

APLICACIÓN DE INFORMACIÓN ESPACIAL A LA PREVENCIÓN DE EMERGENCIAS POR INCENDIOS FORESTALES

Fecha de recepción: 28 de diciembre de 2022

Fecha de aceptación: 28 de febrero de 2023

TCL. Martín Calvo Rey¹

Resumen: *La República Argentina es uno de los países con mayor área afectada por incendios en América Latina. La región montañosa central (Las Sierras de la provincia de Córdoba) es de particular preocupación debido al área quemada, la frecuencia del fuego, el tamaño y distribución de la población humana.*

La información espacial y los Sistemas de Información Geográfica son importantes herramientas para la elaboración de modelos, algoritmos, mapas e índices de peligrosidad y/o probabilidad de incendios.

El presente trabajo de investigación presenta el desarrollo de un Mapa de Probabilidad de Propagación de Incendios (FPPM, por sus siglas en inglés).

Este producto permite el monitoreo de amenazas de incendio en su fase preventiva, facilitando una eficiente gestión y optimización de los recursos por parte de las autoridades responsables del manejo de las emergencias.

Palabras clave: *mapa, incendios, riesgo, sistemas, teledetección.*

APPLICATION OF SPATIAL INFORMATION TO THE PREVENTION OF EMERGENCIAS DUE TO FOREST FIRES

Abstract: *The Argentine Republic is one of the countries with the largest area affected by fires in Latin America. The central mountainous region (Las Sierras de la Provincia de Córdoba) is of particular concern due to the area burned, the frequency of the fire, the size and distribution of the human population.*

Spatial information and Geographic Information Systems are important tools for the elaboration of models, algorithms, maps and indices of fire danger and/or probability.

This research work presents the development of a Fire Propagation Probability Map (FPPM).

This product allows the monitoring of fire threats in their preventive phase, facilitating efficient management and optimization of resources by the authorities responsible for managing emergencies.

Key Words: *map, fires, risk, systems, remote sensing.*

¹ Oficial Ingeniero Militar del Ejército Argentino. Actualmente se desempeña en el Comando Operacional de las Fuerzas Armadas de Argentina. Correo: martincalvorey@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La República Argentina, dada su ubicación y extensión territorial, se encuentra expuesta a distintos tipos de amenazas, siendo las principales: inundaciones, terremotos, erupciones volcánicas, tormentas severas e incendios.

Las consecuencias de los desastres se manifiestan no solo con heridos y muertes humanas, sino también con serios impactos sobre la economía.

En América Latina, las emergencias por incendios forestales tienen vinculación con la alternancia de los fenómenos de La Niña y El Niño, los que generan sequías importantes con las consecuencias de incendios y baja en la producción agrícola, como también inundaciones severas que afectan grandes localidades y población.

La Argentina es uno de los países, en América Latina, con mayor área afectada por incendios (Chuvienco *et al.*, 2008). En la región montañosa central es de particular preocupación, debido al área quemada, la frecuencia del fuego y el tamaño y distribución de la población humana. Por ejemplo, cerca de 2.152.000 hectáreas fueron quemadas en la provincia de Córdoba entre 1993 y 2012, con casi el 95% de las igniciones causadas por el hombre (Argañaraz *et al.*, 2015), (Renda *et al.*, 2017).

Durante el año 2020, se quemaron más de un millón de hectáreas (1.151.931 hectáreas), siendo la provincia de Córdoba la más afectada con un total de 331.676 hectáreas, lo que representa casi el treinta por ciento del total de las 23 provincias de la República Argentina (SNMF, 2020).

Los datos satelitales y sus productos derivados: cobertura de suelo, modelos digitales de elevación, índices de vegetación, datos meteorológicos, etc., están cada vez más disponibles y junto a la teledetección y los sistemas de información geográfica permiten detectar, mapear, monitorear y visualizar aspectos relevantes de la observación de la Tierra, contribuyendo a la mejora de modelos, aplicaciones, mapas, índices y algoritmos, constituyéndose estos en una herramienta fundamental para la toma de decisiones en la gestión de emergencias.

El presente artículo tiene por objeto exponer el desarrollo de un “mapa de probabilidad de propagación de incendios”, que, mediante el registro histórico de ocurrencias de incendios y junto a variables orográficas y fitoclimáticas, faciliten la prevención de incendios forestales.

2. DESARROLLO

Para una mejor comprensión de la temática, a continuación se desarrollan breves conceptos teóricos y definiciones:

Amenaza: factor externo representado por la posibilidad que ocurra un fenómeno o un evento adverso, en un momento y lugar específico, con una magnitud determinada y que podría ocasionar daños a las personas, a la propiedad, la pérdida de medios de vida, y trastornos sociales, económicos y ambientales.

Desastre: interacción entre una amenaza y una población vulnerable que, por su magnitud, crea una interrupción en el funcionamiento de una sociedad y/o sistema a partir de una desproporción entre los medios necesarios para superarla y aquellos medios a disposición de la comunidad afectada.

Emergencia: es una situación, un daño provocado por un evento adverso de origen natural o provocado por los seres humanos que, por su magnitud, puede ser atendida por los medios disponibles localmente.

Peligro: capacidad potencial de causar daño que tiene una amenaza.

Prevención: acciones dirigidas a eliminar el riesgo, ya sea evitando la ocurrencia del evento o impidiendo los daños.

Riesgo: probabilidad de que una amenaza produzca daños al actuar sobre una población vulnerable.

Vulnerabilidad: factor interno de una comunidad o sistema. Características de la sociedad acorde a su contexto que la hacen susceptible de sufrir un daño o pérdida grave en caso de que se concrete una amenaza.

Incendio forestal: cualquier fuego que se extiende sin control en terreno forestal, afectando vegetación que no estaba destinada a arder.

2.1. Incendios

¿Qué es el fuego?

El fuego es un fenómeno físico-químico que se caracteriza por el desprendimiento de luz y calor, producido por la combustión de un cuerpo. Para que el proceso de la combustión se inicie y pueda continuar deben estar presentes, manteniendo entre sí una adecuada proporción, tres elementos: combustible, oxígeno y calor (SNMF, 2021).

Para el caso de los incendios forestales se considera combustible todo material de origen vegetal, independientemente de su estado, condición o ubicación.

¿Qué es un incendio forestal?

Es un fuego que se propaga libremente con efecto no deseado para la vegetación y sin estar sujeto a control humano (SNMF, 2021).

¿Cuáles son las variables del comportamiento del fuego?

Las variables del comportamiento del fuego son: la velocidad de propagación, la longitud y altura de llama, la intensidad, la distancia de propagación, el área, el perímetro, la forma, la ocurrencia de focos secundarios, el coronamiento en incendios de bosques, y todos aquellos descriptores que caracterizan cada incendio.

¿Qué factores afectan a las variables de comportamiento del fuego?

Tanto las acciones del hombre en las tareas de control, como los factores ambientales en el entorno del incendio, influyen en el comportamiento del fuego. Los factores ambientales más importantes se resumen en el Triángulo del Comportamiento del Fuego: meteorología, topografía y combustible.

2.2. Teledetección

La teledetección es la disciplina que permite, por medio de la observación remota y utilizando como parámetro físico la radiación, obtener información de la Tierra. Esos datos obtenidos, debidamente procesados, permiten obtener y generar una variedad de productos que sirven para distintos fines de las ciencias de la Tierra. Los sensores remotos, montados en las plataformas satelitales, son los encargados de recolectar los datos espaciales que la ciencia ha ido necesitando y desarrollando para un mejor conocimiento de la Tierra.

La idea de predecir incendios se basa en el conocimiento y observación de ciertas variables que influyen directamente en estos, las que pueden ser del tipo estáticas o dinámicas. Las variables estáticas corresponden a datos que no varían mucho en el tiempo, como son:

- La topografía (orientación, pendiente, disposición).
- La frecuencia o predisposición a incendio (registros de áreas quemadas).
- El clima y su vegetación (fitoclima).

En tanto que las dinámicas son datos que varían incluso diariamente, como:

- La meteorología (temperatura, viento, humedad, precipitaciones).
- La radiación solar.
- La cobertura vegetal (su estado fenológico, la humedad retenida y su evapotranspiración).

Si podemos medir estas variables (estáticas y dinámicas), podremos conocer su interacción y predecir más eficientemente el riesgo de incendio, sin omitir lo remarcado, que más del

90% de los incendios tiene orígenes antrópicos, siendo el humano la amenaza de riesgo de incendio.

2.3. Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica, más conocidos por sus siglas en inglés, GIS, son gestores de la información que se encuentra georreferenciada, y son estos sistemas, alimentados con la información espacial que le puede otorgar la teledetección, los que le permiten a los investigadores y profesionales de la temática poder desarrollar sus capacidades profesionales y ampliar las fronteras del conocimiento de las ciencias ambientales y de la Tierra. La integración de estas dos herramientas tecnológicas facilita mejorar la gestión de riesgos y emergencias ambientales

Existen en la actualidad una gran variedad de sistemas de gestión de riesgos, índices, algoritmos y modelos que facilitan la gestión del riesgo de incendios en sus distintas fases. El FPPM es un producto derivado del sistema Space-Based Information Support for Prevention and Recovery of Forest Fires Emergency in the Mediterranean Area (PREFER), desarrollado por el Earth Observation Satellite Images Applications Lab (EOSIAL) e implementado para el área de estudio seleccionado (provincia de Córdoba).

2.4. Área de Estudio

Se seleccionó como área de estudio la provincia de Córdoba (figura N° 1) por su frecuencia anual de incendios forestales y por sus características fitoclimáticas. Para efectos de facilitar los tiempos de ejecución, la misma fue acotada al área que cubre un tile del sensor MODIS: (h12, v12) (figura N° 2), que corresponde a toda la provincia, exceptuando una pequeña parte al norte de esta.

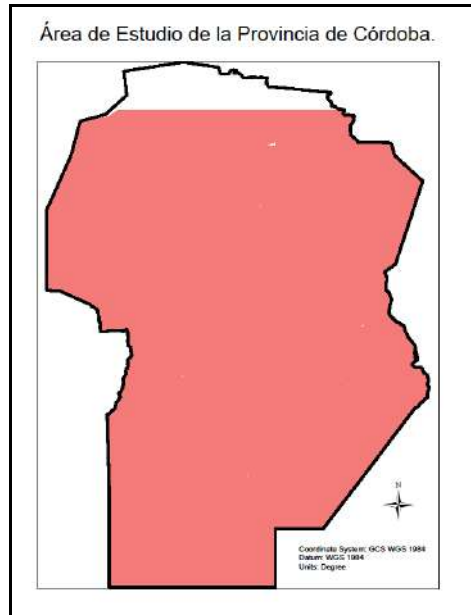


Figura N° 1: Área de estudio (provincia de Córdoba).
Fuente: Elaboración propia.

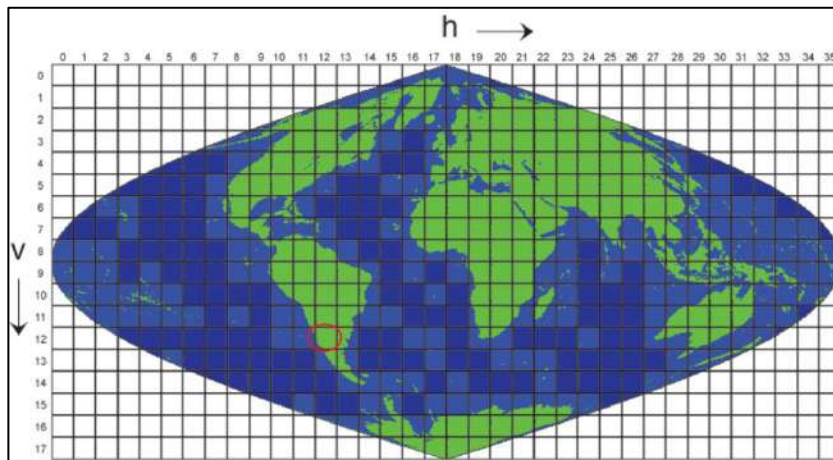


Figura N° 2: Tiles (H12, V12) correspondiente al sensor MODIS.
Fuente: MODIS Land Science Team.

2.5. Materiales

Para obtener el Mapa de Probabilidad de Propagación de Incendios en adelante FPPM por su sigla en inglés (Fire Propagation Probability Map), es necesario contar con los siguientes datos geoespaciales:

Datos satelitales/crudos:

- Datos climáticos (precipitaciones y temperaturas medias para un periodo determinado).

Datos vectoriales:

- Cobertura de suelo (land cover) del área de estudio, con una resolución espacial superior a 250 m.
- Red vial del área de estudio.
- Registro de las áreas quemadas de un periodo de 10 años (2002 al 2011), correspondiente al área de estudio.

Datos raster:

- Modelo de elevación digital (DEM), con una resolución espacial óptima de 30 m.
- NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), máximos y mínimos históricos (a 10 años) del área de estudio.

2.6. Elaboración del Mapa de Probabilidad de Propagación de Incendio (FPPM):

El FPPM es un mapa estático de riesgo de incendio, con una resolución media (250 m) y que tiene en cuenta la distribución estadística de incendios en un periodo de 10 años. Posee una combinación de factores naturales estáticos como: mapa de combustible, modelo de elevación digital con sus pendientes y orientación (*Slope, Aspect*), mapa fitoclimático y la red vial. La importancia de este mapa radica en su elaboración actualizada anualmente (cobertura de suelo y registro de áreas quemadas recientes), antes del periodo de incendios, lo que facilitaría poder predecir los lugares de incendios más frecuentes y así poder optimizar los escasos recursos y dirigir los esfuerzos hacia determinadas áreas específicas. La complejidad de este mapa resulta en la falta de datos y en la dificultad para generarlos y/u obtenerlos de fuentes de datos oficiales.

2.7. Diagrama de flujo

A continuación, se presenta un diagrama de flujo (figura N° 3) para una mejor interpretación del método desarrollado para la obtención del FPPM.

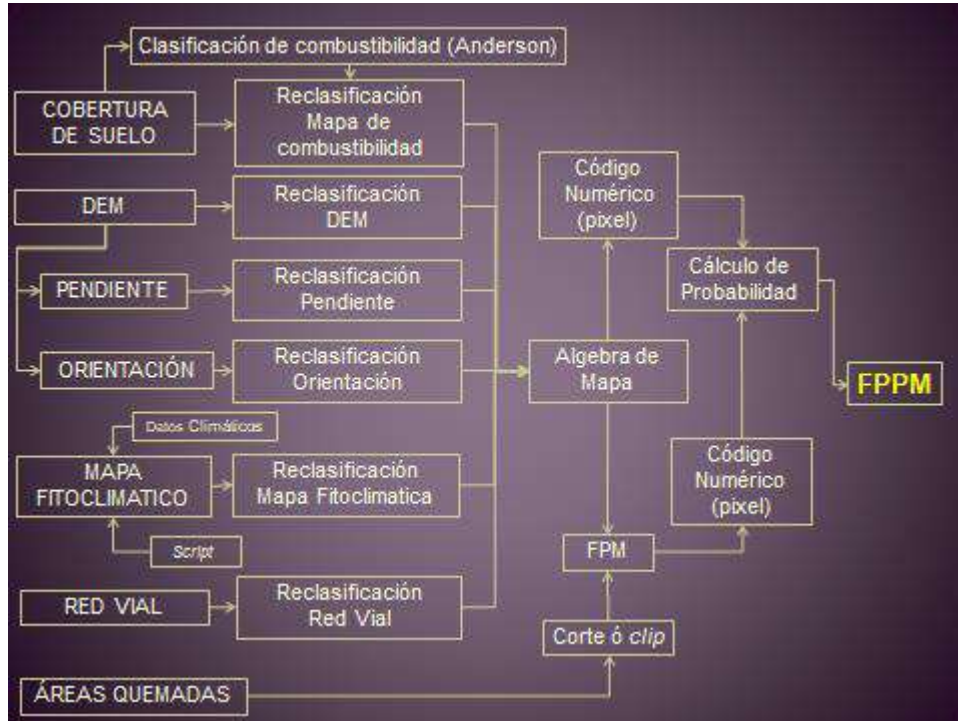


Figura N° 3: Diagrama de flujo para la obtención del FPPM.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar en el diagrama del flujo la necesidad de contar u obtener los datos de entrada necesarios, a saber:

- Cobertura de suelo (*land cover*) - Mapa de combustibilidad (*fuel map*)
- Dem (modelo de elevación digital)
- Pendiente (*slope* del DEM)
- Orientación (aspect del DEM)
- Mapa fitoclimático (*fitoclimatic map*)
- Red vial (road red)
- Áreas quemadas (*burned area*)

Una vez obtenidos los datos de entrada, se deben generar los procesos necesarios para que todos estén en el mismo sistema de proyección: Universal Transversal de Mercator (UTM), zona 20 sur, y con la misma resolución espacial. A continuación, se procede a aplicarles una reclasificación específica a todos los datos de entrada con excepción de las áreas quemadas, de acuerdo con sus características particulares, obteniendo así un código numérico que identifica las propiedades de cada uno de ellos. El detalle de esta reclasificación es desarrollado más adelante (tablas N° 1 a N° 6). Luego se procede a realizar un análisis espacial, que consiste en hacer una sumatoria de las capas de cada reclasificación generada, mediante un álgebra de mapa, obteniendo así el Mapa de Propagación de Incendio, identificado por su sigla en inglés FPM (Fire Propagation Map). Este producto tiene la

particularidad de que cada pixel posee un código numérico, donde cada número de ese código identifica la características específicas de cada dato de entrada. Una vez obtenido el FPM, se realiza un geoproceso de corte (clip) del FPM con cada uno de los registros vectoriales históricos (10 años) de las áreas quemadas, obteniendo así los códigos numéricos correspondientes a los pixeles que fueron quemados por incendios. Finalmente, se realiza un cálculo de probabilidad con los pixeles del mapa que tienen el mismo código numérico que los pixeles que fueron quemados en el periodo de registro (10 años), generando así el FPPM propuesto (figura N° 4).

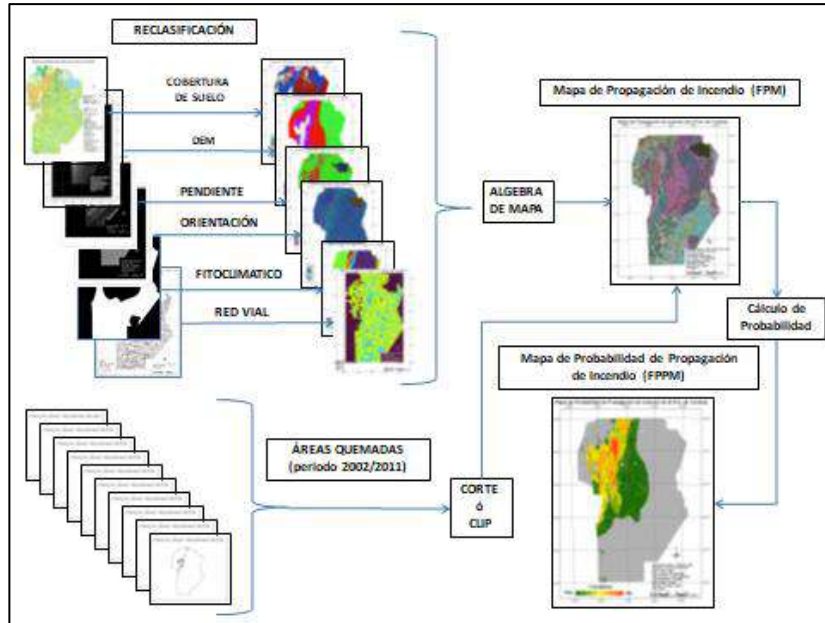


Figura N° 4: Proceso para la obtención del FPPM.
Fuente: Elaboración propia.

2.8. Proceso de obtención y/o generación de los datos de entrada

A continuación, se desarrollan los procesos de obtención y/o generación de las capas de entrada necesarias para el cálculo del FPPM.

- **Obtención del Mapa de Combustibilidad**

Este producto se realizó mediante una cobertura de suelo del área de estudio, mediante un archivo vectorial que en sus atributos cuenta con una clasificación de los tipos de coberturas y su descripción (figura N° 5 y N° 6).

FID	Shape *	UNION	TIPO	
1	Polygon	100000040	MEDANO, DUNA.	ACUMULACION DE ARENA SUELTA, NO SIEMPRE CERCA Y A NIVEL
2	Polygon	100000000	ESPEJO DE AGUA.	SUPERFICIE CUBIERTA CON AGUA DE ORIGEN NATURAL O ARTIFIC
3	Polygon	100000240	BOSQUE, SELVA, FORESTA, PARQUE NATURAL INTRANSITABLE	TERRENO CUBIERTO DE ARBOLES DE DIFERENTES ESPECIES PER
4	Polygon	100000250	BOSQUE, SELVA, FORESTA, PARQUE NATURAL TRANSITABLE	TERRENO CUBIERTO DE ARBOLES DE DIFERENTES ESPECIES PER
5	Polygon	100000030	AFLORAMIENTO ROCOSO	MANIFESTACION SUPERFICIAL DE ESTRATOS, FILON O MASA DE C

Figura N° 5: Atributos de la cobertura de suelo del IGN.

Fuente: Elaboración propia.

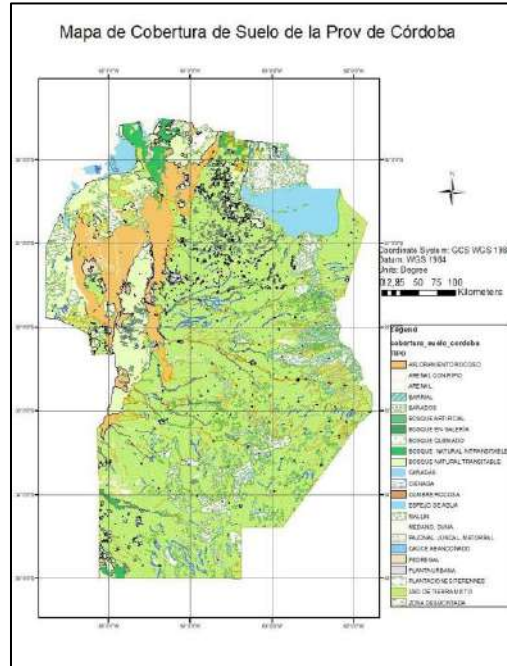


Figura N° 6: Mapa de Cobertura de Suelo de la provincia de Córdoba.
Fuente: Elaboración propia.

Se le agregó un atributo más, a la que se le asignó la correspondiente clasificación de combustibilidad de Anderson (Anderson, 1982) (figura N° 7).

Fuente Anderson 1982: Ayudas para determinar modelos de combustible para estimar el comportamiento del fuego.

Grupos de Combustible	Modelo de Combustible	Tipo de combustible complejo	Carga de Combustible (Tons/Hec)				Profundidad del lecho de combustible (m)	Humedad de extinción combustibles muertos (%)
			1h	10h	100h	live		
Pastizales	1	Pastos finos, secos y bajos (<30 cm)	1,83	0,00	0,00	0,00	0,30	12
	2	Pastizal en superficies	4,94	2,47	1,24	1,24	0,30	15
	3	Pastos altos (< 1m)	7,44	0,00	0,00	0,00	0,76	25
Arbustos o Matorrales	4	Matorral o arbusto (<2 m)	12,38	9,91	4,94	12,38	1,83	20
	5	Matorral (< 60cm)	2,47	1,24	0,00	4,94	0,61	20
	6	Matorral añoso (0,6m a 1,2 m)	3,71	6,18	4,94	0,00	0,76	25
Hojarascas	7	Matorral (1,2m a 2m)	2,79	4,62	3,71	0,91	0,76	40
	8	Hojarasca sobre bosque denso	3,71	2,47	6,18	0,00	0,06	30
	9	Hojarascas en superficie	7,22	1,01	0,37	0,00	0,06	25
	10	Hojarasca (en superficie y denso)	7,44	4,94	12,38	4,94	0,30	25
Ramas	11	Restos de ramas ligeras	3,71	11,14	13,62	0,00	0,30	15
	12	Restos de ramas mas pesadas	9,91	34,67	40,85	0,00	0,70	20
	13	Grandes acumulaciones de restos gruesos de	17,32	56,93	69,31	0,00	0,91	25

Figura N° 7: Modelos de combustibilidad de Anderson.
Fuente: Elaboración propia.

Con los datos de la cobertura de suelo y los modelos de combustible, podemos obtener un modelo de combustible asociado al ecosistema del área de estudio, como se ilustra en las

figuras N° 8 y N° 9. Este es un paso crítico en el estudio del patrón matemático del comportamiento del fuego.

FID	Shape *	UNION	TIPO	DESCRIPCIO	TC	ANDERSON
0	Polygon	10000024000	BOSQUE, SELVA, FORESTA, PARQUE NATURAL INTRANSITABLE	TERRENO CUBIERTO DE ARBOLES DE DIFERENTES ESPECIES PERENNES	0	7
1	Polygon	10000004000	MEDANO, DUNA.	ACUMULACION DE ARENA SUELTA, NO SIEMPRE CERCA Y A NIVEL DEL	0	0
2	Polygon	10000000000	ESPEJO DE AGUA.	SUPERFICIE CUBIERTA CON AGUA DE ORIGEN NATURAL O ARTIFICIAL.	0	0
3	Polygon	10000024000	BOSQUE, SELVA, FORESTA, PARQUE NATURAL INTRANSITABLE	TERRENO CUBIERTO DE ARBOLES DE DIFERENTES ESPECIES PERENNES	0	7
4	Polygon	10000025000	BOSQUE, SELVA, FORESTA, PARQUE NATURAL TRANSITABLE.	TERRENO CUBIERTO DE ARBOLES DE DIFERENTES ESPECIES PERENNES	0	4
5	Polygon	10000003000	AFLORAMIENTO ROCOSO.	MANIFESTACION SUPERFICIAL DE ESTRATOS, FILON O MASA DE CUAL	0	2
6	Polygon	10000003000	AFLORAMIENTO ROCOSO.	MANIFESTACION SUPERFICIAL DE ESTRATOS, FILON O MASA DE CUAL	0	2
7	Polygon	10000043000	USO DE TIERRA MIXTO (16 + 28).	AREA CON CULTIVOS DIVERSOS COMO CEREALES, PASTURAS Y SILV	0	3
8	Polygon	10000024000	BOSQUE, SELVA, FORESTA, PARQUE NATURAL INTRANSITABLE	TERRENO CUBIERTO DE ARBOLES DE DIFERENTES ESPECIES PERENNES	0	7
9	Polygon	10000025000	BOSQUE, SELVA, FORESTA, PARQUE NATURAL TRANSITABLE.	TERRENO CUBIERTO DE ARBOLES DE DIFERENTES ESPECIES PERENNES	0	4
10	Polygon	10000040000	BAÑADOS.	TERRENO ANEGADO QUE CONTIENE AGUA DURANTE TODO EL AÑO. E	0	0
11	Polygon	10000035000	ZONA DESMONTADA.	AREAS DE BOSQUE O FORESTA QUE FUERON ELIMINADAS PARCIAL O	0	11
12	Polygon	10000005000	ARENAL.	SUELO CONSTITUIDO DE ARENA SUELTA. SUS CONDICIONES PARA EL	0	0

Figura N° 8: Clasificación de combustibilidad.

Fuente: Elaboración propia.

Luego se transformó el archivo vectorial en archivo raster, con la nueva clasificación y se reproyectó al sistema geográfico UTM correspondiente y con resolución espacial de 30 m.

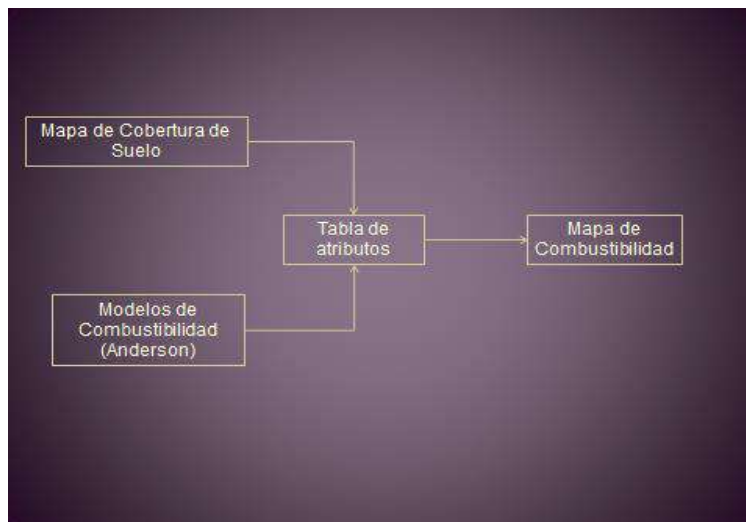


Figura N° 9: Diagrama de proceso de obtención del Mapa de Combustibilidad.

Fuente: Elaboración propia.

- **Obtención del DEM (Modelo de Elevaciones Digital)**

Se generó un mosaico que abarque la provincia de Córdoba con imágenes descargadas del Earth Explorer (USGS, 2022), perteneciente al Servicio Geológico de Estados Unidos, con datos de elevación que ofrece el SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de 1 segundo de arco (30 m, aproximadamente) (figura N° 10).

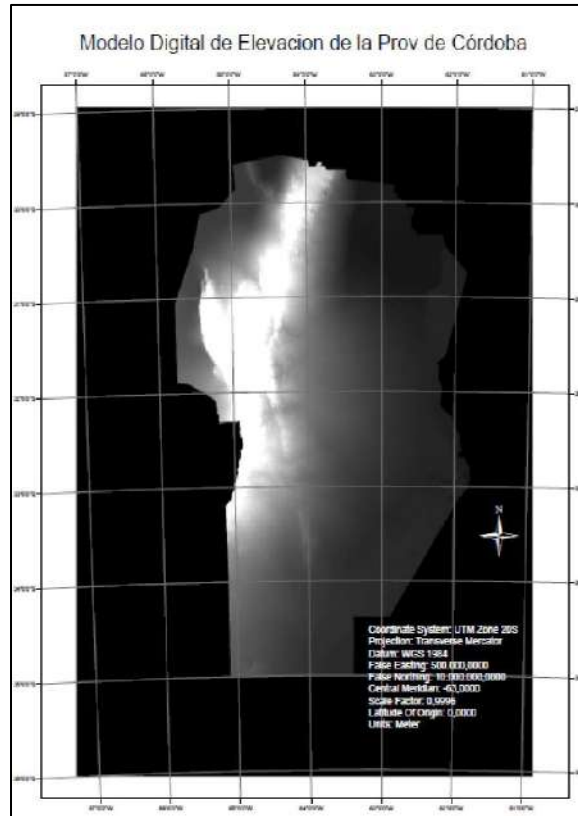


Figura N° 10: Modelo de elevación digital de la providencia de Córdoba.
Fuente: Elaboración propia.

- **Generación de la pendiente (*slope*) del DEM:**

Una vez obtenido el mosaico del DEM del área de estudio, se procedió a generar, también con el *software* ENVI 5.0, el *slope*, aplicando un *kernel* de valor 2 (figura N° 11).

El *slope* representa el cambio de elevación a lo largo de una distancia determinada.

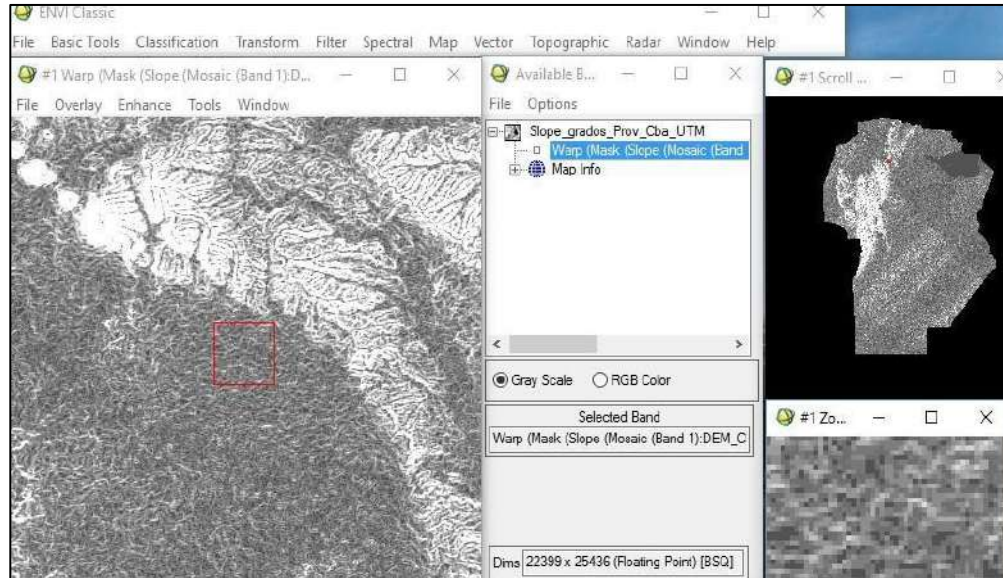


Figura N° 11: Generación del slope.

Fuente: Elaboración propia.

- **Generación de la orientación (*aspect*) del DEM**

También se generó el *aspect* con el mosaico del DEM obtenido, utilizando como herramienta el *software* ENVI 5.0 y aplicando un *kernel* de valor 2 (figura N° 12).

El *aspect* es la dirección de la brújula hacia la que se enfrenta una pendiente. Los valores oscilan entre 0 (Norte) y 360 grados, aumentando en sentido horario.

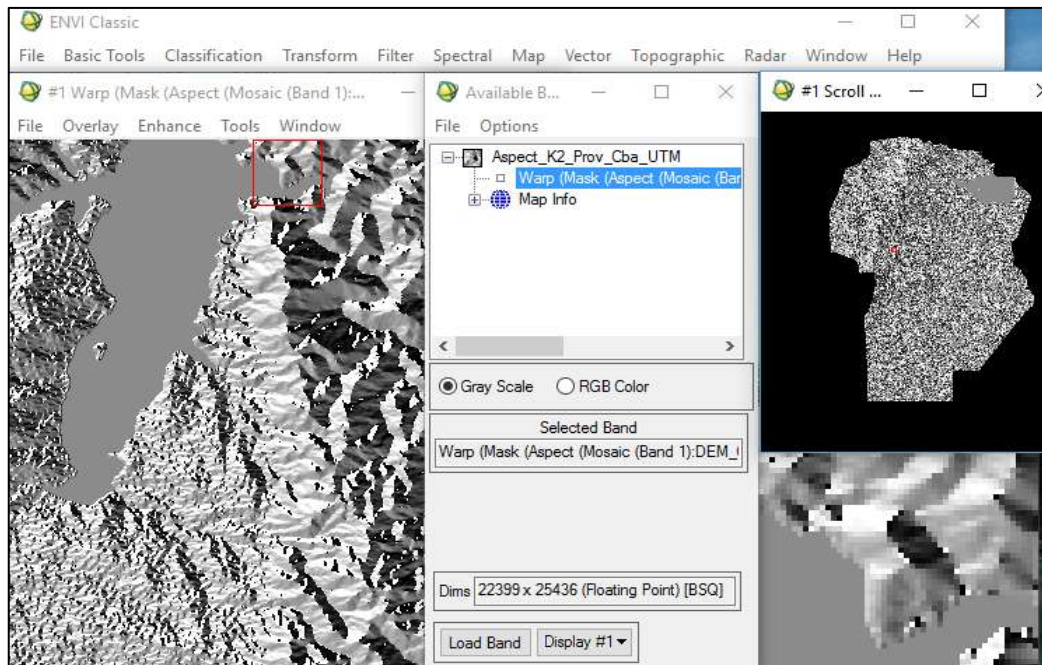


Figura N° 12: Generación del *aspect*.

Fuente: Elaboración propia.

- **Obtención del mapa fitoclimático**

El mapa fitoclimático nos aporta datos de distribución geográfica asociados a datos climáticos. De esta forma, relaciona a una región geográfica a través de la vegetación representativa del lugar con los datos climáticos de un periodo no menor a diez años (temperatura mínima, máxima y media, precipitaciones medias) obteniendo así zonas o regiones fitoclimáticas, que luego reclasificaremos para aportar al FPPM las variables relacionadas de: temperatura media y precipitación media, incidentes en la propagación de incendios.

Este producto fue generado a partir de datos meteorológicos de 10 años, obtenidos del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), instituto de investigación que produce predicciones meteorológicas numéricas globales.

- **Obtención de la red vial (*road red*)**

Se procedió a descargar de la página *web* del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2022), la red vial correspondiente a la provincia de Córdoba (figura N° 13).

Con este producto, lo que se busca es darle la incidencia que provocan los caminos al acceso de la población a las sierras, bosques, reservas y demás lugares que suelen sufrir incendios como consecuencia del esparcimiento, negligencia y accidentes. Esta cobertura de caminos permite identificar todas las vías y también clasificarlas por su tipo: consolidados, pavimentado, tierra.

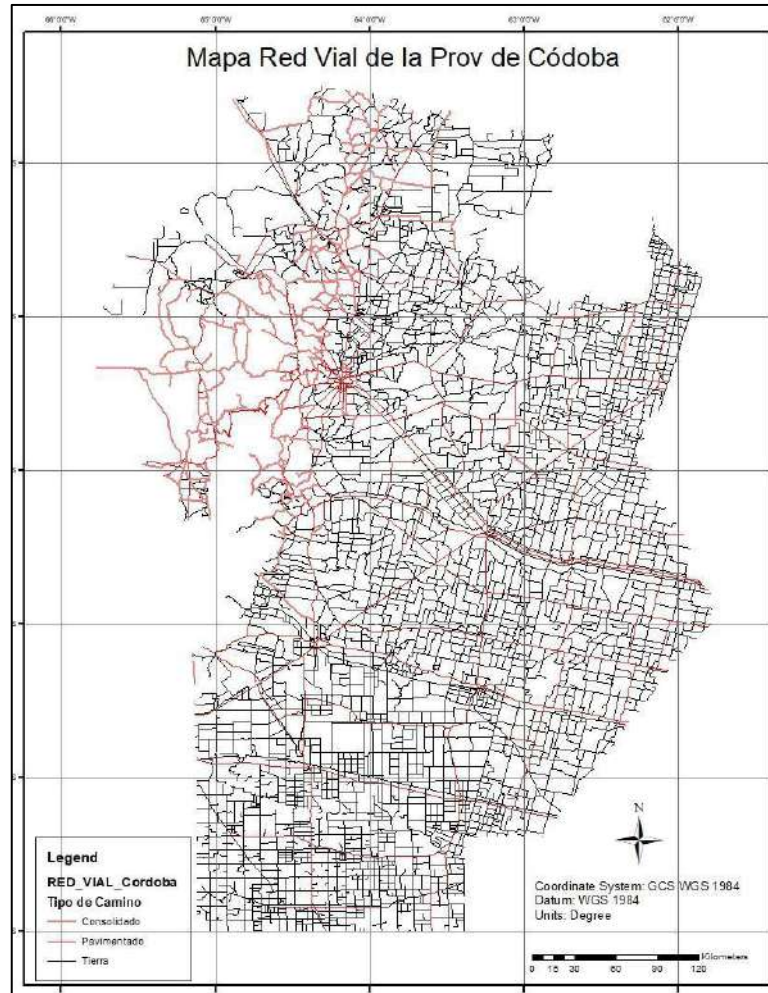
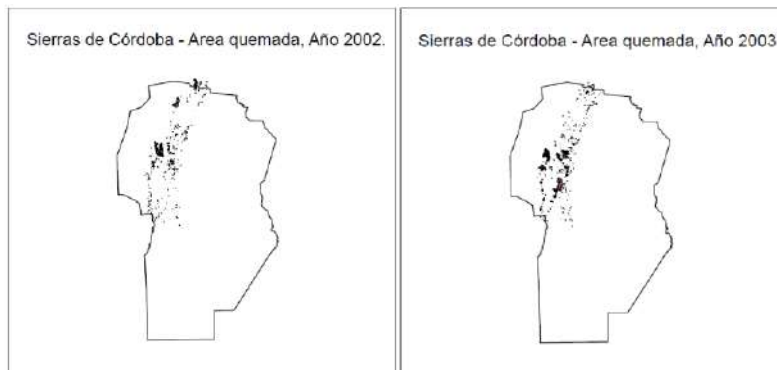


Figura N° 13: Mapa de la red vial de la provincia de Córdoba.
Fuente: Elaboración propia.

- **Obtención de los polígonos de áreas quemadas**

Para el desarrollo del FPPM es necesario contar con un registro de los polígonos de las áreas quemadas de los últimos 5 o 10 años. Con este registro se hace el cálculo de probabilidad. Para este trabajo se procedió a utilizar el registro de áreas quemadas correspondiente al periodo de diez años que van del 2002 al 2011.



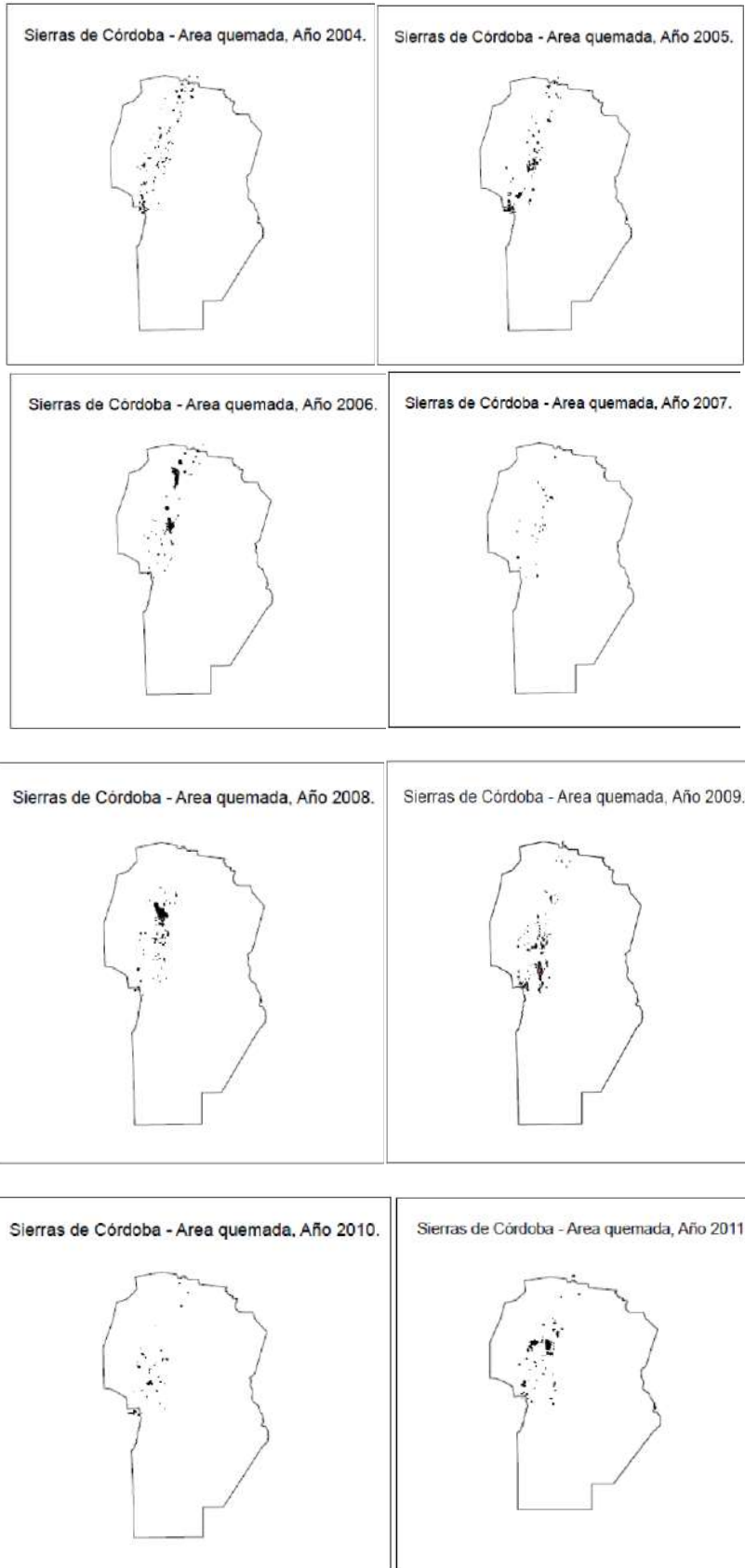


Figura N° 14: mapas de las áreas quemadas en las Sierras de Córdoba, período 2002 al 2011.
Fuente: Elaboración propia.

2.9. Proceso de reclasificación

Una vez obtenidos todos los datos de entradas bajo un mismo sistema de proyección y resolución espacial, se procedió a reclasificarlos, asignándoles un valor numérico específico que permita luego, a través de un algebra de raster, poder generar un código numérico de seis dígitos, donde cada dígito se relaciona con una clase del dato geoespacial de entrada (datos de entrada), (figura N° 15).

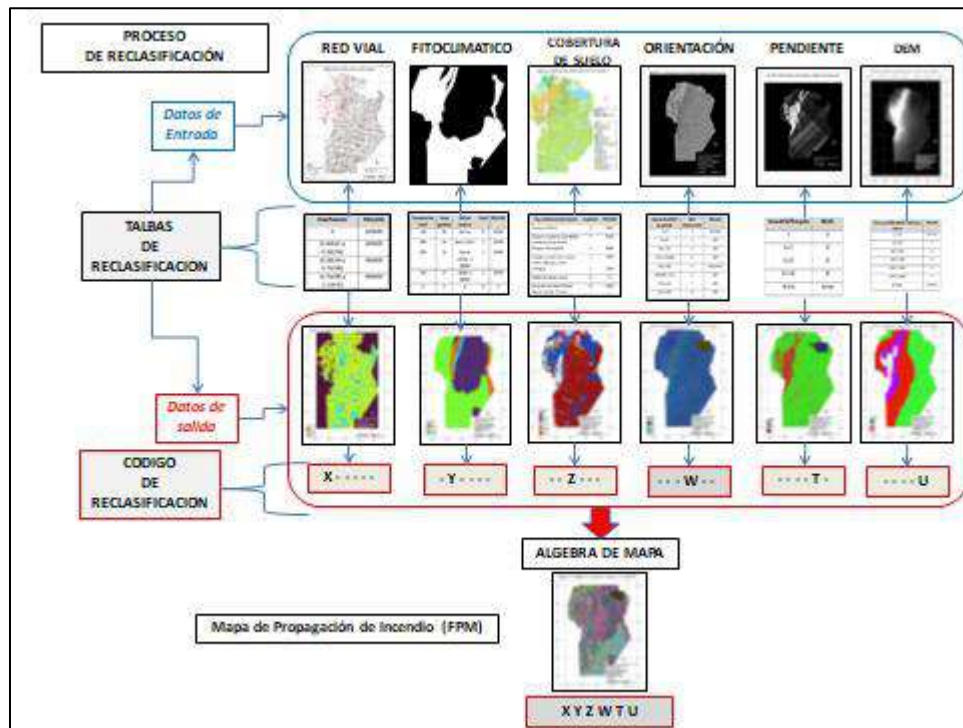


Figura N° 15: Proceso de reclasificación.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se explicitan los valores dados a cada variable de entrada y su posición relativa en el código:

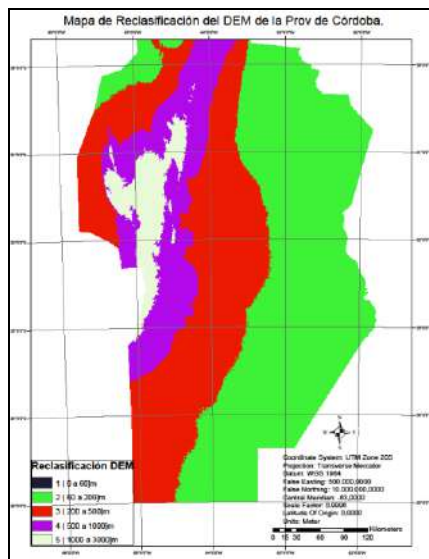
- DEM: valores numéricos con un dígito, correspondientes al sexto dígito del código generado.
- Pendiente: valores numéricos con dos dígitos, correspondientes al quinto dígito del código generado.
- Orientación: valores numéricos con tres dígitos, correspondientes al cuarto dígito del código generado.

- Mapa de combustible: valores numéricos con cuatro dígitos, correspondientes al tercer dígito del código generado.
- Mapa fitoclimático: valores numéricos con cinco dígitos, correspondientes al segundo dígito del código generado.
- Red vial: valores numéricos con seis dígitos, correspondientes al primer dígito del código generado.

Para la reclasificación de las distintas capas de entrada, se utilizó el mismo criterio aplicado por los desarrolladores del sistema PREFER para la zona del Mediterráneo, por considerar que existe una similitud en los rasgos geográficos.

- Reclasificación del DEM

Obtenido el mosaico del DEM de la provincia de Córdoba, se procedió a darle la siguiente reclasificación utilizando las herramientas del Arc Gis (tabla N° 1), obteniendo el Mapa de Reclasificación del DEM (figura N° 16).



Valores del DEM (DESDE - HASTA) en metros	RECLASIFICACIÓN
[-5 a 0]	Sin dato
(0 a 60]	1
(60 a 200]	2
(200 a 500]	3
(500 a 1000]	4
(1000 a 3000]	5
Sin dato	Sin dato

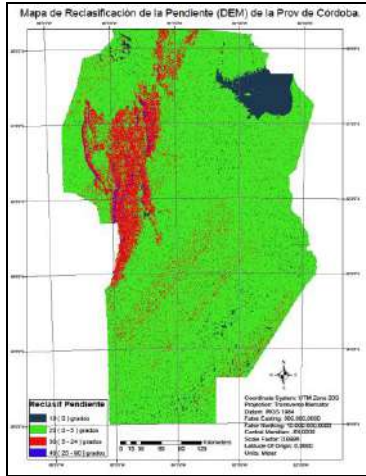
Figura N° 16: Mapa de Reclasificación del DEM.

Tabla N° 1: Reclasificación del DEM del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

- Reclasificación de la pendiente

Ver tabla N° 2 y figura N° 17



Valores de Pendiente en grados	RECLASIFICACIÓN
0	10
(0 a 5]	20
(5 a 25]	30
(25 a 90]	40
No Data	Sin dato

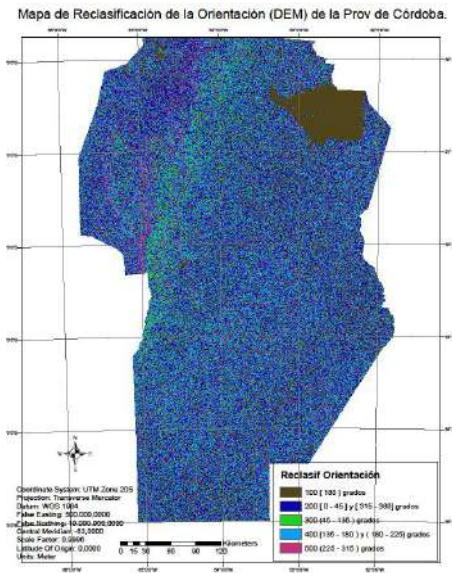
Figura N° 17: Mapa de Reclasificación de la Pendiente (DEM).

Tabla N° 2: Reclasificación de la pendiente del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

- **Reclasificación de la orientación**

Ver tabla N° 3 y figura N° 18.



Valores de la Orientación (en grados)	RECLASIFICACIÓN
-5 a 0	Sin dato
0 a 45	200
45 a 135	300
135 a 179,999	400
180 a 180	100 (plano)
180,0001 a 225	400
225 a 315	500
315 a 360	200

Figura N° 18: Mapa de Reclasificación de la Orientación (DEM).

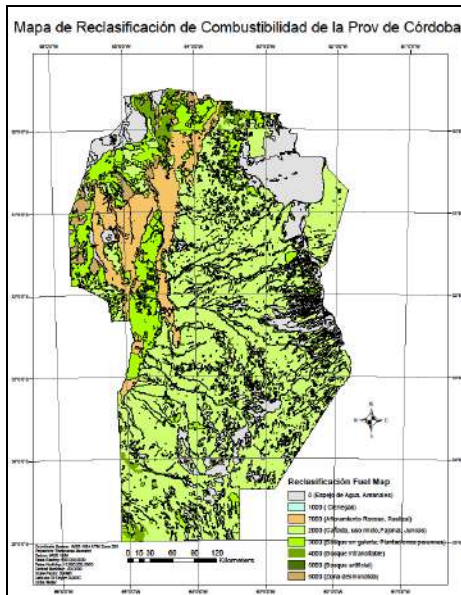
Tabla N° 3: Reclasificación de la orientación del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

- **Reclasificación del Mapa de Combustibilidad**

Una vez obtenido el Mapa de Combustibilidad o *Fuel Map*, con la clasificación de combustibilidad (Anderson, 1982), se procedió a su reclasificación utilizando la herramienta de Arc Gis (*reclass*). Para su reclasificación no fue necesario un orden estricto o

convencional. A continuación, se describe el orden que se le asignó (tabla N° 4) y el producto obtenido (figura N° 19).



Tipo cobertura/descripción	Anderson	RECLASIFICACIÓN
Bosque artificial o cultivado	9	5000
Bosque en galería, transitable, plantaciones perennes	4	3000
Bosque intransitable	7	4000
Cañada, uso de tierra mixto, mallín, pajonal, juncal	3	2000
Ciénagas	1	1000
Espejo de aguas, arenales, dunas	0	0
Zona desmontada (Restos ligeros con $\varnothing < 7,5$ cm)	11	6000
Afloramiento rocoso, pastizal	2	7000

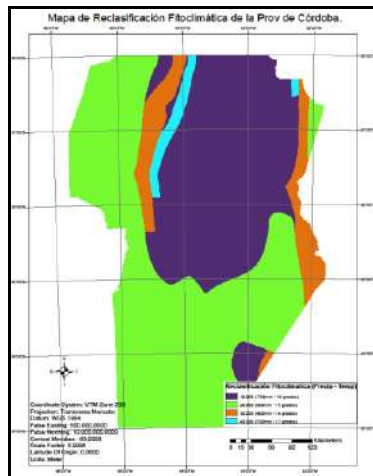
Figura N° 19: Mapa de Reclasificación de Combustibilidad.

Tabla N° 4: Reclasificación del Mapa de Combustibilidad del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

- **Reclasificación del Mapa Fitoclimático**

Una vez facilitado el Mapa Fitoclimático, se procedió a realizar un análisis del mismo teniendo en cuenta como parámetros: las precipitaciones medias y la temperatura media. Como resultado de este análisis, surgió la siguiente clasificación y reclasificación (figura N° 20 y tabla N° 5):



Precipitación (mm)	Temperatura (grados)	Clasificación	RECLASIFICACIÓN
700	18	0	10000
800	19	1	20000
900	16	2	30000
750	17	3	40000
0	0	0	0

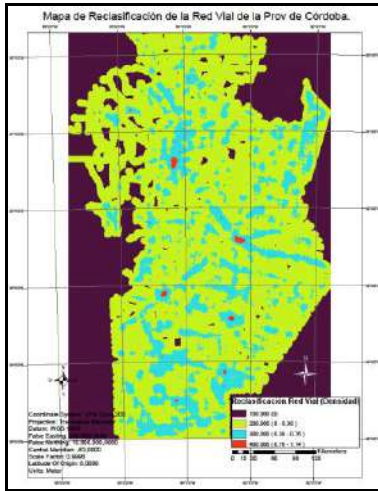
Figura N° 20: Mapa de Reclasificación Fitoclimática.

Tabla N° 5: Reclasificación del Mapa Fitoclimático del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

- **Reclasificación de la red vial**

Una vez obtenida la red vial correspondiente a la provincia de Córdoba, mediante un análisis espacial del *software* Arc Gis, se realizó un procesamiento *density line*. Esta herramienta permite calcular la densidad de líneas (caminos) por unidad de área, obteniendo así un producto que facilita el cálculo de incidencia de la variable (red vial). (Ver tabla N° 6 y figura N° 21).



Clasificación (Km^2)	RECLASIFICACIÓN
0	100000
(0.00001 a 0.38144]	200000
(0.38144 a 0.76288]	300000
(0.76288 a 1.14432]	400000

Figura N° 21: Mapa de Reclasificación de la Red Vial.

Tabla N° 6: Reclasificación del Mapa de Red Vial del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

- **Generación del FPM**

Una vez reclasificados todos los datos de entrada necesarios, en donde cada archivo posee asociada una tabla de atributos con la cantidad de píxeles correspondiente a la clasificación asignada, se procedió a realizar el siguiente análisis espacial: mediante álgebra de raster (sumatoria de capas: reclasificación del DEM + reclasificación de la pendiente + reclasificación de la orientación + reclasificación del Mapa de Combustibilidad + reclasificación del Mapa Fitoclimático + reclasificación de la red vial) se obtiene un nuevo producto: FPM, (figura N° 22).

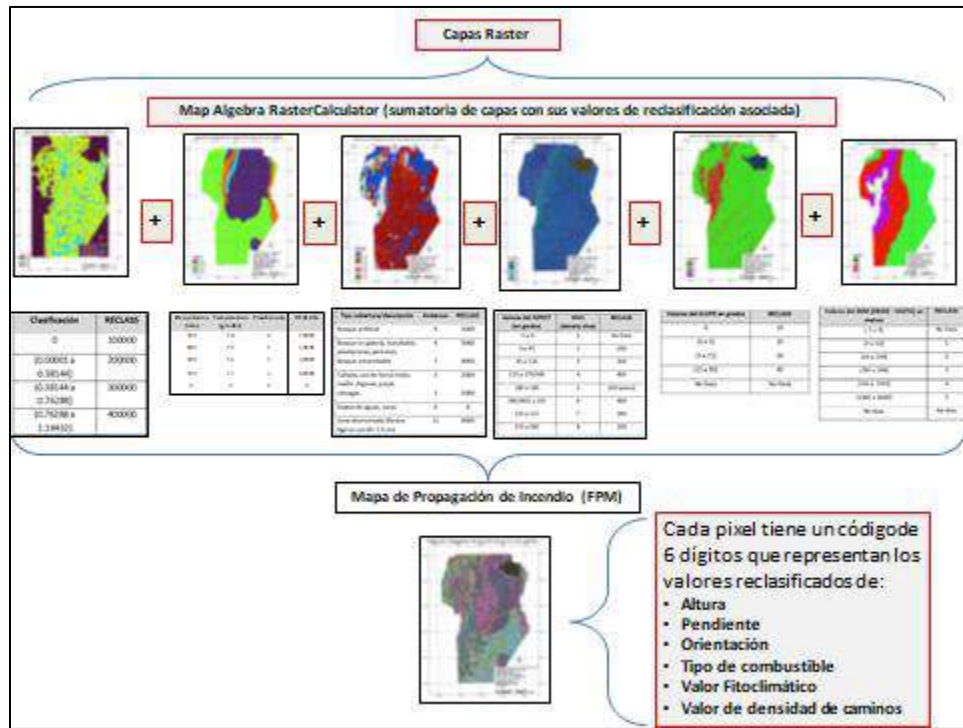


Figura N° 22: Generación del Mapa de Propagación de Incendio.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenido el FPM, se procede a hacer un recorte (*clip*) con cada polígono de las áreas quemadas, correspondiente a un registro de diez años del periodo (2002 al 2011). La finalidad de este paso es obtener la tabla asociada correspondiente al área quemada para luego trabajar con estas tablas (datos de los pixeles quemados) en un estudio de probabilidad, (figura N° 23). Fue así que se obtuvieron diez archivos correspondientes a los cortes o *clips* desde el año 2002 al año 2011.

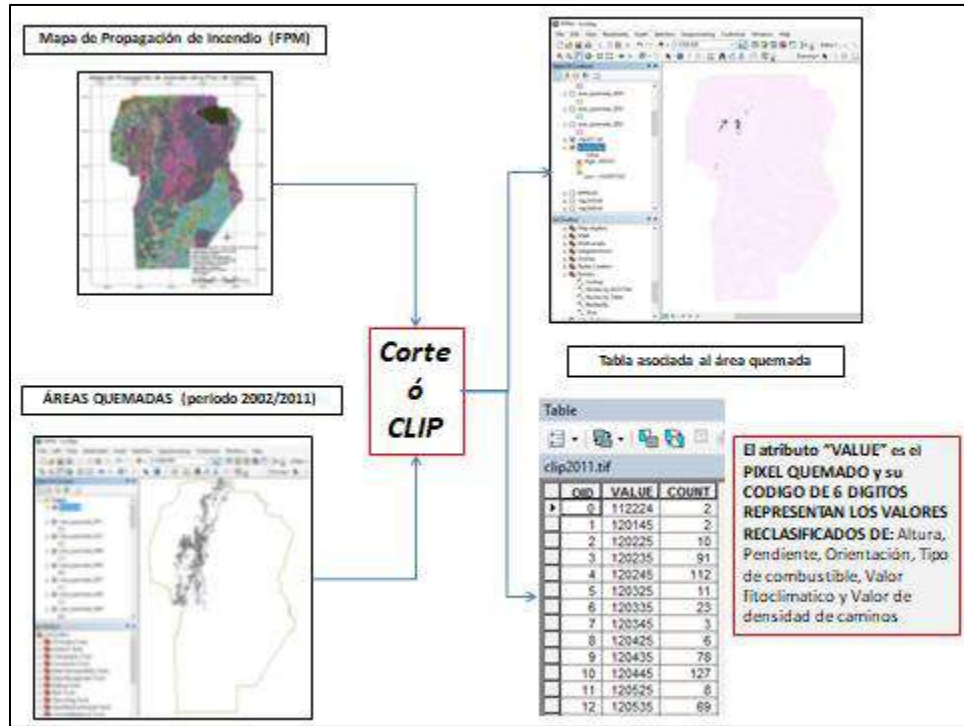


Figura N° 23: Obtención de las áreas quemadas.

Fuente: Elaboración propia.

- **Cálculo de la probabilidad y obtención del FPPM**

Obtenidas las tablas asociadas a los recortes de las áreas quemadas (*clip*) del FPM, se procede a agrupar los valores de pixeles quemados y a contabilizarlos, para luego desarrollar el cálculo de probabilidad, mediante la siguiente formula:

$$FPP = \sum_{K=1}^{N_i} \frac{Cb_{ik}}{T \cdot C_i^{tot}}$$

Cb_{ik} = área quemada de los K incendios dentro de HTC

N_i = número de incendios en el intervalo de tiempo considerado

C_i^{tot} = área de HTC

T = rango de tiempo (8 – 10 años)

HTC = Clases territoriales homogéneas

Obteniéndose el Mapa de Probabilidad de Propagación de Incendio, (ver figura N° 24).

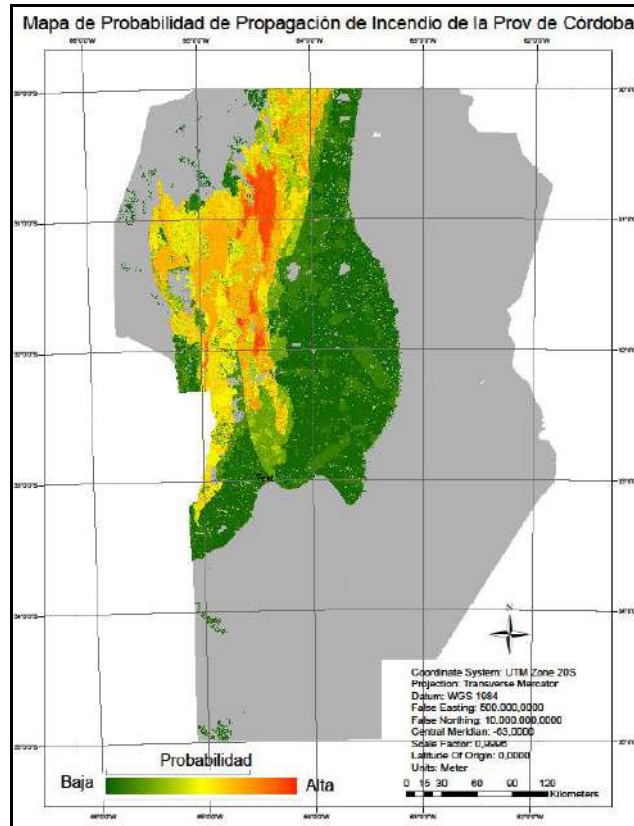


Figura N° 24: Mapa de Probabilidad de Propagación de Incendio de la provincia de Córdoba.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, y luego de aplicado un cálculo probabilístico basado en registros históricos de un periodo de diez años (2002 al 2011), se obtiene el Mapa de Probabilidad de Propagación de Incendios. Se puede apreciar rápidamente en el mapa el posicionamiento de las Sierras de Córdoba como así también la alta probabilidad de propagación de incendios a lo largo de toda el área, siendo aún más alta su probabilidad en las Sierras Chicas (ubicadas al noroeste de la ciudad de Córdoba). La importancia de este mapa radica en poder identificar las zonas de amenaza y vulnerabilidad a incendios del área de estudio, como también poder facilitar la gestión de recursos, siempre escasos, para la prevención de estos desastres que afectan a la población, su flora y fauna, y que también repercuten en lo económico y social.

El FPPM es un mapa estático de riesgo de incendio, con una resolución media (250 m), que tiene en cuenta la distribución estadística de incendios en un periodo de 10 años. Posee además una combinación de factores naturales estáticos, a saber: Mapa de Combustible, DEM con sus pendientes y orientación (*slope, aspect*), Mapa Fitoclimático y la red vial. El Mapa de Probabilidad de Propagación de Incendio, debiera tener una frecuencia de actualización anual para obtener valores más ajustados y con mayor peso, para ser empleado y explotado previo a las temporadas de incendios. Este producto final se pudo constatar con el registro de área quemada disponible correspondiente al año 2013, que se presenta en color blanco. Se puede observar en la figura N° 25, como las áreas quemadas coinciden con la alta

y muy alta probabilidad de propagación de incendio, constituyéndose en un producto fiable de considerar para la prevención de incendios.

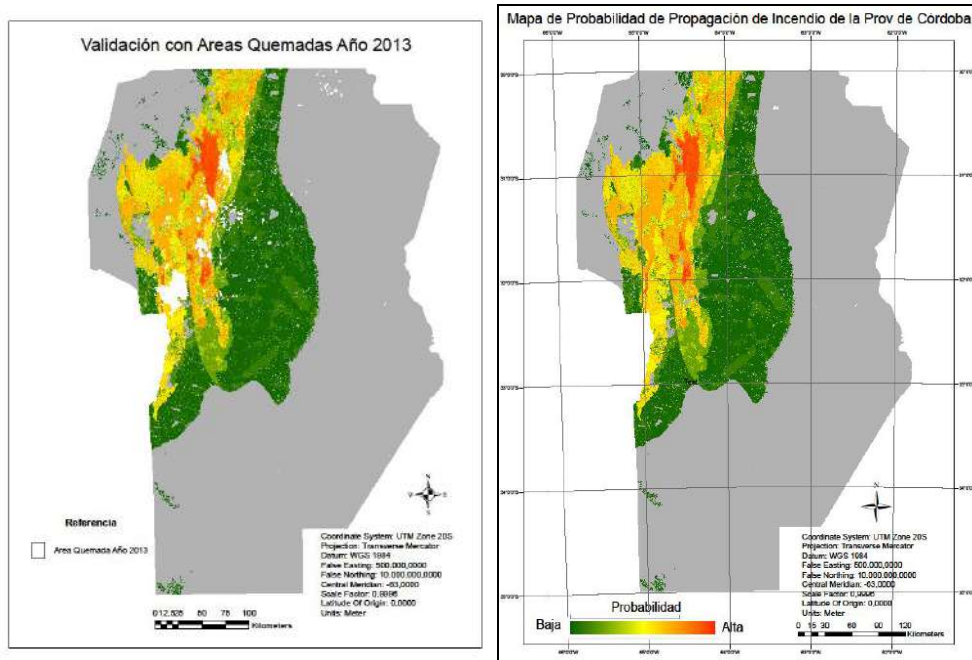


Figura N° 25: Constatación del Mapa de Probabilidad de Incendios.

Fuente: Elaboración propia.

3. CONCLUSIONES

El presente artículo presenta la implementación del Mapa de Probabilidad de Propagación de Incendio, que permite el monitoreo de riesgo de incendio en su fase preventiva, facilitando una eficiente gestión y una optimización de los recursos por parte de las autoridades responsables del manejo de las emergencias.

La metodología desarrollada es aplicable a otras zonas geográficas o provincias vulnerables a la amenaza de incendio como así también para toda la parte continental de la República Argentina.

El Mapa de Probabilidad de Propagación de Incendio, producto desarrollado en el EOSIAL (Earth Observation Satellite Images Applications Lab) e implementado a nuestra área de estudio, es un producto obtenido del procesamiento de datos que proporciona información útil a la etapa de prevención de incendios.

Este mapa se basa en el análisis de datos ópticos estáticos, caracterizados por una resolución media.

Este producto expresa la probabilidad de la ocurrencia de un incendio. Esto permitiría organizar mejor la prevención y gestión de las actividades como también los recursos de lucha contra incendios.

La calidad de este producto radica en la disponibilidad de datos oficiales, que permitan su actualización anual y previa a la época de incendios.

BIBLIOGRAFÍA

ANDERSON, H. E. (1982). “Aids to determining fuel models for estimating fire behavior”, *Bark Beetles, Fuels, Fire Bibliogr.*, N° april, pp. 1–22.

ARGAÑARAZ, J. P.; PIZARRO, G. G.; ZAK, M. and BELLIS, L. M. (2015). “Fire regime, climate, and vegetation in the Sierras de Córdoba, Argentina”, *Fire Ecol.*, vol. 11, N° 1, pp. 55–73.

CHUVIECO, E.; Giglio, L. and Justice, C. (2008). “Global characterization of fire activity: Toward defining fire regimes from Earth observation data”, *Glob. Chang. Biol.*, vol. 14, N° 7, pp. 1488–1502.

Ministerio de Defensa, “Instituto Geográfico Nacional”, Portal Oficial. <http://www.ign.gob.ar/>.

RENDA, E.; ROZAS, M.; MOSCARDINI, O. and TORCHIA, N. (2017). *Manual para la evaluación de mapas de riesgo*.

SNM (2021). “Incendio Forestal”. Portal Oficial del Estado Argentino, 2021. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/fuego/conocemas/incendioforestal>.

SNMF (2020). “Manejo del Fuego - Reporte de incendios,” 3 de noviembre.

SNMF (2021). “Acerca del fuego”. Portal Oficial del Estado Argentino. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/fuego/conocemas>.

USGS (2022). EarthExplorer. <https://earthexplorer.usgs.gov/>.