

**Universidad Nacional de Salta
Facultad de Ciencias Naturales
Escuela de Recursos Naturales**

TESINA

**CARACTERIZACIÓN
ESPACIAL Y TEMPORAL
DE LA SITUACIÓN DE INCENDIOS
EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY
A PARTIR DE FOCOS
DE CALOR MODIS
(2003-2013)**

Roberto Leonidas Lizárraga

2015

Universidad Nacional de Salta
Facultad de Ciencias Naturales
Escuela de Recursos Naturales

**CARACTERIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA
SITUACIÓN DE INCENDIOS EN LAS PROVINCIAS DE
SALTA Y JUJUY A PARTIR DE FOCOS DE CALOR
MODIS (2003-2013)**

Tesina de grado para obtener el título de Ingeniero en
Recursos Naturales y Medio Ambiente dirigida por el Lic.
Virgilio Nuñez

COMITÉ EVALUADOR
Ingeniera Jesús Mosciaro
Ingeniera Virginia Del Val
Ingeniero Javier Tolaba

2015

Momento que te he hecho esperar...

El mismo no habría podido ser posible y por ello quiero agradecer desde lo más profundo de mí:

A MIS PADRES Y HERMANAS, QUIENES SIEMPRE HAN APOYADO Y ESTIMULADO PARA QUE MI VIDA SEA LO QUE HOY ES:

- A mi Papá especialmente, a quien no pude darle la satisfacción de verme profesional en vida ... pero sé que desde el cielo se siente orgulloso.
- A mi Mamá, quien tantas veces me ha preguntado cuando? Mami, el momento ha llegado ...
- A mis hermanas, quienes saben que las quiero.

A MIS Cs., MIS TRES AMORES Y RAZONES DE VIVIR:

- A mi Caro, compañera de vida y lo más hermoso, sincero, paciente y dulce que he conocido en la Universidad y la vida. Por fin no?
- A mi Cami, mi princesa monita que no para de hablarme; pero me enternece con cada una de sus palabras y ocurrencias.
- A mi Coral, mi princesa cachita, que con su mirada y gestos me hace sentir aún mas enamorado de las tres.

A TODOS LOS AMIGOS DE LA UNIVERSIDAD, CON QUIENES HE COMPARTIDO Y COMPARTIRÉ DIFERENTES MOMENTOS DE LA VIDA:

A Talo y Tavo con quienes nos lanzamos a esta aventura universitaria. Al Pelao Filomarino, Pablo Perello, Mauricio Ibarra, Gustavo González, Angelito, Ezequiel, Butterfly, Nacho, Logan, Julito Pedraza, Miguel González, Miguel Alegre, y demás: primeros compañeros de la universidad con quienes compartí contadas andanzas. A Cayito, El Diablo, Claudio Cabral, Diego Vinante, capos amigos y compinches de estudio y otras cosas. A mis grandes compañeros de campo: Claudio Cruz, Julio Cabral y Hugo Orce, con quienes compartí grandes aventuras en el campo y en la ciudad. A Walter Martin, Guillermo Murillo, Carlos Camacho, Seba Montaldi, Mauro Campos, Patricia Piccardo, Cristian Campos, Adrian Avendaño, Edu Acuña, Joel Medina, y demás muchachos. En especial a los profes: Virgilio Nuñez, Silvia Surhing, Pablo Ortega, Juanjo Sauad, Adriana Ortín, el Viejo Garrido, y a todos los que me han enseñado esta profesión.

A TODOS LOS AMIGOS DEL TRABAJO, QUIENES ME HAN ENSEÑADO MUCHAS COSAS, ENTRE ELLAS A SER UN BUEN PROFESIONAL.

A Silvia Chalukian, quien fue mi primera jefa y a quien le debo mucho por los momentos compartidos. A La Sole y a La María, con quienes hemos recorrido El Rey y tantos otros lugares. Al Flaco Gimenez, Mingo, Mariana Saravia, Guillermo Lier, José Luis Colodro, Patricia Lopez Saenz, Rosina Soler, Gabriela Lepera, Débora Delgado y todos los chicos que fueron al Rey. A los capos máximos Pablo Perovic, Nicolas Maioli, Julio Monguillot, Flavio Moschione, Anita Laura Sureda, grandes compañeros de oficina y amigos de la vida. A Carlos Trucco, Natalia Polit, Luis Rivera, Mariana Alrichter, José Volante, grandes profesionales. Al equipo del SIB-APN, demás compañeros de oficina, los chicos del INTA, los chicos de ambiente de Salta, y demás personas con quienes compartí trabajos durante todos estos años. A Alejandra Pérez y Lautaro Vázquez por su colaboración.

A MI DIRECTOR VIRGILIO NUÑEZ Y MIS JURADOS, VIRGINIA DEL VAL, JESUS MOSCIARO Y JAVIER TOLABA, POR LAS SUGERENCIAS Y RAPIDEZ PARA EVALUAR ESTA TESINA.A TODOS GRACIAS...

A LA UNSA, POR BRINDAR UNA EDUCACION PUBLICA E IRRESTRICTA ETERNA

A LA APN POR BRINDARME TANTAS OPORTUNIDADES Y PLANTARME TANTOS DESAFIOS

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	MARCO TEÓRICO	3
2.1	FUEGO E INCENDIOS: conceptos generales	3
2.2	LA TELEDETECCION Y LOS INCENDIOS: aportes desde el espacio	5
2.2.1	Focos de calor	5
2.2.1.1	Usos de los focos de calor	6
2.2.1.1.1	Alerta temprana	6
2.2.1.1.2	Seguimiento de incendios y reconstrucciones	6
2.2.1.1.3	Caracterización de situaciones de fuego a diferentes escalas	7
2.2.1.2	Confiabilidad de los focos de calor	8
2.2.2	Cartografía de áreas quemadas	9
2.2.2.1	Comportamiento espectral de áreas quemadas	9
2.2.2.2	Transformaciones: índices espectrales	12
2.2.2.2.1	Índices de vegetación	12
2.2.2.2.2	Índices espectrales específicos para identificar áreas quemadas	13
2.2.2.2.3	Otras transformaciones	16
2.2.2.3	Métodos de análisis para la detección de áreas quemadas	16
2.2.2.3.1	Técnicas multitemporales: análisis de detección de cambios	16
2.2.2.3.2	Técnicas unitemporales: análisis de una sola escena	16
2.2.2.3.3	Técnicas analógicas: Interpretación visual de imágenes satelitales	16
2.2.2.3.4	Técnicas de análisis digital automatizado	18
2.2.2.3.5	Técnicas mixtas.	19
2.2.3	Landsat 8	19
3	OBJETIVOS ESPECIFICOS	22
4	AREA DE ESTUDIO	23
4.1	Descripción Área de estudio 1	23
4.2	Descripción Área de estudio 2	24
5	MATERIALES Y METODOLOGÍA	26
5.1	Procesamiento de Focos de Calor MODIS	26
5.1.1	Selección de focos de calor para Salta y Jujuy e incorporación de atributos geográficos, temporales y de confiabilidad	26

5.1.2	Variables de caracterización	26
5.1.3	Confección de base de datos tipo ACCESS y de estadísticas por provincia, departamento y variables de caracterización	33
5.1.4	Cálculo de estadísticas por unidades cuadradas de 2 por 2 kilómetros	33
5.1.5	Identificación de áreas recurrentes en cuanto a registros de focos de calor	34
5.1.6	Interpretación visual de la distribución de focos de calor.	34
5.2	Evaluación de la confiabilidad de los focos de calor MODIS	34
5.2.1	Generación de capas geográficas de áreas quemadas	34
5.2.1.1	Selección y pre-procesamiento de imágenes satelitales	34
5.2.1.2	Procesamiento de imágenes satelitales	35
5.2.2	Caracterización de las áreas quemadas.	35
5.2.3	Evaluación de confiabilidad de los focos de calor MODIS	35
5.3	Comparación entre los focos de calor y estadísticas oficiales	36
6	RESULTADOS	36
6.1	Focos de calor en Salta y Jujuy	36
6.1.1	Estadísticas provinciales	36
6.1.2	Estadísticas departamentales	38
6.1.3	Análisis temporal de focos de calor	46
6.1.4	Distribución espacial de las celdas con focos de calor	53
6.1.4.1	Relación cantidad de focos y número de celdas por año	55
6.1.4.2	Celdas clasificadas según su último año de registro de focos de calor	55
6.1.4.3	Celdas clasificadas según la cantidad de focos de calor, años y focos promedio por año	57
6.1.4.4	Áreas recurrentes en cuanto a registros de focos de calor	61
6.1.5	Interpretación visual de la distribución de focos de calor	64
6.1.6	Variables de caracterización.	64
6.1.6.1	Focos de calor y coberturas del suelo	64
6.1.6.2	Focos de calor y porcentajes de suelo desnudo, vegetación herbácea y leñosa	67
6.1.6.3	Focos de calor y variables topográficas	68
6.1.6.4	Focos de calor y variables climáticas	69
6.2	Áreas quemadas y validación de focos de calor	70
6.2.1	Primer periodo: Julio-Setiembre de 2013	70
6.2.1.1	Caracterización de las áreas quemadas por superficie, cobertura del suelo y división política	70

6.2.1.2	Evaluación de confiabilidad de focos de calor para el periodo Julio-Setiembre	73
6.2.2	Segundo periodo: Setiembre –Noviembre de 2013	74
6.2.2.1	Caracterización de las áreas quemadas por superficie, cobertura del suelo y división política	74
6.2.2.2	Evaluación de confiabilidad de focos de calor para el periodo Julio-Setiembre	77
6.2.3	Relaciones focos de calor, número de incendios y superficie afectada	78
6.3	Estadísticas de incendios provinciales versus focos de calor	79
7	DISCUSION	82
8	CONCLUSIONES	90
9	RECOMENDACIONES	92
10	REFERENCIAS.	93
11	ANEXO 1: MAPAS CON LA DISTRIBUCIÓN ANUAL DE FOCOS DE CALOR EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY, RESUMIDOS EN CELDAS CUADRADAS DE 2 KM DE LADO.	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características principales de las bandas espectrales de los sensores OLI y TIRS del Landsat 8. Fuente: USGS 2013.....	21
Tabla 2: Rangos propuestos en la MODIS Collection 4 Active Fire Product User's Guide Version 2.3 (Giglio 2007), para clasificar los registros de focos de calor según el grado de confiabilidad.....	26
Tabla 3: Focos de calor MODIS registrados en la provincia de Salta entre los años 2003 y 2013, por departamento	40
Tabla 4: Focos de calor MODIS registrados en la provincia de Jujuy entre los años 2003 y 2013, discriminados por departamento.....	41
Tabla 5: Focos de calor MODIS registrados en la provincia de Salta agrupados por año y mes (Periodo 2003-2013).....	46
Tabla 6: Focos de calor MODIS registrados en la provincia de Jujuy agrupados por año y mes (Periodo 2003-2013).....	47
Tabla 7: Número de celdas, cuadradas de 2 kilómetros de lado, con registro de focos de calor en las provincias de Salta y Jujuy por año.....	53
Tabla 8: Distribución de las celdas cuadradas de 2 km de lado con focos de calor MODIS según su último año de registro para las provincias de Salta y Jujuy.	55
Tabla 9: Distribución de las celdas cuadradas de 2 km de lado con registros de focos de calor de la provincia de Salta según la cantidad total de focos registrados para el Periodo 2003-2013.	57
Tabla 10: Distribución de las celdas cuadradas de 2 km de lado con registros de focos de calor de la provincia de Salta según la cantidad de años con registro para el Periodo 2003-2013.....	59
Tabla 11: Distribución de las celdas cuadradas de 2 km de lado con registros de focos de calor de la provincia de Salta según la cantidad de focos de calor por año para el Periodo 2003-2013.	61
Tabla 12: Áreas recurrentes en cuanto a registros de focos de calor para el Periodo 2003-2013 en las provincias de Salta y Jujuy, clasificadas según su extensión.	62
Tabla 13: Focos de calor registrados en la provincia de Salta, entre 2003 y 2013, clasificados según coberturas del suelo. Dentro de cada clase de cobertura, se discriminaron aquellos localizados a menos o más de 1500 metros de áreas antrópicas: área urbana, periurbana/infraestructura y transformadas. Entre paréntesis se expresa el porcentaje total representado por cada grupo de datos.....	66
Tabla 14: Focos de calor MODIS registrados entre 2003 y 2013 en Salta y Jujuy, clasificados según % de suelo desnudo (Producto MODIS 44B). Se descartaron los registros de áreas urbanas, periurbanas-infraestructura y transformadas. Entre paréntesis se presentan las frecuencias relativas de cada clase.....	67
Tabla 15: Focos de calor MODIS registrados entre 2003 y 2013 en Salya y Jujuy, clasificados según % de suelo desnudo (Producto MODIS 44B). Se descartaron los registros de áreas urbanas, periurbanas-infraestructura y transformadas. Entre paréntesis se presentan las frecuencias relativas de cada clase.....	67
Tabla 16: Focos de calor MODIS registrados entre 2003 y 2013 en la provincia de Salta clasificados según % de vegetación leñosa (Producto MODIS 44B). Se descartaron los registros de áreas urbanas, periurbanas-infraestructura y transformadas. Entre paréntesis se presentan las frecuencias relativas de cada clase.	67

Tabla 17: Focos de calor MODIS registrados para la provincia de Salta clasificados según rangos de altitud. Periodo 2003-2013.....	68
Tabla 18: Focos de calor MODIS registrados para la provincia de Salta clasificados según clases de pendiente. Periodo 2003-2013.....	68
Tabla 19: Focos de calor MODIS registrados para la provincia de Salta clasificados según clases de exposición.	69
Tabla 20: Focos de calor MODIS registrados para la provincia de Salta clasificados según rangos de temperatura media anual TMA (°C).....	69
Tabla 21: Focos de calor MODIS registrados para la provincia de Salta clasificados según rangos de precipitación media anual.....	70
Tabla 22: Polígonos de áreas quemadas identificados en el área de estudio 2 para el periodo Julio-Setiembre de 2013, clasificados según coberturas del suelo y división política.....	72
Tabla 23: Áreas quemadas, clasificadas por tamaño, detectadas u omitidas por los focos de calor MODIS para el periodo de estudio Julio-Setiembre de 2013.	73
Tabla 24: Focos de calor clasificados como falsas alarmas por la evaluación de confiabilidad con imágenes Landsat 8 para el periodo Julio-Setiembre, discriminados por cobertura del suelo y sensor MODIS.....	73
Tabla 25: Polígonos de áreas quemadas identificados en el área de estudio 2 para el periodo Setiembre - Noviembre de 2013, clasificados según coberturas del suelo y división departamental.....	76
Tabla 26: Áreas quemadas, clasificadas por tamaño, detectadas u omitidas por los focos de calor MODIS para el periodo de estudio Setiembre -Noviembre de 2013.....	77
Tabla 27: Focos de calor clasificados como falsas alarmas por la evaluación de confiabilidad con imágenes Landsat 8 para el periodo Setiembre -Noviembre, discriminados por cobertura del suelo y sensor MODIS.	78
Tabla 28: Resumen de la cantidad de incendios y superficie quemada reportada por el Servicio Nacional de Manejo del Fuego para las provincias de Salta y Jujuy más el número de focos de calor MODIS registrados por año.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Representación de Focos de calor en terreno y en los pixeles de una imagen MODIS. Fuente: FIRMS 2009.....	6
Figura 2: Evolución del fuego y sus direcciones basada en la distribución de los focos de calor MODIS registrados durante octubre y noviembre de 2010 en el incendio ocurrido en el Parque Nacional Calilegua y su entorno. Fuente: Lizárraga 2011 a	7
Figura 3: Firma espectral tipo de vegetación fotosintéticamente activa (línea verde). Modificado de http://www.wikiagro.com/es/Archivo:Firma_espectral_vegetacion_vigorosa.JPG	10
Figura 4: Firmas espectrales de A) selva pedemontana sin quemar (línea verde continua con cuadrados blancos) y selva pedemontana quemada (línea roja continua con rombos rosas), B) campo cultivado con caña sin quemar (línea verde punteada con triángulos) y campo de caña quemado (línea punteada naranja con círculos).	11
Figura 5: Fórmulas de los principales índices de vegetación utilizados para cartografía de áreas quemadas. IC: reflectividad del canal infrarrojo cercano (0,70–1,30 µm). Rojo: reflectividad del canal rojo (0,62–0,67 µm). L: factor de corrección de cobertura vegetal. Varía entre 0 (alta cobertura) y 1 (baja cobertura) (para SAVI). Fuente: Bastarrika 2009.	13
Figura 6: Fórmulas de índices específicamente diseñados para discriminar áreas quemadas. IC: reflectividad del canal infrarrojo cercano (0,70–1,30 µm). Rojo: reflectividad del canal rojo (0,62–0,67 µm). IOC: reflectividad del canal infrarrojo cercano de onda corta (1,10–2,00 µm). IMOL: reflectividad del canal infrarrojo medio de onda larga (2,105-2,155 µm). IMOC: reflectividad del canal infrarrojo medio de onda corta (1,628-1,652). Fuente: Bastarrika 2009.....	14
Figura 7: Índices espectrales derivados de una imagen satelital Landsat 8 231/76 de setiembre de 2013. A) Composición RBG 654 con áreas quemadas en amarillo; b) NDVI: los incendios aparecen en colores claros, se confunden con playas de ríos, pastizales, cultivos y suelos desnudos. C) NBR: incendios en tonalidades oscuras, se confunden con suelos desnudos y pastizales. D) BAI: incendios en tonalidades claras, se confunden con sombras y no se delimitan totalmente. E) BAIM: incendios con tonalidades claras y buen contraste respecto a otras coberturas. F) MIRBI: incendios bien marcados en tonalidades claras, confusiones con suelos desnudos y sombras.....	15
Figura 8: Diferentes composiciones color RBG con Landsat 8 sobre un sector de la imagen 231/76 de setiembre de 2013. Los polígonos amarillos del recuadro A) indican áreas quemadas. Con el RBG B) las áreas quemadas aparecen en tonalidades moradas. En C) los incendios adquieren tonos bordos claros u oscuros pero siempre brillantes. En D) lo quemado adquiere colores violetas y azulinos opacos.	18
Figura 9: Distribución de las bandas de Landsat 8 comparadas con las de Landat 7 ETM+. Fuente: USGS 2013. 21	
Figura 10: Áreas de estudio. El área 1 comprende las provincias de Salta y Jujuy, donde se realizó el análisis de focos de calor; el área de estudio 2 el territorio argentino comprendido por las escenas 231-76 de Landsat 8, donde se analizó su confiabilidad.....	23
Figura 11: Modelo digital de terreno SRTM para las provincias de Salta y Jujuy.	27
Figura 12: Mapa de porcentaje de pendiente elaborado a partir de modelo digital de terreno SRTM para las provincias de Salta y Jujuy.	27
Figura 13: Mapa de exposición elaborado a partir de modelo digital de terreno SRTM para las provincias de Salta y Jujuy.	28

Figura 14: Precipitación anual media para las provincias de Salta y Jujuy según Bianchi 2005.....	28
Figura 15: Temperatura media anual para las provincias de Salta y Jujuy según Bianchi et al. 2005.....	29
Figura 16: Mapa de coberturas del suelo de las provincias de Salta y Jujuy.....	30
Figura 17: Mapa de porcentaje de suelo desnudo para las provincias de Salta y Jujuy, segun DiMiceli et al. 2001.....	31
Figura 18: Mapa de porcentaje de vegetación herbácea para las provincias de Salta y Jujuy, según DiMiceli et al. 2001.....	32
Figura 19: Mapa de porcentaje de vegetación leñosa para las provincias de Salta y Jujuy, según DiMiceli et al. 2001.....	32
Figura 20: Mapa de distancia en metros a sitios transformados: áreas transformadas, áreas urbanas, periurbanas o con infraestructura.....	33
Figura 21: Focos de calor MODIS registrados entre los años 2003 y 2013 en A) la provincia de Salta y B) la provincia de Jujuy. En tonos verdes se representan los años que no superaron el promedio provincial de la serie, en verde oscuro aquellos menores al límite inferior del intervalo de confianza (LIIC) y en verde claro aquellos mayores. En tonos naranjas, se representan los años que superaron el promedio provincial, en naranja claro aquellos que no superaron el límite superior del intervalo de confianza (LSIC) y en naranja aquellos que sí lo hicieron.....	37
Figura 22: Focos de calor MODIS registrados en la provincia de Salta entre los años 2003 y 2013, por departamento.....	38
Figura 23: Focos de calor MODIS registrados en la provincia de Jujuy entre los años 2003 y 2013, por departamento.....	39
Figura 24: Focos de calor MODIS registrados por año en el departamento de Anta (Periodo 2003-2013). En tonos verdes se representan los años que no superaron el promedio provincial de la serie, en verde oscuro aquellos menores al límite inferior del intervalo de confianza (LIIC) y en verde claro aquellos mayores. En tonos naranjas, se representan los años que superaron el promedio provincial, en naranja claro aquellos que no superaron el límite superior del intervalo de confianza (LSIC) y en naranja aquellos que sí lo hicieron.	42
Figura 25: Focos de calor MODIS registrados por año en el departamento de General San Martín (Periodo 2003-2013). En tonos verdes se representan los años que no superaron el promedio provincial de la serie, en verde oscuro aquellos menores al límite inferior del intervalo de confianza (LIIC) y en verde claro aquellos mayores. En tonos naranjas, se representan los años que superaron el promedio provincial, en naranja claro aquellos que no superaron el límite superior del intervalo de confianza (LSIC) y en naranja aquellos que sí lo hicieron.	43
Figura 26: Focos de calor MODIS registrados por año en el departamento Orán (Periodo 2003-2013). En tonos verdes se representan los años que no superaron el promedio provincial de la serie, en verde oscuro aquellos menores al límite inferior del intervalo de confianza (LIIC) y en verde claro aquellos mayores. En tonos naranjas, se representan los años que superaron el promedio provincial, en naranja claro aquellos que no superaron el límite superior del intervalo de confianza (LSIC) y en naranja aquellos que sí lo hicieron.	43
Figura 27: Focos de calor MODIS registrados por año en el departamento de Santa Bárbara (Periodo 2003-2013). En tonos verdes se representan los años que no superaron el promedio provincial de la serie, en verde oscuro aquellos menores al límite inferior del intervalo de confianza (LIIC) y en verde claro aquellos mayores. En tonos naranjas, se representan los años que superaron el promedio provincial, en naranja claro aquellos que no superaron el límite superior del intervalo de confianza (LSIC) y en naranja aquellos que sí lo hicieron.	44

Figura 28: Focos de calor MODIS registrados por año en el departamento de San Pedro (Periodo 2003-2013). En tonos verdes se representan los años que no superaron el promedio provincial de la serie, en verde oscuro aquellos menores al límite inferior del intervalo de confianza (LIIC) y en verde claro aquellos mayores. En tonos naranjas, se representan los años que superaron el promedio provincial, en naranja claro aquellos que no superaron el límite superior del intervalo de confianza (LSIC) y en naranja aquellos que sí lo hicieron.	45
Figura 29: Focos de calor MODIS registrados por año en el departamento Ledesma (Periodo 2003-2013). En tonos verdes se representan los años que no superaron el promedio provincial de la serie, en verde oscuro aquellos menores al límite inferior del intervalo de confianza (LIIC) y en verde claro aquellos mayores. En tonos naranjas, se representan los años que superaron el promedio provincial, en naranja claro aquellos que no superaron el límite superior del intervalo de confianza (LSIC) y en naranja aquellos que sí lo hicieron.	45
Figura 30: Distribución mensual de focos de calor MODIS registrados entre los años 2003 al 2013 en A) la provincia de Salta. B) la provincia de Jujuy.	48
Figura 31: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en la provincia de Salta (Periodo 2003-2013).	49
Figura 32: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en el departamento de Anta, provincia de Salta (Periodo 2003-2013).	50
Figura 33: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en el departamento de General San Martín, provincia de Salta (Periodo 2003-2013).	50
Figura 34: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en el departamento de Orán, provincia de Salta (Periodo 2003-2013).	50
Figura 35: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en la provincia de Jujuy (Periodo 2003-2013).	51
Figura 36: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en el departamento de Santa Bárbara, provincia de Jujuy (Periodo 2003-2013).	51
Figura 37: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en el departamento de San Pedro, provincia de Jujuy (Periodo 2003-2013).	52
Figura 38: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en el departamento de Ledesma, provincia de Jujuy (Periodo 2003-2013).	52
Figura 39: Distribución espacial de celdas con registros de focos de calor MODIS en las provincias de Salta y Jujuy. A) Focos de calor registrados en 2009. B) Focos de calor registrados en 2013.	54
Figura 40: Relación entre el registro anual de focos de calor y la cantidad de celdas de 2 km de lado registradas en las provincias de Salta y Jujuy para el periodo 2003-2013.	55
Figura 41: Mapa de Salta y Jujuy con celdas cuadradas de 2 km de lado, clasificadas según el último año de registro de focos de calor. Periodo 2003-2013.	56
Figura 42: Mapa de Salta y Jujuy con celdas cuadradas de 2 km de lado, clasificadas según la cantidad de focos de calor registrados entre 2003 y 2013.	58
Figura 43: Mapa de Salta y Jujuy con celdas cuadradas de 2 km, clasificadas según la cantidad de años con registro de focos de calor. Periodo 2003-2013.	60
Figura 44: Mapa de Salta y Jujuy con áreas recurrentes derivadas del registro de focos de calor. Periodo 2003-2013.	63

Figura 45: Mapa de incendios detectados dentro del área de estudio 2 para el primer periodo de estudio: Julio - Setiembre de 2013.....	71
Figura 46: Mapa de incendios detectados dentro del área de estudio 2 para el segundo periodo de estudio: Setiembre - Noviembre de 2013.....	75
Figura 47: Regresión lineal entre cantidad de focos de calor y número de polígonos quemados encontrados para cada periodo de evaluación de confiabilidad y por departamento, dentro del área de estudio 2.....	78
Figura 48: Regresión lineal entre cantidad de focos de calor y la superficie quemada determinada para cada periodo de evaluación de confiabilidad y por departamento, dentro del área de estudio 2.	79
Figura 49: Regresión lineal entre: A) la cantidad de incendios por año reportados por el SNMF y el registro anual de focos de calor MODIS para la provincia de Salta para el periodo 2003-2013; B) la superficie quemada anual reportada por el SNMF y el registro anual de focos de calor MODIS para la provincia de Salta para el periodo 2003-2013.	80
Figura 50: Regresión lineal entre: A) la cantidad de incendios por año reportados por el SNMF y el registro anual de focos de calor MODIS para la provincia de Jujuy para el periodo 2003-2013; b) la superficie quemada anual reportada por el SNMF y el registro anual de focos de calor MODIS para la provincia de Jujuy para el periodo 2003-2013.	80
Figura 51: Superficie quemada por año reportada por el SNMF comparada con el registro anual de focos de calor para la provincia de Salta.	81
Figura 52: Superficie quemada por año reportada por el SNMF comparada con el registro anual de focos de calor para la provincia de Jujuy.	81

1 INTRODUCCIÓN

El alto desarrollo alcanzado por las tecnologías de Teledetección Espacial, o Sensores Remotos, posibilita actualmente la implementación de sistemas de seguimiento de una gran cantidad de fenómenos a nivel global (Jensen 2000). Cambios en la cobertura del suelo, diferentes aspectos funcionales de los ecosistemas, variables climáticas, inundaciones e incendios, entre otros fenómenos pueden ser monitoreados a partir de imágenes satelitales (Volante *et al.* 2009, TOVAS 2010, Di Bella *et al.* 2008, Cabello y Paruelo 2008, UMSEF 2007).

Respecto a incendios, diferentes aplicaciones se han desarrollado para su monitoreo (Davies *et al.* 2009), ya que constituyen un importante factor de transformación ambiental para una amplia variedad de ecosistemas (FAO 2007, UMSEF 2007, Grillo *et al.* 2008) y tienen tanto impactos globales, al ser una fuente productora de gases de efecto invernadero (Chuvieco *et al.* 2008, Cole 2001, IPCC 2000), como regionales, relacionados con la degradación de suelos, la pérdida de biodiversidad y daños a personas e infraestructuras (Omi 2005, FAO 2007, Di Bella y Posee 2014).

Estudios realizados sobre la distribución de incendios ocurridos en Sudamérica encontraron que Argentina es uno de los países con más registros del continente (Di Bella *et al.* 2006, Chuvieco *et al.* 2008). Un estudio basado en los focos de calor MODIS registrados entre 2003 y 2008 resumidos sobre celdas cuadradas de 10 kilómetros de lado, concluyó que la ocurrencia de incendios abarca gran parte del País. En el 46% de estas celdas, se registró al menos un foco durante el periodo de estudio, y en un 18% los registros se repitieron en 4 o más años. En conjunto, 7 provincias, comprendieron casi el 80% de los datos: Santiago del Estero, Chaco, Salta, Santa Fé, Formosa, Corrientes y Entre Ríos (Lizárraga 2010 a).

Restringiendo el análisis al norte argentino, durante 2013 ocurrieron incendios de considerables dimensiones en las provincias de Salta y Jujuy atizados por condiciones climáticas de sequía y altas temperaturas (Lizárraga obs. pers.). Esta grave situación había sido predicha por los índices de combustible disponible (Build Up Index, BUI siglas en inglés), indicadores del riesgo de incendio (Dentoni y Muñoz 2012). Durante los meses de abril y junio estos superaron sus valores máximos históricos en las estaciones de monitoreo de ambas provincias (PNMF 2013, BPIFJ 2013). Ahora bien cabe preguntarse: ¿Cuán grave fue la ocurrencia de incendios comparada con años anteriores?, ¿Existe un incremento sostenido de ocurrencia de incendios en estas provincias?, ¿Cuál es la distribución espacial y temporal de los mismos?

Muchos autores postulan que la información sobre ocurrencia de incendios forestales o rurales es incompleta (FAO 2010, Di Bella *et al.* 2006, Chuvieco *et al.* 2008, Bastarrika 2009 y Mosciaro 2010). En Argentina existen estadísticas detalladas de incendios desde el año 1998 a la fecha, y son publicadas por el Programa Nacional de Estadística Forestal (PNEF 2014) (disponibles en : <http://www.ambiente.gob.ar/?idarticulo=13180>). Las mismas surgen de informes realizados por cada jurisdicción provincial sobre incendios combatidos durante un periodo de tiempo (PNEF 2014). Si bien no hay duda de la importancia de tener este tipo de datos disponibles, surgen las siguientes preguntas: Al tratarse solo de un registro de incendios combatidos: ¿Cuán sesgados son estos datos?, ¿Se pueden contestar las

preguntas del párrafo anterior con ellos?, ¿existen herramientas complementarias para mejorarlos?

Una herramienta que puede complementar a estas estadísticas es la detección remota de focos de calor (Oliva *et al.* 2008, Chuvieco *et al.* 2012, Lizárraga 2010 a). Concebidos como sistemas de alerta temprana (FIRMS 2009, CONAE 2014, SEPA 2014 a, SEPA 2014 b, INPE 2014), estos datos han permitido desarrollar una gran cantidad de estudios descriptivos relacionados con estadísticas de la ocurrencia de incendios a diferentes escalas corroboradas empíricamente con experiencia a campo (Lizárraga 2010 a, Lizárraga 2011 a, Lizárraga 2011 b, Lizárraga 2012, Lizárraga 2013, Lizárraga y Lipori 2013, Lizárraga 2014, Gatto 2008, Palacios *et al.* 2007, Fuentes Nay 2013). Cabe destacar que también han demostrado su utilidad para la reconstrucción de incendios de considerables dimensiones y larga duración (Lizárraga 2011 a).

El uso de focos de calor teledetectados como datos complementarios a las estadísticas de incendios tradicionales se justifica por el alcance espacial y temporal de la herramienta, por ser una la metodología fija, repetible y objetiva aplicada a imágenes satelitales, además del fácil acceso y procesamiento de estos datos. La principal duda sobre los focos de calor es cuál es su confiabilidad: ¿detectan todos los incendios ocurridos en un lugar y tiempo determinado?, ¿generan falsas alarmas?, ¿se corresponden con las estadísticas oficiales de incendios?

A partir de estos interrogantes, esta tesina pretende:

1. Aportar un diagnóstico espacial y temporal basado en los focos de calor MODIS de la distribución de incendios anual e histórica de los últimos 11 años para las provincias de Salta y Jujuy como información complementaria a las estadísticas de incendios publicadas por organismos oficiales.
2. Evaluar la confiabilidad de los focos de calor MODIS para detectar los incendios ocurridos en un sector de las provincias de Salta y Jujuy durante Julio y Noviembre de 2013.
3. Indagar sobre las relaciones entre focos de calor y las estadísticas de incendios publicadas por organismos oficiales.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 FUEGO E INCENDIOS: conceptos generales

El fuego ha operado en el planeta tierra desde sus orígenes. El humano ha conocido y evolucionado con el fuego. Su presencia, asociada a rayos y erupciones volcánicas fue una constante en la historia del planeta. Sin embargo, no fue sino hasta alrededor de unos 160.000 años atrás que el hombre empezó a controlarlo para su propio beneficio (Di Bella y Posse 2014). Desde ese entonces el fuego tiene un papel ambiguo para el hombre y el ambiente (Grillo *et al.* 2008).

El fuego es un fenómeno físico - químico que se caracteriza por el desprendimiento de luz y calor, producido por la combustión de un cuerpo, cuyo producto final es carbón y cenizas. Para que el proceso de la combustión se inicie y pueda continuar deben estar presentes tres elementos: oxígeno, calor y combustible (SNMF 2014 b).

El fuego puede ser utilizado como una herramienta útil para moldear herramientas, cocer alimentos, como técnica de caza y más recientemente, en acciones asociadas a la actividad agropecuaria: apertura y limpieza de parcelas o remoción de material senescente en pastizales para favorecer el rebrote de pastos de mayor calidad forrajera (Di Bella y Posse 2014, Bastarrika 2009). Desde un punto de vista ecológico, el fuego constituye también un factor ambiental importante para el mantenimiento y la persistencia de algunos ecosistemas dependientes de él (FAO 2007, FAO 2010, Grillo *et al.* 2008). Sin embargo, por otro lado esta útil “herramienta” constituye uno de los principales agentes de destrucción y degradación de diferentes ambientes a nivel global (FAO 2007). Cuando su ocurrencia es recurrente y su uso no es el adecuado, el fuego produce importantes alteraciones negativas en los ecosistemas. En este punto se puede dejar de hablar de fuego en forma genérica y comenzar a referirse a incendios: fuegos indeseados o dañinos (Di Bella y Posse 2014). Si bien es importante conocer esta diferencia conceptual, en el presente trabajo se hará uso de las palabras fuegos e incendios como sinónimos, independientemente de sus efectos.

Los incendios alteran la dinámica de biomasa, el balance de energía y agua, el ciclado de nutrientes y otros ciclos biogeoquímicos de un ambiente (Chuvieco *et al.* 2008, Di Bella y Posse 2014). Además, producen perturbaciones fisicoquímicas en la atmósfera (Di Bella y Posse 2014).

Son una de las principales fuentes de gases de efecto invernadero y son un factor a tener en cuenta para la mitigación del cambio climático. Algunas estimaciones muestran que el CO₂ emitido por la quema de biomasa es ocho veces superior a los gases generados por la quema de combustibles fósiles (Chuvieco *et al.* 2008).

Los incendios producen cambios en la vegetación, el suelo y el paisaje, que pueden resultar en pérdida de biodiversidad, degradación de suelos, aislamiento ecológico, etc. Además constituyen un factor de destrucción de medios de subsistencia e infraestructura, provocando pérdidas económicas o daños en la salud y la vida de las personas (FAO 2007, FAO 2010).

En términos generales, se pueden distinguir dos tipos de “fuegos” de acuerdo a su origen. Los naturales son eventos originados por factores naturales (rayos, lava de erupciones volcánicas y combustión natural) (Di Bella y Posse 2014). Un ejemplo anecdótico es el incendio de 10 ha ocurrido en 2009 en el Parque Nacional Campo de Los Alisos, provincia de Tucumán, provocado por la caída de un rayo (Carreras com. pers.).

Los fuegos antrópicos son aquellos producidos por el hombre. Dentro de estos a su vez se pueden distinguir: las quemas prescriptas y los fuegos no deseado. Las quemas prescriptas son técnicas de encendido de vegetación dentro de un área acotada, bajo condiciones predeterminadas según objetivos de manejo establecidos (Dentoni y Muñoz 2001). Ejemplos de estos eventos son las quemas programadas realizadas en áreas protegidas como los Parques Nacionales Mburucuyá, El Palmar y Chaco (Pasko com. pers.). Los fuegos o incendios no deseados son aquellos que se propagan libremente por la vegetación, sin estar sujeto a control humano, con efectos no deseados para la misma (SNMF 2014 b).

También se puede hacer una división de diferentes fuegos según su localización, distinguiendo aquellos que ocurren en las ciudades o áreas urbanas (incendios urbanos), los localizados en los límites entre áreas urbanas y áreas naturales (incendios de interface) y los que ocurren en áreas naturales (incendios forestales o rurales) (SNMF 2014 b, Grillo et al. 2008, FAO 2010).

En la evaluación de los bosques a nivel mundial se encontró que el 10 por ciento de todas las ocurrencias son quemas controladas. El resto se clasifica como incendios forestales o rurales (FAO 2010).

La ocurrencia de estos fenómenos y sus patrones espaciales dependen de la interacción de las características bióticas (tipo de cobertura, biomasa, continuidad horizontal y vertical de los combustibles) o abióticas (temperatura, viento, humedad relativa, topografía, etc.) y las actividades y acciones humanas directas e indirectas desarrolladas en los ecosistemas (Chuvieco 2009, de Groot et al. 2013).

Existen varias metodologías que permiten estimar el peligro de incendios en determinado lugar y para una fecha dada. Entre ellas se destaca el Índice Meteorológico de Peligrosidad de Incendio, que se basa en datos meteorológicos para indicar el riesgo de incendio de un lugar y tiempo (Van Wagner 1987, Dentoni y Muñoz 2012).

Sin embargo, estos métodos no proporcionan una buena visión territorial de cómo varían en el espacio las condiciones hídricas del combustible. Por ello se ha comenzado en los últimos años en Argentina a emplear imágenes satelitales para obtener una visión espacialmente más completa de esta variable (SEPA 2014). Esto constituye una de las múltiples aplicaciones que aporta la teledetección a la temática de incendios.

2.2 LA TELEDETECCION Y LOS INCENDIOS: aportes desde el espacio

Las aplicaciones de la Teledetección Espacial en la prevención, caracterización y evaluación de los incendios forestales se ha incrementado notablemente en las últimas décadas (Chuvieco 2009, Di Bella y Posee 2014).

En la actualidad se han desarrollado muchas aplicaciones para las diferentes fases de gestión del fenómeno: 1) antes del incendio: determinación de condiciones de peligro, 2) durante el incendio: detección de incendios, determinación y caracterización parcial de áreas quemadas, y 3) después del incendio: determinación y caracterización final de áreas quemadas, evaluación de daños y seguimiento de la regeneración (Chuvieco 2009, Di Bella y Posse 2014).

En la presente tesina se hará hincapié en la detección de incendios utilizando focos de calor y la determinación de áreas quemadas utilizando imágenes satelitales Landsat 8 OLI.

2.2.1 Focos de calor

Los focos de calor, o puntos calientes (hotspots en inglés), son anomalías térmicas localizadas a partir de imágenes satelitales que en general se corresponden con incendios (Davies *et al.* 2009, Di Bella *et al.* 2008, Oliva *et al.* 2008, CONAE 2014). La mayor parte de los métodos de detección de estas anomalías se basan en el contraste térmico entre el suelo no afectado y el foco de fuego, utilizando sensores sensibles al infrarrojo medio (3 a 11 μm) (Chuvieco 2009, Giglio *et al.* 2003).

Si bien existen varias fuentes de focos de calor derivados de diferentes misiones satelitales como ser NOAA, AVHRR, GOES, METEOSAT, ERS-ATSR, OLS-DMSP, entre otros (INPE 2014, Chuvieco 2009, Oliva *et al.* 2008, Palacios *et al.* 2007); para este trabajo se eligió la base de datos de focos de calor de MODIS Rapid Response -mix de la versión 3, 4 y 5- (Davies *et al.* 2009), distribuidos por medio del sistema web FIRMS (Fire Information for Resource Management System - Sistema de información de incendios para manejo de recursos) (FIRMS 2009). Dicha base de datos contiene información para todo el mundo desde el año 2001 al presente.

Los focos de calor distribuidos por FIRMS son detectados a partir de imágenes satelitales provistas por los sensores MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, Espectro radiómetro de imágenes de mediana resolución) montados sobre las plataformas satelitales Aqua y Terra de la NASA (acrónimo en inglés de National Aeronautics and Space Administration - Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de EEUU) (Giglio *et al.* 2003). 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 μm y 4 -11 μm (Giglio 2013). El sensor MODIS provee dicha información a partir de las bandas 20 a 23 (3.660 - 4.080 μm), 31 y 32 (10.780 - 12.270 μm) (Mas 2011, Núñez 2007).

Cada localización de un foco de calor representa el centro de un píxel de aproximadamente un kilómetro de lado, que contiene uno o más incendios o fuegos activos (Figura 1) (FIRMS 2009).

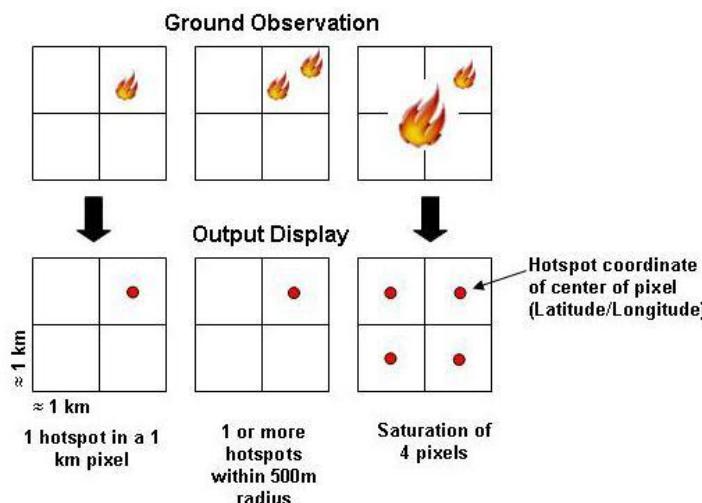


Figura 1: Representación de Focos de calor en terreno y en los pixeles de una imagen MODIS. Fuente: FIRMS 2009.

Gracias a la existencia de dos sensores que dan vuelta a la Tierra cada 12 horas, se cuenta con cuatro lecturas de focos de calor MODIS por día: dos diurnas y dos nocturnas. Para el área de estudio el satélite TERRA pasa entre las 23:00 y 0:00 (pasada nocturna) y entre las 11:00 y 12:00 (pasada diurna) mientras que el AQUA lo hace entre las 15:00 y 17:00 (pasada nocturna) y 4 PM (pasada diurna). Los datos de las pasadas diurnas están disponibles por lo general entre 12 AM y 2 PM (datos TERRA) y 5 PM y 7 PM (datos AQUA).

Más información sobre estos focos de calor puede obtenerse en el sitio web: <https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/faq/firms>

2.2.1.1 Usos de los focos de calor

2.2.1.1.1 Alerta temprana

Los focos de calor son utilizados principalmente como un sistema de alerta temprana que permite rápidamente localizar un incendio (FIRMS 2009, CONAE 2014, INPE 2014, SEPA 2014 a y SEPA 2014 b).

El sistema FIRMS ofrece variados servicios relacionados a focos de calor, entre los que se destaca el aviso por mail o celular de los focos de calor registrados en un área especificada por el usuario. Dicha alerta temprana se envía automáticamente, transcurrido el tiempo de procesamiento de las imágenes satelitales (2 a 5 horas luego de la pasada) (FIRMS 2009).

Además de detectar incendios, los focos de calor han ayudado en algunos casos a desarrollar sistemas de alerta temprana de deforestación en bosques secos de México, Brasil y Bolivia aunque sus resultados no han sido muy buenos (Portillo Quintero *et al.* 2013).

2.2.1.1.2 Seguimiento de incendios y reconstrucciones

Al contar con gran repetición temporal, los focos de calor MODIS ayudan a realizar el seguimiento de grandes incendios y permiten conocer su evolución espacial (Lizárraga 2011a).

En algunos casos, estos datos se han utilizado post –incendio, para reconstruir la trayectoria de un evento de fuego con fines de peritaje, permitiendo determinar su origen, y detalles sobre dirección de avance, determinación de frentes, etc. (Figura 2), o con fines operativos, permitieron estimar la velocidad de avance de un incendio y la superficie del área quemada (Lizárraga 2011 a).

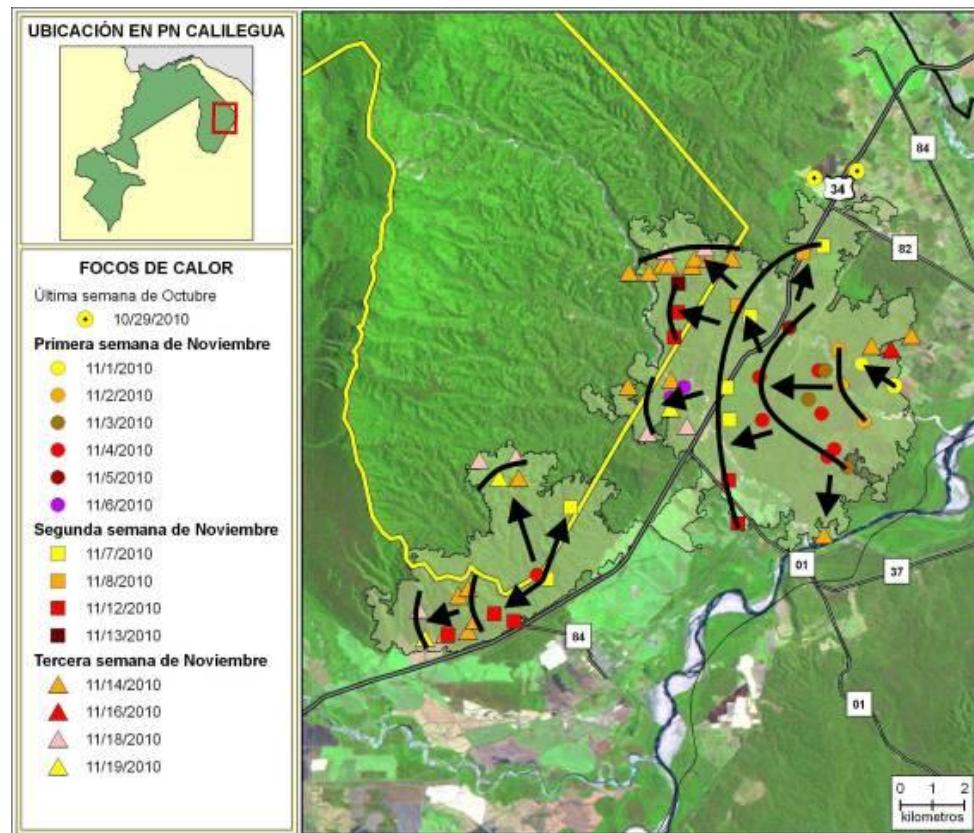


Figura 2: Evolución del fuego y sus direcciones basada en la distribución de los focos de calor MODIS registrados durante octubre y noviembre de 2010 en el incendio ocurrido en el Parque Nacional Calilegua y su entorno. Fuente: Lizárraga 2011 a.

2.2.1.1.3 Caracterización de situaciones de fuego a diferentes escalas

Gracias a su naturaleza digital, datos de posición geográfica y fecha de registro, los focos de calor permiten ser procesados e integrados en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con otros datos tales como división política, coberturas del suelo, áreas protegidas, etc. permitiendo caracterizar la situación de fuego a diferentes escalas (Lizárraga 2010 a). Utilizando registros de focos de calor de uno o varios años se pueden calcular estadísticas de incendios a nivel de:

- Continente: obteniendo información a nivel continental y desglosándola a nivel país (Di Bella *et al.* 2006).
- País: obteniendo información a nivel nacional y desglosándola a nivel regional y provincial (Lizárraga 2010 a, Palacios *et al.* 2007).
- Provincia: obteniendo información a nivel provincial y desglosándola a nivel departamental (Lizárraga 2011 a, Lizárraga 2011 b, Lizárraga 2011 d, Fuentes Nay 2013)

- Sistema de áreas protegidas: obteniendo información a nivel de sistema y área protegida (Lizárraga 2011 a, Lizárraga y Lipori 2012).
- Área protegida y su entorno: generando información a nivel área protegida y su entorno (Lizárraga 2011 a, Lizárraga 2011 b, Lizárraga y Lipori 2013, Lizárraga 2013, Lizárraga 2014, Palacios *et al.* 2007).

2.2.1.2 Confiabilidad de los focos de calor

Según FIRMS (2009) en la mayoría de los casos, los focos de calor son incendios, excepto algunas ocasiones en las que se trata de erupciones volcánicas o llamaradas de pozos de gas (Davies *et al.* 2009, SE 2010). Sin embargo, no es posible saber qué tipo de anomalía térmica es la detectada sólo en base a los datos de MODIS (Davies *et al.* 2009).

Una observación que siempre se realiza respecto a los focos de calor es que los mismos, en algunas ocasiones, generan falsas alarmas: señalando lugares donde no ocurrió ningún incendio, o bien al revés: no detectaron incendios que sí ocurrieron. En Teledetección estos errores se conocen como error de comisión: falsa alarma o falso positivo; y error de omisión: incendio no detectado o falso negativo (Giglio 2013, Oliva *et al.* 2008, Chuvieco *et al.* 2012, Gatto 2008).

Respecto a las falsas alarmas, varios autores han encontrado que los focos de calor en algunas ocasiones se corresponden con suelos desnudos muy calientes, superficies especulares, zonas agrícolas o urbanas (Giglio 2013, Oliva *et al.* 2008, Chuvieco *et al.* 2012, Gatto 2008). De acuerdo a estudios realizados por Chuvieco y colaboradores (2012) 15 % de los focos de calor fueron falsas alarmas.

Respecto a incendios no detectados puede existir una subestimación debida principalmente a la presencia de nubes, el horario de adquisición de la imagen, la geometría de observación, la cobertura de vegetación, la magnitud del incendio y su duración, entre otras razones (Giglio 2013, Di Bella 2008, Davies *et al.* 2009, Chuvieco *et al.* 2012, Oliva *et al.* 2008, Lizárraga 2010 a, Lizárraga 2012). Por ello los incendios ocurridos durante días nublados, o que tuvieron corta duración, o afectaron pequeñas superficies (<50 ha), o que ocurrieron en el sotobosque con una densa cobertura de dosel sin quemarse, no son fácilmente detectados por los focos de calor (Davies *et al.* 2009, Lizárraga 2010 a, Lizárraga 2012). En un estudio realizado en España (Chuvieco *et al.* 2012), la efectividad de los focos de calor para detectar incendios varió entre 60 y 80 % para incendios de más de 100 ha.

A pesar de estos dos tipos de errores: falsas alarmas e incendios no detectados, se puede suponer que los puntos calientes de MODIS representan un muestreo representativo de la distribución geográfica de la ocurrencia de incendios y permiten realizar estudios confiables sobre los patrones regionales de ocurrencia de incendios (Oliva *et al.* 2008, Lizárraga 2010 a).

Se desea destacar que existen evidencias empíricas de la utilidad de los focos de calor, ya que en varias ocasiones al presentar trabajos durante reuniones de planificación de temporadas de incendios, las situaciones temporal y espacialmente descriptas a partir de series anuales de focos de calor tuvieron buena aceptación (Lizárraga 2011 b, Lizárraga 2011 c, Lizárraga 2012, Lizárraga y Lipori 2013, Lizárraga 2014).

2.2.2 Cartografía de áreas quemadas

El uso de imágenes satelitales en la detección de los incendios se ha incrementado notablemente en las últimas décadas (Chuvieco 2009, Di Bella y Posee 2014).

Antes de ellas, la cartografía de áreas quemadas se desarrollaba a partir de dos enfoques: fotografías aéreas blanco y negro, color o infrarrojas; o mediante trabajo de campo, cartografiando *in situ* el perímetro del incendio, a pie o desde medios aéreos (Bastarrika 2009). Si bien ambas técnicas aún se utilizan y, sobre todo el estudio *in situ* es fundamental en algunos casos, las mismas no son factibles al momento de realizar una evaluación completa de las áreas quemadas de una provincia, región o país luego de una temporada de incendios (Bastarrika 2009, Mosciaro 2010, Chuvieco *et al.* 2008). Los altos costos financieros, de tiempo, de recursos humanos y las limitaciones operativas, son algunas de las dificultades que se presentan al desear emplear estas técnicas en un enfoque regional (Mosciaro 2010).

En este sentido, el uso de imágenes satelitales posibilita actualmente el desarrollo de sistemas que proporcionan de forma rápida, precisa y económicamente accesible los límites de las áreas quemadas inmediatamente después (o durante) la temporada de incendios (Bastarrika 2009, Mosciaro 2010, Chuvieco *et al.* 2008).

2.2.2.1 Comportamiento espectral de áreas quemadas

Cada tipo de vegetación, o cobertura del suelo, posee una “firma espectral” que permite identificarla, caracterizarla y diferenciarla de otras en mayor o menor medida. La firma espectral representa el comportamiento de determinada cobertura del suelo ante diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Por lo general dicho comportamiento es expresado en % de reflectancia (Paruelo *et al.* 2014, Beget y Di Bella 2014).

Por ejemplo, la vegetación fotosintéticamente activa posee una firma espectral tipo (Figura 3), que presenta baja reflectancia en el rango del visible (<20 %), producto de la alta absorción de los pigmentos de las hojas: valores muy bajos para el azul (0,45-0,52 µm) y el rojo (0,63-0,68 µm) más un pequeño pico en el verde (0,53-0,60 µm); una máxima reflectancia en el infrarrojo cercano (0,85-0,89 µm), por su interacción con la estructura celular interna de las hojas, alcanzando valores entre 30 y 50 %; y valores más bajos para el resto de los infrarrojos (Beget y Di Bella 2013).

Al quemarse un tipo de vegetación su firma espectral cambia en mayor o menor medida, por la deposición de carbón y cenizas resultantes de la combustión (SNMF 2014), dependiendo de múltiples factores (intensidad del incendio, vegetación predominante, tipo de suelo, contenido de humedad anterior al evento, etc.) (Bastarrika 2009). Ese cambio posibilita discriminar lugares quemados de lugares no quemados.

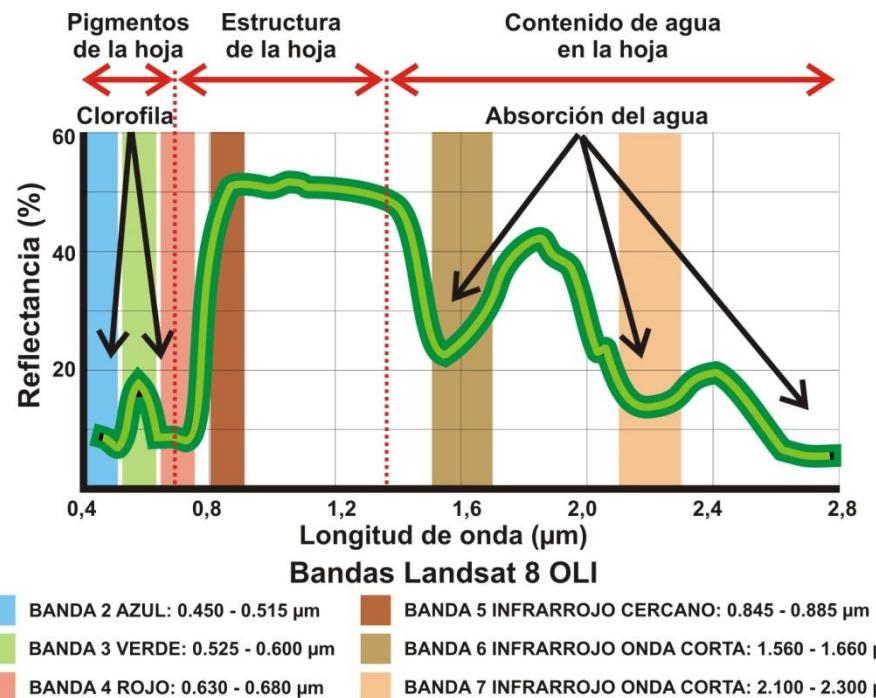


Figura 3: Firma espectral tipo de vegetación fotosintéticamente activa (línea verde). Modificado de http://www.wikiagro.com/es/Archivo:Firma_espectral_vegetacion_vigorosa.JPG

En la Figura 4 (A y B) se presentan comparativamente firmas espectrales de puntos quemados y no quemados, en dos tipos de coberturas, localizadas en Jujuy y Salta respectivamente: A) selva pedemontana y B) campos agrícolas con caña de azúcar. Los valores de reflectancia fueron derivados de una imagen satelital Landsat 8 OLI 231/076 tomada el 08/11/2013.

El cambio observado en la cobertura de selva es muy bajo en la porción visible del espectro electromagnético, muy notorio en el infrarrojo cercano: evidenciando una disminución de la reflectancia, y menos notable en el infrarrojo de onda corta, con un aumento. Para el caso de los campos de caña, se evidencia una baja disminución de la reflectancia en el visible, una notable disminución en el infrarrojo cercano y un comportamiento variable en las dos bandas del infrarrojo de onda corta.

Numerosos trabajos encontraron que, según el ambiente y la intensidad del fuego, la respuesta varía en las diferentes longitudes de onda, salvo en el infrarrojo cercano (Di Bella y Posse 2014). Por ello ésta es una de las porciones del espectro electromagnético más utilizadas para realizar cartografía de áreas quemadas. En un segundo plano, se utiliza el infrarrojo de onda corta e infrarrojo térmico (8,0 -15 μm) (Di Bella y Posse 2014, Bastarrika 2009, Mosciaro 2010).

Si bien las diferencias entre firmas espectrales son casi siempre evidentes, algunos factores son muy importantes de tener en cuenta cuando se necesita individualizar incendios ocurridos. El tiempo transcurrido entre la ocurrencia del incendio y la adquisición de la imagen satelital juega un papel fundamental (Bastarrika 2009, Mosciaro 2010).

Luego del fuego, las cenizas y carbón resultantes de la combustión de biomasa, los cuales son responsables de los cambios en la firma espectral, son dispersados por el viento y

lavados por el agua. Además, la vegetación comienza a regenerarse o, bien, se realizan actividades de labranza en el caso de campos agrícolas-ganaderos. En conjunto, todos estos factores van borrando los rastros de un incendio, por lo que es fundamental contar con imágenes posteriores pero temporalmente cercanas al evento para producir buena cartografía. La intensidad, severidad, el tipo y estado fenológico de la vegetación afectada por el fuego y el contraste de esta con la vegetación circundante, también juegan un papel crítico a la hora de cartografiar (Bastarrika 2009, Mosciaro 2010).

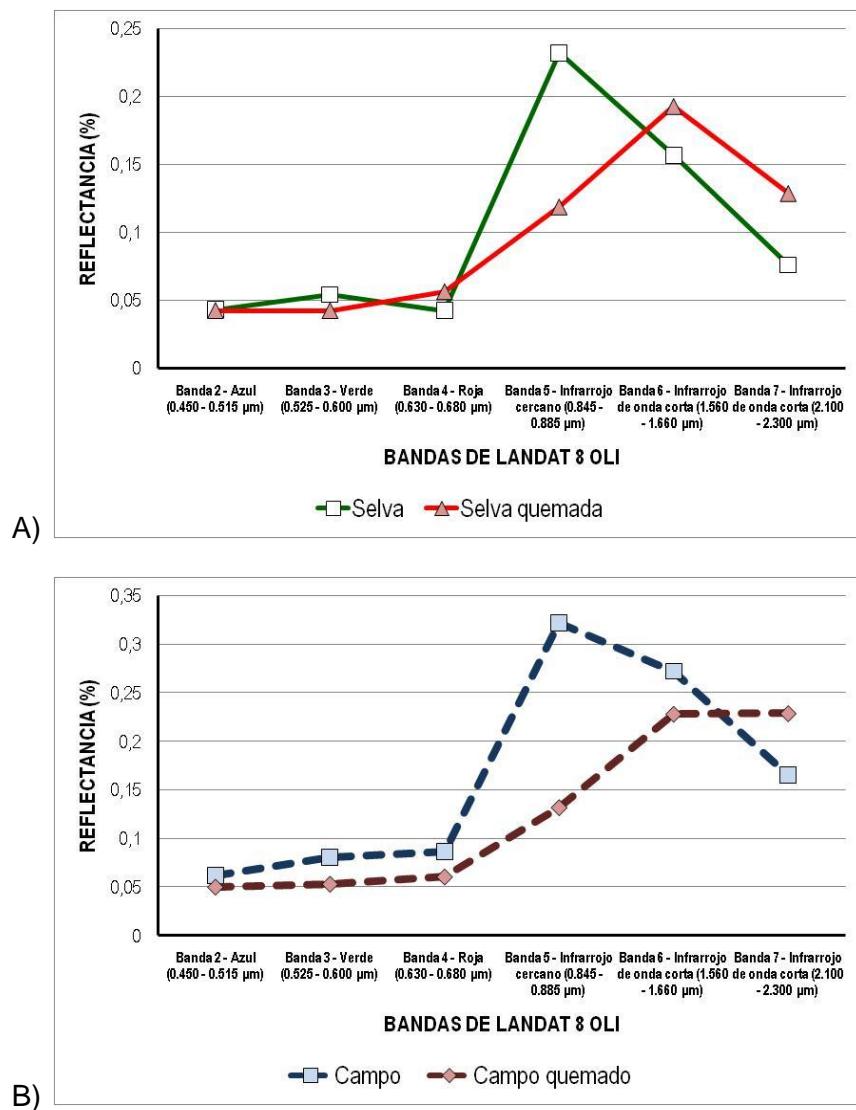


Figura 4: Firmas espectrales de A) selva pedemontana sin quemar (línea verde continua con cuadrados blancos) y selva pedemontana quemada (línea roja continua con rombos rosas), B) campo cultivado con caña sin quemar (línea verde punteada con triángulos) y campo de caña quemado (línea punteada naranja con círculos).

Al depender de tantos factores, el comportamiento espectral de las áreas quemadas presenta cierta dificultad para su generalización. Este comportamiento genera confusión con otras coberturas del suelo que presentan firmas similares. Es por ello, que la mayoría de técnicas de cartografía digital automática de áreas quemadas suelen confundir estas con superficies de baja reflectividad como agua, bosques oscuros, sombras de nubes o sombras topográficas (Chuvieco y Congalton 1988), píxeles mixtos tierra-agua y agua-vegetación que se observan claramente en los bordes de ríos, embalses o zonas de costa (Martín 2001),

áreas urbanas (Chuvieco y Congalton 1988), superficies artificiales, áreas de escasa vegetación (Milne 1986), píxeles mixtos con diferentes proporciones de cubiertas quemadas, no quemadas y suelo (Caetano *et al.* 1994), vegetación no fotosintéticamente activa y suelos sin humedad (Lizárraga 2010 b).

Para minimizar estas confusiones, se desarrollaron numerosas técnicas de transformación y análisis para cartografiar áreas quemadas.

2.2.2.2 Transformaciones: índices espectrales

La transformación de imágenes satelitales a índices espectrales o a otros tipos de imágenes se utiliza frecuentemente para mejorar la detección de incendios. Su objetivo es incrementar el contraste observado entre la señalpectral de las áreas quemadas y la del resto de las cubiertas existentes en una imagen, para minimizar la confusión (Mosciaro 2010).

Es por esto que para la cartografía de incendios, en general, se trabaja con dos tipos de índices espectrales: aquellos creados originalmente para discriminar zonas vegetadas (índices de vegetación) y los índices espectrales diseñados específicamente para el reconocimiento de áreas afectadas por fuego (Bastarrika 2009, Mosciaro 2010).

2.2.2.2.1 Índices de vegetación

Los cálculos de índices de vegetación se basan, principalmente, en la relación del comportamiento de un tipo de vegetación, o cobertura, en las bandas del rojo y el infrarrojo cercano (Figura 3). Tomando como referencia la vegetación sana, fotosintéticamente activa, se observa una baja reflectividad en la región del visible, por la alta absorción de los pigmentos de las hojas, y una elevada reflectividad en la región del infrarrojo cercano, por la interacción de la energía solar con la estructura de la hoja. El resultado es una notable diferencia entre bandas que será mayor cuanto más vigor tenga la vegetación, por lo que así se puede distinguir con facilidad la vegetación sana de otras coberturas (Mosciaro 2010); debe tenerse en consideración que los índices de vegetación presentan la gran ventaja de eliminar el efecto de las sombras topográficas (Nuñez com. pers.).

Diversos índices han sido ampliamente utilizados para el estudio de las áreas quemadas (Martín y Chuvieco 1995, Pereira 1999, Barbosa *et al.* 1999, Stroppiana *et al.* 2002, Chuvieco 2008) debido a que en estas zonas la desaparición parcial o total de la cubierta y la deposición de los residuos de la combustión dan como resultado reflectividades más bajas en el infrarrojo cercano y, por tanto, un contraste entre bandas mucho menor que la vegetación sana. Dentro de estos índices cabe mencionarse el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Índice diferencial de vegetación normalizado, en español), el GEMI (Global Environmental Monitoring Index, Índice de monitoreo ambiental global) o el SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index, Índice de vegetación ajustado por suelo), entre otros. En la Figura 5 se presentan las fórmulas de cada uno de ellos.

Si bien en varios estudios se utilizaron estos índices, su performance general no siempre ha sido buena para cartografiar incendios. Ya que los cambios que afectan a estos índices no son solo producidos por incendios, sino que muchos otros fenómenos conducen a ellos: deforestación, precipitaciones, fenología, sequía, inundaciones, etc. Por lo que se recomienda usar este tipo de índices como información complementaria acompañada de

Índices espectrales específicamente diseñados para identificar áreas quemadas (Kucéra et al. 2005). En cambio, los índices de vegetación han demostrado mucha utilidad para realizar análisis de seguimiento y severidad de incendios (Mari et al. 2007, Lizárraga 2010 b).

$$NDVI = \frac{(IC - Rojo)}{(IC + Rojo)}$$

$$GEMI = \frac{\cap(1-0,25\cap)-(Rojo - 0,125)}{(1 - Rojo)} \quad \cap = \frac{2(IC^2-Rojo^2)+1,5 IC+0,5 Rojo}{(Rojo + IC+0,5)}$$

$$SAVI = \frac{(IC - Rojo)}{(IC + Rojo + L)} (1 + L)$$

Figura 5: Fórmulas de los principales índices de vegetación utilizados para cartografía de áreas quemadas. IC: reflectividad del canal infrarrojo cercano (0,70–1,30 µm). Rojo: reflectividad del canal rojo (0,62–0,67 µm). L: factor de corrección de cobertura vegetal. Varía entre 0 (alta cobertura) y 1 (baja cobertura) (para SAVI). Fuente: Bastarrika 2009.

2.2.2.2.2 Índices espectrales específicos para identificar áreas quemadas

Estos índices han sido diseñados específicamente para enfatizar la señal espectral del área quemada. Dentro de esta categoría se encuentran transformaciones que, teniendo el mismo objetivo, utilizan diferentes combinaciones de bandas (Bastarrika 2009). Estos permiten mejorar la cartografía de incendios e identificar la severidad de los mismos (White et al. 1996, Lizárraga 2010 b), entre otras utilidades.

Entre los índices que utilizan información de las regiones del visible, especialmente el rojo y el infrarrojo cercano se puede mencionar el BAI (Burnt Area Index, Índice de áreas quemadas) diseñado para la discriminación de áreas recientemente quemadas en ecosistemas mediterráneos (Martín 1998).

Entre los índices que utilizan la combinación infrarrojo cercano-infrarrojo de onda corta se pueden nombrar el NBR (Normalized Burnt Ratio, índice de proporción de áreas quemadas normalizado) y el BAIM (Modified Burned Area Index, Índice modificado de áreas quemadas) (Bastarrika 2009).

Otro índice diseñado específicamente para la cartografía de incendios con imágenes MODIS es el MIRBI (Mid-Infrared Burn Index, Índice de áreas quemadas de infrarrojo medio) (Trigg y Flasse 2001), desarrollado para el espacio espectral del infrarrojo medio de onda corta (1,628–1,652 µm) y el infrarrojo medio de onda larga (2,105–2,155 µm), cuyos resultados muestran errores de comisión bajos, aunque mantiene confusiones con los cuerpos de agua y mezclas de vegetación, y un mayor porcentaje de errores de omisión que los obtenidos mediante la implementación del BAIM (Mosciaro 2010, Bastarrika 2009).

En la Figura 6 se resumen las fórmulas de cada uno de estos índices y en la Figura 7 se presentan ilustraciones de algunos de ellos.

$$NBR = \frac{(IC - IOC)}{(IC + IOC)}$$

$$BAI = \frac{1}{(IC - ICc)^2 + (Rojo - Rojoc)^2}$$

ICc y Rojoc: son valores de convergencia, establecidos en 0,06 y 0,1 (valores de reflectividad) respectivamente.

$$BAIM = \frac{1}{(IC - ICc)^2 + (IOC - IOCc)^2}$$

ICc y IOCc: son valores de convergencia, establecidos en 0,05 y 0,2 (valores de reflectividad) respectivamente.

$$MIRBI = 10 \text{ IMOL} - 9,8 \text{ IMOC} + 2$$

Figura 6: Fórmulas de índices específicamente diseñados para discriminar áreas quemadas. IC: reflectividad del canal infrarrojo cercano (0,70–1,30 µm). Rojo: reflectividad del canal rojo (0,62–0,67 µm). IOC: reflectividad del canal infrarrojo cercano de onda corta (1,10–2,00 µm). IMOL: reflectividad del canal infrarrojo medio de onda larga (2,105-2,155 µm). IMOC: reflectividad del canal infrarrojo medio de onda corta (1,628-1,652). Fuente: Bastarrika 2009.

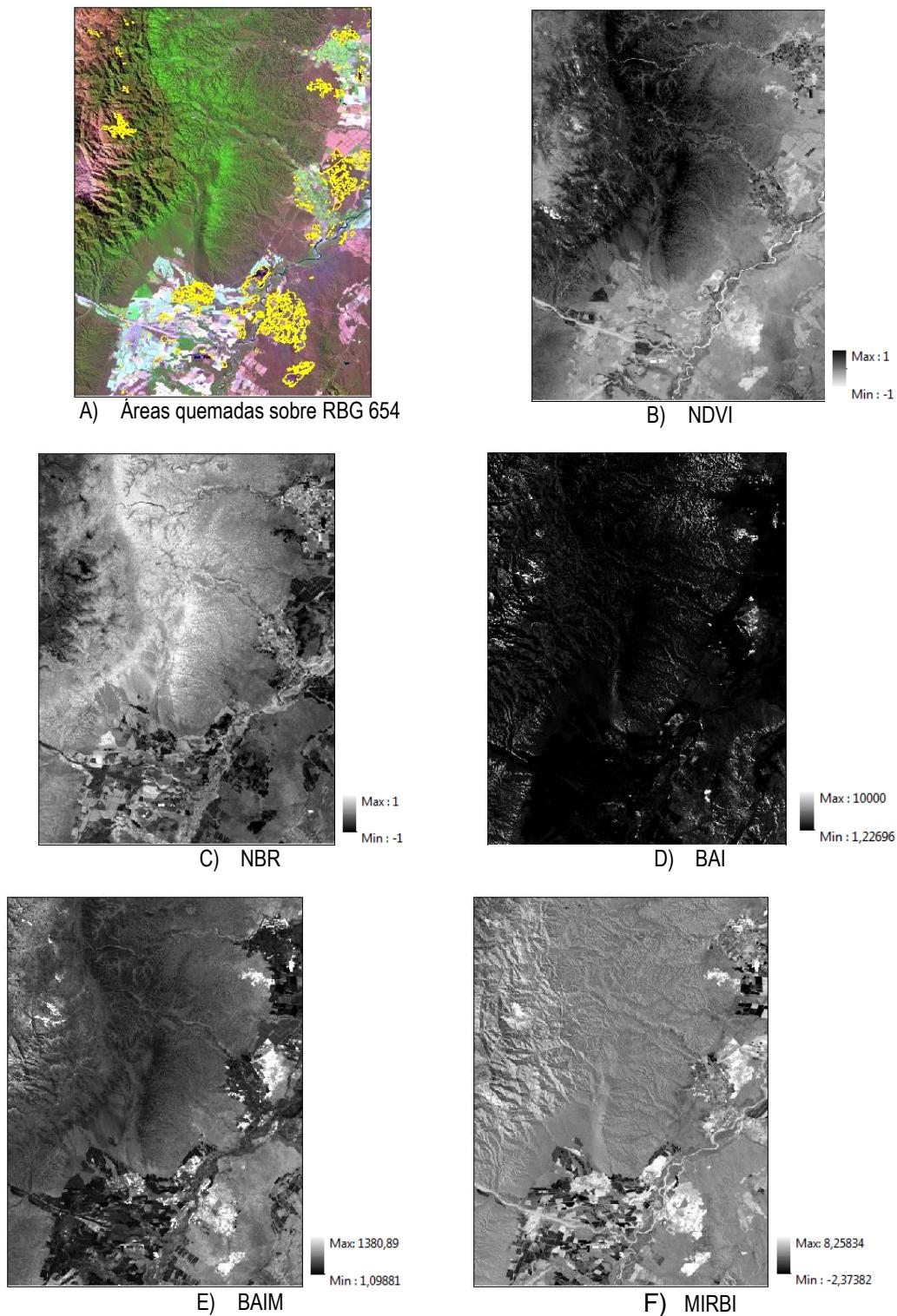


Figura 7: Índices espectrales derivados de una imagen satelital Landsat 8 231/76 de setiembre de 2013. A) Composición RBG 654 con áreas quemadas en amarillo; b) NDVI: los incendios aparecen en colores claros, se confunden con playas de ríos, pastizales, cultivos y suelos desnudos. C) NBR: incendios en tonalidades oscuras, se confunden con suelos desnudos y pastizales. D) BAI: incendios en tonalidades claras, se confunden con sombras y no se delimitan totalmente. E) BAIM: incendios con tonalidades claras y buen contraste respecto a otras coberturas. F) MIRBI: incendios bien marcados en tonalidades claras, confusiones con suelos desnudos y sombras.

2.2.2.2.3 Otras transformaciones

Otro tipo de transformaciones aplicadas a imágenes satelitales que se han utilizado para cartografiar incendios son el análisis por Componentes Principales (PCA), la Transformación Kauth-Thomas (KT) o Tasseled Cap (TC), la Transformación Intensity-Hue-Saturation (IHS), la Regresión lineal y logística, técnicas de desmezclado espectral SMA, Matched filtering (MF) y Texturas y otras medidas de información contextual. Detalles de algunas de estas transformaciones y sus aplicaciones en la detección de áreas quemadas pueden encontrarse en Bastarrika (2009).

2.2.2.3 Métodos de análisis para la detección de áreas quemadas

Existen muchas técnicas para delimitar polígonos de incendios ocurridos en un determinado lugar y fecha o periodo de estudio. Las mismas pueden involucrar una o más imágenes, algoritmos complejos o sencillos, una o más fases de análisis, umbrales o simples actividades de digitalización.

2.2.2.3.1 Técnicas multitemporales: análisis de detección de cambios

Estos métodos consisten en comparar dos imágenes, una anterior al incendio y otra posterior, mediante operaciones matemáticas (Jensen 2000). Pueden involucrar las bandas originales de las imágenes satelitales transformadas en valores de reflectancia (Lipori y Lizárraga 2012), o bien realizarse sobre índices de vegetación o de áreas quemadas ((Kasischke et al. 1993; Kasischke y French 1995; Martín y Chuvieco 1995; Fernández et al. 1997; França y Setzer 20019). Otros análisis pueden realizarse comparando clasificaciones digitales o mediante interpretación visual.

La técnica más comúnmente utilizada es la diferencia entre bandas y su posterior interpretación para aplicar un umbral de corte, que señala sitios quemados y no quemados (Lipori y Lizárraga 2012). A partir de la capa binaria generada por la umbralización se pueden derivar los polígonos de áreas quemadas, los cuales constituyen el producto final que se desea generar (Lipori y Lizárraga 2012, Lizárraga 2009).

2.2.2.3.2 Técnicas unitemporales: análisis de una sola escena

Estas técnicas involucran solo una imagen satelital. El principal desafío en este tipo de análisis es incrementar el contraste de áreas quemadas en dicha escena, para diferenciarlas de otras coberturas (Bastarrika 2009).

2.2.2.3.3 Técnicas analógicas: Interpretación visual de imágenes satelitales

Quizás la técnica más sencilla para el procesamiento de imágenes satelitales es el análisis visual. Incluso algunos autores lo han catalogado como el más efectivo (Chuvieco y Congalton 1988, Hudak y Brockett 2004). Este método consiste en interpretar diferentes composiciones de color que resaltan las áreas quemadas y digitalizarlas manualmente para obtener polígonos de incendios.

Si bien no requiere contar con personal especializado en procesamiento de imágenes satelitales y SIG, sí requiere de operarios con amplia experiencia en interpretación de

imágenes satelitales y conocimiento de terreno (Férrandez-Coppel I. y Herrero Llorente 2012).

Algunas composiciones de color en el Sistema RGB (Red, Green, Blue - rojo, verde, azul) que permiten incrementar la individualización de áreas quemadas son (la numeración de bandas corresponde a Landsat 8 OLI):

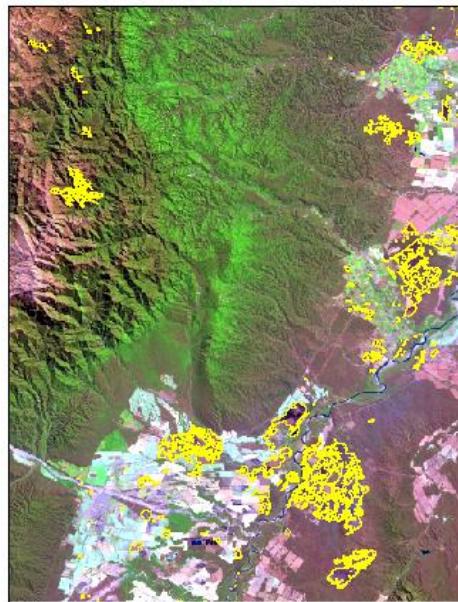
- 7,5,5: utilizada en Argentina (UMSEF 2007);
- 5,6,7: empleada por Barbosa *et al.* 1999 en África, por Chuvieco y Congalton 1988 en España y por Michalek *et al.* 2000 en Alaska ;
- 11,5,2 y 5,6,4: utilizadas en España por Mosciaro 2010;
- 4,5,6: empleada en Amazonas por Pereira y Setzer 1993 a, sabanas africanas (Laris 2005) y australianas (Zhang *et al.* 2001);
- 5,7,2 o 5,7,3: usadas en Grecia (Koutsias y Karteris 1998; Koutsias y Karteris 2000);
- 4, 5,7:empleadas en Alaska (Michalek *et al.* 2000)y Mozambique (Sá *et al.* 2003).

Cabe destacar que en algunos casos las composiciones de color pueden ser construidas a partir de imágenes transformadas: índices espectrales u otras transformaciones (Lizárraga 2010 b).

La interpretación visual ha sido empleada desde 1990 para producir la cartografía de incendios de Portugal (Bastarrika 2009). En Argentina ha sido el método elegido para desarrollar el inventario de bosques nativos del país (UMSEF 2005).

Sin embargo, las principales desventajas de esta metodología son el tiempo que se requiere para digitalizar amplias regiones y las dificultades para diferenciar áreas no quemadas dentro de polígonos quemados heterogéneamente (Bastarrika 2009).

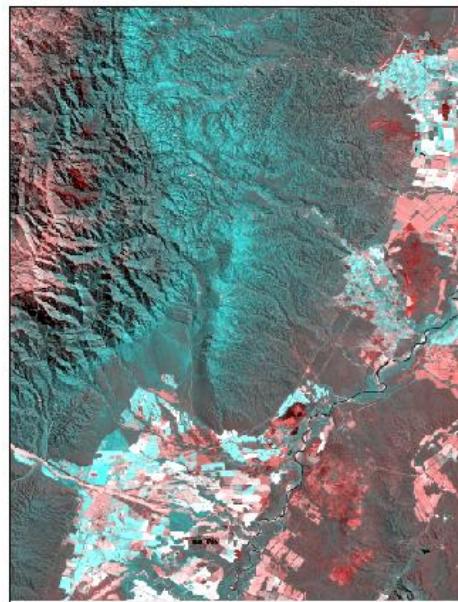
En la Figura 8 se presentan ilustraciones de algunas de estas composiciones.



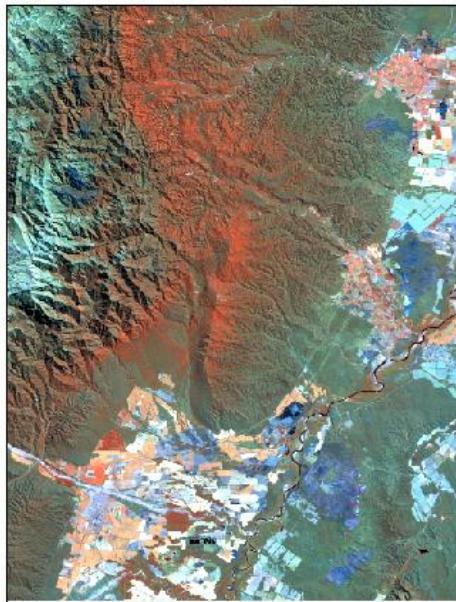
1. Áreas quemadas sobre RBG 654.



2. RGB: 654 (IR O. Corta, Ir Cercano, Rojo).



3. RGB: 755 (IR O. Corta, IR Cercano, IR Cercano).



4. RGB: 567 (IR Cercano, IR O .Corta, IR O. Corta).

Figura 8: Diferentes composiciones color RBG con Landsat 8 sobre un sector de la imagen 231/76 de setiembre de 2013. Los polígonos amarillos del recuadro A) indican áreas quemadas. Con el RBG B) las áreas quemadas aparecen en tonalidades moradas. En C) los incendios adquieren tonos bordos claros u oscuros pero siempre brillantes. En D) lo quemado adquiere colores violetas y azulinos opacos.

2.2.2.3.4 Técnicas de análisis digital automatizado

Utilizando las imágenes satelitales originales, o transformaciones derivadas de ellas, se pueden obtener composiciones de color aptas para realizar análisis automáticos.

Entre estas técnicas se pueden nombrar:

Clasificaciones digitales: las mismas consisten en aplicar diferentes algoritmos, que actúan de manera supervisada o no supervisada, paramétrica o no paramétrica, y permiten obtener una capa temática donde se representan las áreas quemadas y otras coberturas del suelo (Paruelo 2014).

Umbralización: Esta técnica consiste en establecer un valor de corte dividiendo la imagen en dos categorías: categoría “quemado” y “no quemado”. Diferentes criterios para establecer estos umbrales se discuten en Bastarrika (2009).

Análisis multi-fase: Estas metodologías surgen a raíz de las dificultades a la hora de identificar y delimitar el perímetro del área quemada en una única fase de análisis, debido a la variabilidad espectral que muestran las áreas quemadas (Martín 1998; García y Chuvieco 2004). Los métodos multi-fase integran diferentes técnicas para mejorar la precisión y fiabilidad de los sistemas de cartografía de áreas quemadas (Martín 2001), basándose en una combinación de algoritmos multi-umbral, multi-temporal y de análisis espacial. Por ejemplo Bastarrika (2009) elaboró una técnica multi-fase que, en primer lugar, identifica a partir de umbralización de índices espectrales, píxeles “semilla”, es decir celdas con alta probabilidad de estar quemadas. En una segunda fase de análisis, partiendo de las semillas, analiza los píxeles vecinos, utilizando algoritmos contextuales, y los agrega o descarta a las semillas. De esta manera se dibujan de manera automática los polígonos de áreas quemadas por crecimiento de regiones.

2.2.2.3.5 Técnicas mixtas.

Combinación de incendios activos y cartografía de áreas quemadas: El uso sinérgico de la detección de incendios activos y la detección de la señal posterior al incendio ha permitido mejorar los resultados individuales de ambas estrategias (Bastarrika 2009).

Combinación de métodos automáticos con interpretación visual: los métodos que combinan técnicas automáticas (basadas en análisis digital) y visuales suelen resultar los más simples, rápidos, objetivos y precisos para obtener la cartografía de incendios en zonas donde las áreas quemadas presentan mosaicos heterogéneos (Mosciaro 2010). Por ejemplo, en un estudio realizado en el territorio de la Comunidad Autónoma de Madrid Mosciaro (2010) utilizó primeramente el software ABAMS (Bastarrika 2010) para obtener polígonos de áreas quemadas con técnicas automáticas de crecimiento de semillas (Bastarrika 2009), y en una segunda fase interpretación visual, para descartar los polígonos que no indicaban sitios quemados y delinear correctamente aquellos que efectivamente señalaban incendios ocurridos (Mosciaro 2010).

2.2.3 Landsat 8

Se presentan las principales características de las imágenes satelitales Landsat 8, que serán utilizadas en el presente trabajo para realizar la cartografía de áreas quemadas.

El 11 de febrero del 2013 fue lanzado el satélite Landsat 8 (cuyo nombre técnico es LDCM: Landsat Data Continuity Mission, Misión de Continuidad de la Información Landsat). Su diseño y lanzamiento es operación conjunta entre la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (NASA 2013).

LDCM es el octavo de la serie de satélites del programa Landsat con el que se han capturado imágenes de resolución espacial media de la Tierra desde 1972 (USGS 2013,

Paruelo *et al.* 2014 a), logrando dar continuidad al programa satelital sobre información del planeta más largo de la historia.

Landsat es el primer Programa Satelital de Observación de la Tierra que fue diseñado exclusivamente para usos civiles, ha sido testigo de los cambios en el mundo, desde el crecimiento de grandes ciudades hasta la reducción de los bosques más importantes del globo. La información hasta ahora colectada es vital para múltiples áreas, como la gestión hídrica y forestal, energía, gestión de riesgos, agricultura, urbanismo, entre otras (Martínez Batlle 2013, Paruelo *et al.* 2014 a).

Su altura de vuelo es de 705 km, su revisita de 16 días y su ancho de barrido de 185 km. El satélite sigue una órbita cuasipolar descendente (en dirección Norte-Sur) y heliosincrónica (pasa por el Ecuador a las 10:00 am +/- 15 minutos), con una inclinación de 98,2° respecto al Ecuador (NASA 2013, USGS 2013, Paruelo *et al.* 2014 a).

Landsat 8 cuenta con dos instrumentos de toma de datos: el OLI (Operational Land Imager, Generador Operacional de Imágenes de la Tierra) y el TIRS (Thermal Infrared Sensor, Sensor Infrarrojo Térmico) (USGS 2013).

Las escenas de Landsat 8 tienen un total de 11 bandas espectrales, 9 tomadas por el OLI y 2 por el TIRS. En la Tabla 1 se describen las principales características de las mismas y en la Figura 9, se presenta la correspondencia de sus bandas con las misiones Landsat antecesoras (USGS 2013). Los archivos de Landsat 8 son más grandes que los del Landsat 7, rondando los 2 GB, por tener más bandas que sus antecesores, tratarse de archivos de 16 bits y contener una banda de Valoración de Calidad (QA) por píxel, que indica anomalías en la toma del dato por problemas de instrumental u otras (presencia de aerosoles, agua o nieve, etc.) (USGS 2013). Los datos están disponibles mediante los servidores del USGS, 24-48 horas posteriores a la captación de las imágenes, desde los sitios web tales como GloVis, Earth Explorer o Landsat Look Viewer (USGS 2013).

El disponer gratuitamente de una fuente de datos de tan amplio rango temporal y de un mismo territorio, resulta de gran interés para analizar los cambios y tomar mejores decisiones de gestión territorial (Martínez Batlle 2013).

Otra característica a destacar de Landsat 8 es que presenta una configuración orbital similar a la plataforma Terra, que entre sus instrumentos científicos presenta al sensor MODIS, aunque desfasada unos 15 minutos. De esta manera es posible la obtención a escala global de datos espectrales de libre acceso y diferente resolución espacial, adquiridos bajo condiciones atmosféricas y de la cubierta terrestre casi idénticas (Paruelo *et al.* 2014 a). Esto es de fundamental importancia al evaluar la confiabilidad de los focos de calor MODIS con imágenes satelitales Landsat 8.

Tabla 1: Características principales de las bandas espectrales de los sensores OLI y TIRS del Landsat 8. Fuente: USGS 2013.

BANDAS ESPECTRALES DE OLI	LONGITUD DE ONDA	RESOLUCIÓN
Banda 1 - Costero / Aerosol	0.433 - 0.453 μm	30 m
Banda 2 - Azul	0.450 - 0.515 μm	30 m
Banda 3 - Verde	0.525 - 0.600 μm	30 m
Banda 4 - Roja	0.630 - 0.680 μm	30 m
Banda 5 - Infrarrojo cercano	0.845 - 0.885 μm	30 m
Banda 6 - Infrarrojo de onda corta	1.560 - 1.660 μm	30 m
Banda 7 - Infrarrojo de onda corta	2.100 - 2.300 μm	30 m
Banda 8 - Pancromática	0.500 - 0.680 μm	15 m
Banda 9 - Cirrus	1.360 - 1.390 μm	30 m

BANDAS ESPECTRALES DE TIRS	LONGITUD DE ONDA	RESOLUCIÓN
Band 10 - Infrarrojo termal o de onda larga	10.30 - 11.30 μm	100 m
Band 11 - Infrarrojo termal o de onda larga	11.50 - 12.50 μm	100 m

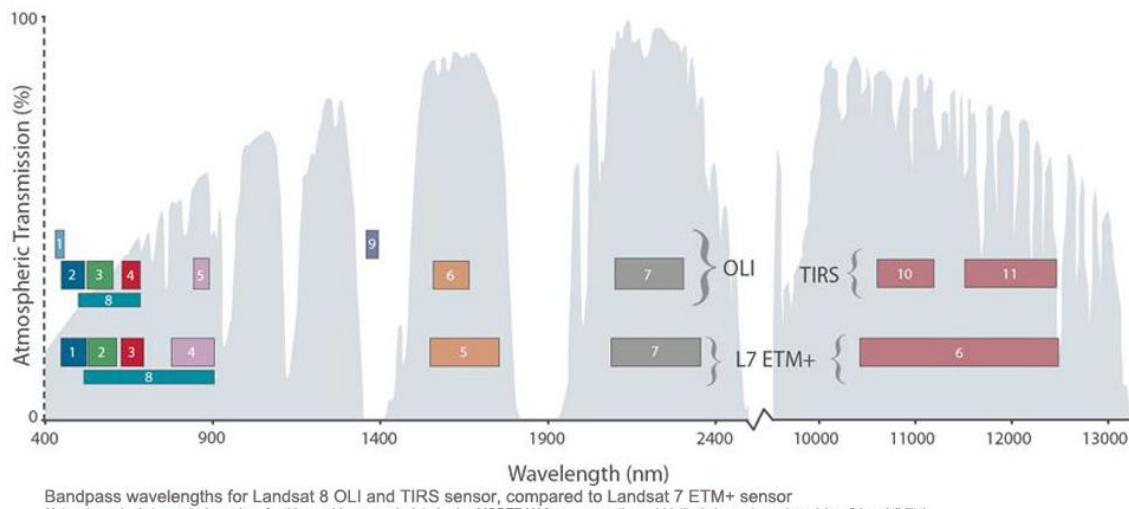


Figura 9: Distribución de las bandas de Landsat 8 comparadas con las de Landat 7 ETM+. Fuente: USGS 2013.

3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir de las metas fijadas y el marco teórico explicitado en la sección anterior, se establecen los siguientes objetivos específicos para la presente tesina:

1. Construir una base de datos georreferenciada de focos de calor MODIS para las provincias de Salta y Jujuy.
2. Caracterizar los territorios de las provincias de Salta y Jujuy, según la incidencia de focos de calor durante el período 2003-2013.
3. Representar la variación temporal anual y promedio de la ocurrencia de focos de calor en cada provincia y sus departamentos.
4. Ilustrar patrones de ocurrencia de focos de calor en Salta y Jujuy según variables temporales y de frecuencia.
5. Correlacionar las ocurrencias con variables temáticas tales como coberturas del suelo, altitud, pendiente, exposición, temperatura media anual y precipitaciones media anual.
6. Evaluar la confiabilidad de los focos de calor MODIS en una porción de ambas provincias, a partir de su correspondencia con mapas de áreas quemadas derivados de interpretación sobre imágenes Landsat 8 (USGS 2014) del año 2013.
7. Correlacionar y comparar las estadísticas de incendios nacionales con el número de focos de calor MODIS registrados por provincia.

4 AREA DE ESTUDIO

Para la presente tesina se plantearon dos áreas de estudio (Figura 10):

- El área de estudio 1 comprende las provincias de Salta y Jujuy. Esta se utilizó para la caracterización de la situación de incendios con los focos de calor MODIS La misma se ubica entre los 21° 40' y 25° 25' de Latitud Sur y entre 62° 20' y 68° 35' de Longitud Oeste.
- El área de estudio 2 comprende la intersección en territorio argentino de las imágenes satelitales Landsat 8 correspondientes al Path 231, Row 076 seleccionadas para cartografiar áreas quemadas y evaluar la confiabilidad de los focos de calor MODIS, entre los 22° 05' 41.04" y 24° 9'47.60" de Latitud Sur y los 63°56'34.19" y 66° 9'52.56" de Longitud Oeste.

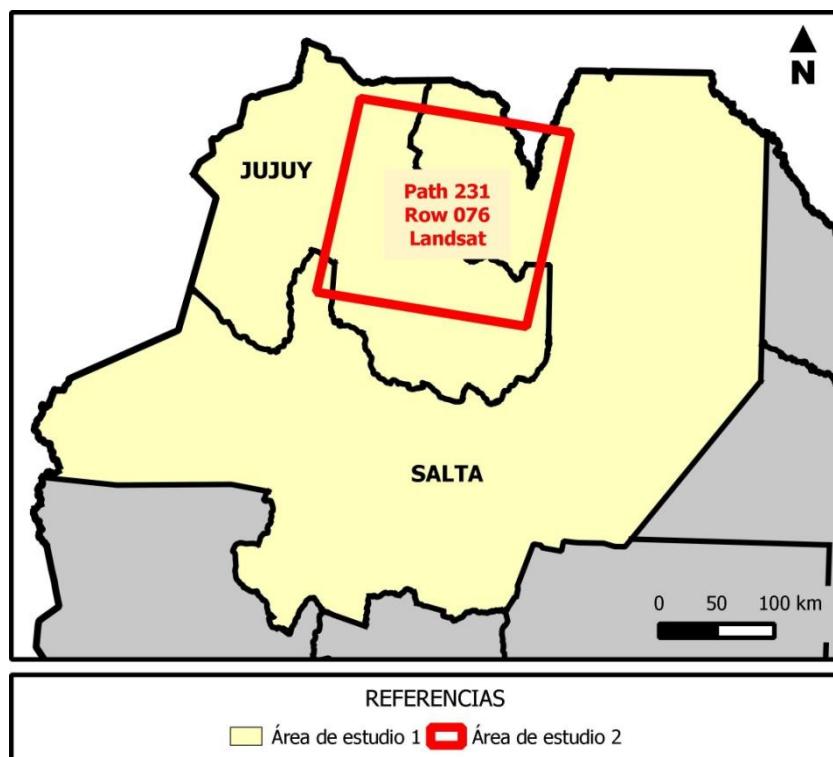


Figura 10: Áreas de estudio. El área 1 comprende las provincias de Salta y Jujuy, donde se realizó el análisis de focos de calor; el área de estudio 2 el territorio argentino comprendido por las escenas 231-76 de Landsat 8, donde se analizó su confiabilidad.

4.1 Descripción Área de estudio 1

La provincia de Salta posee una superficie de 155.488 km² y una densidad poblacional de 7,8 hab. por km² (IGN 2015). Por su gran extensión tanto latitudinal (casi 500 km) como longitudinal (más de 600 km), su gradiente de altitud (altitud mínima 182 m; altitud máxima 6.706 m) y topografía, Salta posee climas, ambientes y actividades productivas muy variadas (Bravo *et al.* 1999, Bianchi y Cravero 2010, Burkart *et al.* 1999). Desde el punto de vista climático, en Salta se identifican 14 tipos climáticos según la clasificación de Thornthwaite. Los mismos varían según sus temperaturas entre cálidos-subtropicales (al

este) a templados-fríos (al oeste) y por sus precipitaciones desde semiáridos (al este) a húmedos o sub-húmedos (zonas serranas al centro de la provincia) y áridos (al oeste), todos con estación seca de régimen monzónico (Bravo *et al.* 1999, Bianchi y Cravero 2010). Desde el punto de vista ambiental se desarrollan ambientes típicos de 5 eco-regiones: Chaco seco, Selva de Yungas, Monte de Sierras y Bolsones, Puna y Altos Andes (Burkart *et al.* 1999). Estos involucran selvas, bosques, arbustales, pastizales, cuerpos de agua, salinas, etc. Respecto a su diversidad productiva, Bravo y colaboradores (1998) identificaron 8 regiones agroeconómicas en la provincia: Chaco silvoganadero, Chaco con riego, Umbral al chaco con cultivos de secano extensivos, Sierras subandinas y pampeanas con ganadería y forestales, Valles de producción intensiva, Cultivos subtropicales y de primicia, Valles y bolsones con oasis de riego y ganadería menor y Puna Altoandina con ganadería menor y camélidos (Bravo *et al.* 1998).

Por su parte la provincia de Jujuy posee una superficie de 53.219 km² y una densidad poblacional de 12,7 hab. por km² (IGN 2015). Sus gradientes latitudinal (300 km), longitudinal (300 km), altitudinal (mínima altitud 308 m y 5.911 m altitud máxima) y topográfico, también determinan varios tipos de climas, ambientes y actividades productivas (Bravo *et al.* 1999, Bianchi y Cravero 2010, Burkart *et al.* 1999). Aquí los tipos climáticos varían según sus temperaturas entre subtropicales-cálidos (al este) a templados-fríos (al oeste) y por sus precipitaciones desde semiáridos (al este) a húmedos o sub-húmedos (zonas serranas al centro de la provincia) y áridos (al oeste), todos con estación seca de régimen monzónico (Bravo *et al.* 1998, Bianchi y Cravero 2010). Desde el punto de vista ambiental se desarrollan ambientes típicos de 5 eco-regiones: Chaco seco, Selva de Yungas, Monte de Sierras y Bolsones, Puna y Altos Andes (Burkart *et al.* 1999). Respecto a su diversidad productiva, Bravo y colaboradores (1998) identificaron 6 regiones agroeconómicas en la provincia: Umbral al chaco con cultivos de secano extensivos, Sierras subandinas y pampeanas con ganadería y forestales, Valles de producción intensiva, Cultivos subtropicales y de primicia, Valles y bolsones con oasis de riego y ganadería menor y Puna altoandina con ganadería menor y camélidos (Bravo *et al.* 1998).

Una diferencia a destacar entre Salta y Jujuy es la mayor extensión de ambientes chaqueños que posee la primera respecto de la segunda (Burkart *et al.* 1999, Bravo *et al.* 1998).

Tanto en Salta como en Jujuy ha ocurrido un proceso acelerado de transformación del uso del suelo que implica principalmente el reemplazo de bosques chaqueños y selvas de yungas por cultivos anuales y/o por pasturas de gramíneas megatérmicas (Greenpeace 2013, Seghezzo *et al.* 2011, Volante *et al.* 2014, Lizárraga *et al.* 2011). Al ser el fuego una de las herramientas para remover los residuos producidos, este proceso puede ser una de las causas de la ocurrencia de incendios.

4.2 Descripción Área de estudio 2

El área de estudio 2 posee un extensión de 3.601.656 ha y abarca parte de las provincias de Salta y Jujuy, involucrando territorios de 13 departamentos de ambas provincias (5 de Salta y 8 de Jujuy).

Al seleccionar esta área se buscó un sector que contenga una muestra representativa de la variación climática, topográfica y ambiental de las provincias de Salta y Jujuy. Además la misma resultó un área interesante de estudiar por dos razones:

- Presenta una alta tasa de incendios forestales, producto de la intencionalidad o negligencia y/o como práctica de manejo de cultivos de caña de azúcar y/o limpieza de vegetación (Lizárraga 2014).
- Contiene los sectores más importantes para la conservación de la biodiversidad de las Selvas de Yungas (Brown et al. 2001), incluyendo áreas protegidas tales como los Parques Nacionales Calilegua y Baritú, el Parque Provincial Pintascayo y parte de la Reserva de Biosfera de Las Yungas (Brown et al. 2002).

Ambientalmente ocurren dentro de esta ventana 5 eco-regiones típicas en estas provincias (Burkart et al. 1999). Las precipitaciones promedio varían entre los 154 al suroeste y los 2091 mm anuales en el centro norte (Bianchi 2005). Hacia el este la precipitación disminuye gradualmente hasta los 600-700 mm anuales en los sectores más planos (Bianchi 2005, Bianchi y Cravero 2010). La temperatura media anual varía de este a oeste, de 21,5°C a 1,3°C respectivamente (Bianchi et al. 2005). Altitudinalmente el área de estudio presenta una altitud mínima de 287 m y una máxima de 5144 m.

Este sector comprende áreas urbanas de interés regional como la localidad de San Ramón de la Nueva Orán, La Quiaca, Libertador general San Martín, y asentamientos humanos más pequeños como Fraile Pintado, Calilegua, Abrapampa, Humaúca, Iruya, Colonia Santa Rosa, Pichanal, entre otros. En estos, se desarrollan diversas actividades económicas agrícola-ganaderas como cultivos de soja, maíz, poroto, caña, cítricos, pasturas, hortalizas, frutales varios y trigo (Volante et al 2004, Paoli et al. 2014 a, Paoli et al. 2014 b, Bravo et al. 1999), además de actividades relacionadas con la producción y refinamiento del petróleo (pozos y gasíferos) (SE 2010).

5 MATERIALES Y METODOLOGÍA

5.1 Procesamiento de Focos de Calor MODIS

El trabajo se dividió en tres etapas:

- Selección de focos de calor para Salta y Jujuy (Área de estudio 1) e incorporación de atributos geográficos, temporales, de confiabilidad y variables de caracterización.
- Integración de los datos en una base de datos tipo ACCESS y cálculo de estadísticas por provincia, departamento y variables auxiliares.
- Cálculo de estadísticas por unidades cuadradas de 2 por 2 kilómetros.

5.1.1 Selección de focos de calor para Salta y Jujuy e incorporación de atributos geográficos, temporales y de confiabilidad

Primeramente se seleccionaron de la base de datos de focos de calor (Davies *et al.* 2009), aquellos detectados entre los años 2003 y 2013 en Salta y Jujuy a partir de una capa de división política a nivel departamental (IGN 2014). A cada registro se le agregaron atributos geográficos administrativos, tales como país, región, provincia y departamento. Además se agregaron atributos de variables de caracterización (ver Item. 6.3 Variables de caracterización). A partir de información contenida en los registros de focos de calor, se generaron otros campos tales como año, mes (número), categorías de confiabilidad y un identificador de los registros con categorías de confiabilidad alta y nominal.

Para generar el campo de categorías de confiabilidad se tomaron los rangos propuestos en MODIS Collection 4 Active Fire Product User's Guide Version 2.3 (Giglio 2007), cuyos valores se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Rangos propuestos en la MODIS Collection 4 Active Fire Product User's Guide Version 2.3 (Giglio 2007), para clasificar los registros de focos de calor según el grado de confiabilidad.

CATEGORIA DE CONFIABILIDAD	CAMPO CONFIABILIDAD*
Baja	< 30 %
Nominal	Entre 30 y 80 %
Alta	> 80 %

*valor proveniente de la base de datos de focos de calor.

5.1.2 Variables de caracterización

Para caracterizar tanto los focos de calor como los polígonos de áreas quemadas se seleccionaron algunas variables generadas ad hoc o provenientes de fuentes secundarias. Ellas permitieron ampliar el análisis estadístico y describir diferentes patrones.

Las variables ambientales describen el clima, la topografía, la cobertura boscosa, y cambio en el uso del suelo de las áreas de estudio. Ellas fueron:

- Altitud: se utilizó el modelo digital de terreno (MDT) generado por la misión SRTM (USGS 2006), que tiene 90 metros de resolución espacial (Figura 11). El mismo se encuentra disponible en <http://srtm.csi.cgiar.org> (Jarvis et al. 2008).

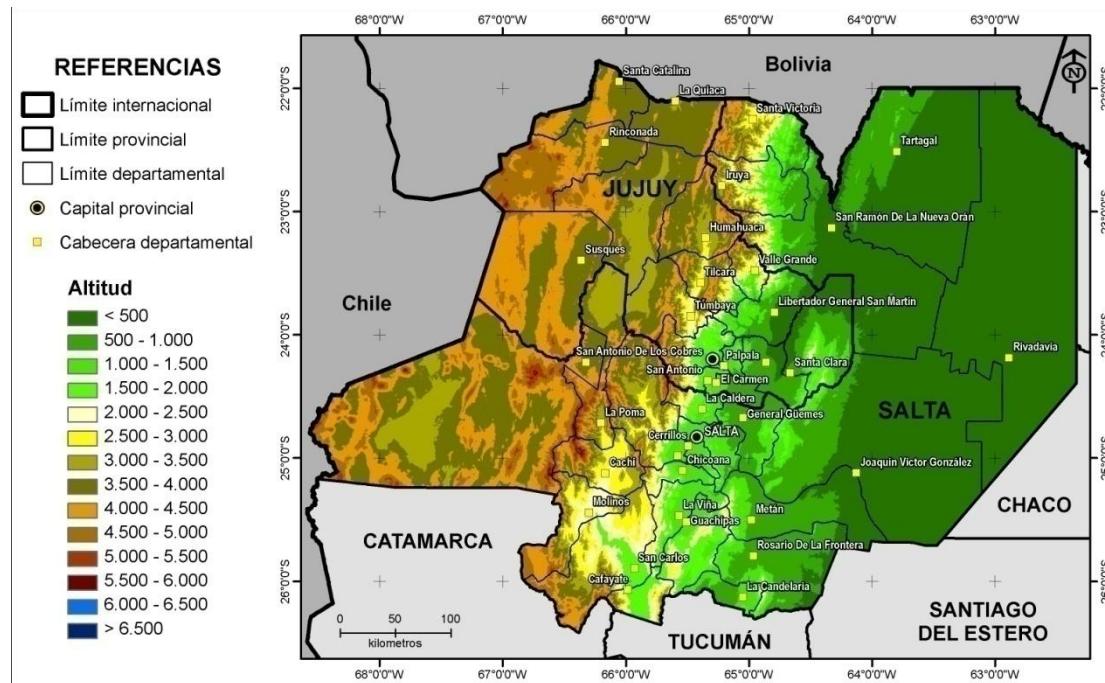


Figura 11: Modelo digital de terreno SRTM para las provincias de Salta y Jujuy.

- Pendiente: a partir del MDT se derivó una capa de porcentaje de pendiente (Figura 12).

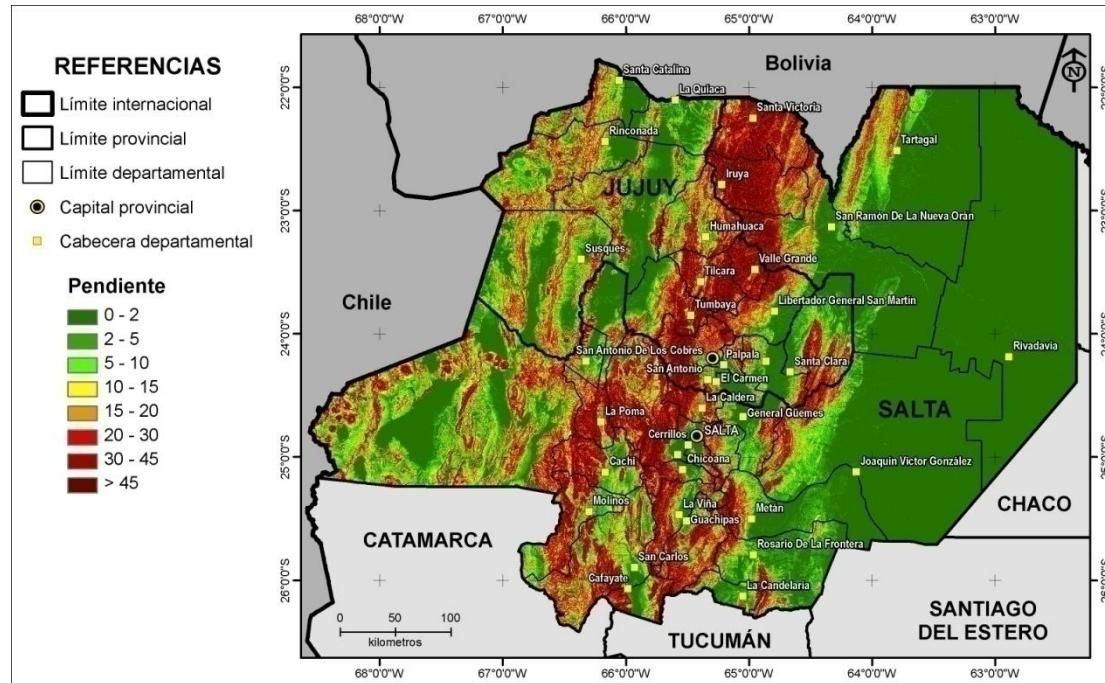


Figura 12: Mapa de porcentaje de pendiente elaborado a partir de modelo digital de terreno SRTM para las provincias de Salta y Jujuy.

- Exposición: a partir del MDT también se estimó la exposición del terreno, que representa la orientación del terreno respecto al norte expresada en grados (Figura 13).

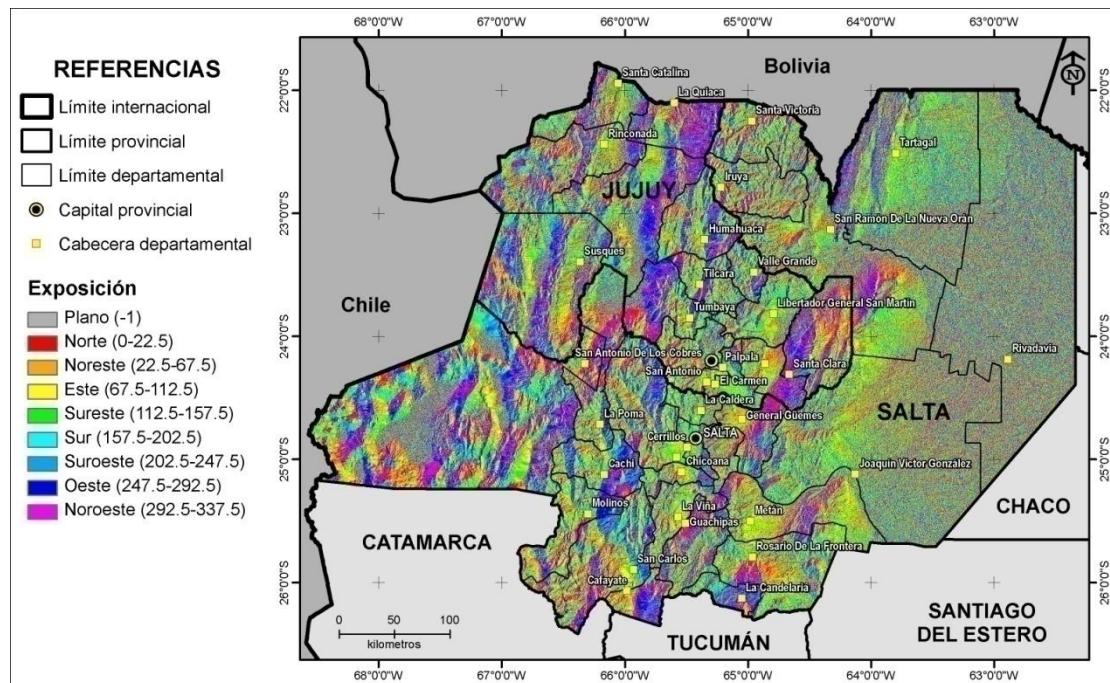


Figura 13: Mapa de exposición elaborado a partir de modelo digital de terreno SRTM para las provincias de Salta y Jujuy.

Precipitación media anual: rasterización de la capa de isohietas anuales del noroeste argentino (Bianchi 2005) (Figura 14) a celdas de 90 metros.

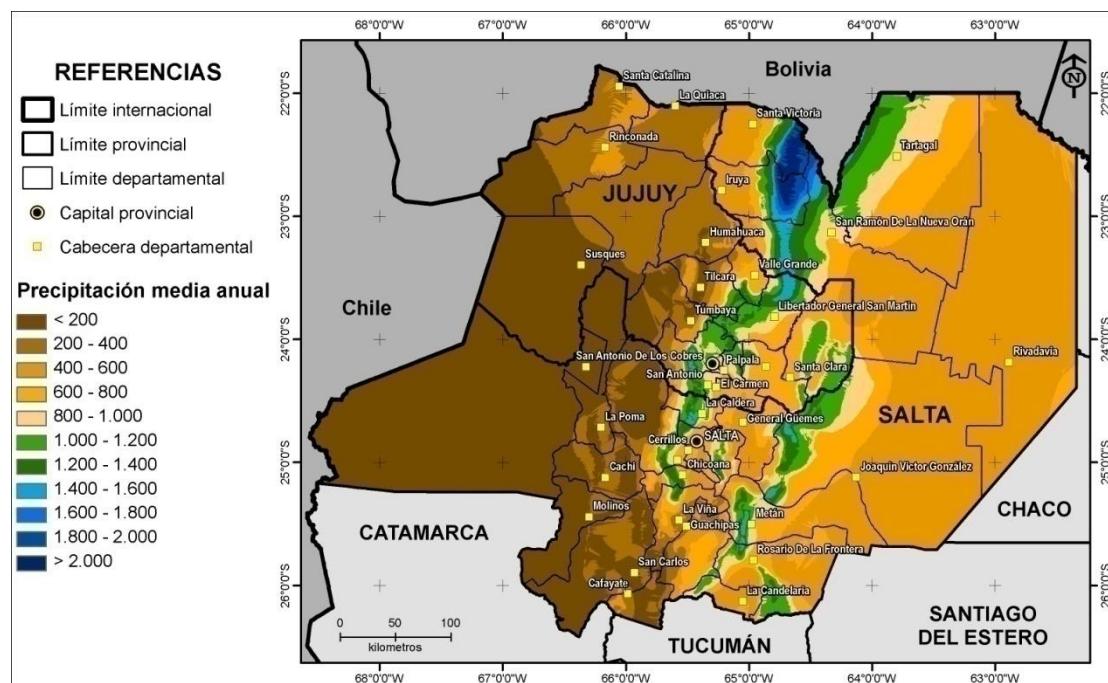


Figura 14: Precipitación anual media para las provincias de Salta y Jujuy según Bianchi 2005.

Temperatura media anual: temperatura media mensual del aire para ambas provincias (Figura 15). Resolución espacial 90 metros (Bianchi *et al.* 2005).

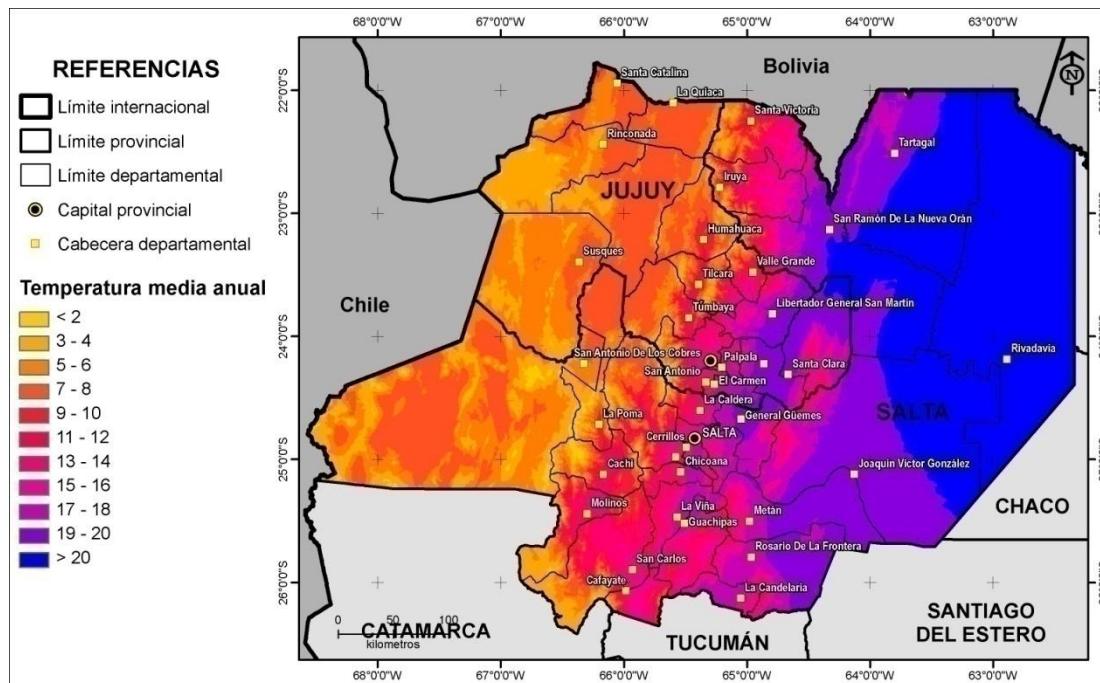


Figura 15: Temperatura media anual para las provincias de Salta y Jujuy según Bianchi et al. 2005.

Coberturas del suelo: esta capa de 17 tipos de coberturas del suelo (Figura 16) se generó ad hoc, con una resolución espacial de 500 metros. La misma resultó de la combinación de diferentes fuentes de información:

- *Imágenes de proporciones de vegetación leñosa para los años 2000, 2001, 2002, 2003, 2004 y 2005* (DiMiceli *et al.* 2001): A partir de ellas, se generó una clasificación no supervisada de 30 clases, luego reagrupadas en tipo de bosques: selva y bosque abierto.
- *Promedios quincenales de EVI (Enhancement Vegetation Index, Índice de Vegetación Mejorado) utilizando compuestos MODIS de 16 días desde el año 2000 al 2008* (Volante y Baldassini datos no publicados): Con estos datos se generó una clasificación no supervisada a partir de la cual se cartografiaron las diferentes coberturas del suelo: Suelo desnudo/ arbustal o pastizal ralo, Arbustal abierto, Pastizal puneño, Pastizal de neblina, Pastizal, Arbustal/pastizal, Arbustal/Bosque abierto, Bosque abierto/Arbustal y Ambiente ripario.
- *Coberturas del IGN – CONAE de la obra Argentina 500 K*: Se seleccionaron las coberturas embalse, lagunas, salinas y salares (IGN 2013).
- *Pastizales de neblina y otros pastizales provenientes del inventario de bosques nativos de Argentina* (UMSEF 2005).
- *Áreas transformadas actualizadas al 2014*: Derivadas de imágenes satelitales provistas por MODIS RAPID RESPONSE y procesadas según el Sistema de alerta temprana y monitoreo de pérdida de bosque nativo (Lizárraga 2011 c).
- *Imágenes satelitales nocturnas del año 2012*: Provenientes del NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC), versión 4 del producto DMSP-OLS Nighttime

Lights Time Series (disponible en <http://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html>): Este producto se utilizó para cartografiar áreas urbanas, periurbanas o con infraestructura.

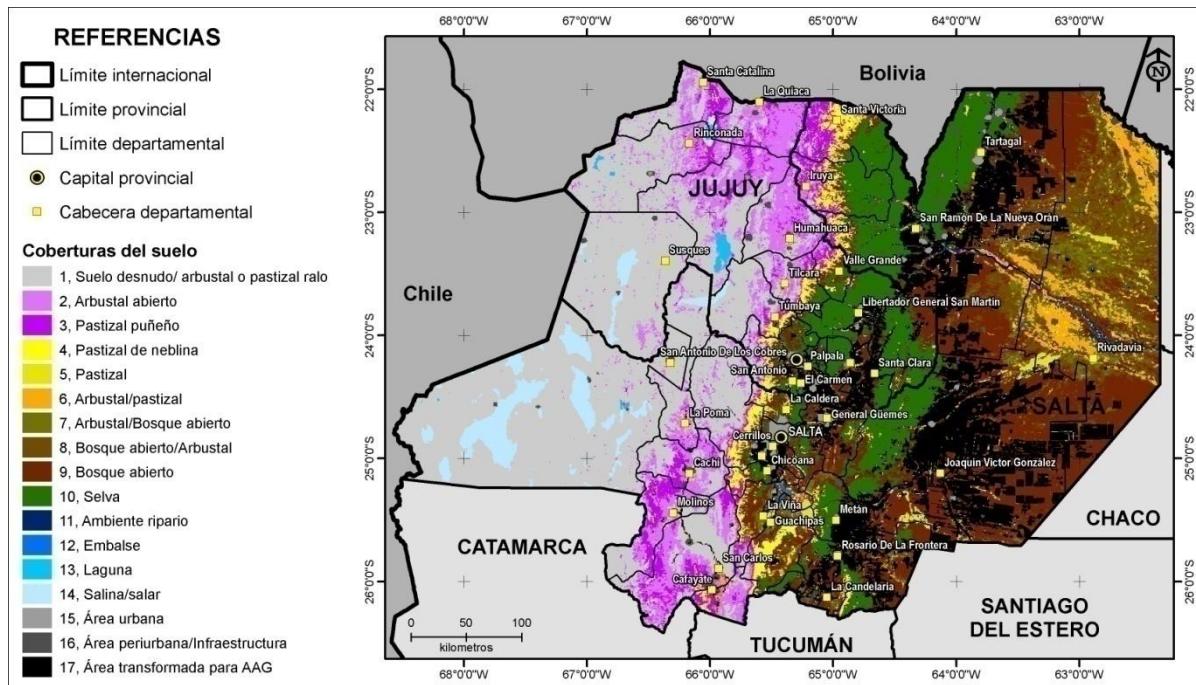


Figura 16: Mapa de coberturas del suelo de las provincias de Salta y Jujuy.

Descripción de las diferentes coberturas del suelo.

1. *Suelo desnudo/arbustal o pastizal ralo:* sectores con nula a baja cobertura vegetal leñosa o herbácea. La misma se relaciona con suelos desnudos y arbustales dispersos típicos de las eco-regiones de la Puna, Altos Andes y Monte de Sierras y Bolsones. Esta cobertura abarcó además sectores de playas de grandes ríos (Bermejo, Pilcomayo, San Francisco, Juramento, entre otros).
2. *Arbustal abierto:* comprende formaciones arbustivas de la Puna y Monte de Sierras y Bolsones, donde la cobertura leñosa es mayor o bien los arbustos son de mayor altura (1-1,5 metros) que la cobertura anterior.
3. *Pastizal puneño:* comprende formaciones herbáceas, o mixtas, típicas de las de la Puna y el Monte de Sierras y Bolsones, relacionadas con las cumbres o laderas más húmedas de estas ecoregiones (Chachi, Parque Nacional Los Cardones, Oeste de Cafayate) o bien con sectores bajos vecinos a cuerpos de agua (Laguna de Los Pozuelos, Abrapampa).
4. *Pastizal de neblina:* comprende formaciones herbáceas o mixtas localizadas en los sectores más altos de las serranías de las Selvas de Yungas.
5. *Pastizal:* abarca diferentes formaciones mayormente herbáceas localizadas en sectores bajos correspondientes a Selvas de Yungas o Chaco Seco. Los mismos pueden tener orígenes edáficos (Bañado de Los Quirquinchos) o bien antrópico (Valle de Acambuco).

6. *Arbustal/Pastizal*: formaciones vegetales mayormente arbustivas abiertas típicas de Chaco Seco, tales como las desarrolladas en los sectores aledaños a los ríos Bermejo y Pilcomayo.
 7. *Arbustal/Bosque Abierto*: comprende sectores con formaciones mayormente arbustivas mezcladas con bosques abiertos típicos del Chaco Seco.
 8. *Bosque abierto/Arbustal*: comprende sectores con formaciones mayormente boscosas mezcladas con vegetación arbustiva típica del Chaco Seco.
 9. *Bosque abierto*: bosques abiertos típicos del Chaco Seco, en general se corresponde con bosques de quebracho o “quebrachales”.
 10. *Selva*: diferentes tipos de selvas y bosques de montaña típicos de las Yungas: selva de transición o pedemontana, selva montana y bosque montano.
 11. *Ambiente ripario*: comunidades vegetales herbáceas y leñosas ligadas a grandes cursos de agua y sectores inundables.
 12. *Embalse*: cuerpos de agua artificiales.
 13. *Laguna*: cuerpos de agua naturales.
 14. *Salina/salar*: comprende las formaciones salinas típicas de la Puna y Altos Andes.
 15. *Área urbana*: áreas transformadas para uso residencial principalmente.
 16. *Área periurbana/Infraestructura*: áreas transformadas vecinas a las urbanas con usos mixtos, residenciales, agrícola ganaderos o industriales más áreas con infraestructura (minas, pozos petroleros o de gas) y pequeños poblados dispersos.
 17. *Áreas transformadas para actividades agrícola-ganaderas (AAG)*: áreas deforestadas para el desarrollo de actividades pecuarias.
- Producto MODIS 44 B Vegetation Continue Fields (Imágenes continuas de proporciones de vegetación): imágenes de proporciones de suelo desnudo (Figura 17), vegetación herbácea (Figura 18) y vegetación leñosa (Figura 19) para el año 2001 (DiMiceli *et al.* 2001).

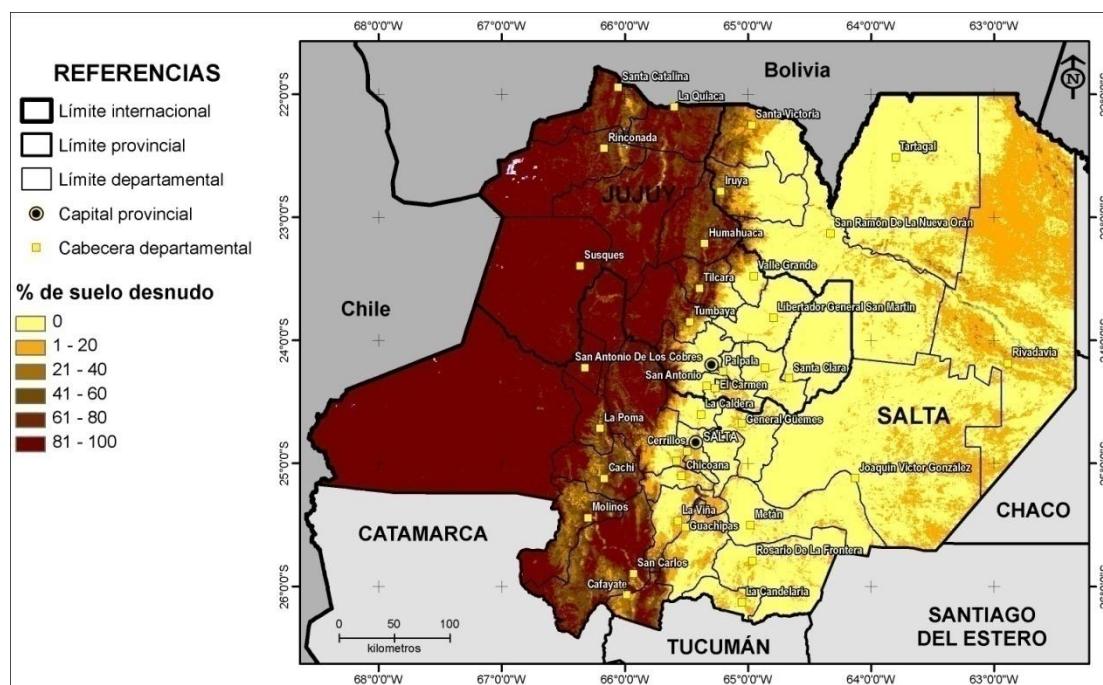


Figura 17: Mapa de porcentaje de suelo desnudo para las provincias de Salta y Jujuy, según DiMiceli *et al.* 2001.

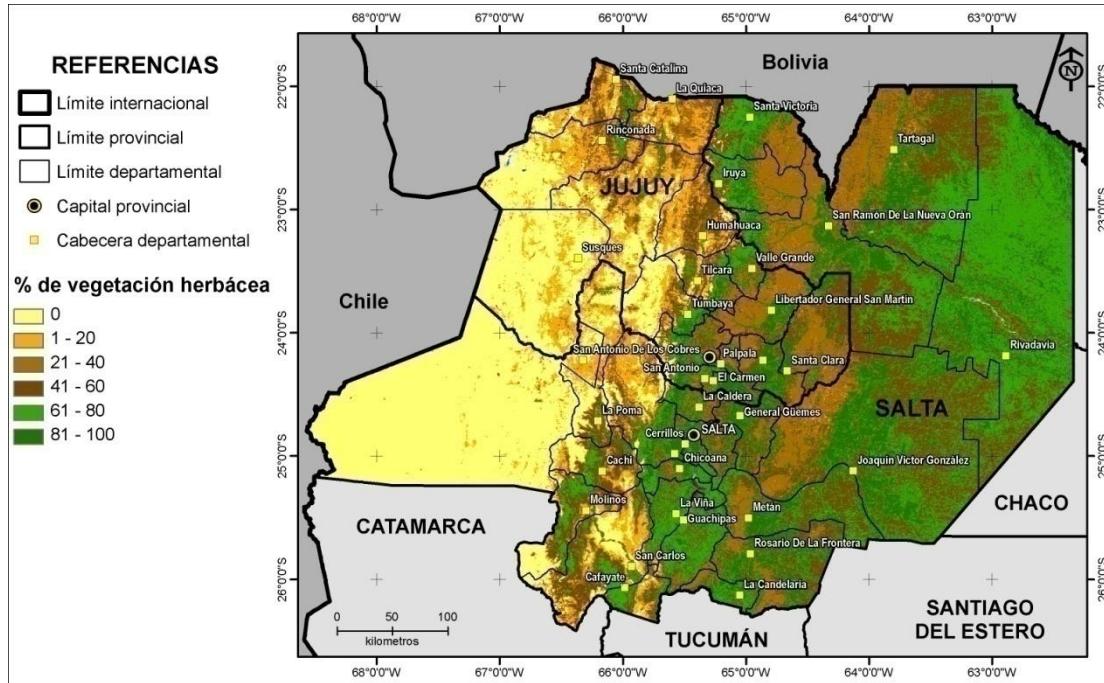


Figura 18: Mapa de porcentaje de vegetación herbácea para las provincias de Salta y Jujuy, según DiMiceli *et al.* 2001.

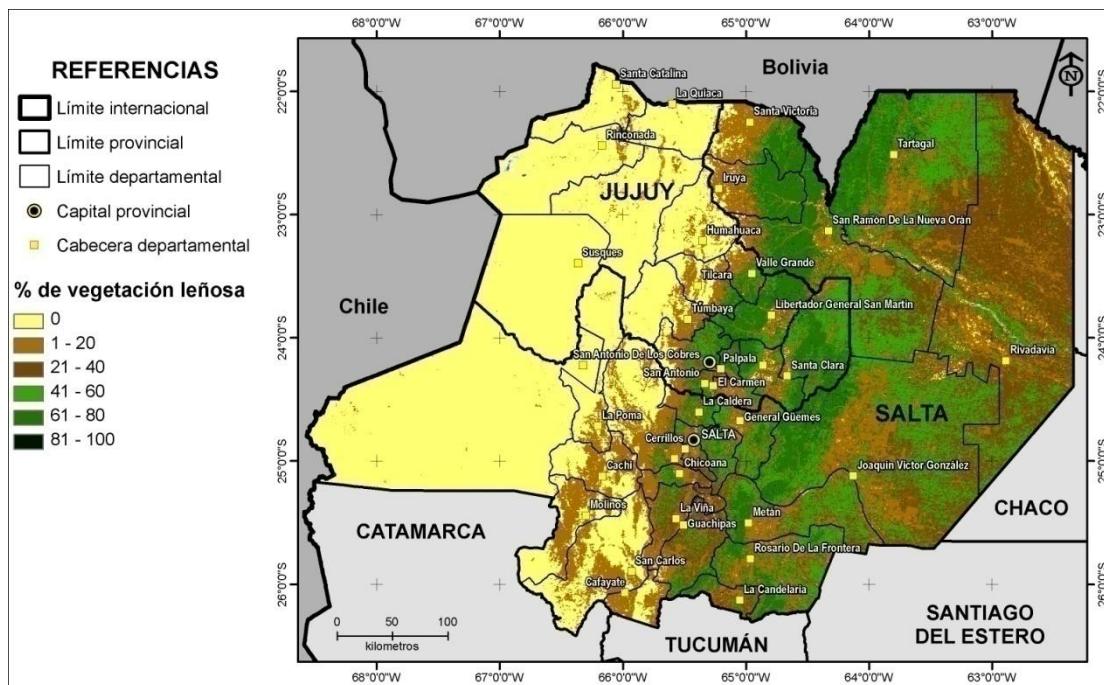


Figura 19: Mapa de porcentaje de vegetación leñosa para las provincias de Salta y Jujuy, según DiMiceli *et al.* 2001.

- Distancia a sitios transformados: finalmente a partir de las capas de áreas transformadas, áreas urbanas, periurbanas o con infraestructura, se derivó una nueva capa que representa la distancia euclídea de cada pixel a estas coberturas del suelo (Figura 20).

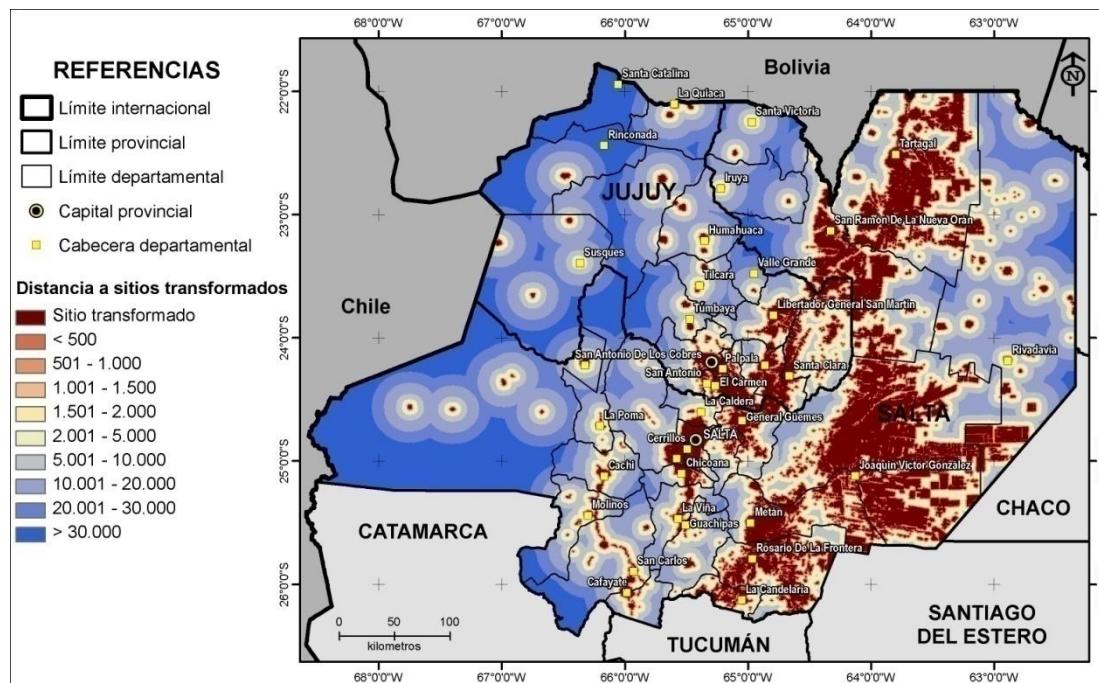


Figura 20: Mapa de distancia en metros a sitios transformados: áreas transformadas, áreas urbanas, periurbanas o con infraestructura

5.1.3 Confección de base de datos tipo ACCESS y de estadísticas por provincia, departamento y variables de caracterización

En esta etapa, se importó la información seleccionada a una base de datos tipo Access para facilitar la edición de consultas y la generación de mapas temáticos. Solo se ingresaron a la mismas focos con confiabilidad nominal y alta (Lizárraga 2010 a). A partir de ella se calcularon estadísticas para las provincias y departamentos de Salta y Jujuy, con las que se confeccionaron tablas, gráficos y mapas, al vincular dicha información con capas temáticas en un entorno de Sistema de Información Geográfica (SIG).

Puntualmente se calcularon:

- Estadísticas anuales y mensuales de focos de calor por provincia y departamento.
- Tendencia del registro anual a nivel provincial y para los departamentos con mayor registro. Para evaluar la tendencia de los datos a nivel provincial y departamental se aplicó el test Mann-Kendall (Oyonarte *et al.* 2014).

5.1.4 Cálculo de estadísticas por unidades cuadradas de 2 por 2 kilómetros

En una tercera instancia, con la finalidad de resumir y derivar información de los focos de calor MODIS se cruzaron los registros con una grilla de unidades de 2 kilómetros de lado (4 km^2 o 400 ha). Para cada celda se calculó:

1. El último año con registro de al menos un foco de calor: este dato sirvió para representar la distribución temporal general de los focos de calor registrados en la provincia de Salta y estimar la antigüedad de las áreas quemadas de determinado lugar.

2. La cantidad de años en los que se registraron focos de calor: a fin de contar con una estimación de la recurrencia de fuego en determinado lugar.
3. Número de focos totales registrados para el período en estudio: a fin de contar con un indicador de la magnitud de los incendios registrados.
4. Cantidad de focos de calor registrados por año: cociente entre el número de focos y la cantidad de años con registro.

Adicionalmente se calculó una regresión lineal entre el registro anual de focos de calor y la cantidad de celdas con datos por año para cada provincia.

5.1.5 Identificación de áreas recurrentes en cuanto a registros de focos de calor

Considerando la cantidad de años con registros de focos y agrupando las celdas con más de 4 años de registros, se mapearon e interpretaron áreas consideradas como lugares con alta recurrencia de incendios.

5.1.6 Interpretación visual de la distribución de focos de calor.

A partir de los mapas de celdas con focos de calor se realizó una caracterización general de la distribución de las mismas para cada provincia mediante interpretación visual apoyada sobre un entorno de SIG.

5.2 Evaluación de la confiabilidad de los focos de calor MODIS

Para realizar la evaluación se trabajó en el Área de estudio 2 (Figura 10), cumpliendo tres etapas:

- Generación de capas geográficas de áreas quemadas.
- Caracterización de las áreas quemadas.
- Evaluación de confiabilidad de los focos de calor MODIS.

5.2.1 Generación de capas geográficas de áreas quemadas

5.2.1.1 Selección y pre-procesamiento de imágenes satelitales

A fin de construir mapas de áreas quemadas se seleccionaron tres escenas Landsat 8 Path 231 Row 76, registradas durante la temporada de incendios 2013: principio (3 de julio), mediados (5 de setiembre) y fin (8 de noviembre). Ellas fueron obtenidas del sistema USGS Global Visualization Viewer (GLOVIS: <http://glovis.usgs.gov/>) (USGS 2014). De esta manera quedaron definidos dos periodos de evaluación: Julio-Setiembre y Setiembre-Noviembre.

Estas escenas que ya se encuentran georeferenciadas y ortorectificadas, fueron reproyectadas desde el sistema de referencia UTM Zona 20 Norte, datum WGS 84 a Posgar 94 Faja 3. Posteriormente fueron corregidas atmosféricamente para estimar su reflectancia utilizando el complemento Semi-Automatic Classification versión 3.1.0 (Congedo 2013) del programa QGIS 2.4 Chugiak (QGISDT 2014).

5.2.1.2 Procesamiento de imágenes satelitales

Por no contar con información de áreas quemadas, se procesaron las escenas para delimitar polígonos de incendios ocurridos en el área de estudio con el fin de evaluar la confiabilidad de los focos de calor detectados por las imágenes Landsat 231/076

El procesamiento constó de dos fases, una automática, y otra de interpretación visual.

Para la primera, se calcularon varios índices espectrales (NDVI, NBR, BAI, BAIM y MIRBI). De ellos se eligió el MIRBI para calcular las 2 imágenes de diferencias entre tiempo sucesivos. MIRBI se eligió porque presentó un buen contraste para áreas quemadas y por recomendación de Gómez Nieto y Martín (2008). Los nuevos productos fueron interpretados visual e individualmente para obtener los umbrales de discriminación entre áreas quemadas y no quemadas. Luego de generar las imágenes binarias, se vectorizaron las mismas para obtener polígonos de incendios ocurridos para los dos períodos de evaluación.

La segunda fase del procesamiento consistió en evaluar todos los polígonos generados mediante interpretación visual, eliminando algunos y agregando partes u otros no detectados automáticamente. Este proceso se realizó utilizando composiciones de color 7,5,5 (UMSEF 2007), 11,5,2 (Mosciaro 2010), composiciones de índices espectrales (MIRBIs y BAIMs) e imágenes de diferencias.

5.2.2 Caracterización de las áreas quemadas.

Finalmente para cada polígono quemado se calculó superficie, perímetro, coordenadas de los centroides y se incorporaron atributos como el periodo de tiempo al cual correspondían, de división política y la cobertura del suelo afectada.

5.2.3 Evaluación de confiabilidad de los focos de calor MODIS

La evaluación se realizó comparando los focos de calor registrados durante el periodo de tiempo entre la obtención de dos imágenes y los polígonos de áreas quemadas.

Basándose en lo propuesto por Chuvieco y colaboradores (2012) se definió la confiabilidad de los focos de calor MODIS a partir de dos valores independientes:

1. *Porcentaje de aciertos y falsas alarmas*: se indagó sobre cuántos focos de calor señalaron efectivamente polígonos de áreas quemadas (aciertos) y cuantos se correspondieron con falsas alarmas (error de comisión o falsos positivos) para cada par de escenas. Para ello se seleccionaron, mediante SIG, los focos localizados a menos de 1,5 km de distancia de los polígonos de áreas quemadas. Esta distancia se considera una estimación conservadora del efecto de posibles desplazamientos geométricos entre las imágenes MODIS y las Landsat (Chuvieco *et al.* 2012). Posteriormente se calcularon valores porcentuales de aciertos y errores.
2. *Nivel de detección de áreas quemadas*: se calculó cuantos polígonos de áreas quemadas fueron detectados por los focos de calor. Para ello, se consideró que existe un error de omisión cuando el perímetro quemado no posee ningún foco de calor a menos de 1,5 km de distancia (Chuvieco *et al.* 2012). Posteriormente se calculó el porcentaje de áreas

quemadas detectadas y el error de omisión para cada par de escenas, discriminados por superficie.

Finalmente se seleccionaron las falsas alarmas, a fin de evaluar si se correspondían con algún patrón espacial respecto a las coberturas del suelo o sensores MODIS montados en las diferentes plataformas satelitales (Aqua y Terra).

Como un análisis adicional se realizaron regresiones lineales simples entre el número de polígonos quemados y superficie quemada con el número de focos de calor considerando los datos por departamento desde julio hasta noviembre de 2013.

5.3 Comparación entre los focos de calor y estadísticas oficiales

A partir de las estadísticas forestales publicadas por el Programa Nacional de Estadística Forestal (PNEF 2014), se obtuvieron los valores anuales de cantidad y superficie afectada por incendios en las provincias de Salta y Jujuy para los años 2003 y 2013. Estos valores se compararon con el número total de focos de calor MODIS registrados en cada provincia en el mismo periodo de tiempo, a partir de análisis de regresión lineal y gráficos comparativos.

6 RESULTADOS

6.1 Focos de calor en Salta y Jujuy

En total se ingresaron 100.991 datos correspondientes a los años 2003 al 2013. Como anexo digital de la presente tesina se adjunta la misma: focos_calor_v1.accd. En el futuro ella puede ser actualizada incorporando datos nuevos.

6.1.1 Estadísticas provinciales

Para la provincia de Salta se registraron 91.627 focos de calor MODIS durante el periodo 2003-2013, con un promedio anual de 8.330 ± 1.157 focos (intervalo de confianza 95%) (Tabla 3 y Figura 21 A). El máximo registro ocurrió en 2009 y el mínimo en 2003.

Los focos de calor de los años 2008, 2010 y 2011 estuvieron por encima del promedio para dicha provincia, pero por debajo del límite superior del intervalo de confianza (LSIC). En cambio los años 2007, 2009 y 2013, superaron el promedio y LSIC. Éstos últimos se consideraron como años con alta ocurrencia de incendios.

Los focos de calor para los años 2004 y 2005 resultaron menores al promedio provincial, pero superaron el límite inferior del intervalo de confianza (LIIC). En cambio los años 2003, 2006 y 2012, presentaron valores menores al LIIC.

Respecto a la tendencia del registro, no se encontró tendencia significativa en la serie de datos de la provincia de Salta ($p>0,05$), aunque se observó un leve incremento de focos de calor entre 2003 y 2013.

Para la provincia de Jujuy se registraron 9.364 focos de calor MODIS durante el periodo 2003-2013, con un promedio anual de focos de calor fue de 851 focos +/- 251 (intervalo de confianza 95%) (Tabla 4 y Figura 21 B). El máximo registro ocurrió en 2013 y el mínimo en 2006. Los años 2009, 2010, 2011 y 2013 estuvieron por del LSIC. Estos fueron considerados años con graves ocurrencias de incendios. Los años 2003, 2007, 2008 y 2012 resultaron con valores por debajo del promedio pero sin ser menores al LIIC. En cambio, 2004, 2005 y 2006, sí resultaron menores a este valor.

Respecto a la tendencia del registro, se encontró una tendencia positiva significativa en la serie de datos de la provincia de Jujuy ($p<0,05$).

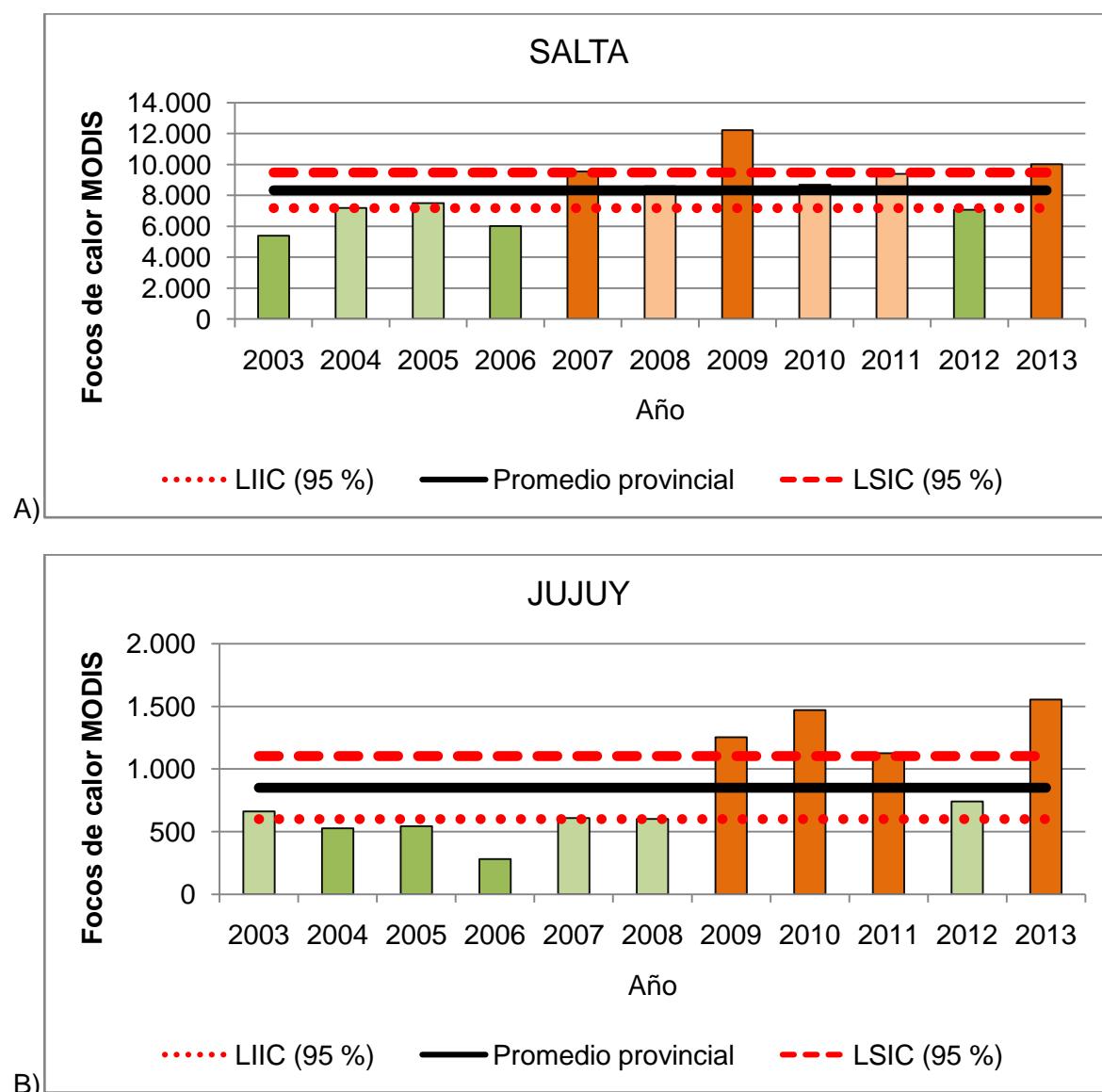


Figura 21: Focos de calor MODIS registrados entre los años 2003 y 2013 en A) la provincia de Salta y B) la provincia de Jujuy. En tonos verdes se representan los años que no superaron el promedio provincial de la serie, en verde oscuro aquellos menores al límite inferior del intervalo de confianza (LIIC) y en verde claro aquellos mayores. En tonos naranjas, se representan los años que superaron el promedio provincial, en naranja claro aquellos que no superaron el límite superior del intervalo de confianza (LSIC) y en naranja aquellos que sí lo hicieron.

6.1.2 Estadísticas departamentales

Al discriminar los datos de la provincia de Salta por departamentos (Tabla 3 y Figura 22) se observó que el 98% de los focos MODIS, registrados entre 2003 y 2013, se localizaron en 9 de los 23 departamentos de la provincia.

El departamento con mayor cantidad de focos de calor MODIS fue Anta: 33.179 registros (36% de los datos). El segundo lugar lo ocupó el departamento General José de San Martín: 24.037 (26% de los datos) y Orán fue el tercero: 11.525 (13%). Estos tres departamentos sumaron el 75% de los registros de la provincia de Salta.

Metán, Rivadavia y Rosario de La Frontera continuaron en orden de importancia, totalizando 8% para el primer departamento y 6% para cada uno de los dos restantes. Finalmente General Güemes, Capital y la Candelaria alcanzaron un 1% cada uno. El resto de los 14 departamentos salteños no sumaron más de una unidad porcentual de focos de calor: menos de 300 registros.

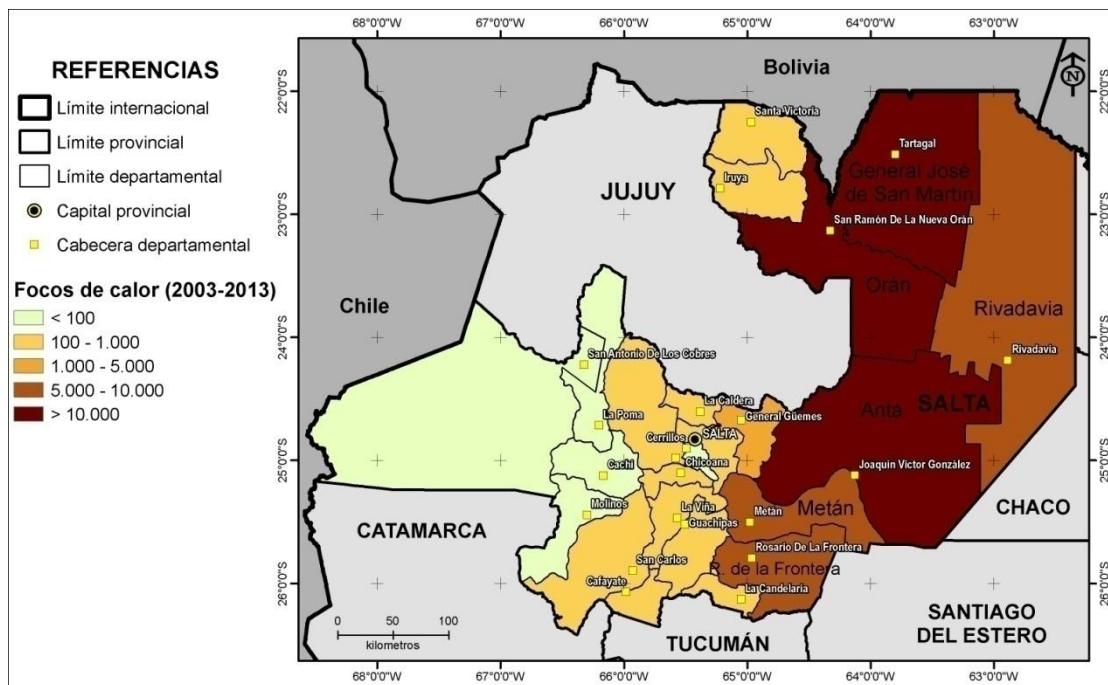


Figura 22: Focos de calor MODIS registrados en la provincia de Salta entre los años 2003 y 2013, por departamento.

En Jujuy (Tabla 4 y Figura 23) se observó que el 96% de los focos MODIS registrados entre 2003 y 2013, se localizaron en 6 de los 16 departamentos de la provincia.

El departamento con mayor cantidad de focos de calor MODIS fue Santa Bárbara: 4.853 registros (52% de los datos). El segundo lugar lo ocupó el departamento San Pedro: 1.740 (19% de los datos) y Ledesma fue el tercero: 1.409 (15%). Estos tres departamentos sumaron el 85% de los registros de la provincia de Jujuy.

En orden de importancia se ubicaron luego: El Carmen, Doctor Manuel Belgrano y Palpalá, totalizando 7, 2 y 2% de los datos, respectivamente. El resto de los 10 departamentos jujeños no sumaron más de 1% de los datos, o sea menos de 100 registros en total.

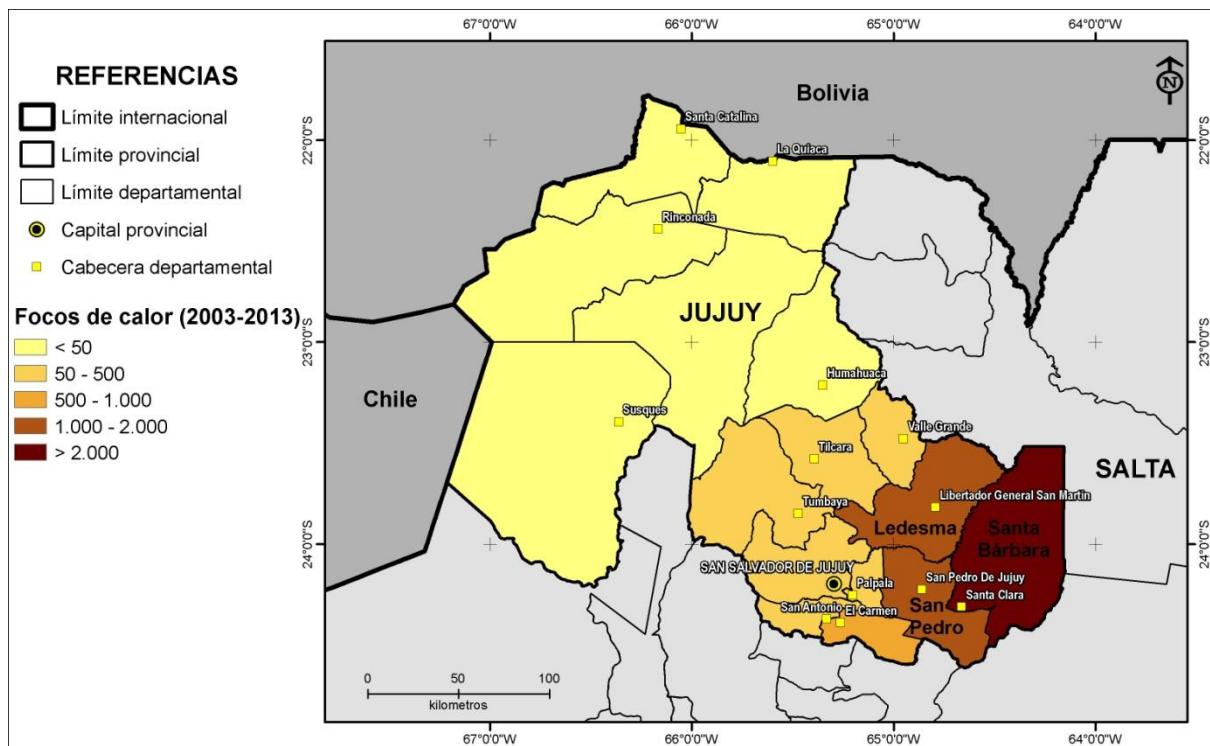


Figura 23: Focos de calor MODIS registrados en la provincia de Jujuy entre los años 2003 y 2013, por departamento.

Tabla 3: Focos de calor MODIS registrados en la provincia de Salta entre los años 2003 y 2013, por departamento.

DEPARTAMENTO	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	TOTAL	%
ANTA	2.516	3.818	3.473	2.642	3.942	2.636	3.742	2.942	3.051	2.131	2.286	33.179	36
GENERAL JOSE DE SAN MARTIN	1.155	1.685	1.942	1.699	2.748	2.370	3.573	2.002	1.984	1.726	3.153	24.037	26
ORAN	592	504	825	712	822	1.346	1.051	661	1.495	1.237	2.340	11.585	13
METAN	368	359	389	467	838	468	1.011	1.022	1.012	321	642	6.897	8
RIVADAVIA	84	133	133	76	447	605	1.451	820	857	623	638	5.867	6
ROSARIO DE LA FRONTERA	295	461	416	266	373	737	812	646	571	683	329	5.589	6
GENERAL GÜEMES	92	69	46	53	77	164	124	210	161	152	202	1.350	1
CAPITAL	48	31	51	26	84	36	106	91	78	38	101	690	1
LA CANDELARIA	33	21	39	14	45	61	88	61	50	17	42	471	1
LA VIÑA	27	4	26	2	18	35	68	29	12	39	41	301	0
GUACHIPAS	31	14		7	28	34	47	44	18	5	42	270	0
SANTA VICTORIA	22	15	31	13	45	12	19	19	12	9	45	242	0
CHICOANA	19	15	7	6	12	17	18	41	31	22	27	215	0
ROSARIO DE LERMA	26	10	14	5	19	15	23	19	22	14	12	179	0
CAFAYATE	11	9	69	8	2	10	4	12	7	7	5	144	0
SAN CARLOS	20	16	9	4	14	8	16	15	10	8	10	130	0
LA CALDERA	8	3	8	4	15	8	22	4	11	13	30	126	0
IRUYA	23		15	5	3	5	16	5	2	6	44	124	0
CERRILLOS	9	3	2	1	6	2	18	24	4	9	5	83	0
LA POMA	3	7	1	5	1	9	3	16	1	3	5	54	0
MOLINOS	3	11	1	1	5	7	5	4	4		4	45	0
CACHI	11	3	4	1	5		4	3	2	2	6	41	0
LOS ANDES	1	1				4		1			1	8	0
FOCOS REGISTRADOS POR AÑO	5.397	7.192	7.501	6.017	9.549	8.589	12.221	8.691	9.395	7.065	10.010	91.627	100

Tabla 4: Focos de calor MODIS registrados en la provincia de Jujuy entre los años 2003 y 2013, discriminados por departamento.

DEPARTAMENTO	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	TOTAL	%
SANTA BARBARA	232	256	200	121	319	257	786	853	726	314	789	4.853	52
SAN PEDRO	177	109	96	72	102	131	125	248	237	189	254	1.740	19
LEDESMA	127	70	102	41	94	71	170	249	55	111	319	1.409	15
EL CARMEN	70	51	34	15	56	87	99	38	76	71	89	686	7
DOCTOR MANUEL BELGRANO	15	5	17	3	7	24	21	7	4	10	39	152	2
PALPALA	3	15	7	6	12	12	33	12	8	8	32	148	2
SAN ANTONIO	12	1	23	5	6	8	11	11	5	3	10	95	1
TILCARA	2	3	39	3		1		19	1		5	73	1
VALLE GRANDE	14		14	1	1		8	18	1	5	3	65	1
TUMBAYA	4	11		6				6	6	21	1	55	1
HUMAHUACA	2	4	6		1	4		2	1	1	7	28	0
COCHINOCA	2		2	3	1	2		3	1	1	1	16	0
RINCONADA			3	4	2	1		2		1	1	14	0
SANTA CATALINA			1	1	1		1	1	5		2	12	0
YAVI					3	2		1		2	2	10	0
SUSQUES	1	1			2					4		8	0
FOCOS REGISTRADOS POR AÑO	661	526	544	281	607	600	1.254	1.470	1.126	741	1.554	9.364	100

Respecto al registro anual de focos de calor MODIS en los tres departamentos con mayor cantidad de registros de la provincia de Salta, se pudo observar que Anta presentó un promedio anual de 3.016 ± 378 . El máximo ocurrió en 2007 y el mínimo en 2012 (Figura 24). No se observó una tendencia significativa en esta serie ($p>0,05$).

Los años 2006 y 2010 alcanzaron valores inferiores al promedio pero superiores al LIIC, mientras que 2003, 2008, 2012 y 2013 mostraron diferencias más notorias. El año 2011 fue superior al promedio departamental pero no superó el LSIC. En cambio los años 2004, 2005, 2007 y 2009 superaron dicho valor.

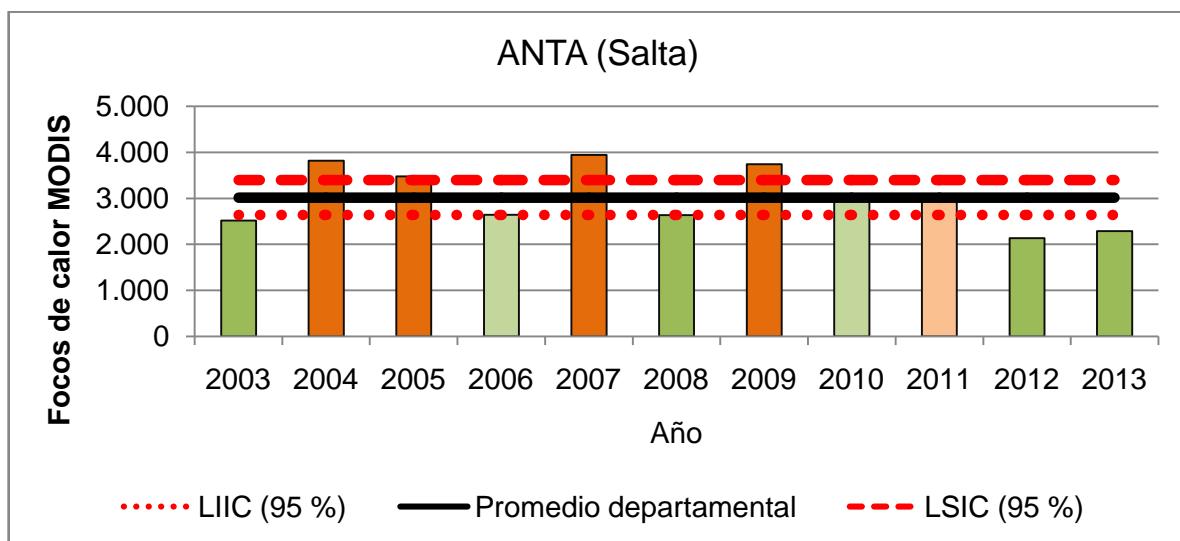


Figura 24: Focos de calor MODIS registrados por año en el departamento de Anta (Periodo 2003-2013). En tonos verdes se representan los años que no superaron el promedio provincial de la serie, en verde oscuro aquellos menores al límite inferior del intervalo de confianza (LIIC) y en verde claro aquellos mayores. En tonos naranjas, se representan los años que superaron el promedio provincial, en naranja claro aquellos que no superaron el límite superior del intervalo de confianza (LSIC) y en naranja aquellos que sí lo hicieron.

Para el departamento de General San Martín, el registro anual medio resultó de 2.185 ± 378 focos de calor MODIS. El valor máximo ocurrió en 2009 y el mínimo en 2003 (Figura 25). No se observó una tendencia significativa en esta serie ($p>0,05$).

Los años 2005, 2010 y 2011 alcanzaron valores menores al promedio pero mayores al LIIC, mientras que 2003, 2004, 2006 y 2012 mostraron diferencias más notorias. El año 2008 fue superior al promedio pero menor al LSIC, en cambio los años 2007, 2009 y 2013 lo superaron.

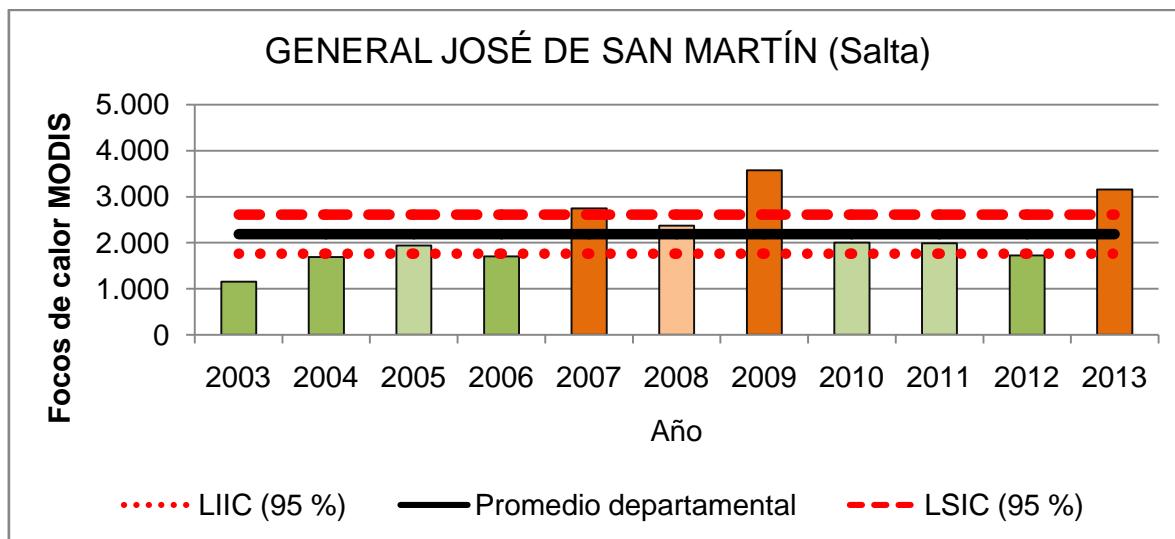


Figura 25: Focos de calor MODIS registrados por año en el departamento de General San Martín (Periodo 2003-2013). En tonos verdes se representan los años que no superaron el promedio provincial de la serie, en verde oscuro aquellos menores al límite inferior del intervalo de confianza (LIIC) y en verde claro aquellos mayores. En tonos naranjas, se representan los años que superaron el promedio provincial, en naranja claro aquellos que no superaron el límite superior del intervalo de confianza (LSIC) y en naranja aquellos que sí lo hicieron.

Para el departamento Orán, el registro anual medio resultó de 1.053 ± 316 focos de calor MODIS. El valor máximo ocurrió en 2013 y el mínimo en 2004 (Figura 26). Sí se encontró una tendencia significativa positiva en esta serie ($p < 0.05$).

Los años 2005, 2007 y 2009 alcanzaron valores menores al promedio departamental pero superior al LIIC, mientras que 2003, 2004, 2006 y 2010 mostraron diferencias más notables. Los años 2008 y 2012 fueron superiores al promedio pero no superaron el LSIC, mientras que 2011 y 2013 lo hicieron.

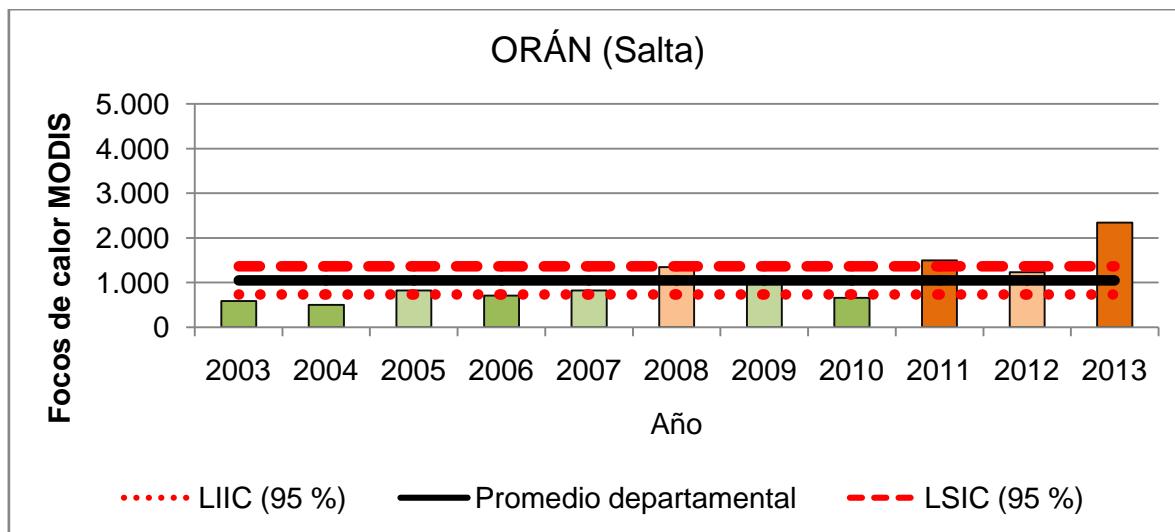


Figura 26: Focos de calor MODIS registrados por año en el departamento Orán (Periodo 2003-2013). En tonos verdes se representan los años que no superaron el promedio provincial de la serie, en verde oscuro aquellos menores al límite inferior del intervalo de confianza (LIIC) y en verde claro aquellos mayores. En tonos naranjas, se representan los años que superaron el promedio provincial, en naranja claro aquellos que no superaron el límite superior del intervalo de confianza (LSIC) y en naranja aquellos que sí lo hicieron.

Para los departamentos de Jujuy se pudo observar que en Santa Bárbara el registro anual medio resultó 441 +/- 167 focos de calor MODIS. El máximo ocurrió en 2010 y el mínimo en 2006 (Figura 27). Se detectó una tendencia positiva significativa para este departamento ($p<0,05$).

Los años 2003, 2004, 2005, 2006 y 2008 alcanzaron valores menores al LIIC. Los valores para 2007 y 2012 fueron menores al promedio pero mayores al LIIC. Los registros para los años 2009, 2010, 2011 y 2013 siempre fueron superiores al LSIC.

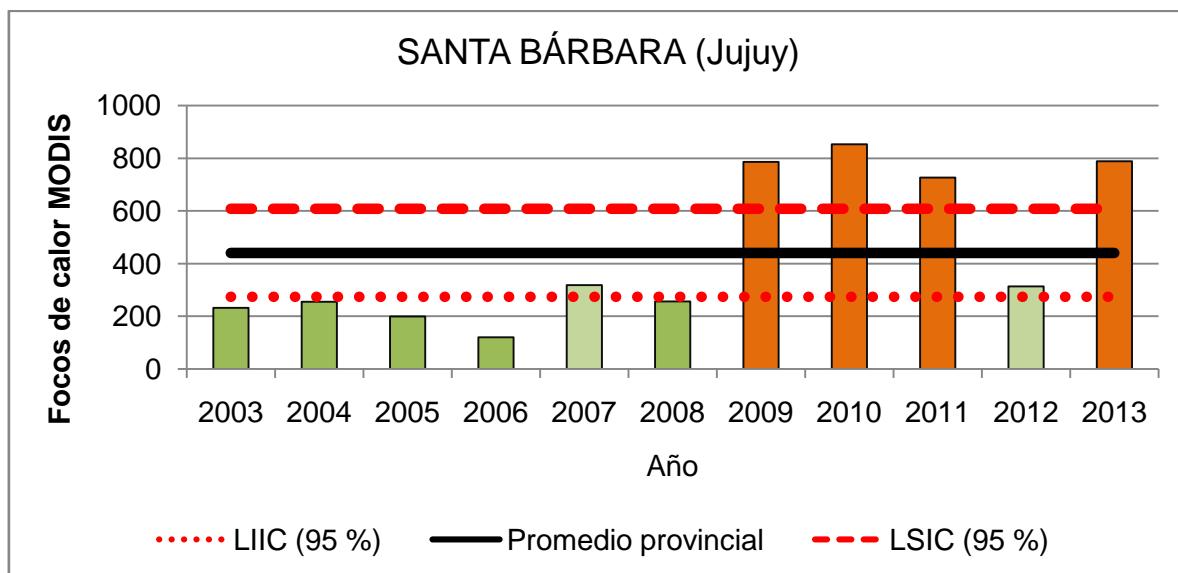


Figura 27: Focos de calor MODIS registrados por año en el departamento de Santa Bárbara (Periodo 2003-2013). En tonos verdes se representan los años que no superaron el promedio provincial de la serie, en verde oscuro aquellos menores al límite inferior del intervalo de confianza (LIIC) y en verde claro aquellos mayores. En tonos naranjas, se representan los años que superaron el promedio provincial, en naranja claro aquellos que no superaron el límite superior del intervalo de confianza (LSIC) y en naranja aquellos que sí lo hicieron.

Para el departamento San Pedro, el registro anual medio resultó 158 +/- 39 focos de calor MODIS. El valor máximo ocurrió en 2013 y el mínimo en 2006 (Figura 28). Se detectó una tendencia positiva significativa para este departamento ($p<0,05$).

Los años 2008 y 2009 alcanzaron valores menores al promedio pero más altos que el LIIC, mientras que 2004, 2005, 2006 y 2007 mostraron diferencias significativas. Los años 2003 y 2012 fueron superiores al promedio pero sin superar el LSIC. En cambio los años 2010, 2011 y 2013 superaron este valor.

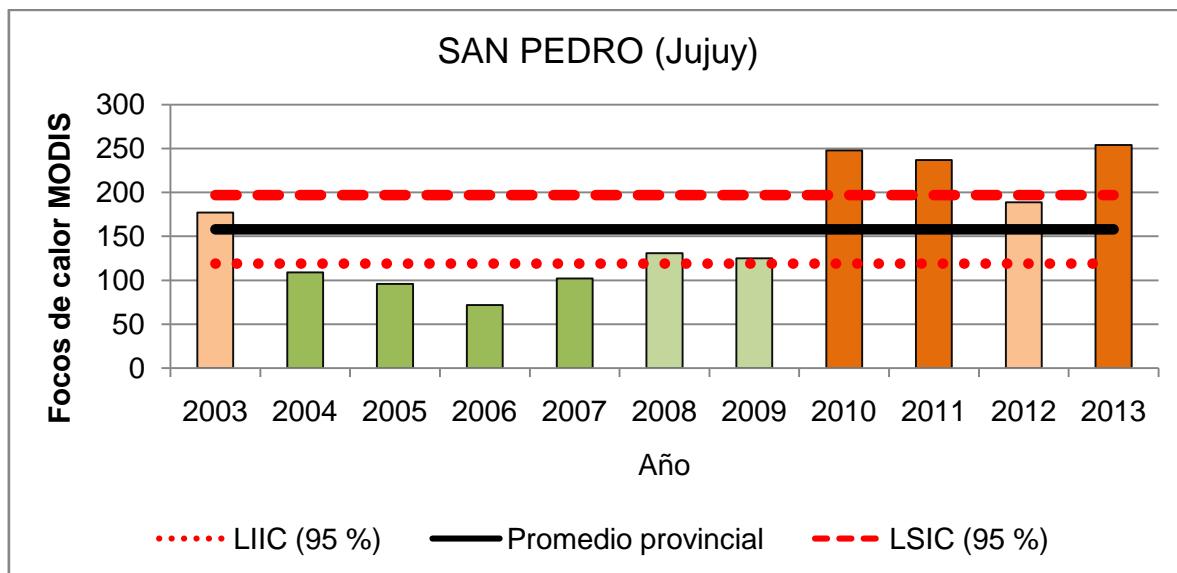


Figura 28: Focos de calor MODIS registrados por año en el departamento de San Pedro (Periodo 2003-2013). En tonos verdes se representan los años que no superaron el promedio provincial de la serie, en verde oscuro aquellos menores al límite inferior del intervalo de confianza (LIIC) y en verde claro aquellos mayores. En tonos naranjas, se representan los años que superaron el promedio provincial, en naranja claro aquellos que no superaron el límite superior del intervalo de confianza (LSIC) y en naranja aquellos que sí lo hicieron.

Para el departamento Ledesma, el registro anual medio resultó 128 ± 51 focos de calor MODIS. El valor máximo ocurrió en 2013 y el mínimo en 2006 (Figura 29). No se detectó una tendencia significativa para este departamento ($p>0,05$). Los años 2003, 2005, 2007 y 2012 alcanzaron valores menores al promedio y superiores al LIIC, mientras que 2004, 2006, 2008 y 2011 mostraron diferencias más significativas. Los años 2009, 2010 y 2013 fueron superiores al promedio, mostrando los dos últimos valores mayores al LSIC.

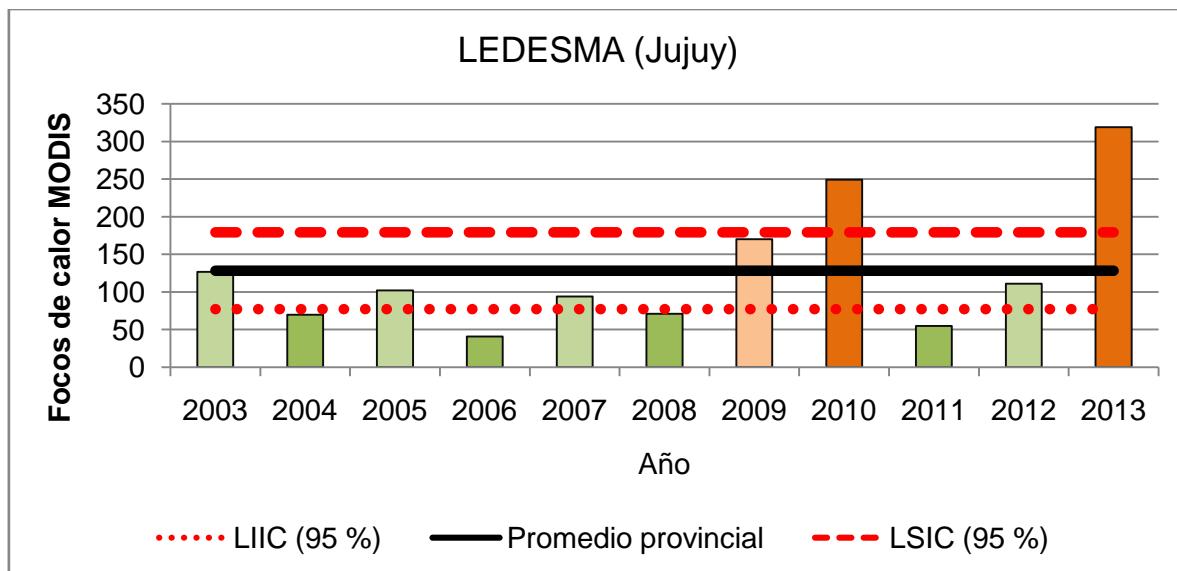


Figura 29: Focos de calor MODIS registrados por año en el departamento Ledesma (Periodo 2003-2013). En tonos verdes se representan los años que no superaron el promedio provincial de la serie, en verde oscuro aquellos menores al límite inferior del intervalo de confianza (LIIC) y en verde claro aquellos mayores. En tonos naranjas, se representan los años que superaron el promedio provincial, en naranja claro aquellos que no superaron el límite superior del intervalo de confianza (LSIC) y en naranja aquellos que sí lo hicieron.

6.1.3 Análisis temporal de focos de calor

A fin de caracterizar la distribución temporal de los focos de calor MODIS registrados en el área de estudio para el Periodo 2003-2013, se agruparon los datos por mes y año para cada provincia (Tabla 5 y Figura 30 A para Salta y Tabla 6 y Figura 30 B para Jujuy). A partir de ella, se calcularon parámetros de estadística descriptiva considerando 11 años de datos y se elaboraron histogramas promedio.

Tabla 5: Focos de calor MODIS registrados en la provincia de Salta agrupados por año y mes (Periodo 2003-2013).

AÑO	MESES												TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2003	0	156	64	16	69	104	496	1.187	1.403	831	933	138	5.397
2004	300	163	154	16	78	361	743	976	1.493	1.909	700	299	7.192
2005	220	63	41	7	110	56	343	1.522	1.975	1.801	1.140	223	7.501
2006	128	359	101	16	121	123	233	877	1.494	1.061	1.399	105	6.017
2007	53	98	84	152	316	290	1.232	1.307	2.253	1.776	1.362	626	9.549
2008	200	142	66	23	98	273	811	1.689	1.985	1.397	1.434	471	8.589
2009	455	387	205	74	263	247	561	2.504	2.010	3.084	2.285	146	12.221
2010	299	217	46	22	41	97	278	1.140	1.906	1.757	1.900	988	8.691
2011	183	112	74	13	42	150	506	1.475	3.075	1.647	1.585	533	9.395
2012	344	167	233	18	106	259	565	1.350	1.965	1.592	397	386	7.382
2013	208	239	151	204	147	270	572	1.888	3.354	2.126	1.008	367	10.534
TOTAL	2.390	2.103	1.219	561	1.391	2.230	6.340	15.915	22.913	18.981	14.143	4.282	92.468
%	3	2	1	1	2	2	7	17	25	21	15	5	100
PROMEDIO	239	191	111	51	126	203	576	1.447	2.083	1.726	1.286	389	8.406
D. EST.	114	103	65	66	88	99	280	460	621	585	535	261	1.990
N	10	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
LIIC. 95%	168	130	72	12	75	144	411	1.175	1.716	1.380	970	235	7.230
LSIC 95%	310	252	149	90	178	261	742	1.719	2.450	2.071	1.602	544	9.582

Tabla 6: Focos de calor MODIS registrados en la provincia de Jujuy agrupados por año y mes (Periodo 2003-2013).

AÑO	MESES												TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2003		20	7	4	8	31	94	142	172	77	87	19	661
2004	49	14	5	1	12	38	57	103	86	119	23	19	526
2005	34	14	1		3	3	45	191	106	127	20		544
2006	3	6	2		1	10	16	59	109	29	44	2	281
2007		7	2		3	25	95	117	176	101	77	4	607
2008	14	20	4	4	5	38	64	127	135	57	102	30	600
2009	31	16	13	1	4	45	59	160	223	328	353	21	1.254
2010	44	36	8	3	9	12	89	230	194	186	529	130	1.470
2011	43	7	8	1	4	24	65	198	176	218	245	137	1.126
2012	46	25	29	2	5	35	46	131	134	144	69	75	741
2013	46	63	26	7	10	31	77	259	592	310	105	28	1.554
TOTAL	310	228	105	23	64	292	707	1.717	2.103	1.696	1.654	465	9.364
%	3	2	1	0	1	3	8	18	22	18	18	5	100
PROMEDIO	34	21	10	3	6	27	64	156	191	154	150	47	851
DESV. EST.	16	17	10	2	3	13	24	59	139	98	161	50	426
N	9	11	11	8	11	11	11	11	11	11	11	10	11
INT. INF	24	11	4	1	4	19	50	121	109	96	55	15	600
INT. SUP	45	31	15	4	8	34	78	191	273	212	245	78	1.103

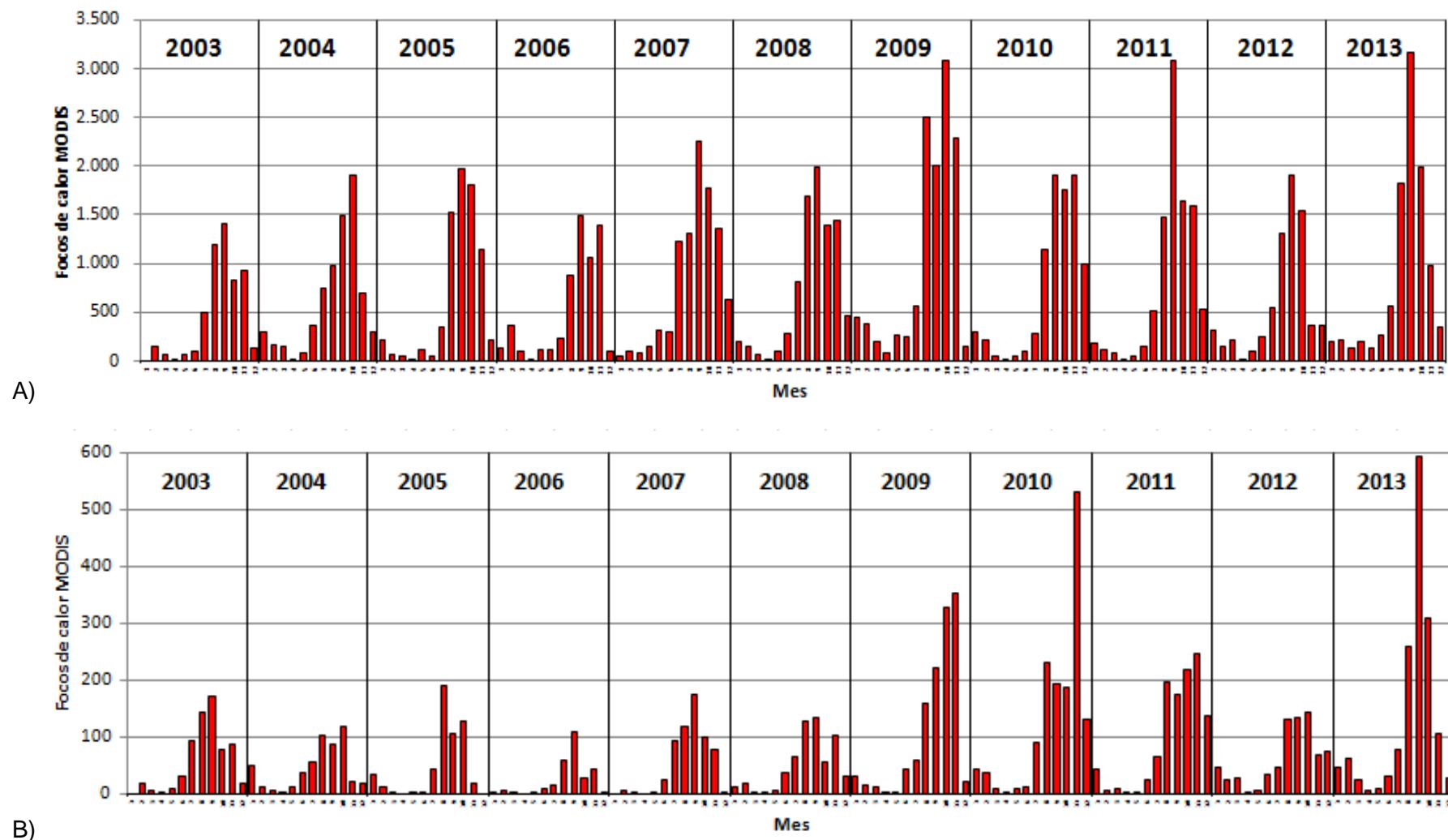


Figura 30: Distribución mensual de focos de calor MODIS registrados entre los años 2003 al 2013 en A) la provincia de Salta. B) la provincia de Jujuy.

En la Figura 30 A se observa la variabilidad mensual año tras año del registro de focos en Salta, destacándose por su magnitud los Setiembrés de 2011 y 2013 y los altos registros sostenidos de 2009: desde Agosto a Noviembre, con máximo en Octubre, y de 2007: que no fue muy alto pero sí muy extendido (Mayo a Diciembre). Para el caso de Jujuy (Figura 30 B) se destacaron los Noviembres de 2009 y 2010 y el Setiembre de 2013 más los registros sostenidos de 2010 y 2011 (Junio a Diciembre).

La distribución temporal promedio de focos de calor MODIS para Salta (03-13) resultó una curva unimodal con un valor máximo en el mes de setiembre y valor mínimo en abril (Figura 31).

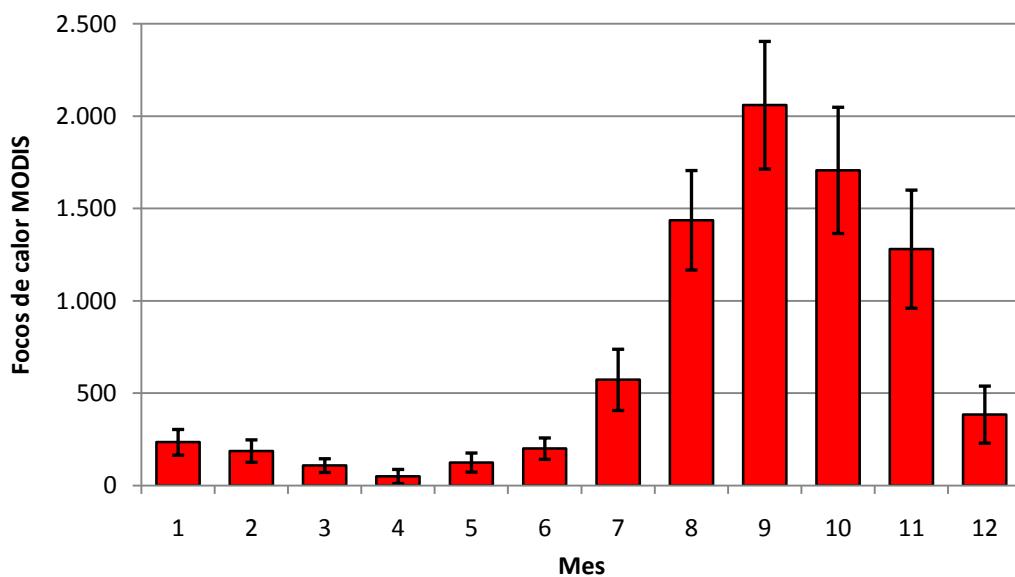


Figura 31: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en la provincia de Salta (Periodo 2003-2013).

Durante los primeros 6 meses del año, se registró un bajo número de focos de calor MODIS con variabilidad interanual pequeña. Desde Julio, el registro comienza a incrementarse notablemente junto a la variabilidad interanual. El pico máximo corresponde a Setiembre. Luego el registro se torna descendente para los últimos meses del año, resultando de gran magnitud la diferencia entre Noviembre y Diciembre.

Tal como se muestra en la Figura 32, la Figura 33 y la Figura 34, los 3 departamentos de Salta con mayor registro siguieron el mismo patrón unimodal del histograma provincial con valor máximo en Setiembre. Aunque las dimensiones del registro fueron distintas: en Anta el registro máximo mensual superó los 2.000 focos, mientras que en San Martín el valor máximo apenas pasó los 500 y en Orán, el máximo no superó los 500 focos de calor MODIS.

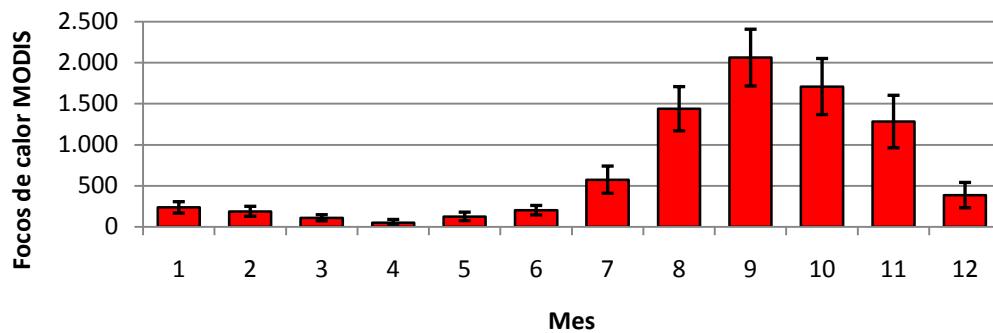


Figura 32: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en el departamento de Anta, provincia de Salta (Periodo 2003-2013).

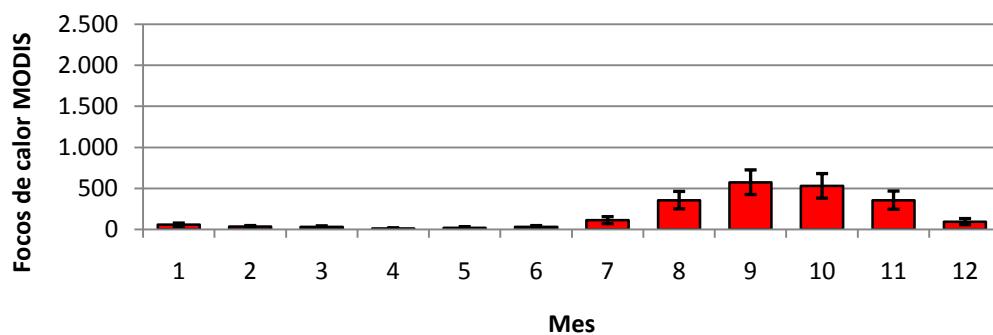


Figura 33: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en el departamento de General San Martín, provincia de Salta (Periodo 2003-2013).

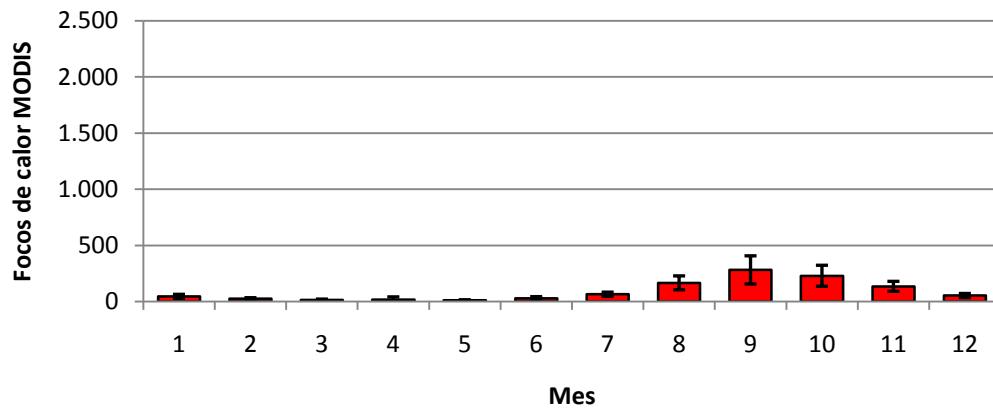


Figura 34: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en el departamento de Orán, provincia de Salta (Periodo 2003-2013).

Para Jujuy, la distribución temporal promedio de focos de calor MODIS (03-13) resultó en un histograma unimodal con valor máximo en Setiembre y valor mínimo en abril (Figura 35). Durante los primeros 6 meses del año, se registró en promedio un bajo número de focos de calor MODIS con una variabilidad interanual pequeña. En Julio el registro comienza a incrementarse notablemente junto a la variabilidad interanual hasta llegar al pico máximo en

Setiembre. Luego el registro desciende levemente en Octubre y mantiene en Noviembre, para finalmente mostrar un gran descenso en Diciembre.

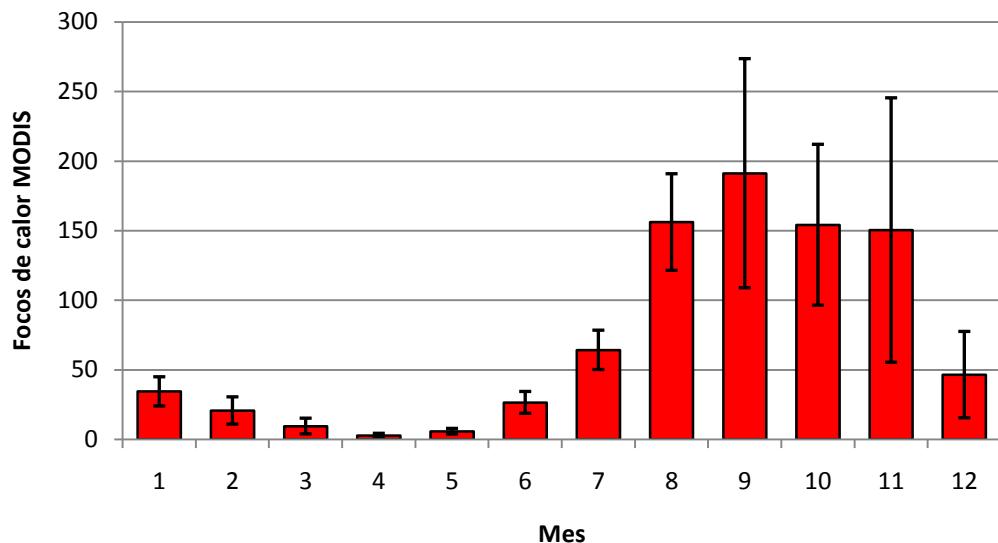


Figura 35: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en la provincia de Jujuy (Periodo 2003-2013).

Tal como se muestra en la Figura 36, Figura 37 y Figura 38, los 3 departamentos de Jujuy con mayor registro de focos de calor mostraron diferencias respecto a la distribución promedio mensual de focos de calor de la provincia.

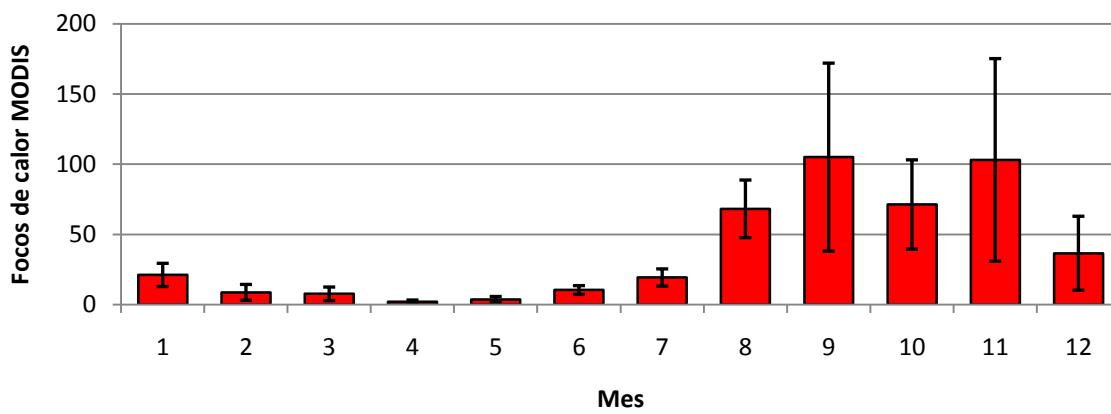


Figura 36: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en el departamento de Santa Bárbara, provincia de Jujuy (Periodo 2003-2013).

El departamento San Bárbara presentó una distribución bimodalidad, con máximos en Setiembre y Noviembre (Figura 36). Cabe destacar que estos máximos presentaron altísimas variabilidades.

San Pedro presentó una curva unimodal con máximo en Agosto, pero con una meseta que se continúa entre este mes y Octubre (Figura 37). También todos estos meses tuvieron alta variabilidad interanual.

Por último Ledesma presentó un máximo en Octubre de menos de 40 focos de calor y con altísima variabilidad (Figura 38). Cabe destacar además la variabilidad que presenta Noviembre en este último caso.

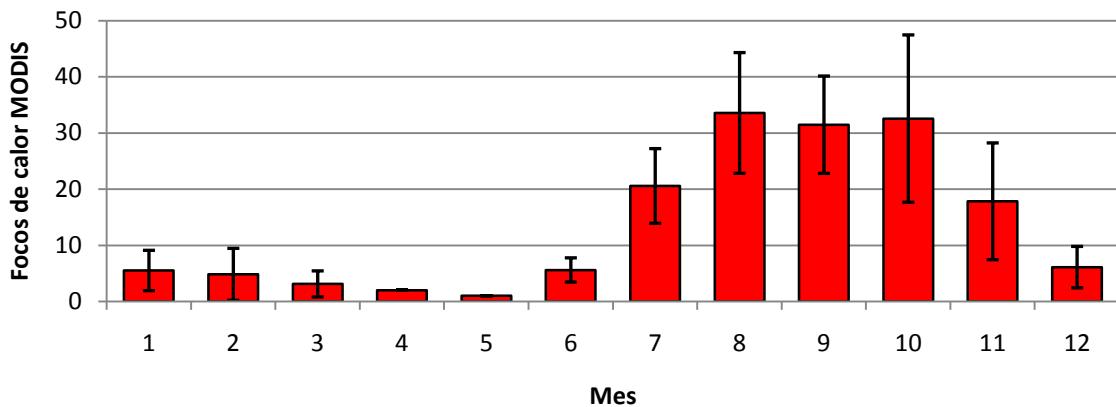


Figura 37: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en el departamento de San Pedro, provincia de Jujuy (Periodo 2003-2013).

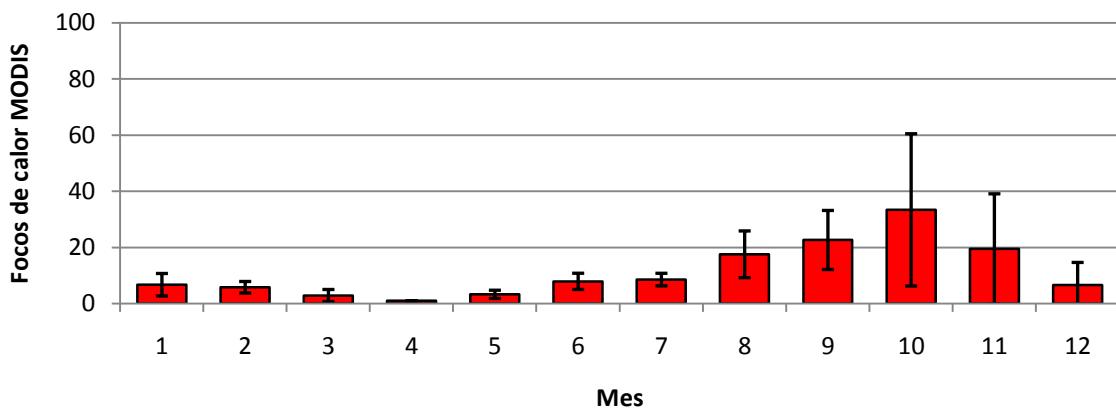


Figura 38: Distribución mensual promedio de focos de calor MODIS registrados en el departamento de Ledesma, provincia de Jujuy (Periodo 2003-2013).

6.1.4 Distribución espacial de las celdas con focos de calor

Para la provincia de Salta, se contabilizaron 47.945 celdas. De ellas, 12.679 (26%) tuvieron al menos un registro de un foco de calor entre 2003 y 2013. Para la provincia de Jujuy, cuyo territorio total fue cubierto por 16.347 celdas, se registraron 1.177 unidades con registro de focos entre 2003 y 2013 (11%). En la Tabla 7 se resumen las cantidades anuales de celdas con focos para ambas provincias.

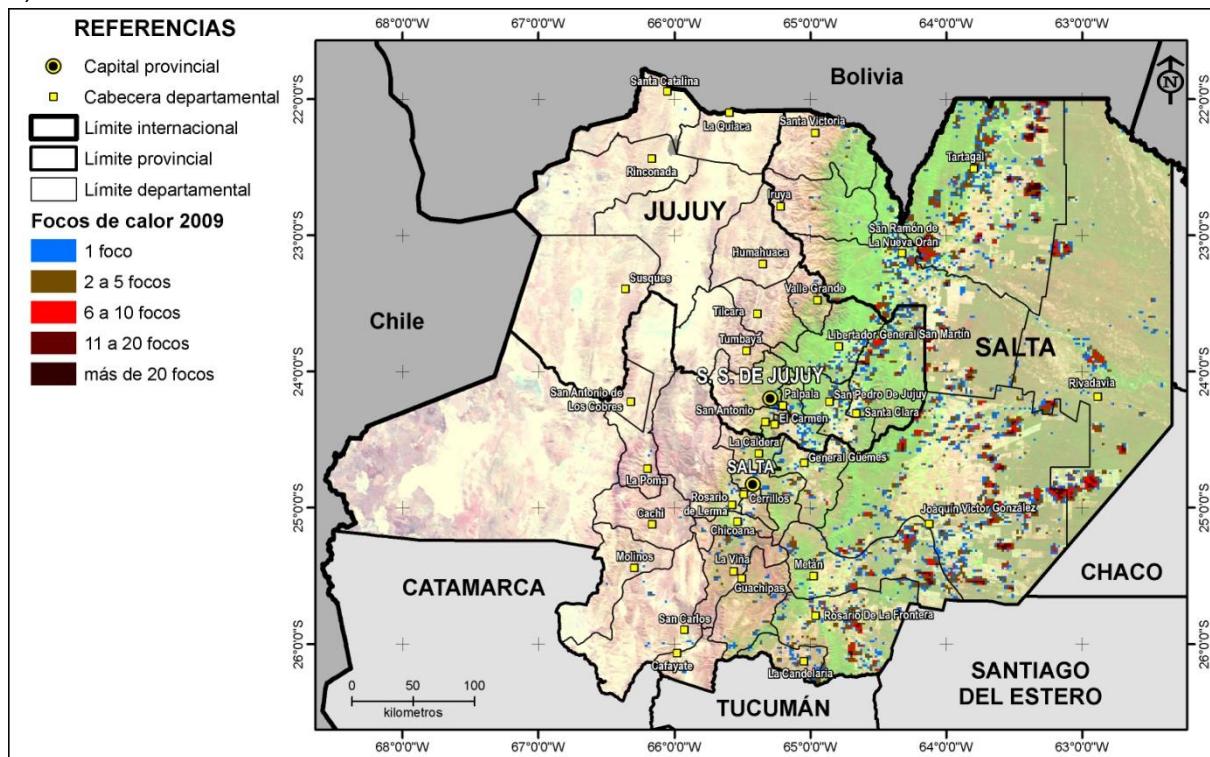
Tabla 7: Número de celdas, cuadradas de 2 kilómetros de lado, con registro de focos de calor en las provincias de Salta y Jujuy por año.

	AÑO	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
SALTA	FRECUENCIA	2.097	1.831	1.950	1.633	2.554	2.499	3.653	2.923	2.673	2.255	3.222
	%	4,4	3,8	4,1	3,4	5,3	5,2	7,6	6,1	5,6	4,7	6,7
JUJUY	FRECUENCIA	394	276	298	196	313	346	555	545	418	359	582
	%	2,4	1,7	1,8	1,2	1,9	2,1	3,4	3,3	2,6	2,2	3,6

Para Salta el año con mayor número de celdas con registro fue el 2009 (3.653 celdas; 7,6% del total provincial), seguido por el 2013 (3.222; 6,7%) y 2010 (2.923; 6,1%). También se destacaron 2011, 2007 y 2008. Para Jujuy el año con más celdas con focos fue el 2013 (582; 3,6% del total provincial), seguido por el 2009 (555; 3,4%) y el 2010 (545; 3,3%). También se destacó 2011.

En la Figura 39 y se presenta, a modo de ejemplo, la distribución espacial de las celdas para los años 2009 y 2013, años con gran cantidad de registros. En el Anexo 1 de la presente tesina se adjuntan todos los mapas anuales del registro de focos en Salta y Jujuy (Periodo 2003-2013).

A)



B)

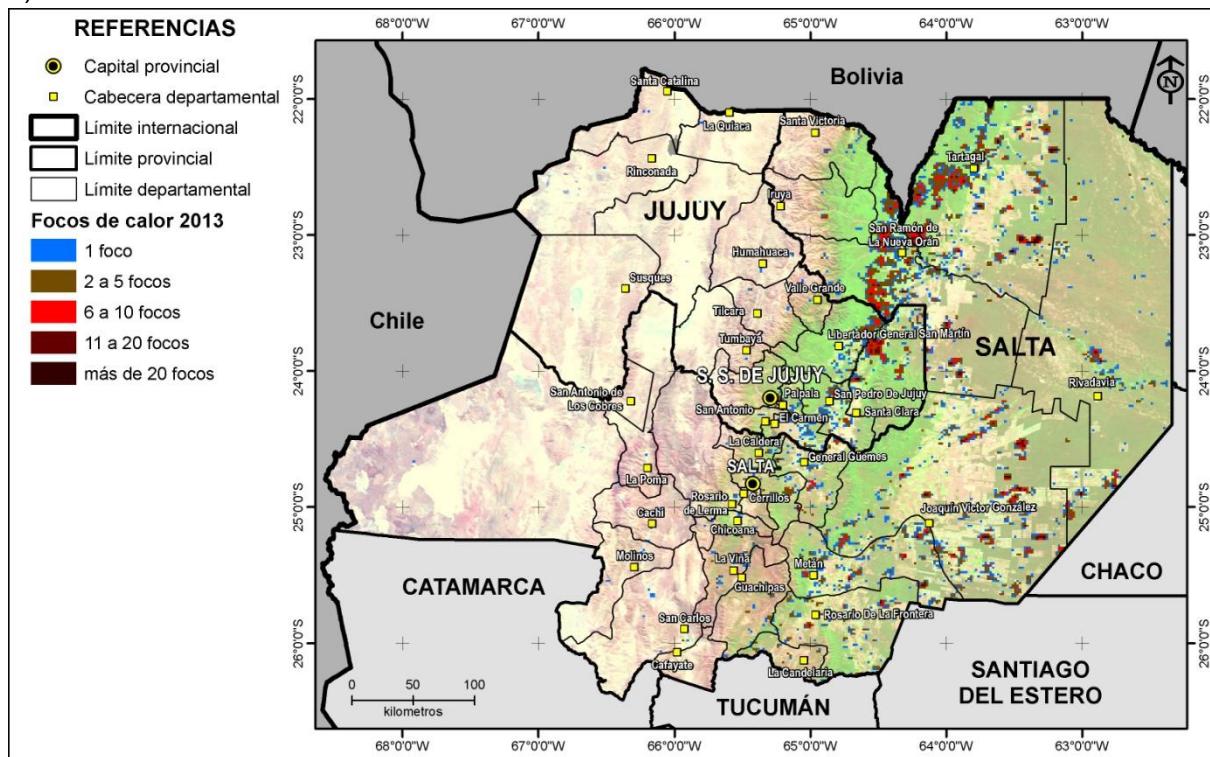


Figura 39: Distribución espacial de celdas con registros de focos de calor MODIS en las provincias de Salta y Jujuy. A) Focos de calor registrados en 2009. B) Focos de calor registrados en 2013.

6.1.4.1 Relación cantidad de focos y número de celdas por año

Al comparar los valores anuales de celdas con la cantidad de focos registrados por año en ambas provincias, se encontró una excelente relación entre variables ($p < 0,05$; $R^2 = 0,97$) (Figura 40).

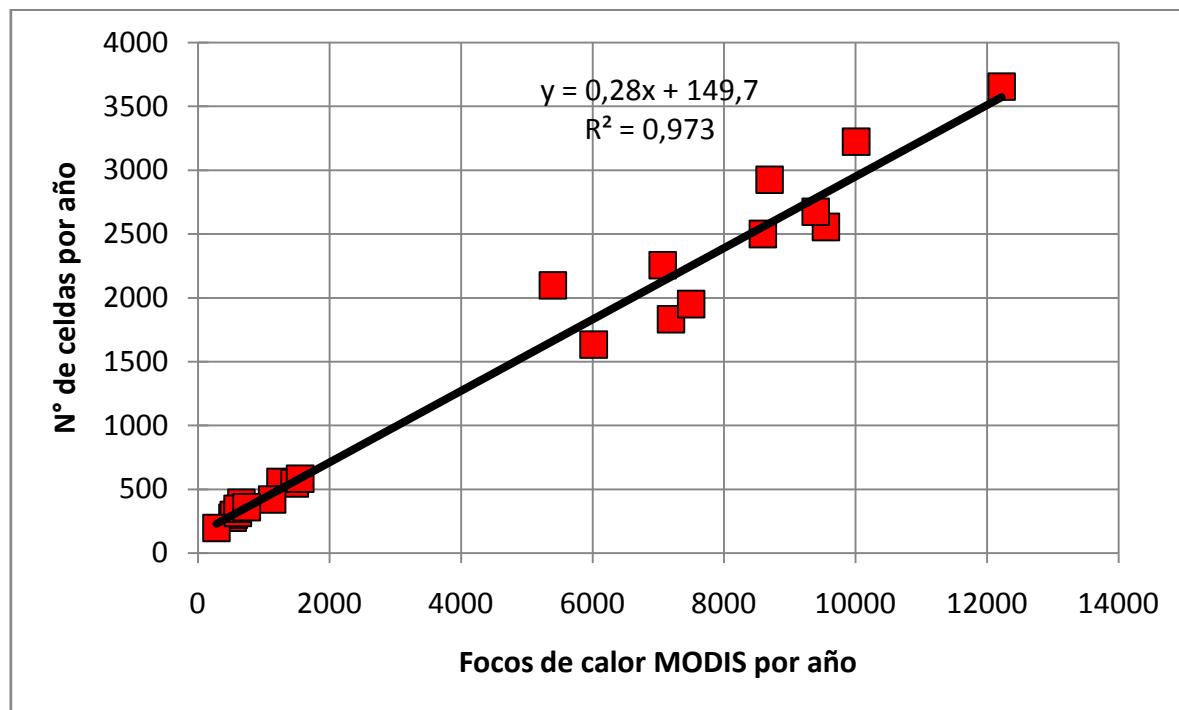


Figura 40: Relación entre el registro anual de focos de calor y la cantidad de celdas de 2 km de lado registradas en las provincias de Salta y Jujuy para el periodo 2003-2013.

6.1.4.2 Celdas clasificadas según su último año de registro de focos de calor

Respecto al último año con registro de focos de calor (Tabla 8 y Figura 41), para Salta se encontró que el 25% de ellas tuvo registro en 2013, el 13% en 2012, el 12% en 2011, el 11% en 2010 y el 12% en 2009; por lo que el 74% de las celdas tuvieron registros de focos de calor en el último quinquenio. El 26% restante se distribuyó entre los 6 años anteriores. En Jujuy el 33% de ellas tuvo registro en 2013, el 13% en 2012, el 11% en 2011, el 13% en 2010 y el 10% en 2009; resumiendo el 80% de las celdas tuvieron registros de focos de calor en el último quinquenio. El 20% restante se distribuyó entre los 6 años restantes, nunca superando el 5%.

Tabla 8: Distribución de las celdas cuadradas de 2 km de lado con focos de calor MODIS según su último año de registro para las provincias de Salta y Jujuy.

ULTIMO AÑO CON REGISTRO		2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
SALTA	Nº DE CELDAS	427	395	454	377	748	837	1.564	1.426	1.567	1.662	3.222
	%	3	3	4	3	6	7	12	11	12	13	25
JUJUY	Nº DE CELDAS	63	51	89	30	48	79	176	239	190	227	582
	%	4	3	5	2	3	4	10	13	11	13	33

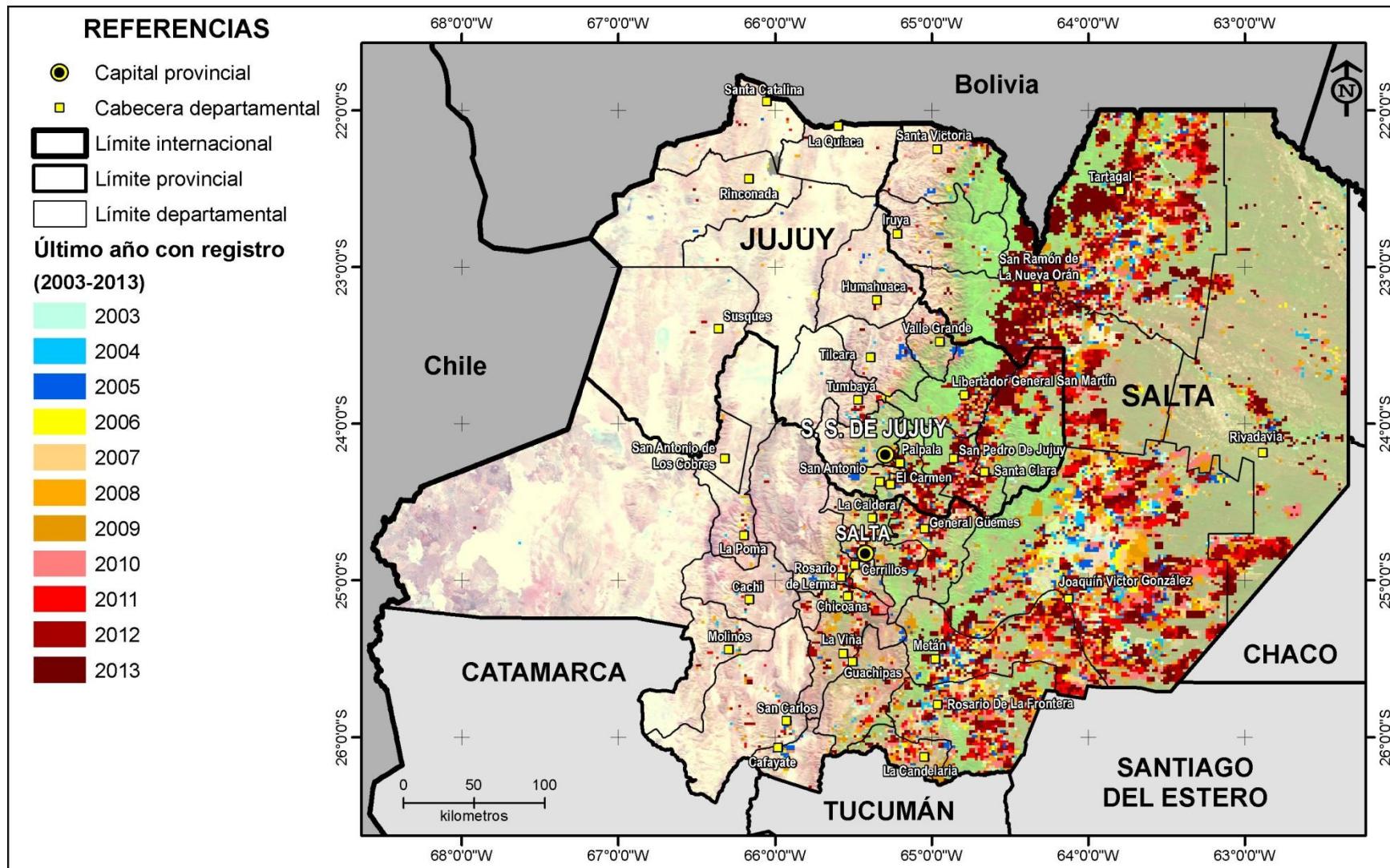


Figura 41: Mapa de Salta y Jujuy con celdas cuadradas de 2 km de lado, clasificadas según el último año de registro de focos de calor. Periodo 2003-2013.

6.1.4.3 Celdas clasificadas según la cantidad de focos de calor, años y focos promedio por año

Respecto al número de focos registrados por celda (Tabla 9 y Figura 42), para el caso de la provincia de Salta en 2.806 celdas (22%) se registró solo 1 foco durante el periodo de estudio y en 4.498 (35%) entre 2 y 5 focos. En 2.364 (17%) se contabilizaron entre y 10 focos y en 2.075 (11%) entre 11 y 20. En 939 celdas (7%) se registraron más de 21 focos de calor. En el caso de la provincia de Jujuy el número de focos registrados por celda, en 486 celdas (27%) se registró solo 1 foco durante el periodo de estudio y en 720 (41%) entre 2 y 5 focos. En 304 (17%) se contabilizaron entre 6 y 10 focos y en 189 (11%) entre 11 y 20. En 75 celdas (4%) se registraron más de 21 focos de calor.

Tabla 9: Distribución de las celdas cuadradas de 2 km de lado con registros de focos de calor de la provincia de Salta según la cantidad total de focos registrados para el Periodo 2003-2013.

Nº DE FOCOS DE CALOR	SALTA		JUJUY	
	FRECUENCIA	%	FRECUENCIA	%
1 foco	2.806	22	486	27
2 a 5 focos	4.498	35	720	41
6 a 10 focos	2.364	19	304	17
11 a 20 focos	2.075	16	189	11
21 a 30 focos	676	5	55	3
31 a 40 focos	201	2	15	1
más de 40 focos	59	0	5	0

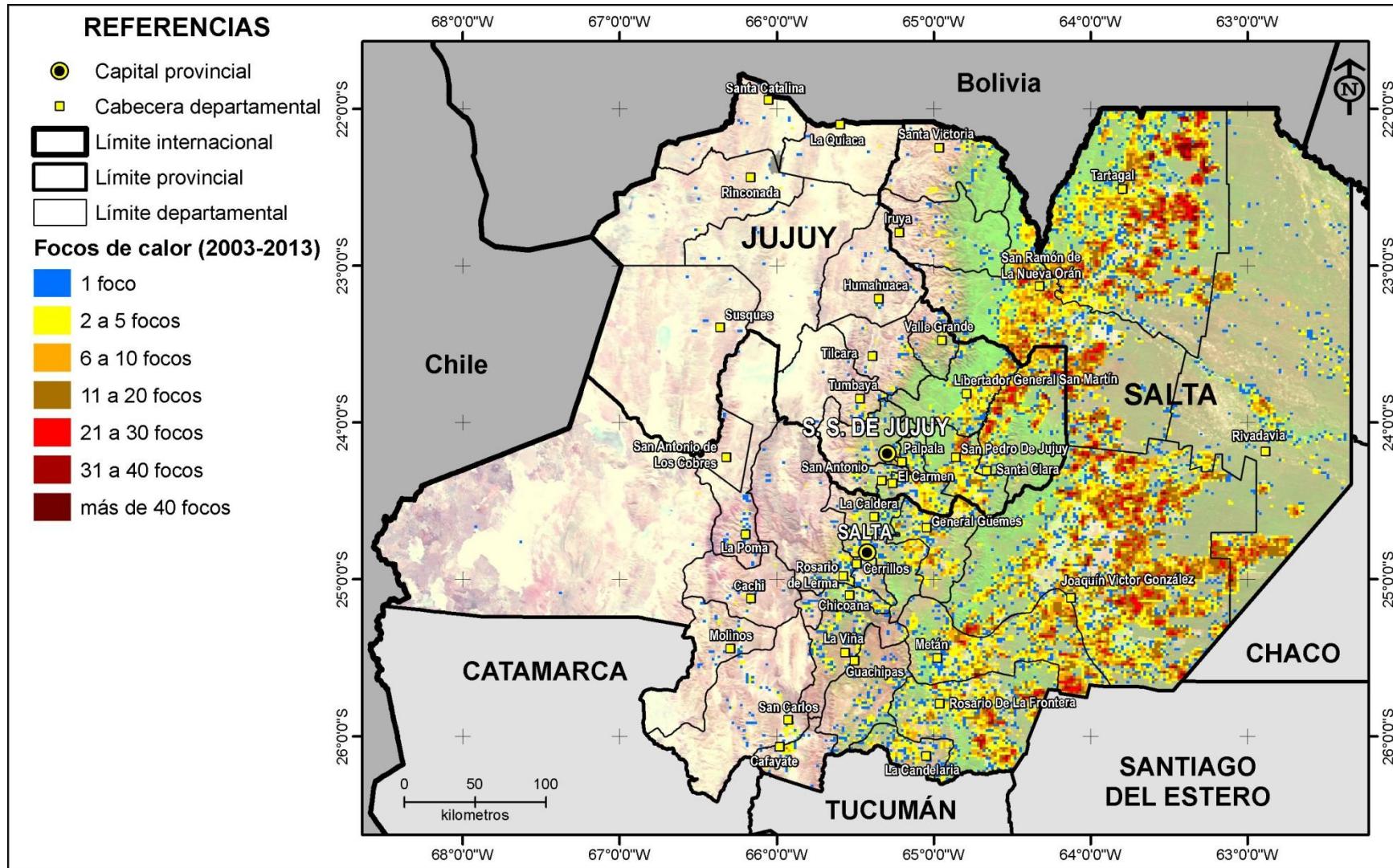


Figura 42: Mapa de Salta y Jujuy con celdas cuadradas de 2 km de lado, clasificadas según la cantidad de focos de calor registrados entre 2003 y 2013.

Respecto a la cantidad de años con registro de focos (Tabla 10 y Figura 43), en Salta se observó que 5.429 celdas (43%) tuvieron registros solo durante un año. Unas 5.296 (42%) entre 2 y 3 años y unas 1.595 (13%) tuvieron registros durante 4 y 5 años. Finalmente 359 (3%) celdas se registraron focos en más de 6 años. Para Jujuy 757 celdas (43%) tuvieron registros solo durante un año. Unas 631 (36%) entre 2 y 3 años y unas 265 (15%) tuvieron registros durante 4 y 5 años. Finalmente 121 (7%) celdas se registraron focos en más de 6 años.

Tabla 10: Distribución de las celdas cuadradas de 2 km de lado con registros de focos de calor de la provincia de Salta según la cantidad de años con registro para el Periodo 2003-2013.

Nº DE AÑOS CON REGISTRO	SALTA		JUJUY	
	FRECUENCIA	%	FRECUENCIA	%
1 año	5.429	43	757	43
2 a 3 años	5.296	42	631	36
4 a 5 años	1.595	13	265	15
6 a 7 años	311	3	87	5
8 a 11 años	48	0	34	2

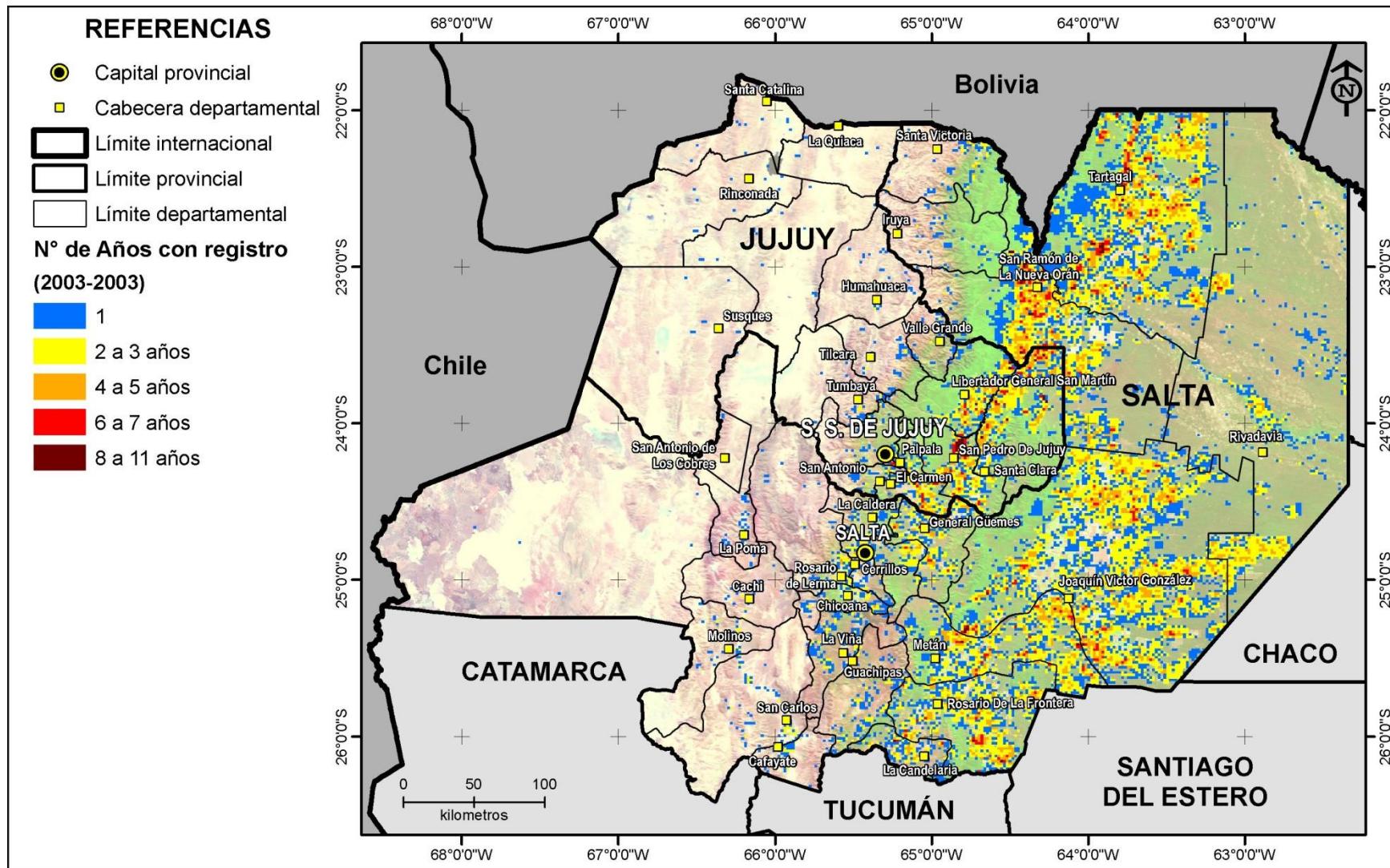


Figura 43: Mapa de Salta y Jujuy con celdas cuadradas de 2 km, clasificadas según la cantidad de años con registro de focos de calor. Período 2003-2013.

Respecto a la cantidad anual de focos de calor por celda (Tabla 11), en Salta se encontró que 3.775 celdas (30%) tuvieron un registro de foco de calor por año, mientras que 6.734 (53%) registraron 2 y 5 focos anuales. Unas 1.605 celdas (13%) tuvieron entre 6 y 10 focos de calor por año. Finalmente 561 celdas (4%) tuvieron registro de más de 20 focos por año. En Jujuy se encontró que 706 celdas (40%) tuvieron un registro de foco de calor por año, mientras que 938 (53 %) registraron 2 y 5 focos anuales. Solo 130 celdas (7%) tuvieron más de 5 focos de calor por año.

Tabla 11: Distribución de las celdas cuadradas de 2 km de lado con registros de focos de calor de la provincia de Salta según la cantidad de focos de calor por año para el Periodo 2003-2013.

Nº DE FOCOS DE CALOR POR AÑO	SALTA		JUJUY	
	FRECUENCIA	%	FRECUENCIA	%
1 foco	3.775	30	706	40
2 a 5 focos	6.734	53	938	53
6 a 10 focos	1.605	13	103	6
11 a 20 focos	489	4	26	1
21 a 30 focos	63	0	1	0
31 a 40 focos	11	0	0	0
más de 40 focos	2	0	0	0

6.1.4.4 Áreas recurrentes en cuanto a registros de focos de calor

En la Tabla 12 se muestra su distribución según superficie y en la Figura 44 su distribución espacial.

Para la provincia de Salta resultaron mapeadas 519 áreas de diferentes dimensiones. El 65 % de las áreas recurrentes fueron de menos de 1.000 ha y casi un 30 % de entre 1.000 y 5.000 ha. Solo 3 polígonos superaron las 20.000 ha.

Para la provincia de Jujuy fueron 100. El 63 % de los polígonos recurrentes tuvo dimensiones inferiores a las 1.000 ha y el 32 % de entre 1.000 y 5.000 ha. Solo un polígono superó las 15.000 ha.

Las áreas recurrentes en cuanto a registros de focos de calor para la provincia de salta coincidieron con las áreas cañeras indicadas por Volante *et al.* 2004, ubicadas al oeste de San Ramón de la Nueva Orán. También señalaron un sector de pastizales pirógenos ubicados al oeste de General Ballivian sobre el sur de las Sierras de Tartagal. Las restantes áreas se distribuyeron en diferentes puntos de la provincia siempre señalando áreas transformadas para agricultura o ganadería.

Las áreas recurrentes más grandes identificadas en Jujuy se correspondieron con las zonas cañeras (Volante *et al.* 2004) cercanas a San Pedro, el Talar y el margen este del río San Francisco en Jujuy. Otras áreas importantes fueron las inmediaciones de Yuto y las de cerca de Saladillo entre la ruta provincial 1 y el río San Francisco.

Tabla 12: Áreas recurrentes en cuanto a registros de focos de calor para el Periodo 2003-2013 en las provincias de Salta y Jujuy, clasificadas según su extensión.

SUPERFICIE	SALTA		JUJUY	
	FRECUENCIA	%	FRECUENCIA	%
Menos de 1.000 ha	338	65,1	63	63
1.000 a 5.000 ha	152	29,3	32	32
5.000 a 10.000 ha	20	3,9	3	3
10.000 a 15.000 ha	4	0,8	1	1
15.000 a 20.000 ha	2	0,4	1	1
Más de 20.000 ha	3	0,6	0	0

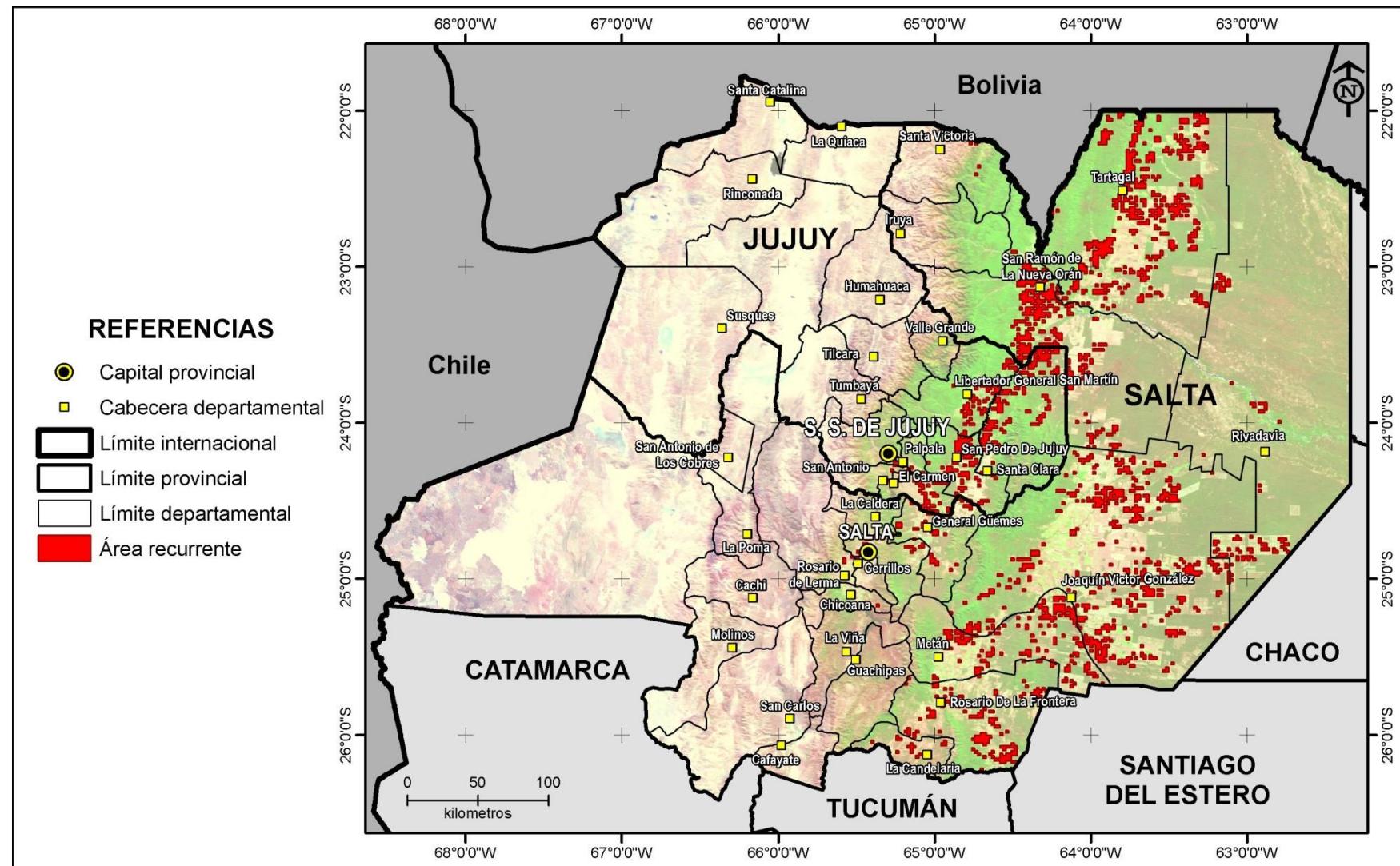


Figura 44: Mapa de Salta y Jujuy con áreas recurrentes derivadas del registro de focos de calor. Período 2003-2013.

6.1.5 Interpretación visual de la distribución de focos de calor

Las celdas con registros de focos de calor MODIS se distribuyeron coincidiendo con las áreas deforestadas de la provincia de Salta sobre el centro-este de su territorio, formando manchones continuos de considerables dimensiones separados por serranías o grandes porciones de bosque chaqueño. Además se encontraron grupos dispersos sobre todo en los departamentos Rivadavia y el este de San Martín y Orán. En los sectores de selva se observaron grandes porciones con registro de focos, principalmente asociadas a selvas de transición y asentamientos humanos de dimensiones importantes. En porciones topográficas más elevadas se encontraron similares manchones en sectores de pastizales de neblina y bosque montano. Sobre los sectores más áridos y occidentales se observaron concentraciones en sitios de mayor densidad antrópica y pastizales, principalmente sobre el río Calchaquí y las serranías entre San Antonio y Cachi. Más al oeste, los registros fueron muy ocasionales.

Para el caso de Jujuy las celdas se concentraron en el centro-este de la provincia y se distribuyeron de manera dispersa en el sector occidental. Al oriente de Jujuy se conformó una gran mancha a lo largo del límite de los departamentos Santa Bárbara y Ledesma, centro de San Pedro y El Carmen, ocupando casi todo el Ramal Jujeño; franjas vacías que coinciden con la selva más húmeda y pequeños grupos dispersos sobre ambientes de bosque montano y pastizales de altura (neblina principalmente).

6.1.6 Variables de caracterización.

6.1.6.1 Focos de calor y coberturas del suelo

En la Tabla 13 se resumen los resultados encontrados para la relación entre los focos de calor MODIS con cada cobertura del suelo.

Para Salta, el 74 % de los focos se localizó en áreas ligadas a actividad antrópica comprendiendo mosaicos de áreas urbanas, semiurbanas y productivas. Un 72% de los focos de calor MODIS se localizó en áreas transformadas, el 1% en zonas urbanas y el 1% en zonas periruranas. La segunda cobertura mayormente afectada por focos de calor MODIS fue el bosque abierto, abarcando el 12% de los datos. De ellos, un 10% se localizó a menos de 1.500 metros de áreas transformadas y un 2% a distancias mayores. La tercera cobertura en cantidad de focos fue la selva, con un total de 8% de los datos, el 3% a distancias menores a 1.500 metros de las áreas transformadas y un 5% a distancias mayores.

El resto de las coberturas sumó cerca del 1% de los datos, las mismas fueron: Bosque abierto/Arbustal y Ambiente ripario (vinculados principalmente con sitios cercanos a áreas transformadas), pastizal (con registros equilibrados respecto a lugares con actividad humana), Arbustal/Bosque abierto (vinculados principalmente con sitios cercanos a áreas transformadas), Ambiente ripario y Arbustal/pastizal (con registros equilibrados respecto a lugares con actividad humana). El resto de las coberturas conjuntamente no superaron el 1% de los registros.

Para Jujuy en cambio el 66% de los focos de calor MODIS de la provincia de Jujuy se localizó en áreas ligadas a actividad antrópica. Un 59% localizó en áreas transformadas, 5% en zonas urbanas y 2% en zonas perirurbanas. La segunda cobertura en cuanto a focos de calor MODIS fue la Selva, abarcando el 19% de los datos. De ellos, un 8% se localizó a menos de 1500 metros de áreas transformadas y un 11 % a distancias mayores. La tercera cobertura en cantidad de focos fue el bosque abierto (configuración típica de los quebrachales y chaco serrano) con un total de 10 % de los datos, el 7 % a distancias menores a 1500 metros de las áreas transformadas y un 3% a distancias mayores.

El resto de las coberturas sumó menos o poco más del 1% de los datos: las mismas fueron: Bosque abierto/Arbustal y Ambiente ripario (vinculados principalmente con sitios cercanos a áreas transformadas), pastizal (con registros equilibrados respecto a lugares con alta actividad humana), pastizal de neblina (vinculado a lugares alejados de áreas transformadas), suelo desnudo/arbustal o pastizal ralo (registros equilibrados respecto a lugares con alta actividad humana). El resto de las coberturas no superó los 50 focos individualmente. En conjunto comprendieron menos del 2% de los datos.

Tabla 13: Focos de calor registrados en la provincia de Salta, entre 2003 y 2013, clasificados según coberturas del suelo. Dentro de cada clase de cobertura, se discriminaron aquellos localizados a menos o más de 1500 metros de áreas antrópicas: área urbana, periurbana/infraestructura y transformadas. Entre paréntesis se expresa el porcentaje total representado por cada grupo de datos.

Nº	COBERTURA DEL SUELO	SALTA			JUJUY		
		FOCOS DE CALOR			FOCOS DE CALOR		
		Menos de 1.500 m de áreas antrópicas	Más de 1.500 m de áreas antrópicas	TOTAL	Menos de 1.500 m de áreas antrópicas	Más de 1.500 m de áreas antrópicas	TOTAL
1	Suelo desnudo/ arbustal o pastizal ralo	208 (0,2%)	71 (0,1%)	279 (0,3%)	46 (0,5%)	37 (0,4%)	83 (0,9%)
2	Arbustal abierto	17 (0%)	94 (0,1%)	111 (0,1%)	2 (0%)	39 (0,4%)	41 (0,4%)
3	Pastizal puneño	19 (0%)	92 (0,1%)	111 (0,1%)	7 (0,1%)	28 (0,3%)	35 (0,4%)
4	Pastizal de neblina	22 (0%)	259 (0,3%)	281 (0,3%)	10 (0,1%)	64 (0,7%)	74 (0,8%)
5	Pastizal	645 (0,7%)	591 (0,6%)	1.236 (1,3%)	55 (0,6%)	59 (0,6%)	114 (1,2%)
6	Arbustal/pastizal	247 (0,3%)	243 (0,3%)	490 (0,5%)	32 (0,3%)	16 (0,2%)	48 (0,5%)
7	Arbustal/Bosque abierto	545 (0,6%)	269 (0,3%)	814 (0,9%)	38 (0,4%)	4 (0%)	42 (0,4%)
8	Bosque abierto/Arbustal	1.503 (1,6%)	599 (0,7%)	2.102 (2,3%)	74 (0,8%)	43 (0,5%)	117 (1,2%)
9	Bosque abierto	9.014 (9,8%)	1.718 (1,9%)	10.732 (11,7%)	679 (7,3%)	208 (2,2%)	887 (9,5%)
10	Selva	2.788 (3%)	4.146 (4,5%)	6.934 (7,6%)	707 (7,6%)	997 (10,6%)	1.704 (18,2%)
11	Ambiente ripario	318 (0,3%)	396 (0,4%)	714 (0,8%)	69 (0,7%)	15 (0,2%)	84 (0,9%)
12	Embalse	3 (0%)	2 (0%)	5 (0%)	0%	1 (0%)	1 (0%)
13	Laguna	1 (0%)	4 (0%)	5 (0%)	0%	1 (0%)	1 (0%)
14	Salina/salar	0%	0%	0%	0%	1 (0%)	1 (0%)
15	Área urbana	1.047 (1,1%)	0%	1.047 (1,1%)	446 (4,8%)	0%	446 (4,8%)
16	Área periurbana/Infraestructura	758 (0,8%)	0%	758 (0,8%)	180 (1,9%)	0%	180 (1,9%)
17	Áreas transformadas	65.976 (72%)	0%	65.976 (72%)	5.506 (58,8%)	0%	5.506 (58,8%)
TOTAL GENERAL		83.111 (90,7%)	8.484 (9,3%)	91.595 (100%)	7.851 (83,8%)	1.513 (16,2%)	9.364 (100%)

6.1.6.2 Focos de calor y porcentajes de suelo desnudo, vegetación herbácea y leñosa

Los focos registrados en ambas provincias ocurrieron en lugares con nula o baja proporción de suelos desnudos (Tabla 14).

Tabla 14: Focos de calor MODIS registrados entre 2003 y 2013 en Salta y Jujuy, clasificados según % de suelo desnudo (Producto MODIS 44B). Se descartaron los registros de áreas urbanas, periurbanas-infraestructura y transformadas. Entre paréntesis se presentan las frecuencias relativas de cada clase.

% DE SUELO DESNUDO	SALTA FRECUENCIA	JUJUY FRECUENCIA
0%	79.208 (87%)	2.990 (93%)
0 – 20 %	11.768 (13%)	129 (4%)
20 – 40 %	340 (0%)	21 (1%)
40 – 60 %	97 (0%)	30 (1%)
60 – 80 %	32 (0%)	25 (1%)
80 – 100 %	45 (0%)	37 (1%)

Según el porcentaje de vegetación herbácea (Tabla 15), en Salta el 76 % ocurrió en lugares con 40 a 80% de cobertura, mientras que en Jujuy el 75% ocupó coberturas de 20-60 %.

Tabla 15: Focos de calor MODIS registrados entre 2003 y 2013 en Salta y Jujuy, clasificados según % de suelo desnudo (Producto MODIS 44B). Se descartaron los registros de áreas urbanas, periurbanas-infraestructura y transformadas. Entre paréntesis se presentan las frecuencias relativas de cada clase.

% DE VEG. HERBACEA	SALTA FRECUENCIA	JUJUY FRECUENCIA
0%	176 (0%)	19 (1%)
0 – 20 %	355 (0%)	58 (2%)
20 – 40 %	8.986 (10%)	1.325 (41%)
40 – 60 %	43.767 (48%)	1.097 (34%)
60 – 80 %	25.597 (28%)	436 (13%)
80 – 100 %	12.609 (14%)	297 (9%)

Tomando el porcentaje de vegetación leñosa (

Tabla 16), en Salta el 74 % de los focos ocurrieron en lugares con coberturas de 20 a 60 %, en Jujuy el 72 % ocurrió en sectores con más cobertura leñosa (40 a 80 %)

Tabla 16: Focos de calor MODIS registrados entre 2003 y 2013 en la provincia de Salta clasificados según % de vegetación leñosa (Producto MODIS 44B). Se descartaron los registros de áreas urbanas, periurbanas-infraestructura y transformadas. Entre paréntesis se presentan las frecuencias relativas de cada clase.

	% DE VEG LEÑOSA	0 %	0 – 20 %	20 – 40 %	40 – 60 %	60 – 80 %	80 – 100 %
SALTA	FRECUENCIA	666 (1%)	13.775 (15%)	28.742 (31%)	39.435 (43%)	8.682 (9%)	190 (0%)
JUJUY	FRECUENCIA	96 (3%)	346 (11%)	455 (14%)	1031 (32%)	1288 (40%)	16 (0%)

6.1.6.3 Focos de calor y variables topográficas

Respecto a la altitud (Tabla 19), el 89% de los datos se localizaron entre los 200 m y los 1.000 m de altitud en la provincia de Salta, mientras que en Jujuy el 93 % de ellos ocupó los pisos altitudinales entre los 200 y 1.200 m snm. En ambas provincias hubo registros de focos de calor a más de 4.000 m de altitud.

Tabla 17: Focos de calor MODIS registrados para la provincia de Salta clasificados según rangos de altitud. Periodo 2003-2013.

PISO ALTITUDINAL	SALTA		JUJUY	
	FRECUENCIA	%	FRECUENCIA	%
Menos de 200	818	1	0	0
200-400	59.776	65	1.979	21
400-600	19.002	21	4.754	51
600-800	6.721	7	1.158	12
800-1.000	2.357	3	582	6
1.000-1.200	748	1	273	3
1.200-1.400	444	0	155	2
1.400-1.600	331	0	49	1
1.600-1.800	321	0	28	0
1.800-2.000	287	0	21	0
2.000-2.200	206	0	42	0
2.200-2.400	163	0	47	1
2.400-2.600	125	0	50	1
2.600-2.800	98	0	54	1
2.800-3.000	65	0	33	0
3.000-3.200	54	0	24	0
3.200-3.400	34	0	14	0
3.400-3.600	23	0	13	0
3.600-3.800	14	0	35	0
3.800-4.000	14	0	17	0
Más de 4.000	26	0	36	0

Respecto a la pendiente (Tabla 18), en Salta el 95 % de los datos se localizó en lugares planos: menos de 10% de pendiente. En Jujuy, el 93 % lo hizo en lugares de hasta un 15 % de pendiente.

Tabla 18: Focos de calor MODIS registrados para la provincia de Salta clasificados según clases de pendiente. Periodo 2003-2013.

CLASE DE PENDIENTE (%)		Menos de 2	2-5	5-10	10-15	15 - 20	20 - 30	30 - 45	Más de 45
SALTA	FRECUENCIA	69.727	12.628	4.292	1.662	986	995	669	668
	%	76	14	5	2	1	1	1	1
JUJUY	FRECUENCIA	4.283	2.924	1.139	332	153	162	157	213
	%	46	31	12	4	2	2	2	2

Respecto a la exposición (Tabla 21), en la provincia de Salta el 73% de los datos presentó exposiciones entre norte, noreste, este, sur-este y sur. En Jujuy se observó mayor variabilidad, ya que el 84 % de los focos se distribuyó entre exposiciones norte, noreste, este, sur este, oeste y noroeste.

Tabla 19: Focos de calor MODIS registrados para la provincia de Salta clasificados según clases de exposición.

EXPOSICION	SALTA		JUJUY	
	FRECUENCIA	%	FRECUENCIA	%
PLANO	999	1	23	0
NORTE	10.568	12	1.248	13
NORESTE	13.069	14	1.457	16
ESTE	16.684	18	1.532	16
SURESTE	15.168	17	1.124	12
SUR	11.067	12	732	8
SUROESTE	8.272	9	738	8
OESTE	7.537	8	1.181	13
NOROESTE	8.263	9	1.328	14

6.1.6.4 Focos de calor y variables climáticas

Respecto a la temperatura media anual (Tabla 20), el 87% de los datos de Salta correspondió a lugares con 20 y 22°C. Mientras que en Jujuy, el rango ocupado por los datos fue mayor: el 95 % de los datos se distribuyó entre los 14 y 22°C.

Tabla 20: Focos de calor MODIS registrados para la provincia de Salta clasificados según rangos de temperatura media anual TMA (°C).

TMA (°C)	SALTA		JUJUY	
	FRECUENCIA	%	FRECUENCIA	%
Menos de 2	2	0	1	0
02-04	2	0	2	0
04-06	11	0	18	0
06-08	100	0	27	0
08-10	109	0	38	0
10-12	123	0	33	0
12-14	426	0	330	4
14 - 16	976	1	967	10
16 - 18	2.249	3	1.307	14
18 - 20	7.068	8	3.236	35
20 - 22	75.849	87	3.404	36
22 - 24	8	0	0	0

Respecto a la precipitación media anual (Tabla 21), el 93 y el 94 % de los datos de Salta y Jujuy respectivamente, se ubicaron en lugares con 400 a 1.000 mm.

Tabla 21: Focos de calor MODIS registrados para la provincia de Salta clasificados según rangos de precipitación media anual.

PRECIPITACION MEDIA ANUAL (mm)	SALTA		JUJUY	
	FRECUENCIA	%	FRECUENCIA	%
Menos de 200	235	0	22	0
200 - 400	295	0	66	1
400 - 600	49.399	54	1005	11
600 - 800	23.894	26	6187	66
800 – 1.000	11.446	13	1585	17
1.000 – 1.200	4.279	5	454	5
1.200 – 1.400	1.358	1	38	0
1.400 – 1.600	236	0	6	0
1.600 – 1.800	22	0		
1.800 – 2.000	30	0		
Más de 2.000	24	0		

6.2 Áreas quemadas y validación de focos de calor

6.2.1 Primer periodo: Julio-Setiembre de 2013

Para el periodo Julio-Setiembre de 2013 se contabilizaron 984 polígonos de áreas quemadas que sumaron un total de 27.786 ha (0,77% del área de estudio) (Figura 45).

6.2.1.1 Caracterización de las áreas quemadas por superficie, cobertura del suelo y división política

El 57% de los polígonos indicó áreas quemadas menores a 5 ha, el 15% tuvo entre 5 y 10 ha y el 19% más de 10 y menos de 50 ha. En total estas clases comprendieron el 91% de los datos. El 4% de los polígonos tuvo un tamaño entre 50 y 100 ha y un 5% entre 100 y 1.000 ha. Solo dos polígonos tuvieron superficies mayores a las 1.000 ha.

Respecto al tipo de cobertura de suelo afectada (Tabla 22), el 40% de las áreas quemadas afectó zonas transformadas para cultivos. El 34% se localizó en ambientes selváticos y un 14% en bosques abiertos o arbustales chaqueños. Los incendios localizados en áreas urbanas y periurbanas sumaron el 4% del área quemada determinada para el periodo en estudio. Por último, y con menos del 3% de la superficie quemada cada una, se identificaron otras coberturas, tales como: ambientes riparios, pastizales, y pastizal de neblina.

Respecto a la distribución política (Tabla 22), el 62% de las áreas quemadas se localizaron en la provincia de Salta y 38% en Jujuy. El área de estudio abarcó parte de 13 departamentos de ambas provincias. Al cuantificar las áreas quemadas para el periodo en estudio se destacaron tres: Orán (Salta), con el 50% de la superficie afectada, Santa Bárbara (Jujuy), con el 22% y Ledesma (Jujuy), con el 16%. Continuaron en orden de importancia: Santa Victoria, San Martín e Iruya. Para el resto de los departamentos, la suma de áreas quemadas no superó las 100 ha.

La mayoría de los incendios ocurrieron en zonas bajas. En sectores serranos se presentaron manchones distribuidos en la porción central del área de estudio 2.

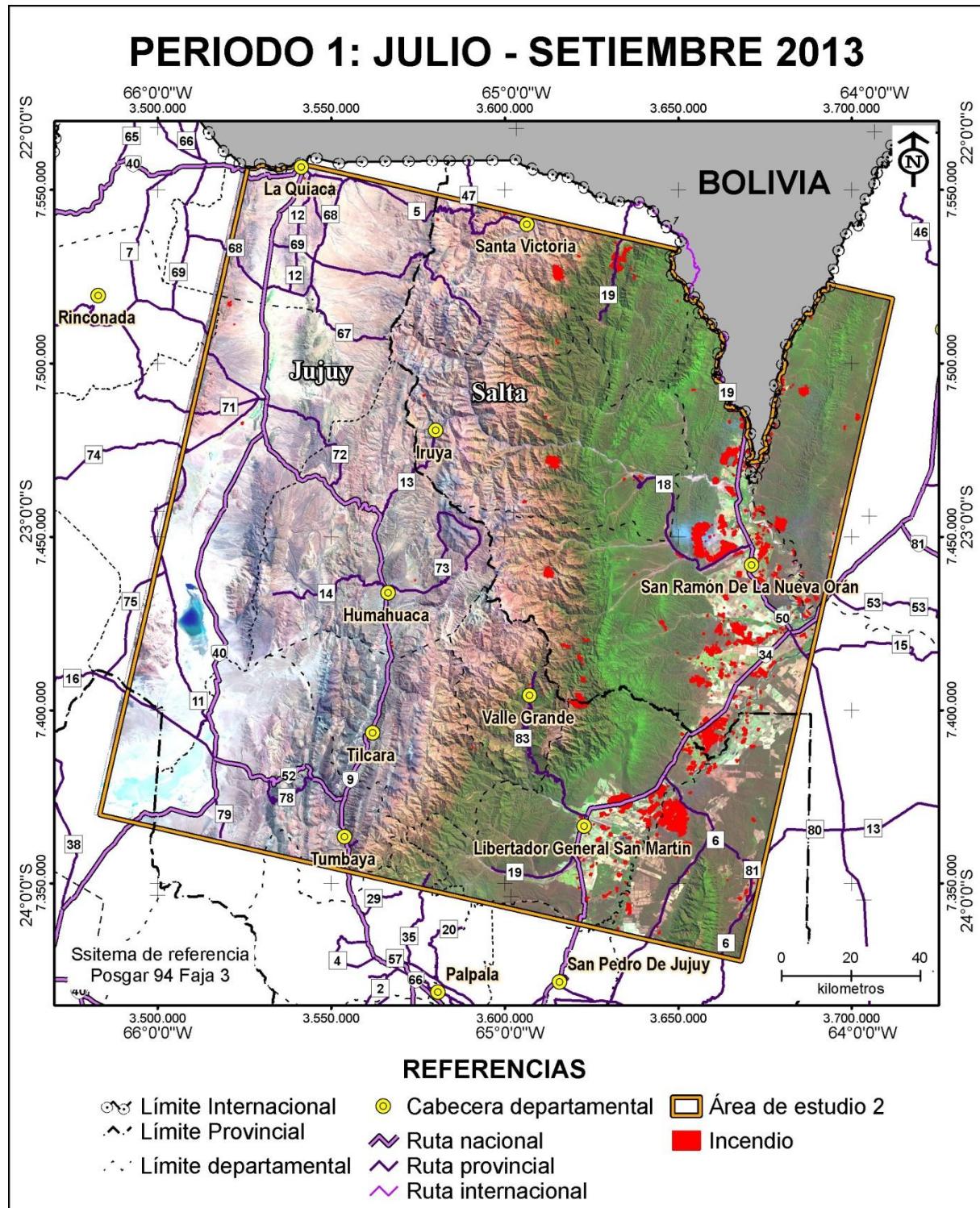


Figura 45: Mapa de incendios detectados dentro del área de estudio 2 para el primer periodo de estudio: Julio - Setiembre de 2013.

Tabla 22: Polígonos de áreas quemadas identificados en el área de estudio 2 para el periodo Julio-Setiembre de 2013, clasificados según coberturas del suelo y división política.

COBERTURA DEL SUELO	JUJUY								SALTA				TOTAL JUJUY	TOTAL SALTA	TOTAL GENERAL	%		
	COCHINOCA	HUMAHUACA	LEDESMA	RINCONADA	SANTA BARBARA	TILOCARA	TUMBAYA	VALLE GRANDE	YAVI	G. J. DE SAN MARTÍN	IRUYA	ORAN	SANTA VICTORIA					
Área periurbana/Infraestructura	2	209		20				5	20		197			236	217	453	2	
Área urbana			31					6			412			37	412	449	2	
Ambiente ripario			190		113					52	151	298	6	303	506	809	3	
Arbustal abierto	1							2		5	14			3	20	23	0	
Arbustal/Bosque abierto			4		21						119	34		25	152	177	1	
Arbustal/pastizal	9	7								4	5	140	36	16	184	200	1	
Bosque abierto			250		719		3		37	135	1.124	441		972	1.737	2.709	10	
Bosque abierto/Arbustal			58		150					3	104	339	435		208	881	1.089	4
Áreas transformadas para actividades agrícola-ganaderas		3.474		1.199		4			174		6.203			4.676	6.377	11.054	40	
Pastizal			56							73	60	241	103	56	477	533	2	
Pastizal de neblina		1						3		14	163	263	4		440	444	2	
Pastizal puneño	39	8	0							0	14	18	78	47	111	158	1	
Selva			136		3.957	4			757	97	4.537	38		4.097	5.429	9.526	34	
Suelo desnudo/ arbustal o pastizal ralo	1									9				1	9	10	0	
Sin categorizar										89		32			121	121	0	
TOTAL POR DEPARTAMENTO	42	21	4.415	0	6.178	4	4	3	16	1.217	584	13.837	1.433	10.682	17.072	27.753		
%	0	0	16	0	22	0	0	0	0	4	2	50	5	38	62			

6.2.1.2 Evaluación de confiabilidad de focos de calor para el periodo Julio-Setiembre

De los 914 focos de calor registrados entre Julio y Setiembre de 2013, 897 (92%) fueron aciertos o sea, estuvieron ubicados a una distancia menor de 1,5 km de un área quemada. Por lo que se determinó un error de comisión (falsas alarmas) de 8%.

Respecto al porcentaje de áreas quemadas detectadas por los focos de calor MODIS (Tabla 23), de los 984 polígonos de áreas quemadas, 704 (72%) se ubicaron a menos de 1,5 km de un foco de calor. Esto determinó un error de omisión de 28%. Cabe destacar que la detectabilidad se incrementó con el tamaño del incendio, siendo muy alta (96%) para incendios de más de 100 ha, 73 % para aquellos de entre 50 y 100 ha y 70 % para incendios de menos de 50 ha (Tabla 23).

Tabla 23: Áreas quemadas, clasificadas por tamaño, detectadas u omitidas por los focos de calor MODIS para el periodo de estudio Julio-Setiembre de 2013.

TAMAÑO	DETECTADO	OMITIDO	TOTAL	% DETECTADO	% OMITIDO
Menos de 5 ha	391	166	557	70	30
5 a 10 ha	102	45	147	69	31
10 a 50 ha	131	56	187	70	30
50 a 100 ha	30	11	41	73	27
100 a 1.000 ha	48	2	50	96	4
1.000 a 10.000 ha	2	0	2	100	0
TOTAL	704	280	984	72	28

Respecto a los 13 incendios no detectados por focos de calor mayores a 50 ha, solo 2 ocurrieron sobre coberturas nativas (uno en pastizal de neblina y otro en selva pedemontana), los 11 restantes se localizaron en áreas transformadas.

Respecto a las 17 falsas alarmas, 13 fueron tomadas por el sensor AQUA y los 4 restantes por el TERRA (Tabla 24). Once de las falsas alarmas se localizaron en zonas de cultivos y 3 en la selva. Los restantes focos de calor se localizaron en áreas periurbanas y pastizales.

Tabla 24: Focos de calor clasificados como falsas alarmas por la evaluación de confiabilidad con imágenes Landsat 8 para el periodo Julio-Setiembre, discriminados por cobertura del suelo y sensor MODIS.

COBERTURA DEL SUELO	FOCOS DE CALOR	
	SENSOR AQUA	SENSOR TERRA
Área periurbana/Infraestructura	1	
Áreas transformadas para actividades agrícola-ganaderas	7	4
Pastizal	1	
Pastizal de neblina	1	
Selva	13	
TOTAL GENERAL	13	4

6.2.2 Segundo periodo: Setiembre –Noviembre de 2013

Para el segundo periodo de estudio, se contabilizaron 2.626 polígonos de áreas quemadas que sumaron un total de 160.406 ha (4,5% del área de estudio) (Figura 46).

6.2.2.1 Caracterización de las áreas quemadas por superficie, cobertura del suelo y división política

El 71% de los polígonos indicó áreas quemadas menores a 5 ha, el 13% tuvo entre 5 y 10 ha y el 11% más de 10 y menos de 50 ha. En total estas clases comprendieron el 95% de los datos. El 2% de los polígonos tuvo un tamaño entre 50 y 100 ha y un 3% entre 100 y 1000 ha. Diez polígonos tuvieron superficies entre 1.000 y 10.000 ha y 6 superaron las 10.000 ha.

Respecto a las coberturas del suelo quemadas (Tabla 25), el 88% de los datos se localizó en zonas de selva y el 5% en zonas de transformadas. El 3% de los incendios ocurrieron en bosques abiertos. En ambientes riparios, los pastizales y las áreas periurbanas se localizaron en conjunto cerca del 3% de las áreas quemadas. Para el resto de las coberturas, la superficie no superó el 1% de los datos.

Respecto a su ubicación política (Tabla 25), el 90% de los incendios cartografiados ocurrieron en la provincia de Salta y el 10% restante en Jujuy. De los 13 departamentos comprendidos en el área de estudio se destacaron Orán y San Martín (Salta), 47 y 41% respectivamente, seguido muy de lejos por Ledesma (5%) y Santa Bárbara (4%) (Jujuy).

Nuevamente los incendios se localizaron en zonas bajas, ligados principalmente a las partes pedemontanas de las serranías. Además se individualizó una mayor cantidad de áreas quemadas dispersas en el sector central del área de estudio.

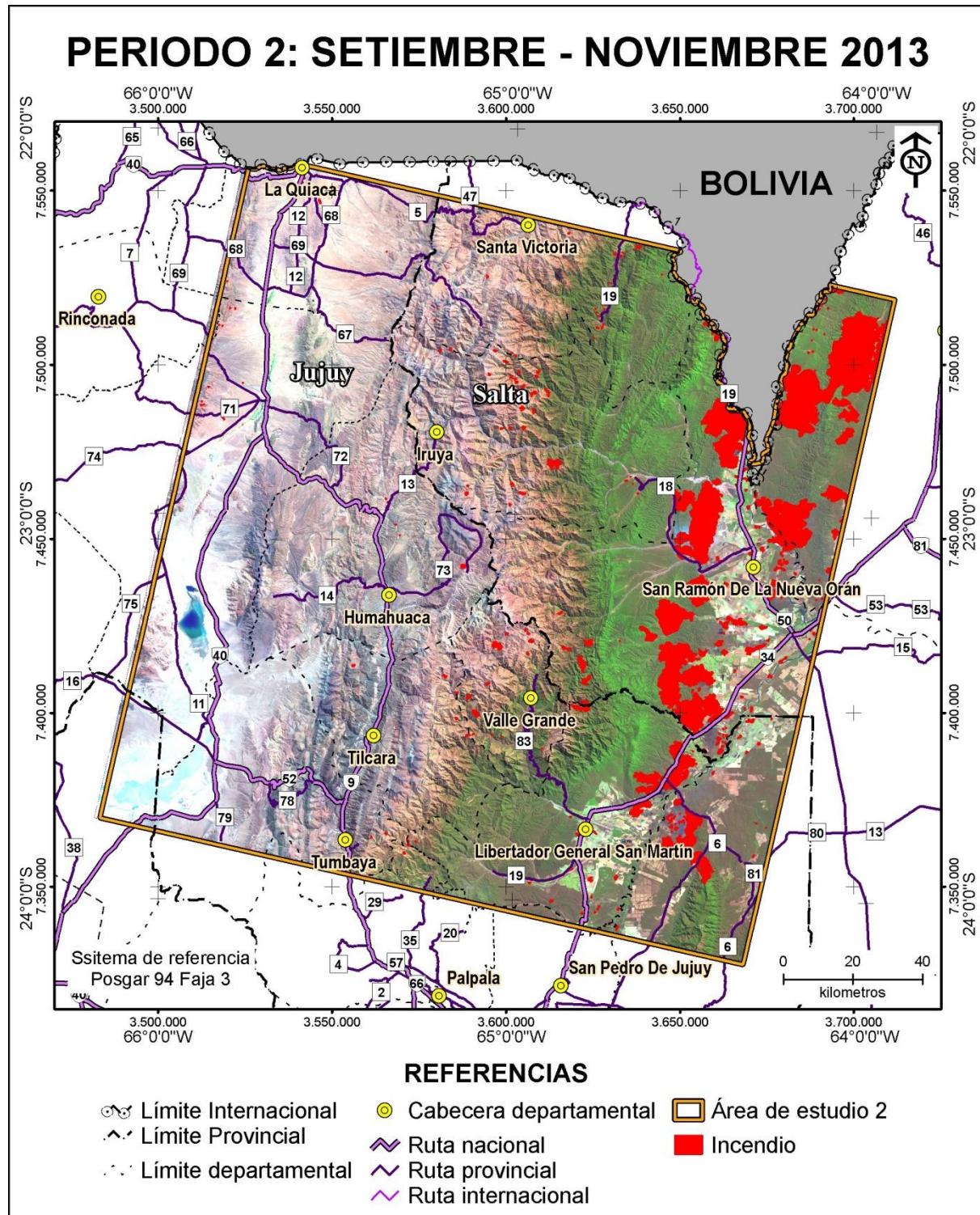


Figura 46: Mapa de incendios detectados dentro del área de estudio 2 para el segundo periodo de estudio: Setiembre - Noviembre de 2013.

Tabla 25: Polígonos de áreas quemadas identificados en el área de estudio 2 para el periodo Setiembre - Noviembre de 2013, clasificados según coberturas del suelo y división departamental.

COBERTURA DEL SUELO	JUJUY								SALTA				TOTAL JUJUY	TOTAL SALTA	TOTAL GENERAL	%	
	COCHINOCA	HUMAHUACA	LEDESMA	RINCONADA	SANTA BARBARA	TILCARA	TUMBAYA	VALLE GRANDE	YAVI	GRAL J. DE SAN MARTIN	IRUYA	ORAN	SANTA VICTORIA				
Área periurbana/Infraestructura				513	3	1			9	1.175	1	540		526	1.716	2.242	1
Área urbana				75						94		60		75	153	228	0
Ambiente ripario				123	1	12	10			320	64	1.239	2	146	1.624	1.770	1
Arbustal abierto	27	28		10		2		7	10		17	12	4	83	33	116	0
Arbustal/Bosque abierto						1				1	0	33		1	34	35	0
Arbustal/pastizal			17			22	2			17	20	33		40	69	109	0
Bosque abierto				678	291	17	83			1.121	230	1.603	77	1.070	3.032	4.102	3
Bosque abierto/Arbustal				183	16	0		38		213	121	440	0	237	775	1.012	1
Áreas transformadas para actividades agrícola-ganaderas				1749	245					503		6.131		1.994	6.634	8.628	5
Pastizal				10	13	4	7	44		11	199	90	4	79	305	384	0
Pastizal de neblina			4			32	37	310	4		177	33	17	388	227	615	0
Pastizal puneño	4	26		8		38		94	13	2	105	88	16	182	212	394	0
Selva				5.405	5.748			14		62.667	915	65.713	56	11.167	129.352	140.519	88
Suelo desnudo/ arbustal o pastizal ralo			55			2		4		57		65		62	122	184	0
Sin categorizar										20		45			65	65	0
TOTAL POR DEPARTAMENTO	31	130	8.737	18	6.318	114	73	595	36	66.201	1.851	76.125	176	16.053	144.353	160.406	
%	0	0	5	0	4	0	0	0	0	41	1	47	0	10	90		

6.2.2.2 Evaluación de confiabilidad de focos de calor para el periodo Julio-Setiembre

De los 2.781 focos de calor registrados entre setiembre y noviembre de 2013, 2.723 (98%) resultaron aciertos. Por lo cual el error de comisión para el periodo de estudio fue del 2 % (Tabla 26).

Respecto al porcentaje de áreas quemadas detectadas por los focos de calor MODIS, de los 2.626 polígonos de áreas quemadas, 2.338 (89%) se ubicaron a menos de 1,5 km de un foco de calor. Por lo cual el error de omisión para este periodo y área de estudio fue del 11% (Tabla 26).

La detectabilidad se incrementó con el tamaño del incendio, siendo muy alta (92%) para incendios de más de 100 ha (Tabla 26). Sin embargo la detectabilidad también fue bastante alta para incendios menores a 50 ha.

Tabla 26: Áreas quemadas, clasificadas por tamaño, detectadas u omitidas por los focos de calor MODIS para el periodo de estudio Setiembre -Noviembre de 2013.

TAMAÑO	POLIGONOS	%	DETECTADO	OMITIDO	% DETECTADO	% OMITIDO
Menos de 5 ha	1.853	71	1.687	166	91	9
5 a 10 ha	345	13	301	44	87	13
10 a 50 ha	297	11	233	64	78	22
50 a 100 ha	49	2	40	9	82	18
100 a 1.000 ha	66	3	61	5	92	8
1.000 a 10.000 ha	10	0	10	0	100	0
Más de 10.000 ha	6	0	6	0	100	0
TOTAL	2.626		2.338	288	89	11

Respecto a los 14 incendios no detectados por focos de calor mayores a 50 ha, solo 11 ocurrieron sobre coberturas nativas (pastizal de neblina y selva pedemontana) y 3 en áreas transformadas.

Respecto a los falsos positivos (Tabla 27), 34 fueron tomados por el sensor AQUA y los 23 restantes por el TERRA. Veintiséis de las falsas alarmas se localizaron en zonas de cultivos y 15 en la selva. Los restantes focos de calor se localizaron en áreas periurbanas y pastizales.

Tabla 27: Focos de calor clasificados como falsas alarmas por la evaluación de confiabilidad con imágenes Landsat 8 para el periodo Setiembre -Noviembre, discriminados por cobertura del suelo y sensor MODIS.

COBERTURA DEL SUELO	FOCOS DE CALOR	
	SENSOR AQUA	SENSOR TERRA
Área periurbana/Infraestructura	2	
Área urbana	3	1
Ambiente ripario	2	1
Arbustal abierto	1	
Bosque abierto	3	1
Áreas transformadas para actividades agrícola-ganaderas	15	11
Pastizal puneño	2	
Selva	6	9
TOTAL GENERAL	34	23

6.2.3 Relaciones focos de calor, número de incendios y superficie afectada

Respecto a la relación entre los focos de calor y el número de polígonos quemados, se observó una regresión lineal significativa ($R^2 = 0,88$; $p < 0,05$) (Figura 47). Mayor aún fue la regresión encontrada entre los focos de calor y la superficie quemada ($R^2 = 0,95$; $p < 0,05$) (Figura 48).

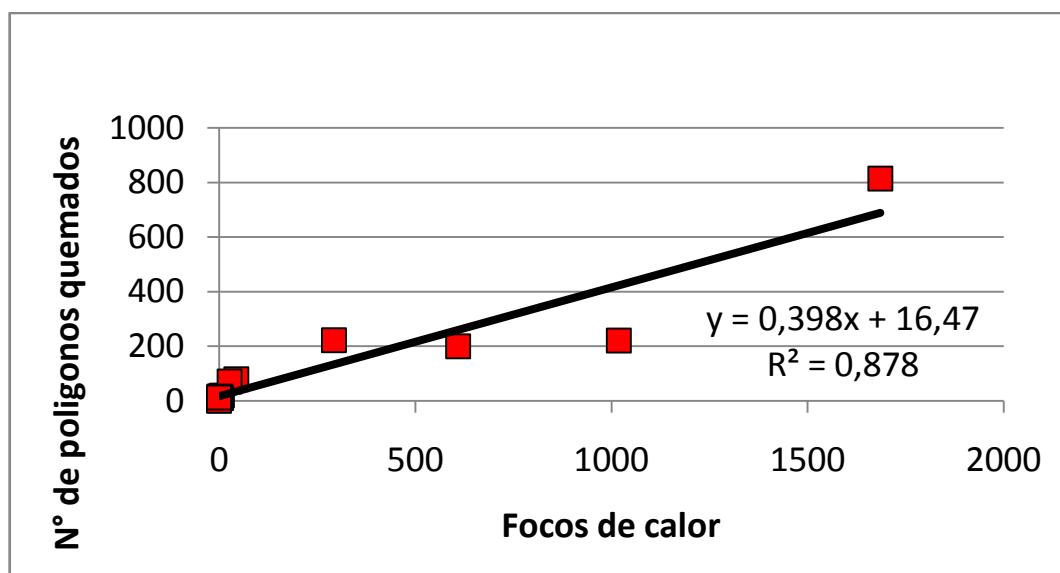


Figura 47: Regresión lineal entre cantidad de focos de calor y número de polígonos quemados encontrados para cada periodo de evaluación de confiabilidad y por departamento, dentro del área de estudio 2.

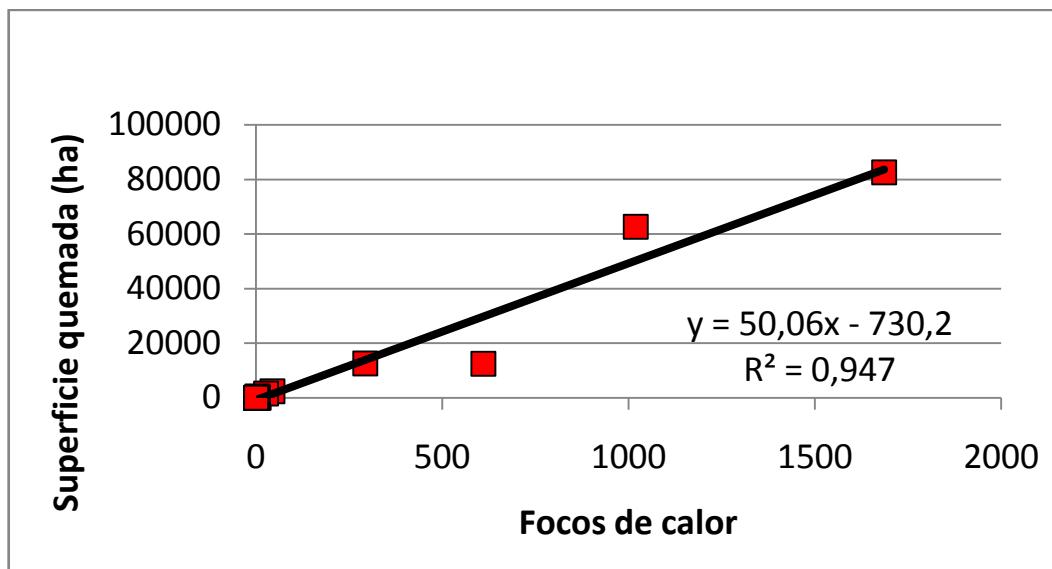


Figura 48: Regresión lineal entre cantidad de focos de calor y la superficie quemada determinada para cada periodo de evaluación de confiabilidad y por departamento, dentro del área de estudio 2.

6.3 Estadísticas de incendios provinciales versus focos de calor

En la Tabla 28 se resumen la cantidad y superficie afectada por incendios en las provincias de Salta y Jujuy para los años 2003 y 2013 reportados por el Programa Nacional de Estadística Forestal (PNEF 2014), más el total de focos de calor MODIS registrados en cada provincia en el mismo periodo de tiempo.

Tabla 28: Resumen de la cantidad de incendios y superficie quemada reportada por el Servicio Nacional de Manejo del Fuego para las provincias de Salta y Jujuy más el número de focos de calor MODIS registrados por año.

AÑO	PROVINCIA DE SALTA			PROVINCIA DE JUJUY		
	NÚMERO DE INCENDIOS	HECTÁREAS QUEMADAS	FOCOS DE CALOR	NÚMERO DE INCENDIOS	HECTÁREAS QUEMADAS	FOCOS DE CALOR
2003	701	54.748	5.397	46	259	661
2004	1.662	64.675	7.192	69	9.796	526
2005	1.876	61.778	7.501	205	3.655	544
2006	1.174	41.163	6.017	154	5.875	281
2007	985	36.809	9.549	275	1.498	607
2008	901	27.391	8.589	156	2.646	600
2009	892	35.051	12.221	275	1.668	1.254
2010	1.062	3.945	8.691	218	27.145	1.470
2011	358	1.909	9.395	212	1.342	1.126
2012	443	1.798	7.065	199	8.675	741
2013	870	18.146	10.010	246	32.042	1.554

Para la provincia de Salta, no se encontraron relaciones estadísticas significativas ni para la cantidad de incendios registrados ($p>0,05$) ni para la superficie quemada ($p>0,05$) y los focos de calor (Figura 49 A).

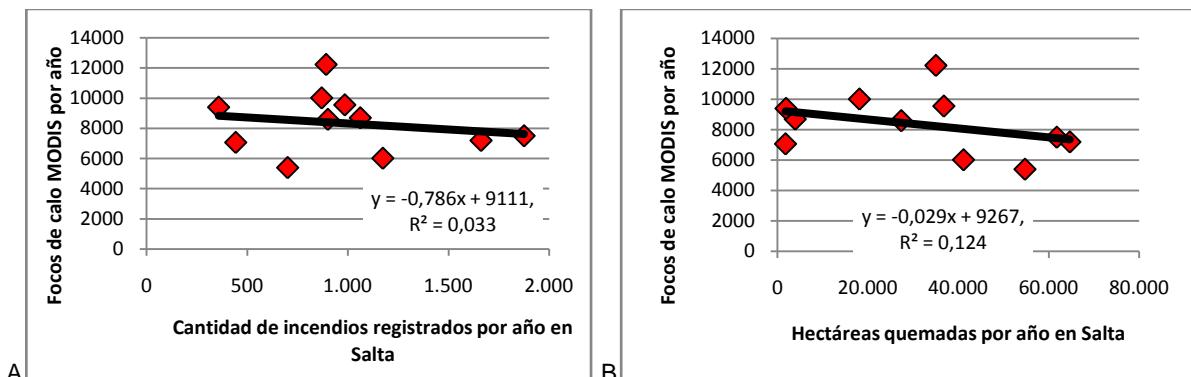


Figura 49: Regresión lineal entre: A) la cantidad de incendios por año reportados por el SNMF y el registro anual de focos de calor MODIS para la provincia de Salta para el periodo 2003-2013; B) la superficie quemada anual reportada por el SNMF y el registro anual de focos de calor MODIS para la provincia de Salta para el periodo 2003-2013.

Para la provincia de Jujuy, la situación fue distinta. No se encontró relación estadísticamente significativa entre focos de calor y número de incendios ($p> 0,05$) (Figura 50 A). Pero sí se encontró una relación significativa directamente proporcional ($R^2=0,44$; $p< 0,05$) entre superficie quemada y focos de calor (Figura 50 B).

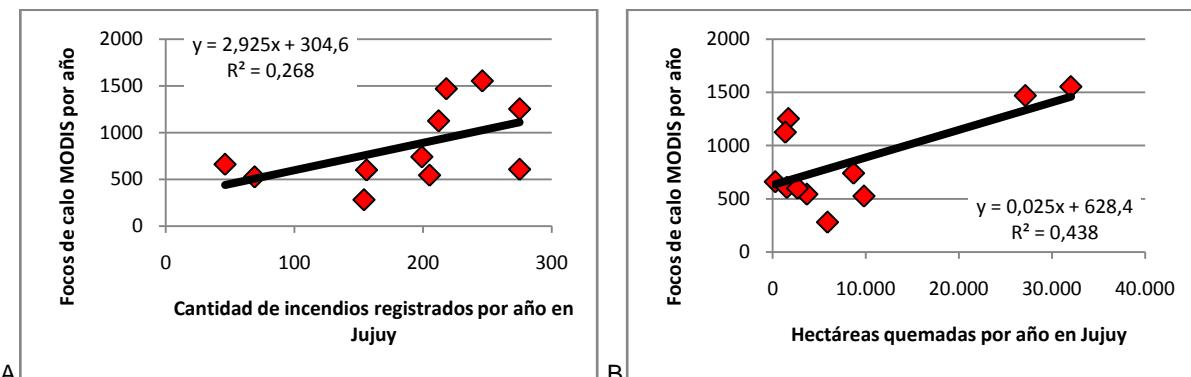


Figura 50: Regresión lineal entre: A) la cantidad de incendios por año reportados por el SNMF y el registro anual de focos de calor MODIS para la provincia de Jujuy para el periodo 2003-2013; b) la superficie quemada anual reportada por el SNMF y el registro anual de focos de calor MODIS para la provincia de Jujuy para el periodo 2003-2013.

Finalmente se interpretaron gráficos que muestran los datos anuales de focos de calor y superficie quemada reportada por cada provincia en función de los años considerados. Para el caso de Salta, se evidencia claramente que no existe ninguna relación entre ambos tipos de datos (Figura 51). La provincia presenta los más altos registros de áreas quemadas entre 2003 y 2006, y luego los valores van disminuyendo hasta 2009. Durante los últimos 4 años, las áreas afectadas fueron muy bajas, presentando un pequeño pico de menos de 20.000 ha en 2013.

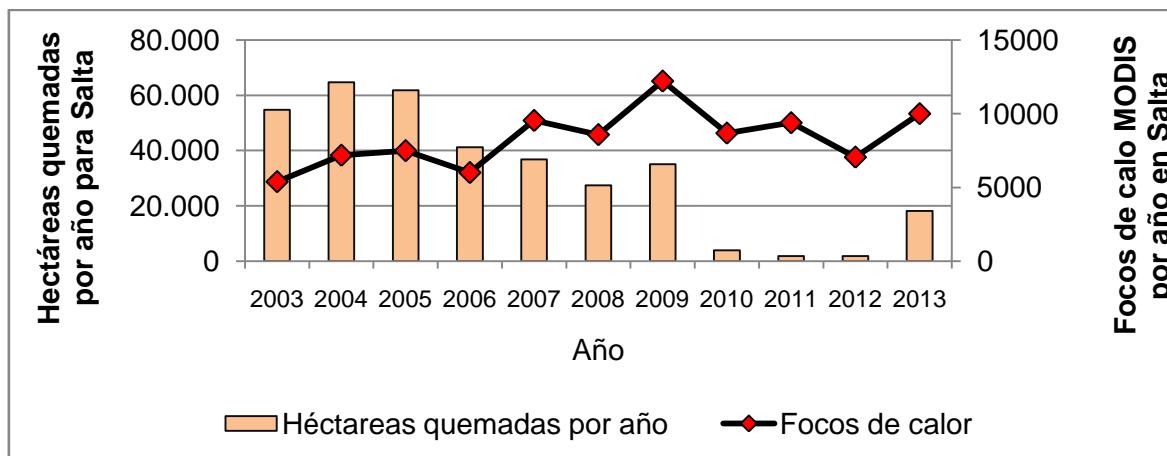


Figura 51: Superficie quemada por año reportada por el SNMF comparada con el registro anual de focos de calor para la provincia de Salta.

Para el caso de la provincia de Jujuy (Figura 52), los picos de superficie quemada coinciden con lo indicado por los focos de calor; pero otros años presentan diferencias, en algunos casos importantes (2009 y 2011).

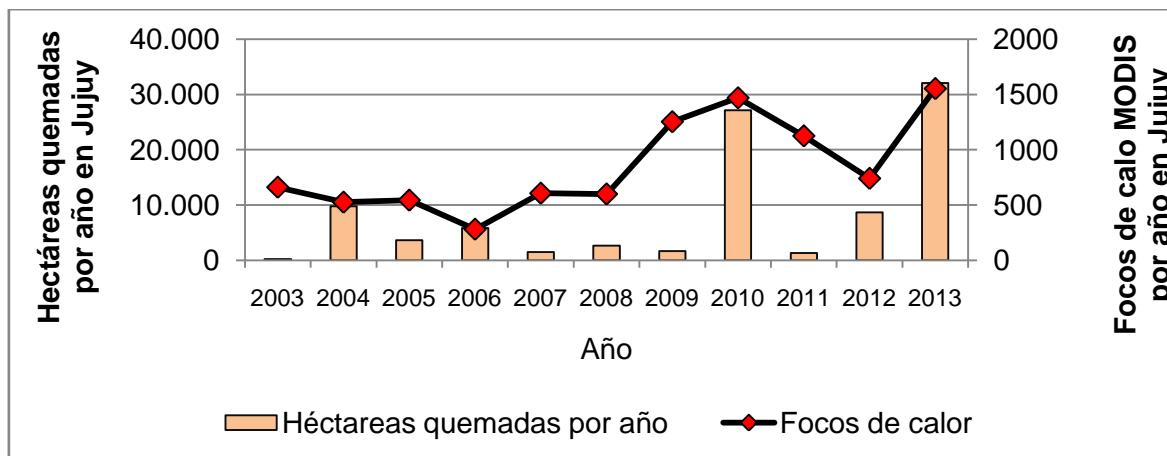


Figura 52: Superficie quemada por año reportada por el SNMF comparada con el registro anual de focos de calor para la provincia de Jujuy.

7 DISCUSION

Antes de comenzar la discusión es importante dejar claro que las cantidades de focos de calor MODIS no indican el número total de incendios ocurridos en determinado lugar y periodo de tiempo. Un incendio puede comprender uno o muchos focos de calor durante su ocurrencia (FIRMS 2009).

Como se expuso en el marco teórico los focos de calor MODIS deben tomarse como un indicador que permite representar una muestra de los incendios ocurridos en un territorio, en este caso las provincias de Salta y Jujuy. Se habla de muestra porque existe una subestimación debida principalmente a la presencia de nubes, el horario de adquisición de la imagen, la geometría de observación, la cobertura de vegetación, la magnitud del incendio y su duración (Di Bella 2008, Davies *et al.* 2009, Chuvieco *et al.* 2012, Oliva *et al.* 2008). Además dentro de los datos existen falsas alarmas difícilmente detectables. Ellas pueden ocurrir por lo general en suelos desnudos muy calientes, superficies especulares, playas de río, zonas agrícolas y urbanas, pozos de viento (Oliva *et al.* 2008, Chuvieco *et al.* 2012, Gatto 2008, Lizárraga 2013, SE 2010) e incluso en lugares cercanos a grandes incendios.

Teniendo en cuenta estas salvedades, en este estudio se supuso que los focos de calor constituyeron una fuente de información objetiva y rápida para comparar de manera relativa situaciones de incendios a diferentes escalas territoriales.

Los resultados obtenidos para las provincias de Salta y Jujuy, revelaron dos situaciones contrastantes. Salta posee un registro anual 10 veces más mayor que Jujuy. Cabe destacar que Lizárraga (2010 a), incluyó a la primera entre las 8 provincias de Argentina con más registros.

En Salta desde 2007 hasta la fecha, se observaron valores superiores al promedio siendo solo el 2012 la excepción. Sin embargo esta serie de datos no manifestó una tendencia significativa para los últimos 11 años. En cambio Jujuy con una modesta cantidad de registros, evidenció una tendencia creciente significativa para el periodo de estudio. El incremento de focos de calor fue muy notorio desde 2009 hasta el presente.

Teniendo en cuenta los focos registrados, en ambas provincias 2009 y 2013 fueron determinados como graves en la ocurrencia de incendios. Estos coincidieron con lo que los combatientes de incendios comentan (PNMF 2013, BPIFJ 2013). El 2007 también fue importante en Salta y 2010 más 2011 lo fueron para Jujuy.

Respecto a la información departamental en Salta, no se encontraron tendencias estadísticamente significativas en Anta y General José de San Martín. Aunque para el primero se registraron valores menores al LIIC en los últimos dos años y valores altos para 2007 y 2009. Para el segundo, el año 2013 sí fue grave junto al 2009 y 2007. Solo Orán presentó una tendencia creciente y significativa, presentando 2011 y 2013 como años con alta ocurrencia de incendios.

Para el caso de Jujuy, Santa Bárbara y San Pedro presentaron tendencias crecientes estadísticamente significativas. El primero presentó años con altos registros desde 2009 hasta 2013, excepto 2012. En el segundo 2010, 2011 y 2013 fueron años significativos.

Finalmente Ledesma no presentó tendencia significativa pero si se identificaron como años graves 2010 y 2013.

Un dato importante a tener en cuenta es que los departamentos con mayor número de focos fueron aquellos que mayor tasa de deforestación han registrado durante los últimos años en ambas provincias: Anta, General José de San Martín y Orán en Salta (Greenpeace 2013), y Santa Bárbara (Lizárraga 2011 e). Para el caso de Ledesma y San Pedro en Jujuy, y de Orán en Salta, el alto registro de focos de calor quizás se pueda explicar además por la producción cañera (Volante *et al.* 2004) de estos tres departamentos, además del cotidiano uso del fuego para la limpieza de campos (Lizárraga 2011 b). Esto coincidiría con lo encontrado por Gatto (2008) para algunos departamentos de la provincia de Tucumán.

La relación entre focos de calor y deforestación debería ser estudiada en más detalle. Ya que si existe una correspondencia entre ellos, los focos de calor podrían ser utilizados como un sistema de alerta de deforestación, tal como lo propone Portillo Quintero y colaboradores (2013) para bosques secos neotropicales.

Una virtud de los focos de calor MODIS es su resolución temporal. La misma permite caracterizar de manera muy detallada el régimen mensual de incendios, aportando información interesante para la planificación operativa por parte de las autoridades.

Tanto las provincias como los departamentos presentaron diferencias en cuanto al registro mensual de focos, pero todos coincidieron en distribuciones con máximos entre Agosto y Octubre. Aunque para Salta, los picos máximos fueron bien marcados mientras que en Jujuy fueron más sostenidos en el tiempo. Este periodo coincide con las épocas de sequía en ambas provincias, y con el patrón empírico relatado por combatientes. Al analizar la situación por departamento, en Salta no se presentaron diferencias notables entre ellos, en cambio en Jujuy sí. Esto podría deberse a los diferentes usos que se le da al fuego en estos territorios.

Santa Bárbara mostró picos en Setiembre y Noviembre, mientras que en San Pedro ocurrió un pico sostenido desde Agosto a Octubre. Finalmente Ledesma presentó un pico máximo en Octubre. Para estos tres casos es interesante destacar la gran variabilidad de Noviembre. Dicha característica puede estar relacionada con la llegada o el atraso de las lluvias en el Ramal Jujeño.

La distribución mensual de cada año aporta información complementaria para interpretar que paso en los años graves. Para Salta por ejemplo 2009 que fue el peor año, tuvo registros desde Agosto hasta Noviembre. En cambio en 2013 los meses con altos registros fueron solo Agosto y Setiembre. El año 2007 es el caso más interesante, ya que no tuvo meses con registros extraordinarios. Tuvo un registro mediano sostenido desde Mayo a Diciembre. Durante este año, se presentó una gran polémica ya que se trató la sanción de la Ley de Bosques y se aceleró el proceso de deforestación. Posiblemente esto se relacione con el patrón presentado por los focos de calor, ya que los incendios podrían corresponderse con quema de cordones principalmente. En Jujuy, 2013, que fue el peor año, presentó un alto registro entre Agosto y Octubre; 2009 presentó un registro creciente con máximo en Noviembre al igual que 2010, que presentó muchos datos hasta Diciembre. Por ultimo 2011 presentó un registro sostenido de focos entre Agosto y Diciembre.

La rapidez con la que se pueden procesar estos datos para mostrar mapas mensuales, anuales o históricos de incendios constituye otra virtud de los focos de calor. El procesamiento está facilitado por la organización en una base de datos con consultas ya predeterminadas, que requieren únicamente el ingreso de nuevos datos para actualizar la información y el resumen de datos en celdas de tamaño fijo.

El análisis por celdas mostró que el 26 % de ellas tuvo registros en la provincia de Salta y un 11 % se alcanzó para Jujuy. Esto puede deberse a la mayor cantidad de superficie incendiable de la primera respecto a la segunda.

Las celdas identificaron además de 2013 y 2009, en Salta a 2011, 2010, 2007 y 2008 como años con alta cantidad de celdas afectadas. En Jujuy, se destacaron 2013, 2009, 2010 y 2011. Cabe destacar que la coincidencia con el análisis de solo focos es perfecta para Jujuy, mientras que en Salta se agregarían 2011, 2010 y 2008, que tuvieron valores mayores al promedio provincial pero no superaron el LSIC.

El mapeo de celdas según su último año con registro de focos resultó útil para brindar una visión global de la antigüedad de sitios quemados. Las proporciones de celdas con registros en el último año fueron similares entre provincias, 74 % para Salta y 80 % para Jujuy. Los registros de 2013, fueron más altos en Jujuy (33 %) que en Salta (25 %).

Un mapa complementario que también sirve para evaluar la magnitud de los incendios ocurridos, es la cantidad anual de focos de calor registrados. Las distribuciones de cantidad de focos por celdas presentadas en ambas provincias fueron similares. Entre el 22 (Salta) y el 27 % (Jujuy) de las celdas tuvieron solo un registro en los 11 años de estudio y entre el 7 y 3 % registró más de 20 focos en Salta y Jujuy respectivamente.

Quizás los datos más importantes derivados a partir de focos de calor es el de cantidad de años con registro de focos. Las proporciones de celdas con registros en un solo año fueron similares para Salta y Jujuy, así como la distribución general de la variable. Además estos datos permitieron derivar la capa de sectores recurrentes en cuanto a ocurrencia de incendios (100 para Jujuy y 519 para Salta). Los mismos deben ser evaluados en un futuro estudio, o bien tenidos en cuenta por las autoridades provinciales en sus planes de combate del fuego.

Finalmente los mapas anuales de focos de calor aportan una visión regional rápida que ayuda a evaluar una temporada específica de incendios individual o comparativamente.

Respecto a los focos de calor, su distribución y las relaciones con las diferentes las coberturas del suelo, en ambas provincias la mayor parte de los focos ocurridos estuvieron ligados a sectores con alta a mediana actividad humana. Cabe destacar que en Salta el porcentaje de focos de calor ocurrido en áreas transformadas fue mayor (74 %) que en Jujuy (66%).

En Salta, otras coberturas con altos porcentajes de focos fueron los bosques abiertos cercanos a sitios transformados (10 %) y selvas alejadas (5 %) y cercanas a estos sitios (3 %). Para varias coberturas, salvo los pastizales, las proporciones fueron más altas cuando se encontraban cerca de lugares transformados. Una cobertura que mostró un patrón inverso fue el pastizal de neblina.

En Jujuy la selva alejada de sectores transformados (11 %) fue la segunda cobertura afectada, seguida por selvas y bosques abiertos cercanos (8 y 7 % respectivamente). Además se destacó la cobertura área urbana (5%) y finalmente los bosques abiertos alejados (2 %). Los ambientes riparios y el bosque abierto/arbustal estuvieron ligados a sitios transformados mientras que los pastizales de neblina no.

Respecto a las relaciones de los focos de calor registrados en lugares no transformados con las proporciones de vegetación herbácea y leñosa, los datos siempre estuvieron ligados a coberturas herbáceas o leñosas abiertas y cerradas. Comparando Salta y Jujuy, en la primera hubo una importancia relativa de formaciones leñosas abiertas (20 a 60 %) y en la segunda de cerradas (40 a 80 %). Esto puede deberse a la mayor proporción de ambientes chaqueños que posee la provincia de Salta. De forma complementaria, la relación se invierte para las proporciones de cobertura herbácea, siendo más alta para Salta (40 a 80 %) que para Jujuy (20 a 60 %).

Para algunas de las variables topográficas se encontraron relaciones interesantes, la mayoría de los focos de calor de Salta se registraron en sectores planos (< 10 % de pendiente) mientras que en Jujuy estos alcanzaron el 15 %. Esto puede estar ligado a la mayor disponibilidad de terrenos planos de Salta respecto a Jujuy. Y también puede relacionarse con eventos de deforestación.

Si bien no es muy clara la relación, en ambas provincias los focos estuvieron relacionados con aquellas exposiciones más expuestas al viento: Noreste, Este, Sureste y Sur. En Jujuy además hubo un registro importante en exposiciones oeste y noroeste.

Respecto a temperatura media anual, en Jujuy los focos ocuparon un rango más amplio (14°C a 22°C) que en Salta, donde la mayoría de los focos se concentró entre los 20 y 22°C.

En cuanto a precipitación media anual, ambas provincias ocuparon el mismo rango; sin embargo en Jujuy los focos de concentraron en intervalos más húmedos (600-800 mm vs. 400-600 mm en Salta).

Las diferencias encontradas entre las variables ambientales de cada provincia pueden relacionarse con las diferencias proporcionales de ambientes en ambas provincias y coinciden con lo señalado en el análisis de coberturas del suelo. Ya que luego de las áreas transformadas, en Jujuy la segunda cobertura en importancia fue la selva (más húmeda, temperatura más variable, mayor pendiente, exposición variable, etc.) y en Salta el bosque abierto (más seco y cálido, menor pendiente y exposición menos variable).

En base a estos análisis individuales se puede resumir que los focos de calor MODIS se distribuyeron en ambas provincias principalmente en zonas agrícola-ganaderas y ambientes naturales cercanos ubicados en sectores bajos, planos, cálidos y con estación seca. Pero también se detectaron lugares afectados por fuegos dispersos entre las serranías y llanura, relacionados principalmente a pequeños asentamientos humanos o puestos ligados a bosques montanos, pastizales de neblina, pastizales, ambientes riparios y bosques abiertos.

Por las relaciones de cercanía a lugares transformados: agrícola-ganaderos, urbanos y periurbanos-infraestructura, de muchas coberturas del suelo; se puede suponer que los incendios mayormente tienen origen antrópico: quema de cordones de desmonte, quema de

rastrojos, limpieza de campos, rebrote de pasturas, cosecha de caña, fogatas de pescadores, quema de banquinas, o el uso de fuego para espantar animales salvajes, entre otros.

Todas estas relaciones deberían ser estudiadas más a fondo en futuros estudios a partir de análisis multivariados por ejemplo, que permitan resumir esta información de manera automática, interrelacionada y objetiva. Además se deberían incluir datos climáticos actuales de precipitación anual, precipitación ocurrida en época seca, ocurrencia de nevadas, temperatura media mensual, evapotranspiración, humedad relativa, índices meteorológicos de incendios, etc.

Pasando a tema cartografía de incendios, la metodología empleada resultó útil para obtener de manera sencilla los polígonos de áreas quemadas. Aunque su aplicación fue más rápida para el primer periodo que para el segundo, ya que las condiciones fenológicas de Noviembre y la ocurrencia de grandes incendios bajo dosel redujeron el contraste entre áreas quemadas y no quemadas, dificultando de esta manera la individualización automática. Gracias a la segunda fase de la interpretación visual, estos inconvenientes pudieron ser resueltos exitosamente, tal como ocurrió en otros estudios (Mosciaro 2010).

Un factor de confusión importante fueron las sombras. Si bien se recomienda realizar correcciones topográficas a las imágenes antes de delimitar áreas quemadas (Bastarrika 2009, Mosciaro 2010, Chuvieco *et al.* 2012), la profundidad y tamaño de las sombras de las escenas analizadas dificultan su corrección e incluso generaron más confusión cuando fueron aplicadas. Por ello se decidió no realizar dicha corrección y filtrar esos errores en la fase de interpretación visual. En este sentido, sería interesante en futuros estudios utilizar índices con cocientes normalizados que eliminan el efecto de las sombras (BAIM por ejemplo).

La composición color RGB más útil fue la 755, propuesta por UMSEF 2007. También fueron muy útiles las imágenes de diferencias entre índices MIRBI y BAIM.

Los dos periodos de estudio donde se analizaron áreas quemadas fueron muy contrastantes. Mientras el primero registró menos del 1 % del área de estudio afectada por incendios, para el segundo se incrementó a casi el 5 %. Cabe destacar que en este último es donde ocurren los picos de registros de focos de calor para la región, señalados por el análisis temporal anteriormente realizado. También fueron más abundantes los incendios de considerables dimensiones, localizados principalmente en zonas de selva dentro de los departamentos General San Martín y Orán, en Salta, y Ledesma y Santa Bárbara en Jujuy.

Respecto al análisis de confiabilidad de focos de calor, se registraron pocas falsas alarmas en este estudio (8 y 2 % para el primer y segundo periodo respectivamente). Por lo que en promedio el 95 % de los focos de calor MODIS fueron aciertos o sea señalaron incendios verdaderos. Este valor es muy alto si se compara con los resultados obtenidos por otros estudios (Chuvieco *et al.* 2012).

Respecto al segundo parámetro que compone el análisis de confiabilidad, los porcentajes de áreas quemadas detectadas para el primer y segundo periodo fueron también altos (72 y 89 % respectivamente). Esto significó un promedio de detección del 81 %. Estos valores fueron más parecidos a lo encontrado por otros estudios en otras regiones (Chuvieco *et al.* 2012).

Estos niveles de confiabilidad no deben ser tomados como concluyentes, ya que pueden ser tan dinámicos como los incendios. A criterio del autor, estos deben ser evaluados periódicamente en futuros estudios, ya que otras evaluaciones realizadas en otros sectores de la región, Valle de Lerma (Lizárraga inédito), encontraron valores mucho más bajos en los aciertos y niveles de detección.

Respecto a las falsas alarmas se distinguieron dos casos: registros espacialmente aislados asociados a lugares con alto porcentaje de suelo desnudo y registros agrupados pero asociados a nuevos desmontes.

Para este segundo grupo se podría evaluar más detalladamente si en realidad se trata de falsas alarmas. Ya que en algunas áreas desmontadas se observaron pequeños grupos de pixeles saturados en la banda del infrarrojo cercano que podrían representar cordones de vegetación en plena combustión. Además, se detectaron cambios en la coloración de algunas coberturas como si hubiesen perdido vegetación. Quizás algunas falsas alarmas estarían indicando incendios de poca magnitud, difíciles de detectar aún con imágenes de alta resolución. Otro factor que podría dificultar la confirmación del foco de calor con imágenes de mediana resolución espacial, podría ser la alta dinámica de las coberturas transformadas ya que mediante labranzas o siembra podrían borrarse rápidamente los rastros de un fuego. Estas hipótesis podrían evaluarse mediante estudios experimentales de campo, aprovechando la sincronización entre imágenes Landsat 8 y MODIS (Paruelo *et al.* 2014 a).

Otro resultado curioso fue la mayor cantidad de falsas generadas por la plataforma Aqua respecto a la Terra, posiblemente las características de sus órbitas (Sur-Norte y Norte-Sur respectivamente) o sus horarios (relacionados con contrastes de temperaturas). Este aspecto debería también ser evaluado en futuros estudios. Como una observación personal, para la región son más frecuentes las imágenes diarias de buena calidad visual tomadas por TERRA en comparación con las adquiridas por AQUA.

En la primera parte de esta tesis, al analizar los focos de calor agrupados por celdas se encontró una muy buena relación entre la cantidad de focos y el número de celdas registradas anualmente. Lo que sugiere que la cantidad de focos estaría relacionada con la superficie quemada. La relación obtenida en la segunda parte del trabajo, al comparar la superficie quemada derivada de imágenes Landsat 8 con los focos de calor por departamento constituye evidencia que apoya este supuesto planteado por otros estudios (Chuvieco *et al.* 2012).

No se encontró relación estadísticamente significativa en tres de las cuatro comparaciones realizadas entre estadísticas oficiales de incendios y los registros de focos por año y provincia. Solo la superficie quemada de la provincia de Jujuy tuvo una relación de baja magnitud directamente proporcional con los focos de calor MODIS. Esto lleva a cuestionar la confiabilidad de las estadísticas publicadas para realizar caracterizaciones de situaciones de fuego a nivel regional.

Considerando por un lado que las estadísticas publicadas se construyen a partir de los incendios combatidos por los brigadistas y bomberos de cada provincia, seguramente quedan fuera del registro eventos de considerables dimensiones que ocurren en lugares alejados de áreas pobladas o con infraestructura o de relativamente fácil acceso. Las

variaciones por periodos en la cantidad de incendios y superficies reportadas a nivel provincial permiten suponer que más que evidenciar tendencias de los regímenes de incendios, estas representan diferencias en la cantidad de recursos con los que contaron, o cuentan, los organismos oficiales encargados de la temática.

Considerando por otro lado que los focos de calor son resultado de análisis objetivos y automatizados de imágenes satelitales, que además posibilitan la observación completa 4 veces al día de los territorios provinciales estudiados, puede esperarse que más incendios sean detectados. De esta manera los focos de calor constituirían una fuente de información más completa para realizar caracterizaciones de situaciones de incendios (Oliva *et al.* 2008 y Chuvieco *et al.* 2012), siempre teniendo en cuenta la existencia de falsas alarmas y las no detecciones (Di Bella 2008, Davies *et al.* 2009, Chuvieco *et al.* 2012, Oliva *et al.* 2008, Gatto 2008, Lizárraga 2013, SE 2010).

Pensando en un sistema regional de detección y evaluación de incendios en las provincias de Salta y Jujuy, claro está que la mejor fuente de datos para caracterizar de manera detallada las situaciones de fuego a nivel provincial sería el procesamiento de imágenes satelitales de mediana resolución espacial, tales como Landsat 8. Sin embargo, los costos de personal y equipamiento para realizar este tipo de análisis con la mayor frecuencia posible, serían bastante elevados y aun así no tendrían el detalle temporal que aportan los focos de calor MODIS.

Una mejor opción podría ser el uso de fuentes de datos que actúen de manera complementaria: estadísticas de incendios combatidos, focos de calor y procesamiento de imágenes satelitales. Un complemento de tipo operativo para este sistema sería la medición rápida de grandes incendios con imágenes MODIS, tal como se propone en Lípori y Lizárraga 2012.

La gran evolución ocurrida en estas dos últimas décadas en cuanto a tecnología (computadoras potentes, Internet 2.0, GPS, smart-phones, drones), acceso a datos (imágenes satelitales, focos de calor, etc.) y la creciente capacitación de personal en el uso de todas estas herramientas han facilitado gratamente la implementación de este tipo de sistemas. Las administraciones provinciales y nacionales van incorporando paulatinamente estas herramientas y se observa gran interés por parte de los equipos técnicos en implementar este tipo de trabajos en sus tareas cotidianas (Del Val, Del Mar y BPIFJ com. pers., Lizárraga 2014).

Apoyan este planteo las incorporaciones por parte del Servicio Nacional de Manejo del Fuego (Ley Nacional 26.815/13), ex Plan Nacional de Manejo del Fuego, de los registros de focos de calor en los informes de estadísticas nacionales mensuales (PNMF 2013) y la publicación de mapas de fuegos activos y de nivel peligro de incendios actual: <http://www.ambiente.gob.ar/snmf/>. Cabe destacar que toda esta información se encuentra disponible en la Internet de forma libre y gratuita. Otra iniciativa multiinstitucional interesante a nivel nacional es la confección del “Protocolo de Incendios Forestales, Rurales y de Interfase”, liderada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva. Una herramienta más a destacar es la de la Administración de Parques Nacionales, que ha incorporado desde 2010, el registro de focos de calor a nivel sistema como un indicador de incendios (Lizárraga 2012).

Seguramente estas experiencias se irán ampliando con el tiempo, incorporando datos climáticos e índices de riesgo de incendios derivados de imágenes satelitales. Dicha experiencia seguramente demandará relaciones interinstitucionales. Una característica que debería tener dicho sistema es que, además de ser útil para los tomadores de decisiones directamente relacionados con la temática, tenga una interface web de acceso libre y gratuito a fin de brindar esta información al público en general.

8 CONCLUSIONES

A partir de los registros de focos de calor de MODIS fue posible caracterizar temporal y espacialmente la situación de fuego de las provincias de Salta y Jujuy, durante el periodo 2003-2013.

El diseño de una base de datos en formato ACCESS ligada a un SIG facilitaría el manejo de datos y la actualización de esta información en el futuro.

Este trabajo podría dar pie al diseño e implementación de un sistema integrado de evaluación de situaciones de fuego a nivel provincial combinando estadísticas de incendios combatidos, focos de calor y delimitación de áreas quemadas. Lo que sería de fundamental importancia para comprender de manera más detallada la dinámica del fuego en Salta y Jujuy y para planificar su abordaje combinando sus resultados con el conocimiento de campo de combatientes experimentados.

Las situaciones descriptas para ambas provincias parecen ser confiables y coincidentes con lo empíricamente conocido.

Salta presentó una mayor cantidad de registros focos de calor MODIS para el periodo de estudio que la provincia de Jujuy (10 veces más). Sin embargo no mostró una tendencia creciente estadísticamente significativa, mientras que Jujuy sí.

En ambas provincias la mayoría de los últimos 5 años resultaron graves en cuanto a ocurrencia de incendios, fundamentalmente 2013.

Los departamentos de Salta con mayores registros de focos de calor fueron: Anta, General José de San Martín y Orán. Para Jujuy Santa Bárbara, San Pedro y Ledesma fueron los departamentos más afectados.

Los patrones evidenciados en estos 6 departamentos parecen relacionarse en parte con la dinámica de deforestación, el tipo de uso de suelo que se realiza en los mismos y cercanía a lugares transformados; sin embargo, en 2013 los eventos ocurridos en selvas de transición relativamente alejadas en Orán, General San Martín, Ledesma y Santa Bárbara fueron significativos.

Respecto al patrón general de ambas provincias, los incendios siempre estuvieron ligados a áreas con alta actividad antrópica, conservando franjas vacías coincidentes con selvas montanas y manchones dispersos en sectores de bosque montano y pastizales de neblina. Sobre el sector occidental de ambas provincias los registros fueron muy escasos.

El 72% y el 66 % de los focos de calor MODIS registrados respectivamente para las provincias de Salta y Jujuy, entre 2003 y 2013, se correspondieron con áreas de alta modificación antrópica: cultivos, áreas urbanas y periurbanas/infraestructura.

Además, se encontró que los registros de focos de calor fueron frecuentes en bosques abiertos y selvas, y en mucha menor medida en bosques abiertos/arbustales, ambientes riparios, pastizales, pastizales de neblina y suelo desnudo/arbustal o pastizal ralo.

Respecto a la confiabilidad de los focos de calor se estimó en un 95% de aciertos considerando ambos periodos en estudio, resultando un error por comisión promedio del 5%. En cuanto al nivel de detección de incendios, el promedio fue de un 80 %, resultando una tasa de omisión del 20 %. En base a toda esta evidencia, se puede aseverar que los focos de calor constituyen una fuente de información confiable y complementaria, para caracterizar de manera general el régimen de incendios de un departamento, provincia, país o continente.

Las falsas alarmas estuvieron más relacionadas con el sensor AQUA y se vincularon principalmente con coberturas de alta actividad antrópica, aunque en el segundo periodo fueron mayores los registros en selva, pero ligados a lugares transformados.

Respecto a los incendios no detectados, se encontraron situaciones inversas, para el primer periodo la mayoría de ellos estuvo en zonas antrópicas, mientras que para el segundo caso la mayoría ocurrió en coberturas nativas.

No se encontró relación entre las estadísticas oficiales de incendios y los focos de calor MODIS, salvo para la comparación entre superficie quemada y número de focos en la provincia de Jujuy. Sí se encontró una muy buena correlación entre los focos de calor y la superficie de los polígonos quemados durante la evaluación de la confiabilidad.

Por todas estas razones, se considera que el registro de focos de calor MODIS como una fuente más confiable para evaluar situaciones relativas de fuego entre años que la de las estadísticas oficiales.

9 RECOMENDACIONES

La utilidad de la Teledetección Espacial, usando focos de calor e imágenes satelitales, en la evaluación de situaciones de fuego o detección de áreas quemadas a diferentes niveles de detalle es alta. Si bien todavía existen algunas objeciones en cuanto a su utilidad operativa por parte de gestores, los resultados alcanzados para el presente estudio más los obtenidos por los realizados en otras partes del mundo (Bastarrika 2009, Mosciaro 2010, Chuvieco *et al.* 2008, Chuvieco *et al.* 2012, Di Bella *et al.* 2006, Lizárraga 2010 a, Palacios *et al.* 2007, Lizárraga 2011 a, Lizárraga 2011 b, Lizárraga 2011 d, Fuentes Nay 2013, Lizárraga 2011 a, Lizárraga y Lipori 2012, Oliva *et al.* 2008, Mari *et al.* 2007, UMSEF 2007) y la implementación de nuevas herramientas (FIRMS 2009, CONE 2014, INPE 2014, SEPA 2014 a, SEPA 2014 b) lo demuestran.

Por ello se recomienda continuar con la implementación de estos tipos de herramientas por parte de los organismos nacionales y provinciales relacionados con la temática, manteniendo un perfil más operativo que científico.

Como líneas de investigación se recomiendan:

- Repetir este análisis en otros sectores de las provincias con características diferentes.
- Realizar análisis más detallados de las falsas alarmas, quizás con estudios experimentales más rigurosos, comprobaciones a campo e imágenes satelitales de mayor resolución espacial, ya que algunas de dichas falsas alarmas podrían relacionarse con quema de cordones originados por desmontes no detectables con imágenes Landsat 8.
- Complementar el presente análisis espacio-temporal con datos climáticos actuales provenientes de estaciones o imágenes satelitales meteorológicas.
- Realizar análisis multivariados que involucren los registros de focos de calor con las variables de caracterización utilizadas en el presente estudio u otras.
- También sería interesante correlacionar los datos de focos de calor con las unidades de uso del suelo, principalmente las correspondientes a los diversos cultivos de la zona, las actividades pecuarias y los nuevos desmontes.

10 REFERENCIAS.

- Bachmann L., Volante J., Cabral C., Frasseto A. y Negri M. 2003. Proyecto de Revisión de la Zonificación de la Reserva de Biosfera de las Yungas. Instituto de Geografía FFyL UBA / SeMADeS. Informe final. Copia en CD.
- Barbosa, P. M., J.-M. Gregoire y J. M. C. Pereira (1999). An Algorithm for Extracting Burned Areas from Time Series of AVHRR GAC Data Applied at a Continental Scale - an overview. *Remote Sensing of Environment* 69: 253-263.
- Bastarrika A. 2009. Cartografía automática de área quemada a nivel local-regional mediante algoritmos de contexto espacial. Tesis doctoral. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá. España.
- Beget M. y Di Bella C. 2014. Capítulo 8: El comportamiento espectral de las cubiertas vegetales. En Paruelo, JM; Di Bella, CM y Milkovic, M (Editores). 2014. Percepción remota y sistemas de información geográfica. Sus aplicaciones en Agronomía y Ciencias Ambientales. Editorial: Hemisferio sur.
- Bianchi A. 2005. Mapa de isohietas anuales sobre mosaico de imágenes. SAC-C publicado en formato póster (60 x 90 cm.). INTA, EEA SALTA. Salta, Argentina.
- Bianchi A., Volante J., Elena H. y Cabral C. 2005. Mapa Digital de temperaturas medias mensuales, evapotranspiración potencial y precipitación menos evapotranspiración potencial. INTA, EEA SALTA. Salta, Argentina.
- Bianchi A. y Cravero S. 2010. Atlas Climático Digital de la República Argentina. INTA, Centro Regional Salta Jujuy. Salta, Argentina.
- Bravo G., Bianchi A., Volante J., Alderete Salas S., Semprovini G., Vicini M., Fernández L., Lipshitz H., Piccolo A. 1999. Regiones Agro-económicas del Noroeste Argentino. Primeras Jornadas de SIG. INTA-UNSE Gobierno Santiago del Estero, Santiago del Estero. Disco Compacto.
- Brown A. D., Grau A., Lomáscolo T. y N. I. Gasparri. 2002. Una estrategia de conservación para las selvas subtropicales de montaña (Yungas) de Argentina. *Ecotrópicos* 15: 147-159.
- Brigada Provincial de Incendios Forestales Jujuy. 2013. Evolución del BUI Jujuy. Secretaría de Gestión Ambiental, provincia de Jujuy. Argentina.
- Burkart R., Bárbaro N., Sánchez R. y Gómez D. 1999. Eco-regiones de la Argentina. Administración de Parques Nacionales. Buenos Aires, Argentina. 42 pp. Disponible en internet: http://www2.sib.gov.ar/archivos/Eco_regiones_de_la_Argentina_1999.pdf Fecha de consulta: 23/01/15.
- Cabello J., Paruelo, J. 2008. La teledetección en estudios ecológicos. *Ecosistemas* 17(3):1-3. Disponible en internet: <http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/77> Fecha de consulta: 22/12/2014.
- Chuvieco E. 2009. Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp). Vol. 103, Nº. 1, pp 173-181. X Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica.
- Chuvieco E., Cifuentes Y., Hantson S., Agustín López A., Ramo R. y Torres J. 2012. Comparación entre focos de calor MODIS y perímetros de área quemada en incendios mediterráneos. *Revista de Teledetección* 37: 9-22. Disponible en internet: http://www.aet.org.es/revistas/revista37/Revista_37_Todo.pdf Fecha de consulta: 22/12/2014.
- Chuvieco E., Opazo S., Sione W., Del Valle H., Anaya J., Di Bella C., Cruz I., Manzo L., López G., Mari N., González-Alonso F., Morelli F., Setzer A., Csiszar I., Kanpandegi J. A., Bastarrika A., y Libonati R. 2008. Global Burned Land Estimation In Latin America Using Modis Composite Data, *Ecological Applications*, Vol. 18(1), Pp. 64-79

CARACTERIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA SITUACIÓN DE INCENDIOS EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY A PARTIR DE FOCOS DE CALOR MODIS (2003-2013)

Chuvieco E. y Congalton R. 1988. Mapping and inventory of forest fires from digital processing of TM data. Geocarto International 4: 41-53.

Cole J. 2001. Biomass Burning. Earth Observatory. EOS Project Science Office. NASA Goddard Space Flight Center. Disponible en internet: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/BiomassBurning/printall.php> Fecha de consulta: 22/12/2014.

CONAE. 2014. Focos de calor. Servicio WMS Últimos Puntos 24 hs. + Mapas de Referencia. Comisión Nacional de Actividades Espaciales. Disponible en internet: <http://focosdecalor.conae.gov.ar/> Fecha de consulta: 22/12/14

Congedo L. 2013. Semi-Automatic Classification Plugin for QGIS. Sapienza University, Rome, Italia. Disponible en internet: <http://www.planning4adaptation.eu/> Fecha de consulta: 22/12/14.

Davies D., Ilavajhala S., Wong M., y Justice C. 2009. Fire Information for Resource Management System: Archiving and Distributing MODIS Active Fire Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 47 (1):72-79.

de Groot W., Flannigan M., y Stocks B. 2013. El Cambio Climático y los Incendios Forestales. Memorias del Cuarto Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación, y Economía de los Incendios Forestales: Cambio Climático e Incendios Forestales. United States Department of Agriculture, Forest Service. EEUU.

Dentoni M. y Muñoz M. 2001. Glosario de Términos relacionados con el Manejo del Fuego. Plan Nacional de Manejo del Fuego. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Disponible en internet: <http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/PNMF/file/glosario.pdf> Fecha de Consulta: 22/12/14.

Dentoni M. y Muñoz M. 2012 Evaluación de peligro de incendios. Informes técnicos. Informe Técnico Nº 1. Sistemas de Evaluación de Peligro de Incendios. Programa Nacional de Evaluación de Peligro de Incendios y Alerta Temprana. Plan Nacional de Manejo del Fuego. Chubut, Argentina. Disponible en internet: http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/PNMF/file/Bibliografia/PNMF_IT1.pdf Fecha de consulta: 22/12/14.

DiMiceli C., Carroll M., Sohlberg R., Huang C., Hansen M. y Townshend J. 2011. Annual Global Automated MODIS Vegetation Continuous Fields (MOD44B) at 250 m Spatial Resolution for Data Years Beginning Day 65, 2000 - 2010, Collection 5 Percent Tree Cover, University of Maryland, College Park, MD, USA.

Di Bella, C., Jobbággy, E., Paruelo, J. y Pinnock, S. 2006. Continental fire density in South America. Global Ecology and Biogeography 15 (2): 192-199.

Di Bella C., Posse G., Beget M., Fischer M., Mari y Veron N. 2008. La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. Ecosistemas 17 (3). <http://www.revistaecosistemas.net/> Fecha de consulta: 01-03-10.

Di Bella C. y Posse G. 2014. Capítulo 15: Estudio y seguimiento de los incendios. En Paruelo, JM; Di Bella, CM y Milkovic, M (Editores). 2014. Percepción remota y sistemas de información geográfica. Sus aplicaciones en Agronomía y Ciencias Ambientales. Editorial: Hemisferio sur.

FAO. 2007. Manejo del Fuego: principios y acciones estratégicas. Directrices de carácter voluntario para el manejo del fuego. Documento de Trabajo sobre el Manejo del Fuego No.17. Roma. Disponible en internet: <http://www.fao.org/docrep/009/j9255s/j9255s00.htm> Fecha de consulta: 07-12-14.

FAO. 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010 Informe principal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Disponible en internet: <http://www.fao.org/docrep/013/i1757s/i1757s.pdf> Fecha de consulta: 22/12/14.

FIRMS. 2009. Fire Information for Resource Management System: Section FAQS. Disponible en internet: <http://maps.geog.umd.edu/firms/> Fecha de consulta: 01-03-10.

Férrandez-Coppel I. y Herrero Llorente E. 2012. El satélite Landsat: análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ satélite Landsat. Dasometría e Inventariación. Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Palencia. Universidad de Valladolid. Disponible en internet: <http://www.cartesia.org/data/apuntes/teledeteccion/landsat-analisis-visual.pdf> Fecha de consulta: 22/12/14.

CARACTERIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA SITUACIÓN DE INCENDIOS EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY A PARTIR DE FOCOS DE CALOR MODIS (2003-2013)

Fuentes Nay E. 2013. Monitoreo de focos de calor y quemas en el Departamento de Pando 2012. HERENCIA Interdisciplinaria para el Desarrollo Sostenible. Pando, Bolivia. Disponible en internet: <http://www.herencia.org.bo/webdocs/transparencia/QUEMAS-2012.pdf> Fecha de consulta: 23-12-14.

Fuller D. y Chowdhury F. 2006. Monitoring and modelling tropical deforestation: Introduction to the Special Issue. doi:10.1111/j.1467-9493.2006.00235.x. Disponible en internet: http://geography.indiana.edu/faculty/roychowdhury/JournalArticles/Fuller-RoyChowdhury2006_Monitoring%20and%20modelling%20tropical%20deforestation-Introduction%20to%20the%20Special%20Issue.pdf Fecha de consulta: 22/12/14.

García M. y Chuvieco E. 2004. Assessment of the potential of SAC-C/MMRS imagery for mapping burned areas in Spain. Remote Sensing of Environment 92: 414-423.

Gatto M. 2008. Distribución espacial y temporal de focos de calor detectados por sensores satelitales en la provincia de Tucumán, Argentina. Trabajo final de graduación. Facultad de Ciencias Forestales "Néstor René Ledesma". Universidad Nacional de Santiago del Estero. Santiago del Estero, Argentina. Disponible en internet: <http://fcf.unse.edu.ar/archivos/biblioteca/Trabajo%20final%20-%20Miguel%20Gatto.pdf> Fecha de consulta: 22/12/14.

Giglio L. 2007. MODIS Collection 4 Active Fire Product User's Guide Version 2.3. Science Systems and Applications, Inc. Disponible en internet: <http://maps.geog.umd.edu/firms/> Fecha de consulta: 01-03-10.

Giglio L. 2013. MODIS Collection 5 Active Fire Product User's Guide. Version 2.5. Department of Geographical Sciences. University of Maryland. Disponible en internet: http://modis-fire.umd.edu/Documents/MODIS_Fire_Users_Guide_2.5.pdf Fecha de consulta: 23/12/14.

Giglio L, Descloires J., Justice C. y Kaufman Y. 2003. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS. Remote Sensing of Environment 87 (2-3): 273-282.

Gómez Nieto I. y Martín M. 2008. Estudio Comparativo de Índices Espectrales para la Cartografía de Áreas Quemadas con Imágenes MODIS. Revista de Teledetección. ISSN: 1988-8740. 2008. 29: 15-24

Greenpeace. 2013. Salta: el festival de desmontes no se detiene. Campaña de Bosques. Greenpeace. Disponible en internet: <http://m.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2013/bosques/Informe-Salta-2013-FINAL.pdf> Fecha de consulta: 23/12/14.

Grillo F., Castellnou M., Molina D., Martínez E. y Fababú D. 2008. Análisis del Incendio Forestal: planificación de la extinción. Editorial AIFEMA, Granada, España 144 p. ISBN 978-84-612-2150-9.

Hudak, A. y Brockett B. 2004. Mapping fire scars in a southern African savannah using Landsat imagery. International Journal of Remote Sensing 25: 3231-3243.

INPE. 2014. Monitoramento de Queimadas em Tempo Quase-Real do INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Brasil. Disponible en Internet: <http://www.inpe.br/queimadas/> Fecha de consulta: 01-03-10.

Instituto Geográfico Nacional. 2014. SIG del IGN. Instituto Geográfico Nacional. Buenos Aires, Argentina. Disponible en Internet: <http://www.ign.gob.ar/sig> Fecha de consulta: 12-09-14.

Instituto Geográfico Nacional. 2015. Datos de la República Argentina. Instituto Geográfico Nacional. Buenos Aires, Argentina. Disponible en Internet: <http://www.ign.gob.ar/category/tem%C3%A1tica/datos-de-la-rep%C3%BAblica-argentina> Fecha de consulta: 23-01-15.

IPCC. 2000. Land Use, Land-Use Change, and Forestry. Robert T. Watson, Ian R. Noble, Bert Bolin, N. H. Ravindranath, David J. Verardo and David J. Dokken (Eds.) Cambridge University Press, UK. Available from Cambridge University Press, The Edinburgh Building Shaftesbury Road, Cambridge CB2 2RU ENGLAND. Disponible en internet: <https://www.ipcc.ch> Fecha de consulta: 12-09-14.

Jarvis, A., Reuter H., Nelson A., Guevara E. 2008. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database. Disponible en internet: <http://srtm.cgiar.org> Fecha de consulta: 12-09-14.

CARACTERIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA SITUACIÓN DE INCENDIOS EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY A PARTIR DE FOCOS DE CALOR MODIS (2003-2013)

Jensen, J. 2000. *Remote Sensing of the Environment. An Earth Resource Perspective*, Upper Saddle River N.J., Prentice-Hall.

Koutsias N. y Karteris M. 1998. Logistic regression modelling of multitemporal Thematic Mapper data for burned area mapping. *International Journal of Remote Sensing* 19: 3499-3514.

Koutsias N. y Karteris M. 2000. Burned area mapping using logistic regression modeling of a single post-fire Landsat-5 Thematic Mapper image. *International Journal of Remote Sensing* 21: 673-687.

Kucéra J., Yasuoka Y. y Dye D. 2005. Creating a forest fire database for the Far East of Asia using NOAA/AVHRR observation. *International Journal of Remote Sensing* 26: 2423-2439.

Laris P. 2005. Spatiotemporal problems with detecting and mapping mosaic fire regimes with coarse resolution satellite data in savanna environments. *Remote Sensing of Environment* 99: 412-424.

Lizárraga L. 2010 a. Focos de Calor MODIS registrados para Argentina (2003-2008): Caracterización espacial y temporal. Informe interno. Sistema de Información de Biodiversidad Nodo NOA, Delegación Regional Noroeste, Administración de Parques Nacionales. Salta, Argentina.

Lizárraga L. 2010 b. Cuantificación Superficie Afectada Incendio Calilegua Noviembre 2010. Informe interno. Sistema de Información de Biodiversidad Nodo NOA, Delegación Regional Noroeste, Administración de Parques Nacionales. Salta, Argentina.

Lizárraga L. 2011 a. Análisis temporal con datos MODIS del incendio ocurrido en noviembre de 2010 en el Parque Nacional Calilegua. Sistema de Información de Biodiversidad Nodo NOA, Delegación Regional Noroeste, Administración de Parques Nacionales. Salta, Argentina.

Lizárraga L. 2011 b. Áreas críticas en cuanto a incendios para el Parque Nacional Calilegua. Informe interno. Sistema de Información de Biodiversidad Nodo NOA, Delegación Regional Noroeste, Administración de Parques Nacionales. Salta, Argentina.

Lizárraga L. 2011 c. Sistema de alerta temprana y monitoreo de pérdida de bosque nativo. Nodo NOA, Sistema de Información de Biodiversidad, Delegación regional Noroeste, Administración de Parques Nacionales. 2º Congreso Nacional de Protección y Manejo Sustentable del Bosque Nativo. 27, 28 y 29 de Octubre de 2011. Villaguay, Entre Ríos, Argentina.

Lizárraga L. 2011 d. Caracterización de la situación de incendios en la provincia de Jujuy. Nodo NOA, Sistema de Información de Biodiversidad, Delegación regional Noroeste, Administración de Parques Nacionales. Salta, Argentina.

Lizárraga L. 2011 e. Mapa de sectores transformados en el Departamento Santa Bárbara, provincia de Jujuy. Fundación CEBIO. Jujuy, Argentina.

Lizárraga L., Sanchez M., De Gracia J. y Moschione F. 2011. Corredores ecológicos en Salta y Jujuy: Problemática, sitios prioritarios, antecedentes y trabajos en marcha. Nodo NOA, Sistema de Información de Biodiversidad, Delegación regional Noroeste, Administración de Parques Nacionales. Salta, Argentina.

Lizárraga L. 2012. Caracterización de la situación de incendios en la provincia de Córdoba e identificación de zonas críticas en el Parque Nacional Quebrada del Condorito a partir del análisis de focos de calor MODIS. Periodo 2003-2011. Taller Implementación de un sistema de cortafuegos y alerta temprana del Parque Nacional Quebrada del Condorito. Carlos Paz, Córdoba, Argentina.

Lizárraga L. 2013. Focos de calor MODIS registrados en la Reserva de Biosfera de las Yungas (2003-2012): caracterización espacial y temporal. Sistema de Información de Biodiversidad – Nodo NOA, Delegación Regional Noroeste, Administración de Parques Nacionales. I SIMPOSIO DE LA RESERVA DE BIOSFERA DE LAS YUNGAS “10 años de experiencias y desafíos” en el marco de la V Reunión Regional de las Selvas de Montaña. 30 y 31 de mayo de 2013, San Salvador de Jujuy, Provincia de Jujuy, República Argentina.

Lizárraga L. 2014. Caracterización de la situación de incendios en las áreas protegidas del noroeste argentino a partir del análisis de focos de calor MODIS. Periodo 2003-2013. Sistema de Información

CARACTERIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA SITUACIÓN DE INCENDIOS EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY A PARTIR DE FOCOS DE CALOR MODIS (2003-2013)

de Biodiversidad – Nodo NOA, Delegación Regional Noroeste, Administración de Parques Nacionales. I Taller de Manejo del Fuego en las áreas protegidas nacionales del NOA. Salta, Argentina.

Lizárraga L. y Lipori M. 2012. Caracterización de la situación de incendios en las áreas protegidas nacionales de argentina a partir de de focos de calor MODIS - año 2011. Congreso argentino de teledetección 2012. Córdoba, Argentina. Disponible en internet: http://cms.iafe.uba.ar/tele/tele_congreso/Posteres/Ambiente%20incendios/2.9_CARACTERIZACION%20DE%20LA%20SITUACION%20DE%20INCENDIOS%20.pdf Fecha de Consulta: 22/12/14.

Lizárraga L. y Lipori M. 2013. Caracterización de la situación de incendios en el Parque Nacional Río Pilcomayo a partir del análisis de focos de calor MODIS. Periodo 2004-2012. Sistema de Información de Biodiversidad, Administración de Parques Nacionales. I Taller de Manejo del Fuego en el Parque Nacional Río Pilcomayo. Formosa, Argentina.

Mari N., Kanpandegi, Di Bella C. Fischer M. Ferrer F. 2007. Respuesta espectral de la vegetación ante disturbios de fuego para distintos ecosistemas de la Argentina. Actas del XII Congreso de la Asociación española de Teledetección. 19 – 21 de setiembre de 2007. Mar del Plata, Argentina.

Martín M. 1998. Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. Doctoral thesis, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares.

Martín M. 2001. Literature review on methods to obtain burnt land maps. Forest Fire Spread Prevention and Mitigation. Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Martín M. y Chuvieco E. 1995. Mapping and evaluation of burned land from multitemporal analysis of AVHRR NDVI images. EARSeL Advances in Remote Sensing 4 (3): 7-13.

Martínez Batlle J. 2013. Lanzamiento del satélite LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Disponible en internet: <http://www.geografiafisica.org/2013/02/11/lanzamiento-del-satelite-lbcm-landsat-data-continuity-mission/> Fecha de Consulta: 22/12/14

Mas, J. F. 2011. Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. Semarnat, INE, UNAM, CIGA. ISBN: 978-607-7908-55-5. México, D.F.Michalek J., French N., Kasischke E., Johnson R. y Colwell J. 2000. Using Landsat TM data to estimate carbon release from burned biomass in an Alaskan spruce forest complex. International Journal of Remote Sensing 21: 323-338.

Milne A. 1986. The use of remote sensing in mapping and monitoring vegetational change associated with bushfire events in Eastern Australia. Geocarto International 1: 25-32.

Mosciano J. 2010. Cartografía histórica de incendios forestales con imágenes Landsat: Tendencias espacio-temporales relacionadas al uso del suelo. Tesis de Máster en Tecnologías de la Información Geográfica . Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares. España.

NASA. 2013. LDCM Landsat Data Continuity Mission Press Kit. Disponible en internet: http://www.nasa.gov/pdf/723395main_LDCMpresskit2013-final.pdf Fecha de Consulta: 22/12/14

Núñez, V. 2007. El Satélite Terra y el EOS. Traducido de la página de la Internet de la NASA: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/mission.asp>, aportes personales y de bibliografía adicional. Instituto de Recursos Naturales y Eco Desarrollo, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta. Salta, Argentina.

Oliva P., Jurado S., Martínez J. y Chuvieco E. 2008. Validación y comparación de los productos MODIS y AATSR para la detección de focos activos en la España Peninsular y Baleares en el año 2003. (ISSN:1130-2968). Espacio, Tiempo y Forma. Geografía. 2008, vol 1, p. 141-150.

Omi P. 2005. Forest Fires: A Reference Handbook. Santa Barbará, California. ABC-CLIO. 347 pp.

Oyonarte C., Alcaraz-Segura D., Oyarzabal M., Caello J. y Paruelo J. 2014. Capítulo 11: Sistema de apoyo a la gestión de áreas protegidas basado en el seguimiento de la productividad primaria derivado de sensores remotos. El caso de la reserva de la biosfera de Cabo de Gata-Níjar (Almería- España). En Paruelo, JM; Di Bella,

CARACTERIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA SITUACIÓN DE INCENDIOS EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY A PARTIR DE FOCOS DE CALOR MODIS (2003-2013)

CM y Milkovic, M (Editores). 2014. Percepción remota y sistemas de información geográfica. Sus aplicaciones en Agronomía y Ciencias Ambientales. Editorial: Hemisferio sur.

Palacios T., Villegas Z. y Pinto C. 2007. Comparación de la detección de focos de calor en Bolivia usando diferentes fuentes (Periodo 2005-2006). Proyecto BOLFOR / Instituto Boliviano de Investigación Forestal. Santa Cruz, Bolivia.

Paoli H., Volante J., Noé Y., Vale L., Campos C., Mosciaro M. 2014 a. Monitoreo de cultivos del Noroeste Argentino a partir de sensores remotos. Campaña agrícola 2013-2014: Cultivos extensivos de verano para las provincias de Salta y Jujuy. PRORENOA. INTA. Disponible en internet: <http://www.inta.gov.ar/prorenoar/> Fecha de consulta: 01-01-14.

Paoli H., Volante J., Noé Y., Mosciaro M., Vale L., Elena H. 2014 b. Monitoreo de cultivos del Noroeste Argentino a partir de sensores remotos. Campaña Agrícola 2014 Cultivos Extensivos de Invierno. PRORENOA. INTA. Disponible en internet: <http://www.inta.gov.ar/prorenoar/> Fecha de consulta: 01-01-14.

Paruelo J. 2014. Capítulo 7: Clasificación de datos espectrales. En Paruelo, JM; Di Bella, CM y Milkovic, M (Editores). 2014. Percepción remota y sistemas de información geográfica. Sus aplicaciones en Agronomía y Ciencias Ambientales. Editorial: Hemisferio sur.

Paruelo J., García A. y Di Bella C. 2014 a. Capítulo 4: Sensores pasivos y plataformas de observación terrestre. En Paruelo, JM; Di Bella, CM y Milkovic, M (Editores). 2013. Percepción remota y sistemas de información geográfica. Sus aplicaciones en Agronomía y Ciencias Ambientales. Editorial: Hemisferio sur.

Paruelo J., Verón S. y De Abelleira D. 2014 b. Capítulo 1: Principios básicos de percepción remota. En Paruelo, JM; Di Bella, CM y Milkovic, M (Editores). 2014. Percepción remota y sistemas de información geográfica. Sus aplicaciones en Agronomía y Ciencias Ambientales. Editorial: Hemisferio sur.

Pereira J. 1999. A Comparative Evaluation of NOAA/AVHRR Vegetation Indexes for Burned Surface Detection and Mapping. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 37: 217-226.

Pereira J. y Setzer A. 1993. Spectral characteristics of deforestation fires in NOAA-AVHRR images. International Journal of Remote Sensing 14: 583-597.

Plan Nacional de Manejo del Fuego. 2013. Informe Nacional de Peligro de Incendios de Vegetación. Diciembre 2013. Programa de Evaluación de Peligro y Alerta Temprana. Coordinación de Desarrollo Técnico. Plan Nacional de Manejo del Fuego. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.

Portillo-Quintero C., Sanchez-Azofeifa A. y do Espirito-Santo M. 2013. Monitoring deforestation with MODIS Active Fires in Neotropical dry forests: An analysis of local-scale assessments in Mexico, Brazil and Bolivia. Journal of Arid Environments. Volume 97: 150–159.

Quantum GIS Development Team. 2014. Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponible en internet: <http://qgis.osgeo.org> Fecha de Consulta: 22/01/14.

Servicio Nacional de Manejo del Fuego. 2014 a. Incendios forestales. Plan Nacional de Manejo del Fuego. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Disponible en internet: http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/PNMF/File/Que_es_el_fuego.pdf Fecha de Consulta: 22/12/14.

Servicio Nacional de Manejo del Fuego. 2014 b. INCENDIOS FORESTALES: ¿Qué es un Incendio Forestal?. Servicio Nacional de Manejo del Fuego. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Disponible en internet: http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/PNMF/File/A_que_llamamos_Incendio_Forestal.pdf Fecha de Consulta: 22/12/14.

Programa Nacional de Estadística Forestal. 2014. Estadística de Incendios Forestales 2013. Dirección de Bosques. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Buenos Aires, Argentina. Disponible en Internet: <http://www.ambiente.gob.ar/archivos/web/PNEF/file/Incendios%202013%20corregido%202013-11-2014/Documento%20completo.pdf> Fecha de Consulta: 22/12/14.

CARACTERIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA SITUACIÓN DE INCENDIOS EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY A PARTIR DE FOCOS DE CALOR MODIS (2003-2013)

Sá A., Pereira J., Vasconcelos M., Silva J., Ribeiro N. y Awasse A. 2003. Assessing the feasibility of sub-pixel burned area mapping in miombo woodlands of northern Mozambique using MODIS imagery. International Journal of Remote Sensing 24: 1783-1796.

Secretaría de Energía. 2010. Informe preliminar de Anomalías Térmicas en detección de Viento y Quema de Gas. Área Sensores Remotos, Tecnología de la Información, Secretaría de Energía. Buenos Aires, Argentina. Disponible en Internet: http://sig.se.gob.ar/visor/timeline_venteos/informes_pv/48_informe_mayo_junio_2013.docx Fecha de Consulta: 22/12/14.

Seghezzo L., Buliubasich C., Paruelo J., Volante J., Somma D., Rodríguez H., Gagnon S., Hufty M. 2011. Native Forests and Agriculture in Salta (Argentina): Conflicting visions of development. Journal of Environment & Development. 20 (3) 251-277. Disponible en internet: <http://redaf.org.ar/wp-content/uploads/2012/12/Seghezzo-et-al-2011-Native-forests-and-agriculture-in-Salta.pdf> Fecha de Consulta: 22/12/14.

SEPA. 2014 a. Eventos extremos: catálogo de focos. SEPA - Herramientas satelitales para el seguimiento de la producción agropecuaria. INTA. Disponible en internet: http://sepa.inta.gob.ar/productos/eventos_extremos/catalogo_incendios/ Fecha de Consulta: 22/12/14.

SEPA. 2014 b. Eventos extremos: mapa de focos. SEPA - Herramientas satelitales para el seguimiento de la producción agropecuaria. INTA. Disponible en internet: http://sepa.inta.gob.ar/productos/eventos_extremos/mapa_incendios/ Fecha de Consulta: 22/12/14.

Stroppiana D., Pinnock S., Pereira J. y Gregoire J. 2002. Radiometric analysis of SPOTVEGETATION images for burnt area detection in Northern Australia. Remote Sensing of Environment 82: 21-37.

Trigg, S. y S. Flasse (2001). An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrubsavannah. International Journal of Remote Sensing 22: 2641-2647.

TOVAS. 2010. TRMM Online Visualization and Analysis System (TOVAS). Disponible en internet: <http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/> Fecha de consulta: 01-03-10.

UMSEF. 2005. Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos. Proyecto Bosques Nativos y Áreas Protegidas. Préstamo BIRF 4085-AR Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal. Dirección de Bosques, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Disponible en internet: http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/UMSEF/File/PINBN/informe_nacional_pinbn.pdf Fecha de consulta: 01-03-10.

UMSEF. 2007. Áreas afectadas por los incendios de septiembre de 2006 en la provincia de Córdoba. Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal. Dirección de Bosques, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Disponible en internet: <http://www.ambiente.gov.ar/> Fecha de consulta: 01-03-10.

USGS. 2006, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) "Finished" 3-arc second SRTM Format Documentation. Disponible en internet: <http://edc.usgs.gov/products/elevation/srtmbil.html> Fecha de Consulta: 22/12/14.

USGS. 2013. Landsat Missions. U.S. Geological Survey. Disponible en internet: <http://landsat.usgs.gov/index.php> Fecha de Consulta: 22/12/14.

Van Wagner, C. E. (1987). Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service. Ottawa, Canada.

Volante J., Benedetti P., Paoli H., Fernandez D. y Moreno R. 2004. Monitoreo de cultivos del Noroeste Argentino a partir de sensores remotos - Campaña agrícola 2003-2004. Caña de Azúcar. PRORENOA. INTA. Disponible en internet: <http://www.inta.gov.ar/prorenoaa/> Fecha de consulta: 01-03-10.

Volante, J., Mosciaro M., Alcaraz-Segura D., Vale L., Viglizzo E. y Paruelo J. 2014. Capítulo 27: Dinámica del avance de la frontera agropecuaria y cambios funcionales en ecosistemas del Noroeste de Argentina. En Pascale Medina, C.; Zubillaga M.; Taboada M.A (Eds.). 2014. Los suelos, la producción agropecuaria y el cambio climático: avances en la Argentina. 1ra Edición. Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca; AACyAPA.

CARACTERIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA SITUACIÓN DE INCENDIOS EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY A PARTIR DE FOCOS DE CALOR MODIS (2003-2013)

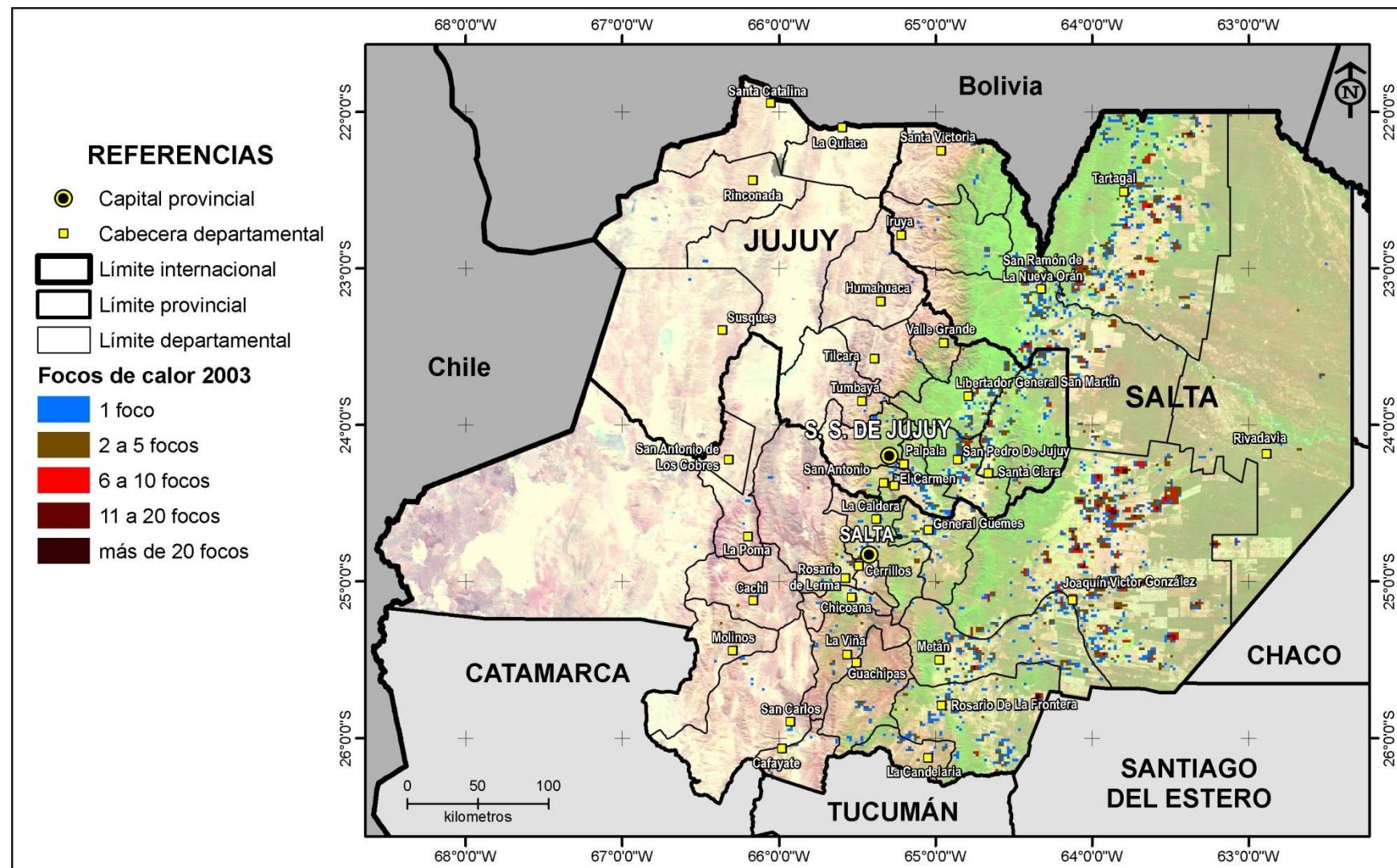
Buenos Aires, Argentina. . Disponible en internet: <http://inta.gob.ar/documentos/el-seguimiento-del-nivel-de-provision-de-los-servicios-ecosistemicos/> Fecha de consulta: 22/12/14.

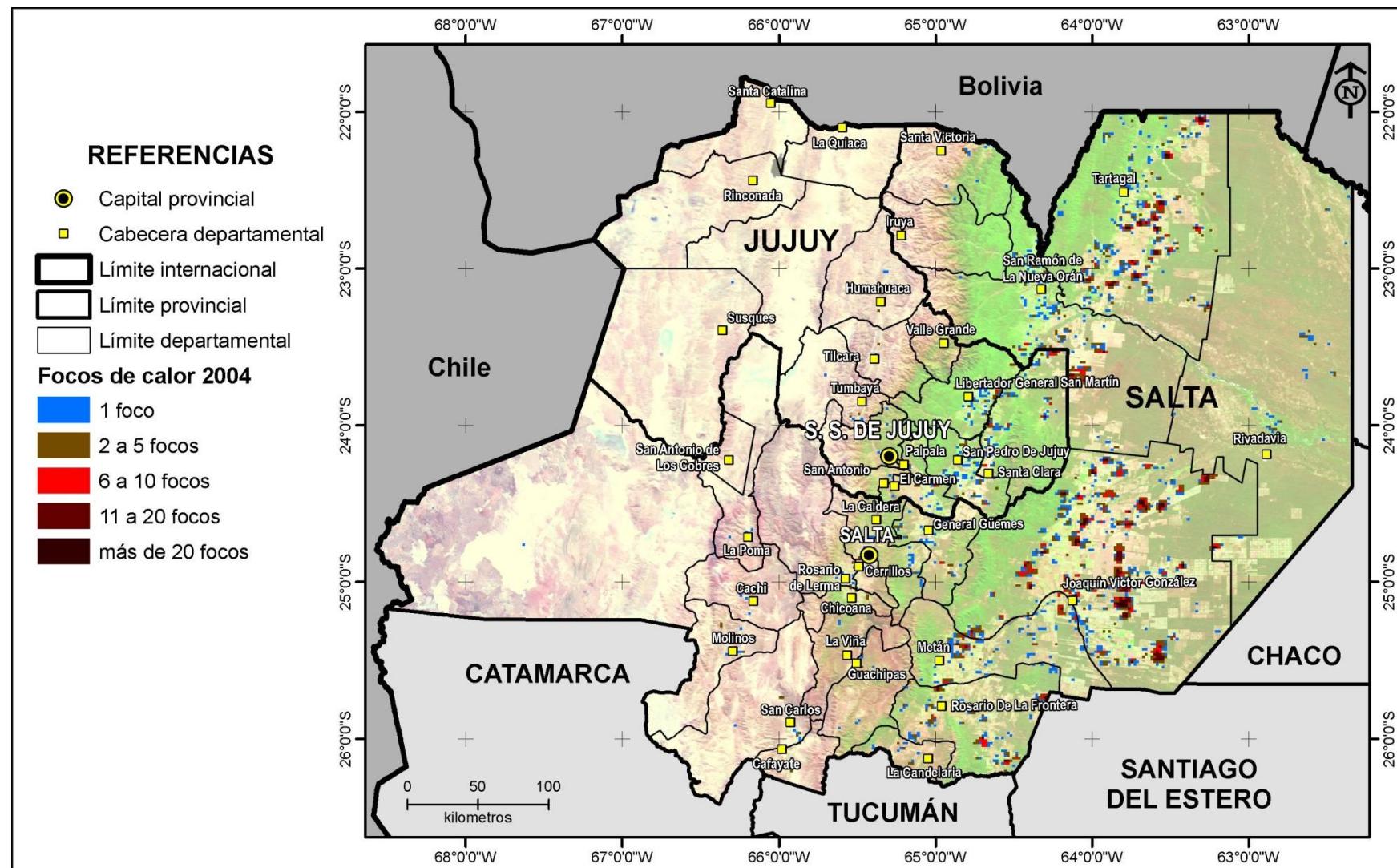
Volante J., Paruelo J., Morales Poclava M. y Vale L. 2009. Dinámica espacial y temporal de la deforestación en la región Chaqueña del Noroeste Argentino en el período 1977 – 2007. PRORENOA. INTA. Disponible en internet: <http://www.inta.gov.ar/prorenoal/> Fecha de consulta: 01-03-10.

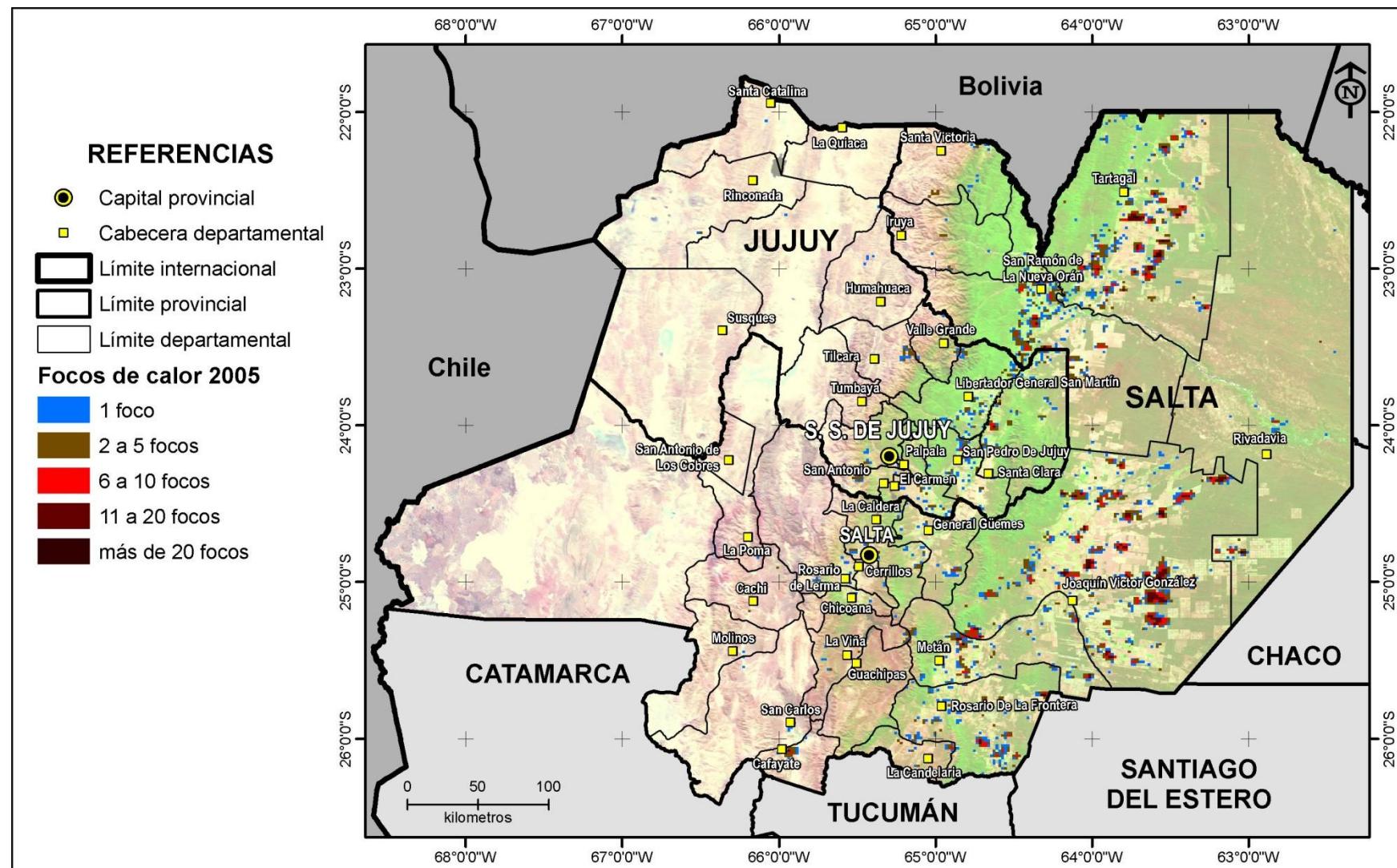
White J., Ryan K., Key C. y Running S. 1996. Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. International Journal of Wildland Fire 6: 125-136.

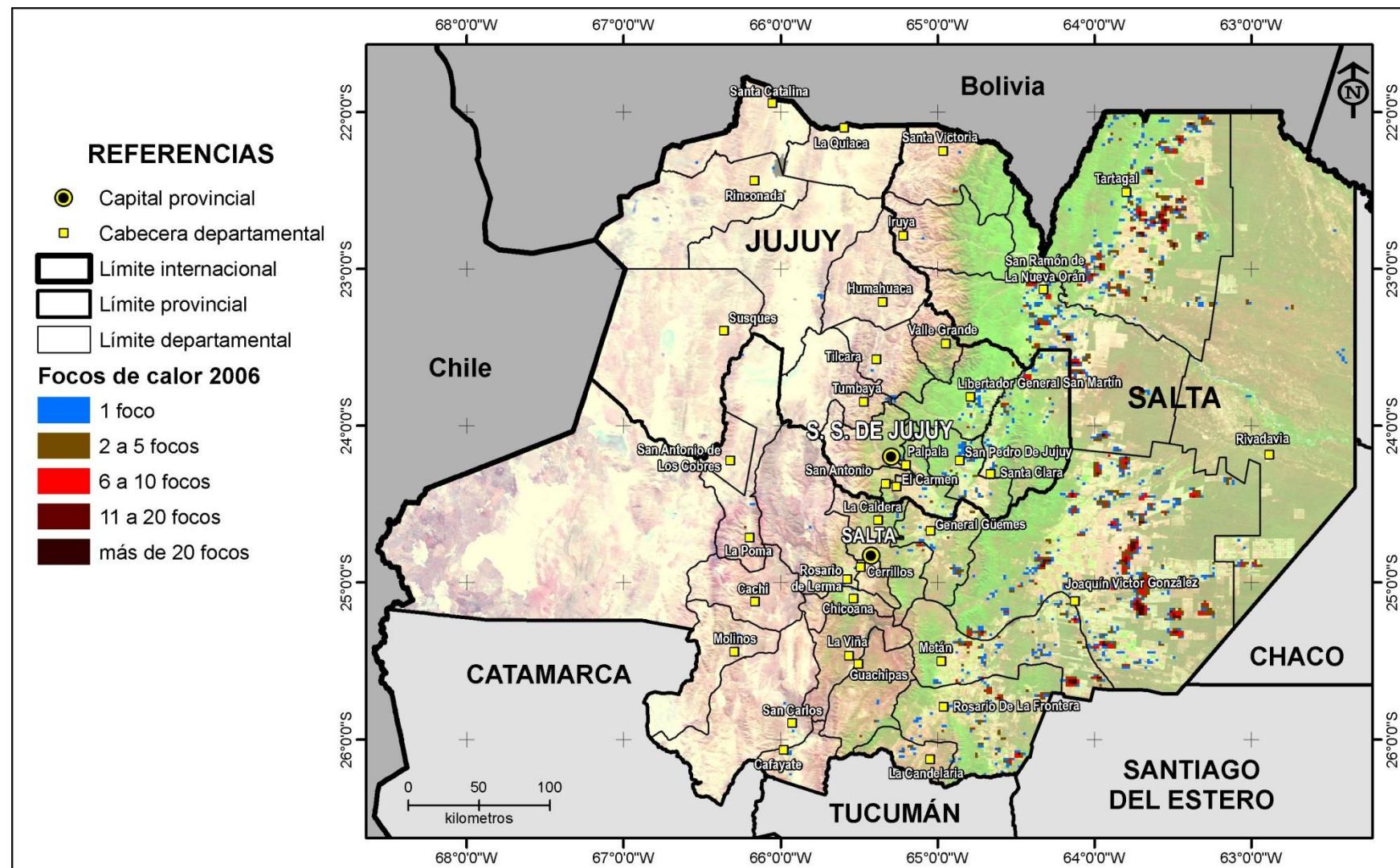
Zhang Y., Pearson D., Whitehead P. y Ahmad W. 2001. Mapping and spatial analysis for savanna wildfire history in Northern Australia by remotely sensed data and Gis. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2001 (IGARSS'2001), Sydney, Australia: 792-794.

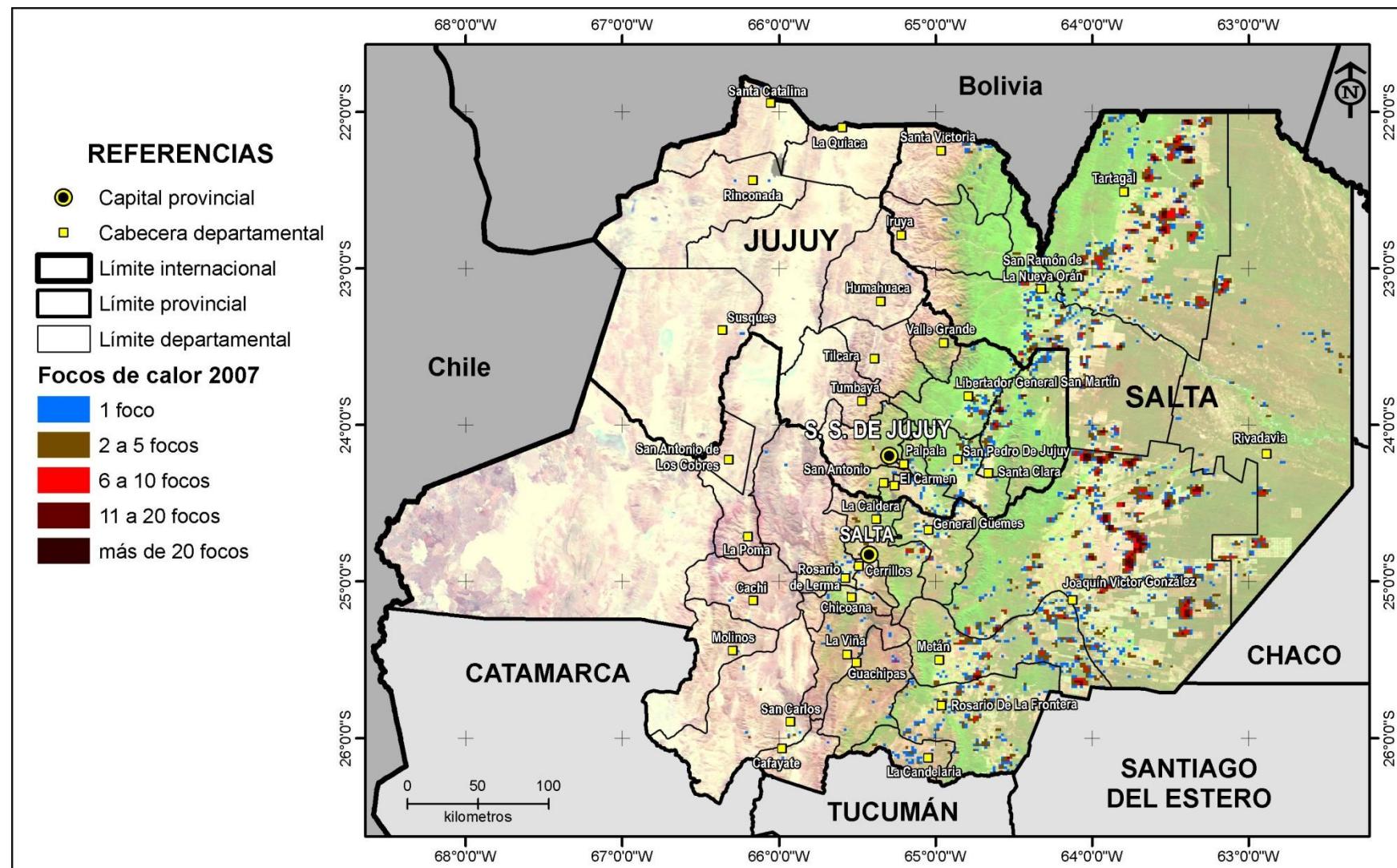
11 ANEXO 1: Mapas con la distribución anual de focos de calor en las provincias de Salta y Jujuy, resumidos en celdas cuadradas de 2 km de lado.

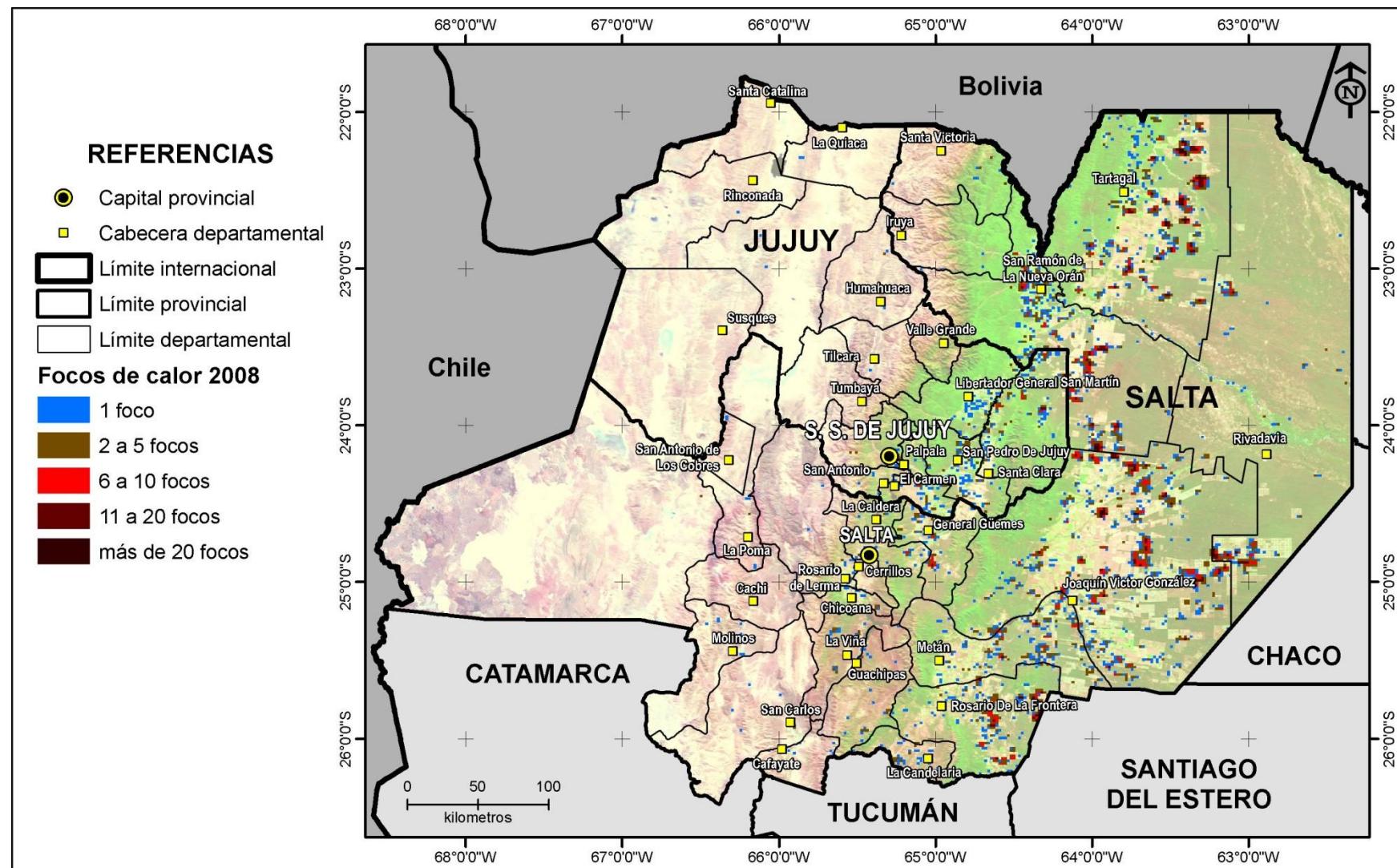










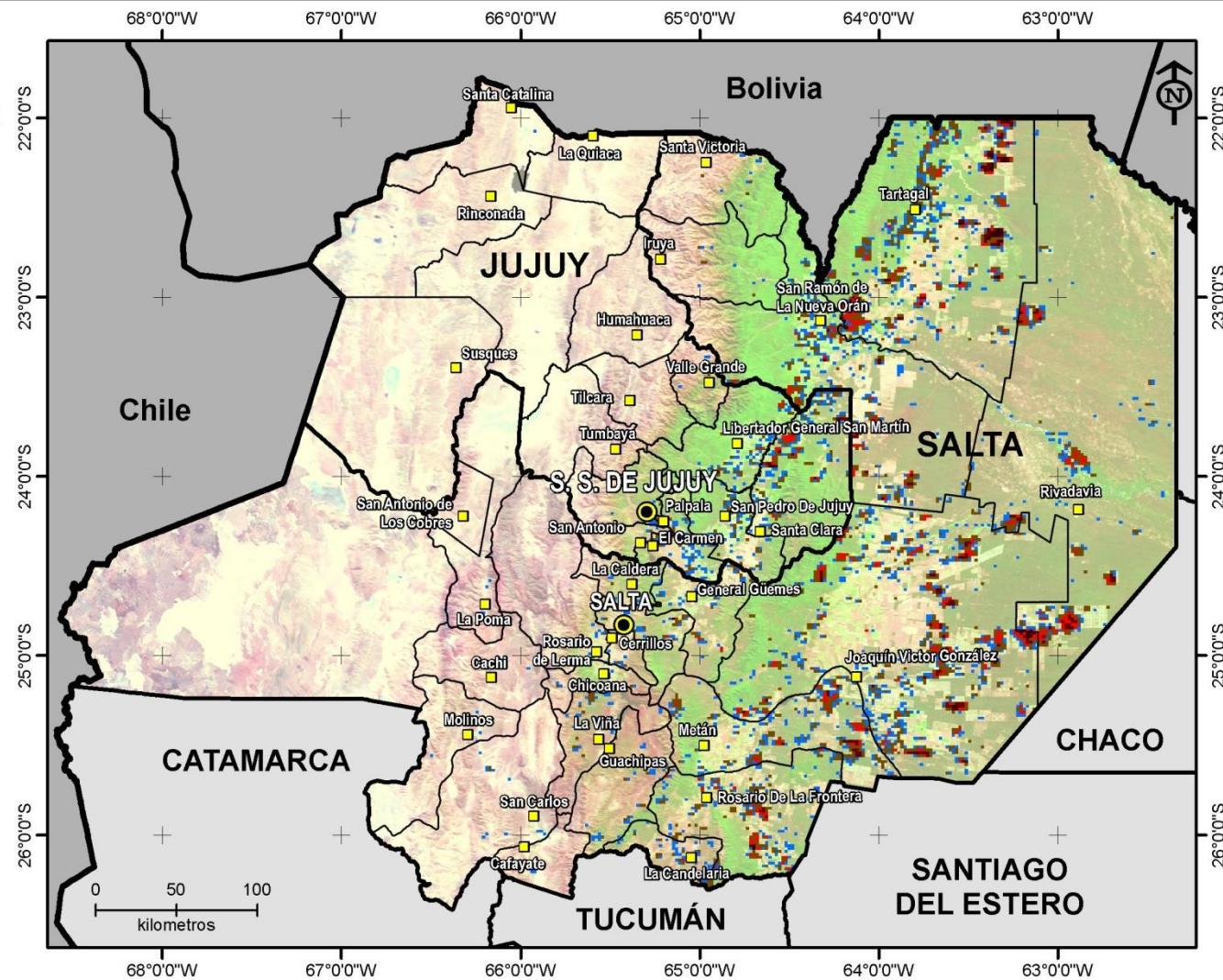


REFERENCIAS

- Capital provincial
- Cabecera departamental
- Límite internacional
- Límite provincial
- Límite departamental

Focos de calor 2009

- 1 foco
- 2 a 5 focos
- 6 a 10 focos
- 11 a 20 focos
- más de 20 focos



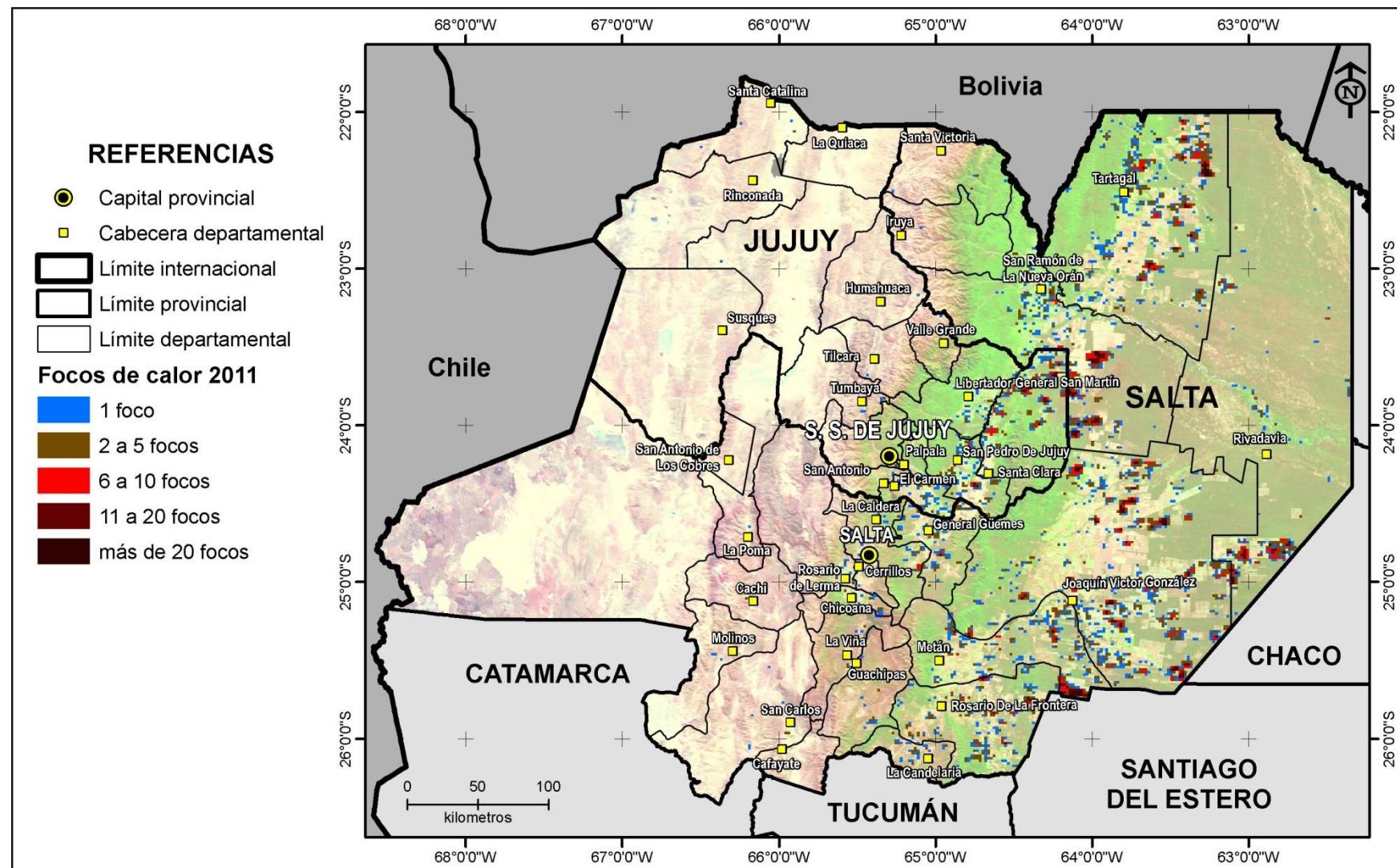
REFERENCIAS

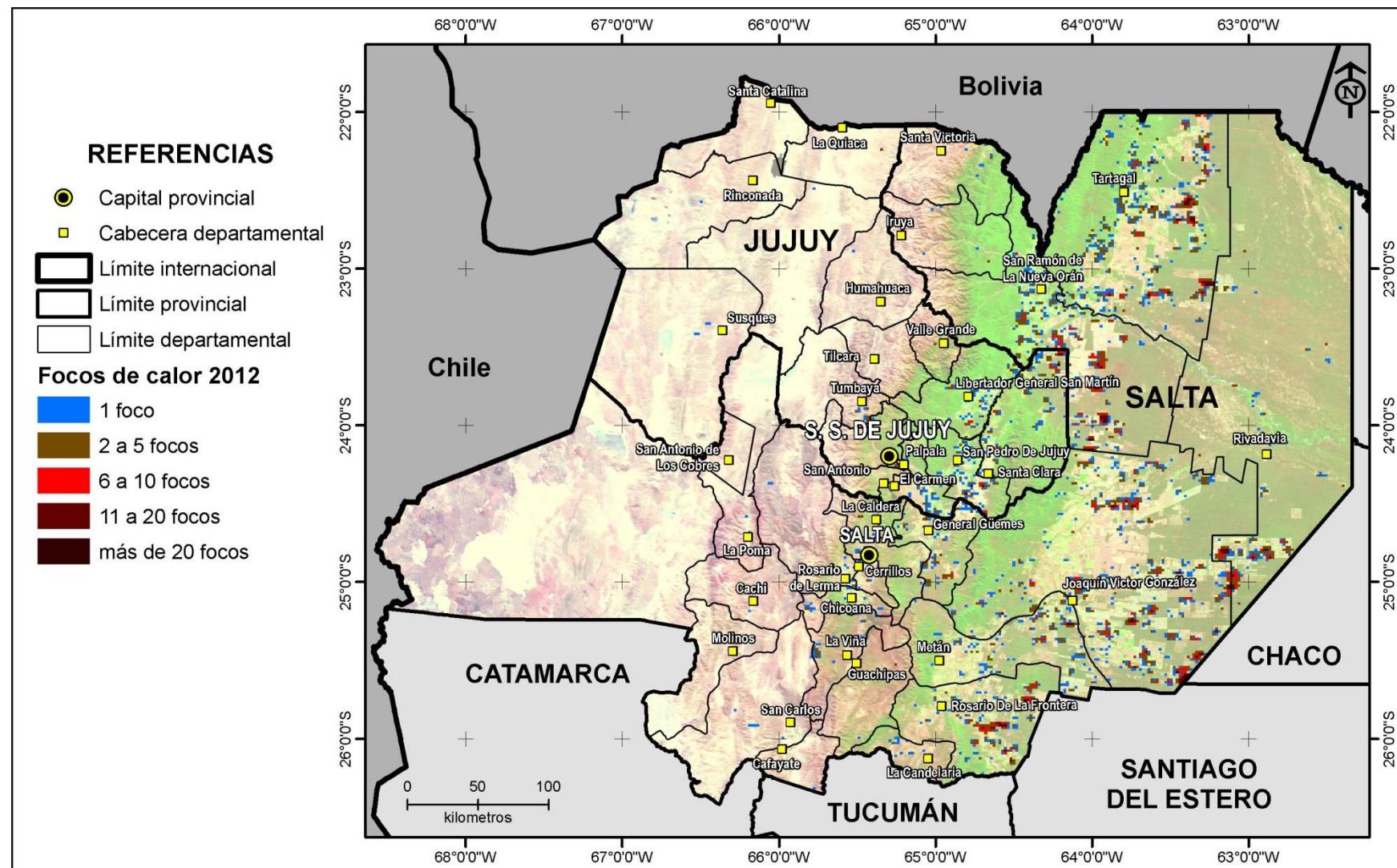
- Capital provincial
- Cabecera departamental
- Límite internacional
- Límite provincial
- Límite departamental

Focos de calor 2010

- 1 foco
- 2 a 5 focos
- 6 a 10 focos
- 11 a 20 focos
- más de 20 focos







REFERENCIAS

- Capital provincial
- Cabecera departamental
- Límite internacional
- Límite provincial
- Límite departamental

Focos de calor 2013

- 1 foco
- 2 a 5 focos
- 6 a 10 focos
- 11 a 20 focos
- más de 20 focos

