

Propuesta de Metodología de Generación Automática de Perímetros de Área Quemada usando Imágenes Satelitales MODIS para su Aplicación en un Sistema de Predicción de Incendios

Agustín Zúñiga¹, José Arancibia¹, Miguel Méndez-Garabetti^{1,2}, Germán Bianchini¹, Paula Caymes-Scutari^{1,2} y María Laura Tardivo^{1,2,3}

¹Laboratorio en Cómputo Paralelo Distribuido (LICPaD), UTN-FRM, Mendoza, ARGENTINA

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³Departamento de Computación, UNRC, Río Cuarto, Córdoba, ARGENTINA

agustin.zuniga@alumnos.frm.utn.edu.ar, josearanciba09@gmail.com,

miguelmendezgarabetti@gmail.com, gbianchini@frm.utn.edu.ar,

pcaymesscutari@frm.utn.edu.ar, lauratardivo@dc.exa.unrc.edu.ar

Resumen

Cada año, los incendios forestales causan pérdidas incommensurables en los ecosistemas del mundo, provocando la desaparición de grandes superficies de bosques. En respuesta a esta problemática, la predicción del comportamiento de estos fenómenos puede ser una herramienta de gran utilidad para disminuir los daños provocados. Este método ha sido probado mayormente con mapas de incendios controlados y mapas de incendios reales cuya metodología de trabajo consistía en la toma de sus perímetros de forma manual mediante herramientas de sistemas de información geográfica. En el presente trabajo, se ha aplicado un método para la automatización de perímetros de área quemada en casos de incendios reales. El mismo ha sido diseñado y probado para la utilización de imágenes satelitales obtenidas por los satélites Terra y Aqua de la herramienta espacial MODIS. Los resultados obtenidos en el experimento han sido comparados respecto a los obtenidos mediante la metodología de trabajo manual, consiguiendo valores más adecuados de las áreas quemadas para ser posteriormente implementados en el método de simulación de comportamiento de incendios.

1. Introducción

Los incendios forestales son una de las problemáticas ecológicas reales a lo largo del mundo, la dificultad de su predicción y extinción han ocasionado la pérdida de innumerables hectáreas de bosques durante años.

Según los últimos datos estadísticos obtenidos de los reportes anuales producidos por la EFFIS (European Forest Fire Information System), el cual reporta una cantidad de incendios forestales para 29 países de Europa y África del norte desde el año 1980 hasta el año 2016 (datos por país según el año de comienzo de la toma de los mismos), dos de los tres países con más incendios forestales superan las 3 millones de hectáreas (Portugal y España), mientras que el restante supera los 16 millones de hectáreas de bosques consumidas por incendios (Rusia) [1]. Debe considerarse que, aunque este último sea el país con mayor extensión a nivel mundial, los datos obtenidos, a diferencia de los demás, comienzan a partir del año 2010, dejando en evidencia la magnitud del problema. En el año 2017, la cantidad de incendios en la zona de Europa superó los 1500, cuyo promedio anual alcanzaba la cifra de 639 incendios en los últimos 8 años, afectando casi a 8 millones y medio de hectáreas [2].

La República Argentina cuenta con una superficie de 376.127.400 ha [3], convirtiéndose en el segundo país más extenso de América Latina, y el octavo respecto del mundo. De esta superficie, 53.654.545 ha corresponden a bosques nativos [4], casi el 15% de la superficie total de la Argentina. Por lo cual, el surgimiento de incendios forestales en este país puede ocasionar la pérdida de importantes superficies de bosques. Más allá de la dificultad de la obtención de los datos de incendios a lo largo de los años, un panorama de la actualidad puede concluirse a partir de las Estadísticas de Incendios Forestales del Período 2014-2015, suministradas por el Ministerio de Agroindustria [5] y las Estadísticas de Incendios Forestales del año 2015 y 2016 del Ministerio

de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación [6, 7]. La cantidad de incendios durante el año 2014 dio un valor de 6.968 focos reconocidos, con una pérdida de 798.518,83 ha. Para el año 2015, este número de focos de incendio disminuyó a 6.076 con una significativa reducción de hectáreas incendiadas, las mismas fueron de 4.986.810,42 ha. Sin embargo, la tendencia de disminución no se mantuvo para el año siguiente, ya que el total de incendios en el país aumentó a 7.519, llevando consigo la pérdida ambiental de 1.072.642,14 ha, convirtiéndose en la mayor de las pérdidas del período de años marcados, elevando su cifra a más de un millón de hectáreas de bosques incendiadas.

Debido a la magnitud anual en la pérdida de hectáreas de bosques y su impacto tanto en el medioambiente como en las regiones rurales, es importante el desarrollo de métodos científicos y tecnológicos que ayuden en la prevención de los incendios forestales, disminuyendo de esta manera la desaparición de los bosques y los recursos necesarios en su extinción.

Una de las herramientas utilizadas para la prevención de incendios consiste en la predicción del comportamiento de los incendios forestales mediante métodos computacionales. Esta herramienta es capaz de ayudar a determinar la futura dirección de la propagación del incendio y así calcular los recursos necesarios para sofocar el incendio y prever evacuaciones [8].

Un uso común es la aplicación de un simulador de incendios de modo clásico. Éste consiste en la evaluación de la línea de fuego luego de un período inicial de tiempo, mediante la utilización de un simulador de comportamiento de incendios [8]. En la Fig. 1 se puede visualizar un esquema del funcionamiento del método en cuestión. El Simulador de incendios (SI) es alimentado por dos conjuntos de datos: la línea de fuego real (LFR) en el instante de tiempo (T_n), generalmente representada por un mapa en el cual se muestra el área quemada donde se inició el incendio, y la información del ambiente o parámetros de entrada (PE) del lugar donde el fuego se ha desarrollado (humedad, vegetación, etc.). Cada parámetro de entrada tiene un único valor asignado, el SI utiliza este conjunto de parámetros de entrada y la LFR_n para realizar la predicción de la línea de fuego (LFP) para el siguiente instante de tiempo (T_{n+1}) mediante una única simulación [9].

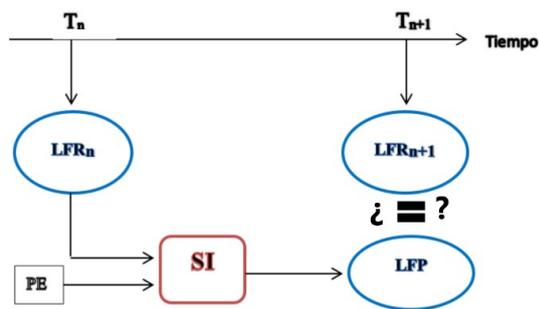


Figura 1. Predicción clásica

La predicción del comportamiento de un incendio no es fácil de determinar debido a la cantidad de parámetros de entrada que deben medirse en tiempo real (velocidad y dirección del viento, humedad, tipo de vegetación, etc.), además de no poder tener un conocimiento certero de los valores de dichos parámetros. Esta incertidumbre en los valores de entrada afecta de manera considerable la precisión de la línea de fuego predicha en la salida del método, impidiendo así que las técnicas clásicas de predicción puedan ser utilizadas en este contexto [10]. Debido a esto es que se utilizan métodos de reducción de incertidumbre para optimizar los valores de entrada del método de predicción.

Existen diversos métodos para la detección de incendios forestales y la toma de datos del mismo. Una de ellas consiste en el monitoreo visual desde torres de vigilancia en puntos estratégicamente localizados que permite la examinación de territorios asociados con alto riesgo y peligro de incendios por personal bien calificado. Sin embargo, esta forma de trabajo no es capaz de funcionar con territorios aislados y de difícil acceso para los equipos de detección y rescate [30]. El principal problema asociado a este método consiste en que, al momento de su detección, la velocidad de su propagación ha producido niveles de daño incontrolables. Además, esta metodología de trabajo acarrea elevados costos en infraestructura y de personal capacitado.

Otro método ampliamente utilizado es la WSN o red de sensores inalámbrica. Este es un sistema distribuido compuesto por nodos con capacidad de obtener información de las condiciones ambientales y transmitirla de manera inalámbrica a una estación base, para su procesamiento. Las técnicas de fusión de información permiten mejorar la calidad de la respuesta ante un evento de interés, al combinar las diferentes fuentes de datos [31]. Algunos de los beneficios de utilizar estos sistemas son sus bajos costos de implementación y su autonomía en la obtención y manejo de datos.

una fuente de información confiable y actualizada constantemente sobre frentes de incendios forestales son las imágenes satelitales. Para ello, la obtención de imágenes satelitales, mediante sistemas de teledetección,

nos brinda la posibilidad de ver y utilizar imágenes de incendios forestales que ocurren en el mundo y que son vitales debido a la dificultad existente con otros medios para conseguir dicha información. No obstante, el proceso de captura y transformación de estas imágenes requiere de una serie de pasos necesarios para su utilización en algún determinado sistema de predicción.

En las siguientes secciones de este artículo se presenta el trabajo realizado sobre un incendio real del año 2008 en la provincia de Córdoba, Argentina, mediante imágenes tomadas por el satélite MODIS y procesadas para delimitar su perímetro con el fin de realizar la predicción del incendio según el método de reducción de incertidumbre ESSIM (Evolutionary-Statistical System with Island Model) [8], mostrando así los pasos involucrados en la generación automática.

2. Método ESSIM

El Sistema Estadístico Evolutivo con Modelo de Islas (ESSIM, por sus siglas en inglés) es un método de reducción de incertidumbre basado en cómputo paralelo que puede ser aplicado a distintos modelos de propagación con el objetivo de reducir la incertidumbre en los valores de entrada de parámetros dinámicos utilizados en un sistema de predicción.

El funcionamiento de este modelo se caracteriza por utilizar la superposición de casos y la combinación de los parámetros mediante el uso de análisis estadístico, cómputo paralelo y algoritmos evolutivos paralelos, con el fin de realizar su predicción.

El análisis estadístico es el encargado de analizar los datos para la toma de decisiones y la resolución de problemas. Con ello, es posible encontrar relaciones de dependencias entre las variables que afectan un fenómeno. Este es el caso de los parámetros de entrada del modelo de predicción para incendios forestales, cuyos valores determinan el comportamiento del fuego [8]. Por ejemplo, al dividir de manera virtual el área total de un bosque en secciones cuadradas en un mapa, podemos calcular su Probabilidad de Ignición (la probabilidad de que esta sección o celda sea quemada) según el conjunto de parámetros introducidos en el método:

$$P_{ign}(C) = n_c/n$$

- C = Celda
- n = número de escenarios totales
- n_c = Número de escenarios donde la celda es alcanzada por el fuego

Debido a la exigencia del método y la cantidad de variables que debe procesar, el mismo hace uso de cómputo paralelo mediante un sistema de computación de alto rendimiento. De esta manera, es posible repartir las

tareas entre varios procesadores, disminuyendo considerablemente los tiempos de trabajo de tareas complejas. Entre los distintos paradigmas de trabajo que puede utilizarse para estos sistemas, ESSIM hace uso del llamado Master-Worker. Éste se estructura como un proceso (Master) que genera muchos sub-problemas o tareas las cuales son enviadas a resolver de manera simultánea por otros procesos (Workers) que luego devolverán sus resultados al Master.

Los Algoritmos Evolutivos (AE) son métodos de optimización y búsqueda cuyo funcionamiento está inspirado en la selección natural y genética para resolver problemas de optimización. Su proceso consiste en una serie de iteraciones, donde una muestra de posibles escenarios es agrupada como un conjunto de soluciones posibles [11].

En los modelos de AE se introducen tres tecnicismos de trabajo cuya definición es un símil a los propios de la evolución: Individuos, o conjuntos de valores de solución posible; Población, o conjunto de individuos; y Generación, o serie de iteraciones. Así, es posible entender el modelo en tres pasos: 1) Selección de una muestra de padres de la población; 2) Sometimiento de los padres a diferentes operaciones de recombinación y mutación para generar un conjunto de descendientes; 3) Introducción de los descendientes a la población, reemplazando a los individuos con peor desempeño. En la Fig. 2 puede observarse el funcionamiento básico de estos pasos.



Figura 2. Modelo de Algoritmo Evolutivo

Los AE utilizan una Función de Fitness que calcula un valor determinado para cada individuo, de esta manera podemos determinar cuán aceptable es la solución que el individuo representa respecto del problema. Para la predicción de incendios forestales, cuyo trabajo demanda una exigencia compleja, es común utilizar AEs de forma paralela, ahorrando así tiempos de procesamiento y aumentando la capacidad de búsqueda del mismo. El modelo de AE de este trabajo es el denominado PM&M (Población Múltiple y Migración), mejor conocido como AE con Modelo de Islas. Su forma de trabajo consiste en un sistema donde cada isla representa una población diferente de individuos. Este modelo opera con múltiples

islas, y los operadores genéticos son aplicados entre individuos de la misma población. Es aquí donde aparece la migración, un operador que realiza el movimiento de los individuos entre las islas para agregar diversidad y prevenir la convergencia prematura o el estancamiento de los valores locales.

El funcionamiento general (comprendido como una unidad de los tres elementos explicados anteriormente) puede ser visualizado en la Fig. 3.

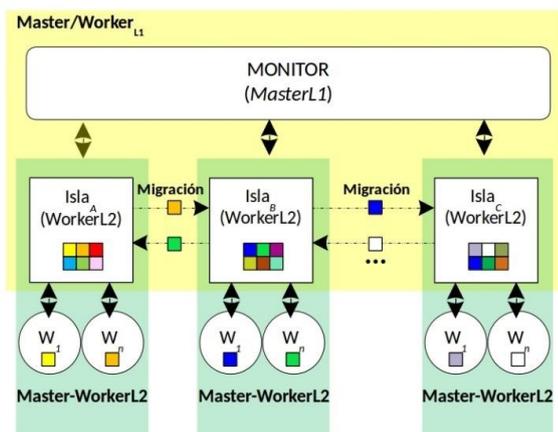


Figura 3. Esquema de funcionamiento del ESSIM [8]

Como puede observarse en la misma, este modelo ha sido implementado con dos niveles de paralelismo. Un Nivel 1, o Master-Worker L1, donde el Proceso Monitor es el encargado de controlar todo el proceso de predicción mediante la comunicación con cada una de las islas, enviándole la información necesaria para que cada una de ellas ejecute su respectivo algoritmo evolutivo. En tanto que en el Nivel 2, o Master-Worker L2, cada proceso Master se encarga de la operación de su isla enviando individuos a sus Workers (o trabajadores), evaluando cómo evoluciona la población y realizando los procesos de migración de los individuos con las otras islas. Mientras, los Workers llevan a cabo el proceso de simulación y la evaluación de Fitness de la población para luego enviar los resultados a su proceso Master. Finalmente, para cada paso de la simulación, y una vez que todos los procesos Master de cada isla han enviado sus resultados al proceso Monitor, este último lleva a cabo la predicción de la línea de fuego. Para cada ejecución del método existen m instancias de L2 corriendo en paralelo, y cada predicción representa el estado de la línea de fuego del incendio forestal en ese instante de tiempo dado.

3. Imágenes Satelitales

La observación de la Tierra desde el espacio mediante imágenes adquiridas por satélites, percepción remota o

teledetección, ha alcanzado un alto nivel de desarrollo y difusión, y es extremadamente útil para el seguimiento de fenómenos naturales y acciones antrópicas, y sus impactos en el planeta [12].

Existen esencialmente 3 tipos de satélites: los de alta órbita terrestre, de mediana órbita terrestre y los de baja órbita terrestre. Los satélites de alta órbita terrestre se encuentran a una distancia de 36.000 km sobre la tierra.

Los satélites de órbita terrestre media se mueven más rápido que los anteriores y poseen dos órbitas notables: la órbita semi-sincrónica y la órbita de Molniya [28].

Sin embargo, la mayoría de los satélites científicos y muchos satélites meteorológicos se encuentran en una órbita terrestre baja, casi circular. Mientras estos orbitan, la Tierra gira por debajo. Para cuando el satélite vuelve a cruzar a la luz del día, se encuentra sobre la región adyacente al área que se ve en su última órbita, complementando la imagen. En un período de 24 horas, los satélites en órbita polar verán la mayor parte de la Tierra dos veces: una a la luz del día y otra a la oscuridad gracias a su periodo de 12 horas.

Del mismo modo que los satélites geosincrónicos tienen un punto dulce sobre el ecuador que les permite permanecer en un punto de la Tierra, los satélites en órbita polar tienen un punto dulce similar que les permite permanecer en una misma hora [29].

A continuación, se presentan algunas de las plataformas satelitales utilizadas para el relevamiento de la superficie terrestre.

3.1 Landsat 8

Landsat es una serie de satélites estadounidenses para observación de la tierra de 1972. Landsat 8 es el último satélite que fue lanzado al espacio en febrero de 2013 y genera imágenes para cada sitio del planeta, con una frecuencia de 16 días. Landsat 8 está dotado de dos sensores: el Operational Land Imager (OLI) que toma información en las bandas espectrales correspondientes al visible (V), infrarrojo cercano (IRC) e infrarrojo medio (IRM). El segundo, Thermal Infrared Sensor (TIRS), provee dos bandas en el infrarrojo térmico. El sensor OLI genera imágenes con una resolución espacial de 30 metros y 12 bits de resolución radiométrica. Estas características lo hacen muy adecuado para realizar trabajos de relevamiento a escala zonal y regional como los del presente proyecto [13].

3.2 VIIRS

Es un radiómetro de barrido que recoge imágenes visibles e infrarrojas y mediciones radiométricas de la tierra, la atmósfera, la criosfera y los océanos.

Los datos de VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) se usan para medir las propiedades de nubes y aerosoles, el color del océano, la temperatura de

la superficie del mar y del terreno, el movimiento y la temperatura del hielo, los incendios y el albedo de la Tierra. Los climatólogos utilizan los datos VIIRS para mejorar nuestra comprensión del cambio climático global.

VIIRS amplía y mejora una serie de mediciones iniciadas por el radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR) y el espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS), lo que le da especial importancia en el presente trabajo.

La mayor ventaja de estos sistemas radica en sus observaciones diarias multiespectrales, que se utilizan para caracterizar y monitorear la superficie terrestre a escalas regionales y globales. MODIS proporcionó un nuevo estándar en observaciones satelitales calibradas, de calidad científica y resolución gruesa, que continuará con VIIRS. [12]

El estudio de la dinámica de la vegetación, incluida la fenología, implicará el uso de productos tales como el índice de vegetación, el contenido de agua de la hoja y el índice del área foliar, (cantidad dimensional que caracteriza la canopia o doseles de las plantas) muy importantes para la predicción de incendios e ignición en la zona. El estudio del cambio en la cobertura del suelo incluye el uso de los productos Land Cover [14] y Fire [15]. Los primeros también se utilizan como una capa de datos de estratificación básica, por ejemplo, para iniciar el clima regional a global y modelos de evaluación integrados, y los segundos se usan para cuantificar la perturbación de la vegetación y como entradas para modelar las emisiones de la quema de biomasa [12].

3.3 MODIS

Con su amplia franja de visualización de 2.330 km, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) ve cada punto de nuestro mundo cada 1 o 2 días en 36 bandas espectrales discretas [14]. En consecuencia, MODIS realiza un seguimiento de una matriz más amplia de signos vitales de la Tierra que cualquier otro sensor de tierra. Por ejemplo, el sensor mide el porcentaje de la superficie del planeta que está cubierto por nubes casi todos los días.

Además, MODIS mide las propiedades de las nubes, como la distribución y el tamaño de las gotas de nubes, tanto en agua líquida como en nubes de hielo. MODIS también mide las propiedades de los aerosoles: pequeñas partículas líquidas o sólidas en la atmósfera. Los aerosoles ingresan a la atmósfera a partir de fuentes artificiales como la contaminación y la quema de biomasa y fuentes naturales como tormentas de polvo, erupciones volcánicas e incendios forestales. Utilizando sus sensores de temperatura, MODIS ayuda a los científicos a rastrear fuentes de dióxido de carbono.

MODIS también registra dónde y cuándo ocurren los desastres, como las erupciones volcánicas, las

inundaciones, las tormentas severas, las sequías y los incendios forestales, y uno de sus objetivos es utilizar la información para ayudar a las personas a salir del peligro. Las bandas de MODIS son particularmente sensibles a los incendios; pueden distinguir las llamas de las quemaduras ardientes y proporcionar mejores estimaciones de las cantidades de aerosoles y gases que emiten los incendios a la atmósfera [16].

3.4 WorldView

Además de ofrecer las imágenes satelitales de mayor resolución en la actualidad, WorldView-3 es el primer satélite comercial en tener 8 bandas de alta resolución que capturan información con ancho de onda SWIR. WorldView-3 provee información para identificar y caracterizar muy precisamente materiales naturales y hechos por el hombre, penetración de humo, y análisis de minerales. Las 8 bandas SWIR capturan información única sobre la agricultura, bosques, minería/geología y otras aplicaciones [17].

4. Frecuencia de bandas satelitales

Las frecuencias de las bandas satelitales utilizadas para la detección de incendios y en particular de puntos de calor o focos de calor es la SWIR o banda de onda infra roja (*shortwave infrared*), cuyo espectro se encuentra con una longitud de onda de entre 1 y 2.5 nanómetros. MODIS posee esta tecnología en varios de sus sensores. En la Fig. 4 es posible ver la longitud de onda del SWIR y NIR (bandas usadas en el presente artículo).

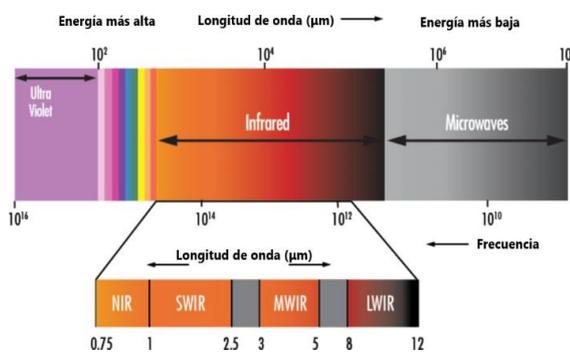


Figura 4. Longitud de onda visible y no visible [18]

Una aplicación SWIR popular es la detección de humedad. El agua es transparente a la luz visible, pero se absorbe fuertemente a longitudes de onda de 1450 y 1900 nm, lo que hace que parezca negra en la imagen. Con el correspondiente filtro o iluminación, esta capacidad puede usarse para diversas tareas de inspección en las industrias de alimentos y bebidas, carpintería, textil o automotriz: ejemplos incluyen la verificación de recubrimientos o

2	841 - 876
7	2105 - 2155

5.2 Diagrama de la aplicación de conversión y generación de área quemada en mapas de entrada

Para algunos de los pasos en la realización de la conversión de los datos al formato necesario, se ha hecho uso de la herramienta Gdal. Esta es una biblioteca de traducción para formatos de datos geospaciales de licencia Open Source brindada por la *Open Source Geospatial Foundation* [24], la cual brinda una extensión de funciones para el trabajo de tratamiento de mapas en sus distintos formatos.

En la Fig. 6 se pueden observar los pasos del proceso completo de conversión de los mapas, desde su descarga hasta el ingreso del mapa de incendio final al simulador de incendios.



Figura 6. Proceso de conversión de mapa.

Es importante mencionar que el proceso de la predicción no es capaz de procesar las imágenes satelitales en su formato originar por lo que éstas deben ser adaptadas al formato requerido (formato ASCII). Por lo cual, este primer paso es ejecutado para cada uno de los días del incendio, obteniendo un conjunto de mapas en formato GeoTIFF cuyos valores de tamaño total del mapa y de resolución por pixel deben ser idénticos.

En un segundo paso es que se hace el primer uso de las funciones de la librería de Gdal para descomponer cada una de las bandas RGB como un mapa independiente en su mismo formato. Como se observa en la Fig. 7, cada una de las bandas R, G y B corresponde a los valores de las bandas 7,2,1 respectivamente del satélite MODIS. De esta forma la composición de las mismas en un solo mapa

permite ver el área incendiada, el incendio y humo proveniente del mismo.

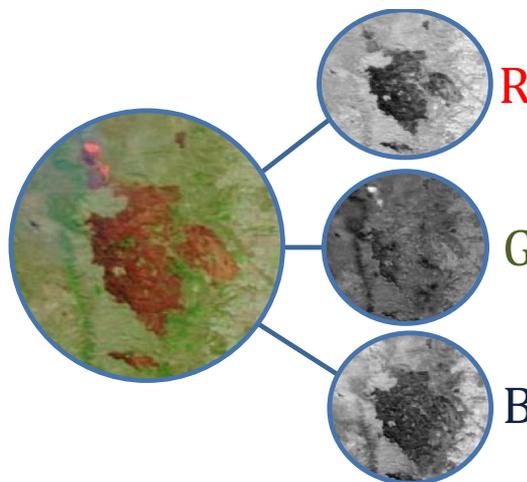


Figura 7. Descomposición de mapa RGB.

Una vez obtenidas las distintas bandas por separado, en el tercer paso se convierte cada uno de esos archivos en el formato ASCII mediante una segunda función de Gdal, la cual convierte el archivo en una matriz de datos, pero donde el valor de cada uno de ellos corresponde a su valor en RGB para cada banda (entre 0 y 255), valores que nos serán luego útiles para distinguir el área que ha sido quemada de la que no en cada instante de tiempo. Dado el caso de tener un mapa cuyo tamaño de celda sea muy pequeño en relación al tamaño total del mapa, puede anexarse aquí la posibilidad de hacerse uso de una última función de Gdal que permite redimensionar el tamaño de las celdas y, en consecuencia, la cantidad total de las mismas, sin modificar el área total del mapa, disminuyendo el tiempo total de trabajo y el procesamiento de los cómputos en el sistema de reducción de incertidumbre y predicción del comportamiento del incendio [25].

A partir del paso número 4, y teniendo ya el conjunto de mapas en formato ASCII para cada una de las bandas de cada mapa de incendio en un instante de tiempo, se procede a realizar un algoritmo de comparación entre sus valores para cada celda del mapa. La finalidad es lograr obtener las celdas donde se encuentra predominancia del color rojo del sistema RGB, recordando con la Fig. 4 que esto implica el área donde las celdas han sido alcanzadas por el fuego. Si la celda corresponde a una parte del área total alcanzada por el fuego en el instante de tiempo de ese mapa, la celda del nuevo mapa de salida tendrá el valor de ese instante de tiempo. En caso de no ser así, su valor será igual a cero, dando a entender que las llamas no alcanzaron esa sección de espacio en ningún momento.

Ya terminado el paso número 4 para cada uno de los mapas de cada instante de tiempo, y obtenido, entonces, el nuevo conjunto de mapas con el área quemada en su intervalo, se procede a la realización del último paso de este algoritmo. En el paso número 5 se realiza una combinación del conjunto de mapas obtenidos. Para lograrlo, cada valor de celda de un instante de tiempo nuevo actualizará el valor del instante de tiempo anterior, con la excepción de aquellas celdas donde el nuevo instante sea igual a cero. Terminado este proceso, la salida será un mapa final con los valores del área de quema por instante en cada celda, dejando a la vista la dirección de propagación del incendio a lo largo del tiempo, desde que inició hasta que terminó.

El mapa en cuestión será similar al de la Fig. 5 (pero con mayores dimensiones), el cual es el utilizado para ingresar como parámetro en el sistema de predicción de incendios. En la sección de experimentación podrá verse un ejemplo completo de este proceso para un incendio de seis días de duración.

6. Experimentación

6.1 Caso de estudio

El presente trabajo de automatización de la digitalización de mapas de entrada y predicción de incendios forestales, corresponde al incendio del año 2008 en la localidad de Capilla del Monte, Provincia de Córdoba, Argentina, cuya duración se presenta desde la fecha del 29 de agosto al 03 de septiembre de dicho año y en el cual fueron quemadas 51.852,063 hectáreas [26, 27]. En la Fig. 8 puede observarse el área quemada en su último día de incendio.

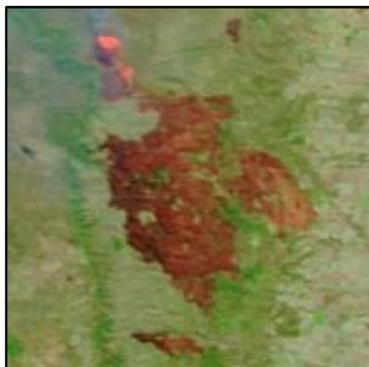


Figura 8. Día final del incendio en Córdoba

Para el primer paso de la conversión debemos tener en cuenta la cantidad de días que el incendio ha durado. Como ha sido mencionado, el presente incendio cuenta con una duración total de seis días, lo cual corresponde a la descarga de seis imágenes (una por día) de los satélites

que nos muestren el avance del incendio. En la Fig. 9 se ve el conjunto de imágenes del incendio descargadas.

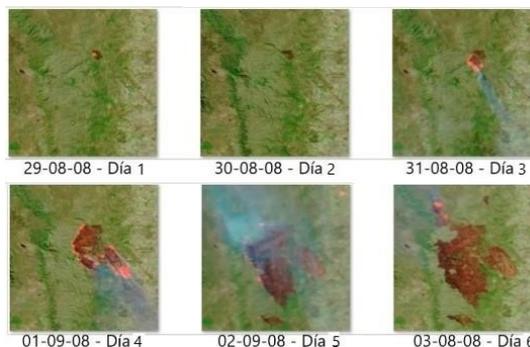


Figura 9. Días del incendio en Córdoba

A su vez, deben estandarizarse los valores del tamaño total del mapa (tomando siempre los mismos puntos de coordenadas en el mapa), resolución por pixel y formato de archivo del mapa para trabajar con un conjunto de imágenes que se encuentren en la misma área, evitando de esta manera los errores que puedan surgir en aquellos procesos que precisen comparaciones entre ellas.

Tabla 2. Información de mapas

Tabla 2. Información de mapas	
Cantidad de imágenes	6
Tamaño de imagen (cantidad de celdas)	213 px X 213 px
Resolución (por pixel)	250m
Formato de archivo	GeoTIFF

Para cada uno de estos seis mapas obtenidos hemos procedido a realizar el trabajo de descomposición de sus bandas RGB, teniendo así tres mapas por cada uno de ellos.

Tabla 3. Descomposición de mapas RGB

Tabla 3. Descomposición de mapas RGB			
Imagen RGB por día	Mapa R	Mapa G	Mapa B
Mapa 29-08	29-08R	29-08G	29-08B
Mapa 30-08	30-08R	30-08G	30-08B

Mapa 31-08	31-08R	31-08G	31-08B
Mapa 01-09	01-09R	01-09G	01-09B
Mapa 02-09	02-09R	02-09G	02-09B
Mapa 03-09	03-09R	03-09G	03-09B

Una vez separadas las bandas, procedimos a la conversión del formato GeoTIFF al formato ASCII precisado para cada uno de los 18 mapas nuevos. De esta manera, cada uno de los mapas corresponde a la matriz de 213x213 con un valor de 0 a 255 (rango de valores de color en formato RGB. Siendo 0 el valor más claro y 255, valor más oscuro) en cada celda.

En el presente caso, debido al tamaño de las celdas en relación con el tamaño total del mapa y su repercusión en los tiempos de trabajo del sistema de predicción, decidimos hacer uso del paso de redimensionamiento del mapa para obtener un tercio de la cantidad de celdas. Los nuevos valores de los mapas son los indicados en la Tabla 4, logrando con esto menor tiempo de trabajo y de procesamiento en el sistema de predicción, como podrá apreciarse con mayor detalle en la siguiente sección de la experimentación.

Cantidad de imágenes	18
Tamaño de imagen (cantidad de celdas)	71 px X 71 px
Resolución (por pixel)	750m
Formato de archivo	ASCII

Para el algoritmo de generación de área quemada, se realizó una comparación entre las imágenes de las bandas R, G, B, por cada día de quema (cada uno de los mapas descargados) de manera que aquellos valores de la misma celda cuya preponderancia se encuentre en el rojo, serán tomados como un nuevo valor para el nuevo mapa de salida y este valor corresponde al instante de quema en la celda. Es decir, si en una misma celda del mapa el valor de la banda R es mayor al de los dos restantes (G y B), se tomará como celda que ha sido alcanzada por el fuego y este valor (que estará en el rango de 0 a 255) será cambiado

al del instante de quema (minuto de quema desde que empezó el incendio) correspondiente, dejando en evidencia en qué instante de tiempo la celda fue quemada (esa sección del mapa fue alcanzada por el fuego). En el caso de que la preponderancia del valor de la celda no se encuentre en el rojo (fenómeno que nos indica que esa celda no ha sido quemada), el nuevo valor de esta celda será de cero.

Aunque este paso se repite para cada uno de los días, solamente mostraremos el caso del día 3 de septiembre (Mapa 03-09) presentado en la Fig. 8, cuyos mapas a comparar son el 03-09R, 03-09G, 03-09B.

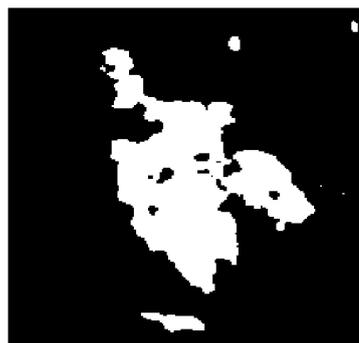


Figura 10. Día final del incendio en Córdoba representado en el formato de salida ASCII

La Fig. 10 es el nuevo mapa de salida en el formato ASCII requerido. Como se observa, todos aquellos valores de las celdas que no cumplieron con el valor adecuado del rojo, y cuyo nuevo valor equivale a cero, se encuentran en negro, en tanto que todos aquellos que corresponden al incendio se encuentran en blanco. El valor de las celdas dependerá del instante de quema, como este mapa corresponde al sexto día, su valor es de 8670 minutos (seis días).

Este proceso es realizado por separado para cada uno de los días, obteniendo un nuevo mapa de salida por cada combinación R, G, B visto en la tabla anterior. Así, tendremos seis nuevos mapas en el formato requerido.

nueva imagen ASCII	Tiempo de instante de quema
Mapa 29-08	1440 (minutos)
Mapa 30-08	2880 (minutos)
Mapa 31-08	4320 (minutos)

Mapa 01-09	5760 (minutos)
Mapa 02-09	7200 (minutos)
Mapa 03-09	8640 (minutos)

Con estos nuevos seis mapas ya es posible la realización de un mapa final que nos muestre el avance de la línea de fuego en el tiempo. El algoritmo final que se encarga de esto toma las matrices (o mapas) desde el último día del incendio, hasta el primero del mismo. La finalidad de realizarlo de esta manera (a la inversa de los sucesos) consiste en superponer las celdas de menores valores sobre las mayores, dejando a la vista en el nuevo mapa como se ha desarrollado el incendio en cada día.

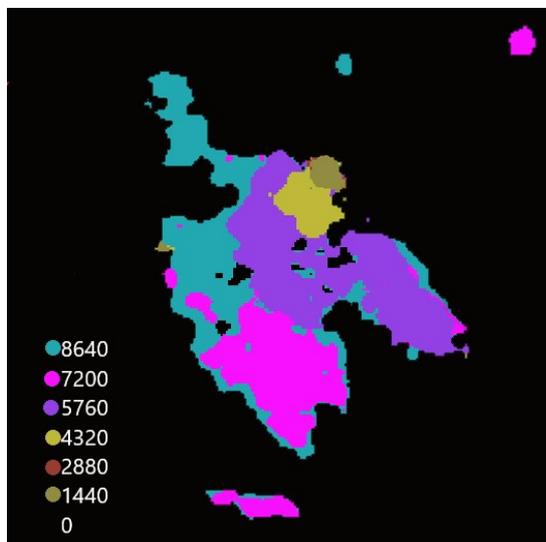


Figura 11. Mapa final del desarrollo del incendio en Córdoba en nuevo formato ASCII

Una vez obtenido el mapa de salida, cuyo resultado es el observado en la Fig. 11, es posible introducirlo al simulador del comportamiento de incendios para observar los resultados de su proceso de simulación.

6.2 Comparación entre la generación de mapas de modo manual y automático

En el método manual usado tradicionalmente, es necesaria la utilización de sistemas de información geográfica (como es el caso de ArcGIS, QGIS, etc.) para obtener las áreas quemadas de los mapas descargados. Para ello, se procede a marcar el perímetro en cada mapa, punto por punto, un número limitado de veces de manera

manual para conseguir un perímetro aproximado. Un ejemplo del mapa del día 03 de septiembre puede verse en la Fig. 12.

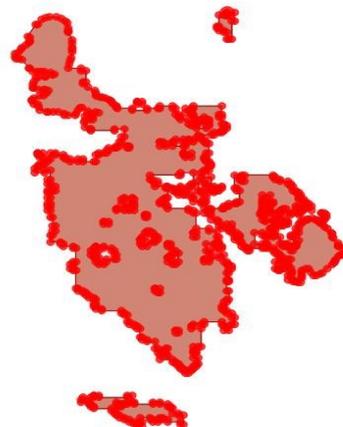


Figura 12. Día final del incendio en Córdoba representado en un formato vectorial

Como puede observarse, la unión de los puntos marcados (utilizando de base el mapa original descargado) da como resultado un nuevo mapa cuyo formato ya no pertenece a un archivo de tipo ráster como el caso de los tipos GeoTIFF y ASCII utilizados en el presente trabajo, sino a un nuevo formato vectorial. Aunque el uso de formatos vectoriales en mapas de incendio cuenta con ciertas ventajas (como su facilidad de redimensionamiento) frente a los archivos ráster, las desventajas de su utilización en el presente caso implican una mayor imprecisión en el área tomada debido a dos factores particulares: la necesidad de marcar de manera visual una cantidad de puntos que estará siempre limitada con respecto al perímetro, y la obtención de una imagen de tipo vectorial desde un formato de tipo ráster (GeoTIFF).

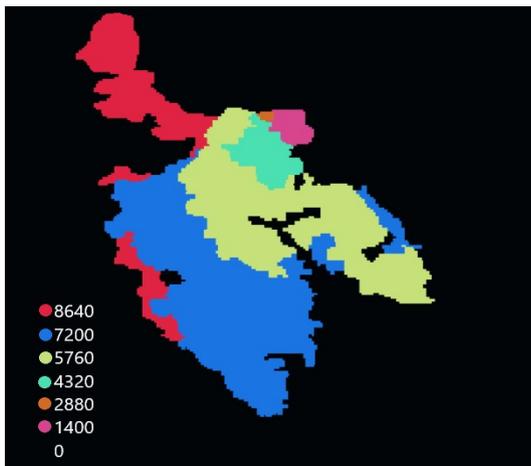


Figura 13. Mapa final del desarrollo del incendio en Córdoba en formato vectorial

En la Fig. 13 se observa el mapa obtenido de manera manual y puede apreciarse la diferencia con el mapa del incendio obtenido de manera automática de la Fig. 11.

Aunque se ha realizado un proceso de eliminación de las áreas inferior y superior derecha para trabajar con el progreso del área mayor del incendio, el área total del incendio generado manualmente supera en hectáreas la del mapa generado de manera automática con el proceso de este trabajo. A pesar de que estos valores sean mayores, su resultado es más impreciso que los obtenidos con el método automático ya que superan en exceso la cantidad total de hectáreas incendiadas. El detalle de estos valores y su diferencia pueden observarse en la tabla 6.

Fuente de información	ha incendiadas
Generado manualmente	95.400, 000 ha
Generado automáticamente	49.687,500 ha
Datos oficiales [27]	51.852, 063 ha

Finalmente es posible identificar de esta manera cómo la toma manual de los perímetros de área quemada en los mapas descargados acarrea un error debido a la conflictiva tarea de marcar de manera precisa dicho perímetro. Lo mismo puede entenderse si se considera la dificultad de identificar visualmente todas las celdas que, a primera

impresión, parezcan haber sido alcanzadas por el fuego. Por ello, el algoritmo codificado para lograr esta tarea puede ayudarnos a mejorar esta precisión en el mapa y trabajar utilizando datos más certeros con el fin de implementarse en el método de predicción seleccionado.

6.3 Utilización del perímetro en la predicción

Como ha sido mencionado anteriormente en el artículo, el simulador de comportamiento de incendios forestales cuenta con dos conjuntos de datos fundamentales para realizar su predicción: la línea de fuego real en un instante de tiempo determinado (vista en la sección anterior) y los parámetros de entrada del ambiente donde el fuego se ha desarrollado.

Parámetro	Rango
Modelo	1-13
Velocidad del viento	10.0 – 130.0 min/h
Dirección del viento	0.0 – 360.0
Pendiente	0.0 – 0.0
Aspecto	180.0 – 180.0
Humedad de la vegetación a 1 hora	0.1 – 0.3
Humedad de la vegetación a 10 horas	0.1 – 0.5
Humedad de la vegetación a 100 horas	0.1 – 0.5
Humedad del combustible herbáceo vivo	0.1 – 0.5

En nuestro caso de estudio, el mapa ha sido trabajado con 6 pasos de predicción, uno por cada instante de tiempo, con el fin de obtener 5 valores finales de fitness (recordando que en el primer instante no es posible realizar una predicción) en donde el rango va de 0 a 1, siendo 0 (0%) el peor valor de predicción y 1 (100%) una predicción perfecta. Los valores del tiempo corresponden a intervalos de 1440 minutos (un día). Para obtener una

estadística concreta de la calidad de predicción obtenida en cada instante de tiempo en este mapa, se ha resuelto a realizar 20 (veinte) simulaciones del mapa en el simulador de comportamiento de incendios forestales y conseguir un promedio de estos 20 valores en cada paso de predicción.

En la Fig. 14 (denominada gráfica de la función de fitness) podemos observar el valor de fitness (como valor propio del eje y) obtenido en cada intervalo de tiempo, o cada día (sobre el eje de las x) para la gráfica estadística.



Figura 14. Gráfica de la función de fitness

Entre los datos que pueden observarse a simple vista, es posible identificar un aumento de la calidad de predicción para los primeros dos días del incendio, con el pico mayor en el día número 3, seguido de una caída de los valores de predicción en el siguiente día de análisis del incendio. Para el día número cinco, hubo una tendencia general de alza en los valores de fitness para, finalmente, obtener un leve descenso de estos valores en el día final del incendio.

En la Tabla 8 se pueden observar los valores de los promedios resultantes de las veinte predicciones realizadas para cada instante de tiempo del incendio, es decir, un promedio de los resultados de la calidad de predicción para cada día del incendio.

Valor de Fitness	valor de instante de quema
-	Día 1 (1440)
0.24	Día 2 (2880)
0.60	Día 3 (4320)

0.30	Día 4 (5760)
0.40	Día 5 (7200)
0.23	Día 6 (8640)

7. Conclusiones

Ante la dificultad de obtener datos precisos de incendios forestales reales, en el presente trabajo se ha resuelto utilizar las herramientas de teledetección de los satélites MODIS cuyas combinaciones de bandas espectrales nos permiten utilizar imágenes sobre las áreas incendiadas en un incendio forestal. Sin embargo, las imágenes que estos satélites son capaces de otorgarnos no sólo no se corresponden con el formato requerido por el método ESSIM, sino que contienen datos más allá de los necesarios para dicho método.

A lo largo de este trabajo se ha realizado un proceso de conversión y toma de datos de estas imágenes satelitales con el fin de extraer las áreas propias del incendio de cada día en el formato requerido para ser utilizado en el método ESSIM. Para ello, se ha trabajado con las imágenes de un incendio real del año 2008 en la provincia de Córdoba, Argentina de seis días de duración. Una vez logrado esto, se realizó una comparación con el resultado obtenido mediante el método manual, demostrando mejoras en la precisión del área obtenida. Terminado esto, se procedió a utilizar el mapa en el sistema de predicción.

El método de trabajo consistió en realizar una predicción del comportamiento del incendio para cada día que el mismo duró con el objetivo de medir la calidad de predicción de cada una de ellas. Con el fin de realizar un trabajo estadístico que nos brinde resultados más generales, se procedió a introducir el mapa en el sistema de predicción un total de veinte veces y obtener la media de las predicciones para cada instante de predicción. Los resultados finales de esta estadística indicaron buenos valores en la calidad de predicción, especialmente de los días 2,3 y 5 con un valor del 60,25% de calidad de predicción del comportamiento del incendio en el día 3.

El mapa resultante, en el proceso de extracción y conversión, indica la posibilidad de seguir trabajando con este método para ser utilizado en el sistema de predicción de incendios forestales. Se planea continuar las experimentaciones mediante la obtención de imágenes en una amplia variedad de incendios forestales para verificar la aplicabilidad del sistema de predicción usado en el presente trabajo.

8. Referencias

- [1] Joint Research Centre Science for Policy Report. “*Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2016*”, Luxemburgo, Publications Office of the European Union, 2017.
- [2] C.Harris. Climate change blamed as EU’s forest fires more than double [En línea]. Disponible en: <http://www.euronews.com/2017/10/16/how-europe-s-wildfires-have-more-than-trebled-in-2017>. [Accedido: 21-julio-2018].
- [3] IGN. Límites, Superficies y Puntos Extremos | Instituto Geográfico Nacional [En línea]. Disponible en: <http://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geografia/DatosArgentina/LimitesSuperficiesyPuntosExtremos>. [Accedido: 21-julio-2018].
- [4] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Ambiente Bosques [En línea]. Disponible en: <http://bosques.ambiente.gov.ar/geomaps#nacional>. [Accedido: 21-julio-2018].
- [5] Subsecretaría de desarrollo foresto industrial, “*Estadísticas de incendios forestales. Período 2014-2015*”, Buenos Aires, abril 2016.
- [6] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, “*Estadística de incendios forestales 2015*”, Buenos Aires, agosto 2016.
- [7] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, “*Estadística de incendios forestales 2016*”, Buenos Aires, junio 2017.
- [8] Méndez-Garabetti, M., Bianchini, G., Caymes-Scutari, P., & Tardivo, M. L.” *Increase in the quality of the prediction of a computational wildfire behavior method through the improvement of the internal metaheuristic*”. Fire Safety Journal, 82, 49–62 (2016).
- [9] Tardivo, M. L., Caymes Scutari, P., Bianchini, G., & Méndez Garabetti, M. “*Ajuste de parámetros evolutivos para el método paralelo de reducción de incertidumbre ESSIM-DE*”, Libro de Actas XXII CACIC 2016, XXII Congreso Argentino de Ciencias de La Computación, 1, 4-13 (2016).
- [10] Bianchini, G., Caymes-Scutari, P., Méndez-Garabetti, M., & Tardivo, M.L. “*Método de Reducción de Incertidumbre basado en Algoritmos Evolutivos Paralelos orientado a Procesos de Predicción*”. XVII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (2015).
- [11] Bianchini, G., Caymes-Scutari, P., & Méndez-Garabetti, M. “*Evolutionary-Statistical System: A parallel method for improving forest fire spread prediction*”. Journal of Computational Science, 6(1), 58–66. (2015).
- [12] NASA Official: Gleason, J. Joint polar satellite system [En línea]. Disponible en: <https://jointmission.gsfc.nasa.gov/about.html>. [Accedido: 30-julio-2018].
- [13] Ferreyra, A. “*La observación de la Tierra desde el espacio. Un recurso disponible*”. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Pergamino. 57-61. (2016).
- [14] LANDFIRE Program: Home [En línea]. Disponible en: <https://www.landfire.gov/>. [Accedido: 30-julio-2018].
- [15] Brandon M., NASA Official: Frazier, S. MODIS specifications [En línea]. Disponible en: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>. [Accedido: 30-julio-2018].
- [16] NASA Official: Kurtis T., Webmaster: Pearce, S. Curator: Owen, T. MODIS|TERRA [En línea]. Disponible en: <https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/modis>. [Accedido: 05-agosto-2018].
- [17] Digital Globe. *Shortwave-infrared Imaginary Data Sheet*. (2017).
- [18] Edmund Optics Inc. What is SWIR [En línea]. Disponible en: <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/what-is-swir>. [Accedido: 05-agosto-2018].
- [19] NASA web curator: B. Maccherone. MODIS Web [En línea]. Disponible en: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>. [Accedido: 08-agosto-2018].
- [20] Giglio, L. “*MODIS collection 6 active fire product user's guide, revision A. Technical Report*”. University of Maryland, 2015.
- [21] Fuchs, E. M., Stein, E., Strunz, G., Strobl, C., & Frey, C., “*Fire monitoring-The use of medium resolution satellites (AVHRR, MODIS, TET) for long time series processing and the implementation in user driven applications and services*”. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 40 (7W3), 797–804. (2015).
- [22] EOSDIS Worldview [En línea]. Disponible en: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>. [Accedido: 12-agosto-2018].
- [23] Zhang, J. H., Yao, F. M., Liu, C., Yang, L. M., & Boken, V. K., “*Detection, emission estimation and risk prediction of forest fires in China using satellite sensors and simulation models in the past three decades-An overview*”. International Journal of Environmental Research and Public Health, 8(8), 3156–3178. (2011).
- [24] DOXYGEN. GDAL: GDAL - Geospatial Data Abstraction Library [En línea]. Disponible en: <https://www.gdal.org/>. [Accedido: 17-agosto-2018].
- [25] Zúñiga A., Méndez-Garabetti, M., Bianchini, G., Caymes-Scutari, P., & Tardivo, M. L., “*Análisis de Resolución de Mapas de Entrada en Método de Predicción de Incendios Forestales*” (2017).
- [26] La Nación. Una nevada extinguió el fuego en Córdoba - LA NACION [En línea]. Disponible en: <https://www.lanacion.com.ar/1047057-una-nevada-extinguio-el-fuego-en-cordoba>. [Accedido: 18-agosto-2018].
- [27] Secretaría de Ambiente, “*INCENDIOS EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA AGOSTO 2008*”, Córdoba, agosto 2008.
- [28] King-hele,D.G. “*The Orbital Lifetimes of Molniya Satellites*”. ROYAL AIRCRAFT ESTABLISHMENT FARNBOROUGH, Inglaterra, 1975.
- [29] NASA Official, Ichoku, C., Catalog Office Earth Satellite Orbits [En línea]. Disponible en: <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog/page2.php> [Accedido: 06-septiembre-2018].
- [30] Muñoz, C., Acevedo, P., Salvo, S., Fagalde, G., & Vargas, F. . “*Detección de incendios forestales utilizando imágenes NOAA / 16-LAC en la Región de La Araucanía, Chile*”. Bosque, Revistas Electrónicas UACH. 28(2), 119–128. (2007)
- [31] Antonio, J., Camacho, A., & Díaz-ramírez, A.. “*Red de sensores inalámbrica para la detección de incendios forestales*”. Advances in Computing Science. Centro de Investigación en Computación. 107, 73–85. (2015)