no significativas.
- (b) El INPE indica que no existe una “mayor o menor confianza” ya que el algoritmo para obtener focos da positivo o negativo.
- (c) Existen focos de calor del Suomi NPP que, pese a estar en estado Provisional, ya se usa en México y Brasil, y los estudios comparativos con MODIS indican mejores resultados para el Suomi NPP (Csiszar et al. s.f.)

Finalmente, se decidió realizar la validación siguiendo la metodología de la consultoría, que consistió en comparar focos de calor de NASA e INPE contrastándolo con las cicatrices en imágenes Rapid Eye. Además de determinar el porcentaje de errores de comisión de los focos de calor, también se quiso determinar zonas donde ocurren estos errores (bosque, río, no bosque; y dentro de no bosque: urbe u alguna otra categoría que se pueda identificar). El tercer objetivo fue determinar si los datos de porcentaje de confianza y FRP (Fire Radiative Power) que ofrecen los focos de calor de la NASA tienen alguna relación con nivel de acierto de los focos de calor. Por último, se utilizó los datos de la NASA de *Track* y *Scan* para saber el tamaño real del pixel y ver cuánto afecta esta deformación en la validación de resultados.

2.1. PROCEDIMIENTO

La Sala de Observación Perú contaba con algunas imágenes satelitales Rapid Eye del 2011-2012 alcanzadas por los Ministerios, producto de la donación del gobierno japonés (donación Hatoyama) que recibieron el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre de MINAGRI y la Dirección General de Ordenamiento Territorial del Ministerio del Ambiente. Se seleccionaron 13 de estas imágenes cuyo criterio de selección correspondió, en primer lugar, a zonas donde se presentaban la mayor concentración de focos de calor pero también se consideró que las imágenes abarcaran zonas con distintas coberturas de terreno para explorar si las detecciones de focos de calor se encuentran afectadas sus distintas reflectancias. Se seleccionaron imágenes que presentaban grandes ríos con sus playas estacionales, zonas inundables estacionales, zonas urbanas, zonas de monocultivos, zonas de minería, zonas de cultivos agrícolas, zonas de bosque en general. Las imágenes elegidas fueron tanto en zonas de selva alta como baja (ver Cuadro 12 y Figura 30) y todas están en color real, tal como fueron entregadas a los ministerios.

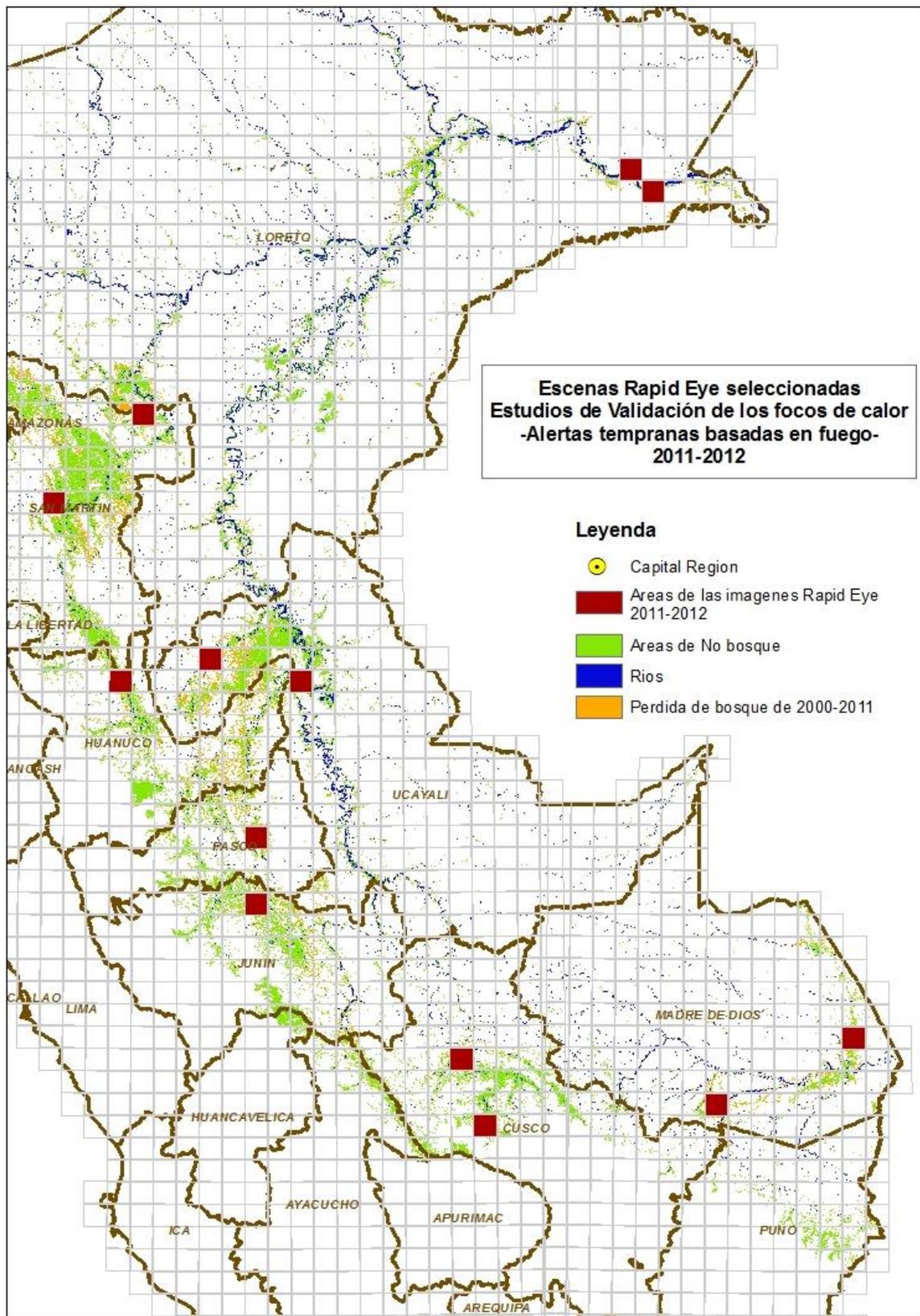


Figura 30: Mapa de las escenas Rapid Eye a utilizar en el primer estudio de validación.

Cuadro 13: Lista de imágenes Rapid Eye usadas para el primer estudio de validación.

Nº	Código imagen	Región	Provincias	Distritos	Fecha toma de imagen
1	1937304	Loreto	Mariscal Ramón Castilla	San Pablo, Ramón Castilla	07-ago-2012
2	1937205	Loreto	Mariscal Ramón Castilla	San Pablo, Ramón Castilla	22-ago-2012
3	1933414	Madre de Dios	Tambopata	Las Piedras	28-ago-2011
4	1933108	Madre de Dios	Manu Tambopata	Huepetuhe, Madre de Dios Inambari	27-set-2011
5	1833324	Cusco	La Convención	Echarate	17-ago-2011
6	1833025	Cusco	La Convención Urubamba	Vilcabamba, Huayopata, Santa Teresa MacchuPicchu	30-ago-2012
7	1835017	Ucayali	Coronel Portillo Puerto Inca (Huánuco)	Masisea, Manantya, Iparia Honoría	27-ago-2011
8	1835113	Ucayali	Padre Abad	Irazola, Curimana, Padre Abad	02-set-2012
9	1836210	San Martín	Lamas San Martín Alto Amazonas (Loreto)	Barranquita El Porvenir Yurimaguas, Teniente Cesar Lopez Rojas	22-ago-2012
10	1835806	San Martín	Huallaga Mariscal Cáceres	Saposoá, Picoyacu, El Eslabón, Sacanche Juanjui, Pachiza	10-ago-2012
11	1834315	Pasco	Oxapampa	Puerto Bermudez	27-ago-2011
12	835009	Huánuco	Marañón Leoncio Prado Tocache (San Martín)	Cholón José Crespo y Castillo Nuevo Progreso	13-ago-2011
13	1834015	Junín	Chanchamayo	Perene Pichanaki	27-ago-2011

La validación con imágenes Rapid Eye se inició en julio de 2015. Estas imágenes tienen una resolución espacial de 5m. El procedimiento seguido se detalla a continuación.

1. Se descargaron los focos de calor de la NASA y del INPE (solo del sensor MODIS – satélites Terra y Aqua -) para las fechas del 01/01/2011 al 31/12/2012 en formato *shapefile*¹. Los focos fueron descargados la primera semana de agosto 2015.
2. En el programa ArcGis, se re proyectó ambos *shapefiles* a la proyección UTM -18S datum WGS 84. Los focos del INPE vienen con proyección geográfica SIRGAS 2000 y los de la NASA en geográficas WGS84.
3. Se sobrepusieron las capas de Distrito-Provincia-Región, la imagen a evaluar y los focos de ambas instituciones.
4. Se filtraron los focos de calor localizados dentro de la imagen y luego se filtraron nuevamente para que queden sólo los focos previos a la fecha la imagen, con 6 meses de antigüedad como máximo respecto a la toma de la imagen.
5. Se hizo un *buffer*² cuadrado a cada foco que represente el tamaño real del pixel utilizando los datos de *scan* y *track* en la tabla de atributos del *shapefile* de la NASA. Un *scan* o *track* mayor a 1km implica distorsión.
6. Si se evidenció una cicatriz dentro del *buffer*, es un acierto. Si no, es una falsa alarma (error comisión).
7. Se analizó la tabla de atributos de pixeles de la NASA. Se observa el % de confianza y FRP de los focos de calor para intentar establecer una relación entre ellos y el nivel de acierto de los focos de calor.

2.2. CONTRASTE DE LOS FOCOS DE CALOR CON CADA IMAGEN

Los resultados de cada imagen están en dos tablas. En una de ellas aparece el total de aciertos para los focos provenientes de ambas instituciones. En la otra, cada foco de calor de la NASA con su porcentaje de confianza, FRP y precisión. Los focos de calor de la NASA se encuentran en color azul y los del INPE en color rojo. Las fechas y los *buffers* de los mismos responden al mismo patrón de colores. La capa de focos de la NASA se ha colocado sobre

¹ Tipo de archivo informático de extensión .shp que contiene información vectorial espacializada

² Es el área de influencia alrededor de un elemento que puede de punto o línea.

la del INPE pues en las trece imágenes trabajadas se ha dado que los focos de la NASA los contiene el INPE, pero no todos los puntos del INPE lo contiene la NASA. Por lo tanto, en los casos donde el punto de calor de la NASA está exactamente sobrepuesto al del INPE solo se ve el punto azul. Cuando se encontró alguna observación útil para formular la futura metodología del sistema de alertas tempranas basadas en focos de calor, se tomó una captura de pantalla y se hizo una breve descripción del caso.

2.2.1. LORETO (Cód. imagen 1937304)

- Distrito de San Pablo y Ramón Castilla. Provincia de Mariscal Ramón Castilla.
- Imagen del 07 de agosto 2012

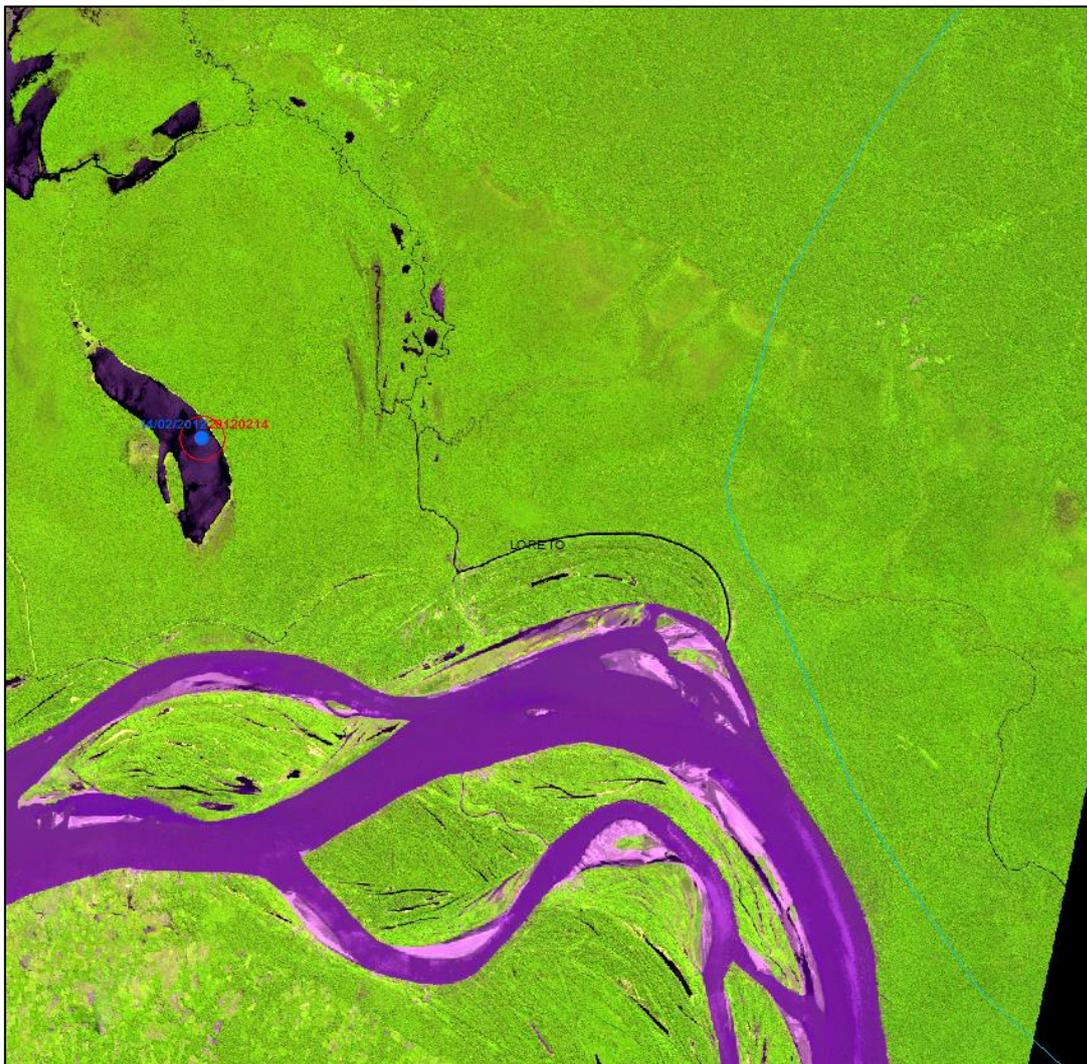


Figura 31: Escena Completa Rapid Eye 1937304 - Loreto

Cuadro 14: Resumen de aciertos/errores - Escena de Loreto Rapid Eye 1937304

	Total	Errores	Zona del error
INPE	1	1	Río
NASA	1	1	Río

Cuadro 15: Focos de calor registrados por la NASA – Escena Rapid Eye 1937304

Foco	Confianza	FRP	Precisión
1	30	9.8	Error (Río)

Para la región Loreto se procuró encontrar una imagen que incluya ríos grandes. Se encontraron solo dos imágenes de estas características que contuvieran focos de calor de fecha previa a la toma de imagen. Ambas imágenes fueron tomadas para la validación. En la Figura 31 se muestra la primera imagen seleccionada. Contiene solo un foco de calor cerca al río, en una zona donde no ha habido mucha intervención antrópica. Esta fue una de las dos imágenes encontradas que presentaban algún foco de calor y ambas fueron seleccionadas.

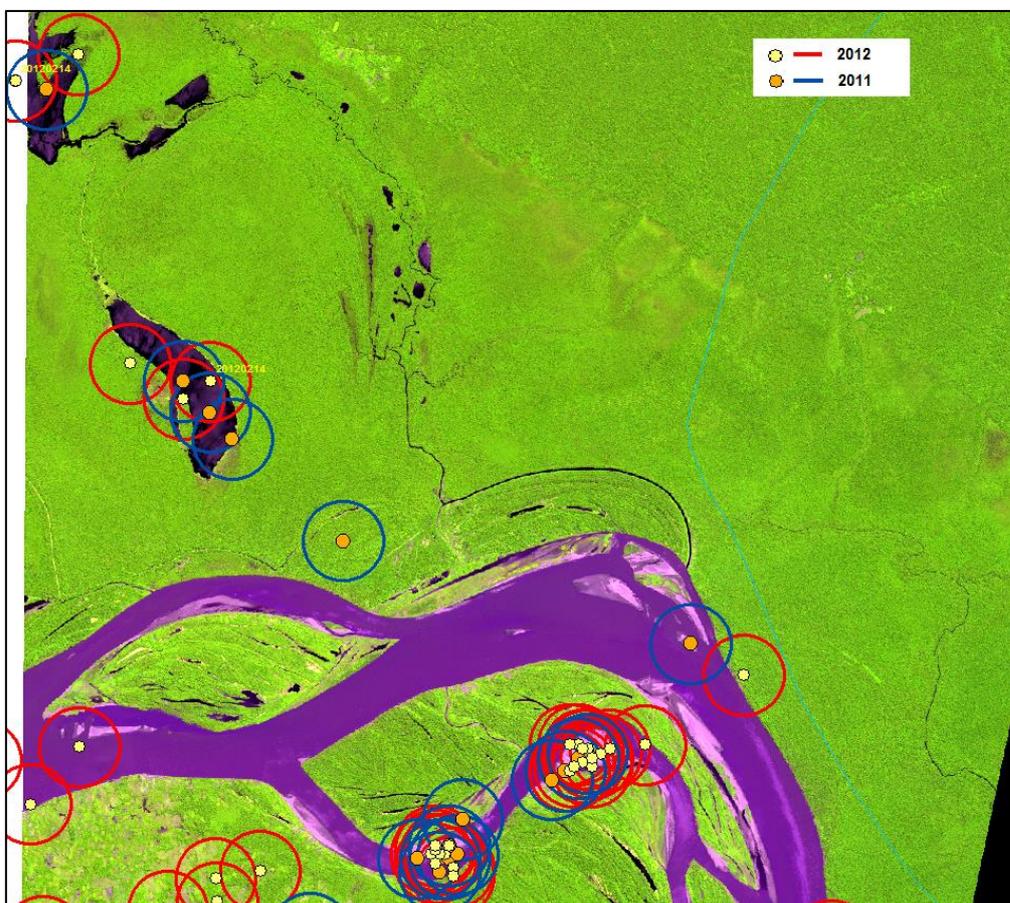


Figura 32: Errores en zonas de ríos – Escena de Loreto Rapid Eye 1937304

El foco de calor presente en la imagen es un error, pero para verificar si el falso positivo es un error frecuente se sobrepuso los focos de calor del año 2012 y 2011 con sus respectivos *buffer* (Figura 32). Se observa que los focos son recurrentes en las zonas donde el río se expande y forma playas, dejando la posibilidad de que sea la reflectancia de esta zona la causa de los falsos positivos.

2.2.2. LORETO (Cód. imagen 1937205)

- Distrito de San Pablo, Ramón Castilla. Provincia de Mariscal Ramón Castilla.
- Imagen del 22 agosto 2012



Figura 33: Escena completa Rapid Eye 1937205 - Loreto

Cuadro 16: Resumen de aciertos/errores – Escena de Loreto Rapid Eye 1937205

	Total	Errores	Zona del error
INPE	2	0	
NASA	2	0	

Cuadro 17: Focos de calor registrados por la NASA – Escena Rapid Eye 1937205

Foco	Confianza	FRP	Precisión
1	11	12.4	acierto
2	53	38.4	acierto

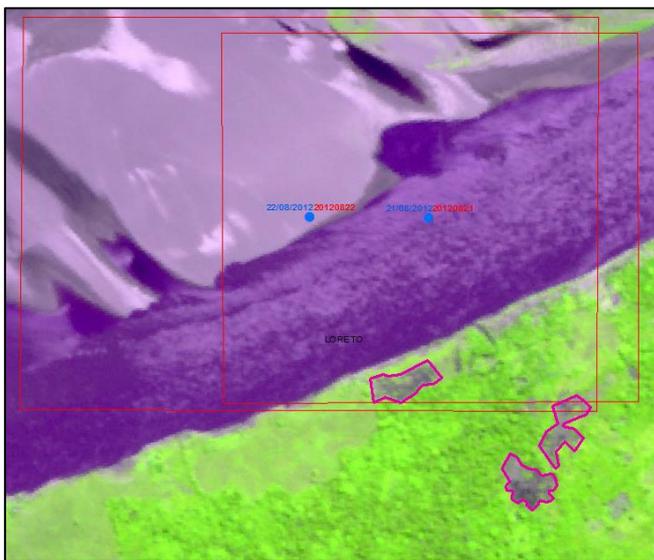


Figura 34: Detalle de los focos de calor – Escena de Loreto Rapid Eye 1937205

Los polígonos en magenta representan las cicatrices de quema reciente.

Al igual que la escena anterior, esta escena también corresponde a un río y los focos de calor se localizan en las zonas de playas. Sin embargo cerca se aprecian pequeñas cicatrices de quema reciente y los focos pueden referirse a las mismas (Figura 34). De todas maneras, se sobrepusieron los focos de calor del año 2011 y 2012. En la Figura 35 puede observarse que esta es una zona de error frecuente por presentarse sucesivamente focos de calor en áreas no intervenidas.

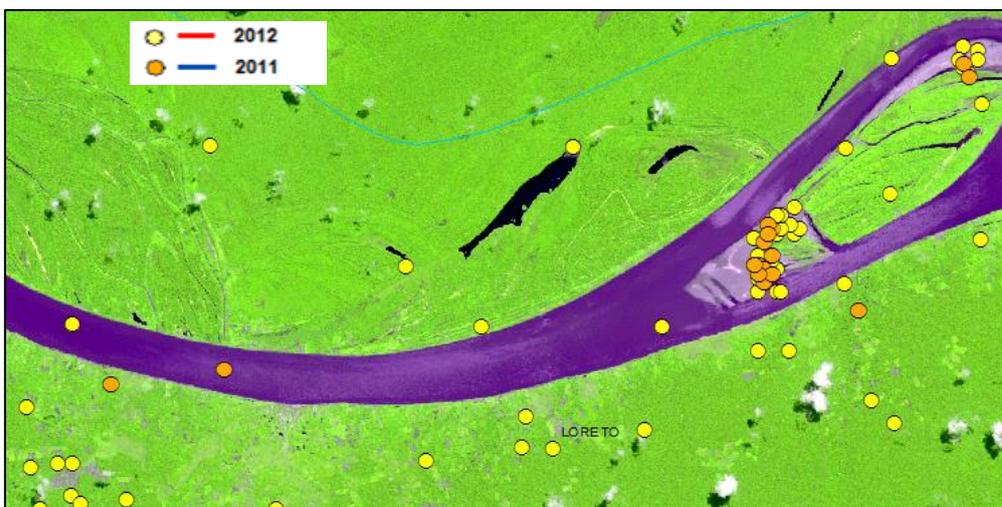


Figura 35: Detalle de error en ríos – Escena de Loreto Rapid Eye 1937205

Para la zona de Loreto, no se pudieron contrastar muchos focos de calor debido a la no coincidencia entre la fecha de la imagen y los focos de calor registrados para la zona. El análisis de esta región puede complementarse con el segundo estudio de validación.

2.2.3. MADRE DE DIOS (Cód. imagen 1933414)

- Distrito de Las Piedras. Provincia de Tambopata
- Imagen del 28 agosto 2011

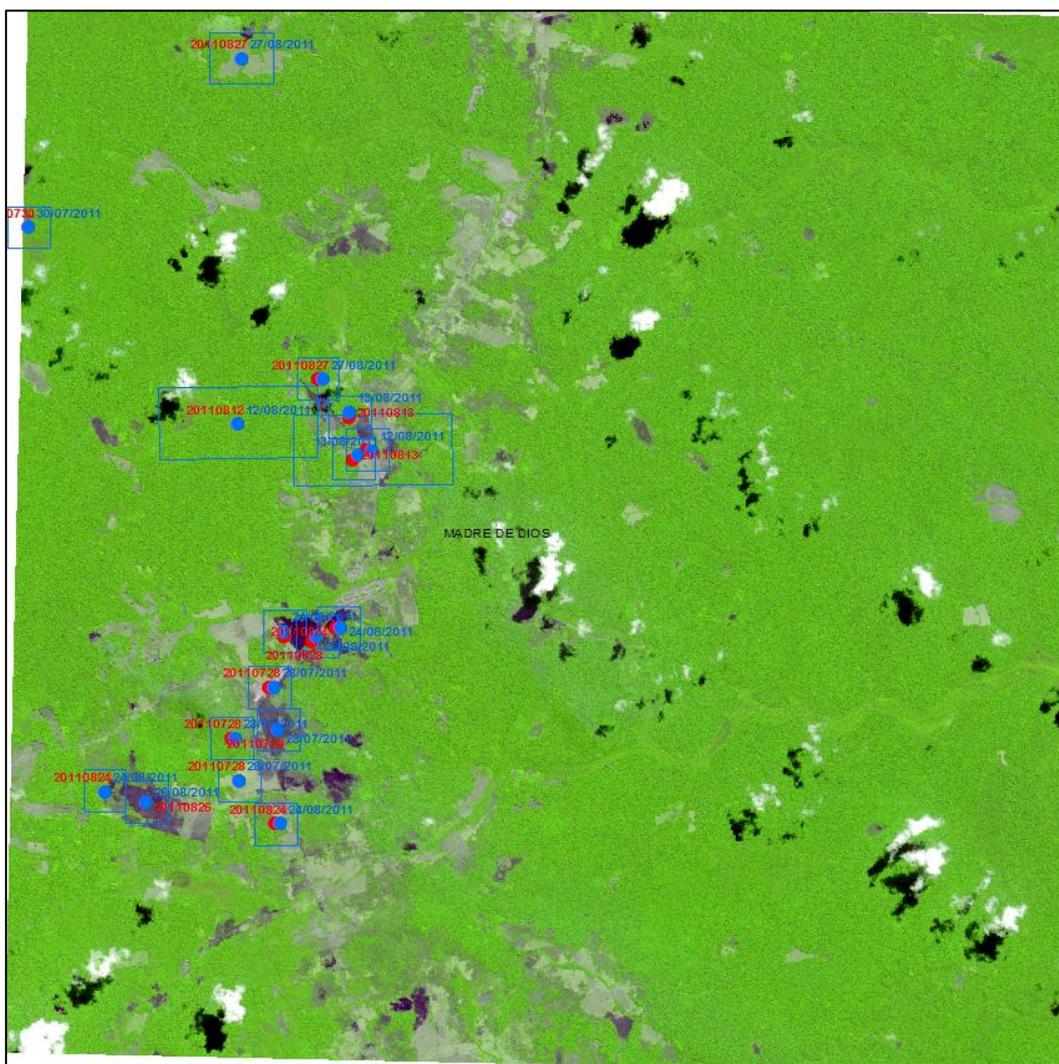


Figura 36: Escena completa Rapid Eye 1933414 – Madre de Dios

Cuadro 18: Resumen de aciertos/errores – Escena de Madre de Dios Rapid Eye 1933414

	Total	Errores	Zona del error
INPE	17	0	
NASA	17	0	

Cuadro 19: Focos de calor registrados por la NASA – Escena de Rapid Eye 1933414

Foco	Confianza	FRP	Precisión
1	37	12.5	Acierto
2	46	11.2	Acierto
3	47	45.3	Acierto
4	48	47.4	Acierto
5	50	13.2	Acierto
6	59	18.6	Acierto
7	62	13.4	Acierto
8	63	12.5	Acierto
9	66	14.5	Acierto
10	69	13.5	Acierto
11	72	22.6	Acierto
12	77	18.7	Acierto
13	77	26.9	Acierto
14	78	33.5	Acierto
15	81	24	Acierto
16	90	46.8	Acierto
17	100	131	Acierto

En esta escena todos los focos de calor representan una quema, así como lo muestran las Figuras 37 y 38. También se observan algunos píxeles cuya distorsión alcanza a 3km en el *scan* y 2km en el *track*.

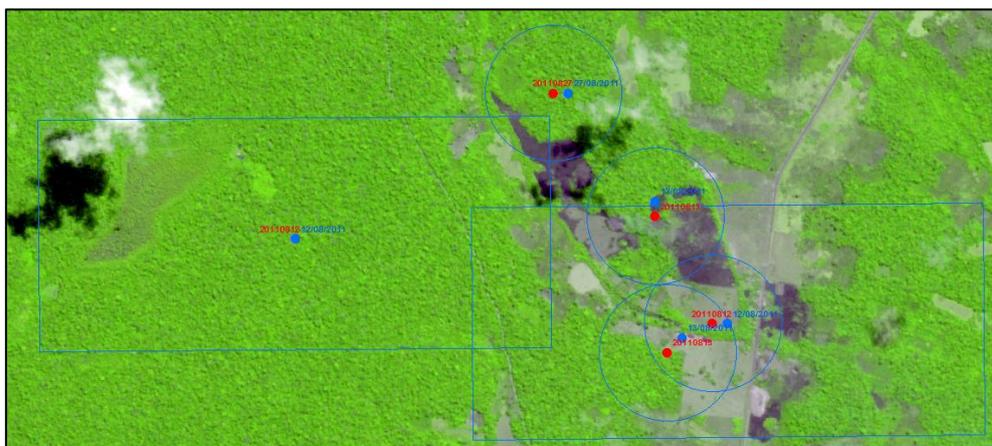


Figura 37: Detalle de focos de calor correspondientes a píxeles distorsionados - Rapid Eye 1933414



Figura 38: Detalle de correspondencia de focos de calor con cicatrices de quema - Rapid Eye 1933414

2.2.4. MADRE DE DIOS (Cód. imagen 1933108)

- Distrito de Huepetuhe y Madre de Dios. Provincia de Manu.
Distrito de Inambari. Provincia de Tambopata
- Imagen del 27 setiembre 2011

Cuadro 20: Resumen de aciertos/errores – Escena de Madre de Dios Rapid Eye 1933108

	Total	Errores	Zona del error
INPE	7	3	2 Río/1Bosque
NASA	7	3	2 Río/1Bosque

Cuadro 21: Focos de calor registrados por la NASA –Escena Rapid Eye 1933108

Foco	Confianza	FRP	Precisión
1	61	12.1	Error (Río)
2	64	14.2	Error (Río)
3	94	610	Acierto

4	89	437	Acierto
5	65	10.5	Acierto
6	89	60.2	Acierto
7	36	14.2	Error (Bosque)

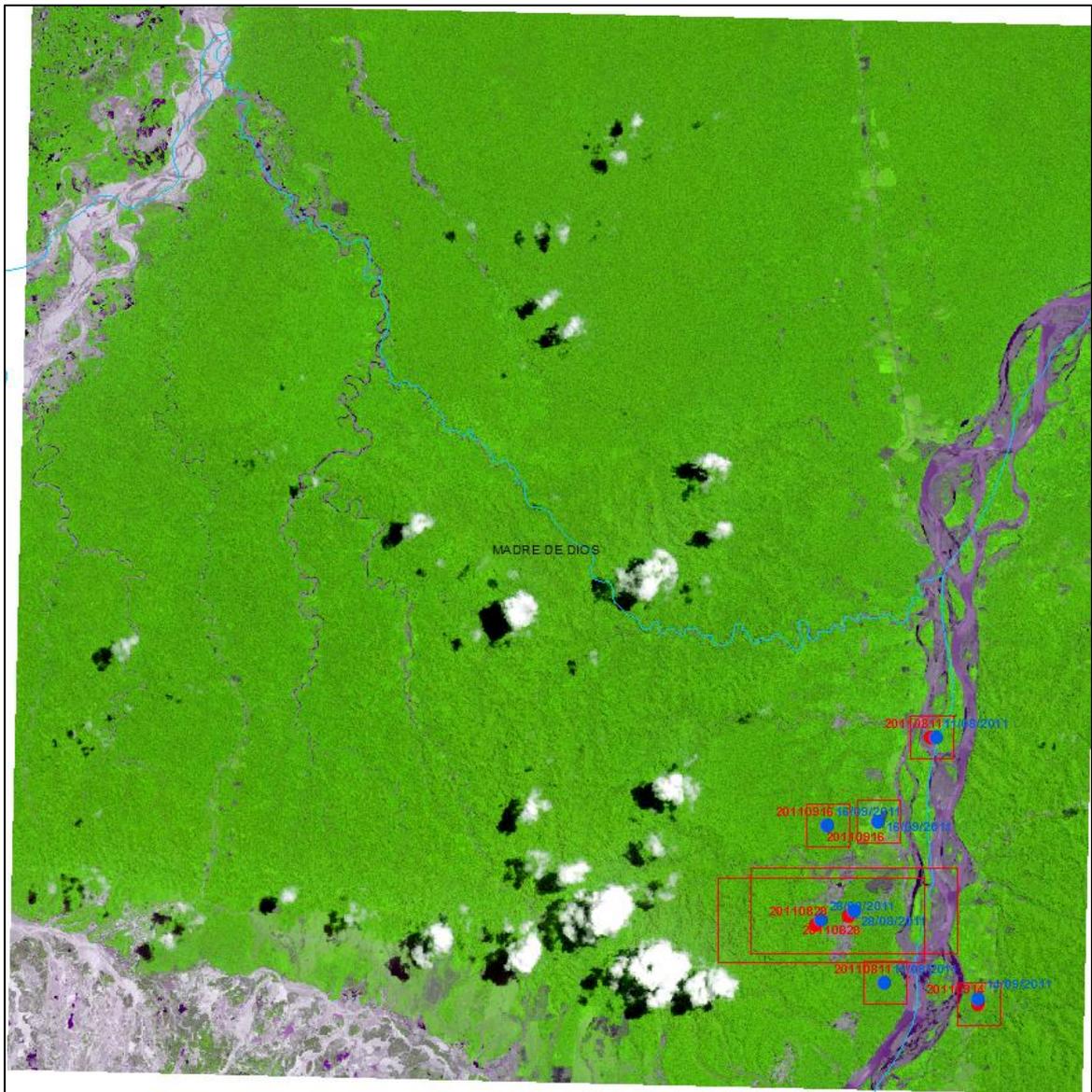


Figura 39: Escena Completa Rapid Eye 1933108 – Madre de Dios

Existen tres focos de calor que son errores (Figura 40, señalado con flechas). Uno de ellos se localiza en bosque y dos de ellos están cerca del río con grandes playas. Se observa, que en el caso del error de bosque, la confianza es menor. Dos de los puntos presentan pixeles distorsionados y corresponden a una cicatriz grande de quema.

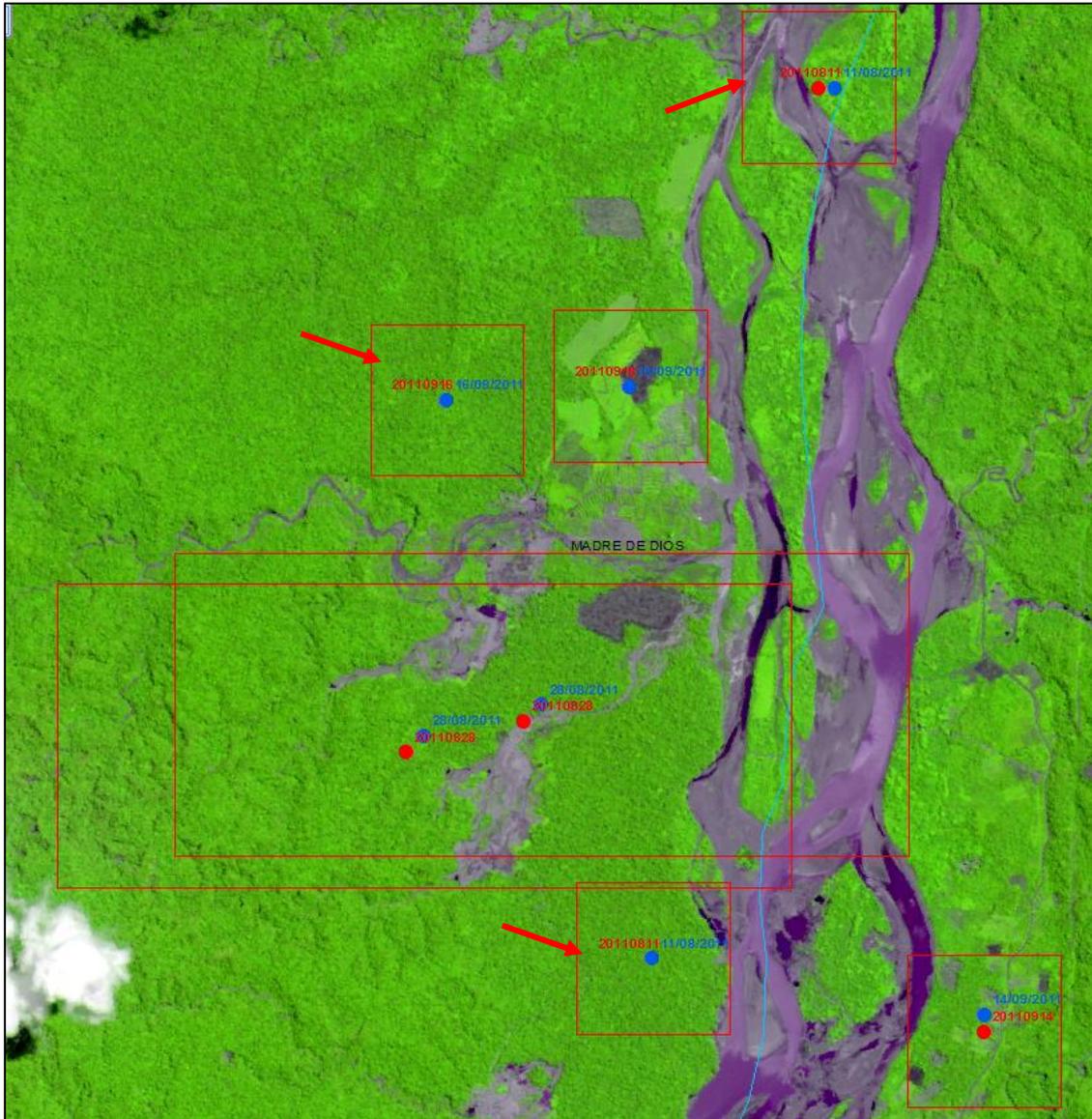


Figura 40: Error en zonas de Bosque – Escena Rapid Eye 1933108

2.2.5. CUSCO (Cód. imagen 1833324)

- Distrito de Echarate. Provincia de La Convención.
- Imagen del 17 agosto 2011

Cuadro 22: Resumen de aciertos/errores – Escena de Cusco Rapid Eye 1833324

	Total	Errores	Zona del error
INPE	3	0	
NASA	3	0	

Cuadro 23: Focos de calor registrados por la NASA - Escena Rapid Eye 1833324

Foco	Confianza	FRP	Precisión
1	58	15.7	Acierto
2	92	71.6	Acierto
3	23	22.3	Acierto

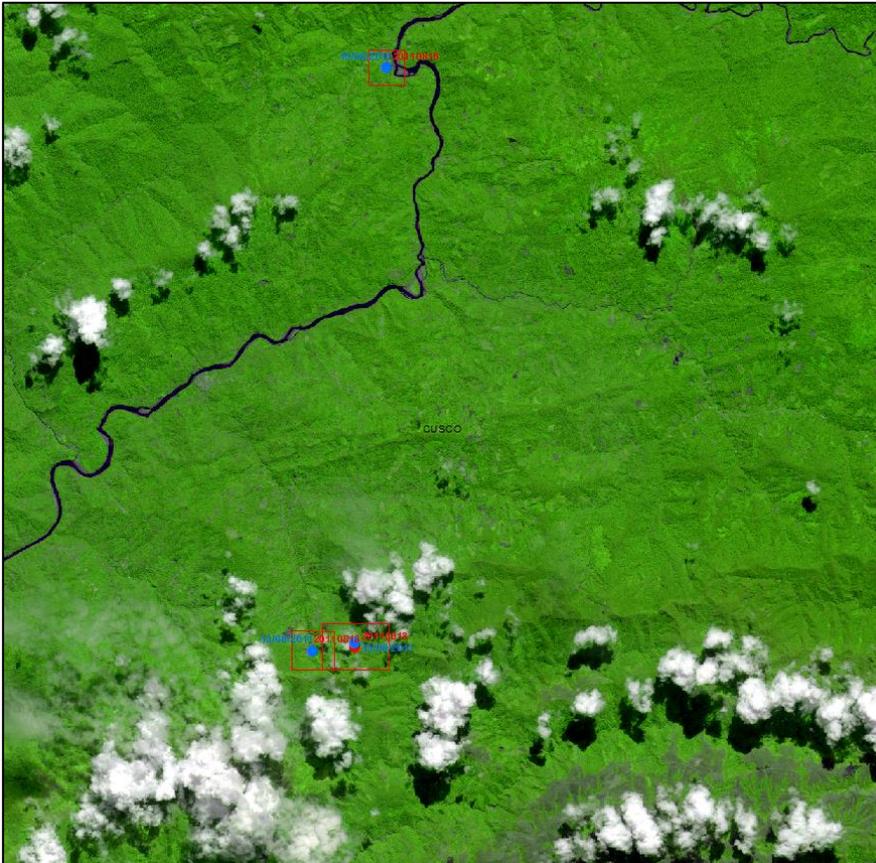


Figura 41: Escena Completa Rapid Eye 1833324 - Cusco

En esta escena solo hubo tres focos de calor y todos acertados. También presentan pixeles distorsionados como se observa en la imagen derecha de la Figura 42.

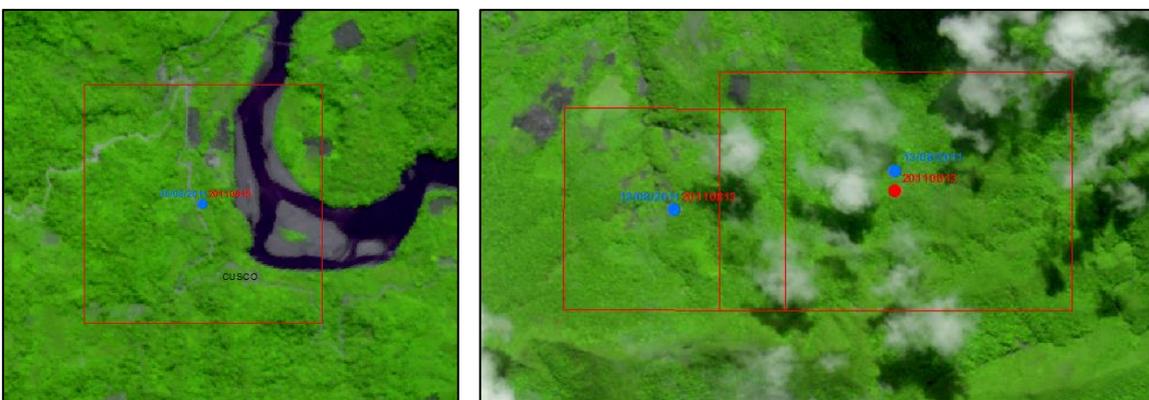


Figura 42: Detalle del contraste focos de calor vs cicatrices de quema – Rapid Eye 1833324

2.2.6. CUSCO (Cód. imagen 1833025)

- Distrito de Vilcabamba, Huayopata, Santa Teresa. Provincia de La Convención.
- Distrito de Macchu Picchu. Provincia de Urubamba
- Imagen del 30 agosto 2012

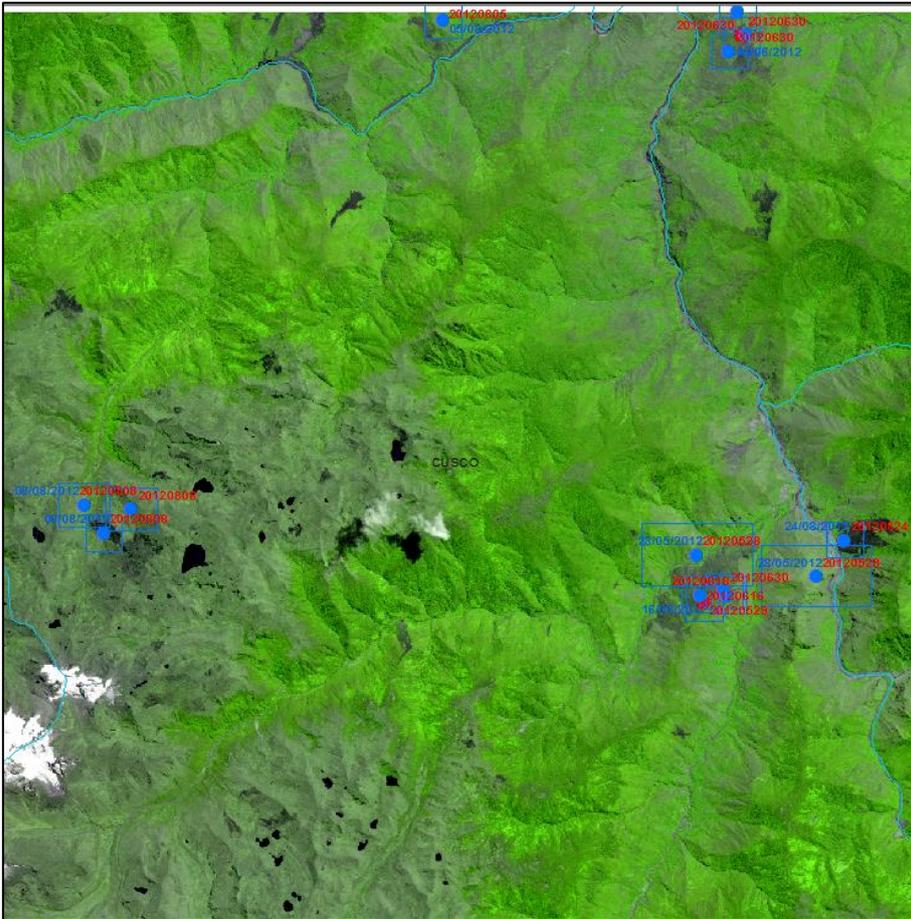


Figura 43: Escena Completa Rapid Eye 1833025 – Cusco

Cuadro 24: Resumen de aciertos/errores – Escena de Cusco Rapid Eye 1833025

	Total	Errores	Zona del error
INPE	14	0	
NASA	13	0	

Cuadro 25: Focos de calor registrados por la NASA - Escena Rapid Eye 1833025

Foco	Confianza	FRP	Precisión
1	24	13.5	Acierto
2	45	69.1	Acierto
3	46	16.8	Acierto

4	46	20.4	Acierto
5	53	15.3	Acierto
6	61	19.5	Acierto
7	66	38	Acierto
8	69	107	Acierto
9	78	42.9	Acierto
10	81	54.3	Acierto
11	82	38.8	Acierto
12	85	60	Acierto
13	95	111	Acierto

En esta imagen todos los focos pertenecen a una quema. Algunos focos pertenecen a la misma cicatriz. Por ejemplo, en la Figura 44 se observan grandes cicatrices de quema y varios focos que se refieren a mismo evento. La cicatriz de la derecha se observa más oscura pues sucedió seis días antes de la toma de imagen, mientras que la cicatriz de la izquierda sucedió dos meses antes de la toma de imagen. Se observa que dos de los focos también presentan grandes distorsiones de pixel.



Figura 44: Detalle del contraste focos de calor vs cicatrices de quema – Rapid Eye 1833025

En las tres imágenes de la Figura 45 se observan los detalles de los focos de calor. En la Figura 45a y 45c se observan tres focos de calor que corresponden a la misma cicatriz fechados con el 08/08/2012 (45a) y del 30/06/2012 (45c). Se debe recordar que el sensor MODIS representa al satélite Aqua y Terra los cuales pasan a dos veces al día, con diferentes órbitas y a diferentes horas. Esta es la razón por que aparecen tres focos con sus *buffers* sobrepuestos.

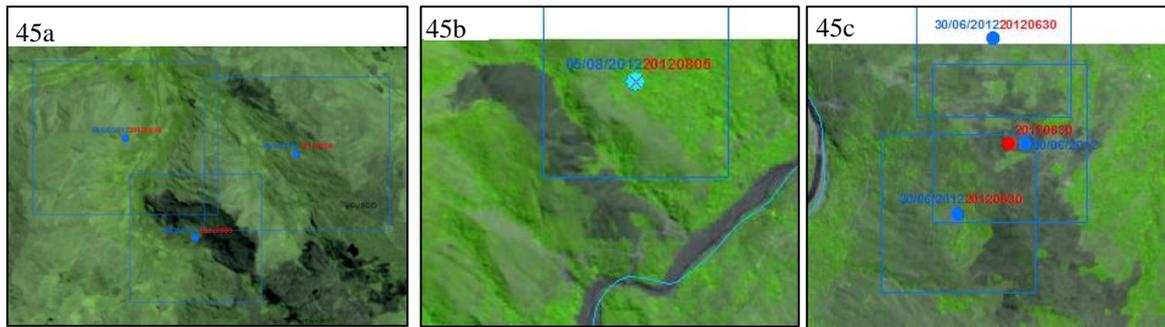


Figura 45: Detalle de tres vistas del contraste focos de calor vs cicatrices de quema – Rapid Eye 1833025

2.2.7. UCAYALI (Cód. imagen 1835017)

- Distrito de Masisea, Manantay, Iparia. Provincia Coronel Portillo.
Distrito de Honoría. Provincia Puerto Inca (Huanuco)
- Imagen del 27 agosto 2011

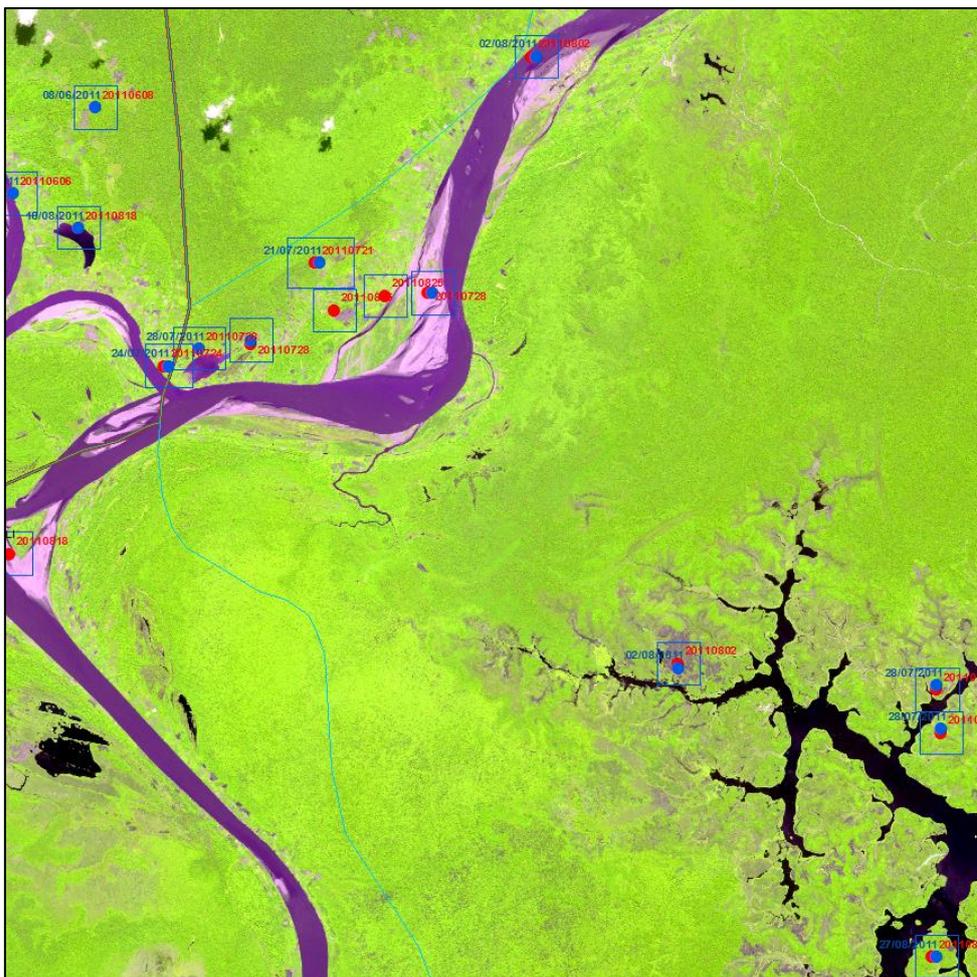


Figura 46: Escena Completa Rapid Eye 1835017 – Ucayali

Cuadro 26: Resumen de aciertos/errores – Escena de Ucayali Rapid Eye 1835017

	Total	Errores	
INPE	16	4	2 Pantano/ 2 Ríos
NASA	13	3	2 Pantano/ 1 Río

Cuadro 27: Focos de calor registrados por la NASA –Escena de Ucayali Rapid Eye 1835017

Foco	Confianza	FRP	Precisión
1	27	12.5	Acierto
2	38	5.2	Acierto
3	41	9	Error (Pantano)
4	42	11.3	Error (Río)
5	48	10.6	Acierto
6	51	8	Acierto
7	55	11.1	Acierto
8	59	12.8	Acierto
9	64	10.7	Acierto
10	70	16.1	Error (Pantano)
11	70	19	Acierto
12	75	27	Acierto
13	86	51	Acierto

Se superpusieron los focos de calor anuales del 2012 y 2011 a la imagen (Figura 47), y se observó que la presencia de los focos es recurrente en zonas de grandes playas de ríos, en el mismo lugar donde se encontraron los focos con error.

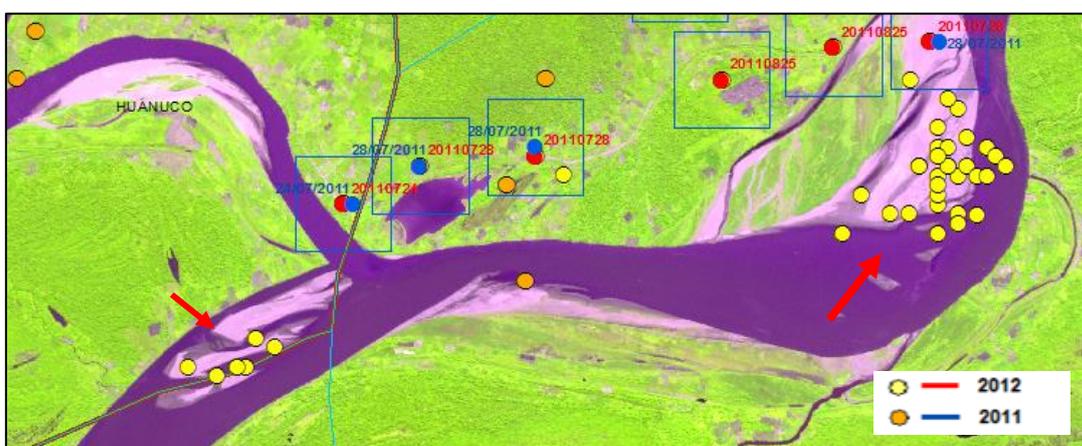
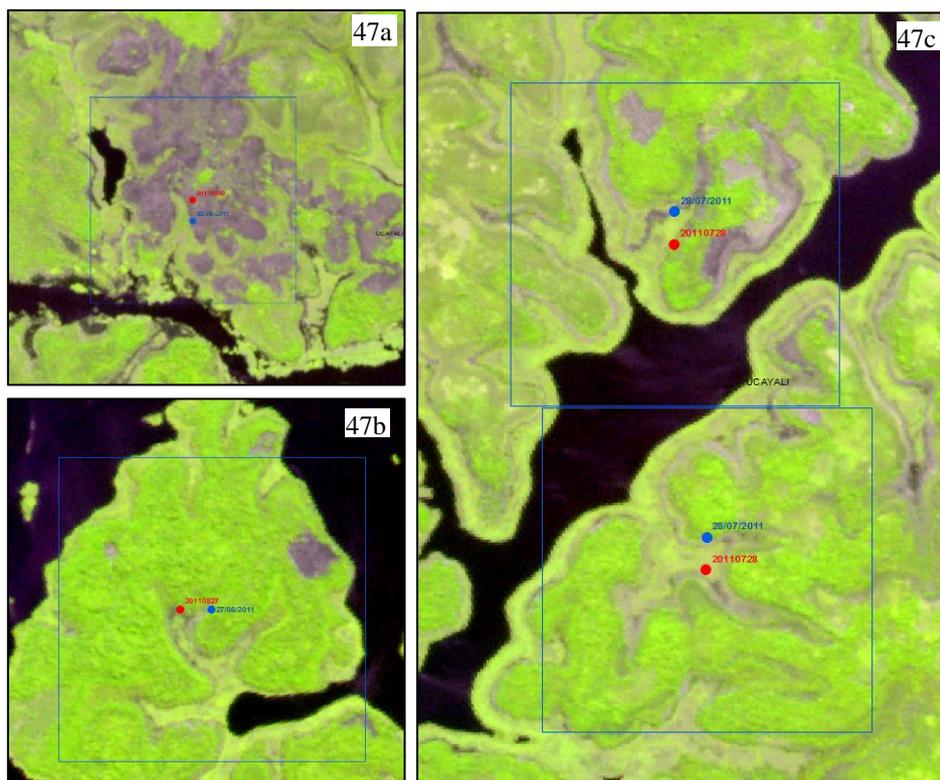


Figura 47: Detalle del error en zonas de playas de ríos – Rapid Eye 1835017

En la Figura 47 se observan los detalles de la zona pantanosa de la escena. La Figura 47a tiene un foco del 02/agosto y representa un error pues no se refiere a una cicatriz de quema. La Figura 47b tiene un foco del 27/agosto y se observa una quema reciente. La Figura 47c tiene dos focos del 27/julio, un mes antes de la imagen. El foco inferior es un error y el superior presenta una cicatriz clara. También se presentan dos errores justo en las playas del río a izquierda de la escena completa.



*Figura 48:
Detalle del error
en zonas
pantanosas –
Rapid Eye
1835017*

2.2.8. UCAYALI (Cód. imagen 1835113)

- Distrito de Irazola, Curimana y Padre Abad. Provincia de Padre Abad.
- Imagen del 02 setiembre 2012

Cuadro 28: Resumen de aciertos/errores – Escena de Ucayali Rapid Eye 1835113

	Total	Errores	Zona de Error
INPE	33	0	
NASA	32	0	

Cuadro 29: Focos de calor registrados por la NASA –Escena de Ucayali Rapid Eye 1835113

Foco	Confianza	FRP	Precisión
1	26	28	Acierto
2	27	10.5	Acierto
3	34	18.5	Acierto
4	39	9.4	Acierto
5	40	30	Acierto
6	41	23.9	Acierto
7	44	18.2	Acierto
8	44	8.3	Acierto
9	46	15.3	Acierto
10	49	8	Acierto
11	50	19.9	Acierto
12	52	7.6	Acierto
13	60	40.7	Acierto
14	61	18.2	Acierto
15	63	9.8	Acierto
16	69	22.9	Acierto
17	72	25.5	Acierto
18	73	98	Acierto
19	75	29.5	Acierto
20	77	82.8	Acierto
21	78	23	Acierto
22	78	19.8	Acierto
23	80	79.2	Acierto
24	80	40.4	Acierto
25	81	46.3	Acierto
26	82	43.5	Acierto
27	87	64.8	Acierto
28	90	79.4	Acierto
29	91	63	Acierto
30	91	66.4	Acierto
31	92	88.8	Acierto
32	93	58.7	Acierto

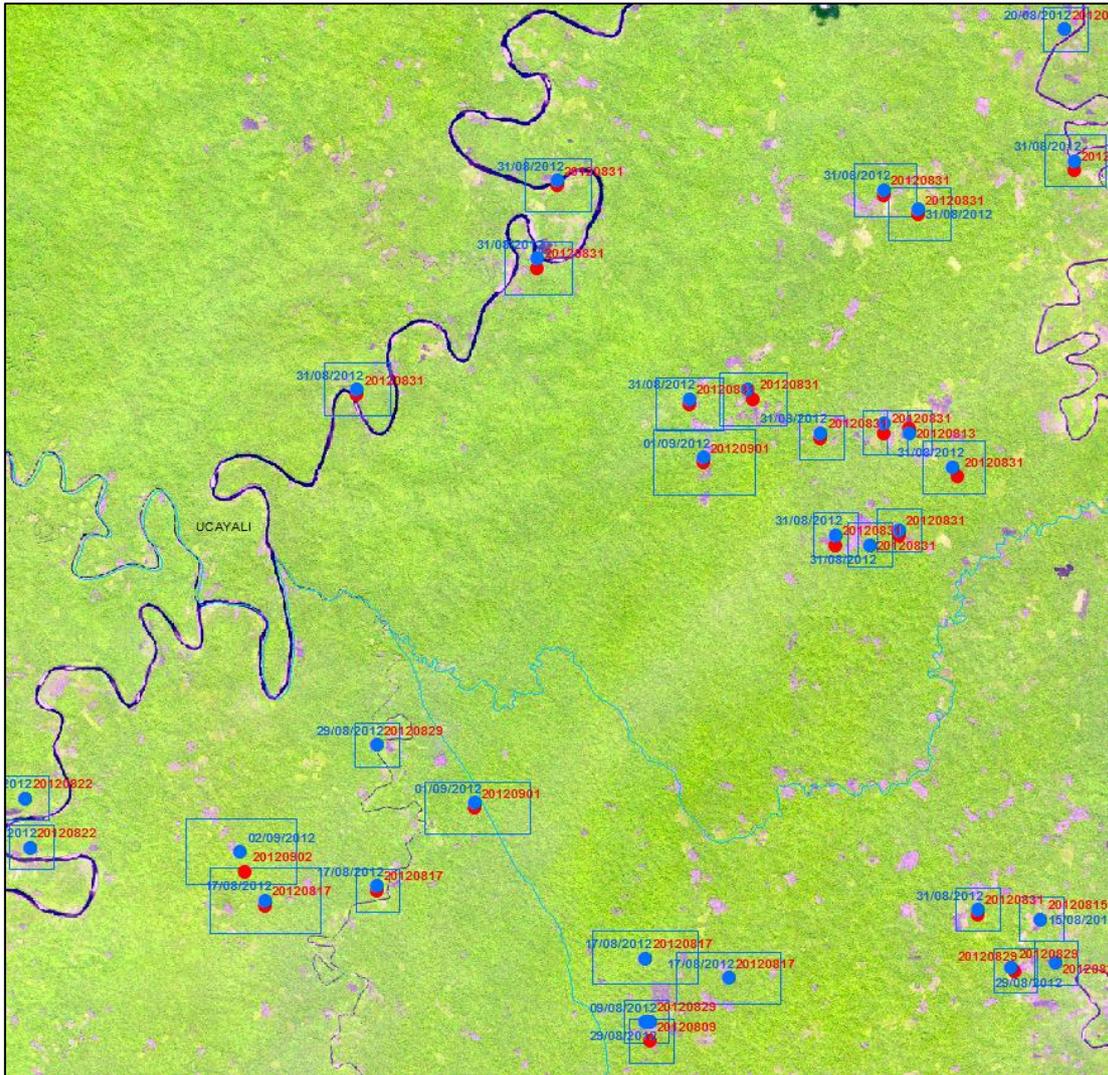


Figura 49: Escena Completa Rapid Eye 1835113 – Ucayali

En esta escena, todos los focos de calor correspondieron a su respectiva cicatriz. Es una zona agrícola y no se tuvieron observaciones diferentes a las ya mostradas. En la escena completa se pueden observar los pixeles distorsionados.

2.2.9. SAN MARTIN (Cód. imagen 1836210)

- Distrito de Barranquita. Provincia de Lamas
Distrito de El Porvenir. Provincia de San Martín
Distrito de Yurimaguas y Teniente Cesar López Rojas. Provincia de Alto Amazonas (Loreto)
- Imagen del 22 agosto 2012

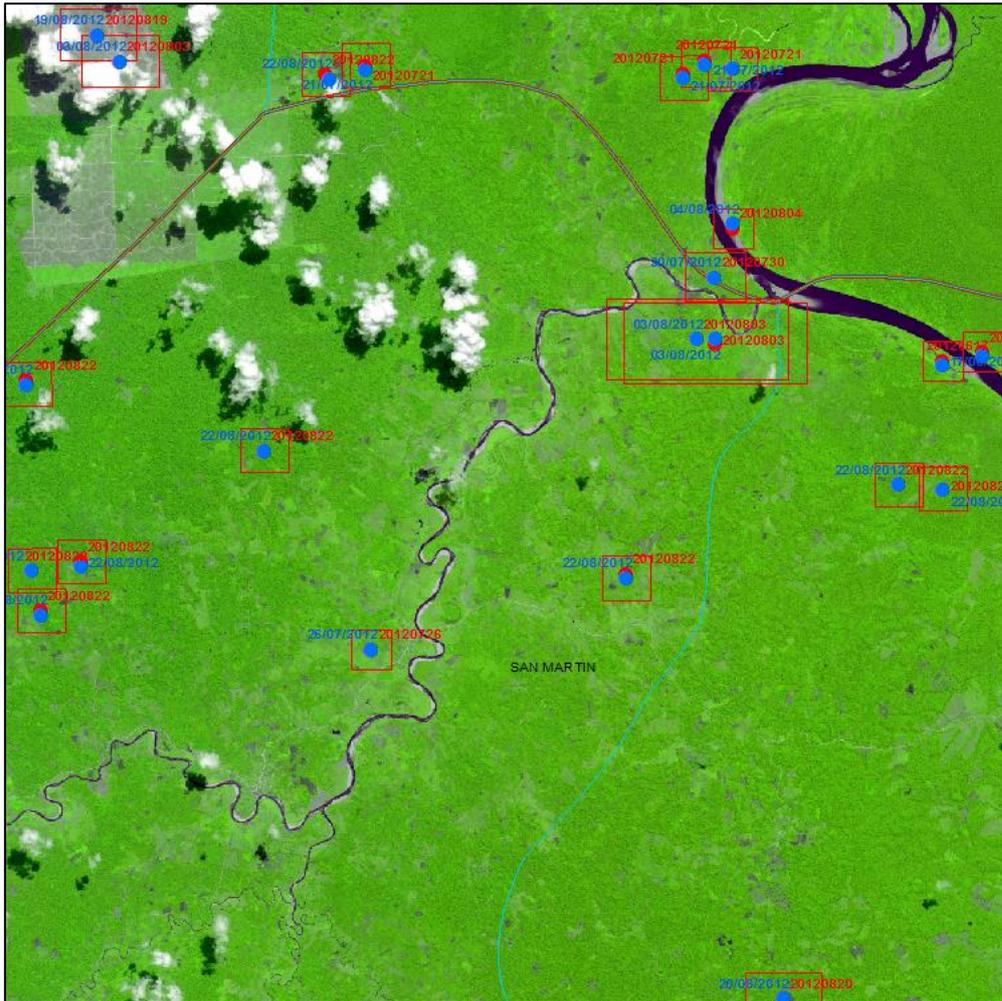


Figura 50: Escena Completa Rapid Eye 1836210 – San Martín

Cuadro 30: Resumen de aciertos/errores – Escena de San Martín Rapid Eye 1836210

	Total	Errores	Zona de Error
NASA	23	3	2(Palma) 1 (Bosque)
INPE	23	3	2(Palma) 1 (Bosque)

Cuadro 31: Focos de calor registrados por la NASA –Escena de San Martín Rapid Eye 1836210

Foco	Confianza	FRP	Precisión
1	43	11	Acierto
2	45	24.1	Error (Palma)
3	49	29.5	Error (Palma)
4	49	72.2	Acierto
5	49	7.1	Acierto
6	54	85.6	Acierto
7	57	22.2	Acierto

8	58	9.3	Acierto
9	61	16.7	Acierto
10	64	13.2	Acierto
11	64	13.8	Acierto
12	65	12.5	Acierto
13	69	12.4	Acierto
14	70	14.9	Acierto
15	71	16.1	Acierto
16	72	17.2	Acierto
17	72	23.2	Acierto
18	74	23.4	Error (Bosque)
19	79	28.9	Acierto
20	79	30.8	Acierto
21	80	32.6	Acierto
22	82	34.3	Acierto
23	85	40.8	Acierto

En la esquina superior izquierda se observan los cultivos de palma (Figura 51). Los focos presentan un error ya que en la imagen se observa que el área fue abierta en una fecha anterior al foco. A la derecha, los focos presentan sus respectivas cicatrices de quema.

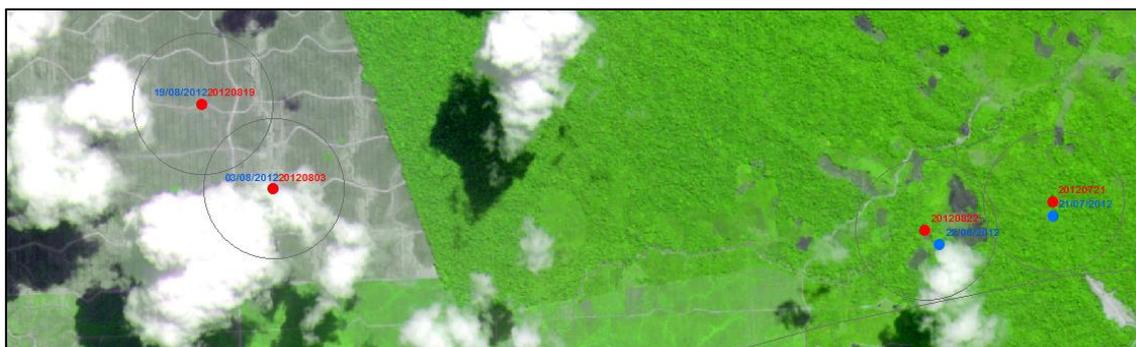


Figura 51: Detalle de error en zona de cultivo de palma - Rapid Eye 1836210 – San Martín

En la Figura 52a, el foco de la izquierda no corresponde a ninguna cicatriz de quema por lo que es considerado un error. En la Figura 52b se observan dos pixeles distorsionados de 4.5km (*scan*) y 2km (*track*). Dentro del verdadero tamaño del pixel se encuentran las cicatrices, ambos focos presentan un FRP elevado de 72.2 y 85.6 pero un porcentaje de confianza no muy alto (49% y 54%).

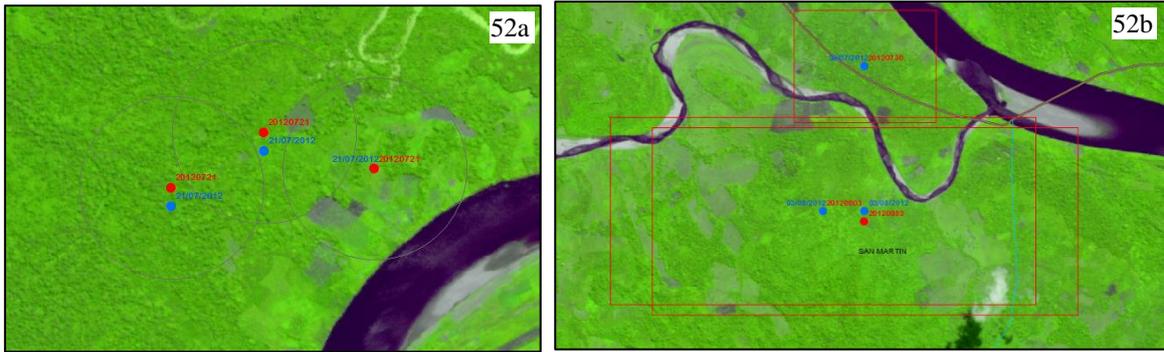


Figura 52: Detalle del contraste focos de calor vs cicatrices de quema – Rapid Eye 1836210

2.2.10. SAN MARTIN (Cód. imagen 1835806)

- Distrito de Saposoa, Picoyacu, El Eslabón y Sacanche. Provincia de Huallaga
- Distrito de Juanjui y Pachiza. Provincia de Mariscal Cáceres
- Imagen del 10 agosto 2012

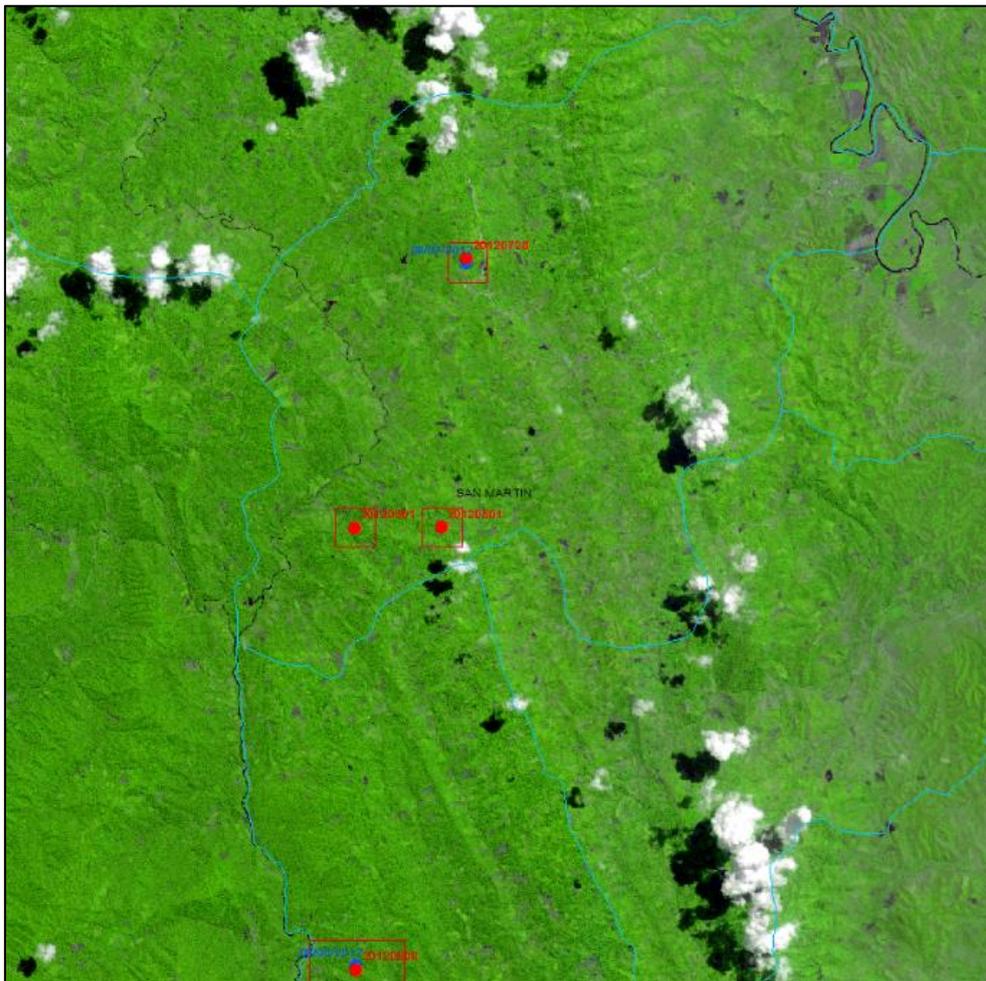


Figura 53: Escena Completa Rapid Eye 1835806 – San Martín

Cuadro 32: Resumen de aciertos/errores – Escena de Madre de Dios Rapid Eye 1933108

	Total	Errores	Zona de error
INPE	4	0	
NASA	2	0	

Cuadro 33: Focos de calor registrados por la NASA –Escena de San Martín Rapid Eye 1937304

Foco	Confianza	FRP	Precisión
1	55	11.8	Acierto
2	59	40.9	Acierto

La Figura 54a muestra el detalle de los dos focos de calor que tiene el INPE pero no la NASA, con sus respectivas cicatrices. Las Figuras 54b y 54c muestran los dos focos (mostrados por la NASA y por el INPE) con sus respectivas cicatrices.

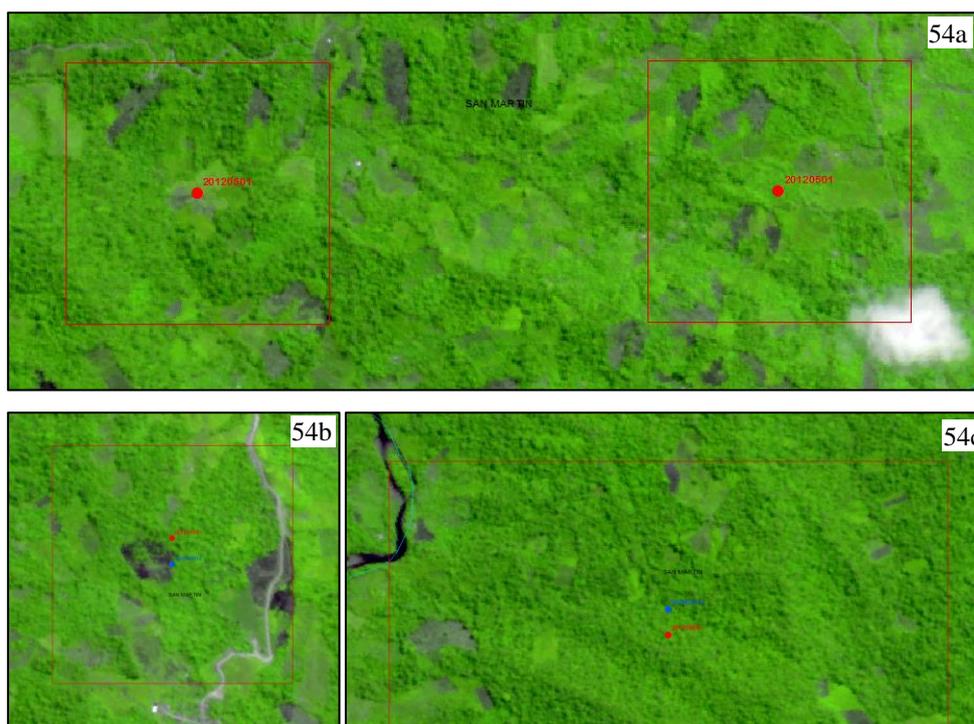


Figura 54: Detalle del contraste focos de calor vs cicatrices de quema – Rapid Eye 1835806

2.2.11. PASCO (Cód. imagen 1834215)

- Distrito de Puerto Bermudez. Provincia de Oxapampa
- Imagen del 27 agosto 2011

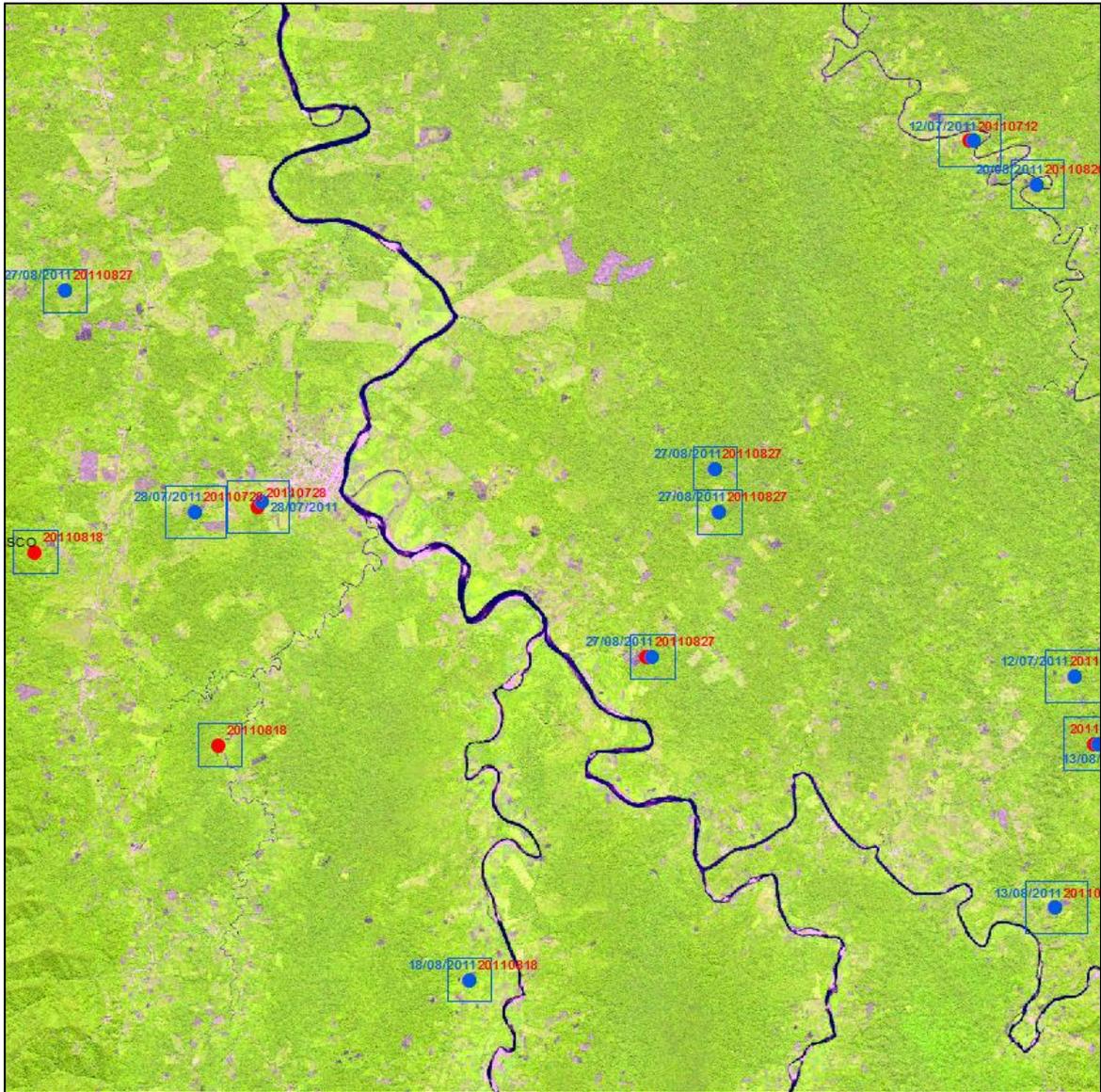


Figura 55: Escena Completa Rapid Eye 1834215 – Pasco

Cuadro 34: Resumen de aciertos/errores – Escena de Pasco Rapid Eye 1834215

	Total	Errores	Zona de error
INPE	13	2	Bosque
NASA	11	2	Bosque

Cuadro 35: Focos de calor registrados por la NASA –Escena de Pasco Rapid Eye 1834215

Foco	Confianza	FRP	Precisión
1	36	10.6	Acierto
2	50	14.1	Acierto
3	52	8.2	Acierto
4	53	14.2	Acierto

5	61	15.5	Acierto
6	62	19.7	Acierto
7	68	11.6	Acierto
8	69	18.6	Acierto
9	72	14.6	Acierto
10	75	16.9	Error (Bosque)
11	83	29.3	Error (Bosque)

Los dos focos de calor que presentan error se ubican en zonas de bosque (Figura 56). Los focos presentan cicatrices pero ninguna parece ser una cicatriz reciente. Sin embargo, los puntos son de la misma fecha de toma de la imagen y cabe la posibilidad que la imagen haya sido tomada antes del fuego.



Figura 56: Detalle de error en zona de bosque - Rapid Eye 1834215 – Pasco

2.2.12. HUÁNUCO (Cód. imagen 1835009)

- Distrito de Cholón. Provincia de Marañón
Distrito de José Crespo y Castillo. Provincia de Leoncio Prado
Distrito de Nuevo Progreso. Provincia de Tocache (San Martín)
- Imagen del 13 agosto 2011

Cuadro 36: Resumen de aciertos/errores – Escena de Huánuco Rapid Eye 1835009

	Total	Errores	
INPE	6	0	
NASA	6	0	

Cuadro 37: Focos de calor registrados por la NASA –Escena de Huánuco Rapid Eye 1835009

Foco	Confianza	FRP	Precisión
1	44	19	Acierto
2	52	8.9	Acierto
3	53	9.2	Acierto
4	59	18.6	Acierto
5	66	26.7	Acierto
6	66	14.5	Acierto



Figura 57: Escena Completa Rapid Eye 1835009 –Huánuco

Esta escena es de una región de selva alta. No presenta errores ni observaciones diferentes a las ya mostradas en anteriores escenas. Se observan tres pixeles distorsionados que pueden apreciarse en la escena completa.

Cuadro 39: Focos de calor registrados por la NASA –Escena de Junín Rapid Eye 1834015

Foco	Confianza	FRP	Precisión
1	35	10.1	Error (Urbe)
2	39	7.6	Error (Urbe)
3	39	20.8	Error (Urbe)
4	43	10.8	Acierto
5	43	6.4	Acierto
6	49	11.8	Error (Urbe)
7	52	11.1	Acierto
8	54	8.1	Acierto
9	55	13	Error (Urbe)
10	61	22.5	Acierto
11	62	11.1	Acierto
12	89	42.9	Error (Río)
13	90	48.8	Acierto
14	92	54.5	Acierto

En la zona urbana de la imagen (Figura 59), se observan focos de calor. Esta es una falsa detección para nuestros fines pues podrían tratarse de fuentes de calor industriales como sucede en las siderúrgicas. Aparecen varios focos de calor en la misma zona y constantes a través de los años.

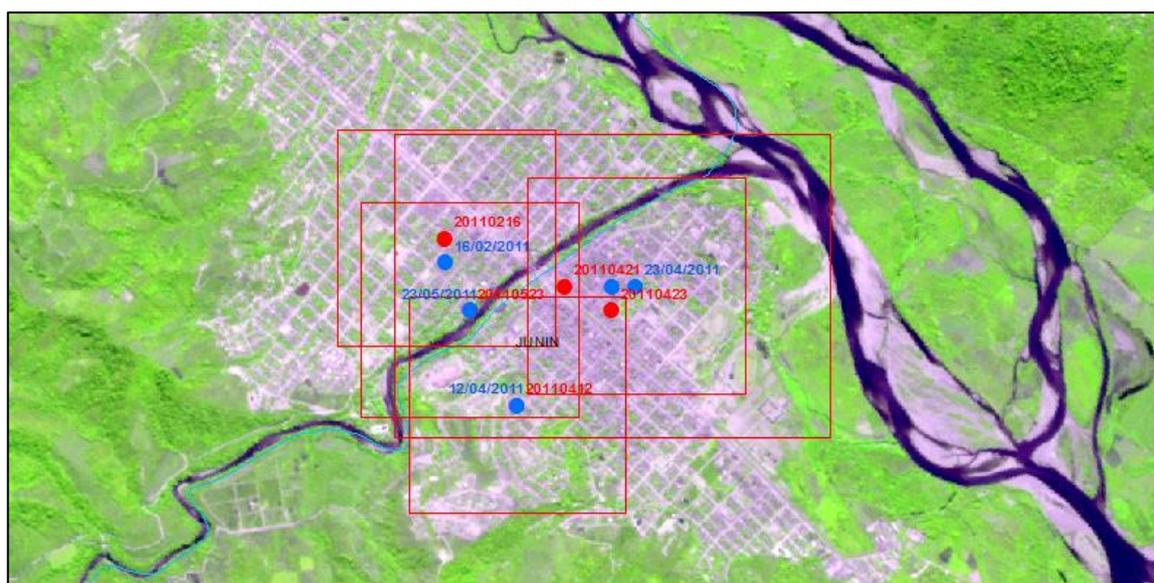


Figura 59: Detalle del error en zonas urbanas – Escena de Huánuco Rapid Eye 1835009

Respecto al error en el bosque, es de la misma fecha de la toma de la imagen así que es posible que aún no haya ocurrido el fuego para el momento de la toma de la imagen. La zona sí presenta cicatrices pero ninguna reciente. En la Figura 60, los tres focos son del 27 de agosto, en el de la izquierda y derecha, se observa cicatriz reciente, pero en el foco central no, razón por la cual se consideró un error.

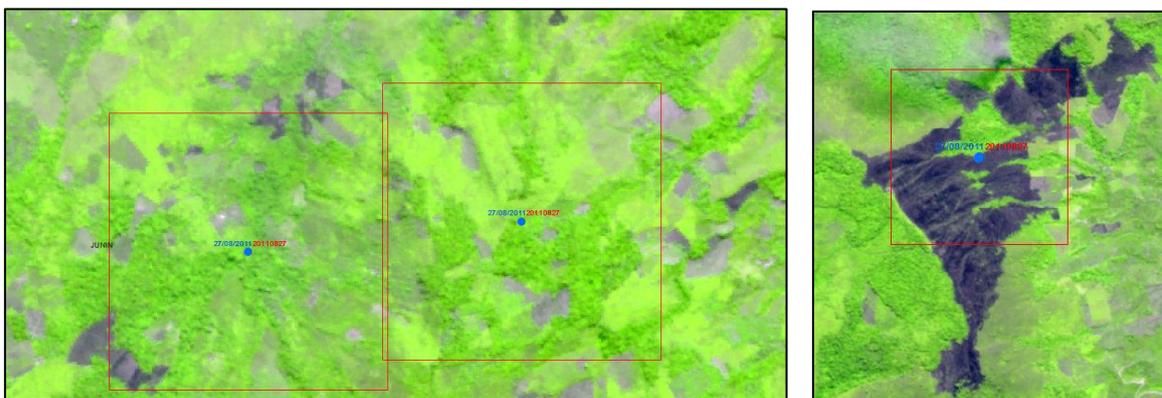


Figura 60: Detalle del contraste focos de calor vs cicatrices de quema – Rapid Eye 1834015

2.3. RECUENTO DE LAS DETECCIONES

2.3.1. Nivel de acierto de los focos de calor según fuente (NASA/INPE)

El Cuadro 40 resume la totalidad de focos acertados y falsas alarmas, en cantidad y en porcentaje. En total, el INPE registró 7.6% más focos que la NASA. Esto se evidencia en seis de las trece escenas, donde la cantidad de focos del INPE fue uno o dos focos mayor que de la NASA. En cuanto al nivel de acierto, se tiene que los focos de calor descargados del portal de FIRMS de la NASA fueron un 88.9% certeros y los focos de calor descargados del portal del INPE, 89.1% certeros; en contraste el error fue 11.1% y 10.9% respectivamente. La Figura 61 muestra que esos 11 focos de diferencia que presentó el INPE y no la NASA, representan un acierto a excepción de uno de ellos.

Cuadro 40: Resumen del total de aciertos y errores de los focos de calor de NASA e INPE

NASA	Aciertos	Errores	Río	Urbe	Palma	Bosque	Pantano	%Error	%Acierto
INPE	155	19	6	5	2	4	2	10.9	89.1
NASA	144	18	5	5	2	4	2	11.1	88.9

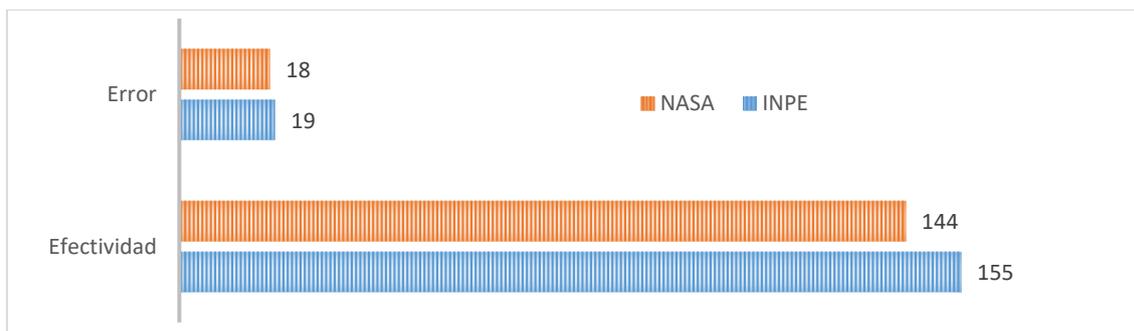


Figura 61: Comparación de aciertos/errores de los focos de calor de la NASA e INPE analizados.

2.3.2. Evaluación de las zonas de errores frecuentes de los focos de calor

En el análisis de las trece imágenes se registraron los errores en las zonas donde fueron localizados. Algunas de estas zonas fueron coberturas de suelo como bosque, pantano o río, y otras fueron zonas de uso de suelo como urbes y cultivo de palma aceitera. Se encontró que el 42.1% de los errores, se refiere a zonas con presencia de agua, ya sea en zonas de río o pantano. La segunda mayor cantidad de errores se dio en zonas urbanas con 26.3%. En tercer lugar, con 21.1% se reportaron los errores en bosque (el 2.3% de todos los focos analizados). Finalmente, solo el 10.5% de los errores fueron en la palma. La Figura 62 ejemplifica mejor los dicho y disgrega los errores por su ubicación.

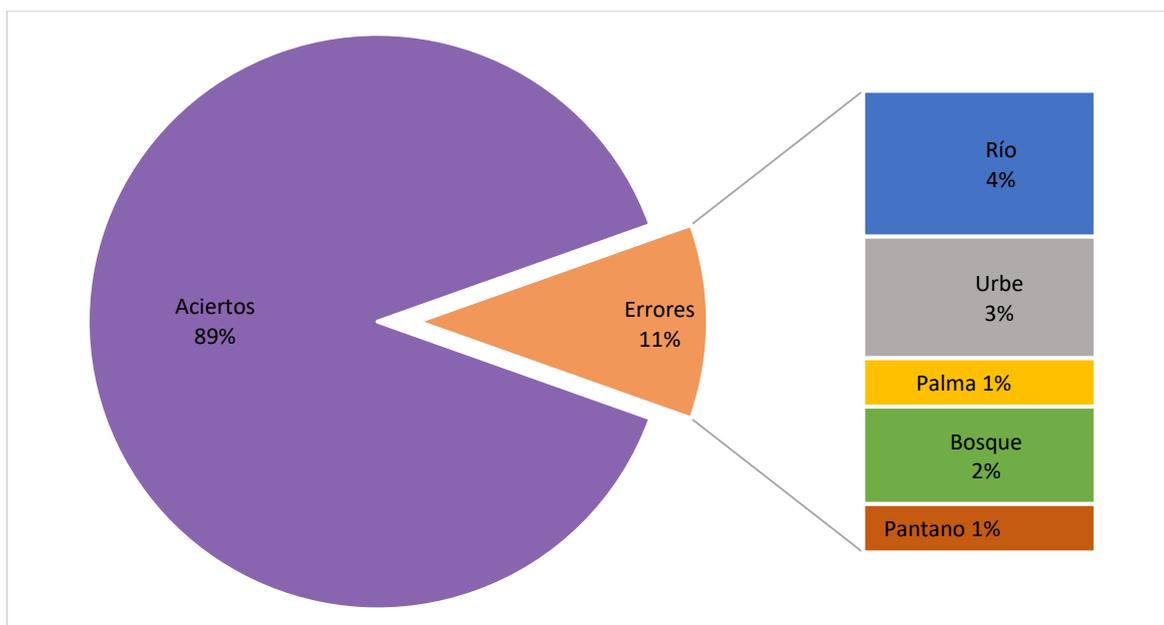


Figura 62: Resultado del primer estudio de validación para focos de calor provenientes del INPE: acierto, errores y disgregado de errores.

Sin embargo, se debe recordar que estos resultados son solo para zonas de Amazonía. Cada imagen tiene aproximadamente 650km² y son trece imágenes que representan 8450km². Al comparar esta cifra con los más de 782mil km², representa sólo el 1% de la región amazónica peruana. También, se debe recalcar que sólo hubo una imagen en zona del cultivo de palma aceitera, una imagen con área urbana pero varias que contenían ríos. No obstante, este primer estudio de validación sirvió para tener en cuenta las áreas con errores potenciales y plantear las mejoras a implementarse en el segundo estudio de validación con imágenes Landsat.

2.3.3. Nivel de acierto de focos de calor por tipo de región (Selva alta/Selva baja)

Los resultados en la Amazonía peruana la podemos separar en dos grandes regiones: Selva Alta y Selva Baja, encontramos que los porcentajes de acierto varían de 91% para selva baja y 87% para selva alta. Para hallar estos resultados, se tomaron como selva baja las regiones de Loreto, Ucayali y Madre de Dios; y como selva alta, las restantes. En este resultado influye la selección de imágenes pues 6 escenas corresponden a selva baja mientras 7 corresponden a selva alta, a pesar que la cantidad de focos de calor sea la misma. El Cuadro 41 fue realizado en base a los datos presentados por la NASA.

Cuadro 41: Resumen de aciertos y errores de los focos de calor de NASA disgregado en Selva alta y Selva baja.

	Aciertos	Errores	%Error	%Acierto	Ubicación de errores
SELVA BAJA	72	7	9.7	91.1	4 Río, 1 Bosque, 2 Pantano
SELVA ALTA	72	11	15.3	86.7	5 Urbe, 2 Palma, 3 Bosque, 1 Río

En cuanto a los tipos de errores que se presentan en cada zona con mayor frecuencia, se observa que hay mayores errores de ríos/pantanos en la zona de selva baja. Esto puede explicarse por la topografía que permite que en selva baja las playas sean más extensas y propicia la existencia de zonas pantanosas que no se dan en selva alta. Para afirmar si es la reflectancia de las playas o del agua en sí las que afecta el registro de los sensores se debe estudiar con mayor detenimiento la firma espectral de estos objetos y compararlo con los algoritmos para obtener los focos de calor.

2.3.4. Análisis de la relación de las variables FRP y porcentaje de confianza con el porcentaje de error

Los datos de este análisis provienen de la tabla de atributos de los focos descargados por la NASA pues los datos del INPE no contienen esta información. Al hacer este análisis se buscó determinar si el porcentaje de confianza o el FRP o ambos podrían usarse como un filtro para disminuir el porcentaje de error.

El Cuadro 42 muestra los valores de FRP y confianza para los focos en zonas de error. Se observa que el porcentaje de confianza oscila de 30% a 89% mientras que los valores del FRP se mantienen, salvo un caso, por debajo de los 30. Este cuadro demuestra que los focos de calor con error no necesariamente presentan bajos valores de porcentaje de confianza.

Cuadro 42: Confianza y FRP de las falsas alarmas (focos con error) del primer estudio de validación

Foco	Confianza %	FRP	Error	Departamento
1	30	9.8	Río	Loreto
2	35	10.1	Urbe	Junín
3	36	14.2	Bosque	Madre De Dios
4	39	7.6	Urbe	Junín
5	39	20.8	Urbe	Junín
6	41	9	Pantano	Ucayali
7	42	11.3	Río	Ucayali
8	45	24.1	Palma	San Martín
9	49	29.5	Palma	San Martín
10	49	11.8	Urbe	Junín
11	55	13	Urbe	Junín
12	61	12.1	Río	Madre De Dios
13	64	14.2	Río	Madre De Dios
14	70	16.1	Pantano	Ucayali
15	74	23.4	Bosque	San Martín
16	75	16.9	Bosque	Pasco
17	83	29.3	Bosque	Pasco
18	89	42.9	Río	Junín

El Cuadro 43 muestra los veinte focos con valores más bajos de confianza, los cuales corresponden tanto a focos acertados como errados. El Cuadro 44 muestra los veinte focos con valores más bajos de FRP. Si bien en el Cuadro 42 había indicio de una relación entre el FRP y la precisión, este cuadro indica que los valores bajos de FRP no necesariamente corresponden a focos de calor errados.

Cuadro 43: Lista de los 20 focos con menor porcentaje de confianza.

Foco	Confianza	Precisión
1	11	Acierto
2	23	Acierto
3	24	Acierto
4	26	Acierto
5	27	Acierto
6	27	Acierto
7	30	Error
8	34	Acierto
9	35	Error (Urbe)
10	36	Acierto
11	36	Error bosque
12	37	acierto
13	38	Acierto
14	39	Error (Urbe)
15	39	Acierto
16	39	Error (Urbe)
17	40	Acierto
18	41	Error
19	41	Acierto
20	42	Error

Cuadro 44: Lista de los 20 focos con menor valor de FRP.

Foco	FRP	Precisión
1	5.2	Acierto
2	6.4	Acierto
3	7.1	Acierto
4	7.6	Error (Urbe)
5	7.6	Acierto
6	8	Acierto
7	8	Acierto
8	8.1	Acierto
9	8.2	Acierto
10	8.3	Acierto
11	8.9	Acierto
12	9	Error
13	9.2	Acierto
14	9.3	Acierto
15	9.4	Acierto
16	9.8	Error
17	9.8	Acierto
18	10.1	Error (Urbe)
19	10.5	Acierto
20	10.5	Acierto

Los cuadros 42, 43 y 44 evidencian que usar las variables FRP y porcentaje de confianza como filtro para eliminar errores sería contraproducente pues no solo se filtrarían errores sino aciertos.

2.3.5. Análisis de la distorsión de los pixeles MODIS

Los datos de este análisis provienen de la tabla de atributos de los focos descargados por de la NASA pues los focos de calor del INPE no contienen esta información. Se contabilizó los pixeles MODIS tomando en cuenta su tamaño real (su valor nominal es 1 km x 1 km) y diferenciando la distorsión de la medida latitudinal del pixel (*scan*) y la medida longitudinal del pixel (*track*).

Cuadro 45: Variación de la medida latitudinal (Scan) de pixel.

Scan (km)	Cantidad de Pixeles	% acumulado
1	35	24.3
1.1	10	31.3
1.2	29	51.4
1.3	11	59.0
1.4	18	71.5
1.5	13	80.6
1.7	4	83.3
1.8	2	84.7
1.9	4	87.5
2	1	88.2
2.3	2	89.6
2.4	2	91.0
2.5	5	94.4
3	2	95.8
3.8	2	97.2
4.5	2	98.6
4.8	2	100.0
Promedio	1.49	

Se observó que la medida del pixel en el *scan* presenta mayor distorsión que en el *track*, presentando la primera en promedio 1.49 km (Cuadro 45) y el segundo 1.18 km (Cuadro 46). Tan sólo el 24.3% de los pixeles presentó la medida teórica (1 km) en el *scan*. El 80.6% de los pixeles tiene una medida en el *scan* de menor o igual a 1.5km mientras el 12.5% de los pixeles registran una distorsión mayor o igual al 100% (de 2km a más). En el *track*, estas

cifras son menores: el 94.4% de los pixeles tienen una medida en el *track* menor o igual a 1.5km y solo el 5.6% de los pixeles están sobre esta medida.

Cuadro 46: Variación de la medida longitudinal (*Track*) del pixel.

Track (km)	Cantidad de Pixeles	% acumulado
1	44	30.6
1.1	41	59.0
1.2	31	80.6
1.3	10	87.5
1.4	1	88.2
1.5	9	94.4
1.7	2	95.8
1.8	2	97.2
2	4	100.0
Promedio	1.18	

La Figura 63 muestra la variación de la longitud (km) del pixel en el *scan* versus el porcentaje acumulado de cantidad de pixeles. Se toma el lado del *scan* pues es el que presenta mayor distorsión y será el que rija el tamaño del *buffer* a realizar para ubicar la cicatriz de quema correspondiente al foco de calor en mención. Se observa que la primera inflexión de la curva es en el tamaño de pixel 1.5km (80.6% de los pixeles) y la segunda inflexión es en el tamaño de pixel de 2.0 km (88.2% de los pixeles).

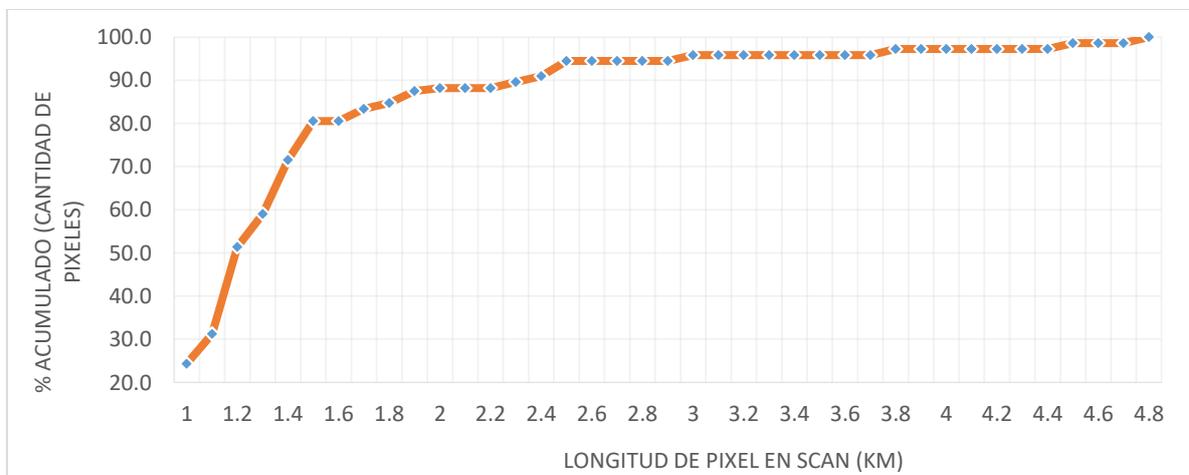


Figura 63: Curva de porcentaje acumulado (cantidad de pixeles) por medida latitudinal (*Scan*) del pixel.

3. VALIDACIÓN CON IMÁGENES LANDSAT

De la primera validación se demostró que los focos MODIS si eran certeros para el territorio peruano, pero presentaban dos inconvenientes principales: la baja resolución de las imágenes MODIS (1km) y la gran distorsión que presentan. Los resultados de validación con las Rapid Eye indicaron que solo el 24.3% de los pixeles MODIS tienen el tamaño teórico de pixel mientras que un 63.9% tiene un pixel entre 1km a 2km. Es decir, teniendo las coordenadas del foco, para deducir el lugar del evento, se tendría que buscar en un área de 4km². Teniendo esto en cuenta, se decidió que era necesario iniciar validaciones con el Suomi NPP por tener resoluciones mayores (hasta de 375m) pese a que los focos de calor siguieran siendo un producto Provisional. Sin embargo, los primeros resultados de los focos de calor con este satélite mostraron mejoras respecto al MODIS (Csizsar et al. s.f.), además el INPE de Brasil y el CONABIO de México incorporaron en sus portales de alertas de incendio a los focos de calor Suomi NPP 750m desde el 2013 (Brasil) y 2014 (México); y desde inicios de 2015, ambos países sumaron a sus alertas los focos de calor Suomi NPP en su resolución 375m.

Las validaciones iniciaron a finales de Setiembre de 2015. Para esta época, ya se podían contar con imágenes Landsat de algunos de los meses de alta concentración de focos (agosto a octubre). Como los resultados de la primera validación demostraron que era indistinto usar datos de la NASA o el INPE y que incluso no se había demostrado que los datos de porcentaje de confianza o FRP sirviera para reducir el error, se optó por usar, solo por temas de practicidad, los datos del INPE. Usar imágenes Landsat también permitió analizar una mayor cantidad de focos de calor debido a que estas imágenes permiten una mayor área de análisis (una imagen Landsat mide aproximadamente 175km x 185 km, mientras que una Rapid Eye 24km x 24 km). Para esta validación se analizaron 3041 focos MODIS mientras que en la primera solo 144.

El objetivo se mantuvo: medir el nivel de acierto de los focos de calor, esta vez del Suomi NPP 750m y Suomi NPP 375m, contrastándolo siempre con los focos de calor del sensor MODIS (satélites Terra y Aqua). Se contabilizaron los errores de comisión diferenciándolo, al igual que en el primer caso por el tipo de zona de incidencia (Bosque, Río/Playas, Urbes, etc). Además se tomaron otras observaciones consideradas importantes para establecer la metodología deseada.

3.1. PROCEDIMIENTO

Se seleccionaron seis escenas Landsat con fecha entre setiembre y noviembre 2015 (época de quema en el país). Al igual que en la primera validación se eligieron zonas con alta concentración de focos y que contengan diferentes coberturas de suelo (ríos, zonas urbanas, zonas agrícolas, zonas mineras, zonas de monocultivo). Las imágenes Landsat seleccionadas se muestran en el Cuadro 47 y la Figura 64.

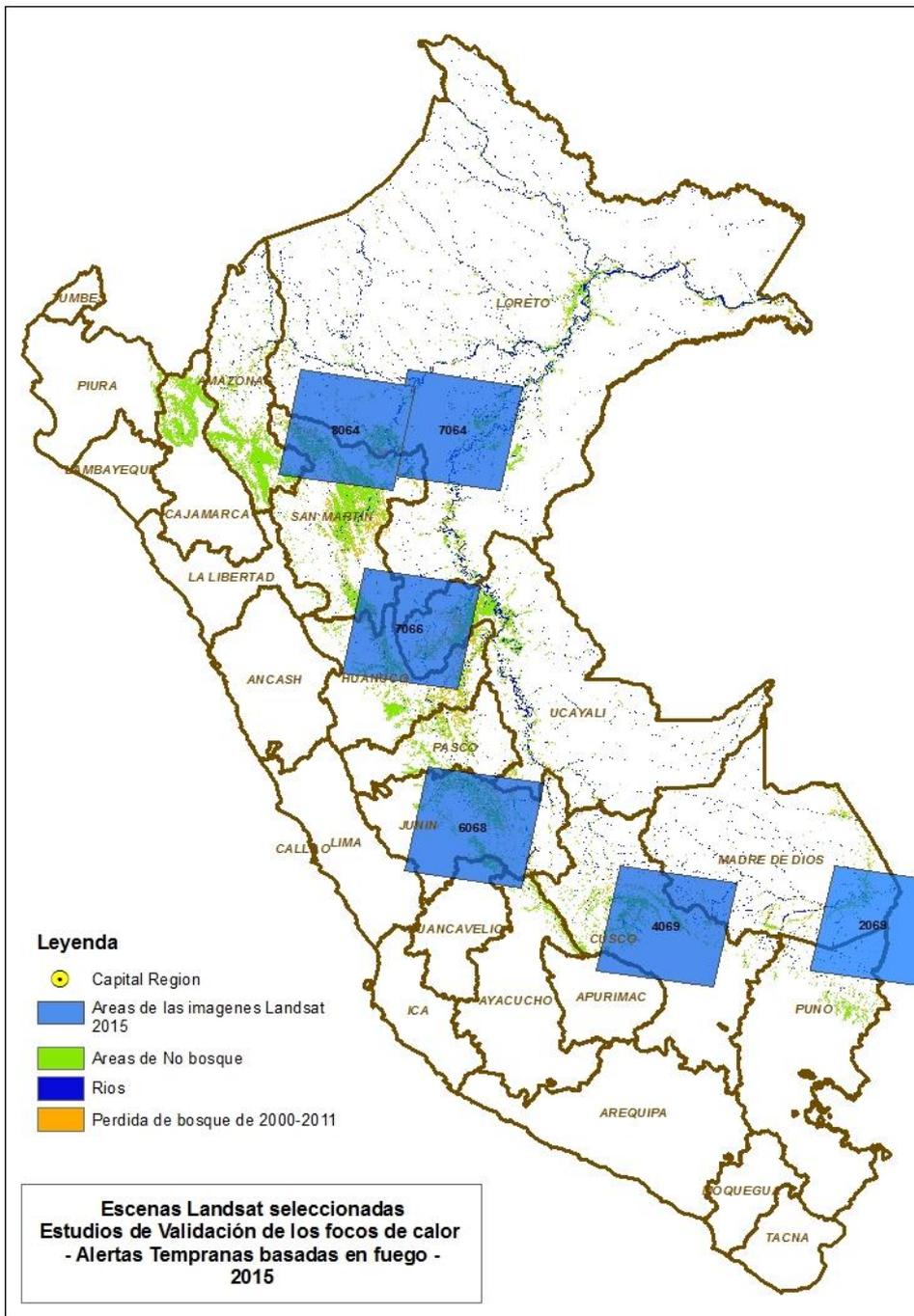


Figura 64: Mapa de escenas Landsat seleccionadas para el segundo estudio de validación

Cuadro 47: Lista de imágenes Landsat usadas para el segundo estudio de validación.

Nº	Path	Row	Departamento	Fecha toma de imagen
1	8	64	San Martín / Loreto	17/set/2015
2	7	64	Loreto / San Martín	10/set/2015
3	7	66	San Martín / Loreto / Huánuco / Ucayali	10/set/2015
4	6	68	Junín	10/oct/2015
5	4	69	Cusco / Madre de Dios	21/set/2015
6	2	69	Madre de Dios /Puno	10/nov/2015

El procedimiento fue ligeramente diferente del primer estudio, principalmente en cuanto al radio de búsqueda de la cicatriz. Los pasos seguidos fueron los siguientes:

1. Se descargaron los puntos de INPE del año 2015, para los satélites TERRA, AQUA, NPP y NPP-375m en formato *shapefile*, con proyección SIRGAS 2000.
2. En el programa Arc Gis, se reproyectó el *shapefile* a proyección UTM-18S datum WGS 84.
3. Se seleccionó y se descargó la escena Landsat con menor porcentaje de nubes del Path y Row previamente elegido, con fecha entre agosto y noviembre 2015.
4. En una plantilla se superpusieron las capas de Región, la escena a evaluar y los focos de calor reproyectados.
5. Se filtraron los focos de calor para que solo queden aquellos dentro la imagen y con fecha máxima de dos meses previos a la toma de la imagen. Este rango de fecha se planteó para poder reconocer mejor las quemadas dado que las imágenes Landsat son de menor resolución (30m) que las Rapid Eye. Además, una de las observaciones del primer estudio de validación fue la dificultad para reconocer cicatrices de más de dos meses de antigüedad pues la vegetación se puede recuperar en cuestión de semanas.
6. Se hizo un *buffer* cuadrado a cada foco, de 282 m para las NPP-375m, de 563m para las NPP-750m y de 750m para las MODIS. La medida elegida para los *buffers* corresponde a la medida teórica del pixel multiplicada por el factor 1.5. Esta decisión se tomó en base a los resultados de la primera validación que establece que el 80.6% de los pixeles tiene medida hasta de 1.5km. Si bien estos resultados se basan en pixeles MODIS, se sabe que la distorsión MODIS es hasta del 600% mientras que la distorsión del NPP es

de máximo 200%, por lo que considera que el rango elegido cubrirá bien las distorsiones del NPP.

7. Se buscó una cicatriz reciente dentro del *buffer*. Si hubo evidencia de cicatriz, se consideró un acierto, sino, una falla.
8. Se realizó una tabla con los aciertos y desaciertos de cada satélite.

3.2. CONTRASTE DE LOS FOCOS DE CALOR CON CADA IMAGEN

Para cada escena, se presenta un cuadro donde se detallan los aciertos y errores de los focos de calor evaluados. Se acompaña cada resultado con capturas de pantalla donde los puntos del NPP-375m se encuentran en color rojo, los del NPP-750 en azul y los de MODIS en amarillo. Los *buffers* de los mismos responden al mismo patrón de colores. En las escenas donde se encontró alguna observación que contribuya a idear una metodología para el reporte de alertas tempranas de deforestación basado focos de calor, se tomaron capturas de pantallas y, en algunos casos, se usó una imagen Landsat de apoyo de la misma escena pero diferente fecha para mejorar el análisis. En cada resultado se dan los códigos de las imágenes Landsat utilizadas y también los códigos de las imágenes de apoyo. Todas las imágenes utilizadas fueron Landsat 8 por lo que se usó una combinación de bandas RGB 654.

3.2.1. SAN MARTIN / LORETO (Landsat 008/064)

- Imagen del 17 setiembre 2015 (LC80080642015260)

Cuadro 48: Resultados para la escena Landsat San Martín/Loreto – Landsat 008/064

Sensor	Total puntos	Errores				Nube (no válidos)	Puntos acertados	
		Urbe	Río	Bosque	Total		Cantidad	%
MODIS	402	11	7	3	21	7	374	94.68%
NPP-750m	468	1	0	4	5	16	447	98.89%
NPP-375m	576	2	1	4	7	14	555	98.75%

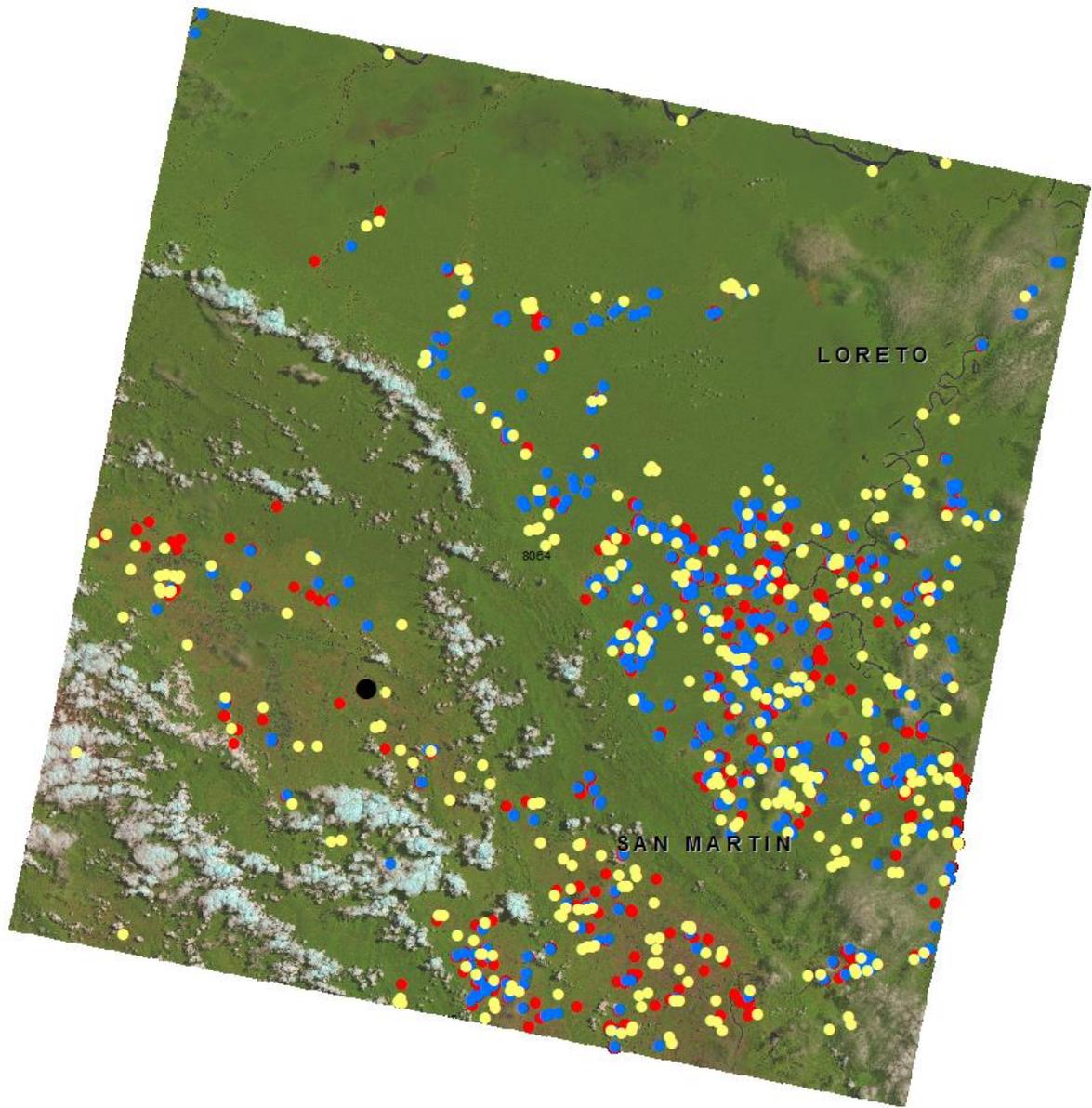


Figura 65: Escena completa SAN MARTIN / LORETO – Landsat 008/064 (LC80080642015260).

En las siguientes imágenes se observa que la presencia de cicatrices captados por un satélite y no por otro. Así también se encontraron cicatrices captadas por todos los satélites y cicatrices no captadas por ninguno. En la parte inferior de la Figura 66 se observa una gran cicatriz de quema de un día antes de la toma de la imagen. Los satélites MODIS lo captan más no los NPP; sin embargo el NPP capta otra cicatriz que el MODIS no. Similar sucede en la Figura 67, tenemos algunas cicatrices captadas por varios satélites en simultáneo, otras solo por uno; pero también presenciamos cicatrices que no fueron captadas por ningún satélites (con flecha).



Figura 66: Detalle de cicatrices de quema captados por satélite MODIS y NPP-375M independientemente.

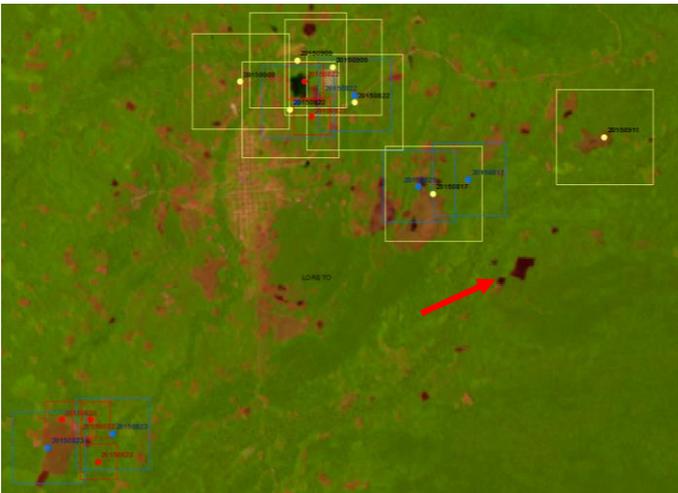


Figura 67: Detalle de cicatrices de quema captados por varios satélites en simultáneo, solo por un satélite o por ninguno

Para la siguiente observación se usó una escena Landsat de apoyo (LC80080642015212) de fecha 31 de julio de 2015. En la Figura 68 se observa una misma zona en dos escenas de distintas fechas: la de la izquierda es del 31 de julio 2015 y la de la derecha del 17 de setiembre 2015. Al visualizarlas en paralelo se observa el cambio de coloración en la imagen de la derecha respecto a la de la izquierda, se observa en color rojo oscuro las quemaduras para siembra de parcelas previamente agrícolas y la quema para habilitación de nuevas tierras.



Figura 68: Detalle del contraste de coloración de dos imágenes de la misma zona con diferente fecha (julio – izquierda, septiembre – derecha)

La Figura 69 es de la misma zona, pero esta vez se ha añadido la capa de No Bosque hasta el 2014 (en rojo). Claramente se ve, que este año fueron habilitadas nuevas áreas para agricultura y muchas de ellas fueron captadas por los focos de calor (cabe mencionar que solo se observan los focos desde el 18 de julio 2015).



Figura 69: Detalle de la capa No Bosque al 2014 (en rojo) en contraste con la imagen analizada.

Para esta observación también se usó la escena de apoyo de la Figura 68. La Figura 70 es una muestra del error en zonas urbana. La imagen de la izquierda es del 31 de julio 2015 y a la derecha está la del 17 de setiembre 2015. Si se observa la diferencia entre las imágenes, se aprecia una quema reciente en el lado inferior izquierdo. Todos los puntos fueron considerados error, salvo los dos que contienen esa cicatriz.



Figura 70: Detalle de error en zonas urbanas. Escena Landsat 008/064

Finalmente, la Figura 71 muestra toma previa y posterior de una quema captada durante su transcurso. MODIS y NPP-375M captaron el fuego, pero no el NPP 750m.

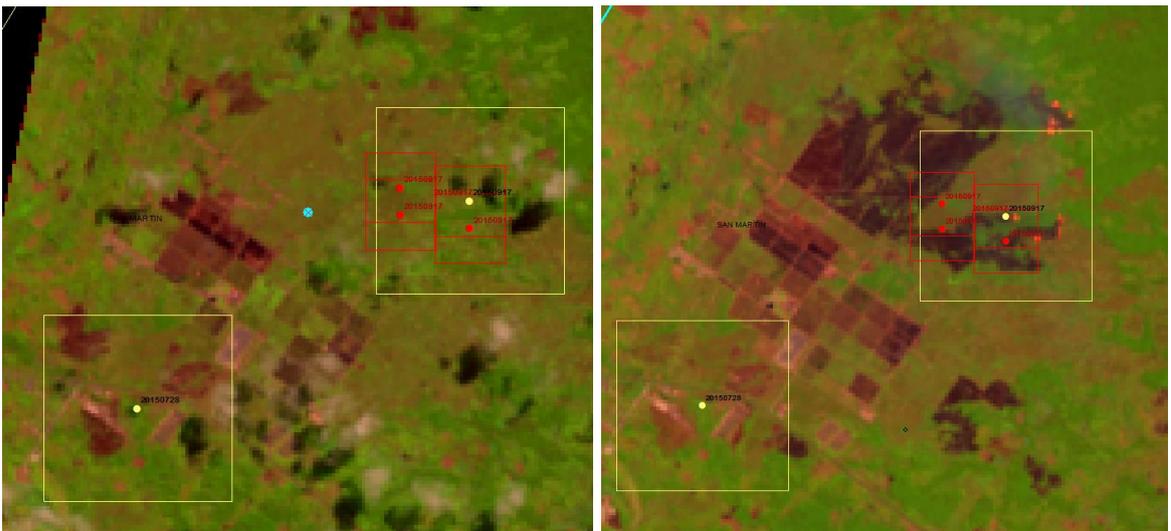


Figura 71: Detalle de una quema en curso. Imagen izquierda (julio 2015), imagen derecha (setiembre 2015)

3.2.2. LORETO – Landsat 007/064

- Imagen del 10 setiembre 2015 (LC80070642015253)

Cuadro 49: Resultados para la escena Landsat Loreto – Landsat 007/064

	Total puntos	Errores				Nube (no validos)	Puntos acertados	
		Urbe	Río	Bosque	Total		Cantidad	%
MODIS	152	0	82	2	84	0	68	44.7
NPP-750m	118	0	8	0	8	0	110	93.2
NPP-375m	165	0	2	0	2	0	163	98.8

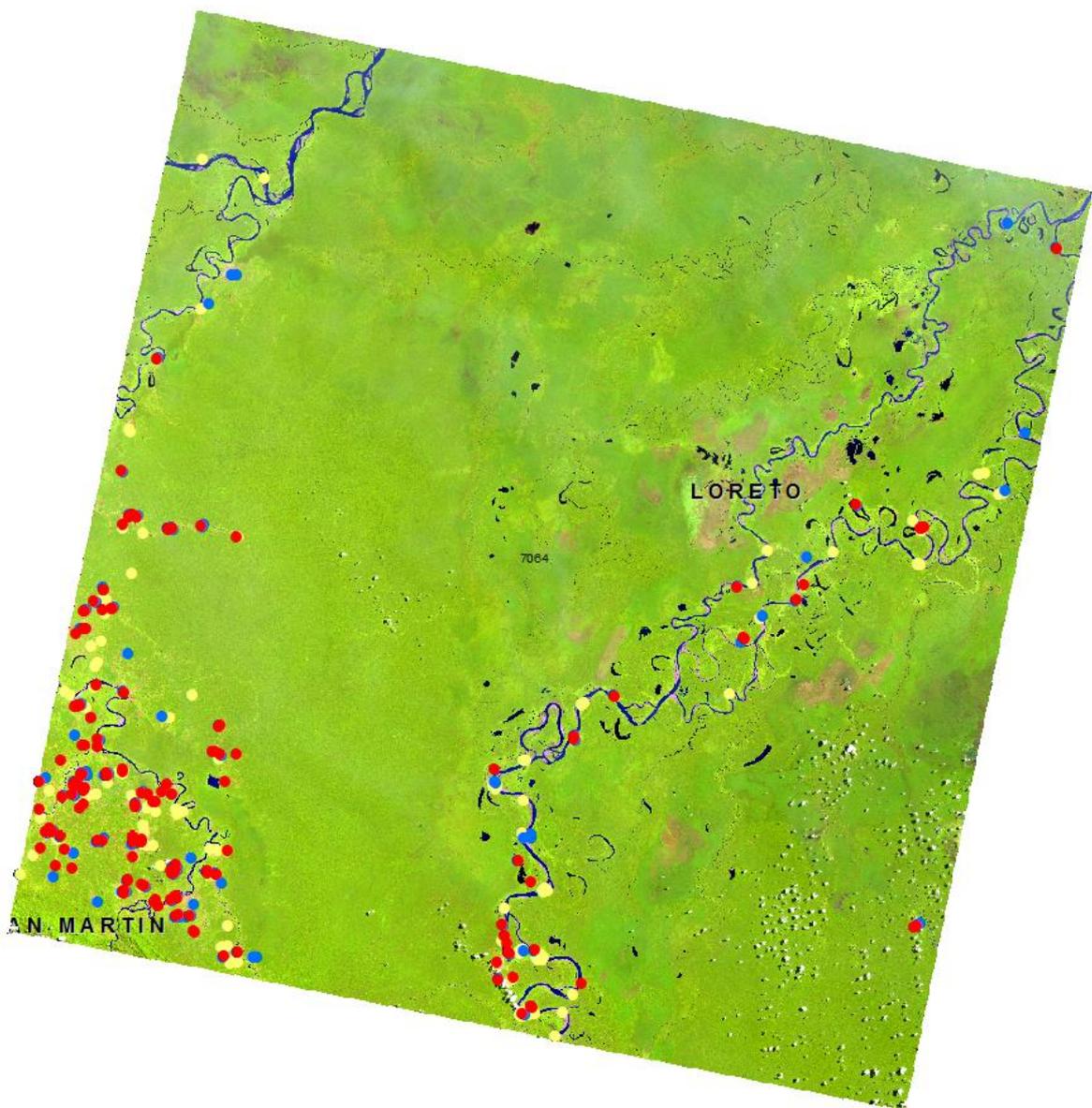


Figura 72: Escena completa LORETO – Landsat 007/064 (LC80070642015253)

En esta escena se encuentran muchos errores en la zona de ríos. La Figura 74 muestra lo dicho. Nótese que la mayoría de errores en río se registran por el sensor MODIS tanto es así que el porcentaje de acierto de este sensor bajó a 44.7%, frente a 93.2% y 98.8% de los sensores NPP-750 y NPP-375M respectivamente.

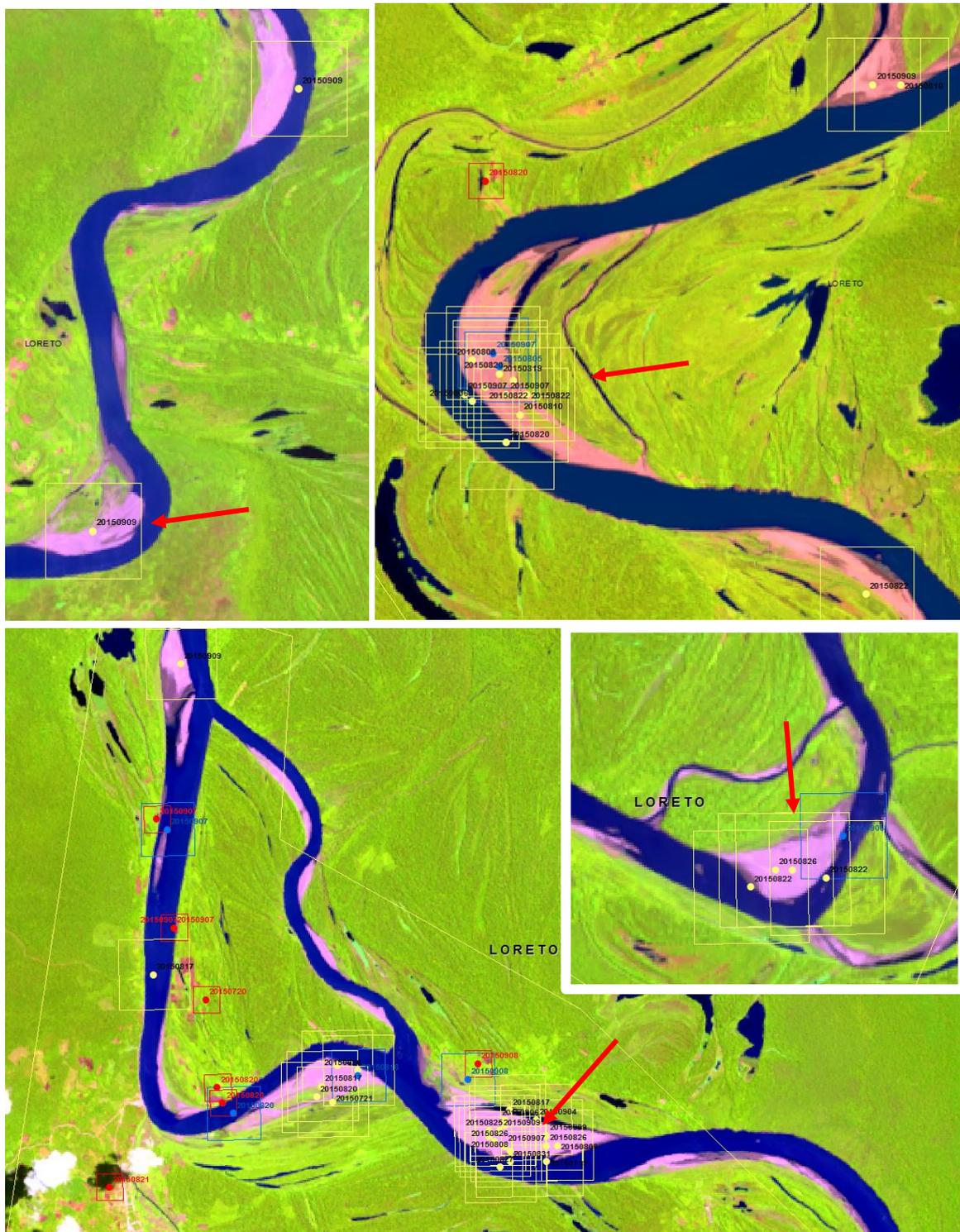


Figura 73: Detalle de error en zonas de ríos y playas. Escena Landsat 007/064

En la Figura 73 se observa las nuevas zonas quemadas respecto a un año anterior, la imagen de la izquierda es una escena de soporte para esta observación (LC80070642014250) y corresponde al 2014 y el de la derecha es del 10 de setiembre 2015.

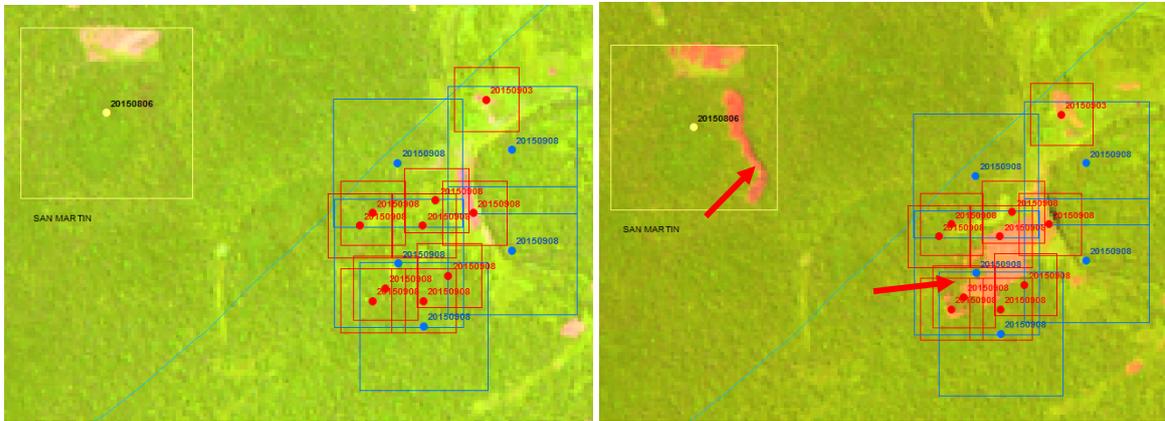


Figura 74: Detalle de nuevas áreas quemadas. Imagen izquierda (2014), imagen derecha (2015)

3.2.3. HUANUCO-UCAYALI – Landsat 007/066

- Imagen del 10 setiembre 2015 (LC80070662015253)

Cuadro 50: Resultados para la escena Landsat Huánuco-Ucayali – Landsat 007/066

	Total puntos	Errores				Nube (no validos)	Puntos acertados	
		Urbe	Río	Bosque	Total		Cantidad	%
MODIS	1260	6	29	16	51	14	1195	95.91
NPP	1099	0	2	5	7	17	1075	99.35
NPP-375m	1810	0	0	7	7	34	1769	99.61

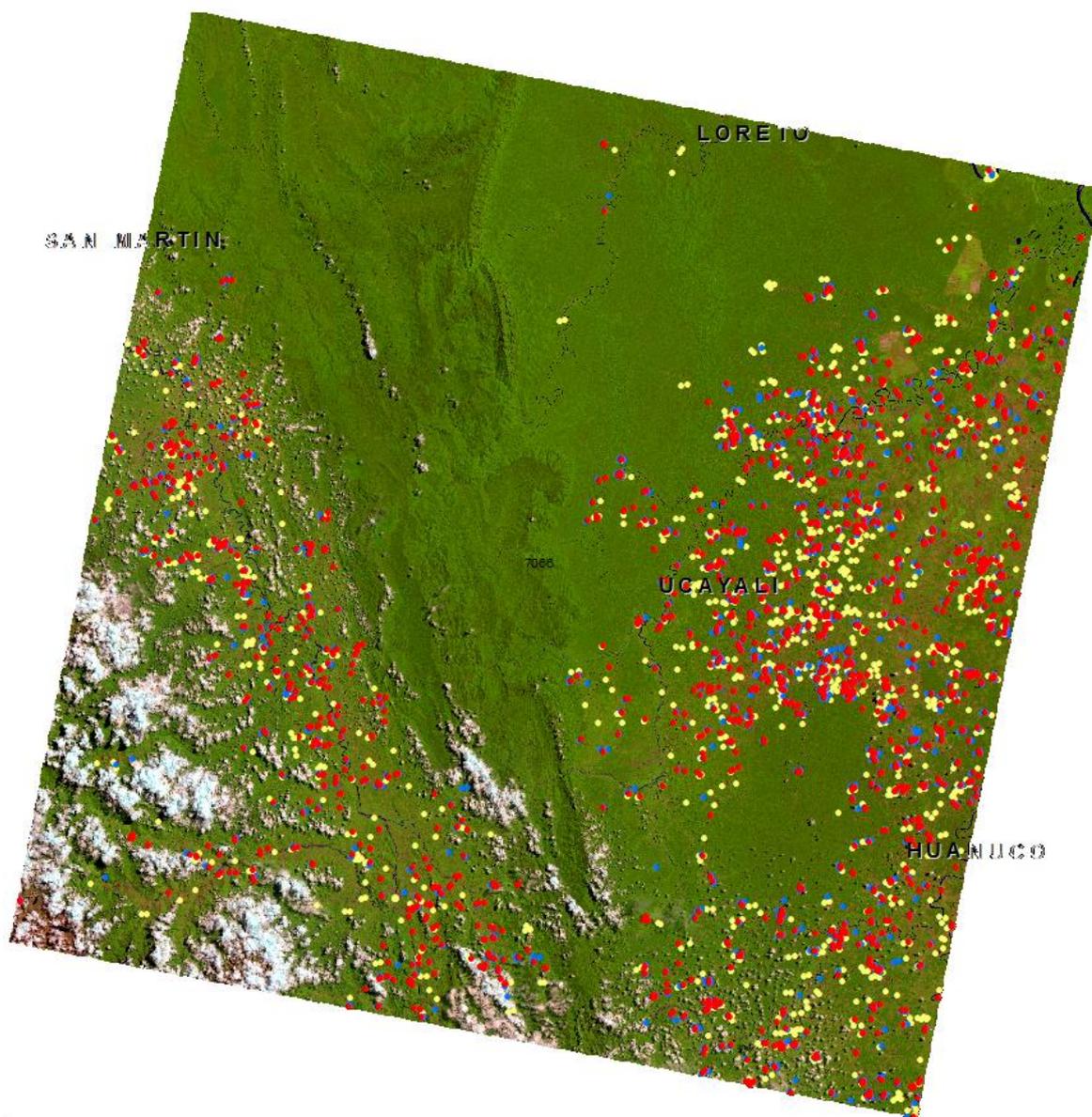


Figura 75: Escena completa HUANUCO-UCAYALI – Landsat 007/066 (LC80070662015253)

En la Figura 76 se observa que hay una zona de quema no registrada por los focos de calor (1) e incluso en la imagen se puede observar el fuego en curso. Cuando se revisó los focos posteriores, hay uno registrado el día 11 de setiembre, un día después de la toma de la imagen donde posiblemente los satélites MODIS y NPP sí pudieron captar el fuego. También se observa que hay un foco del 10/08/2015 (2) que en la imagen se observa como una quema reciente. Posiblemente la zona se quemó en esa fecha y se ha vuelto a requemar en fechas cercanas a la imagen.



Figura 76: Detalle de cicatrices de quema encontradas – Escena Landsat 007/066

En la Figura 77 se muestra algunos pixeles MODIS que no contienen cicatriz de quema en el *buffer* establecido pero que pueden hacer referencia a una cicatriz cercana ya que se sabe que la distorsión del pixel MODIS puede llegar hasta 400%. Sin embargo, debido a la metodología, se consideró como error si la cicatriz no está dentro de un rango de 750 m alrededor del foco.



Figura 77: Detalle de errores de detección en los focos de calor MODIS.

La Figura 78 muestra las zonas de error, tanto en ríos como en zonas urbanas. Se observa que la mayoría de estos errores los presentan los focos de calor MODIS.

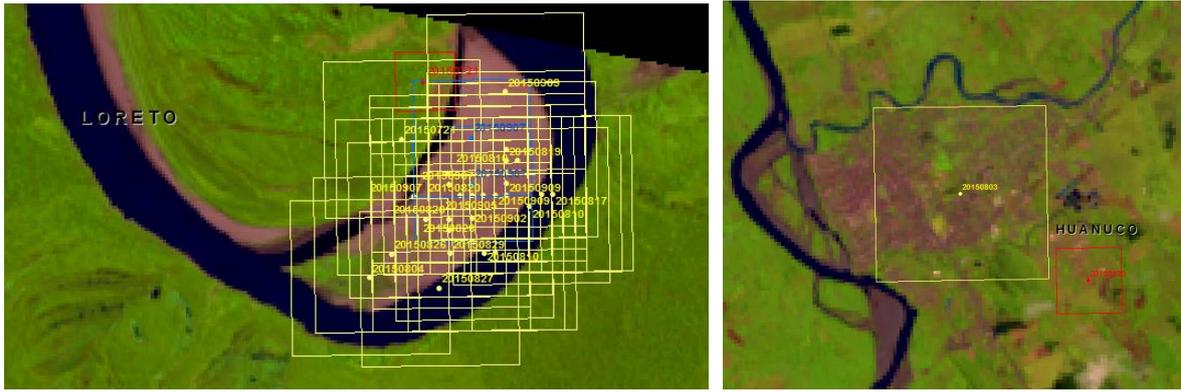


Figura 78: Detalle de errores en zonas de playas (izquierda) y zonas urbanas (derecha)

3.2.4. JUNIN – Landsat 006/068

- Imagen del 10 octubre 2015 (LC80060682015278)

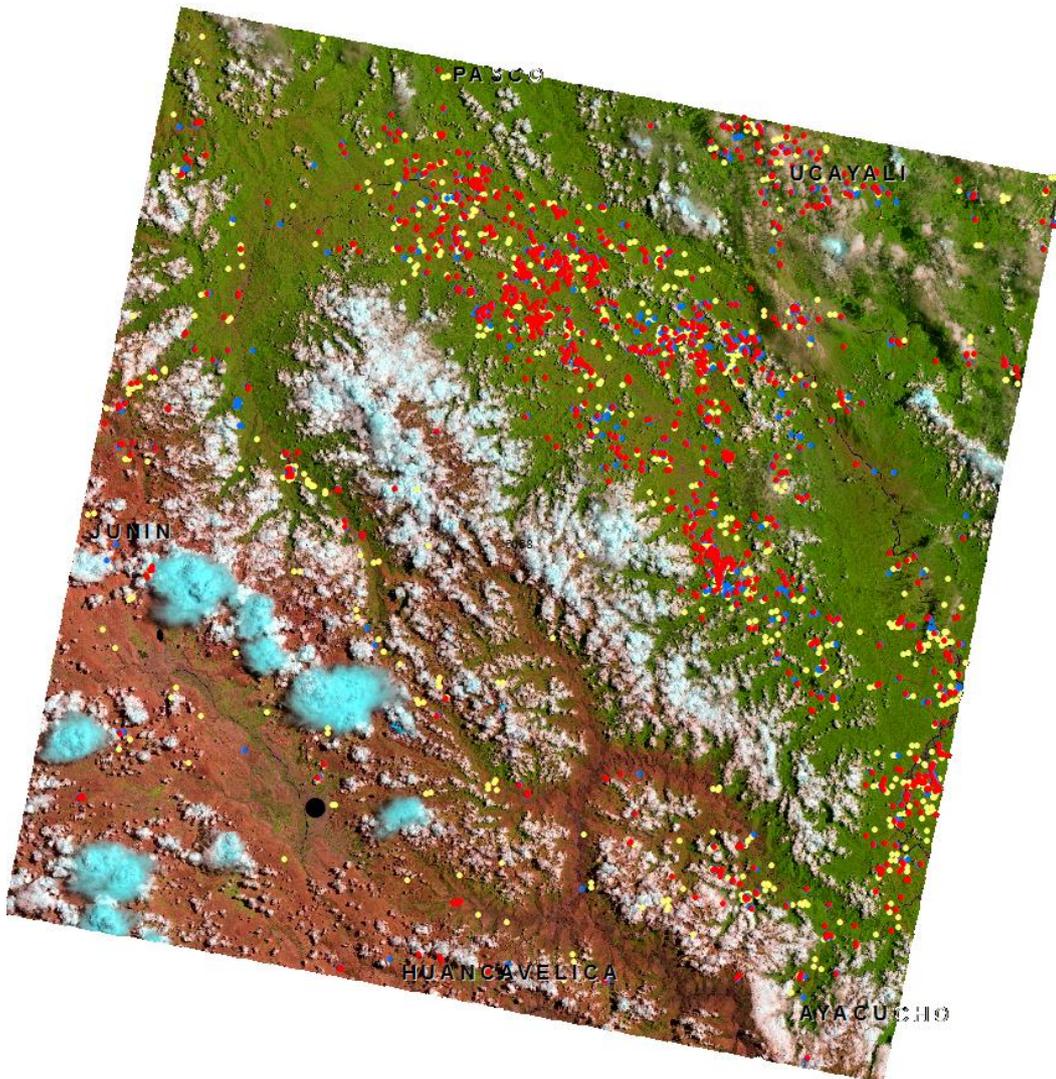


Figura 79: Escena completa JUNÍN - Landsat 006/068 (LC80060682015278)

Cuadro 51: Resultados para la escena Landsat Junín – Landsat 006/068

	Total puntos	Errores				Nube (no validos)	Puntos acertados	
		Urbe	Río	Bosque/Suelo	Total		Cantidad	%
MODIS	803	11	0	8	19	89	695	97.3
NPP	755	0	0	18	18	80	657	97.3
NPP-375m	1219	0	2	15	17	135	1067	98.4

En la Figura 80 se observan las áreas más pequeñas de quema detectadas en esta escena por los satélites. Los focos presentados registran quemas de 7, 2, 4, 6 pixeles Landsat. Es decir a partir de un cuarto de hectárea.

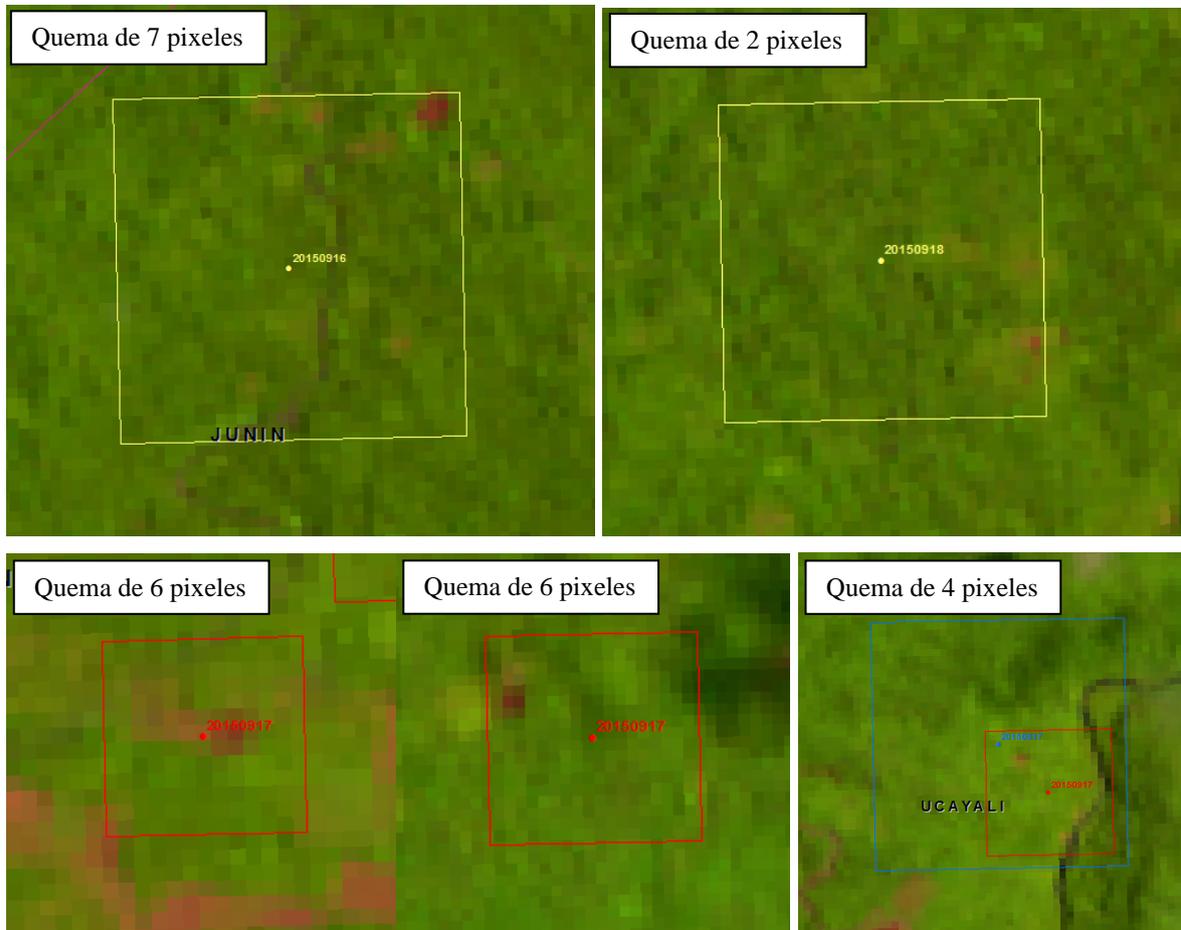


Figura 80: Detalle de área mínima de quema detectada por los focos de calor - Escena 006/068

La Figura 81 muestra el detalle de cicatrices no detectadas por ningún satélite.



Figura 81: Detalle de cicatrices no detectadas – Escena 006/068

3.2.5. CUSCO – Landsat 004/069

- Imagen del 21 setiembre 2015 (LC80040692015264)

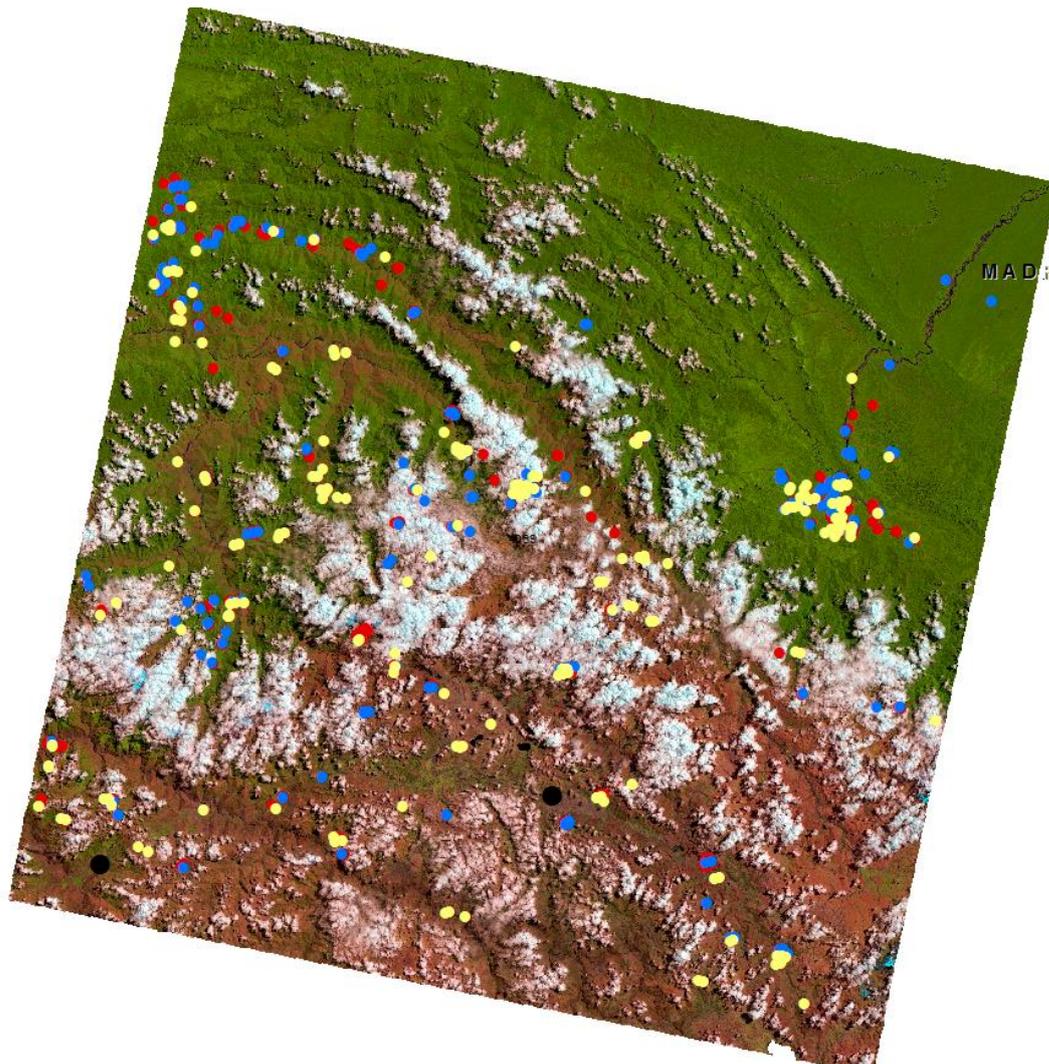


Figura 82: Escena completa CUSCO – Landsat 004/069 (LC80040692015264)

Cuadro 52: Resultados para la escena Landsat Cusco – Landsat 004/069

	Total puntos	Errores				Nube (no validos)	Puntos acertados	
		Urbe	Río	Bosque/Suelo	Total		Cantidad	%
MODIS	196	0	0	2	2	28	166	98.8
NPP	173	0	0	1	1	21	151	99.3
NPP-375m	311	0	0	3	3	45	263	98.9

Esta escena incluye una parte de la Cordillera de los Andes, donde se observa que las quemas son de mayor extensión. Empiezan como una quema en una parte de la ladera de la montaña y comúnmente se esparcen por toda la ladera debido al viento, convirtiéndose en un incendio. Las Figura 83 muestra los dicho. En las imágenes de selva baja, como se observará en los resultados de este estudio, es menos frecuente encontrar incendios de esta magnitud, y por el contrario lo que se observa más en selva baja son quemas agrícolas que pocas veces llegan a ser incendios.

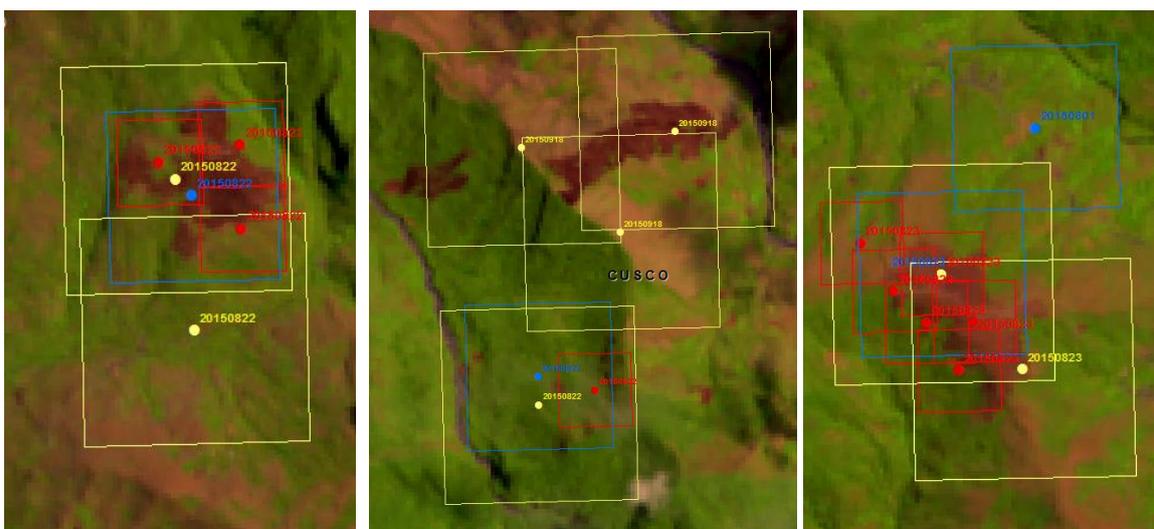


Figura 83: Detalles de cicatrices de gran tamaño en Selva Alta - Escena Landsat 004/069

En selva alta, debido a la topografía que da mayor presencia de nubes, se presenta mayor error por “omisión” (fuego no detectado). Esto se debe principalmente a la constante presencia de nubes (como se muestra en la escena completa) o al ángulo de toma del satélite (normalmente capta un lado de la ladera y el otro lado queda oculto. En la Figura 54 y 55 se muestra la cantidad de quemas no detectadas, incluso aquellas de gran tamaño.

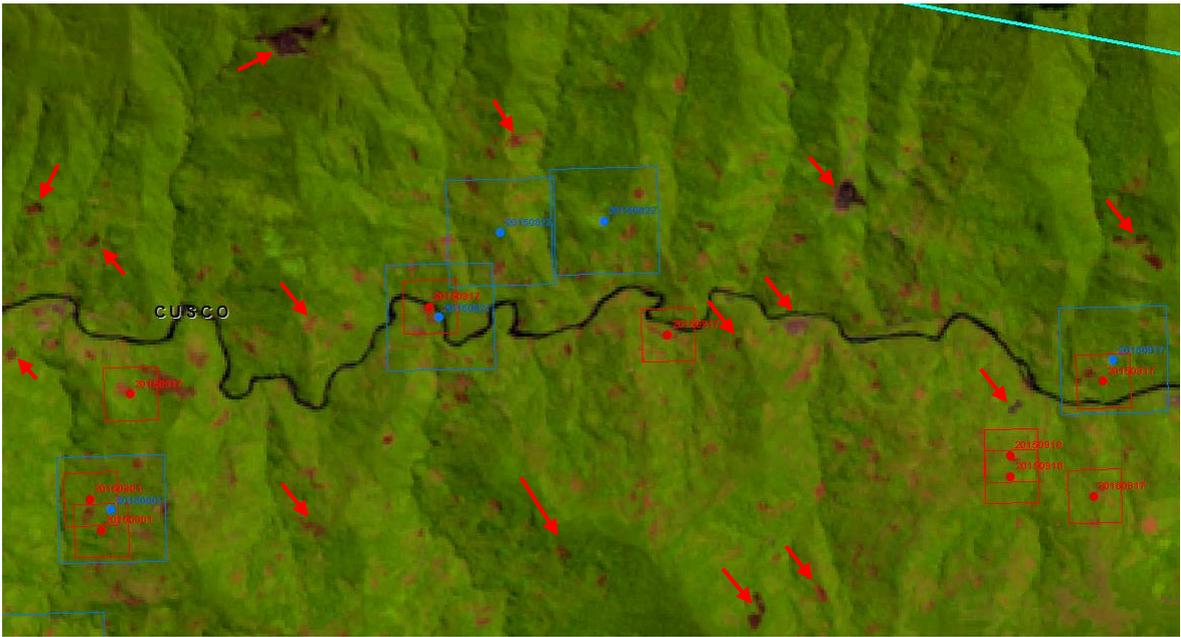


Figura 84: Detalles de cicatrices no detectadas - Escena Landsat 004/069

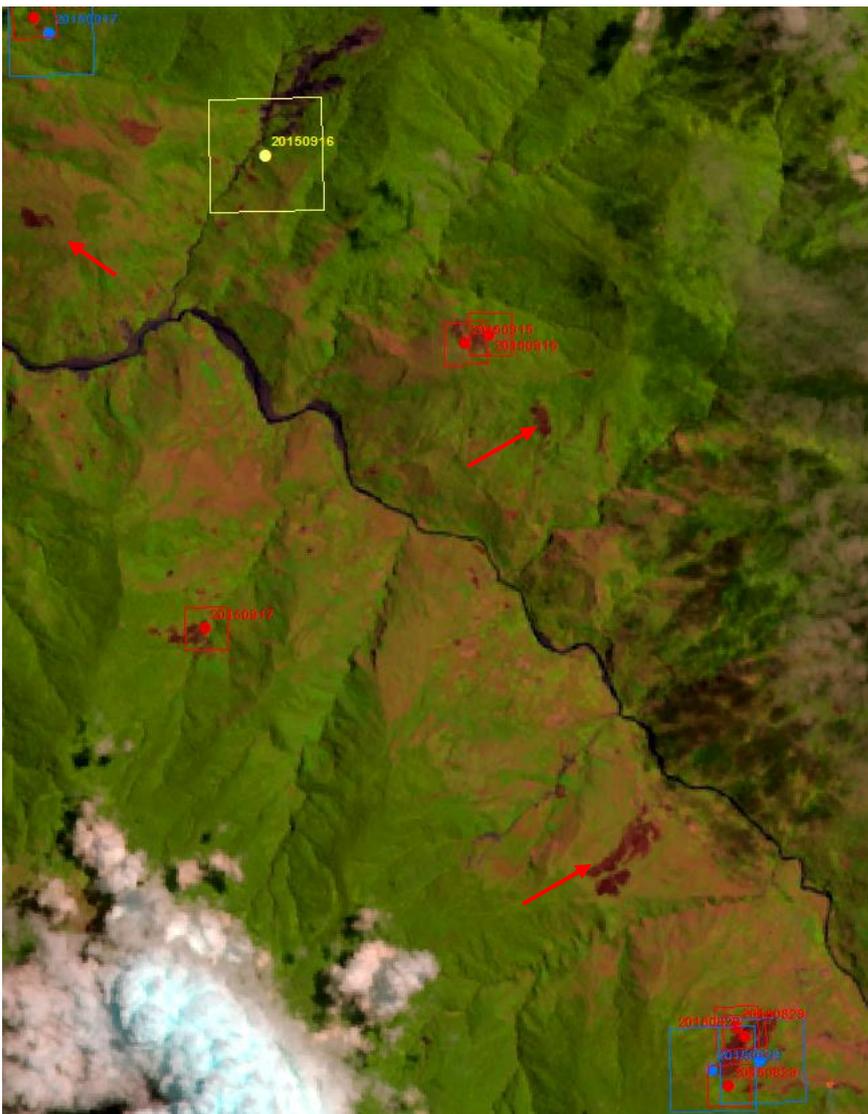


Figura 85: Detalles de cicatrices no detectadas - Escena 004/069

3.2.6. MADRE DE DIOS – Landsat 002/069

- Imagen del 10 noviembre 2015 (LC80020692015314)
- Imagen del 23 setiembre 2015 (LC80020692015266) – Imagen de apoyo

Cuadro 53: Resultados para la escena Landsat Madre de Dios – Landsat 002/069

	Total puntos	Errores				Nube (no validos)	Puntos acertados	
		Urbe	Río	Bosque	Total		Cantidad	%
MODIS	258	9	5	7	21	1	236	91.8
NPP-750m	281	0	1	6	7	0	274	97.5
NPP-375m	448	1	0	14	15	1	432	96.6

Para esta escena se trabajó con una imagen adicional de apoyo. La imagen principal es del 10 de noviembre (izquierda); la imagen de apoyo es del 23 de setiembre (derecha).

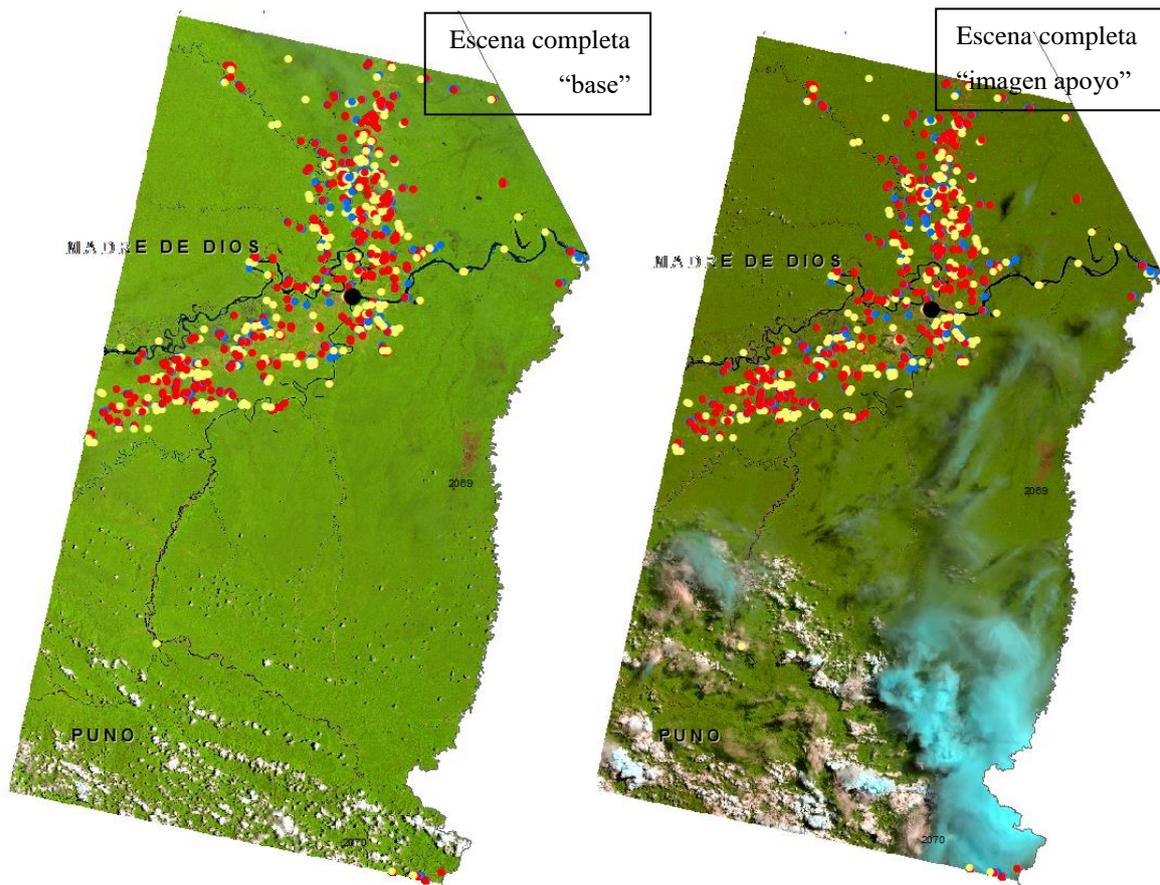


Figura 86: Escena completa MADRE DE DIOS – Landsat 002/069 (LC80020692015314) y (LC80020692015266 – imagen de apoyo)

En la Figura 87 y 88, se ve en polígono negro aquellas cicatrices correspondientes a focos entre el 17 – 21 de octubre. En la primera escena (23/set) no se observan estas cicatrices, en la segunda escena (10/nov) se observan la cicatrices en color rojo vivo. En polígono rojo esta la cicatriz correspondiente al foco del 18/set, en la escena del 23/set se observa en rojo oscuro, mientras que en la escena del 10/nov esta cicatriz ya está desapareciendo.



Figura 887: Detalle de cicatrices - Escena del 23/set

Se observa los polígonos en negro que no muestran cicatriz alguna, mientras que el polígono en rojo muestra una cicatriz reciente, de hace cinco días, correspondiente a focos del 18 al 22 de setiembre (el fuego duró al menos cuatro días y fue extendiéndose de sur a norte).

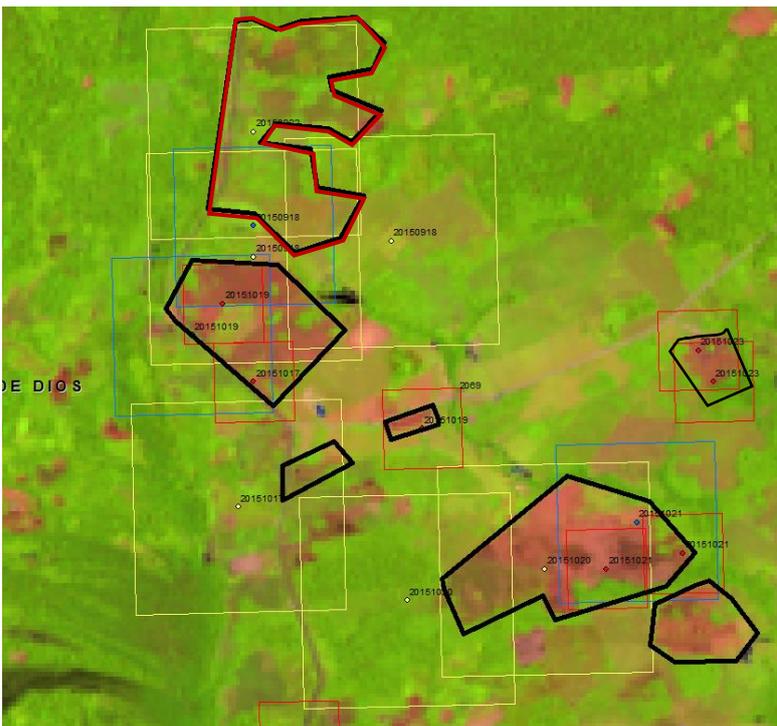


Figura 878: Detalle de cicatrices - Escena del 10/nov

Se observa los polígonos en negro, con cicatrices relativamente recientes de quema (el tono rojo de la cicatriz ya no es tan oscuro como la Figura 58 pues esta cicatriz lleva ya 20 días). El polígono rojo muestra como luego de 40 días, la cicatriz de la quema de setiembre ya no es muy notoria.

En cuanto al área mínima de quema detectada, las dos cicatrices aisladas más pequeñas son de 5 y 6 píxeles, alrededor de 0.5 ha cada una. Las Figura 89 refleja lo dicho.

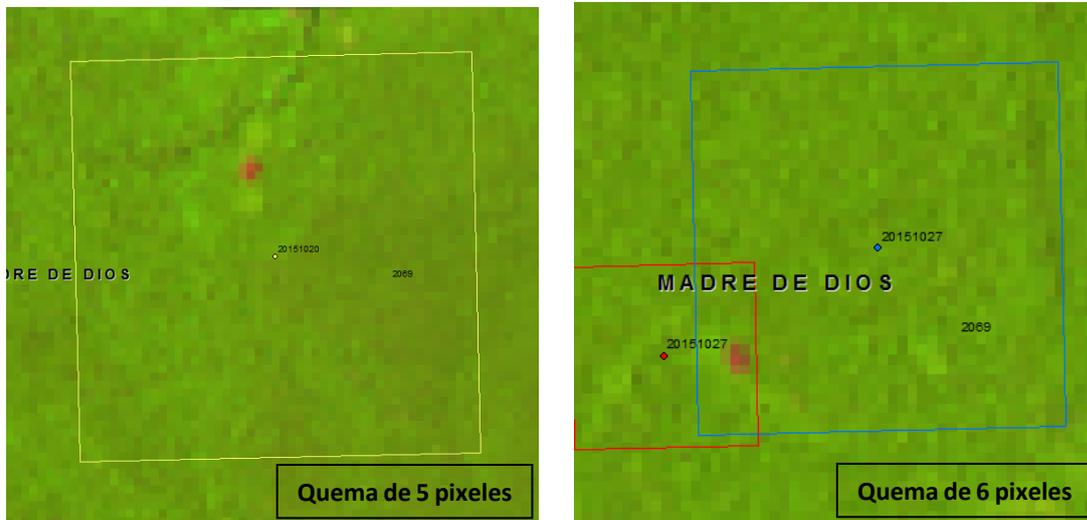


Figura 89: Detalle de área mínima de cicatriz captada en esta escena

Se realizó observaciones de quemas no detectadas, pero estas áreas no fueron contabilizadas por no formar parte de los objetivos del estudio. Se debe recordar que la presencia de nubes causa que algunos eventos no sean detectados. Las Figura 90 muestran estas áreas en polígonos rojos.



Figura 90: Detalle de cicatrices no captadas por ningún satélite.

3.3. RECUENTO DE LAS DETECCIONES

3.3.1. Nivel de acierto de los focos de calor por satélite

El Cuadro 54 resume la totalidad de focos analizados en el segundo estudio de validación, disgregado por aciertos y errores de cada satélite. El total de focos analizados en las seis escenas Landsat sumaron 10494 focos. En algunas escenas, sobre todo aquellas cercanas a la cordillera, hubo presencia de nubes lo que corresponde a focos “no válidos”. Los focos “acertados” son aquellos que efectivamente presentaron una cicatriz de quema dentro de su *buffer* cuadrado; los errores son aquellos focos que no la presentaron. En porcentaje de acierto de los focos de calor por satélite es: 93.2% para los focos de calor MODIS, 98.4% para los NPP-750m y 98.8% para los NPP-375m.

Cuadro 54: Resumen del total de aciertos y errores de los focos de calor de MODIS, NPP-750m y NPP-375m

Sensor	Total puntos	Errores				Nube (no válidos)	Puntos acertados	
		Urbe	Río	Bosque	Total		Cantidad	%
MODIS	3071	37	123	38	198	139	2734	93.2
NPP-750m	2894	1	11	31	43	134	2717	98.4
NPP-375m	4529	3	5	43	51	229	4249	98.8
TOTAL	10494	41	139	112	292	502	9700	

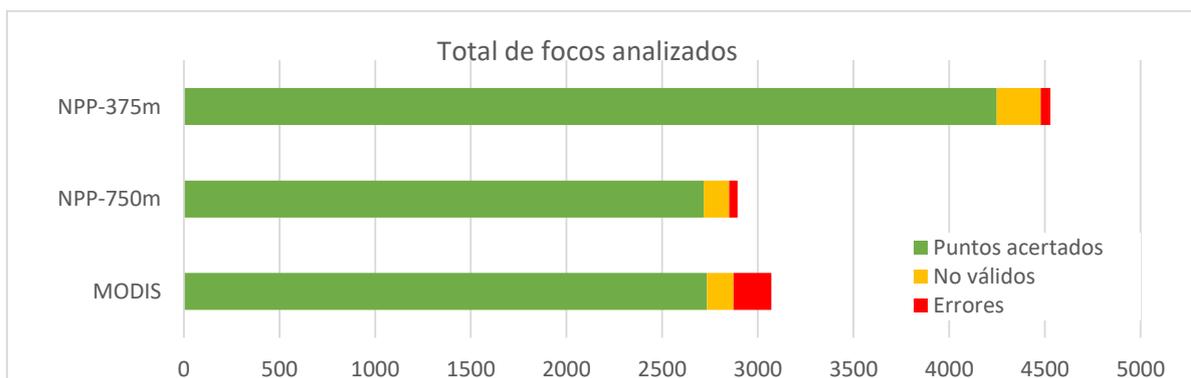


Figura 91: Total de focos de calor analizados divididos en: aciertos, no válidos, errores.

En la Figura 91 se observa que para la misma área de territorio, el satélite NPP-375m presentó mayores focos que los otros dos satélites, sin embargo hay que considerar que el hecho que tenga mayor cantidad de focos no implica que abarque todos los eventos como ya

se ha visto en las observaciones de las escenas individuales (ver Figura 90). Estas cifras responden en gran parte a la mayor resolución del satélite pues mientras el MODIS, por ejemplo, presenta un foco de calor indicando que en un área de 1.5km² ha habido fuego, el NPP-375m puede mostrar cuatro focos de calor indicando cuatro eventos por separado mientras que el MODIS lo toma como uno solo.

3.3.2. Evaluación de las zonas de errores frecuentes de los focos de calor

Los errores en zonas urbanas se presentaron en las ciudades de Tarapoto (Landsat 008-064), Tingo María (Landsat 007-066), Satipo y Bajo Pichanaki (Landsat 006-068) y Puerto Maldonado (Landsat 002-069). Las zonas de errores en río están en el Río Ucayali (Landsat 007-064 y 007-066), Río Marañón (Landsat 007-064), y Río Madre de Dios (Landsat 002-069). Se observa que ninguna ciudad de la Sierra mostró falsas detecciones. También se observa que las zonas de error en ríos fueron solo en los ríos grandes que originan grandes playas mientras que los ríos pequeños no mostraron este problema.

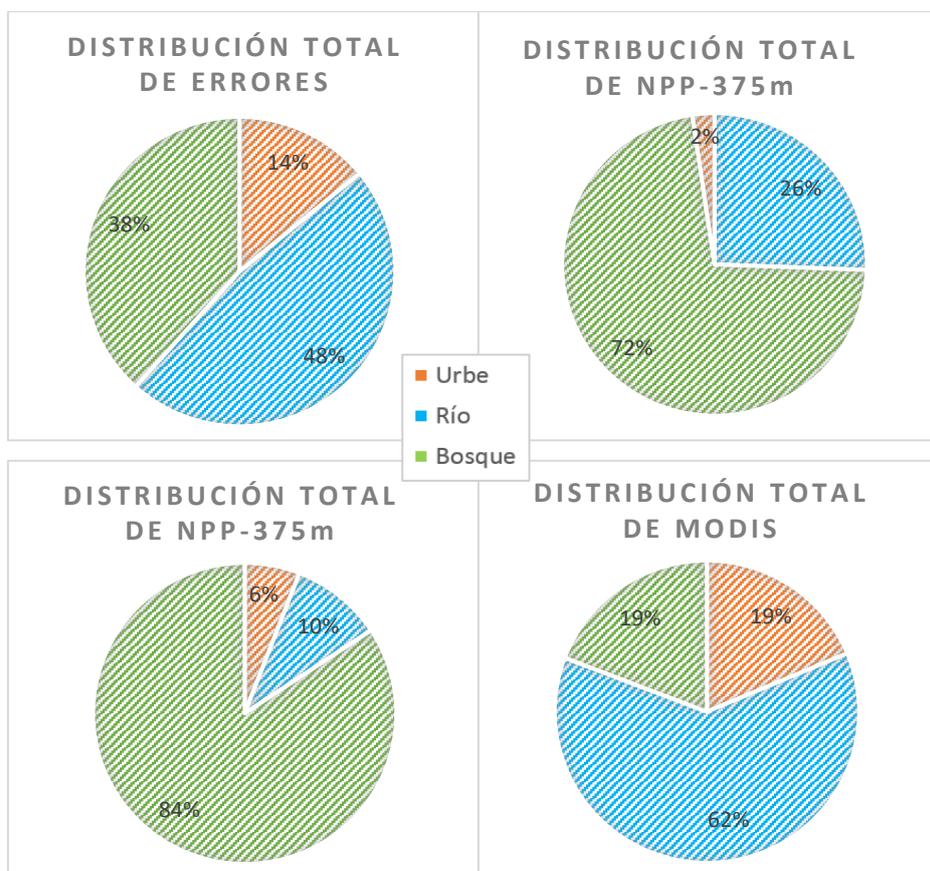


Figura 92: Distribución de errores porcentual por satélite y tipo de error en el total de las escenas analizadas.

Las Figura 92 muestran la distribución de errores por satélite porcentual de los focos de calor analizados, respectivamente. En total, el 48% de los errores está en zona de ríos, el 38% en zonas de bosque y el 14% en zonas de construcciones urbanas. Si lo vemos por satélite, la proporción varía pues tenemos al satélite MODIS cuyo 62% de errores significa ríos, mientras que los NPP presentan mayor porcentaje en la zona de bosques. Sin embargo, en la Figura 93 que muestra los datos por cantidad, se observa que el número de errores en bosque en los tres satélites es similar pero es bastante diferenciada para ríos y urbes donde MODIS es el satélite con mayor presencia de estos dos últimos errores. Si se aplica una máscara a los ríos y zonas urbanas, el error de MODIS se reduciría en 81%, el del NPP-750 en 26% y el de NPP-375 en 16%, logrando así todos un porcentaje de acierto mayor al 98.5%.

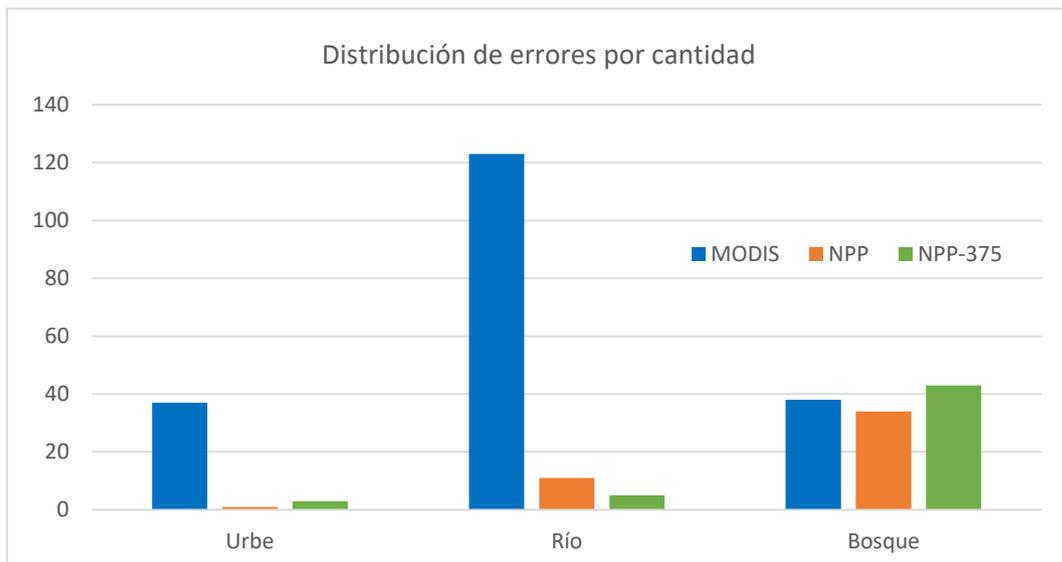


Figura 93: Distribución de cantidad de errores por satélite y tipo de error en el total de las escenas analizadas.

Podemos inferir que los errores en playa y urbes son originados por la alta reflectancia de los elementos presentes en playa y ciudades. El algoritmo para focos de calor incluye un filtro con aquellas bandas de brillo solar u otros elementos que pueden confundir la detección del fuego por parte del sensor. Posiblemente las características del sensor MODIS hagan que este filtro no sea tan efectivo mientras que las características del sensor VIIRS (satélite Suomi NPP) permitan un mejor filtrado. Cabe mencionar que los sensores del Suomi NPP fueron creados incorporando mejoras basadas en la experiencia MODIS.

Los errores en bosque, por otro lado, pueden no deberse a la confusión de reflectancias sino a distorsiones propias del pixel que pueden superar el límite de “1.5 veces el tamaño del pixel” usado para esta metodología. Es decir, posiblemente estos “errores” en bosque no son falsas alarmas sino que pertenecen a pixeles distorsionados donde la cicatriz de quema se encuentra en un radio mayor al considerado para este estudio.

3.3.3. Otras observaciones

En varias de las escenas se pudo identificar cicatrices únicas dentro de un *buffer* con lo que se pudo determinar el tamaño en pixeles de la cicatriz (Ver Figura 80 y 89). No se encontraron grandes diferencias entre un satélite u otro pero existe evidencia para afirmar que los tres satélites han logrado detectar áreas de quema de 0.54 hectáreas.

En cuanto a cicatrices no detectadas (ver Figuras 81, 84, 85 y 90), estas no fueron contabilizadas por no ser objetivo del estudio. Se conoce que la principal causa de estas no-detecciones es por presencia de nubes por lo que hacer un estudio de este tipo de error debería considerar estos factores. No obstante, las observaciones realizadas indican que la probabilidad de detección aumenta cuando se trabaja con más de un satélite a la vez (ver figuras 66, 67, 68, 70, 74, 76, 77, 83, 88) pues los diferentes horarios y órbitas de paso brindan mayor opción para captar escenas libres de nubes de la zona. Obviamente, siempre existirán zonas “ciegas” para los satélites ópticos por sus mismas limitaciones.

4. DISEÑO DE LA METODOLOGÍA PARA EL REPORTE DE ALERTAS TEMPRANAS DE DEFORESTACIÓN BASADA EN FOCOS DE CALOR

Los reportes en Perú se iniciaron de manera mensuales, reportando los primeros días del mes en curso los focos del mes anterior. El primer reporte fue de Octubre 2015 para el que se usó una metodología preliminar pues aún no se había terminado la validación con las imágenes Landsat. Estos reportes preliminares se compartieron con los especialistas del PNCB/MINAM, DGOT/MINAM y SEFOR/MINAGRI para incorporar sus aportes. A la par se fue construyendo una máscara en las zonas de error frecuente pues fue uno de las conclusiones de la primera validación. Inicialmente fueron ríos y playas, pero mientras se

avanzaba en la máscara se encontraron otros lugares de error que serán descritos en el punto 4.3. También se realizó una salida de campo en el trayecto Cuzco – Madre de Dios para observar en el terreno las cicatrices de quema y contrastarla con los focos y las imágenes Landsat. Las observaciones más importantes de esta salida se mostraran en el punto 4.3. La metodología se consolidó en Diciembre de 2015, cuando se terminaron los estudios de validación y se procesaron los datos de campo. El resultado es la elaboración de un protocolo para el reporte de alertas tempranas destinado a dar reportes diarios.

4.1. APOORTE DE LOS ESTUDIOS DE VALIDACIÓN PARA EL DISEÑO DE LA METODOLOGÍA

La información recopilada durante la revisión bibliográfica, el análisis preliminar de focos de calor para el país y las validaciones sirvieron para consolidar la metodología. Los principales aportes se muestran a continuación:

a. Utilizar los satélites Aqua, Terra, NPP y NPP-375 en simultaneo para el reporte de alertas tempranas de deforestación basado en focos de calor:

Lo observado durante la validación con imágenes Landsat demuestra que la probabilidad de detección aumenta cuando se utilizan focos de varios satélites en simultáneo. En varias capturas de pantalla (ver punto 3.3.3) se observa que hay cicatrices detectadas por un satélite pero no por otro. No se puede controlar la presencia de nubes, pero usar cuatro satélites con diferente horario de paso al día aumenta las posibilidades de detección.

b. Realizar una máscara de las zonas de error frecuente en el Perú (zonas urbanas y zonas de playas de río):

El recuento de detecciones de ambas validaciones indica que hay error repetitivo en grandes playas de río y en zonas urbanas. Es factible realizar un enmascaramiento de todas las zonas urbanas y una máscara hidrográfica al país. La máscara hidrográfica debe actualizarse al menos una vez al año por el movimiento propio de los ríos. Esta máscara eliminará estos tipos de errores que representan, según las cifras de la segunda validación, el 58% de los errores; por lo que el nivel de acierto de los cuatro satélites estaría sobre el 98%.

c. Realizar un procedimiento para reducir la “repetición de alertas” para un mismo evento:

Esta recomendación se basa en los casos vistos en la validación con las imágenes Landsat cuando dos satélites o más detectaban un mismo evento. Los reportes de alertas tempranas basadas en focos de calor no deberían reportar solo la cifra de cuántos focos de calor se registran pues da la idea de que sucedieron más eventos de los que en verdad se produjeron. Cuando se den casos de repetición, lo ideal sería reportar solo los focos de calor del satélite de mayor resolución y obviar los focos de los satélites de menor resolución pues se entiende que el primero ya contempla las detecciones de los segundos. Es importante tener cuidado con las fechas de los eventos cuando se realice este procedimiento para reportes semanales o mensuales pues en una misma zona se pueden dar incendios o quemaduras repetitivas.

d. Para contraste del foco de calor con su respectiva cicatriz de quema considerar, tomando como centro la coordenada del foco de calor, un radio de búsqueda de 0.75 a 1 del tamaño del pixel teórico de donde proviene dicho foco de calor:

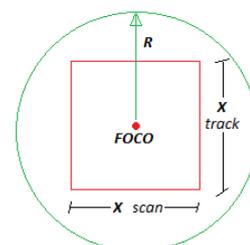
Las conclusiones de la primera validación sirvieron para determinar que las distorsiones de los píxeles juegan un papel muy importante al momento de verificar el evento *in situ*. Un foco puede ser considerado por error cuando podría ser el caso que la cicatriz de quema no se encuentre fácilmente por estar en un radio muy lejano respecto a las coordenadas dadas por el foco de calor, y esto sucederá si se está tratando con un pixel distorsionado. Los resultados de la primera validación indican que el 80.6% de los focos MODIS provienen de píxeles cuyo tamaño real en el *scan* (medida latitudinal del pixel) es 50% más que su tamaño teórico, mientras que el 88.2% mide en la realidad el doble del tamaño teórico. Por lo tanto, se recomienda que para encontrar la cicatriz en campo, el radio de búsqueda sea al menos el tamaño teórico del pixel multiplicado por 0.75. El INPE (Morelli 2014), recomienda que este radio sea igual al tamaño del pixel de donde proviene el foco. Gráficamente sería como sigue:

Donde:

Tamaño teórico del pixel: X

$$R = [0.75X; 1X]$$

Radio de búsqueda del evento: R



e. Para fines prácticos, utilizar la base de datos del proyecto “Monitoramento de Queimadas e Incêndios por satélite em tempo quase-real” del INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) Brasil:

Se recomienda usar este portal web por la facilidad de descarga de datos pues presenta los cuatro satélites mencionados en el punto “a” y la descarga de los *shapefiles* es inmediata. La primera validación ya comprobó que los focos de calor del satélite MODIS descargados del portal de la NASA y del INPE no presentan mayores diferencias. Si bien es cierto que la información de la tabla de atributos de la NASA tiene mayores variables, también se demostró que esta información no es relevante para los objetivos de un reporte de alertas tempranas de deforestación basado en focos de calor.

4.2. ENMASCARAMIENTO DE LAS ZONAS QUE PRESENTAN ERROR FRECUENTE

La máscara se realizó con la finalidad de reducir el error de los focos de calor. En la segunda validación se observó que el error de los focos variaba del 2% al 8% de la cantidad total de focos, según el satélite. Se observó que aparecían repetidamente en ciertas zonas fácilmente delimitables como playas de ríos y zonas urbanas. Entonces, se concluyó que realizando una máscara en zonas de error frecuente se podría disminuir drásticamente porcentaje de falsas alertas de los focos de calor.

La metodología usada consistió en sobreponer los focos de calor del año 2013, 2014 y 2015 al mosaico libre de nubes de imágenes Landsat del Perú para el año 2014 (Universidad de Maryland, 2014). Primero se elaboró la máscara de los ríos donde se tomó como referencia la capa de hidrografía 2013 (PNCB-MINAM/SdO-OTCA, 2013) pues era el último año actualizado. Las zonas donde mes a mes y año a año se repetían los focos en un mismo lugar, se las marcó como máscara. Luego, con ayuda del *shapefile* de ciudades, se hizo máscara en las zonas urbanas pues no se incluyen en el monitoreo de bosque. La Figura 94 ejemplifica lo dicho. Finalmente, se buscaron otras zonas donde había acumulación de focos año tras año. Se encontraron otros lugares como pantanos, zonas industriales y volcanes (Ver Figura 95). La máscara se hizo para todo el país.



Figura 94: 94a-Máscara en zonas de ríos y playas. 94b-Máscara en zonas urbanas.

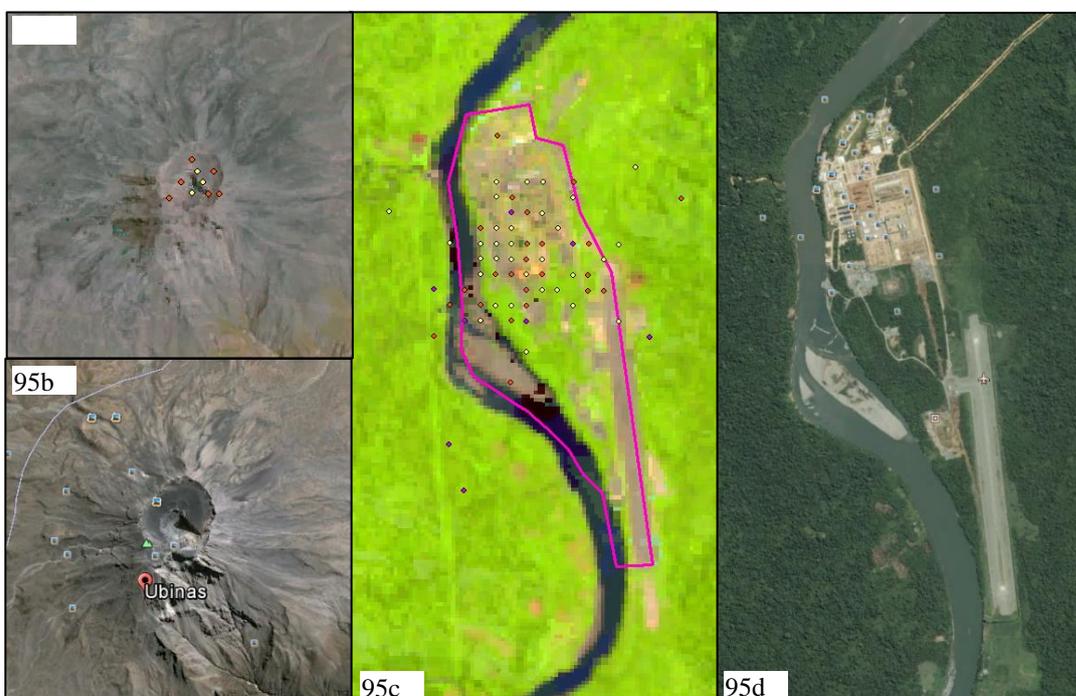


Figura 95: 95a-Máscara en el volcán Ubinas en Moquegua. 95b-Imagen satelital Digital Globe 2016 (Google 2016) del volcán Ubinas. 95c-Máscara en la Planta de Gas Las Malvinas en Cuzco. 95d-Imagen satelital Digital Globe 2016 (Google 2016) de la Planta de Gas Las Malvinas.

Para el mes de diciembre de 2015, los focos de calor de todo el país ascendieron a 1147 focos. La máscara ayudó a eliminar 77 focos que representaban error (6.7% del total de focos). En enero de 2016, la cantidad de focos de calor fue 1460, y la máscara ayudó a eliminar 104 focos errados (7.1% del total de focos).

4.3. OBSERVACIONES REALIZADAS DURANTE LA SALIDA DE CAMPO

En octubre del 2015 se realizó una salida de campo, donde se recorrió la carretera interoceánica en el tramo Cuzco – Madre de Dios. La salida tuvo como fin validar los diferentes trabajos realizados en la Sala de Observación de los componentes Degradación, Deforestación y Alertas tempranas. Respecto al componente de Alertas tempranas, el objetivo fue validar en campo los focos de calor cercanos a la ruta de paso.

Se partió de la ciudad de Cuzco hasta el poblado de Iñapari en Madre de Dios, frontera con Brasil (Figura 96). Previo a la salida se identificaron 42 focos de calor de los satélites trabajados en las validaciones, registrados con una antigüedad no mayor a dos meses y localizados a pie de la carretera. Estos serían visitados durante la salida de campo pero debido a algunos inconvenientes, se lograron visitar solo 29 de ellos. Además, en campo se tomaron otros 39 puntos y en gabinete se comprobó si estos puntos fueron registrados en los focos de calor.

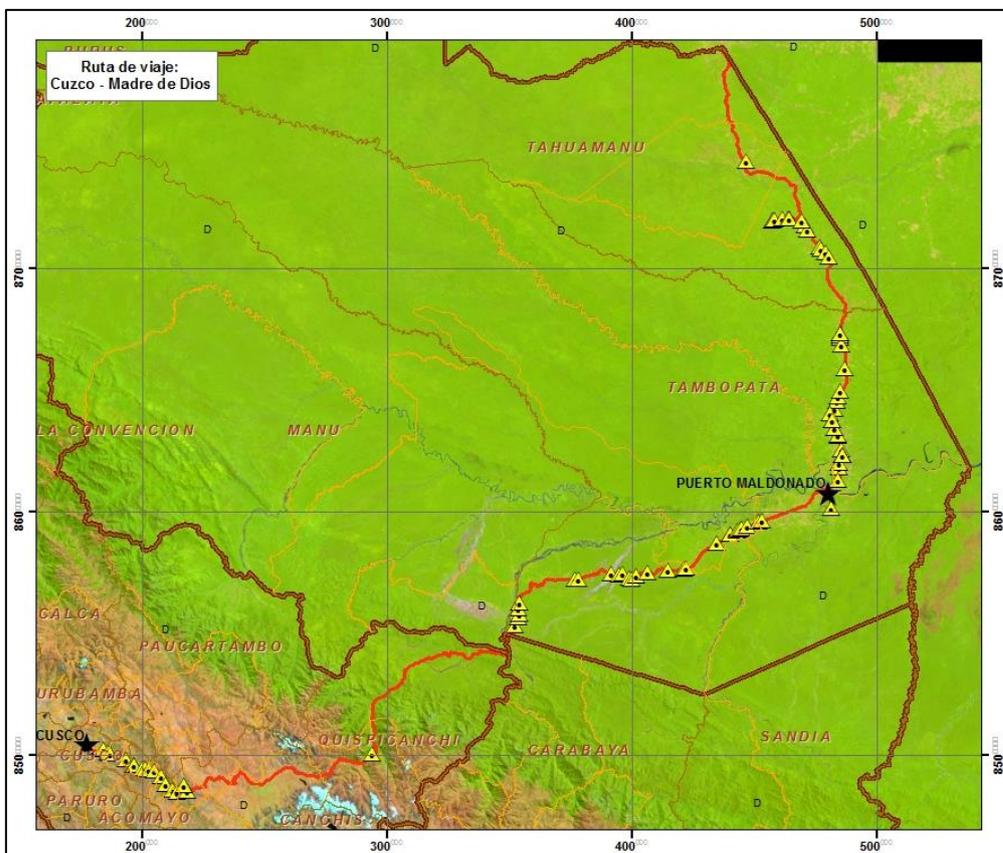


Figura 96: Trayecto realizado en la salida de campo Cuzco – Madre de Dios (ruta en rojo). Los triángulos amarillos son los puntos tomados en campo.

Los puntos registrados en campo en total fueron 68. Ya en gabinete, se descargaron imágenes de manera que se pueda comparar la fotografía tomada en campo, la imagen satelital y el foco de calor. El Cuadro 55 resume los resultados obtenidos. De los 68 puntos, 54 fueron en Selva y 14 en Sierra. También, 44 representaban eventos registrados por un foco de calor (en este grupo están los 29 focos de calor registrados previos a la salida) y 24 de ellos no fueron registrados por focos de calor (errores de omisión). La mayoría de los eventos que no habían sido registrados por focos de calor fueron en el tramo Cuzco – Puerto Maldonado. Ese tramo también presentó dificultad para obtener una imagen Landsat por la alta nubosidad en la zona.

Cuadro 55: Resultados de los registros tomados en la salida de campo.

REGION	Focos registrados		Total general
	NO	SI	
Selva	17	37	54
Sierra	7	7	14
Total general	24	44	68

Las Figuras 97 al 99 muestran un ejemplo de los registros en Sierra, que si bien no es el ámbito de esta metodología sirve para ver cómo los focos de calor pueden alertar y dar seguimiento a un incendio forestal. Los pobladores indicaron que el incendio fue en los cerros aledaños a la Laguna Huacarpay, que duró más de una semana y fue uno de los más grandes ocurridos en Cuzco en lo que iba del año. Las imágenes satelitales Landsat 004/069 (Figura 98 y 99) muestran que se consumieron más de 1700ha de pajonal. Las escenas de dos fechas, 08 de octubre de 2015 y 23 de octubre de 2015, muestran como fue avanzando el incendio (de este a oeste – flechas amarillas). Las fechas de los focos van desde el 05 de octubre al 11 de octubre de 2015. Los focos de calor de los satélites NPP (puntos celestes y rosados) tienen registro del evento el 5, 6, 7, 9, 10 y 11 de octubre. Los focos de calor MODIS (puntos amarillos) solo registran el 6, 9 y 11 de octubre.



Figura 97: Mosaico fotográfico de la zona de incendio en cercanías a la laguna Huacarpay. Se observa la cicatriz del incendio en la cumbre de los cerros.

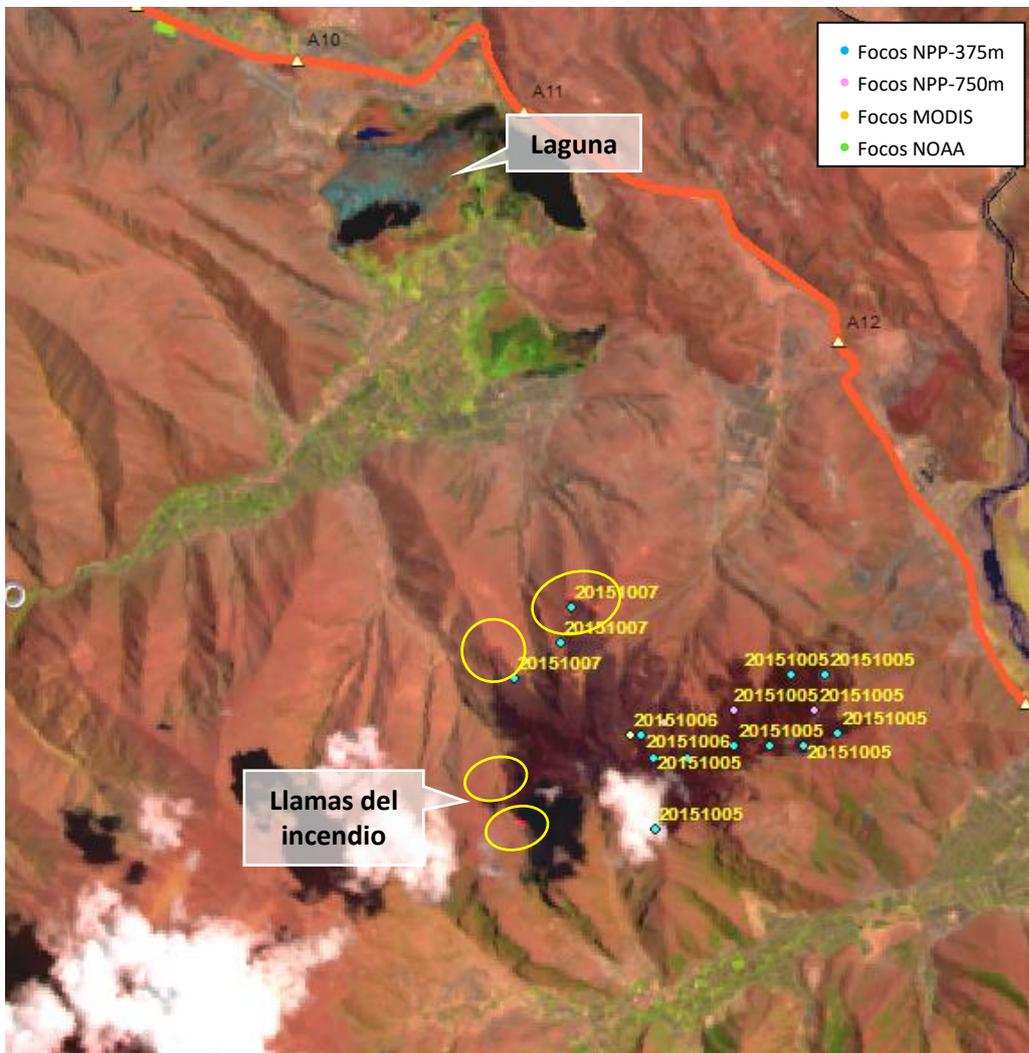


Figura 98: Escena Landsat 004/069 del 08 de octubre 2015 que muestra el incendio de la laguna Huacarpay en curso. Se observa la cicatriz en marrón oscuro, donde indican los focos de calor, y las llamas del incendio en naranja encendido (círculos amarillos).

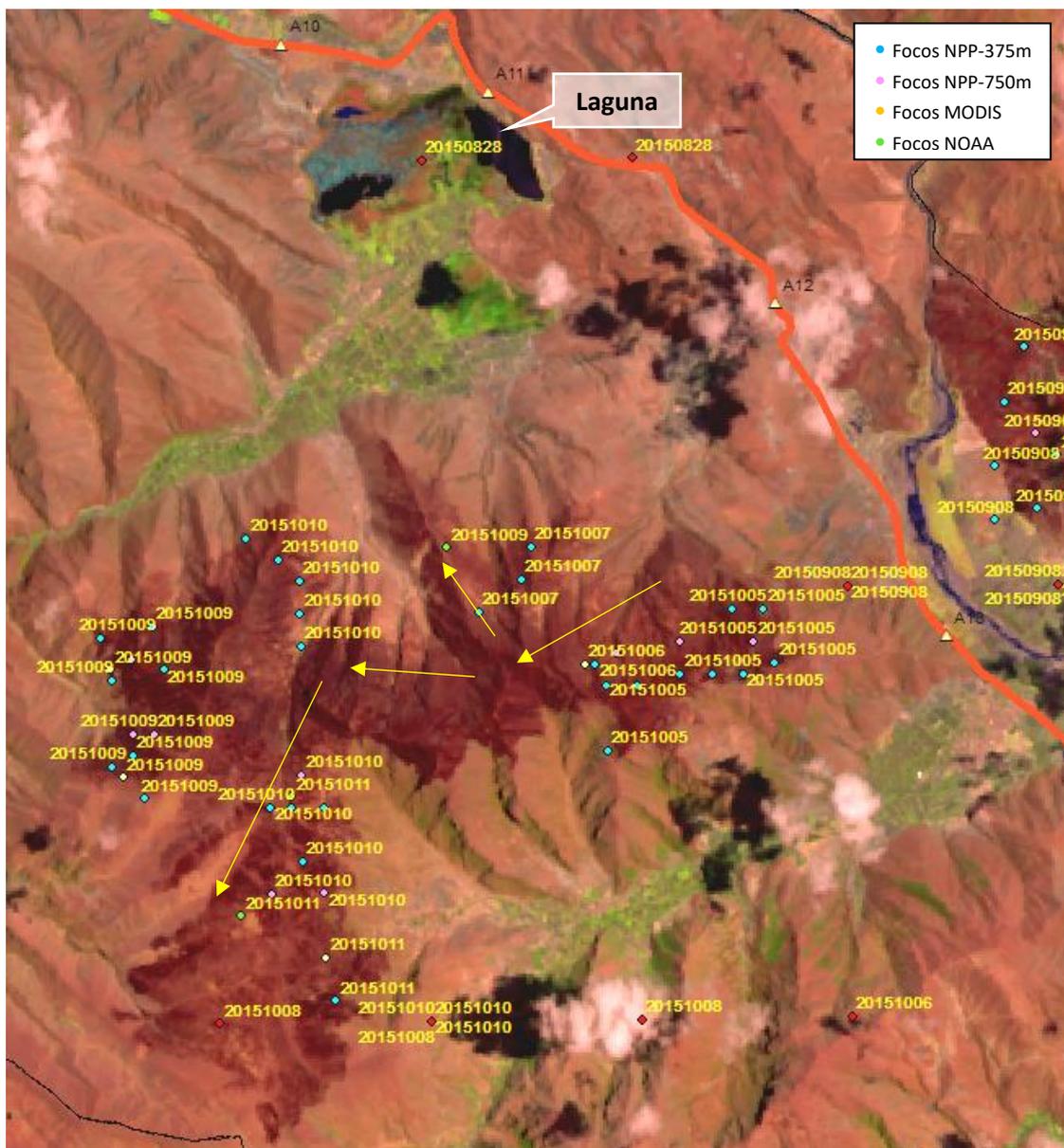


Figura 99: Escena Landsat 004/069 del 23 de octubre 2015 que muestra la cicatriz dejada por el incendio de la laguna Huacarpay. Se observa la dirección de avance del fuego según la fechas de los focos de calor (flechas amarillas)

Las Figuras 100 a 102 muestran evidencias de los registros (triángulos amarillos) en Selva, en zonas de concesiones de castaña en la ruta rumbo a la Concesión Forestal Otorongo. La Figura 100 muestra dos imágenes Landsat 002/068 de diferente fecha. La Figura 100a es del 2014, donde no se evidencian las cicatrices, y 100b es del 10 de noviembre de 2015, luego de los eventos. Los registros son de focos de calor MODIS (buffer amarillos), focos NPP-750m (buffer azul) y focos NPP-375m (buffer rojo), con fechas 08 y 29 de setiembre de 2015. La Figura 101 y 102 son fotografías tomadas en campo el día 23 de octubre.

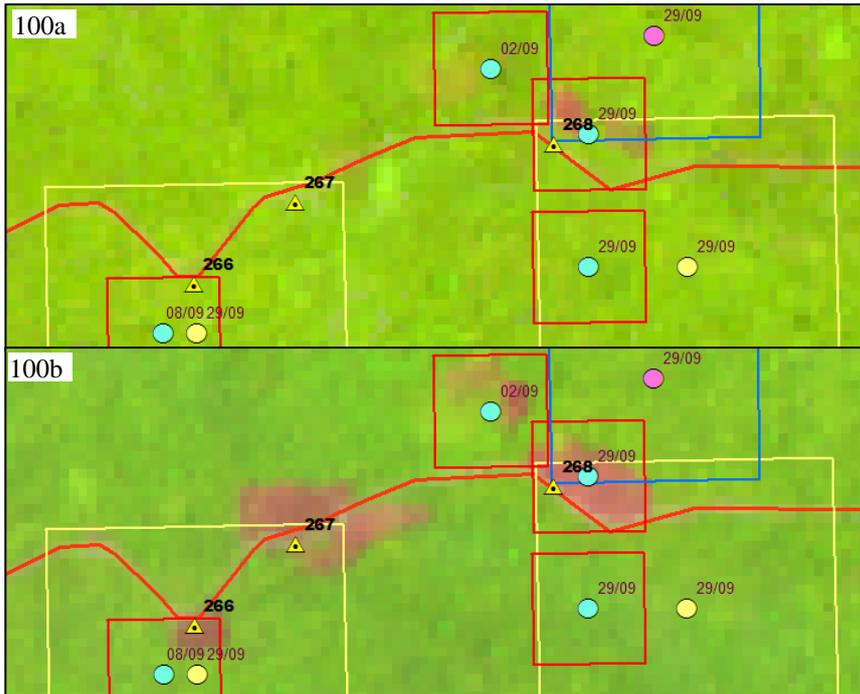


Figura 100: Escenas Landsat 002/068 que registran tres evento. La superior es del 2014, la segunda es del 10 de noviembre 2015.



Figura 101: Fotografía del evento 266, acontecido el 08/set/2015. Se evidencia vegetación ya crecida.



Figura 102: Fotografía del evento 267, acontecido el 29/set/2015. Se evidencia vegetación ya crecida.



Figura 103: Fotografía de evento 268, de fecha 29/set/2015. Se evidencia troncos aun quemándose.

4.4.ELABORACION DEL PROTOCOLO PARA REPORTAR ALERTAS TEMPRANAS BASADAS EN FOCOS DE CALOR

Este protocolo es la puesta en práctica de los resultados previos. Determina el procesamiento a seguir desde la descarga de los focos hasta que estén listos para el reporte, de manera que cualquier persona pueda replicar los pasos. El proceso enmascara las zonas de error frecuente y elimina la repetición de focos registrados por cuatro satélites: Aqua, Terra, NPP (750m) y NPP (375m) cuando estos se refieren a un mismo evento. El protocolo se realizó con miras de ser un proceso a realizarse diariamente y automáticamente de manera que se aproveche la alta temporalidad de los satélites utilizados para este tipo de datos. Esto debería implementarse como una plataforma virtual alertas diarias de incendios/quemas basadas en focos de calor a cargo a cargo de alguno de los dos Ministerios (Ambiente o Agricultura).

Paso 1: Descarga de los focos de calor

Los focos utilizados en los reportes provienen del Instituto de Investigación Espacial (INPE) de Brasil. Este portal de descarga brinda la facilidad de tener acceso a los satélites requeridos desde un solo lugar.

- Ingresar a la página web Monitoramento de Queimadas e Incendios del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE) de Brasil (<http://www.inpe.br/queimadas/>) y dar click en *SIG Queimadas* del panel izquierdo

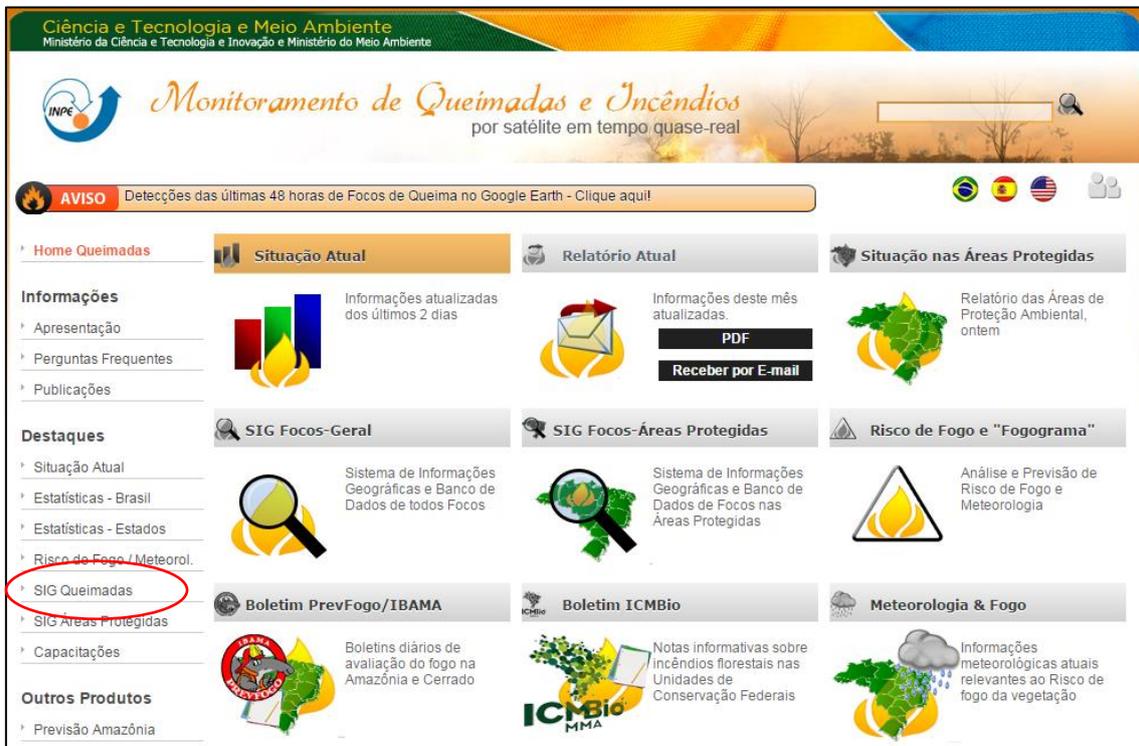


Figura 104: Página de inicio del “Monitoramento de Queimadas e Incendios por satélite em tempo quase-real” del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Brasil

- Seleccionar los parámetros: En el panel izquierdo están una serie de parámetros para elegir de cuándo y dónde realizar la descarga de focos de calor que se desea obtener. Por ejemplo, para obtener los focos de calor de todo el mes de diciembre de 2015 en Perú, se ingresarían los siguientes datos:

Data inicial: 2015-12-01 / **Data final:** 2015/12/31

País: Perú

Satélite: Aqua Manha, Aqua Tarde, Terra Manha, Terra Tarde, NPP-NASA, NPP-375m

Hacer click en **CONSULTAR**

En la parte inferior de la pantalla se debe elegir el tipo de archivo a exportar los focos. Elegir *.shp*. Luego saldrá una ventana para ingresar el correo electrónico requerido para la descarga. El archivo se descarga comprimido para lo cual se debe descomprimir.

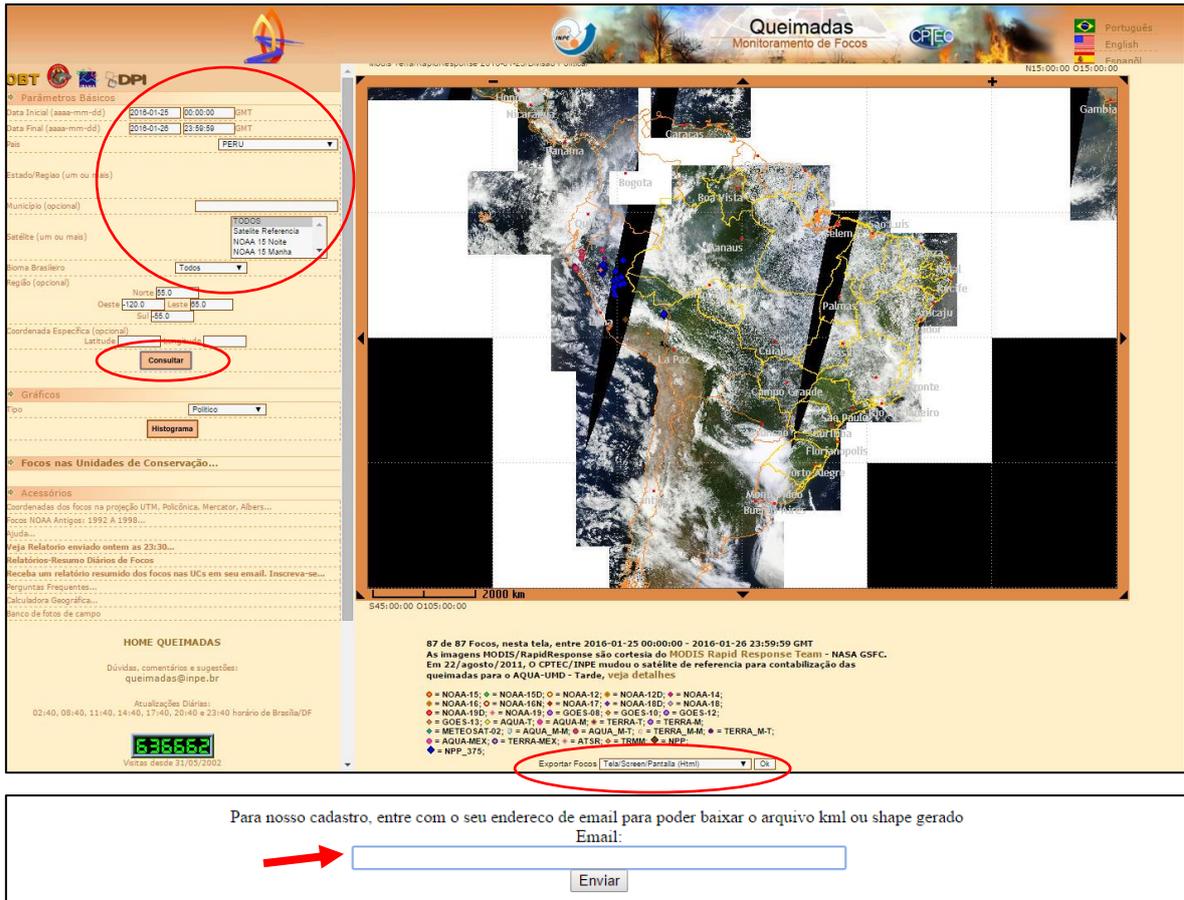


Figura 105: Página de descarga de los focos de calor de la Base de Datos de Queimadas -INPE

Paso 2: Proyección al sistema de coordenadas del país

Los focos descargados del INPE están en el sistema de coordenadas SIRGAS 2000 por lo que tienen que pasar al sistema de coordenadas del país: WGS84, proyección UTM 18S. En este paso y los siguientes se utilizó el programa ArcGis, pero se puede elegir cualquier otro software de sistemas de información geográfica.

De la caja de herramientas, seleccionar:

Data Management Tools – Projections and Transformations – Project

Cuando se abra el cuadro “Project” ingresar los siguientes parámetros:

Input Dataset or Feature Class: Agregar el *shapefile* de focos descargados

Input Coordinate System: Aparecerá SIRGAS 2000

Output Dataset or Feature Class: Poner la ruta donde se grabará los focos

Output Coordinate System: Poner WGS_1984_UTM_Zone_18S

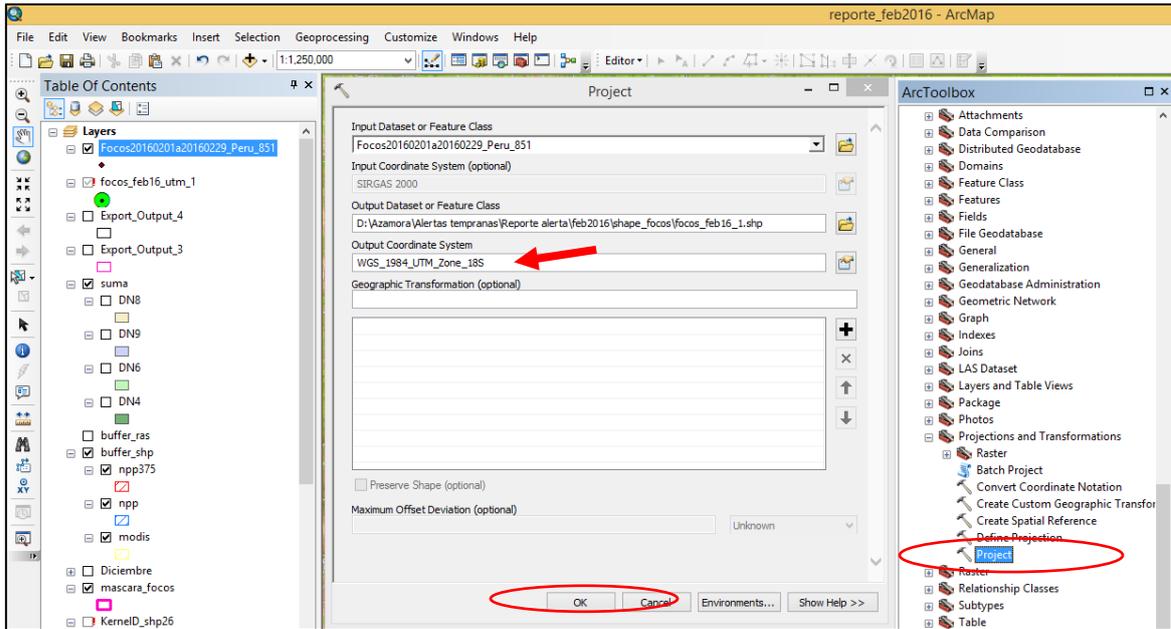


Figura 106: Proceso para proyectar los focos de calor descargados al sistema de coordenadas del país.

Paso 3: Agregar la información del país

Para los análisis futuros, se debe añadir información a cada foco según su ubicación. Esto se hará agregando información del país a la tabla de atributos de los focos de calor. Es decir, para cada foco se debe tener a qué distrito, provincia y región pertenece; si está en un área previamente deforestada, en sierra, costa o zona de bosque; y si pertenece a un área de interés particular como un área de conservación, una concesión, bosque de protección permanente, u otra que se considere de importancia para el usuario de la información.

- Para la intersección con límites políticos, de la caja de herramienta seleccionar:

Analysis Tools – Overlay – Intersect

Cuando se abra el cuadro de diálogo, ingresar los siguientes parámetros:

Input Features: Agregar la capa de focos reproyectados y la capa de Distritos

Output Feature Class: Poner la ruta donde se guardará el nuevo *shapefile*.

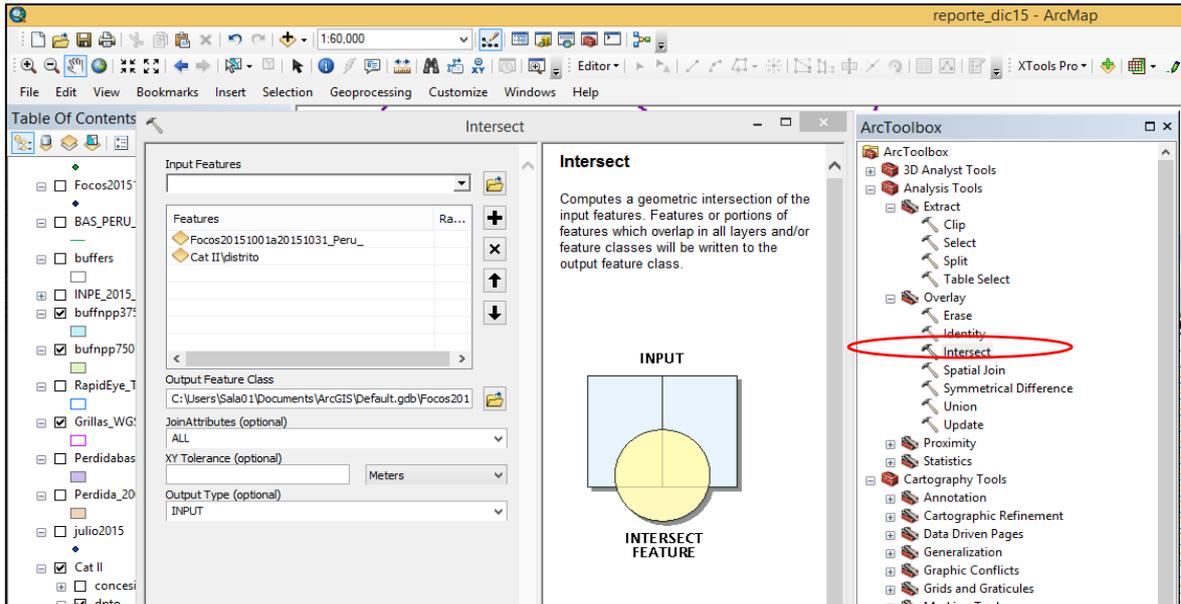


Figura 107: Herramienta para intersectar los focos de calor con los límites políticos deseados.

- Para la intersección con otras áreas, de la caja de herramienta seleccionar:

Analysis Tools – Overlay – Spatial Join.

Cuando se abra el cuadro de diálogo seleccionar los siguientes parámetros:

Input Features: Añadir la capa de focos de calor

Join Features: Añadir la capa con la que se desea cruzar información (áreas naturales protegidas, comunidades nativas, concesiones forestales, reservas territoriales, etc.)

Output Features: Añadir la ruta de salida del proceso

Mantener el click en “Keep all target features”

En Field Map se puede elegir los elementos que no desee conservar en la tabla.

Match Option: Mantener “intersect”

El resultado será el *shapefile* de focos de calor con nuevas columnas provenientes del *shapefile* con el que se hizo el “join”. Por ejemplo, se hizo “Spatial Join” entre el *shapefile* de focos y el *shapefile* de registro de Bosque/No Bosque del año 2014, como resultado se obtuvo una columna extra en la tabla de los focos de calor que tiene la información “cobertura” que indica si el foco está en el área no bosque / bosque / no monitoreado, etc. La Figura 109 muestra la tabla en mención.

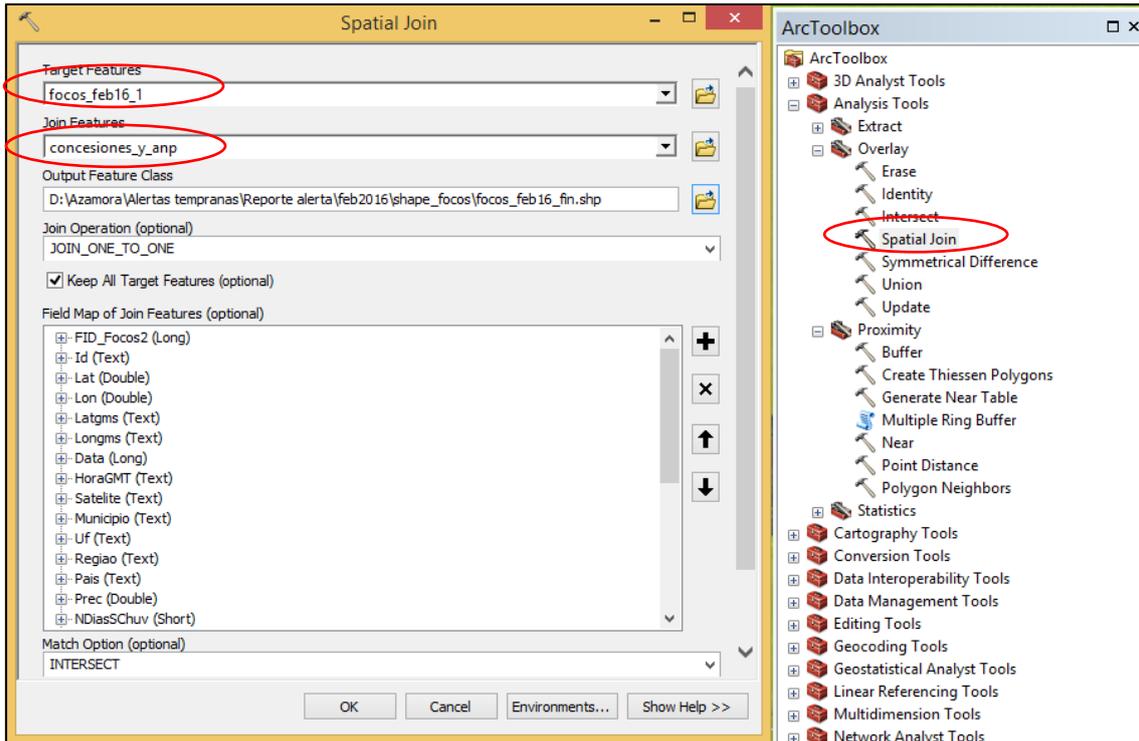


Figura 108: Herramienta para realizar el “Spatial Join” del shapefile de focos de calor con la información deseada.

Satelite	Pais	Prec	NDiasS	Risco	WRS_TM	IDDIST	NOMBDIST	NOMBPROV	NOMBDEP	sat_COD	Cobertura
NPP_375	Peru	112.5	0	0	2/68	170303	TAHUAMANU	TAHUAMANU	MADRE DE DIOS	1	BOSQUE AL 2014
NPP_375	Peru	112.5	0	0	2/68	170303	TAHUAMANU	TAHUAMANU	MADRE DE DIOS	1	NO BOSQUE 2000
NPP	Peru	12.5	1	777.7	2/73	230101	TACNA	TACNA	TACNA	2	NO MONITOREADO
AQUA_M-T	Peru	0	70	777.7	2/72	230109	SAMA	TACNA	TACNA	3	NO MONITOREADO
NPP	Peru	0	57	777.7	2/72	230301	LOCUMBA	JORGE BASADRE	TACNA	2	NO MONITOREADO
AQUA_M-T	Peru	0.4	8	777.7	3/72	180303	PACOCCHA	ILO	MOQUEGUA	3	NO MONITOREADO
NPP	Peru	67.1	0	0.2	2/70	211002	ANANEA	SAN ANTONIO DE PUTI	PUNO	2	NO MONITOREADO
NPP	Peru	67.1	2	0.6	2/70	211002	ANANEA	SAN ANTONIO DE PUTI	PUNO	2	NO MONITOREADO
NPP_375	Peru	4.1	14	777.7	7/70	110504	INDEPENDENCIA	PISCO	ICA	1	NO MONITOREADO
NPP_375	Peru	145	1	0	6/68	120699	MAZAMARI - PANGO	SATIPO	JUNIN	1	NO BOSQUE 2000
NPP_375	Peru	145	1	0	6/68	120699	MAZAMARI - PANGO	SATIPO	JUNIN	1	NO BOSQUE 2000
AQUA_M-T	Peru	150.7	1	0	6/68	120699	MAZAMARI - PANGO	SATIPO	JUNIN	3	BOSQUE AL 2014
NPP_375	Peru	150.7	1	0	6/68	120699	MAZAMARI - PANGO	SATIPO	JUNIN	1	NO BOSQUE 2000
NPP_375	Peru	154.8	2	0	6/68	120607	RIO NEGRO	SATIPO	JUNIN	1	NO BOSQUE 2000
NPP_375	Peru	154.8	2	0	6/68	120607	RIO NEGRO	SATIPO	JUNIN	1	BOSQUE AL 2014
NPP_375	Peru	183.8	2	0	6/68	120607	RIO NEGRO	SATIPO	JUNIN	1	NO BOSQUE 2000
NPP_375	Peru	183.8	2	0	6/68	120607	RIO NEGRO	SATIPO	JUNIN	1	BOSQUE AL 2014
TERRA_M-T	Peru	4.1	8	777.7	8/68	150806	HUAURA	HUAURA	LIMA	3	NO MONITOREADO
TERRA_M-T	Peru	4.1	8	777.7	8/68	150806	HUAURA	HUAURA	LIMA	3	NO MONITOREADO
TERRA_M-T	Peru	24.5	0	777.7	8/68	150806	HUAURA	HUAURA	LIMA	3	NO MONITOREADO
NPP_375	Peru	144.3	0	0	6/68	120303	PICHANAQUI	CHANCHAMAYO	JUNIN	1	NO BOSQUE 2000
TERRA_M-T	Peru	1	12	777.7	8/67	150203	PATVILCA	BARRANCA	LIMA	3	NO MONITOREADO
TERRA_M-T	Peru	6.3	2	777.7	8/67	021405	COCHAS	OCROS	ANCASH	3	NO MONITOREADO
NPP_375	Peru	180.4	0	0	7/67	190303	HUANACARAMBA	OXAPAMPA	PASCO	1	BOSQUE AL 2014

Figura 109: Tabla de focos de calor con datos agregados del shapefile Bosque/No Bosque 2014

Paso 4: Enmascaramiento de las zonas de error frecuente

En ese paso se busca disminuir los errores que puedan presentar los focos de calor con ayuda de la máscara preparada como se indicó en el punto 4.2. Para aplicar la máscara, la capa de focos de calor a enmascarar debe estar activada para su edición. En la Barra “Editor”, dar clic en *Start Editing*, tal como lo muestra la Figura 110. En el Cuadro “Start Editing”, seleccionar la capa a editar.

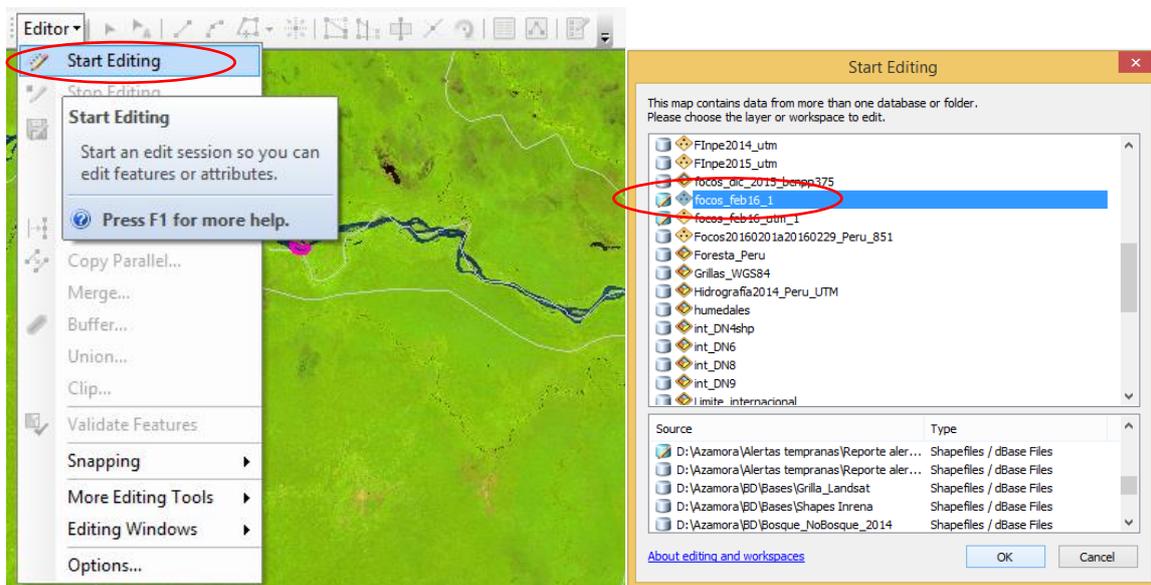


Figura 110: Proceso para habilitar la edición en la capa de focos de calor a enmascarar.

En Selection, ir a Select By Location.

Cuando se abra el cuadro “Select by Location” ingresar los siguientes parámetros:

Target layer: Seleccionar los focos de calor a trabajar

Source layer: Seleccionar el *shapefile* de la máscara de error

Spatial selection method for target layer feature: Poner “intersect the source layer feature”

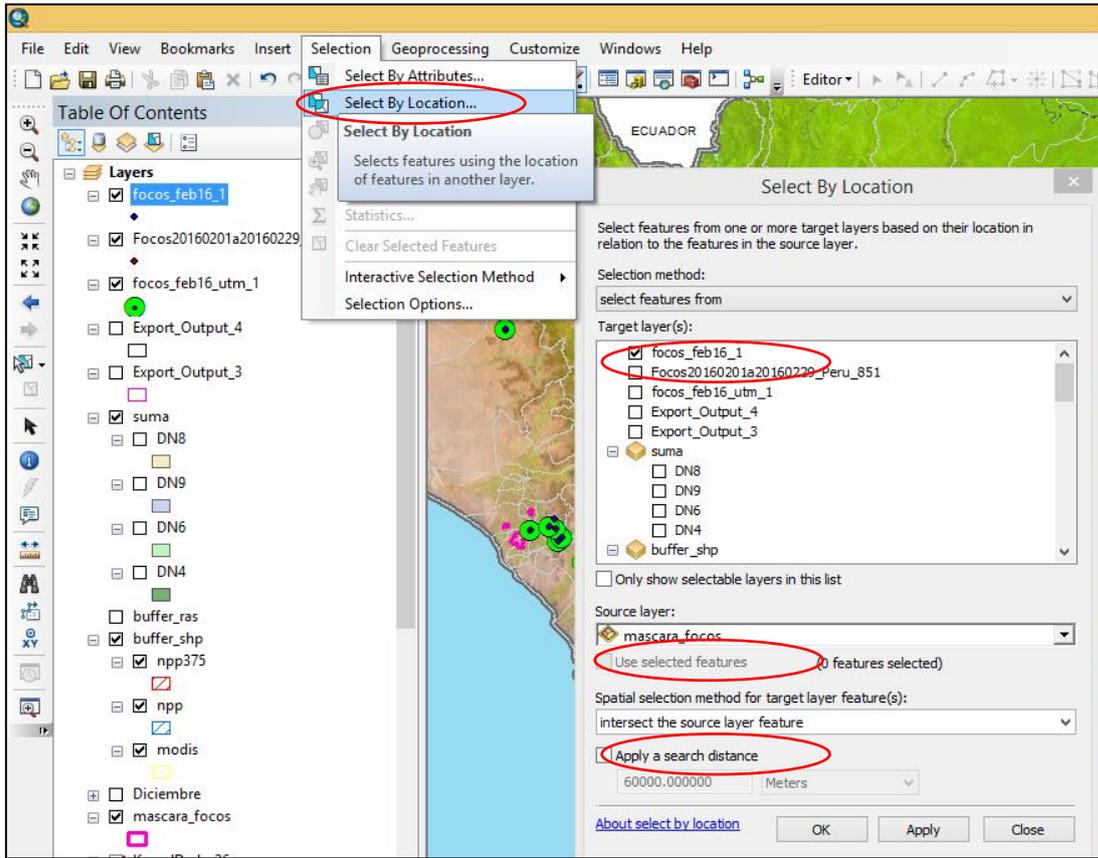


Figura 111: Proceso para aplicar la máscara de error a los focos de calor descargados

Los focos a eliminar del *shapefile* de focos de calor quedarán seleccionados. Abrir la tabla de atributos para proceder a eliminarlos.

FID	Shape #	FID_Focos2	Id	Lat	Lon	Latgms	Longi
0	Point	198	S180343070192620160224181216	-18.062	-70.324	S 18 03 43	O 70 19
1	Point	50	S175530070362520160207182415	-17.925	-70.607	S 17 55 30	O 70 36
2	Point	17	S174431070413120160204051248	-17.742	-70.692	S 17 44 31	O 70 41
17	Point	71	S172931071212120160214053459	-17.492	-71.356	S 17 29 31	O 71 21
18	Point	74	S172931071211820160214061806	-17.492	-71.355	S 17 29 31	O 71 21
19	Point	21	S172931071204520160204054036	-17.492	-71.346	S 17 29 31	O 71 20
20	Point	73	S172927071213920160214053459	-17.491	-71.361	S 17 29 27	O 71 21
21	Point	189	S172927071213920160223055716	-17.491	-71.361	S 17 29 27	O 71 21
22	Point	211	S172927071213220160228061222	-17.491	-71.359	S 17 29 27	O 71 21
23	Point	195	S172923071213220160223060609	-17.49	-71.359	S 17 29 23	O 71 21
24	Point	58	S172923071212120160212060450	-17.49	-71.356	S 17 29 23	O 71 21
25	Point	210	S172920071213920160228060339	-17.489	-71.361	S 17 29 20	O 71 21
26	Point	59	S172916071212820160212061240	-17.488	-71.358	S 17 29 16	O 71 21
27	Point	72	S172913071213620160214053459	-17.487	-71.36	S 17 29 13	O 71 21
28	Point	212	S172913071212820160228061222	-17.487	-71.358	S 17 29 13	O 71 21
29	Point	19	S172909071212820160204051248	-17.486	-71.358	S 17 29 09	O 71 21
30	Point	20	S172858071205920160204054036	-17.483	-71.35	S 17 28 58	O 71 20
31	Point	207	S172811071211820160227175936	-17.47	-71.355	S 17 28 11	O 71 21

Figura 112: Proceso para eliminar los focos de calor dentro de la máscara.

Paso 5: Eliminación de los focos de calor repetidos para un mismo evento

La información a reportar debe ser útil a las regiones, de manera que se alerte a las autoridades correspondientes de los eventos ocurridos a fin que estas puedan tomar las acciones correctivas necesarias. Se recomienda reportar eventos en vez de focos de calor para no dar cifras alarmantes, pero siempre teniendo como sustento a los focos de calor obtenidos en el paso 4 para mayores análisis que la región o el usuario de la información desee realizar.

Al utilizar varios sensores, de diferente horario de pasada y de diferente resolución, cabe la posibilidad, que un mismo incendio o quema haya sido registrado por más de un sensor. Por ello, para evitar reportar un mismo evento dos o más veces, se desarrolla un procedimiento para eliminar los focos de calor duplicados o sobrepuestos. La Figura 113 muestra un ejemplo de cómo funciona este proceso. En un inicio hay 13 focos de calor provenientes de los satélites de diferente resolución. Los cuadrados representan el tamaño de pixel de procedencia del foco de calor: MODIS (cuadrados verdes), NPP-750m (cuadrados amarillos) y NPP-375m (cuadrados azules). Luego del proceso, los focos de calor se reducen a 8. Se observa que donde hay sobreposición de los pixeles representativos, el proceso hace que se prioricen aquellos de mayor resolución, eliminando los otros.

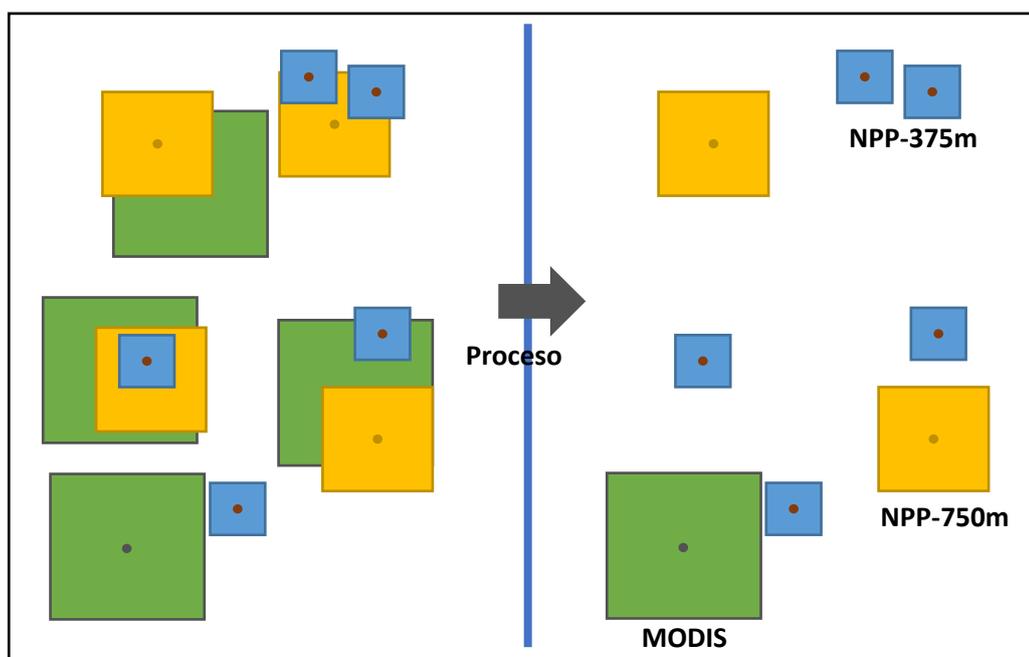


Figura 113: Secuencia que ejemplifica funciona la eliminación de focos de calor repetidos para un mismo evento.

Los focos de calor del NPP-375m tienen prioridad por tener mayor precisión en cuanto a la ubicación del evento, por lo que nunca se eliminarán. La segunda prioridad la tendrán los focos de calor del NPP-750m y por último los focos de calor MODIS. Es decir, cuando el *buffer* de un foco de calor del satélite NPP-375m se cruce con el *buffer* de un foco de calor NPP-750m, se entenderá que se refieren a un mismo evento, por lo que se mantendrá el foco de calor del NPP-375m y se eliminará el foco del NPP-750m. Igual pasará cuando exista intersección entre los *buffers* de los focos NPP-375m con los buffers de los focos Aqua/Terra, se priorizará los focos del primer satélite. Finalmente, cuando exista intersección entre los focos de NPP-750m y Aqua/Terra, se priorizará el foco NPP-750m.

- **Generación de *Buffer* según cada satélite:**

Para facilitar esta tarea, se empezará añadiendo a la tabla de atributos de la capa de focos de calor una columna más llamada “sat_COD”, donde escribiremos códigos para cada satélite basados en su tamaño de pixel:

NPP-375m: 1

NPP-750m: 2

AQUA/TERRA: 3

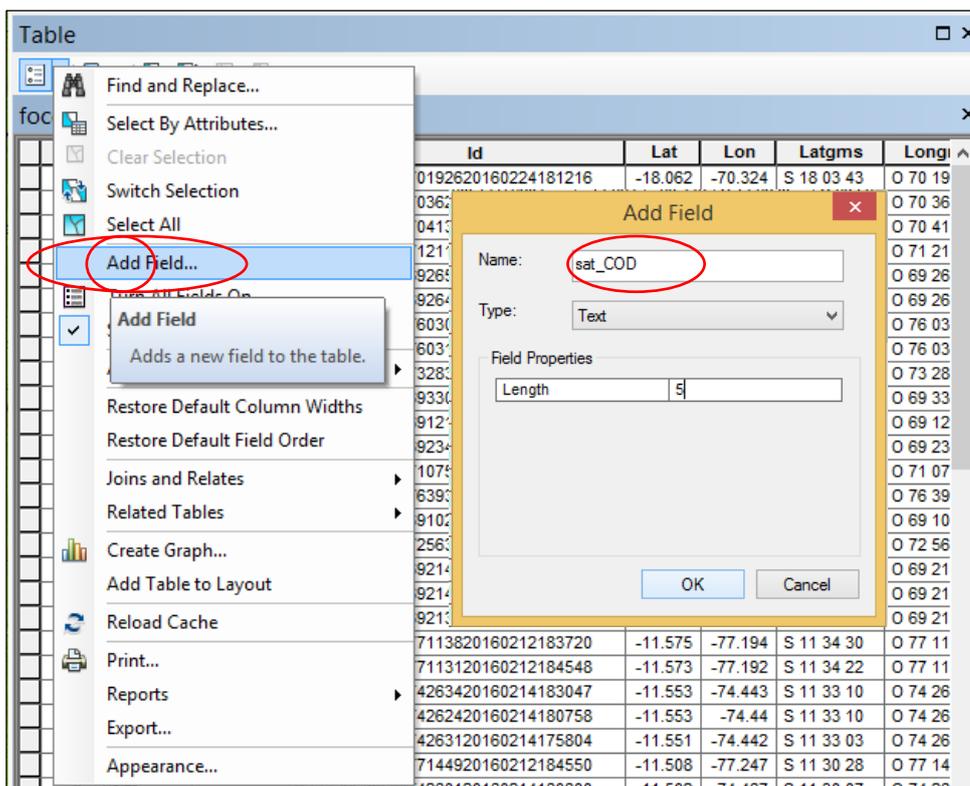


Figura 114: Proceso para añadir un nuevo campo de datos a una tabla

Se crearán tres *buffers*, cada uno representará los tres tamaños de pixeles con los que se trabajará. Así tendremos:

NPP-375: *Buffer* de 188m

NPP NASA: *Buffer* de 375m

TERRA/AQUA: *Buffer* de 500m

Abrir la tabla de atributo de la capa de focos. Seleccionar “Select By Attributes” tal como lo muestra la Fig. 11 y en el recuadro “SELECT*FROM ... WHERE” escribir:

“sat_COD”=’1’ cuando se vaya a elaborar el *buffer* de NPP-375

“sat_COD”=’2’ cuando se vaya a elaborar el *buffer* de NPP-NASA

“sat_COD”=’3’ cuando se vaya a elaborar el *buffer* de AQUA/TERRA

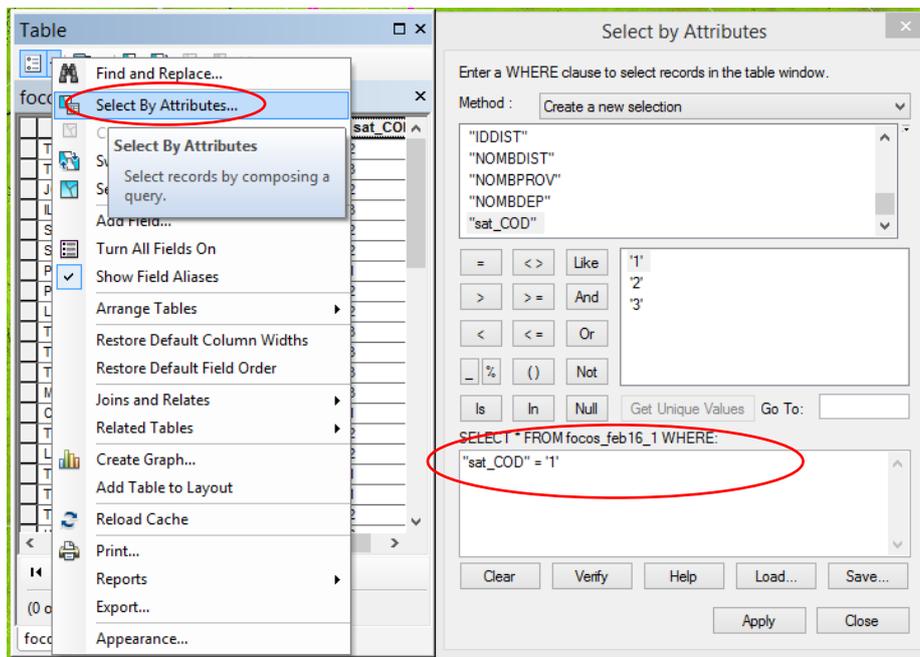


Figura 115: Proceso para seleccionar elementos deseados dentro de una tabla de atributos.

En la caja de herramientas seleccionar

Analysis Tools – Proximity – Buffer.

Cuando se abra el Cuadro “*Buffer*” seleccionar los siguientes parámetros:

Input Features: Añadir la capa de focos de calor

Output Features: Añadir la ruta de salida de cada *buffer*

Linear unit: 188/375/500 (según el satélite). Seleccionar *Meters* como unidad.

Se repite el proceso para cada uno de los tres tipos de satélite.

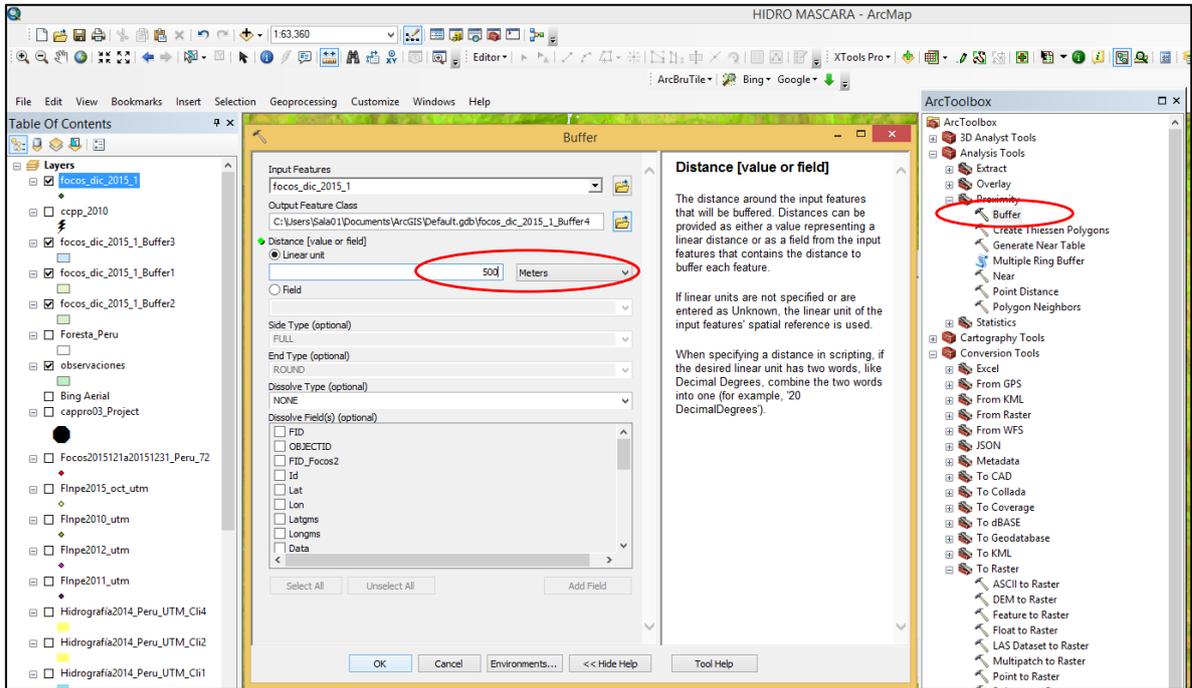


Figura 116: Proceso para la creación de buffers

El resultado obtenido son *buffers* redondos; sin embargo, al ser el pixel cuadrado es necesario convertir el *buffer* de redondo a una forma cuadrada, acorde al tamaño del pixel.

- **Conversión de *buffer* redondo a cuadrados:**

Se realiza aplicando el siguiente procesamiento a cada uno de los *buffers* generados en el punto anterior. En la caja de herramientas seleccionar:

Data Management Tools – Features – Feature Envelope To Polygon.

Cuando se abra el cuadro de diálogo, completar los parámetros:

Input Features: Ingresar cada uno de los *buffers*

Output Features: Establecer la ruta de salida para los nuevos *shapefiles* generados.

Llamarlos de la siguiente manera: buf1.shp / buf2.shp / buf3.shp. Los números corresponden al sat_COD de cada satélite.

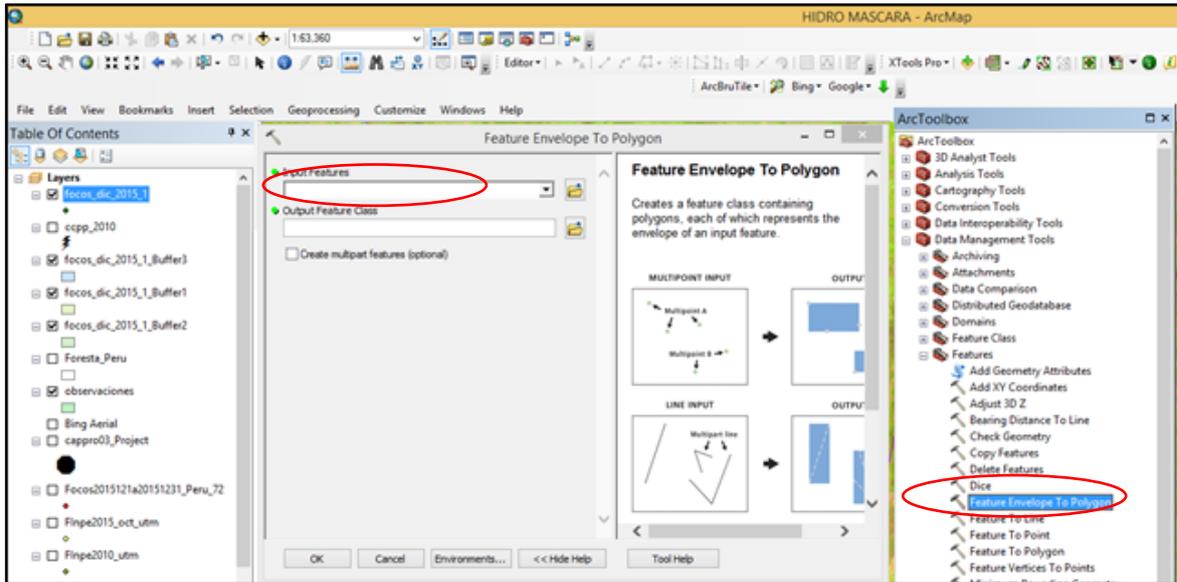


Figura 117: Proceso para convertir los buffers redondos en cuadrados.

- **Eliminación de focos de calor repetidos:**

Se trabajarán en tres etapas, en el siguiente orden:

- Intersección de los *buffers cuadrados* de los focos de calor NPP-375m y NPP-750m. Cuando hay intersección, se mantiene el foco del NPP 375m y se elimina el foco del NPP-750m.
- Intersección de los *buffers cuadrados* de los focos de calor NPP-375m y MODIS. Cuando hay intersección se mantiene el foco del NPP 375m y se elimina el foco MODIS.
- Intersección los *buffers cuadrados* de los focos de calor NPP-750m y MODIS. Cuando hay intersección se mantiene el foco del NPP-750m y se elimina el foco del MODIS.

Se describirá los pasos para la etapa (a), se debe repetir para el (b) y (c). Usar:

Selection – Select By Location.

Cuando se abra el cuadro, poner los siguientes parámetros.

Target layer: Adjuntar el buf2.shp

Source layer: Seleccionar el buf1.shp

Spatial selection method for target layer feature: Poner “intersect the source layer feature”.

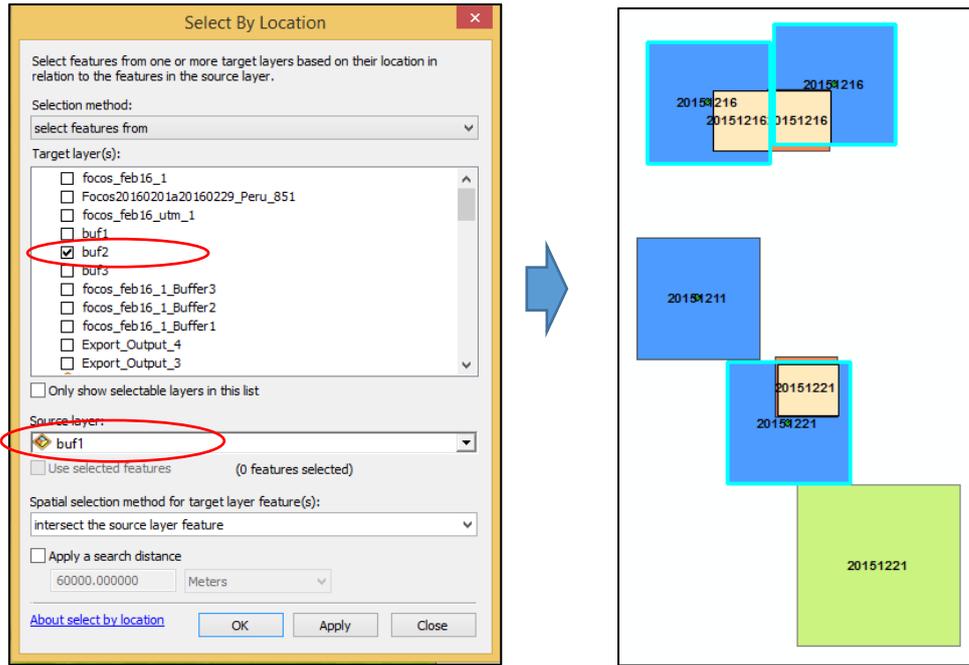


Figura 118: Proceso para seleccionar los buffers de los focos NPP-750m intersectados con NPP-375m

Se seleccionarán aquellos buffers del NPP-750m que tienen intersección con los buffers del NPP-375m. Exportar estos elementos seleccionados como “erases_a.shp”. Luego proceder a eliminar los elementos seleccionados del shapefile “buf2.shp”.

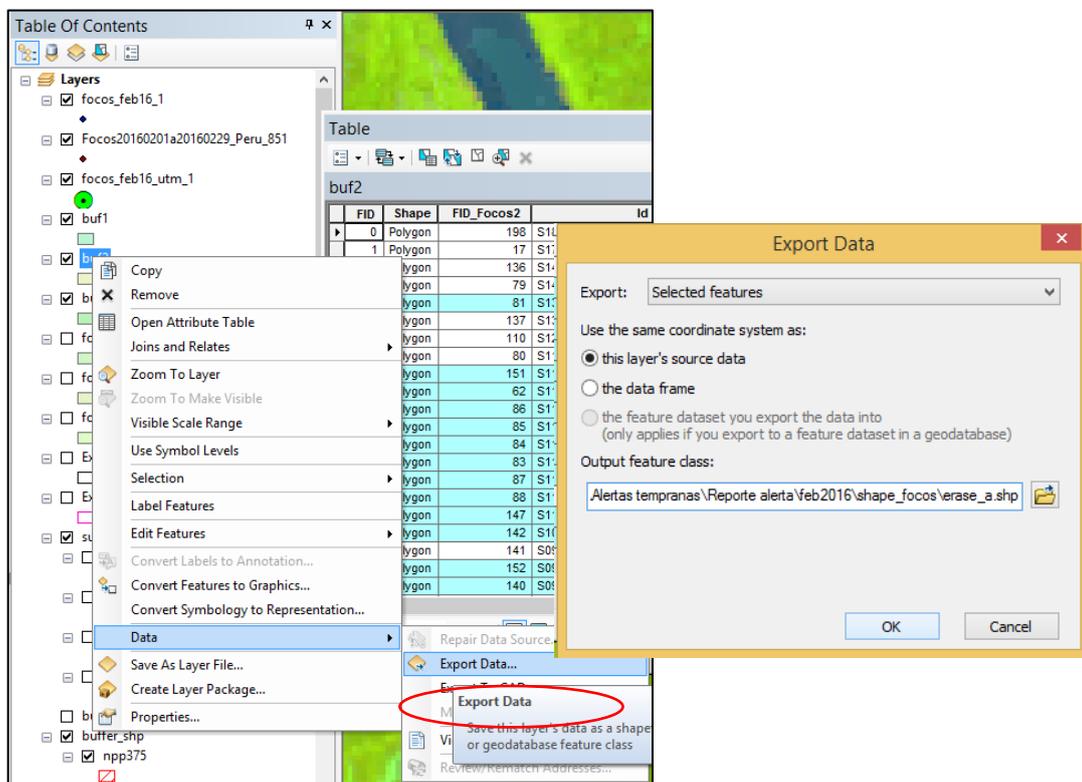


Figura 119: Proceso para exportar los elementos seleccionados a un nuevo shapefile.

Filtrar el *shapefile* de focos de calor de manera que solo aparezcan los focos del NPP-750m, tal como aparece en la Figura 120. Hacer click derecho sobre el *shapefile* focos e ir a: *Properties – Definition Query*

En el espacio para escribir ingresar “*sat_COD*”= ‘2’

Este *shapefile* también debe estar activado para ser editado (pues se eliminarán los focos).

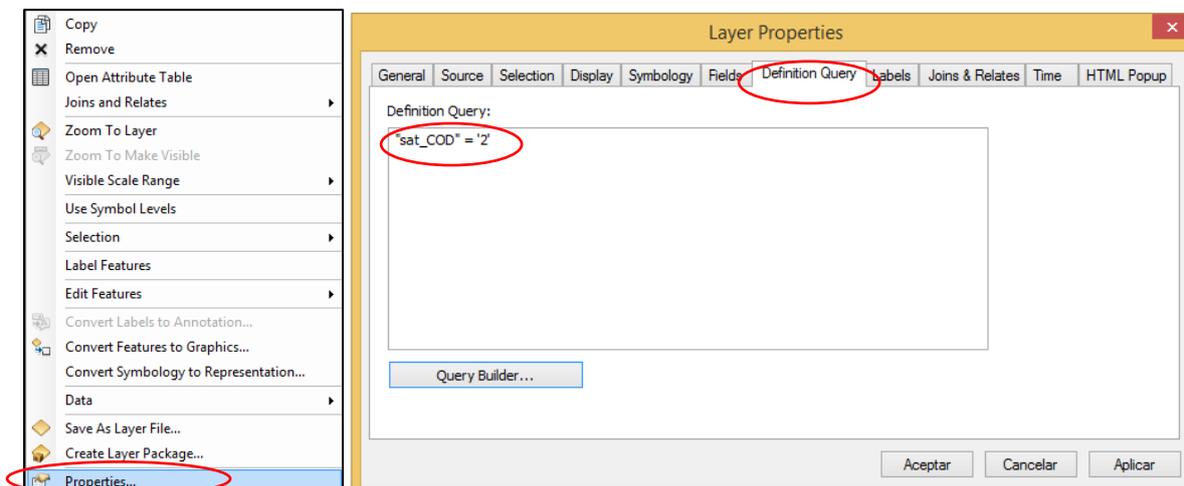


Figura 120: Proceso para mostrar solo los elementos con atributos definidos por el usuario de un *shapefile*.

Volver al *Select By Location*, esta vez para seleccionar solo los focos de calor NPP-750m que pertenecen a los *buffers* exportados anteriormente.

Target layer: Poner los *shapefiles* de focos de calor (previamente filtrados).

Source layer: Seleccionar el *erase_a.shp*

Spatial selection method for target layer feature: Poner “intersect the source layer feature”.

Se marcarán los focos de calor NPP-750m que se sobreponen con los del NPP-375m. Eliminar estos focos.

Hacer el mismo procedimiento para la sobreposición del *buffer* NPP-375m con el *buffer* de Terra/Aqua (punto b) y luego con el *buffer* del NPP-750m con el de Terra/Aqua (punto c). En ambos casos se busca eliminar los focos Terra/Aqua para lo cual se debe filtrar el *shapefile* de focos del mes (Figura 120) para que solo aparezcan los focos de calor de los satélites Terra/Aqua.

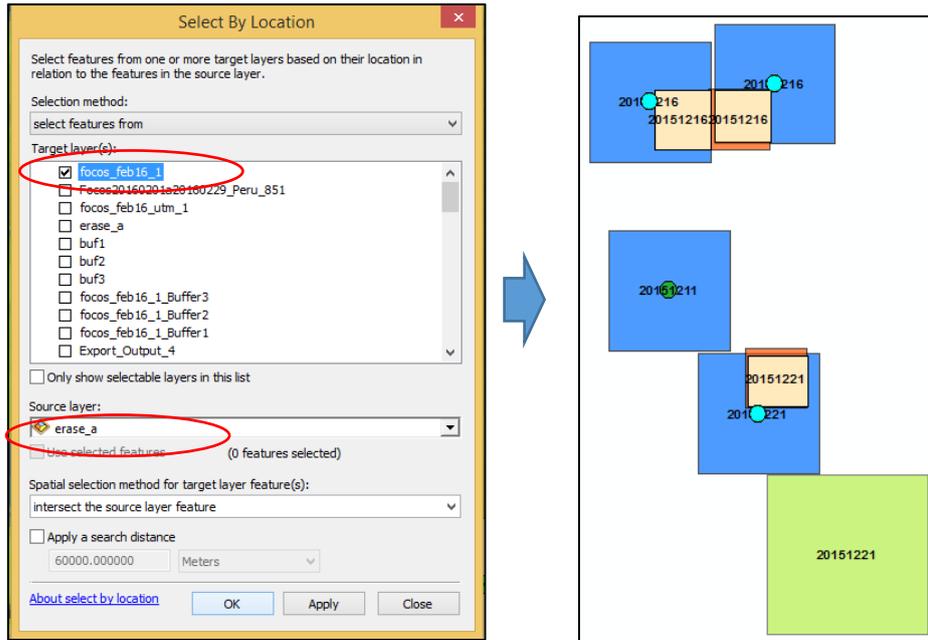


Figura 121: Proceso para seleccionar los focos del NPP-750m a eliminar

El proceso manual del paso 1 al 5 no debería tomar más de una hora en culminarse.

Paso 6: Análisis de la información

En el paso 4, los focos quedaron listo para su uso y con el paso 5 se consiguió reducir su número a eventos. Si se desea un mayor análisis de la información, se puede usar el archivo .dbf del *shapefile* que contiene la tabla de atributo trabajada. Este archivo puede abrirse en el software Microsoft Excel y luego exportarse a otro tipo de archivo si se desea.

La Sala de Observación Perú realiza unos reportes mensuales como resumen de los eventos registrados durante el mes. En ellos, se clasifican los eventos por distrito, provincia, región; por su ubicación en zonas fuera de la Amazonía o en esta; los que están en Amazonía, si se ubicaron en bosque o en zonas previamente deforestadas; y si están dentro de un área natural protegida o una concesión forestal. Los reportes también incluyen un mapa de concentración de los eventos durante el mes.

V. CONCLUSIONES

Los focos de calor son un instrumento de ayuda para el monitoreo de la deforestación pues en el país la principal causa de deforestación es la actividad agropecuaria y “la roza y quema” es una práctica común para convertir el bosque a estas nuevas áreas. En los estudios de validación realizados en gabinete y campo se comprobó que los focos de calor procesados adecuadamente, proporcionan información acertada ante la ocurrencia de eventos como quemas o incendios.

La metodología diseñada permite adecuar la información de los focos de calor de los satélites Aqua, Terra, NPP-750m y NPP-375m a las características del país: Reduce el error de comisión de los focos de calor al implementar la máscara de zonas de error frecuente en el país. Añade información a la tabla de atributo de los focos de calor para saber dónde ocurrió el evento de referencia (en qué ubicación política, si se trata de una nueva abertura en el bosque o está en una zona previamente deforestada, si involucra un área de interés particular como una concesión o área natural protegida u otros). Reduce la repetición de alertas al dar la alternativa de reportar por “eventos” y no solo focos de calor.

El objetivo del sistema de alerta temprana de deforestación basada en focos de calor es dar un aviso oportuno de un evento en curso de manera que se tomen las acciones pertinentes, por lo que usa cuatro satélites en simultáneo que dan información diaria teniendo así mayor posibilidad de detectar el evento. Esto es importante pues en el Perú existen zonas y temporadas de alta nubosidad que interfieren en la toma de información de los satélites ópticos. Además, esta metodología puede ser aplicada en cualquier región de la Amazonía peruana y por cualquier usuario con conocimientos básicos de sistemas de información geográfica

VI. RECOMENDACIONES

- Este trabajo se hizo con la visión de ser la base para implementar una plataforma virtual interactiva de las alertas tempranas de deforestación basadas en focos de calor para el país, donde estas alertas se den de manera automática, diaria o con desfase de solo horas de haber ocurrido el evento; y sea complementaria a otros sistemas de alertas tempranas de deforestación basadas en detecciones de cambios en la superficie pero con resolución temporal menor. Para ello, se recomienda que esta plataforma se implemente y esté a cargo de la autoridad competente en el tema.
- De implementarse esta plataforma, es necesario que se acompañe con una socialización al usuario potencial como son bomberos, brigadas de gestión de riesgos, instituciones relacionadas al tema, investigadores y autoridades regionales. Se deben realizar capacitaciones a las regiones o entidades que lo soliciten para que puedan utilizar los datos correctamente y realizar con ellos los análisis que requieran.
- Este estudio se centró en la Amazonía pero durante la salida de campo se evidenció que los incendios forestales son un tema de importancia en la Sierra del Perú, sin embargo no cuentan con apoyo ni en logística ni en un sistema de monitoreo. Se recomienda hacer estudios de validación en la zona de sierra del país, así también en la costa, de manera que este sistema este respaldado a nivel nacional.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arnaldos, J.; Navalón, X.; Pastor, E.; Planas, E.; Zarate, L. 2004. Manual de Ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. España, Mundi-Prensa, 414p.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, MX). s.f. Sistema de Alerta de Incendios [en línea]. Mexico. Consultado 27 marzo 2015. Disponible en <http://incendios1.conabio.gob.mx/>

CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales, AR). s.f. Información espacial para la gestión de emergencias [en línea]. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva. Buenos Aires, Argentina. Consultado 28 abril 2015. Disponible en http://www.conae.gob.ar/WEB_Emergencias/Links_de_la_Izquierda/Mapas_Humedad_y_Monitoreo_Focos_Calor/jgm2/jgm_n.html

CPTEC(a) (Centro de Previsao de tempo e estudos climáticos, BR). 2014. Curso Sobre el Uso de Datos de Monitoreo Satelital de Quemas y introducción a las Herramientas de Geoprocesamiento [diapositivas]. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Sao Paulo, Brasil.

CPTEC(b) (Centro de Previsao de tempo e estudos climáticos, BR). s.f. DSA- División de Satélite y Sistemas Ambientales [en línea]. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / Ministerio de Ciencia y Tecnología. Brasil. Consultado 18 junio 2015. Disponible en <http://satellite.cptec.inpe.br/home/novoSite/index.jsp#>

Cruz, M.; López, G.; Rainer; R. 2011. Sistema de alerta temprana para incendios forestales en México. Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio [en línea]. Mexico, INE - SERMANAT / UNAM / CIGA. Mexico. Disponible en http://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/aplicacionesMODIS.pdf

CSA-UPCH (Centro para la Sostenibilidad Ambiental de la Universidad Peruana Cayetano Heredia, PE). 2010. Quemas agropecuarias e Incendios Forestales: ¿Qué se pierde y qué se gana? [en línea]. Observatorio de Fuego. Lima, Perú. Consultado 14 mayo 2015. Disponible en <http://www.csa-upch.org/pdf/Boletin-Quemas.pdf>

Csiszar, I. 2012. Land Products from the Suomi NPP VIIRS Instrument [en línea]. NOAA/NESDIS/STAR. Estados Unidos. Consultado 17 mayo 2015. Disponible en http://lcluc.umd.edu/sites/default/files/lcluc_documents/25_Csiszar_land_102714_0.pdf

Csiszar, I. et al. s.f. VIIRS Active Fire [en línea]. JPSS - Joint Polar Satellite System. Estados Unidos. Consultado 14 mayo 2015. Disponible en <http://viirsfire.geog.umd.edu/>

EARTHDATA. 2016. VIIRS I - Band 375 Active Fire Data [en línea]. Estados Unidos. Consultado el 30 enero 2016. Disponible en <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/viirs-i-band-active-fire-data>

EOSDIS (Earth Observing System Data and Information System, EU). s.f. EARTHDATA: Frequently Asked Questions [en línea]. Aeronautics and Space Administration (NASA). Estados Unidos. Consultado el 10 abril 2015. Disponible en <https://earthdata.nasa.gov/faq#ed-firms-umd>

EOWEB (Earth Observation on the WEB, US). s.f. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [en línea]. Estados Unidos. Consultado el 17 abril 2015. Disponible en http://eoweb.dlr.de:8080/short_guide/D-MODIS.html

FIP (Programa de Inversión Forestal, PE). 2012. Componente III: Elementos para la identificación de áreas con mayor potencial para reducir emisiones de GEI en el sector forestal [Informe]. Ministerio del Ambiente, Ministerio de Agricultura, Ministerio de Economía y Finanzas, Consejo Inter.-Regional Amazónico. Lima, Perú.

Geoservice Peru SAC. 2014. Protocolo de Análisis y desarrollo para la implementación del servicio de alerta temprana de deforestación, basado en imágenes MODIS con indicadores de fuegos y detección de cambios NDVI. [Informe de consultoría]. Lima, Perú.

Giglio, L.; Descloitres, J.; Justice, C.; Kaufman, Y. 2003. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment* 87 (2-3): 273-282. Consultado en: 03 marzo 2015. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425703001846>.

Giglio, L. 2013. MODIS Collection 5 Active Fire Product User's Guide Version 2.5 [en línea]. Science Systems and Applications, Universidad de Maryland - Departamento de

Geografía. Estados Unidos. Consultado el 16 marzo 2015. Disponible en https://earthdata.nasa.gov/files/MODIS_Fire_Users_Guide_2.5.pdf.

Goldberg, M. 2012. Status of the SOUMI National Polar-orbiting Partnership (NPP) Satellite Instruments [en línea]. Joint Center for Satellite Data Assimilation (JCSDA), NOAA JPSS Program, NPP SDR and EDR Team. Consultado 20 mayo 2015. Disponible en <http://www.jcsda.noaa.gov/documents/seminardocs/2012/Goldberg20120215.pdf>

Google. 2016. Google Earth. Image © DigitalGlobe.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, BR). s.f. Preguntas frecuentes [en línea]. Brasil. Consultado 20 marzo 2015. Disponible en <http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas/faq.php>

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, BR). 2015. Monitoramento de Queimadas e Incêndios [en línea]. Consultado el 5 marzo 2015. Disponible en <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>

LANCE Sytem. s.f. NASA LANCE-FIRMS MODIS Active Fire Shapefiles. [Archivo README incluido en la descarga de los shapefile]. NASA/GSFC Earth Science Data Information System (ESDIS). Estados Unidos. Descarga de shapefiles: 31 mayo 2015.

Manta, M.; León, H. 2004. Los incendios forestales en el Perú: Grave Problema por resolver. **In** Tercer Simposium de Control de Incendios Forestales [en línea]. Curitiba, Brasil. Consultado 13 marzo 2015. Disponible en http://cedinfor.lamolina.edu.pe/Separatas%20FCF/Proteccion%20Forestal/3SimposioBrasil-Per_.PDF.

MINAM (Ministerio del Ambiente, PE). 2015. Tamaño de la pérdida de bosque [Reporte]. Programa Nacional de Conservación de Bosques. Perú.

Morelli, F. 2014. Curso Sobre el Uso de Datos de Monitoreo Satelital de Quemadas. [curso]. CPTec / INPE. Belem do Pará, Brasil.

NASA(a) (National Aeronautics and Space Administration, US). s.f. Fire Information for Resource Management System [en línea]. Estados Unidos. Consultado 5 marzo 2015. Disponible en <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>

_____ (b). s.f. MODIS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: Data [en línea]. Estados Unidos. Consultado 4 marzo 2015. Disponible en <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/>

_____ (c). s.f. MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: Specifications [en línea]. Estados Unidos. Consultado 4 marzo 2015. Disponible en <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>

_____ (d). s.f. Aqua Project Science [en línea]. Estados Unidos. Consultado 16 marzo 2015. Disponible en http://web.archive.org/web/20141017071125/http://aqua.nasa.gov/about/instrument_modis.php

_____ (e). s.f. Suomi NPP VIIRS Land - Visible Infrared Imagin Radiometer Suite [en línea]. Estados Unidos. Consultado 22 junio 2015. Disponible en <http://viirsland.gsfc.nasa.gov/index.html>

_____ (f). s.f. Polar-Orbiting Missions [en línea]. Estados Unidos. Consultado 22 junio 2015. Disponible en <http://npp.gsfc.nasa.gov/viirs.html>

_____ (g). s.f. NASA LANCE-FIRMS MODIS Active Fire Shapefiles [Archivo README incluido en la descarga de los shapefile] Descarga de shapefile: 31 mayo 2015

NGDC (National Geophysical Data Center, US). s.f. Advanced Very Hight Resolution Radiometer (AVHRR) [en línea]. National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA. Estados Unidos. Consultado 19 mayo 2015. Disponible en https://www.ngdc.noaa.gov/ecosys/cdroms/AVHRR97_d1/avhrr.htm

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, US). s.f. Geoestationary Operational Environmental Satellite (GOES) [en línea]. Estados Unidos. Consultado 8 mayo 2015. Disponible en. https://www.nsof.class.noaa.gov/data_available/goes/index.htm

Olmo, M.; Nave, C. 2012. HyperPhysics: Ley de desplazamiento de Wien [en línea]. Georgia State University. Estados Unidos. Consultado 10 abril 2015. Disponible en <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/wien.html>

OTCA (Organización del Tratado de Cooperación Amazónica, BR). 2015. Seminario Regional sobre incendios forestales para países miembros de la Otca. Cuzco, Perú.

Pinilla Ruiz, C. s.f. Leyes de la radiación - lección 2 [en línea]. Universidad de Jaen, España. Consultado 10 noviembre 2015. Disponible en <http://www.ujaen.es/huesped/pidoceps/tel/archivos/2b.pdf>

PNCB-MINAM/SERFOR-MINAGRI/SdO-Perú (Programa Nacional de Conservación de Bosques - Ministerio del Ambiente / Servicio Nacional Forestal - Ministerio de Agricultura y Riego / Sala de Observación Perú de la Organización de Tratado de Cooperación Amazónica). 2015. Shapefile de Bosque / No Bosque del 2000-2014. Lima, Perú.

RAMMB (Regional and Mesoscale Meteorology Branch, US). s.f. VIIRS bands and bandwidths [en línea]. Colorado State University. Estados Unidos. Consultado 8 mayo 2015. Disponible en http://rammb.cira.colostate.edu/projects/npp/VIIRS_bands_and_bandwidths.pdf

Schroeder; Csiszar; Giglio; Justice; Ellicott; Wind. s.f. VIIRS Fire Product Status [en línea]. NOAA/NESDIS, Universidad de Maryland. Estados Unidos. Consultado 13 mayo 2015. Disponible en <http://www.arb.ca.gov/smp/progdev/iasc/2013prezo/viirs.pdf>

Schroeder, W. 2015. 375m Active Fire Detection Algorithm User's Guide [en línea]. Suomi National Polar-orbiting Partnership Visible Infrared Imaging Radiometer Suite S-NPP/VIIRS. Department of Geographical Sciences - University of Maryland, NASA, NOAA. Consultado 05 enero 2016. Disponible en https://earthdata.nasa.gov/files/VIIRS_375m_Users_guide_Dec15_v2.pdf

SERFOR/SERNANP (Servicio Nacional Forestal del Ministerio de Agricultura y Riego / Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas de Ministerio del Ambiente, PE). s.f. Shapefiles varios. Lima, Perú.

SIB/APN (Sistema de información de Biodiversidad/Administración de Parques Nacionales, AR). s.f. Nueva herramienta para la detección de focos de calor [en línea]. Consultado el 20 diciembre 2015. Disponible en <http://www.sib.gov.ar/noticia/nueva-herramienta-para-la-deteccion-de-focos-de-calor>

Tappan, G.; Miller, E. 1982. Area estimation of environmental phenomena from NOAA-n Satellite data [en línea]. NASA Technical Reports Server (NTRS). National Aeronautics and Space Administration. Estados Unidos. Consultado 05 mayo 2015. Disponible en <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19820016677>.

The Comet Program. s.f. GOES-R: beneficios de la observación ambiental de próxima generación [en línea]. University Corporation for Atmospheric Research. Estados Unidos. Consultado 9 mayo 2015. Disponible en http://www.goes-r.gov/users/comet/goes_r/envmon_es/print.htm#page_5.4.0 (último acceso: 2015 de mayo de 9).

UNAD, Universidad Nacional Abierta y a Distancia. s.f. 401588 - Física Cuantica [en línea]. Colombia. Consultado 18 junio 2015. Disponible en http://datateca.unad.edu.co/contenidos/401588/ACT_2016_16-01_/modulo/leccin_4_ley_del_desplazamiento_de_wien.html.

Universidad de Maryland. 2014. Mosaico libre de nubes del Perú con imagenes Landsat. Department of Geography Maryland University. Estados Unidos.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Tabla con la cantidad de focos de calor por satélite por año, del 2000 al 2014.

Satélite	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Total general
AQUA_M-M			14	17	17	111	48	28	19	25	92	35	94	35	71	606
AQUA_M-T			4255	9544	5252	10997	5713	7828	5938	7743	10138	7430	11602	7731	8416	102587
AQUA-M				2	2	7	2				5		3			21
AQUA-T			1205	1925	1305	966	437	582	476	1041	1321	807	1291	704		12060
ATSR	163	9	18	21	20	97	46	15	26		90	22	4			531
GOES-08			861	3026												3887
GOES-10		1						1711	1323	1088						4123
GOES-12				524	618	1798	4428	446		130	3027	2499	5323	1258		20051
GOES-13												6	286	2049	2764	5105
NOAA-12	2748	371	425	919	445	1754	653	176								7491
NOAA-12D						18	6	2								26

NOAA-14						22	23	1								46
NOAA-15						154	164	334	615	184	43	25	79	8		1606
NOAA-15D						12	8	6	29	9	11	10	10	4	2	101
NOAA-16				1826	1082	185			9	24	41		29	74	17	3287
NOAA-16N					1	1				3	23	10	132	13	2	185
NOAA-17						30	48	30	48	21	58					235
NOAA-18						11	8	18	32	12	25	22	76	150	309	663
NOAA-18D						7	5	2	1	11	4	3	1	6	29	69
NOAA-19											5		9	36	51	101
NOAA-19D											11	1	6	11	25	54
NPP														1479	10891	12370
TERRA_M-M	203	40	28	66	34	278	117	91	61	94	327	115	294	182	225	2155
TERRA_M-T	1132	1661	1135	1794	927	2568	1258	1259	859	1902	2740	1978	3157	1914	2115	26399

TERRA-M				7	2	2	1	1		11	13	8	8	1		54
TERRA-T			594	191	120		54	34	92	141	199	135	145	23		1728
TRMM								430	536	192	342	25	527	487	237	2776
Total general	4246	2082	8535	1986	9825	19018	1301	1299	1006	1263	18515	1313	23076	1616	25154	208317
				2			9	4	4	1		1		5		