

Generación de mapas de áreas quemadas a partir de imágenes Landsat 8 OLI y Sentinel 2 MSI.

Emiliano Melchiori¹, Nicolás Mari²

¹ Consultor independiente, Gualeguaychú, Entre Ríos, Argentina
emelchiori@gmail.com

² Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – Agencia de Extensión Rural Cruz del Eje, Av. Eva Perón 451, Cruz del Eje, Córdoba, Argentina.
mari.nicolas@inta.gob.ar

Resumen. La respuesta temprana a emergencias es uno de los principales desafíos que enfrenta la gestión de desastres naturales. Los incendios forestales forman parte del tipo de emergencias con mayores daños a la biodiversidad implicando enormes pérdidas económicas y deben ser registrados debidamente. La información satelital ha evolucionado hacia el uso combinado de sistemas de observación que permiten acortar los tiempos de respuesta. Se presenta una metodología multitemporal basada en diferencias relativas, que combina imágenes multispectrales Landsat-8 OLI y Sentinel-2 MSI para la delimitación de polígonos de área quemada por el incendio ocurrido en la Reserva La Calera, el 18 de Agosto de 2017, en Córdoba. La constelación Sentinel 2 realiza un aporte importante de imágenes al total disponible para una determinada región geográfica y período de tiempo. Las características similares de los sensores OLI y MSI permite un uso combinado y presenta significativos beneficios comparado al uso individual.

Palabras claves: teledetección, emergencias, incendios

1 Introducción

Los incendios constituyen uno de los principales disturbios en las Sierras de Córdoba, Argentina [1]. En algunos ecosistemas del mundo, como las praderas, sabanas o en ciertos bosques y arbustales sub tropicales, el fuego contribuye a la regeneración del hábitat [6]. Ahora bien, el aumento de la cantidad de incendios interanuales por efecto de las actividades humanas, genera alteraciones en los ecosistemas que por ejemplo, tienen impactos en la hidrología de una cuenca, y por consecuencia, modificaciones en la capacidad de captar y almacenar agua para diversos usos. La emisión de gases con efecto invernadero y material particulado a la atmósfera por efecto del fuego, tiene consecuencias directas sobre la salud de las personas y el ambiente en general.

La detección de áreas quemadas en resolución espacial media y alta es uno de los productos satelitales más requeridos para la gestión de incendios [2]. La generación autónoma de mapas de áreas quemadas requiere del desarrollo de métodos para proce-

sar bancos de imágenes de resolución espacial media (Landsat TM, OLI y Sentinel-2 MSI) que puedan producir resultados de uso práctico [4]. Desafortunadamente aun no existen herramientas estandarizadas ni productos 100% confiables en sistemas operacionales aunque se están produciendo algunos prototipos [2], [19]. En este contexto es fundamental desarrollar nuevos procedimientos que permitan generar información precisa sobre las áreas afectadas por incendios para dimensionar los efectos sobre la cobertura, el ambiente y permitir el seguimiento de la recuperación de vegetación [5]; [20].

La serie histórica de datos Landsat TM, ETM+ e OLI, ha aportado valiosos recursos para la generación de mapas de áreas quemadas con una resolución espacial media de 30 m (900 m²) y adquisiciones cada 16 días [2]; [9]. Existen varios trabajos que reportan áreas quemadas en Córdoba con el objetivo de caracterizar la ocurrencia de incendios y su frecuencia en los cordones serranos [17]; [1]. Actualmente acompaña la constelación de satélites Sentinel 2A y 2B, en órbita desde 2015 y 2017 respectivamente, que por su configuración orbital y la de su sensor multiespectral MSI, es posible de emplear conjuntamente con Landsat, sea a partir del análisis de escenas individuales o mediante fusión de datos [21]. Esta nueva posibilidad permite ampliar la disponibilidad de escenas por evento de incendio, lo cual significa una mejora en la producción de cartografía y en menor tiempo, contribuyendo a los reportes de área quemada remitidos por organismos provinciales y nacionales [18].

El objetivo del presente trabajo es introducir una metodología simple y eficaz para la clasificación de áreas quemadas en imágenes de sensores ópticos multiespectrales en resolución espacial de 30 metros o menor, aprovechando las mejoras en las frecuencias temporales de adquisición cuando se utilizan en forma combinada datos producidos por los sistemas Landsat-8 y Sentinel-2.

2 Materiales y Métodos

El trabajo se realizó dentro de los límites de la Reserva La Calera, ubicada entre las Localidades de Malagueño y La Calera, una zona cercana a la ciudad de Villa Carlos Paz. El día 18 de agosto del 2017 el fuego se inició en el cerro Mogote extendiéndose por una vasta zona de montañas y quebradas. El incendio duro 5 días hasta el 23 de agosto afectando una superficie aproximada de 2500 has dentro de la reserva, según los reportes periodísticos. La zona corresponde al cordón de sierras chicas perteneciente al distrito chaco serrano, con dominancia de Molle de beber "*Lithraea molleoides*", Coco "*Fagara coco*", Talas "*Celtis*" Horco-Quebracho "*Schinopsis*", entre otras. El clima de tipo estacional, Semiárido, con lluvias concentradas en el verano y un marcado déficit hídrico en el invierno.

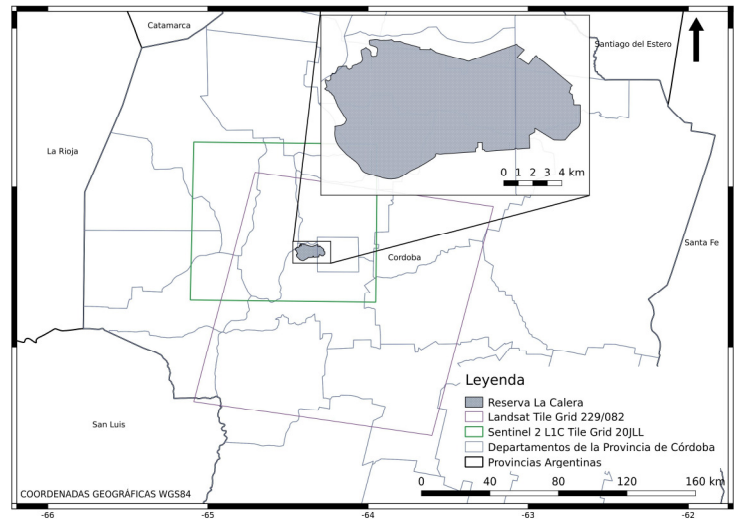


Fig. 1. Área de la Reserva La Calera en el contexto de los departamentos cordobeses y las provincias argentinas. Se indican las unidades de grilla Landsat-8 WRS-2 229/082 en color violeta y Sentinel-2 US-MGRS 22JLL en color verde, cubriendo el área de estudio en gris más oscuro.

Fuente: Elaboración propia.

2.1. Datos

Las imágenes multiespectrales y térmicas de los sensores OLI y TIRS abordo del satélite Landsat 8 fueron liberadas para todo tipo de uso [23]. Actualmente es posible obtener series completas de estas imágenes desde diferentes servidores, tales como Google Storage, Amazon Web Services, USGS, entre otros. Las imágenes OLI tienen una resolución espacial de 30 metros y diferentes bandas espectrales, entre las que resultan particularmente interesantes para identificar el efecto del fuego las ubicadas en el infrarrojo cercano, banda 5 y en el infrarrojo de onda corta, bandas 6 y 7 [27], [20]. La descripción de las bandas espectrales de los sensores se encuentra en la Tabla 1.

De la misma manera, la Agencia Espacial Europea libera el acceso y uso de las imágenes de la constelación de satélites Sentinel 1, 2 y 3 hasta el momento. Todas las imágenes se pueden obtener del servidor de la ESA Copernicus [7], [23]; también es posible obtener las imágenes Sentinel 1A, 2A y 2B de Amazon Web Services. USGS disponibiliza imágenes Sentinel 2.

Las imágenes Sentinel 2 tienen resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 metros dependiendo de la banda espectral considerada. Las bandas espectrales del sensor MSI

que se utilizan en este caso son la 4, 8a y 12. Esta similitud entre las resoluciones espacial y espectral de los sensores, longitud de onda central y ancho de banda permite considerar el uso combinado de estas informaciones [10], [14], [21]. El detalle de las bandas espectrales de las imágenes MSI se encuentra en la Tabla 1.

Las imágenes Landsat-8 OLI son distribuidas utilizando la grilla World-wide Reference System version 2 (WRS-2) [23], mientras que las imágenes Sentinel-2 MSI utilizan la grilla US-Military Grid Reference System (US-MGRS) [8]. En la Figura 1 es posible apreciar las diferencias de tamaño y geometría de las unidades de grilla.

La Tabla 1 presenta las bandas espectrales de las imágenes Landsat-8 OLI y Sentinel-2A/B MSI, indicando las longitudes de onda extremas de cada banda. La resolución espacial de las imágenes OLI es de 30 metros. La resolución espacial de las imágenes Sentinel-2 MSI se indica en la columna central de la Tabla 1 [8], [23].

Los focos de calor son otra de las herramientas disponibles para el seguimiento de incendios. Poseen una alta frecuencia de actualización, de varias veces por día, con los sucesivos pasajes de los sensores MODIS, AVHRR, VIIRS y las adquisiciones secuenciales de los satélites geoestacionarios como GOES y MeteoSat. En este trabajo se presentan a modo representativo para corroborar los resultados del área quemada.

Tabla 1. Bandas espectrales Landsat-8 OLI y Sentinel-2AyB. La columna Sentinel-2A indica la resolución espacial en metros de la banda entre paréntesis.

Landsat 8 OLI-TIRS [μm]	Sentinel 2A [μm] (m)	Sentinel-2B [μm]
B1: 0.43 – 0.45	B1: 0.430 – 0.457 (60)	B1: 0.419 – 0.464
B2: 0.45 – 0.51	B2: 0.447 – 0.545 (10)	B2: 0.443 – 0.541
B3: 0.53 – 0.59	B3: 0.537 – 0.582 (10)	B3: 0.536 – 0.582
B4: 0.64 – 0.67	B4: 0.645 – 0.683 (10)	B4: 0.645 - 0.684
B5: 0.85 – 0.88	B5: 0.694 – 0.713 (20)	B5: 0.693 - 0.713
B6: 1.57 – 1.65	B6: 0.731 – 0.749 (20)	B6: 0.730 – 0.748
B7: 2.11 – 2.29	B7: 0.768 – 0.796 (20)	B7: 0.765 – 0.793
B8: 0.50 – 0.68	B8: 0.762 – 0.907 (10)	B8; 0.766 - 0.899
B9: 1.36 – 1.38	B8a: 0.848 – 0.881 (20)	B8a: 0.848 - 0.880
B10: 10.60 – 11.19	B9: 0.932 – 0.958 (60)	B9: 0.929 – 0.956
B11: 11.50 – 12.51	B10: 1.336 – 1.411 (60)	B10: 1.338 – 1.414
	B11: 1.542 – 1.685 (20)	B11: 1.539 – 1.680
	B12 2.081 – 2.323 (20)	B12: 2.066 – 2.304

El amplio espectro de imágenes libres disponibles invita a la implementación de una variedad de aplicaciones para todo tipo de usos [3], [22]. En este caso particular, ejemplificamos la clasificación y segmentación de polígonos de área quemada mediante el análisis de cambios que se producen entre dos imágenes consecutivas. Se utiliza una imagen de referencia adquirida previamente al evento de incendio y otra adquirida posteriormente, para obtener una medida del área afectada mediante la evaluación de los cambios en dichas imágenes [11].

La metodología desarrollada utiliza servidores de metadatos disponibles en Internet [15] para consultar la disponibilidad de imágenes ubicadas en una determinada región y dentro de una determinada ventana temporal o período de tiempo. Ambos servidores de metadatos precisan de autenticación de usuario y contraseña, por lo que es necesario un registro previo. El área de interés en este caso, es el polígono de la Reserva la Calera que se muestra en el mapa de la Fig.1.

Se utilizaron filtros para obtener imágenes con baja cobertura de nubes y la menor distancia temporal a la fecha del evento de fuego. La distancia temporal es el periodo de tiempo que transcurre desde el pasaje del satélite hasta el comienzo del evento de incendio y viceversa, desde el comienzo del evento de incendio hasta el próximo pasaje de algún satélite. Se descartan las imágenes correspondientes a la fecha de inicio del incendio, en el caso de que exista la coincidencia. El proceso de búsqueda finaliza con un par de imágenes, una previa al evento y una posterior. Del total de bandas disponibles solo son transferidas las necesarias para la elaboración de los índices espectrales.

Las imágenes son convertidas a valores de reflectancia en tope de atmósfera. Con las imágenes de reflectancia se calculan los índices espectrales NDVI y NBRL. La ecuación del índice NDVI involucra las reflectancias en los canales infrarrojo cercano (NIR del inglés Near Infra Red) y rojo del espectro electromagnético. El NBRL por su parte considera la reflectancia en el infrarrojo cercano y en el infrarrojo de onda corta (SWIR del inglés Short Wave Infra Red). Las ecuaciones de ambos índices se detalla a continuación.

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}) \quad (1)$$

$$\text{NBRL} = (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{SWIR}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{SWIR}}) \quad (2)$$

Estos índices han sido ampliamente utilizados para delimitación de área quemada en la literatura, siendo el NBRL particularmente adecuado ya que resalta las características intrínsecas de la cicatriz de incendio que son daño en la vegetación y disminución de la humedad [10], [20], [21], [27]. El índice NDVI por su parte tiene capacidad para resaltar el verde de las plantas y por lo tanto es válido en formato multitemporal para evaluar cambios en la cobertura vegetal [28].

Aunque existen diferencias entre los sensores OLI del satélite Landsat y el MSI del satélite Sentinel 2, el uso combinado es materia de estudio con el objetivo de resaltar las capacidades conjuntas de observación de la tierra [29], [30]. Las diferencias que puedan existir se podrán compensar en el caso de que los objetivos planteados así lo requieran o de acuerdo a la rigurosidad de la metodología utilizada [26]. En este caso particular, la cercanía temporal entre las imágenes en conjunto con los filtros de nubes permite hacer la simplificación de no utilizar reflectancia en superficie.

Las imágenes de NDVI y NBRL son normalizadas utilizando la siguiente ecuación [12].

$$INDEX_{norm} = (INDEX - minINDEX) / (maxINDEX - minINDEX) \quad (3)$$

De esta manera, los valores de los índices son trasladados a una nueva escala entre 0 y 1.

Se calcula la diferencia relativa a la fecha previa al incendio utilizando la siguiente ecuación.

$$DIFREL_{index} = (INDEX_{norm_pre} - INDEX_{norm_post}) / INDEX_{norm_pre} \quad (4)$$

Los siguientes términos conforman la ecuación que clasifica área quemada y no quemada. Cada uno de los términos representa una matriz binaria con unos y ceros. El valor uno (1) donde se cumple la condición y cero (0) donde no se cumple.

$$A = NDVI_{norm_pre} > NDVI_{norm_post} \quad (5)$$

$$B = NBRL_{norm_pre} > NBRL_{norm_post} \quad (6)$$

$$C = DIFREL_{ndvi} > Undvi \quad (7)$$

$$D = DIFREL_{nbrl} > Unbrl \quad (8)$$

Undvi y Unbrl son los umbrales de extracción para las diferencias relativas de NDVI y NBRL respectivamente. En este caso se utiliza Undvi=0.25, Unbrl=0.15 debido a la escasa vegetación activa presente en el área de estudio. El valor medio del NDVI es de 0.31, el máximo de 0.6 y el desvío estándar de 0.07 en la fecha previa al incendio.

Finalmente, la multiplicación de las cuatro matrices binarias (5), (6), (7) y (8) permite obtener la clasificación de área quemada.

$$AQM = A * B * C * D \quad (9)$$

Un método para detectar cambios entre imágenes previas y posteriores a un incendio es la diferencia entre índices.

La diferencia de NDVI o dNDVI es calculado con la siguiente ecuación.

$dNDVI = NDVI_{norm\ pre} - NDVI_{norm\ post}$	(10)
--	------

La diferencia de NBRL o dNBRL es calculada con la ecuación siguiente.

$dNBRL = NBRL_{norm\ pre} - NBRL_{norm\ post}$	(11)
--	------

En las ecuaciones 10 y 11, pre y post corresponden a las imágenes previa y posterior a la fecha al incendio. Los valores de diferencia son elevados cuando cambios tuvieron lugar entre las fechas consideradas. De ese modo, el compuesto de bandas permite visualizar fácilmente aquellas zonas donde se produjeron cambios significativos en la vegetación. Se utiliza la imagen Landsat-8 OLI correspondiente a la unidad de grilla WRS 229/082, adquirida el día 17 de Agosto de 2017, como imagen previa al incendio. La imagen posterior es la Sentinel-2A MSI correspondiente a la unidad de grilla US-MGRS 20JLL adquirida el día 21 de Agosto de 2017.

3 Resultados

En primer lugar se realizó la búsqueda de imágenes sobre la fecha del 18 de agosto. Luego sobre el 22 de agosto. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Las imágenes con menor distancia temporal y condiciones de cobertura de nubes dentro de lo aceptable se indican en la tabla con un color más oscuro.

En ambos casos coincide la menor distancia temporal con la menor cobertura de nubes. Tomamos la convención que la distancia temporal es negativa cuando la fecha de interés es posterior a la fecha de adquisición de la imagen.

Tabla 2. Resultados de la búsqueda de imágenes.

Satélite	Fecha de adquisición	Cobertura de nubes %	Distancia en días al 18/08	Distancia en días al 22/08
Landsat 8	01/08	9.0	-17	-21
Sentinel 2B	03/08	2.55	-15	-19
Sentinel 2A	08/08	15.63	-10	-14
Sentinel 2B	16/08	16.21	-2	-6
Landsat 8	17/08	0.0	-1	-5
Sentinel 2A	21/08	1.13	3	-1

Landsat 8	02/09	1.0	15	11
Sentinel 2B	05/09	1.9	18	14
Sentinel 2A	17/09	1.06	30	26
Landsat 8	18/09	0.0	31	27

Los mapas en las Figuras 2 y 3 a continuación presentan el compuesto de bandas dNDVI, NBRL pos fuego y dNBRL para dos fechas. En primer lugar para el 21/08 y luego para el 02/09.

Existen diferentes alternativas que se pueden utilizar, el compuesto bi-temporal, en este caso resalta las zonas donde se produjeron cambios en los canales rojo y azul de la composición RGB con las diferencias de NDVI y NBRL respectivamente, el canal verde presenta valores mínimos debido al efecto del fuego sobre el índice NBRL. En las zonas sin cambios, las diferencias de los índices son mínimas, tomando notoriedad el canal verde con el valor de NBRL de la fecha post fuego (Fig.2).

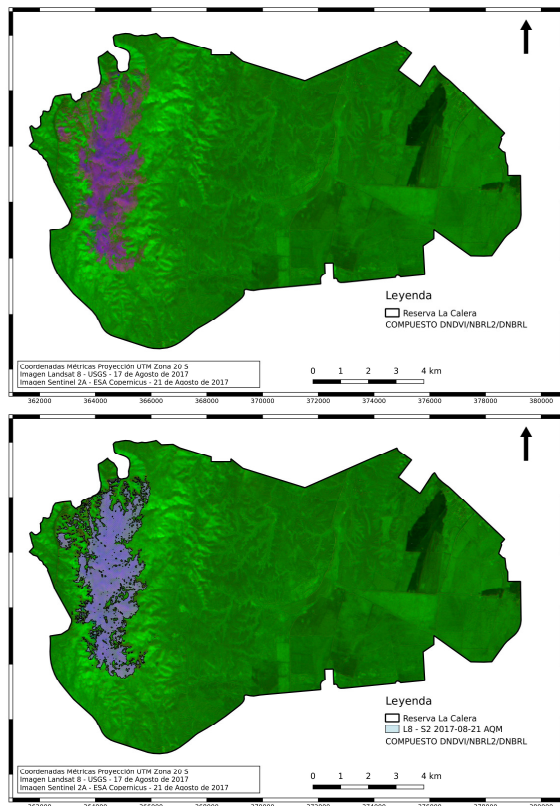


Fig. 2. Arriba: Compuesto de bandas dNDVI, NBRL pos fuego y dNBRL para la fecha 21/08. Abajo: Polígono de área quemada. Fuente: Elaboración propia.

El área afectada al 21 de Agosto de 2017 se calcula en 938 hectáreas aproximadamente.

Para delimitar la segunda cicatriz de incendio se utiliza como imagen previa, la adquirida por el satélite Sentinel-2A, el día 21 de Agosto de 2017. La imagen post fuego corresponde al satélite Landsat-8, adquirida el día 2 de Setiembre de 2017.

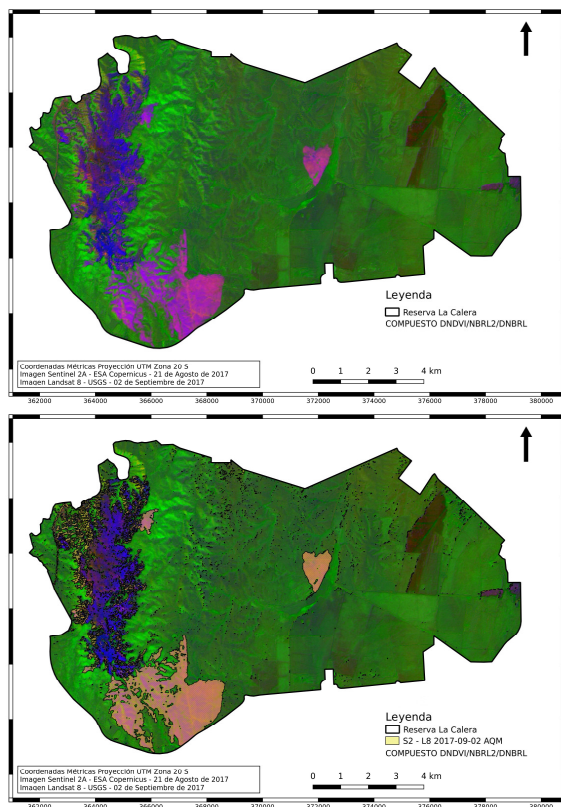


Fig. 3. Arriba: Compuesto de bandas dNDVI, NBRL pos fuego y dNBRL para la fecha 02/09. Abajo: Polígono de área quemada. Fuente: Elaboración propia.

La segunda cicatriz de incendio aporta 1110 hectáreas, totalizando 2048 hectáreas afectadas según el método empleado. No se disponen de mediciones de campo, cicatrices delimitadas con otras metodologías digitales o manuales. Por ese motivo no es posible calcular errores de omisión, comisión y los demás parámetros que permiten determinar la confiabilidad del método propuesto.

La zona delimitada en primera instancia y correspondiente a la extensión del incendio hasta el 21 de Agosto por la mañana, no interfiere en la delimitación de la segunda cicatriz debido a que ya se encuentra registrada en la imagen del 21 de agosto sirviendo como imagen de referencia para determinar los cambios hasta el 02 de Septiembre.

Los focos de calor detectados por múltiples sensores en diferentes horarios, son publicados por el sistema de INPE-Queimadas. Cada foco de calor tiene un área de influencia que es proporcional a la resolución espacial de las imágenes con que fueron generados, desde 350 metros hasta varios kilómetros, incorporando un grado de incerteza en la ubicación de la fuente de energía dentro del pixel. Por ese motivo algunos focos de calor aparecen fuera del polígono de área quemada [12].

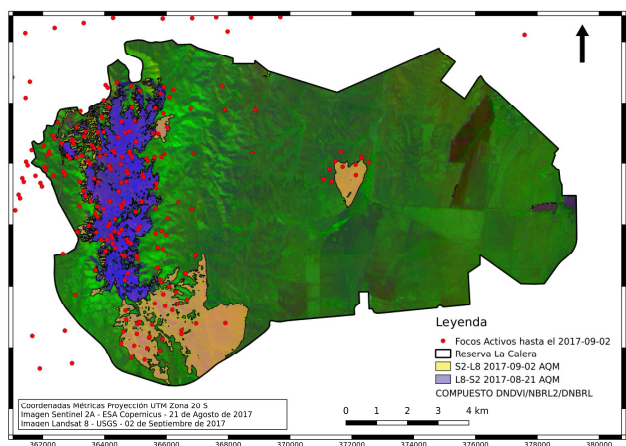


Fig. 4. Polígonos de área quemada para el 21/08 y 02/09 y superpuesto los focos de calor detectados hasta el día 02/09. Fuente: Elaboración propia.

La continuidad del incendio, hasta el día 22 de agosto, es delimitada por las imágenes Sentinel 2A y Landsat 8 nuevamente, aunque la secuencia es invertida respecto de la fecha anterior. En este caso, la imagen post-fuego anterior es utilizada como referencia pre-fuego.

El satélite Sentinel 2B no aporta imágenes a la delimitación de la cicatriz de incendio debido a que otras imágenes presentan mejores condiciones de distancia temporal y cobertura de nubes.

Conclusiones

El uso combinado de imágenes de los sensores Landsat y Sentinel 2 representa una ventaja obvia respecto del uso individual de cada sensor en el caso particular de delimitación de área quemada como parte de un sistema de respuesta temprana.

Las similitudes en términos radiométricos y de resolución espacial permiten una fácil integración de los datos Landsat 8 y Sentinel 2. Se observaron diferencias despreciables en los valores de los índices considerados y de reflectancia de las bandas utilizadas.

Cuando se utilizan únicamente las imágenes Landsat, el incendio queda completamente comprendido dentro del periodo de tiempo entre los dos pasajes sucesivos del 17 de agosto y 2 de septiembre. La cicatriz del incendio es delimitada en su totalidad en una única vez sin posibilidad de observar la propagación.

El uso exclusivo de imágenes Sentinel 2 supera en prestaciones a las imágenes Landsat para la generación rápida de mapas de área quemada, aunque basándose básicamente en los hechos de que se trata de una constelación de dos (2) satélites en órbitas opuestas y que el periodo de revisita individual de 10 días cada satélite, y combinado de 5 días, es menor que el de Landsat de 16 días. De todos modos, el uso combinado de los dos sensores resulta un claro beneficio para los objetivos planteados.

En el caso de requerir una cicatriz de resolución base de 10 metros es posible restringir el uso de los datos Landsat lo que significaría la utilización de las imágenes Sentinel 2B del 16 de agosto, Sentinel 2A del 21 de Agosto y nuevamente el 2B para el 5 de septiembre.

En el caso específico de control de cambios asociado a un sistema de respuesta temprana a incendios, es preferible disponer de imágenes con la mayor frecuencia posible, esto con el objetivo de delimitar la propagación a medida que ocurre el incendio, proporcionando información de suma importancia para el accionar de las fuerzas de combate al fuego y disminuir la probabilidad de encontrar una imagen con cobertura de nubes. Considerando la máxima frecuencia posible, las señales de la cobertura serán similares en áreas sin cambios y presentarán diferente grado de divergencias en las áreas que fueron afectadas. La señal de área quemada disminuye con una velocidad que dependerá de las condiciones de clima y vegetación de la región.

Los cambios mínimos en la cobertura son detectados por el sistema de sensores. Las zonas sin afectar por el incendio permanecen prácticamente sin alteración entre las sucesivas fechas, mientras que dentro de la cicatriz se presentan diferentes niveles de cambios producidos por el fuego indicando variabilidad.

Es importante indicar que una metodología de clasificación simple, como la que se presenta, funciona mejor para ambientes sin mayor actividad de cambios como las reservas naturales u otro tipo de áreas protegidas.

La intervención humana sobre la cobertura vegetal produce en algunos casos señales similares a las producidas por los incendios. Esto toma relevancia cuando se considera su implementación como un sistema operacional autónomo a gran escala, con diversidad de usos del suelo diferentes.

Es necesaria la comparación de los resultados obtenidos con los mapas oficiales de área quemada, o mapas elaborados mediante inspección visual por parte de un especialista entrenado. A partir de estos resultados es posible ajustar los umbrales de extracción para mejorar la capacidad de respuesta el algoritmo de clasificación disminuyendo los errores de comisión y omisión que resulten. Es importante resaltar el hecho de que los umbrales de extracción son variables y dependerán de las condiciones previas de la vegetación afectada.

Las metodologías semiautomáticas, como la presentada en este trabajo, pretenden simplificar de alguna manera las tareas de clasificación y extracción de polígonos de área quemada aliviando las tareas de identificación y asistiendo al profesional experto.

Para finalizar, resulta importante hacer el reconocimiento a las políticas de distribución de datos y a la diversidad de fuentes de información espacial disponibles, permitiendo la implementación de herramientas automáticas que simplifiquen las tareas de búsqueda, descarga y procesamiento de imágenes, permitiendo dedicar mayor tiempo a los algoritmos y a la evaluación en diferentes ambientes y condiciones.

Agradecimientos

Agradecemos los aportes y observaciones del manuscrito a Silvia Melchiori.

Referencias

1. Argañaraz, J.P., G. Gavier Pizarro, M. Zak, and L.M. Bellis. Fire regime, climate, and vegetation in the Sierras de Córdoba, Argentina. *Fire Ecology* (2015) 11(1): 55–73. doi: 10.4996/fireecology.1101055
2. Bastarrika, A., E. Chuvieco, and M.P. Martín. Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: balancing omission and commission errors. *Remote Sensing of Environment* (2011) 115: 1003-1012. doi: 10.1016/j.rse.2010.12.005
3. Borini Alves, D. & Pérez-Cabello, F. Multiple remote sensing data sources to assess spatio-temporal patterns of fire incidence over Campos Amazônicos Savanna Vegetation Enclave (Brazilian Amazon), *Science of The Total Environment*. (2017). Volumes 601–602, 2017, Pages 142-158, ISSN 0048-9697
4. Boschetti, L., Roy, D., Justice, C., Humber, M. MODIS–Landsat fusion for large area 30 m burned area mapping. *Remote Sensing of Environment*. (2015). 161. 10.1016/j.rse.2015.01.022.
5. Brewer CK, Winne JC, Redmond RL, Opitz DW, Magrich MV.: Classifying and mapping wildfire severity: a comparison of methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. (2005) 71, 1311–1320.
6. Chad T., Hanson, Rosemary L., Sherriff, Richard L., Hutto, Dominick A., DellaSala, Thomas T., Veblen and William L. Baker. (2015). *The Ecological Importance of Mixed-Severity Fires*. ISBN: 978-0-12-802749-3
7. Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., Meyret A., Spoto F., Sy O., Marchese F., Bargellini P.

- Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services, Remote Sensing of Environment. 2012. Volume 120, (2012), Pages 25-36, ISSN 0034-4257
8. Gatti A., Gallopo A. Castellani C., Carriero F. Sentinel-2 Products Specification Document. (2018). Issue 14.5.
 9. Goodwin, Nicholas R.; Collett, Lisa J. Development of an automated method for mapping fire history captured in Landsat TM and ETM + time series across Queensland, Australia. Remote Sensing of Environment. (2014). 148:206-221.
 10. Huang H.; Roy D.P.; Boschetti L.; Zhang H., Yan L.; Kumar S.; Gomez-Dans J.; Li J. Separability Analysis of Sentinel-2A Multi-Spectral Instrument (MSI) Data for Burned Area Discrimination. Remote Sensing. (2016). 8. 10.3390/rs8100873.
 11. Hussain M., Chen D., Cheng A., Wei H., Stanley D. Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 80. 91-106. 10.1016/j.isprsjprs. (2013).03.006.
 12. INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios. Disponível em <http://www.inpe.br/queimadas>. Visitado en Mayo de 2018
 13. Jin Z., Prasad R., Shriver J., Zhuang Q. Crop model- and satellite imagery-based recommendation tool for variable rate N fertilizer application for the US Corn system. Precision Agriculture. (2016). 10.1007/s11119-016-9488-z.
 14. Korhonen L., Hadi H., Packalen P., Rautiainen M. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index. Remote Sensing of Environment. (2017). 195. 259-274. 10.1016/j.rse.2017.03.021.
 15. Landsat Metadata 2018. <https://landsat.usgs.gov/landsat-bulk-metadata-service>.
 16. Visitado en Marzo de 2018.
 17. Landsat Amazon S3 2018. <https://aws.amazon.com/public-datasets/landsat/>. Acceso en Marzo de 2018.
 18. Mari, N. Estudio de la ocurrencia de incendios en el Valle de Punilla, Córdoba. Tesis de Grado. Universidad de Ciencias Empresariales y Sociales, (1999) Buenos Aires.
 19. Mari, N. Sistema de Alerta y Respuesta Temprana a Incendios de Vegetación-Sartiv. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Córdoba. (2012). Córdoba.
 20. Melchiori A.E., Setzer A.W., Morelli F., Libonati R., Candido P., De Jesus S. A Landsat-TM/OLI algorithm for burned areas in the Brazilian Cerrado – preliminary results. (2014). Imprensa da Universidade de Coimbra.
 21. Melchiori A.E., Cândido P., Libonati R., Morelli F., Setzer A., de Jesus, S., Fonseca L., Körting T. Spectral indices and multitemporal change image detection algorithms for burned area extraction in the Brazilian Cerrado. April (2015). DOI: 10.13140/RG.2.1.4314.2562 Conference: XVI Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, João Pessoa, Brazil, Volume: XVI
 22. Quintano C & Fernandez-Manso A., Fernández-Manso O. Combination of Landsat and Sentinel-2 MSI data for initial assessing of burn severity. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. (2018) 64. 221-225. 10.1016/j.jag.2017.09.014.-3
 23. Romanov P. Global Multisensor Automated satellite-based Snow and Ice Mapping System (GMAIS) for cryosphere monitoring. Remote Sensing of Environment. (2017). 196. 42-55. 10.1016/j.rse.2017.04.023.
 24. Roy D.P., Wulder M.A., Loveland T.R., Woodcock C.E., Allen R.G., Anderson M.C., Helder D., Irons J.R., Johnson D.M., Kennedy R., Scambos T.A., Schaaf C.B., Schott J.R., Sheng Y., Vermote E.F., Belward A.S., Bindschadler R., Cohen W.B., Gao F., Hipple J.D., Hostert P., Huntington J., Justice C.O., Kilic A., Kovalskyy V., Lee Z.P., Lyburner L., Masek J.G., McCorkel J., Shuai Y., Trezza R., Vogelmann J., Wynne R.H., Zhu Z.

- Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research, *Remote Sensing of Environment*, Volume 145, (2014), Pages 154-172, ISSN 0034-4257
25. Sentinel Copernicus 2018. <https://scihub.copernicus.eu/>. Acceso en Marzo de 2018.
 26. Sentinel Amazon S3 2018. <http://sentinel-pds.s3-website.eu-central-1.amazonaws.com/>. Acceso en Marzo de 2018.
 27. Song C., Woodcock C., Seto K., Pax M., Macomber, St. Classification and Change Detection Using Landsat TM Data. *Remote Sensing of Environment - Remote Sensing of Environment*. (2001). 75. 230-244. 10.1016/S0034-4257(00)00169
 28. Stroppiana D., Boschetti M., Zaffaroni P., Brivio P. Analysis and Interpretation of Spectral Indices for Soft Multicriteria Burned-Area Mapping in Mediterranean Regions. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*. (2009). 6. 499 - 503. 10.1109/LGRS.2009.2020067.
 29. Stroppiana D., Bordogna G., Carrara P., Boschetti M., Boschetti L., Brivio P.A. A method for extracting burned areas from Landsat TM/ETM+ images by soft aggregation of multiple Spectral Indices and a region growing algorithm, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 69, (2012), Pages 88-102, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.03.001>.
 30. Yan L., Roy D.P., Zhang H., Li J., Huang H. An Automated Approach for Sub-Pixel Registration of Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) and Sentinel-2 Multi Spectral Instrument (MSI) Imagery. *Remote Sensing*. (2016), 8, 520.
 31. Zhang H.K., Roy D.P., Yan L., Li Z., Huang H., Vermote E., Skakun S., Roger JC. Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences, *Remote Sensing of Environment*, (2018). ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.031>.