



EVALUACIÓN DE INFORMACIÓN RELACIONADA CON COMBUSTIBLES EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO PARA EL MODELADO Y SIMULACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES, CASO DE ESTUDIO: INCENDIO DEL CERRO ATACAZO

ASSESSMENT OF FUEL RELATED DATA IN THE METROPOLITAN DISTRICT OF
QUITO FOR MODELING AND SIMULATION OF WILDFIRES, CASE STUDY:
ATACAZO HILL WILDFIRE

Juan Gabriel Mollocana Lara*^{}, César Iván Álvarez Mendoza^{} y Luis
Jonathan Jaramillo Coronel^{}

Grupo de Investigación Ambiental en el Desarrollo Sustentable GIADES, Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Politécnica Salesiana, Quito 170702, Ecuador

*Autor para correspondencia: jmollocana@ups.edu.ec

Manuscrito recibido el 04 de abril de 2021. Aceptado, tras revisión, el 29 de junio de 2021. Publicado el 1 de septiembre de 2021.

Resumen

El Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) no cuenta con toda la información necesaria para diseñar estrategias de gestión de incendios forestales basadas en modelos y simulaciones. Este trabajo evaluó el uso de información relacionada con incendios forestales del DMQ obtenida de fuentes gubernamentales y libres, tomando como caso de estudio el incendio del cerro Atacazo (29/09/2018). Se procesó información topográfica, meteorológica y de combustibles; las hojas topográficas se obtuvieron del portal del Instituto Geográfico Militar, la información meteorológica de la estación Guamaní de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito, y la información de combustibles y cobertura vegetal se estimó en base a las categorías de vegetación y nivel de alteración del mapa de cobertura y uso de la tierra del proyecto Cartografía Temática a Escala 1:25000 del Ecuador ejecutado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. Se realizaron simulaciones en FlamMap de los trayectos principales y tiempos de arribo del incendio para dos casos: el Caso 1 contempla barreras de fuego construidas con los datos de OpenStreetMap; y el Caso 2 complementa esta información con observaciones en campo. Se utilizó imágenes satelitales para comparar la extensión del incendio real con las simulaciones, usando los coeficientes de Sorensen y kappa de Cohen; obteniendo 0.81 y 0.85 (Caso 1), y 0.78 y 0.81 (Caso 2), respectivamente. Estos resultados mostraron una gran similitud entre el comportamiento del modelo y el incendio real. Una vez validado el modelo, se aplicó para estimar el comportamiento del incendio en varios escenarios de interés; se comprobó que el diseño de barreras de fuego en base a simulaciones tiene gran potencial para disminuir el área de afectación de un incendio.

Palabras clave: FlamMap, simulación incendios forestales, modelado incendios forestales, sensores remotos.

Abstract

The Metropolitan District of Quito (DMQ) does not have all the information needed to design wildfire management strategies based on models and simulations. This work evaluated the use of information related to wildfires in the DMQ obtained from governmental and free sources, using the case study of the Atacazo Hill wildfire (09/29/2018). Topographic, meteorological and fuel data from different sources were processed. The topographic information was obtained from the topographic sheets of the Military Geographical Institute; the meteorological information was obtained from Guamaní station of the Metropolitan Network of Atmospheric Monitoring of Quito, and the fuel and vegetation cover information was estimated based on vegetation and alteration level categories of the coverage and land use map of the Thematic Cartography at Scale 1:25000 of Ecuador Project, executed by the Ministry of Agriculture, Livestock, Aquaculture, and Fisheries. The major paths and the fire arrival times were simulated on FlamMap for two different cases. In Case 1, the simulation included fire barriers based on OpenStreetMap data. Additional information gathered during field visits was included in Case 2. Satellite imagery was used to compare the real wildfire extent with the simulated extent using Sorensen and Cohen's kappa coefficients, obtaining 0.81 and 0.85 for Case 1, and 0.78 and 0.81 for Case 2, respectively. These results showed great similarity between the behavior of the model and the real wildfire. After the model was validated, it was applied to estimate the wildfire behavior in various scenarios of interest; it was found that the design of fire barriers based on simulations has great potential to reduce the affected area of a wildfire

Keywords: FlamMap, wildfires simulation, wildfires modeling, remote sensing.

Forma sugerida de citar: Mollocana, J.G., Álvarez, C.I. y Jaramillo, L.J. (2021). ¹. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 34(2):45-62. <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.03>.

IDs Orcid:

Juan Gabriel Mollocana Lara: <http://orcid.org/0000-0002-2430-8400>

César Iván Álvarez Mendoza: <http://orcid.org/0000-0001-5629-0893>

Luis Jonathan Jaramillo Coronel: <http://orcid.org/0000-0002-3127-9855>

1 Introducción

En los últimos años, grandes incendios forestales han sido noticia en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ); en el periodo julio 2019 – septiembre 2019 se registraron 285 incendios forestales que consumieron casi 2500 ha de cobertura vegetal. Los incendios forestales son una de las amenazas naturales y antrópicas más recurrentes en el territorio del DMQ, y son considerados eventos catastróficos debido a su gran impacto ambiental (Secretaría de Seguridad DMQ, 2015). Los impactos de un incendio forestal que pueden afectar a corto o largo plazo a ecosistemas y comunidades cercanas incluyen: pérdida de servicios ecosistémicos, amenaza a especies en peligro de extinción, simplificación de la estructura y composición biológica de bosques, entrada de especies invasoras, y generación de condiciones climáticas secas por la emisión de gases de efecto invernadero (Moore y col., 2003; Barkhordarian y col., 2019).

La aplicación de modelos y simulaciones para la gestión, prevención y respuesta a incendios forestales abarca diversos enfoques (DeMagalhães y col., 2017; Srivastava y col., 2018; Botequim y col., 2019; Jahdi y col., 2019; Palaiologou y col., 2020; Xofis y col., 2020). Por ejemplo, el Servicio Forestal Canadiense (CFS; Canadian Forest Service) desarrolla diversos modelos y aplicaciones de software para realizar predicciones en la propagación de un incendio. Entre estas herramientas están el Modelo Canadiense de Efectos de Incendios (CanFIRE; Canadian Fire Effects Model), usado para predecir el comportamiento de un incendio a corto plazo, y el Sistema de Análisis Probabilístico de Incendios (PFAS; Probabilistic Fire Analysis System), usado para predecir efectos a largo plazo. Con estas herramientas se evalúa la necesidad de intervención para suprimir un incendio cuando es muy probable que no se extinga naturalmente, ahorrando cientos de millones de dólares anuales en costos por supresión de incendios (Fitch y col., 2018; Government of Canada, 2020).

Tradicionalmente, el modelado de incendios forestales incluye la predicción de la propagación del incendio, la intensidad y la longitud de la llama. Parte de variables fáciles de medir relacionadas con el tipo de combustible, topografía del terreno y condiciones climáticas superficiales. Los tipos de com-

bustibles suelen clasificarse en distintas categorías que dependen de su cantidad, densidad aparente, contenido calórico y humedad de extinción. Las características de estas categorías de combustibles sirven como entradas para los modelos semiempíricos de comportamiento de fuego implementados en software como FlamMap y FIRESITE (Bakhshaii y Johnson, 2019; Zigner y col., 2020).

FlamMap es un software para modelado y simulación de incendios desarrollado por el Programa de Ciencias de Fuego, Combustible y Humo de Estados Unidos (FFS; Fire, Fuel, and Smoke Science Program) y ampliamente aplicado en la actualidad (Hernández y col., 2007; Jahdi y col., 2016; Botequim y col., 2017; Conner y col., 2018; Rios y col., 2019). Este programa implementa varios modelos semiempíricos para estimar el comportamiento, crecimiento y propagación de un incendio. Para realizar simulaciones en una zona determinada usando este software hace falta información meteorológica, topográfica y de combustibles. Este programa puede generar distintas salidas en base a los resultados de simulaciones de comportamiento de incendios, Tiempo de Viaje Mínimo (MTT; Minimum Travel Time) y Modelado de Optimización de Tratamientos (TOM; Treatment Optimization Model) (Finney, 2006; Stratton, 2009).

Los modelos de incendios forestales semiempíricos son los más usados en la actualidad, sin embargo, tienen varias limitaciones; entre ellas está su enfoque en la representación del comportamiento de un incendio, mas no en los mecanismos de combustión y transferencia de calor. Además, realizan varias simplificaciones con el fin de proveer métodos de fácil ejecución a través asunciones estadísticas y aproximaciones geométricas en dos dimensiones de procesos tridimensionales. Por otro lado, la nueva generación de modelos atmosféricos de incendios forestales incluye la aplicación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD; Computational Fluid Dynamics) para resolver numéricamente modelos físicos tridimensionales de combustión, transferencia de calor, aerodinámica y turbulencia. Además, estos modelos incluyen métodos de Predicción Numérica de Clima (NWP; Numerical Weather Prediction) que permiten simular la interacción del incendio con la atmósfera cercana. De esta forma, se puede representar la dinámica de procesos tridimensionales complejos que pueden

ocurrir durante un incendio, como penachos de humo, remolinos de fuego, vórtices horizontales, combinación de fuego y vientos de montaña, fuego de chimenea, y tormentas de fuego. La principal desventaja de estos modelos es la gran cantidad de recursos computacionales que requieren, por lo que su aplicabilidad está enfocada a la investigación (e.g. FIRETEC) (Bakhshaii y Johnson, 2019).

El principal inconveniente para la simulación de incendios forestales con FlamMap en el DMQ es que no existe ninguna base de datos con características de combustibles y porcentajes de vegetación destinada a la gestión de incendios forestales en el DMQ. Sin embargo, existen mapas de tipo de vegetación y uso de suelo generados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) y el Ministerio de Ambiente y Agua del Ecuador (MAAE) con información que puede ser relacionada al tipo de combustible de una zona. Estos datos, en combinación con mapas de OpenStreetMap e imágenes satelitales, pueden ser potenciales fuentes de información de combustibles destinadas a la simulación de un incendio (MAAE, 2020; MAGAP, 2015). Además, para poder identificar incendios que sirvan como casos de estudio en el DMQ se pueden usar herramientas de teledetección de incendios forestales como el sistema FIRMS de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA; National Aeronautics and Space Administration) (NASA, 2021) o, en su defecto, implementar algoritmos basados en redes neuronales e imágenes satelitales multiespectrales (Govil y col., 2020; Mujtaba y Wani, 2018; Govil y col., 2020).

El objetivo del presente trabajo es evaluar el uso de la información disponible en el DMQ para modelar y simular incendios forestales utilizando el software FlamMap y estimando las propiedades de los combustibles con información de libre acceso y de entes gubernamentales, tomando como caso de estudio el incendio del cerro Atacazo, ocurrido en septiembre del 2018 (Cuerpo de Bomberos DMQ, 2018). Para validar los resultados de las simulaciones se comparará la extensión real y simulada de incendio usando los coeficientes de Sorensen y kappa de Cohen (Banko, 1998). Por último, se evaluará la aplicación del modelo para la simulación de escenarios de interés, estos son: comportamiento del incendio en condiciones climáticas extremas, comportamiento del incendio ante barreras de fuego es-

tratégicamente diseñadas y comportamiento del incendio ante la falla de una barrera de fuego.

2 Materiales y Métodos

El caso de estudio de esta investigación es el incendio del cerro Atacazo ocurrido el 29 de septiembre del 2018; para modelar y validar este incendio se contemplaron cuatro fases: recopilación de datos, procesamiento de datos, simulación y validación (Figura 1). En la primera fase, se recopiló información meteorológica de la estación meteorológica Guamaní de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ.), información topográfica de la carta topográfica de la parroquia Amaguaña del DMQ levantada por el Instituto Geográfico Militar (IGM), y se realizó una estimación de la cobertura vegetal y del tipo de combustible partiendo del mapa de cobertura y uso de la tierra del Proyecto Cartografía Temática a Escala 1:25000 del MAGAP. Este mapa posee categorías que clasifican el terreno según el tipo de vegetación (herbácea, arbustiva y bosques) y nivel de alteración (bajo, medio y alto). Además, se utilizaron los datos de caminos y coberturas naturales de OpenStreetMap para complementar la información de combustibles. Esto se debe a que los senderos, caminos secundarios, cuerpos de agua y zonas rocosas pueden comportarse como barreras contra incendios naturales o no intencionadas (Rigolot y col., 2004). En la segunda fase, se creó un archivo LCP que contiene los datos de pendiente, elevación, orientación, modelos de combustibles y cobertura vegetal, un archivo WXS con los datos meteorológicos, y dos mapas con las barreras de fuego para el Caso 1 y el Caso 2. La extensión del incendio del cerro Atacazo se estimó en base a imágenes satelitales Sentinel-2. En la fase tres, la simulación de la extensión del incendio se realizó a través del cálculo del MTT en FlamMap. Por último, la precisión de la simulación se calculó con el coeficiente de Sorensen y el coeficiente kappa de Cohen.

2.1 Caso de estudio

El cerro Atacazo se encuentra en Ecuador, provincia de Pichincha, en el límite sur del DMQ con el cantón Mejía (Figura 2). Su cima se ubica en el punto $0^{\circ}21'15.8''S$ $78^{\circ}37'14.3''W$ a una altura de 4463 metros sobre el nivel del mar. El cerro Atacazo es un

estratovolcán que forma parte de la Cordillera Occidental, su temperatura media es de 11,9 °C, posee un clima tropical húmedo y su vegetación es principalmente páramo con vegetación herbácea. El incendio del cerro Atacazo inició el 29 de septiembre del 2018, tuvo una duración de cuatro días y consumió más de 1200 ha del DMQ y el Cantón Mejía (Figura 3). Según los reportes del Cuerpo de Bomberos del DMQ, el incendio se reportó a las 14h50 horas del 29 de septiembre del 2018, logró ser controlado a las 7h06 del 2 de octubre del 2018 y fue monitoreado durante dos días más. La duración del incendio, desde su reporte hasta su hora de control,

fue de 2 días, 16 horas y 16 minutos (3856 minutos en total). Resulta de interés mencionar que en la cima del cerro Atacazo existen instalaciones de antenas de telecomunicación. Por esta razón, existen vías de segundo orden que pueden recorrerse en vehículos con doble transmisión que llegan muy cerca de la cobertura de rocas de la cima. Esta información tiene gran importancia debido a que un camino, lo suficientemente ancho para ser recorrido por un automóvil, puede comportarse como barrera de fuego en un incendio, así mismo, las rocas y arenales cercanos a la cima de un volcán son superficies donde el fuego no se propaga.

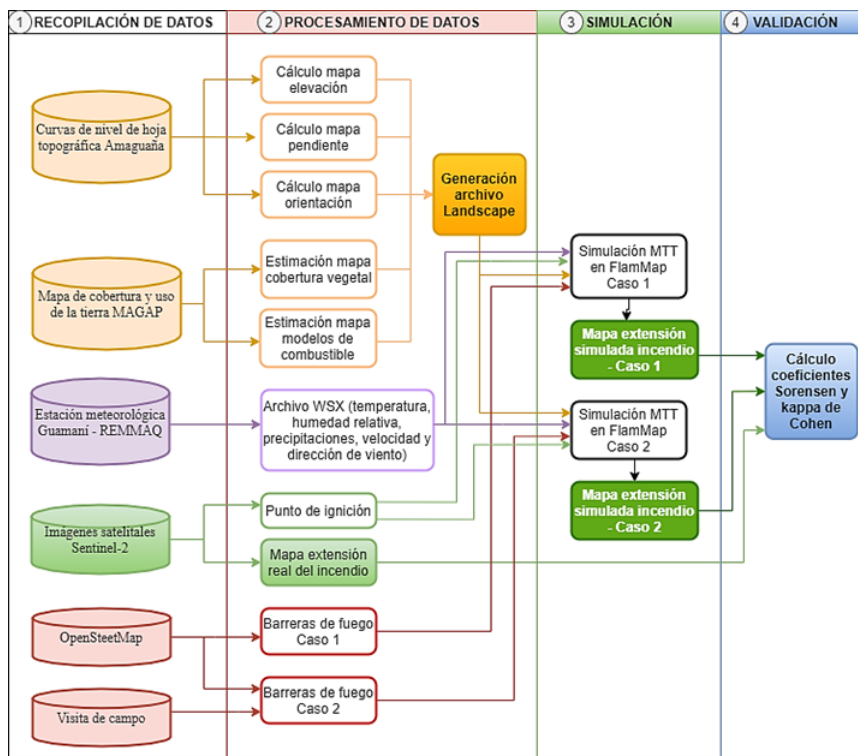


Figura 1. Diagrama metodología (elaboración propia).

2.2 Modelado de incendios forestales

El modelo semiempírico de propagación de fuego superficial de Rothermel es uno de los más usados para describir el comportamiento de un incendio forestal. Por lo general, este modelo se aplica en conjunto con otros modelos de intensidad de llama, longitud de llama, fuego de corona, conatos de incendio, velocidad de propagación de fuego, creci-

miento del frente de un incendio, entre otros, para el manejo de incendios y combustibles. La ecuación final del modelo de propagación de fuego superficial de Rothermel se detalla a continuación (Andrews, 2018):

Ecuación 1

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \phi_W + \phi_S)}{\rho_B \epsilon Q_{ig}} \quad (1)$$

Donde:

R es la velocidad de propagación medida en $\frac{m}{min}$.

I_R es la intensidad de reacción medida en $\frac{J}{m^2 \cdot min}$.

ξ es la razón de propagación de flujo.

ϕ_W es un factor relacionado con el efecto del viento en la propagación del fuego.

ϕ_S es un factor relacionado con el efecto de la pendiente del terreno en la propagación del fuego.

ρ_B es la densidad aparente del combustible medida en $\frac{kg}{m^3}$.

ε es el número de calentamiento efectivo.

Q_{ig} es la cantidad de calor necesaria para encender una libra de combustible medida en $\frac{J}{kg}$.

A pesar de que este modelo existe desde 1972, sigue siendo implementado como parte de modelos más complejos y de simuladores ampliamente usados en la actualidad como FlamMap y FIRESITE. FlamMap es un simulador de incendios forestales que implementa distintos modelos de comportamiento de incendios, estos son:

- Modelo de Rothermel (1972) para propaga-

ción de incendios superficiales.

- Modelo de Van Wagner (1977) para iniciación de fuego de corona.
- Modelo de Rothermel (1991) para propagación de incendio de corona.
- Modelo de Albini (1979) para conatos de incendio.
- Método de cálculo de fuego de corona de Finney (1998) o Scott and Reinhardt (2001).
- Modelo de humedad de combustible muerto de Nelson (2000).

La información geoespacial de entrada para FlamMap se describe mediante varios *rasters* combinados en un archivo *Landscape* con extensión LCP; la información meteorológica puede ser procesada por la herramienta *WindNinja* e ingresada en formato WSX. Además, otros datos como barreras de fuego y puntos de ignición pueden definirse mediante mapas con información de tipo vector.

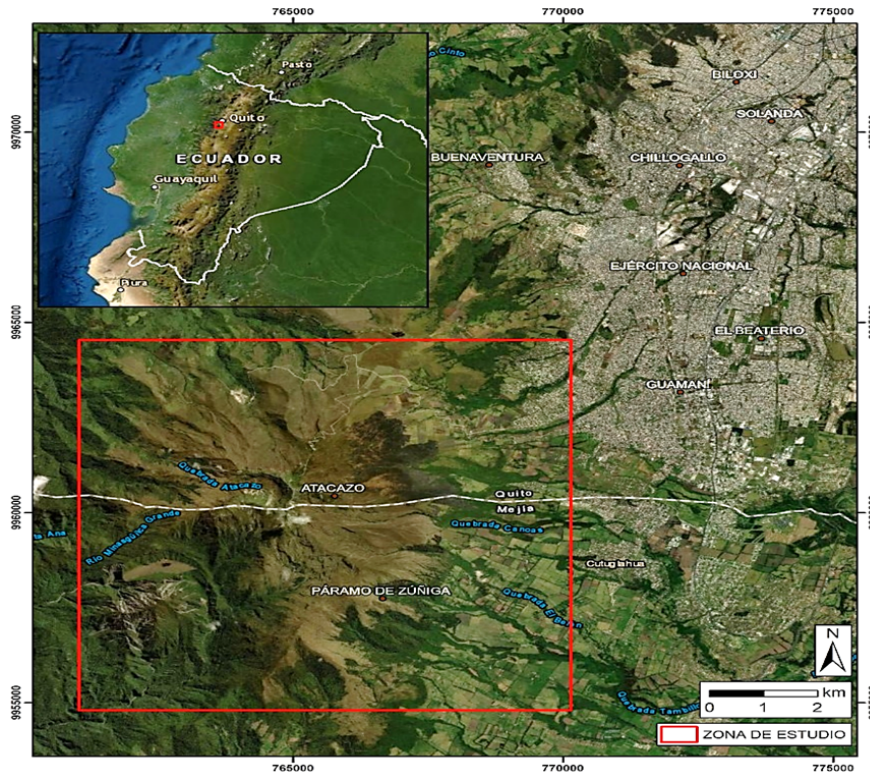


Figura 2. Ubicación del cerro Atacazo (elaboración propia).

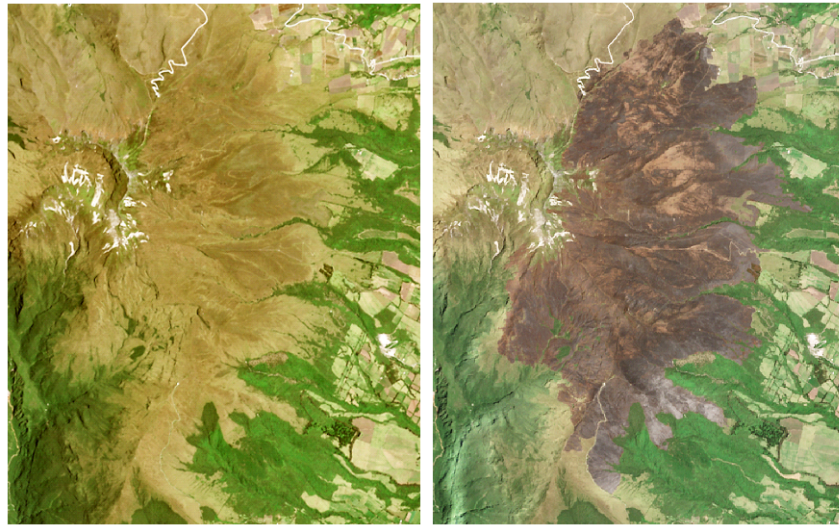


Figura 3. Imágenes Sentinel-2 cerro Atacazo. Antes del incendio – 29/09/2018 (izquierda) y después del incendio – 24/10/2018 (derecha).

2.3 Procesamiento de datos

2.3.1 Archivo Landscape

Para generar el archivo *Landscape* para FlamMap es necesario crear cinco *rasters*: elevación o altura, pendiente, orientación, cobertura vegetal y modelos de combustible. Para esto, es importante que todos los *rasters* tengan el mismo tamaño de celda o píxel (en este caso 20×20 m), que sus píxeles coincidan exactamente, y cubran la misma zona de estudio. Además, se necesita indicar a través de un archivo

con extensión PRJ la proyección usada, en este caso, WGS84 zona 17S.

2.3.2 Creación de *rasters* de altura, pendiente y orientación

Los *rasters* de altura, pendiente y orientación se obtienen partiendo de las curvas de nivel de la hoja topográfica de Amaguaña. Para esto se usó el software ArcGis y el procedimiento descrito en la Figura 4. El resultado de este proceso se muestra en la Figura 5.

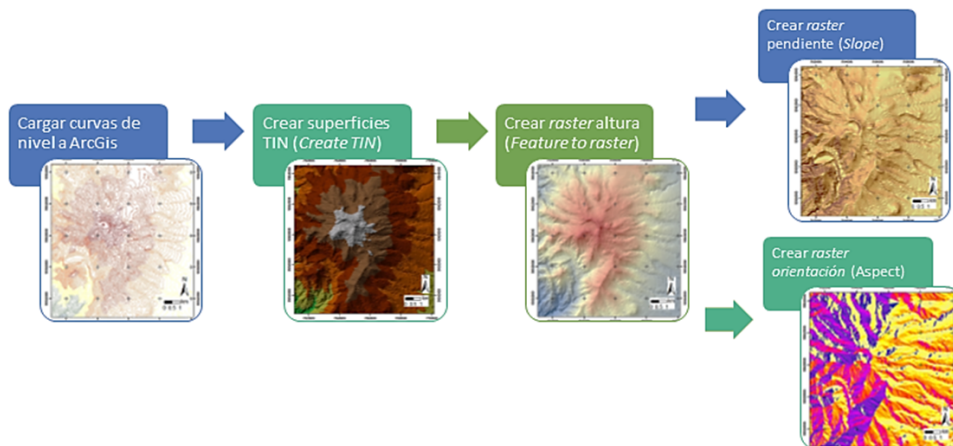


Figura 4. Procedimiento para crear los *rasters* de altura, pendiente y orientación (elaboración propia).

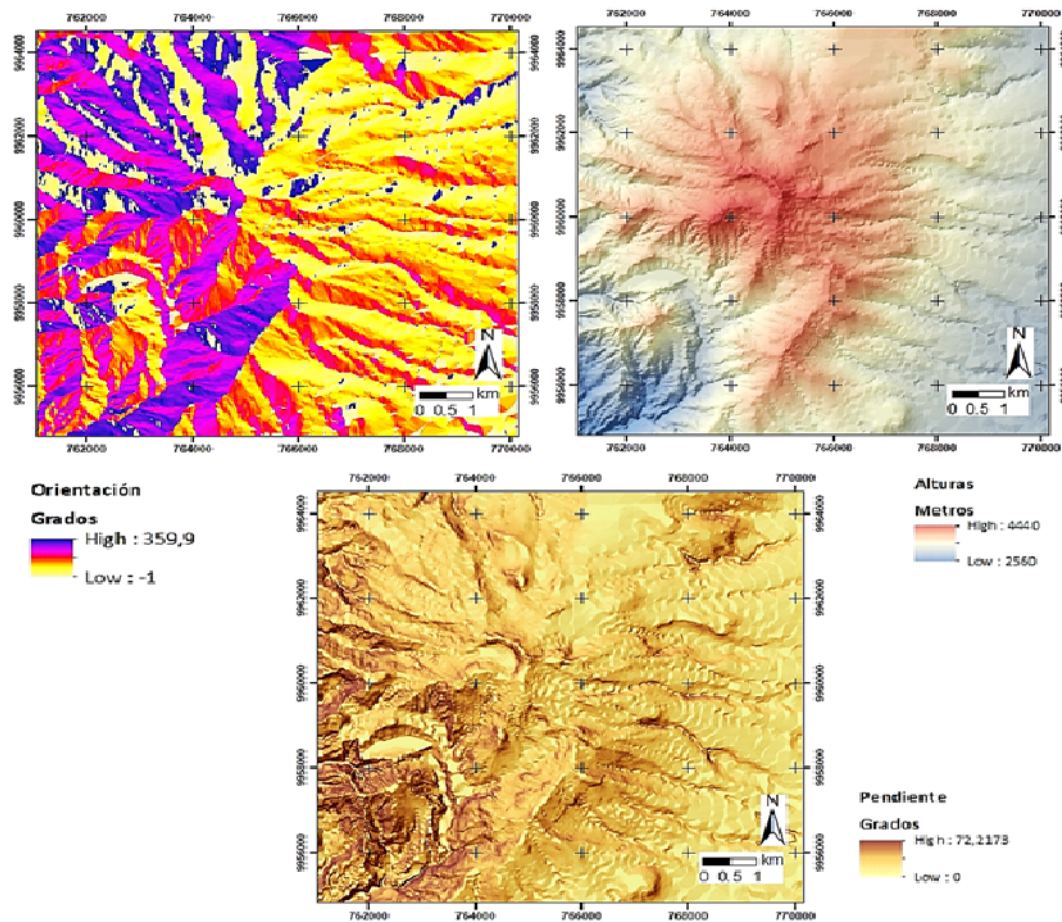


Figura 5. *Rasters* de altura, pendiente y orientación de la zona de estudio (elaboración propia).

2.3.3 Creación de *rasters* de modelos de combustible y cobertura vegetal

Para generar los *rasters* de cobertura vegetal y modelos de combustible se partió del mapa de cobertura y uso de la tierra del Proyecto Cartografía Temática a escala 1:25000 del MAGAP. Este mapa está en formato vectorial y cuenta con el atributo “cobertura” que contiene 25 categorías de tipo de cobertura y uso de la tierra de la zona del cerro Atacazo. Los tipos de vegetación indicados en estas categorías son relacionados con los modelos de combustibles de Scott-Burgan para generar el *raster* de combustibles para FlamMap (Scott y Burgan, 2005). Por otro lado, los niveles de alteración del terreno se relacionan con rangos de porcentajes de cobertura vegetal para generar el *raster* de cobertura. Además, se consideraron las indicaciones de la guía de selección

de combustibles del Grupo Coordinador Nacional de Incendios Forestales de Estados Unidos (NWCG; *National Wildfire Coordinating Group*). Con esta información se creó la base de datos de la Tabla 1, donde los atributos “fuel_value” y “cc_class” se usaron para crear los *rasters* de modelos de combustibles y cobertura vegetal, respectivamente (Figura 6). En esta tabla se asigna a cada categoría del atributo “cobertura” un modelo de combustible (“fuel_type”) con su respectivo código numérico (“fuel_value”) y una clase de cobertura vegetal (“cc_class”). En la clase de cobertura vegetal, el valor 0 corresponde con 0% de cobertura, 1 con de 1 a 25% de cobertura, 2 con de 26 a 50% de cobertura, 3 con de 51 a 75% de cobertura y 4 con de 76 a 99% de cobertura. Cabe mencionar que la información levantada corresponde al año 2015, es la más actual y con la mejor resolución encontrada.

Tabla 1. Base de datos de cobertura, modelos de combustible, código numérico de modelos de combustible, y cobertura vegetal (elaboración propia).

cobertura	fuel_type	fuel_value	cc_class
AREA EN PROCESO DE URBANIZACION	NB1	91	0
CENTRO POBLADO URBANO	NB1	91	0
MISCELANEO DE CICLO CORTO	NB3	93	0
MISCELANEO FORESTAL	NB3	93	0
PAPA	NB3	93	0
PASTO CULTIVADO	NB3	93	0
LAGO/LAGUNA	NB8	98	0
AREA EN PROCESO DE EROSION	NB9	99	0
CANTERA	NB9	99	0
MINA	NB9	99	0
VEGETACION HERBACEA HUMEDA MUY ALTERADA	GR1	101	4
VEGETACION HERBACEA HUMEDA POCO ALTERADA	GR5	105	4
PARAMO HERBACEO MEDIANAMENTE ALTERADO	GR3	103	3
PARAMO ARBUSTIVO MEDIANAMENTE ALTERADO	GS4	124	2
PARAMO HERBACEO POCO ALTERADO	GR5	105	4
MATORRAL HUMEDO MUY ALTERADO	TU1	161	1
PARAMO HERBACEO MUY ALTERADO	GR1	101	2
MATORRAL HUMEDO POCO ALTERADO	GH4	144	3
PARAMO ARBUSTIVO MUY ALTERADO	GS3	123	1
MATORRAL HUMEDO MEDIANAMENTE ALTERADO	SH4	144	2
BOSQUE HUMEDO MEDIANAMENTE ALTERADO	TU2	162	2
PINO	TU2	162	2
BOSQUE HUMEDO POCO ALTERADO	TU3	163	3
EUCALIPTO	TU4	164	2

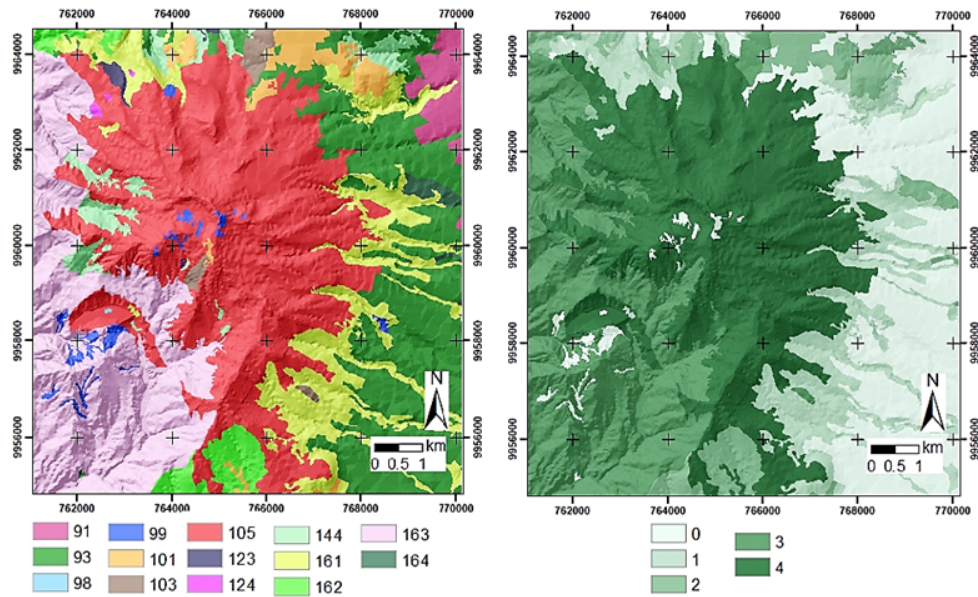


Figura 6. Raster de modelos de combustible y cobertura vegetal de la zona de estudio (elaboración propia).

2.3.4 Creación de archivo wxs con condiciones meteorológicas

Las variables meteorológicas de interés son temperatura, humedad relativa, nubosidad, precipitaciones, velocidad de viento y dirección de viento. Todas estas variables, a excepción de la nubosidad, están disponibles en la estación Guamaní de la REM-MAQ entre el 29 de septiembre y el 5 de octubre del 2018. Con estos datos se generará un archivo con extensión WXS que contiene la información meteorológica de entrada para los cálculos de la humedad de combustible muerto que realiza FlamMap.

Tabla 2. Variables meteorológicas de archivo WXS y su valor medio (elaboración propia).

Variable	Unidades	Valor medio
Temperatura	Grados centígrados	14
Humedad relativa	Porcentaje	59
Precipitaciones	Centésimas de milímetros	0
Velocidad de viento	Kilómetros por hora	6
Dirección de viento	Grados	181
Nubosidad	Porcentaje	0

2.3.5 Punto de ignición

Una de las ventajas del caso de estudio del incendio del cerro Atacazo es que se dispone de una imagen satelital Sentinel-2 con poca nubosidad poco tiempo después de su primer reporte. El incendio fue visualizado desarrollándose en el lado sur del cerro Atacazo y reportado a las 14h50 del 29 de septiembre de 2018. Además, una de las teorías de su inicio es que se produjo por una quema agrícola fuera de control. Por estas razones, se tomó como punto de ignición el área negra cercana a sembríos, visualizada en la Figura 7. Se creó un *shapefile* interpretado sobre la imagen satelital con la forma de esta área que será usado para las simulaciones MTT en FlamMap.

2.3.6 Barreras de fuego según mapa de OpenStreetMap

Se pudo identificar, mediante un reconocimiento de la zona, los caminos transitables por vehículos. El ancho de estos caminos y la poca altura de la vegetación herbácea de su alrededor hacen posible que se comporten como barreras de fuego. Por otro lado, los cuerpos de agua y zonas rocosas de la cima son superficies donde el fuego no se propaga. Con estas observaciones y la información de la plataforma

OpenStreetMap se generaron dos conjuntos de barreras de fuego. El Caso 1 contempla barreras de fuego construidas únicamente con los datos de *OpenStreetMap*, mientras que, el Caso 2 complementa esta información con observaciones en campo (Figura 8).

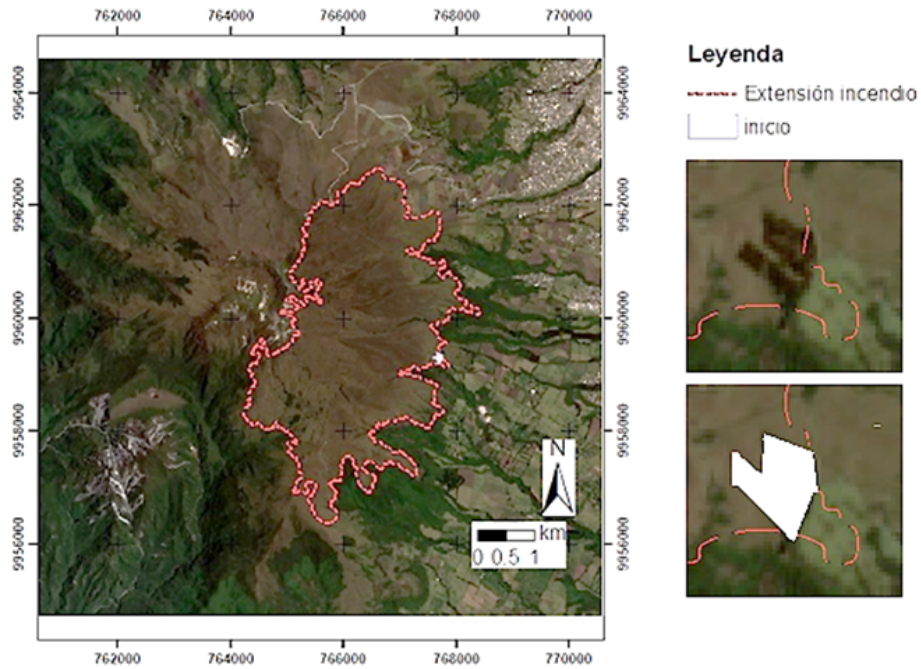


Figura 7. Punto probable de ignición del incendio del cerro Atacazo (elaboración propia).

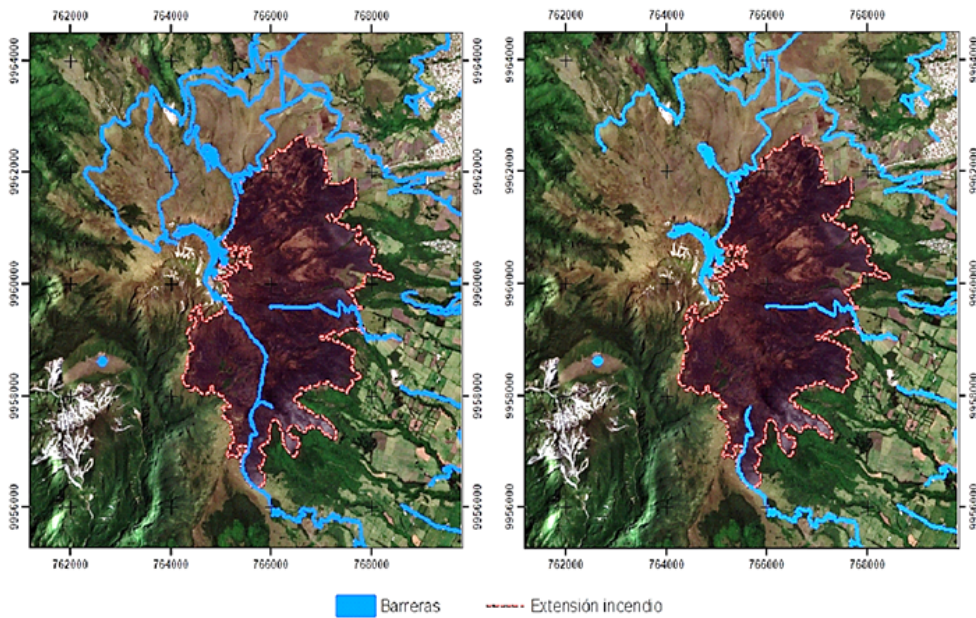


Figura 8. Barreras de fuego: Caso 1 (izquierda), Caso2 (derecha) (elaboración propia).

2.4 Medidas de error

2.4.1 Coeficiente de Sorensen

Este coeficiente tiene como objetivo comparar la similitud de dos muestras con información de la existencia o no existencia de una característica determinada. En el contexto de la simulación de incendios forestales se puede comparar las zonas quemadas o no quemadas del incendio real con las simulaciones. La fórmula para el cálculo de este coeficiente es la siguiente:

Ecuación 2

$$SC = \frac{2a}{2a + b + c} \quad (2)$$

Donde:

SC es el coeficiente de Sorensen.

a es el número de celdas quemadas en la simulación e incendio real.

b es el número de celdas quemadas en la simulación y no quemadas en el incendio real.

c es el número de celdas no quemadas en la simulación y quemadas en el incendio real.

2.4.2 Coeficiente kappa de Cohen

El coeficiente kappa de Cohen es una medida de error que puede derivarse de una matriz de error o matriz de confusión. Este coeficiente evalúa el ajuste general de la matriz de error tomando en cuenta los elementos fuera de su diagonal. El contexto de un incendio forestal se puede calcular con la siguiente fórmula:

Ecuación 3

$$KC = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})} \quad (3)$$

Donde:

KC es el coeficiente kappa de Cohen.

r es el número filas de la matriz de error.

N es el número total de observaciones.

x_{ii} es el número de observaciones en la fila i y columna i de la matriz de error.

x_{i+} es el total marginal de la fila i .

x_{+i} es el total marginal de la columna i .

3 Resultados

3.1 Simulación de trayectos principales y tiempo de llegada

En ambos casos, se ejecutaron simulaciones basadas en el MTT para obtener los trayectos principales y el mapa de tiempo de llegada (Figura 9). Los trayectos principales facilitan la identificación de zonas de tratamiento de combustible, mientras que, el mapa de tiempo de llegada permite visualizar la extensión del incendio. En el Caso 1 se puede apreciar que la extensión del incendio es limitada al norte, sur y oeste por las barreras de fuego consideradas, mientras que el cambio de tipo de vegetación es la limitante por el este.

Este tipo de vegetación se clasifica como matorral húmedo muy alterado y corresponde al modelo de combustible TU1 (mezcla de bosque y sotobosque de pasto y arbustos) con porcentaje de cobertura vegetal entre 1 y 25%. En el Caso 2, se puede apreciar que la extensión del incendio es limitada al norte y noroeste por las barreras de fuego consideradas, mientras que el cambio de tipo de vegetación es la limitante por el suroeste, este y sur. La vegetación al este se clasifica como matorral húmedo muy alterado y corresponde al modelo de combustible TU1 (bosque con carga baja de pasto y arbustos) con porcentaje de cobertura vegetal entre 1 y 25%; la vegetación al sur se clasifica como bosque húmedo medianamente alterado y corresponde al modelo de combustible TU2 (bosque con carga moderada de pasto y arbustos) con porcentaje de cobertura vegetal entre 25 y 50%; la vegetación al suroeste se clasifica como bosque húmedo poco alterado y corresponde al modelo de combustible TU3 (bosque con carga moderada de pasto y arbustos) con porcentaje de cobertura vegetal entre 51 y 75%. Cabe mencionar que el fuego comienza a propagarse a través de este último tipo de vegetación al finalizar la simulación.

3.2 Validación del modelo

Para comparar la extensión simulada y real del incendio se calculan los coeficientes de Sorensen y kappa de Cohen. Para esto, es necesario crear *rasters* que clasifiquen cada píxel en celdas "quemadas" y "no quemadas" para calcular los parámetros a , b , y c de la Ecuación 2 (Figura 10) y generar las matrices

de error de la Ecuación 3 (Tabla 3 y Tabla 4). Los valores del coeficiente de Sorensen obtenidos son 0,81 y 0,85 para el Caso 1 y el Caso 2, respectivamente. Los valores del coeficiente kappa de Cohen son 0,78

y 0,81 para el Caso 1 y el Caso 2, respectivamente. Es decir, la simulación donde se complementó la información de *OpenStreetMap* con observaciones en campo presenta mejores resultados.

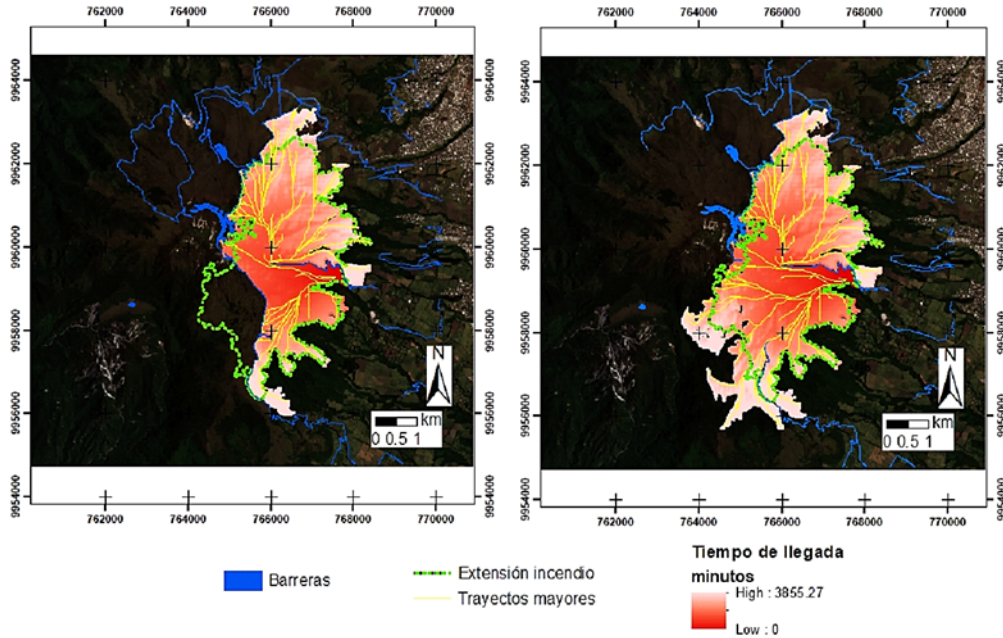


Figura 9. Simulación de trayectos principales y tiempo de llegada para Caso 1 (izquierda) y Caso 2 (derecha) (elaboración propia).

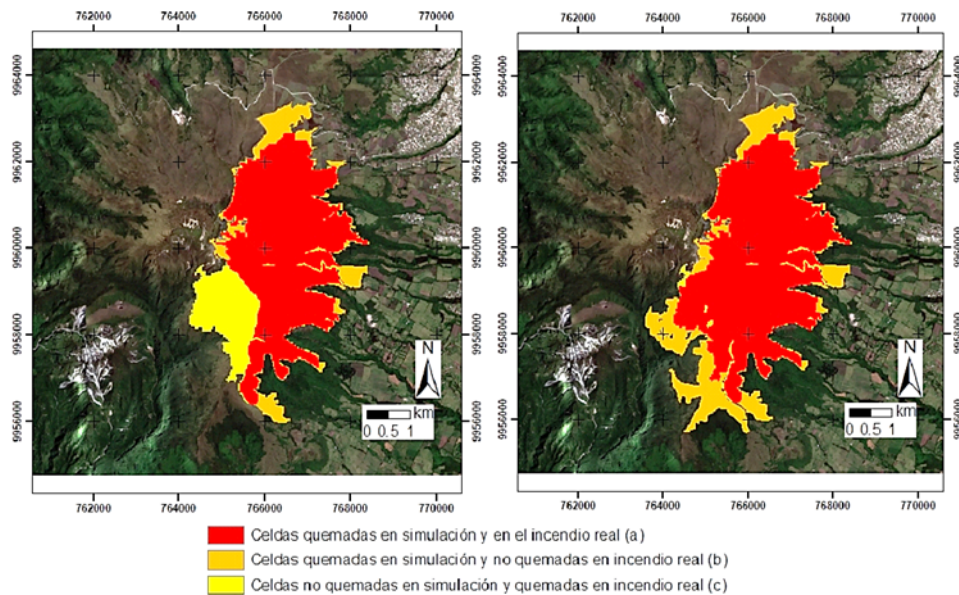


Figura 10. Parámetros para cálculo de coeficientes de Sorensen y kappa de Cohen para Caso 1 (izquierda) y Caso 2 (derecha) (elaboración propia).

Tabla 3. Matriz de error simulación Caso 1 (elaboración propia).

	Celda quemada (Simulación)	Celda no quemada (Simulación)	Total
Celda quemada (Real)	25920	6732	32652
Celda no quemada (Real)	5190	183743	188933
Total	31110	190475	221585

Tabla 4. Matriz de error simulación Caso 2 (elaboración propia).

	Celda quemada (Simulación)	Celda no quemada (Simulación)	Total
Celda quemada (Real)	31771	881	32652
Celda no quemada (Real)	10772	178161	188933
Total	42543	179042	221585

3.3 Simulación de escenarios de interés

Con el modelo validado se puede generar distintas simulaciones; en esta investigación se simulan tres escenarios de interés. El primer escenario considera condiciones climáticas extremas con precipitaciones nulas. Se puede observar que el fuego se propaga al suroeste a través de vegetación categorizada como bosque húmedo poco alterado y llega a una zona de altas pendientes (Figura 11), lo que provoca que el incendio se extienda en una gran área que sobrepasa la zona de estudio. En el segundo escenario se simula el comportamiento del incendio ante la falla de una barrera de fuego ubicada al norte de la cima. Se puede observar como el fuego se propaga a una gran área al oeste del cerro Atacazo (Figura 11). El tercer escenario considera dos tratamientos de combustibles; el primer tratamiento consiste en colocar una barrera de fuego que corte los trayectos principales que llevan el incendio hacia el suroeste en el primer escenario; el segundo tratamiento extiende un camino cercano a la cima creando una barrera

que inicia en la frontera agraria, en la parte inferior del cerro, y termina en su cima (Figura 12).

4 Discusión

A pesar de que los coeficientes de Sorensen y kappa de Cohen muestran gran similitud entre las simulaciones y el incendio real, y sus valores concuerdan con estudios similares (Jahdi y col., 2016), se debe mencionar que, entre otras razones, esto se debe a la homogeneidad de la vegetación en la zona. La confiabilidad de la metodología propuesta puede aumentar calibrando el modelo con varios incendios antes de aplicarlo para la simulación de escenarios de interés, por lo que se recomienda hacerlo con al menos tres incendios (Stratton, 2009). En especial, se recomienda calibrar las humedades de los modelos de combustible y las barreras de fuego; para esto se puede combinar simulaciones con observaciones en campo, medidas experimentales o imágenes satelitales.

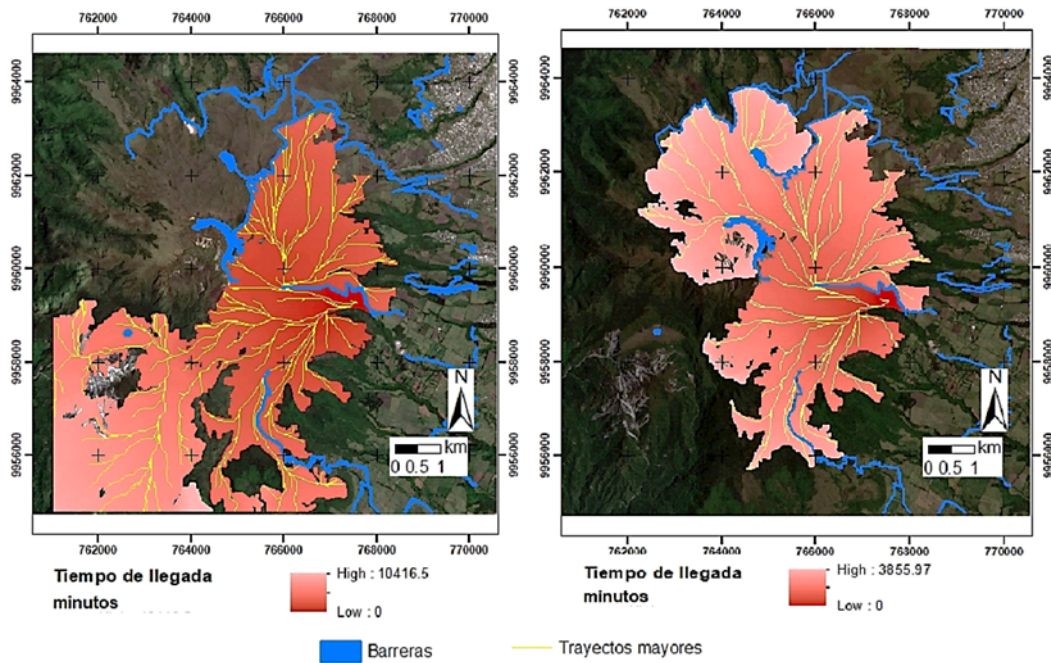


Figura 11. Simulación de trayectos principales y tiempo de llegada para el primer (izquierda) y segundo (derecha) escenario (elaboración propia).

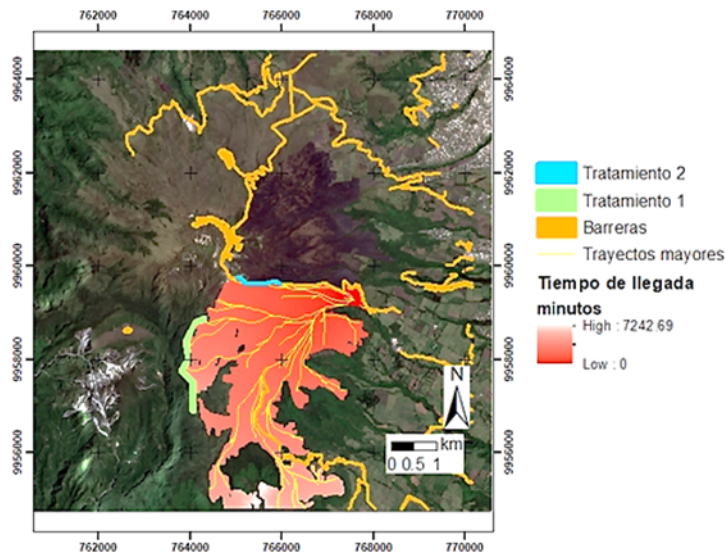


Figura 12. Simulación de trayectos principales y tiempo de llegada para el tercer escenario (elaboración propia).

Por otro lado, existen varias fuentes de error que (tampoco se cuenta con información al respecto); los modelos de combustibles usados corresponden a vegetación de ecosistemas presentes en Estados Unidos, lo que excluye ecosistemas típicos de la

cordillera de los Andes, por lo que resulta de interés desarrollar modelos de combustibles propios de la zona de estudio (Elia y col., 2015); mucha información usada no fue levantada con el propósito de simular incendios, para esto se puede levantar desde cero los datos de combustibles y vegetación usando técnicas de Detección y Medición de Objetos por Láser (LIDAR; *Laser Imaging Detection and Ranging*) (Jakubowski y col., 2013; Stefanidou y col., 2020), muestreo aleatorio estratificado, imágenes satelitales multiespectrales, clasificación supervisada, o alguna combinación de estas técnicas. Por otro lado, las condiciones meteorológicas se tomaron de una estación ubicada a más de un kilómetro del cerro Atacazo y el cálculo de los coeficientes de Sorense y kappa de Cohen se realizó con la extensión final del incendio, por lo que no se tiene información de la exactitud del modelo para representar su evolución temporal (Stratton, 2009).

Se puede apreciar, tanto en las simulaciones como en el incendio real, que las zonas clasificadas como páramo herbáceo poco alterado poseen alta propagación de fuego, siendo las barreras de fuego y el cambio de vegetación las limitantes en la extensión final del incendio. El identificar estas limitantes es de gran importancia debido a que el cerro Atacazo posee, al oeste de su cima, una gran cantidad de vegetación de este tipo por donde puede propagarse un incendio si las barreras de fuego no lograsen contenerlo.

Por otro lado, la simulación con el cálculo de las humedades de combustibles en base a las condiciones meteorológicas cambiantes del archivo WSX permite que los resultados se acerquen mucho más al comportamiento real del incendio (Finney, 2006). Una simulación con condiciones meteorológicas fijas implicaría omitir el aumento de la humedad y la disminución de la temperatura en las noches y madrugadas, pudiendo provocar que el fuego se propague por zonas con vegetación de tipo bosque húmedo poco alterado o matorral húmedo muy alterado. En un escenario real, esto correspondería a un incendio que tiene lugar en un verano inusualmente seco y condiciones meteorológicas extremadamente desfavorables (pocas lluvias y vientos fuertes).

Es importante mencionar la efectividad en el control de un incendio que muestra la implementación de barreras de fuego estratégicamente ubica-

das (Figura 12), llegando a ser elementos decisivos en la expansión de un incendio en grandes áreas. Además, su implementación es común en otros países (Rigolot y col., 2004) y resulta bastante conveniente por la existencia de varios senderos y caminos comúnmente usados por turistas y trabajadores, sin embargo, el impacto ecológico de su implementación aún está en discusión (Shinneman y col., 2019). Cabe mencionar que una barrera de fuego correctamente diseñada puede cumplir un doble propósito, primero impedirá la propagación del fuego, y luego facilitará el acceso de personal del cuerpo de bomberos al lugar.

5 Conclusiones

Este trabajo tomó el caso de estudio del incendio del cerro Atacazo que inició el 29 de septiembre del 2018, para evaluar el uso de la información disponible en el DMQ en el modelado y simulación de incendios forestales, usando el software FlamMap. En el DMQ, no existe información levantada dirigida específicamente al modelado y simulación de estas emergencias. En especial, hacen falta datos del tipo de combustible y porcentaje de cobertura vegetal del territorio. Como se mencionó en varias ocasiones, los datos utilizados para estimar los modelos de combustible y los porcentajes de cobertura vegetal no fueron levantados con el propósito de ser usados en el modelado y simulación de incendios forestales. Por esta razón, existen muchas formas de mejorar la confiabilidad de los resultados de la simulación en base a una mejora en la generación de los *rasters* de modelos de combustible y porcentajes de vegetación. Algunas opciones son:

- Generar modelos de combustible propios del DMQ: Los modelos de Scott-Burgan están desarrollados para los tipos de vegetación presentes en Estados Unidos, por lo que usarlos en el DMQ implica una aproximación que puede mejorarse, generando modelos propios para los ecosistemas de alta montaña de la cordillera de los Andes del DMQ (Elia y col., 2015).
- Generar mapas de combustibles y cobertura vegetal desde cero. Las aproximaciones realizadas al levantar los datos de los mapas de cobertura vegetal y uso de las tierras utilizadas en este trabajo pueden implicar grandes cambios en la simulación de un incendio.

Por ejemplo, una pequeña zona mal clasificada puede provocar que el fuego se expanda en áreas muy grandes en una simulación. Además, una zona con un determinado tipo de combustible puede contener áreas con distinto porcentaje de cobertura, lo que implica que el fuego se propague de distinta forma

Referencias

- Andrews, P. (2018). «The Rothermel surface fire spread model and associated developments: A comprehensive explanation». En: *USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR 371*, 1–121. Online: <https://bit.ly/3fUaBdJ>.
- Bakhshaii, A. y E. Johnson (2019). «A review of a new generation of wildfire-atmosphere modeling». En: *Canadian Journal of Forest Research* 49.6, 565-574. Online: <https://bit.ly/3CEYH1b>.
- Banko, G. (1998). *A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data and of Methods Including Remote Sensing Data in Forest Inventory*. International Institute for Applied Systems Analysis. Online: <https://bit.ly/3AGan1U>.
- Barkhordarian, A. y col. (2019). «A recent systematic increase in vapor pressure deficit over tropical South America». En: *Scientific reports* 9.1, 1-12. Online: <https://go.nature.com/37A2rCK>.
- Botequim, B. y col. (2017). «Coupling fire behaviour modelling and stand characteristics to assess and mitigate fire hazard in a maritime pine landscape in Portugal». En: *European Journal of Forest Research* 136.3, 527-542. Online: <https://bit.ly/3jPbwgA>.
- Botequim, B. y col. (2019). «Improving silvicultural practices for Mediterranean forests through fire behaviour modelling using LiDAR-derived canopy fuel characteristics». En: *International Journal of Wildland Fire* 28.11, 823-839. Online: <https://bit.ly/3iIoAFc>.
- Conver, J. y col. (2018). «Modeling fire pathways in montane grassland-forest ecotones». En: *Fire Ecology* 14.1, 17-32. Online: <https://bit.ly/2VIs69z>.
- Cuerpo de Bomberos DMQ (2018). *Plan de Prevención y Respuesta a Incendios Forestales 2018*. Cuerpo de Bomberos DMQ. Online: <https://bit.ly/3CMrgti>.
- DeMagalhães, S. y col. (2017). «Fire behaviour in different periods and configurations of a landscape in Northeastern Portugal». En: *Ciência Florestal* 27.2, 457-469. Online: <https://bit.ly/3jJz8TG>.
- Elia, M. y col. (2015). «Developing custom fire behavior fuel models for Mediterranean wildland-urban interfaces in southern Italy». En: *Environmental management* 56.3, 754-764. Online: <https://bit.ly/3yDpA2Z>.
- Finney, M. (2006). «An overview of FlamMap fire modeling capabilities». En: *Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings*, 213–220.
- Fitch, R. y col. (2018). «Changes in potential wildland fire suppression costs due to restoration treatments in Northern Arizona Ponderosa pine forests». En: *Forest policy and economics* 87, 101-114. Online: <https://bit.ly/3yIPK4z>.
- Government of Canada (2020). «Fire management». Online: <https://bit.ly/2UcarGP>.
- Govil, K. y col. (2020). «Preliminary results from a wildfire detection system using deep learning on remote camera images». En: *Remote Sensing* 12.1, 1-15. Online: <https://bit.ly/37B8dny>.
- Hernández, L. y col. (2007). «Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata». En: *Applied mathematical modelling* 31.6, 1213-1227. Online: <https://bit.ly/3m3TXMv>.
- Jahdi, R. y col. (2016). «Evaluating fire modelling systems in recent wildfires of the Golestan National Park, Iran». En: *Forestry* 89.2, 136-149. Online: <https://bit.ly/2Ue6EzL>.
- Jahdi, R. y col. (2019). «Fire modelling to assess spatial patterns of wildfire exposure in Ardabil, NW Iran». En: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 577–581. Online: <https://bit.ly/3m02DU0>.
- Jakubowski, M. y col. (2013). «Predicting surface fuel models and fuel metrics using Lidar and CIR imagery in a dense, mountainous forest». En: *Photogrammetric Engineering y Remote Sensing* 79.1, 37-49. Online: <https://bit.ly/37CGHpA>.
- MAAE (2020). «Mapa interactivo». Accessed: 5 October 2020. Online: <https://bit.ly/3swh6Ze>.
- MAGAP (2015). *Memoria técnica DMQ - Proyecto Cartografía Temática Escala 1:25000*.
- Moore, P. y col. (2003). «Forest and wildfires: fixing the futures by avoiding the past». En: XII

- World Forestry Congress. Online: <https://bit.ly/3mlEnfl>.
- Mujtaba, T. y M. Wani (2018). «Object detection from satellite imagery using deep learning». En: *5th IEEE international conference on computing for sustainable global development*.
- NASA (2021). «FIRMS». Online: <https://go.nasa.gov/3AR0zlw>.
- Palaiologou, P. y col. (2020). «Development of comprehensive fuel management strategies for reducing wildfire risk in Greece». En: *Forests* 11.8, 789. Online: <https://bit.ly/3yVgkXW>.
- Rigolot, E. y col. (2004). «Recommendations for fuel-break design and fuel management at the wildland urban interface: an empirical approach in south eastern France». En: *Institute of Mediterranean forest ecosystems and forest products warm international workshop, Athènes*, 131-142. Online: <https://bit.ly/3CJImrX>.
- Rios, O. y col. (2019). «A data-driven fire spread simulator: Validation in Vall-Llobrega's fire». En: *Frontiers in Mechanical Engineering* 5, 1-11. Online: <https://bit.ly/2VM5dlC>.
- Scott, J. y R. Burgan (2005). *Standard fire behavior fuel models: A comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model*. USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR. Online: <https://bit.ly/3CJtGc9>.
- Secretaría de Seguridad DMQ (2015). «Atlas de amenazas naturales y exposición de infraestructura del Distrito Metropolitano de Quito». Online: <https://bit.ly/37AHasF>.
- Shinneman, D. y col. (2019). «The ecological uncertainty of wildfire fuel breaks: examples from the sagebrush steppe». En: *Frontiers in Ecology and the Environment* 17.5, 279-288. Online: <https://bit.ly/2UfFIJ6>.
- Srivastava, A. y col. (2018). «A simulation study to estimate effects of wildfire and forest management on hydrology and sediment in a forested watershed, Northwestern US». En: *Transactions of the ASABE* 61.5, 1579-1601. Online: <https://bit.ly/3jPK5TS>.
- Stefanidou, A. y col. (2020). «LiDAR-based estimates of canopy base height for a dense uneven-aged structured forest». En: *Remote Sensing* 12.10, 1565. Online: <https://bit.ly/3jJIeQk>.
- Stratton, R. (2009). *Guidebook on LANDFIRE Fuels Data Acquisition, Critique, Modification, Maintenance, and Model Calibration*. Critique.
- Xofis, P. y col. (2020). «Integrating remote sensing methods and fire simulation models to estimate fire hazard in a south-east Mediterranean protected area». En: *Fire* 3.3, 31. Online: <https://bit.ly/37GnKT0>.
- Zigner, K. y col. (2020). «Evaluating the ability of farsite to simulate wildfires influenced by extreme, downslope winds in Santa Barbara, California». En: *Fire* 3.3, 29. Online: <https://bit.ly/3xHXguY>.