



Modelación dinámica de incendios forestales en los Cerros Orientales de Bogotá, Colombia

Dynamic modeling of forest fires in the Eastern Hills of Bogota, Colombia

Korina Ocampo-Zuleta¹ y Julio Beltrán-Vargas²

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. Bogotá D.C., Colombia.

² Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Bogotá D.C., Colombia.

* Autor de correspondencia. korinaocampo@zuleta@gmail.com

RESUMEN

Se propone un modelo de simulación para explicar la dinámica de incendios forestales en los Cerros Orientales de Bogotá, para lo cual se tiene en cuenta el número de eventos de fuego en la zona, la variabilidad climática y factores como balance hídrico, cobertura vegetal, bienes y servicios ecosistémicos, retamo espinoso (*Ulex europaeus*) y causalidad del fuego, que explican la incidencia de cada uno en la generación de incendios. La modelación se basó en la correlación de las variables y la obtención de la fórmula del modelo mediante regresión lineal. El comportamiento del ciclo hidrológico tiene en cuenta dos años con menor y mayor precipitación, 2001 y 2011 respectivamente, donde se evidencia la importancia de la infiltración en la ocurrencia de los incendios forestales y la dispersión del retamo espinoso. En cuanto a la cobertura vegetal, se muestra la influencia que tiene el cambio de uso en el suelo, además de ser una de las causales en la pérdida de los bienes y servicios ecosistémicos provistos por los bosques, junto con la propagación rápida de la especie invasora retamo espinoso que, por sus habilidades de dispersión y de producción de cobertura seca, es un factor de propagación de incendios forestales. Finalmente, se logró determinar que el número de incendios forestales es de seis (6) cuando la temperatura es alta, la precipitación baja y se mantiene constante el combustible (vegetación).

PALABRAS CLAVE: Cerros Orientales, cobertura vegetal, bienes y servicios ecosistémicos, *Ulex europaeus*.

ABSTRACT

A simulation model is proposed to explain the dynamics of forest fires in the Eastern Hills of Bogotá, taking into account the number of fire events in the area, climatic variability and some factors such as hydric balance, vegetation cover, both goods and ecosystem services, gorse (*Ulex europaeus*) and fire causes, which explain the incidence of each one in the generation of fires. This modeling was based on the correlation of the variables and obtaining the formula of the model by linear regression. The behavior of the hydrological cycle takes into account two calendar years, one with low and another with greater precipitation, 2001 and 2011 respectively, where the importance of infiltration in the occurrence of forest fires and the dispersion of gorse is evident. Regarding the vegetation cover, the influence of the change of use in the soil is shown, in addition to being one of the causes in the loss of the goods and services provided by the forests, along with the rapid propagation of the invasive species, known as gorse that, due to its scattering and dry coverage as well as production abilities, it is clearly a factor in the spread of forest fires. Finally, it was determined that the number of forest fires is six (6) when the following conditions are given: first the temperature is high, secondly the precipitation is low and thirdly the fuel (vegetation) is kept constant.

KEYWORDS: Eastern Hills, vegetation cover, goods and ecosystem services, *Ulex europaeus*.

INTRODUCCIÓN

Los Cerros Orientales de Bogotá, son un sistema montañoso perteneciente a la Estructura Ecológica Principal de la ciudad, caracterizado por presentar bosques naturales y mixtos, mezclados en su gran mayoría vegetación exótica como plantaciones forestales y monocultivos de uso agropecuario; además, de la invasión biológica del retamo espinoso (*Ulex europaeus*), que constituyen factores de degradación de la reserva forestal y tienen alta incidencia en la aparición de fuego de origen antrópico (Cortés, Van der Hammen y Rangel, 1999; León y Vargas, 2011).

Desde hace varios años se presentan fluctuaciones en el clima, producidas en gran medida por la interacción de distintos componentes del sistema climático (Montealegre y Pabón, 2000). Sin embargo, estos cambios también están relacionados con las actividades humanas, las cuales fortalecen el efecto invernadero (Pabón, 2003).

Por esta razón, es importante la generación de modelos de predicción de incendios forestales que consideren variables físicas, ecológicas y antrópicas. Esos modelos podrían contribuir para pronosticar el comportamiento de los fuegos en diferentes zonas (Návar, 2011; Pompa-García, Vásquez-Vásquez, Zapata-Molina y Solís-Moreno, 2012; Avila, Pompa y Vargas, 2010), de forma tal que su pronóstico ayude no solo en la conservación de los ecosistemas de cada uno de los países donde sean aplicados, sino también vele por la protección de los asentamientos humanos, el suministro de bienes y servicios ecosistémicos que proveen cada uno de los bosques que podrían ser afectados (Alvear, 2004; Amaya y Armenteras, 2012).

La expectativa central de la simulación de los incendios no solo se basa en la obtención de un modelo estadístico, matemático o dinámico que asuma las condiciones naturales, sino también, un modelo que permita conocer la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales con efectos ambientales negativos como la producción de los gases de efecto invernadero, la afectación del ciclo hidrológico, pérdida de suelos, pérdida de cobertura vegetal, procesos de sedimentación de cauces, pérdida de la biodiversidad, contaminación de aguas, cambios

microclimáticos y alteración en procesos migratorios. Además del riesgo de pérdida de los bienes y servicios ecosistémicos que los seres humanos obtenemos de ellos (Castillo, Pedernera y Peña, 2003; Parra y Bernal-Toro, 2011; Pabón, 2012).

Es así como se presenta la oportunidad de evaluar los factores naturales como la precipitación y la evapotranspiración mediante modelos y escenarios climáticos, como lo mencionan Watson, Zinyowera y Moss (1996), donde se evalúen consecuencias económicas, ecológicas y sociales derivadas de estas interacciones. Villanueva-Solis, Ranfla y Quintanilla-Montoya, 2013, explican cómo la modelación dinámica es una herramienta que permite describir, analizar y evaluar sistemas complejos, siendo los modelos una simplificación de la realidad. El programa Stella 9.3 (Isee systems inc., 2014) presenta una posibilidad de interacción cualitativa entre las variables que se pretende analizar, de forma que se puede usar para analizar los sistemas biológicos, físicos y sociales (Cervantes, Chiappa y Dias, 2009).

Para Yebra-Álvarez, de Santis y Chuvieco (2005), uno de los principales factores del comportamiento del fuego está basado en los combustibles vegetales, pues sus características de combustibilidad y humedad son claves en la ignición y el comportamiento del fuego. La dinámica del fuego está asociada con coberturas vegetales y está condicionada por factores climáticos, además que guarda estrecha relación con el área urbana (Parra y Bernal-Toro, 2011).

A pesar de que exista una alta precipitación, el rendimiento hídrico es mayor para suelos con vegetación nativa pues tienen mejor capacidad de regular los niveles de agua por infiltración y almacenamiento, caso contrario ocurre con las plantaciones forestales que tienen un alto nivel de evapotranspiración (Otero, Contreras y Barrales, 1994).

La modelación de incendios forestales en los Cerros Orientales se ha realizado en ejercicios académicos con simuladores del comportamiento del fuego, que relacionan el tipo de material vegetal con las condiciones climáticas como variables determinantes en la ocurrencia de estos



eventos. Un ejemplo de esto el modelo planteado por Tellez-Aljure (2004), quien realizó una modelación de riesgo de incendios de la cobertura vegetal. Posteriormente, Verano-Velásquez (2013) realizó el modelamiento y simulación de incendios con el uso del software Farsite. Por su parte, Jaque, Sánchez y Álvarez (2016) establecieron una metodología para la estimación de amenaza de incendios por medio de imágenes satelitales. Y Morales (2017), desarrolló a través del álgebra de mapas y simulación la determinación del riesgo de ignición y propagación de los incendios.

OBJETIVOS

El objetivo de este estudio fue realizar la modelación dinámica de incendios forestales a partir de la relación entre variables como: balance hídrico, cobertura vegetal exótica y probabilidad de ocurrencia de los incendios ocasionados por las actividades de los pobladores de la franja limítrofe de la reserva, para caracterizar la dinámica del incendio forestal bajo diferentes condiciones ambientales. Los resultados de la modelación aportarán información importante a las autoridades locales para establecer medidas más eficaces para la protección de la biodiversidad de la zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Los Cerros Orientales se localizan en la capital de Colombia, en el departamento de Cundinamarca (Fig. 1), con un área aproximada de 14 170 ha, en un intervalo altitudinal que oscila entre los 2600 m y los 3500 m; una precipitación entre los 600 mm (extremo sur) y los 1500 mm (extremo norte); con una temperatura media anual entre 8 °C y 13 °C sobre la cota de los 2750 m snm y una humedad relativa, entre 75% y 80%, en un régimen casi uniforme a lo largo del año (Corporación Autónoma de Cundinamarca [CAR], 2006).

Los Cerros Orientales se encuentran en el área de influencia de cinco (5) de las 20 localidades con las que cuenta la ciudad de Bogotá, en esta zona habitan alrededor

de 82 000 personas. Los factores asociados que influyen en la propagación de los incendios forestales son las plantaciones de especies exóticas de pino, eucalipto, acacia y retamo liso y espinoso, que influyen en la pérdida de coberturas nativas, y la desaparición de agua superficial. La biomasa genera combustible para la incidencia de incendios forestales, entre 2010 y 2017 se presentaron 127 eventos relacionados directamente con las condiciones meteorológicas (Unidad Administrativa Especial Cuerpo Oficial de Bomberos Bogotá [Uaacob], 2017). Además, existen actividades mineras extractivas como las canteras que generan grandes impactos ambientales y acciones de urbanismo que van en contra de lo reglamentado por las leyes en la protección de los Cerros (Garzón, 2014).

Componentes del modelo

Las variables usadas para el desarrollo del modelo fueron elegidas por la influencia en la generación y propagación de un incendio forestal, como el balance hídrico y las alteraciones suscitadas del mismo por la influencia del fenómeno El Niño.

Se tuvieron en cuenta las coberturas vegetales nativas y exóticas, además de los procesos de restauración ecológica, con la introducción de individuos vegetales. Estas coberturas han sido afectadas por el cambio de uso del suelo, generando índices de deforestación altos dados por los cultivos y la urbanización, dando paso a la invasión por parte de especies exóticas. Para este caso, se hace énfasis en la especie invasora *Ulex europaeus* sobre otras especies por sus características biológicas, pues al ser pirogénica facilita su dispersión y la propagación de incendios. Esta especie generalmente se encuentra asociada a otras coberturas como las plantaciones forestales. Por su porte arbustivo y por su rápida colonización de espacios, genera pérdida de biodiversidad, de servicios ecosistémicos importantes para la supervivencia, como la regulación del clima, purificación de agua, descontaminación del aire, control de inundaciones, recreación y paisaje. Además, se convierte en combustible potencial para los eventos de fuego (Ríos, 2005).

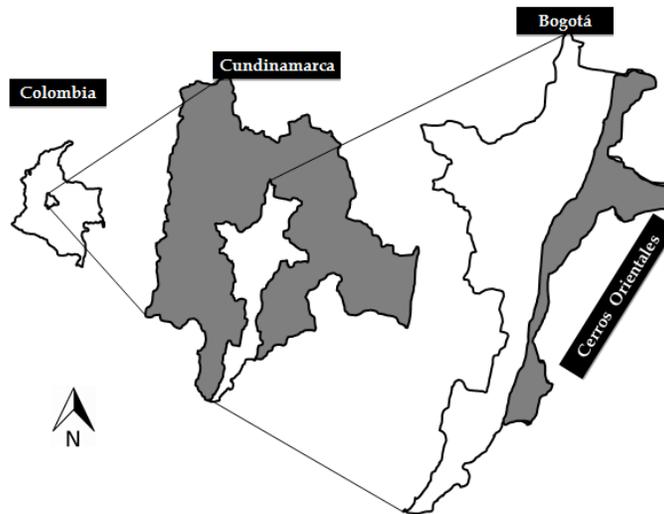


FIGURA 1. Localización de los Cerros Orientales de Bogotá, Colombia.

TABLA 1. Variables utilizadas para el desarrollo del submodelo de balance hídrico.

<i>Dirección</i>	<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Fuente</i>
Entrada	Precipitación	mm/mes	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] (2014)
Entrada	Área reserva	ha/mes	CAR (2006)
Entrada	Precipitación efectiva	mm/mes	Cálculo a partir de datos IDEAM (2014)
Salida	Interceptación	mm/mes	Ideam (2014)
Stock	Evapotranspiración	mm/mes	Ideam (2014)
Salida	Infiltración	mm/mes	Cálculo a partir de datos IDEAM (2014)

Balance hídrico. El intercambio de agua entre el océano, la atmósfera y la corteza terrestre constituye el ciclo hidrológico que actúa sobre la dinámica de la humedad del suelo (Guarín y Poveda, 2013). Los cambios en la humedad del suelo reflejan el comportamiento de la precipitación, es así como en Colombia el fenómeno El Niño es el principal modulador de la hidrología, pues se presentan anomalías negativas en la precipitación, en la humedad del suelo, en la actividad vegetal y en los caudales de los ríos (Poveda,

Ramírez y Jaramillo, 2001; Mendoza, Bocco, López y Bravo, 2002; Magaña y García, 2002).

La interrelación entre las variables meteorológicas afecta el contenido de humedad de los diferentes combustibles, ejerciendo un factor predominante en la frecuencia y ocurrencia de los incendios forestales (Aguado y Camia, 1998; Cocero, Riaño y Chuvieco, 1998). Las variables consideradas para la construcción del submodelo de balance hídrico se presentan en la tabla 1.



Cobertura vegetal. La cobertura vegetal está relacionada directamente con la dinámica del agua en un ecosistema, por lo que la densidad, la estructura de la vegetación, la capacidad de infiltración son indicadores y condicionantes, al mismo tiempo, de los cambios hidromorfológicos de los bosques (Rodríguez-Aizpeolea, Pérez-Badia y Cerda-Bolinches, 1991). De la misma manera, la resistencia de la vegetación a prolongados periodos de sequía y su eficiencia en el uso del agua, según las características del suelo (Younis, Gilabert y Meliá, 1999), incentivan la producción de material seco que se convierte en combustible para los incendios forestales.

Los principales factores que amenazan los bosques son el cambio en el uso del suelo y la presión antrópica sobre los recursos forestales (Franco, Regil y Ordoñez, 2012). Lo que ocasiona la deforestación por disminución del arbolado, pérdida de biodiversidad, la proliferación de plagas y enfermedades que desencadenan la afectación de los suelos (López-Granados, Mendoza y Acosta, 2002). Las variables consideradas para la construcción del submodelo de cobertura vegetal se presentan en la tabla 2.

Retamo espinoso. La colonización por parte de especies invasoras como consecuencia de cambios en los intervalos de distribución geográfica y preferencias de hábitats perturbados (Parra y Bernal-Toro, 2010), influyen en la modificación de las zonas donde se les localiza. Se han realizado varias investigaciones que caracterizan al retamo espinoso (*Ulex europaeus*) como una especie pirogénica, pues tiene al rebrote como uno de los mejores mecanismos de piroresistencia (Bodi, Cerdá, Mataix-Solera y Doerr, 2012). Su alta tasa reproductiva, capacidad de acumulación de semillas (Ocampo-Zuleta y Solorza-Bejarano, 2017) e intensificación de competencia hacen que puedan persistir en el suelo por lo menos 30 años (Clements, Peterson y

Prasad, 2001). Sin embargo, la mortalidad está dada por las altas temperaturas que puede alcanzar del suelo (Torres, 2009).

La cantidad de materia seca acumulada tanto en las ramas de *Ulex europaeus* como en el suelo, pueden actuar como combustible y generar la expansión rápida de los incendios forestales, haciendo a su vez la dispersión de semillas (Vargas, León y Díaz, 2009). Las variables consideradas para la construcción del submodelo de retamo espinoso se presentan en la tabla 3.

Bienes y servicios ecosistémicos. Los bosques han sido históricamente apreciados como estructuras naturales productoras de madera útil para la construcción de viviendas, herramientas y como fuentes de leña y carbón. Además de estos servicios de aprovisionamiento, cuyo valor de intercambio lo establecen los mercados, los bosques proveen servicios adicionales importantes para las comunidades humanas (Meynard *et al.*, 2007; Vilanova, 2011). No obstante, la constante presión antrópica sobre los hábitats naturales ha provocado que estos sean incapaces de suministrar estos beneficios en el mismo nivel que el pasado (Fernández *et al.*, 2010). A causa del crecimiento de la población, el consumo y la tecnología, aumenta el potencial de degradación de los ecosistemas, en especial la tala de bosques, alteración de ríos, minería y pastoreo (Shlisky *et al.*, 2007; Anderson *et al.*, 2012).

Las quemadas continuas son otro generador de pérdida de cobertura vegetal, el fuego es uno de los mecanismos comúnmente usados en diferentes sistemas de producción, ya sea para el rebrote de pasturas o para la preparación del terreno para la siembra y la eliminación de residuos sólidos en áreas rurales (Sarmiento y Fonseca, 2010). Las variables para la construcción del submodelo de bienes y servicios ecosistémicos se presentan en la tabla 4.

TABLA 2. Variables utilizadas para el desarrollo del submodelo de cobertura vegetal.

<i>Dirección</i>	<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Fuente</i>
Entrada	Restauración	m ² /mes	CAR (2006)
Entrada	Bosque plantado	m ² /mes	CAR (2006)
Entrada	Bosque natural	m ² /mes	CAR (2006)
Stock	Bosque	m ² /mes	CAR (2006)
Salida	Deforestación	m ² /mes	Cálculo a partir de datos CAR (2006)
Salida	Cambio uso del suelo	m ² /mes	CAR (2006)

TABLA 3. Variables utilizadas para el desarrollo del submodelo de retamo espinoso.

<i>Dirección</i>	<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Fuente</i>
Entrada	Germinación	m ² /mes	Ríos (2005)
Entrada	Tasa de germinación	Adimensional	Ríos (2005)
Entrada	Precipitación	mm/mes	Ideam (2014)
Entrada	Área de los Cerros	m ² /mes	CAR (2006)
Stock	Retamo espinoso	m ² /mes	CAR (2006)
Salida	Mortalidad	m ² /mes	Ríos (2005)
Entrada	Tasa de mortalidad	Adimensional	Ríos (2005)

TABLA 4. Variables utilizadas para el desarrollo del submodelo de bienes y servicios ecosistémicos.

<i>Dirección</i>	<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Fuente</i>
Independiente	Agua	Adimensional	Encuesta diagnóstico social
Independiente	Madera	Adimensional	Encuesta diagnóstico social
Independiente	Paisaje	Adimensional	Encuesta diagnóstico social
Independiente	Producción de oxígeno	Adimensional	Encuesta diagnóstico social
Independiente	Riqueza de especies	Adimensional	Encuesta diagnóstico social
Independiente	Almacenamiento de Carbono	Adimensional	Encuesta diagnóstico social
Entrada	Oferta	m ² /mes	CAR (2006)
Stock	Bienes y servicios	m ² /mes	CAR (2006)
Salida	Pérdida	m ² /mes	CAR (2006)
Entrada	Bosque	m ² /mes	CAR (2006)
Entrada	Incendios Forestales	Número	Modelación



Incendios forestales. El fuego es un proceso de disturbio con fuerte influencia en la estructura composición y dinámica forestal, por esta razón la modelación debe ser considerada como una herramienta para orientar en acuerdos de protección y prevención de incendios (Altamirano, Salas, Yaitul, Smith-Ramírez y Ávila, 2013). Autores que han modelado los incendios forestales, como Villers (2006) indica que los componentes que pueden influenciar la generación de un incendio son la distribución de los combustibles forestales es uno de los patrones más difíciles de modelar dados sus continuos cambios, la humedad de los combustibles, determinada por la precipitación, y la interceptación y el tiempo atmosférico. Las variables consideradas para la construcción del submodelo de incendios forestales se presentan en la tabla 5.

Modelación de componentes

Para la modelación general se usó el programa Stella 9.3 (Isee systems inc., 2014), donde se ingresaron los datos para cada uno de los componentes. Para el componente del balance hídrico se usó la metodología descrita por Nívar (2011) y Méndez (2013), quienes usan un submodelo hidroclimático para estimar los efectos de la precipitación, la evapotranspiración y el contenido de humedad en el suelo para predecir el riesgo de incendios. Los datos usados

para alimentar el modelo fueron tomados de la estación hidrometeorológica Venado de Oro de los años 2001 y 2011, los cuales fueron de menor y mayor precipitación respectivamente; estos datos muestran el nivel de humedad en el suelo en los Cerros Orientales y la vulnerabilidad a presentar incendios.

El método clasificado como balance de masas (Nívar, 2011) describe cómo la el agua que ingresa por precipitación se distribuye en el área con salidas, sean estas evapotranspiración, interceptación o infiltración, que permiten establecer la humedad existente en la zona de estudio (Ec. 1).

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = n(c)P'_G + \left(\frac{cE_c}{R}\right) \sum_{j=1}^n (P'_{Gj} - P'_G) + (c) \sum_{j=1}^m P_{Gj} + qS_c + p_t \sum_{j=1}^{n-q} P_{Gj} \tag{1}$$

donde:

- c*: proporción del suelo sin cobertura forestal (%)
- E_c*: tasa de evaporación del agua interceptada (%)
- R*: intensidad de la lluvia sobre la cobertura
- P'_G*: cantidad de lluvia necesaria para iniciar la redistribución del agua en el suelo (cm)
- q*: precipitación que no sobrepasa P'_G (cm)
- S_c*: cantidad de agua necesaria para saturar la cobertura (cm)
- p_t*: proporción de la lluvia que es escorrentía (%)

TABLA 5. Variables utilizadas para el desarrollo del submodelo de incendios forestales.

<i>Dirección</i>	<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Fuente</i>
Entrada	Quemas y fogatas	Adimensional	Encuesta de diagnóstico social
Entrada	Tránsito de vehículos	Adimensional	Encuesta de diagnóstico social
Entrada	Fumadores	Adimensional	Encuesta de diagnóstico social
Entrada	Intencional	Adimensional	Encuesta de diagnóstico social
Entrada	Causalidad	Adimensional	Encuesta de diagnóstico social
Stock	Generación	Numero	Modelación
Salida	Incendios forestales	Numero	Modelación
Entrada	Infiltración	m ² /mes	CAR (2006)
Entrada	Bosque	m ² /mes	CAR (2006)
Entrada	Cambio de uso del suelo	m ² /mes	CAR (2006)

Para el desarrollo del componente de cobertura vegetal, se utilizó la simulación de la expansión urbana de Eppink, van der Bergh y Rietveld (2004), donde el cambio en el uso de la tierra y sus efectos sobre la biodiversidad tienen en cuenta variables exógenas (Ec. 2); los resultados obtenidos son la disminución de las áreas de bosque como consecuencia del aumento rápido en urbanización y preparación de suelos para cultivos y ganadería (Parra y Bernal-Toro, 2011).

$$Nt = K - Ut - At \quad (2)$$

donde:

Nt : tierra natural en el periodo t (m^2 , ha)

K : oferta fija de suelo, que logra comprobar la deforestación causada por la rápida expansión de las edificaciones alrededor de espacios verdes (m^2 , ha).

U y A , crecen con el tiempo, mientras que N , solo puede disminuir. El área natural se estabiliza cuando se detiene el crecimiento urbano.

Para el componente de especies invasoras, en particular retamo espinoso, se consideraron parámetros ecológicos como tasa de mortalidad, germinación y distribución en la zona, pues pueden afectar procesos de regeneración de especies nativas y propagación de incendios forestales por su comportamiento pirogénico, como lo indican Ríos (2005), Aguilar (2010), Torres (2009) y Vargas *et al.*, (2009).

Para establecer cuáles son los bienes y servicios ecosistémicos que se verían más afectados en un escenario de incendio forestal en el área, se realizó una encuesta (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo [INSHT], 2001); Hurtado, 2000). Esta encuesta permitió obtener información sobre la percepción de los pobladores de los Cerros Orientales de Bogotá acerca de los beneficios ambientales que estos les proveen. Se llevó a cabo mediante un muestreo aleatorio estratificado con afijación simple, a 100 personas: 60 hombres y 40 mujeres mayores de 18 años (Abascal y Grande, 2005; Ec. 3). En relación con el contenido de la encuesta, se realizaron trece preguntas de selección múltiple clasificadas en tres tipos cada una: 1)

percepción del ambiente; 2) percepción del clima, y 3) percepción de incendios forestales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2010).

$$\begin{aligned} n_h = k \quad \forall h = 1 \dots L &\Rightarrow \sum_{h=1}^L n_h = \sum_{h=1}^L k \\ \Rightarrow n = Lk &\Rightarrow f_h = \frac{n_h}{N_h} = \frac{k}{N_h} \end{aligned} \quad (3)$$

donde:

L : número de estratos

n : tamaño muestral

N : total de individuos de la población

n_h : tamaño de la muestra aleatoria simple

N_h : muestra aleatoria simple

k : depende de la confianza, si la confianza es 95,5% $k = 2$ y si es 99% $k = 3$

En cuanto al componente de incendios forestales, correspondiente al número de incendios forestales que se podrían presentar, se determinó el combustible, la fuente de ignición y las condiciones climáticas propicias para la generación. Todas estas variables se correlacionaron mediante regresión lineal para determinar su aporte dentro del modelo, esta metodología fue tomada de Pompa-García *et al.*, (2012) y Rojo, Santillán, Ramirez, y Arteaga (2001), quienes construyeron el potencial de incendios forestales a partir del resultado de la suma lineal de los componentes (Ec. 4).

$$Yi(u) = \beta_{0i}(u) + \beta_{1i}(u)x_{1i}1i + \beta_{2i}(u)x_{2i} + \dots + \beta_{mi}(u)x_{mi} \quad (4)$$

donde:

y : variable dependiente

x : variable independiente

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ y β_m : coeficientes de regresión

x_1, x_2 y x_m : variables seleccionadas por presentar influencia en la ocurrencia de incendio

m : logaritmo decimal



$\beta_{0i}(u)$: indica que el parámetro que describe la relación alrededor de la ubicación (u) es específico de ese lugar.

Una predicción podrá realizarse para la variable dependiente, si las mediciones de las variables independientes también están disponibles en el lugar de (u).

Para desarrollar el modelo se consideraron los siguientes supuestos con el fin de delimitar su alcance y posterior uso:

a. El componente de balance hídrico se realizó teniendo en cuenta los datos hidrometeorológicos mensuales de los años 2001 y 2011 como precipitación, evapotranspiración y precipitación efectiva, siendo los años con mayor y menor precipitación que den cuenta de la influencia de estos factores.

b. La modelación tuvo en cuenta la precipitación en un año seco y un año húmedo con el propósito de verificar el comportamiento de las variables, por esta razón se presenta un estimado de 24 meses.

c. Dadas las condiciones de variabilidad climática en Colombia, se presume que los incendios forestales ocurren cuando hay escasa precipitación y alta evapotranspiración, en períodos de verano y Fenómeno El Niño, y con fuegos provocados por el hombre.

d. Para esta modelación, existen dos tipos de cobertura vegetal en los Cerros Orientales, los bosques (nativos y plantados) y matorrales de retamo espinoso (*Ulex europaeus*), que inciden en la generación y propagación de los incendios forestales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo general de incendios forestales para los Cerros Orientales se observa en la figura 2, en la cual se presenta la interacción de variables meteorológicas, biofísicas y antrópicas que se manifiestan como combustibles forestales y la acción de elementos socioeconómicos que pueden accionar el fuego.

Balance hídrico. Los resultados de balance hídrico muestran que el agua interceptada puede evaporarse, debido a las condiciones meteorológicas o el tipo de vegetación, y sus remanentes pueden infiltrarse (Fig. 3). Cuando la precipitación promedio anual del año menos húmedo es de 71,88 mm, la evapotranspiración es de 21,42 mm, la interceptación (4,9 mm) y la infiltración (3,9 mm). Estas dos últimas son menores, lo que concuerda con lo expuesto Rodríguez (2012) y CAR (2006), quienes indican que dadas las condiciones morfológicas del área es una zona importante para la recarga de los acuíferos y que la infiltración es alta en los Cerros Orientales.

Asimismo, Díaz, Gómez, Chávez y Zepera, (2006), encontraron que la interceptación y la infiltración tienen una correlación negativa, además de observar que la precipitación es interceptada por la vegetación de forma que puede permanecer un tiempo en esta o es pérdida por evapotranspiración y el resto se infiltra en el suelo. Gerrits (2010) afirma que la interceptación no solo se da por coberturas vegetales sino también por estructuras como el suelo (infiltración), materia orgánica, construcciones civiles y la agricultura. Méndez (2013), por su parte, confirma que dependen de la duración e intensidad de la lluvia y la estructura de la vegetación. Para López-Granados *et al.*, (2002), la infiltración depende en gran medida del relieve y de la superficie ocupada por asentamientos humanos y agricultura; en este sentido las plantaciones forestales de especies exóticas pueden disminuir la dinámica hídrica de una zona (Díaz, 2006).

El algoritmo que se obtuvo en la modelación del balance hídrico (Ec. 5), muestra cómo la infiltración es un factor importante sobre otras variables como la precipitación y la evapotranspiración; de la combinación de estos factores se pueden generar condiciones propicias para la generación de incendios forestales.

$$\begin{aligned} \text{Interceptación}(t) &= \text{interceptación}(t - dt) + \\ &(\text{precipitación}_{\text{Efectiva}} - \text{Infiltración} - \\ &\text{Evapotranspiración}) * dt \end{aligned} \quad (5)$$

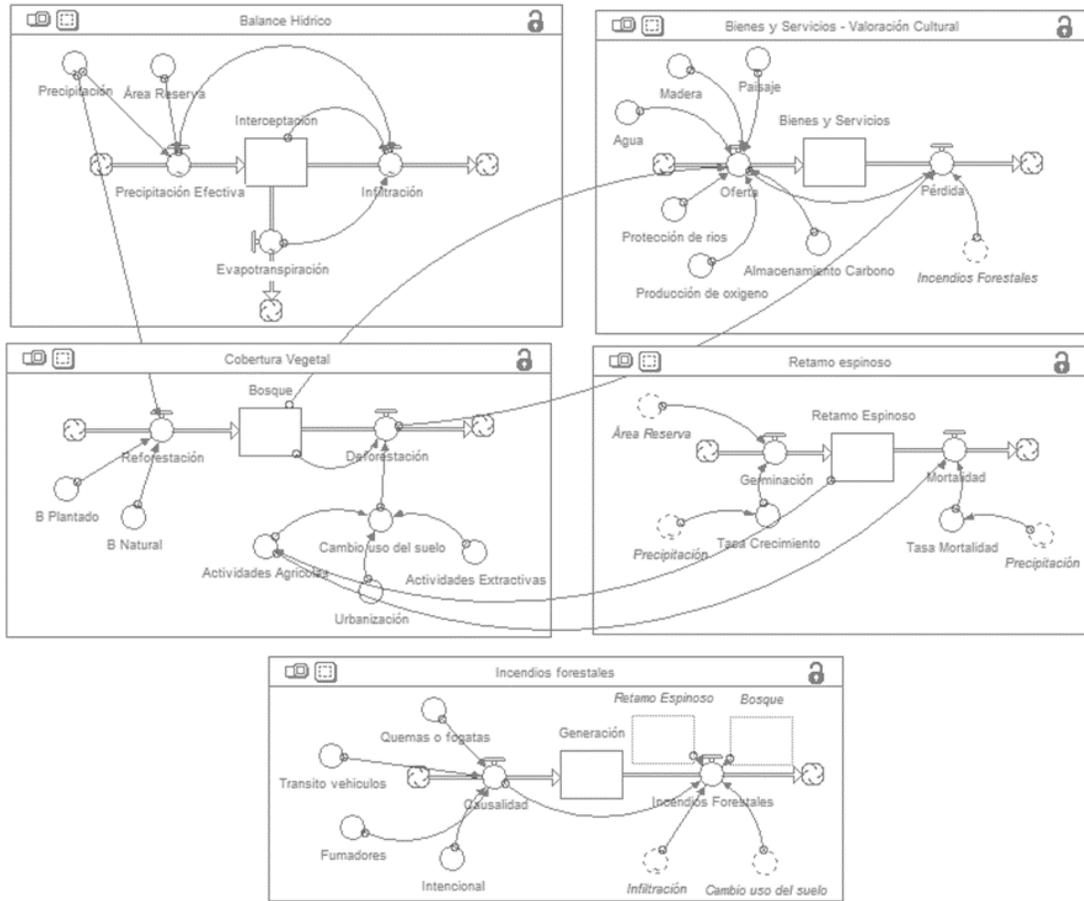


FIGURA 2. Modelo dinámico de incendios forestales para los Cerros Orientales de Bogotá.

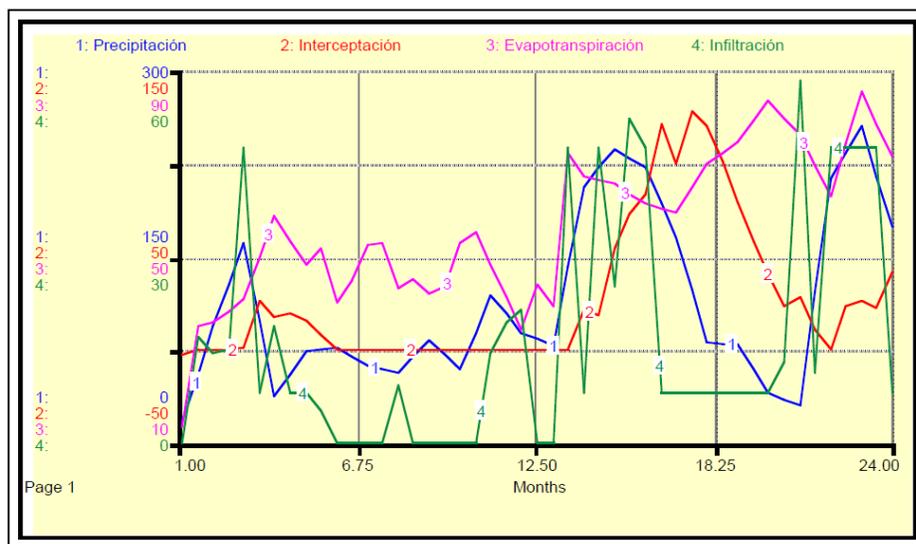


FIGURA 3. Modelación del balance hídrico para los Cerros Orientales de Bogotá.



Cobertura vegetal. Los resultados muestran que la deforestación se encuentra en función del cambio de uso de suelo (Fig. 4), y la afectación de los procesos de restauración de los Cerros llevados a cabo en la época de la colonia. Se puede inferir que las tasas de recuperación de las áreas con restauración ecológica son afectadas de manera importante por el cambio de uso de suelo, retardando así los procesos de recuperación de áreas afectadas (Ec. 6).

$$Bosque(t) = Bosque(t - dt) + (Reforestación - Deforestación) * dt \quad (6)$$

Los efectos encontrados coinciden con los alcanzados por Britos y Barchuk (2013), quienes afirman que los cambios en el uso de la tierra y la pérdida creciente de la cobertura de los bosques desencadenan procesos de desertificación que altera los ciclos biogeoquímicos. Además, Cayuela (2006) asegura que la pérdida de bosques se debe, en los países en vías de desarrollo, al crecimiento poblacional y a

la pobreza persistente, siendo la principal causa de degradación; sin embargo, la tala de especies selectivas es otra causa de pérdida de biodiversidad. La expansión del borde urbano genera la afectación de las estructuras ecológicas que se encuentran en sus inmediaciones, por la demanda de recursos para los pobladores (Carrillo, 2011).

Retamo espinoso. Los resultados de la modelación de la dinámica del retamo espinoso (Fig. 5) evidencian que no hay diferencia para los años de sequía o humedad. Esto se debe a que la germinación y mortalidad no varían por condiciones climáticas, competencia intra e interespecífica, cambio de uso de suelo y/o actividades de control de esta especie. Es importante tener en cuenta que la tasa de mortalidad es menor que la de germinación; por cuanto a la cobertura del *Ulex europaeus* tiende a incrementarse, probablemente debido a que muchas de las zonas de los Cerros Orientales tienen procesos de regeneración natural (rebrote) y activación del banco de semillas (Vargas *et al.*, 2009; Torres, 2009; Aguilar, 2010).

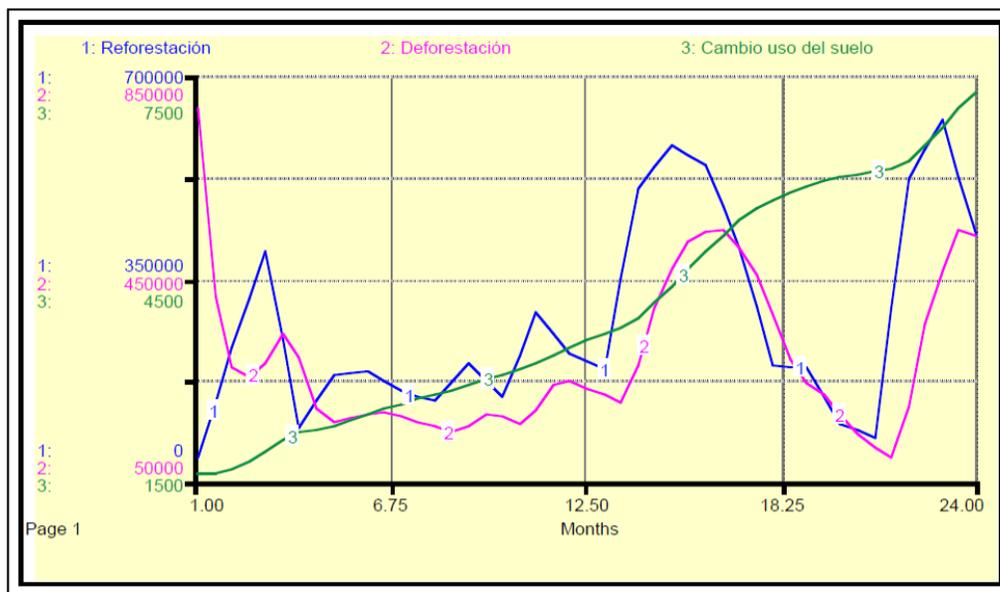


FIGURA 4. Modelación de la cobertura vegetal para los Cerros Orientales de Bogotá.

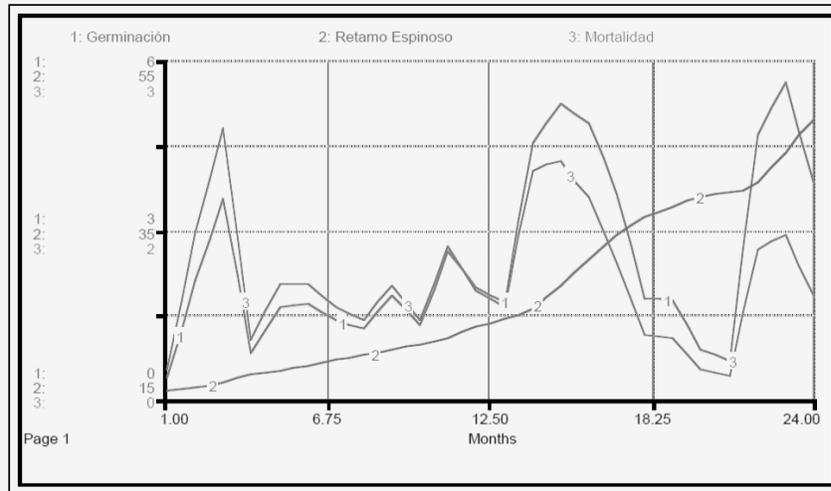


FIGURA 5. Modelación del retamo espinoso de los Cerros Orientales de Bogotá.

El aumento observado en el crecimiento de la especie invasora, retamo espinoso, concuerda con autores como León y Vargas (2011), quienes mencionan que la expansión del retamo espinoso se da principalmente en áreas abiertas, en los bordes de caminos y en los matorrales, determinantes en el avance de la invasión. Además, su desarrollo se da en zonas con altas precipitaciones y altos niveles de humedad en el suelo para su germinación, como lo menciona Muñoz (2009). Sin embargo, este mismo autor aclara que la germinación depende, además del clima, de sus propias condiciones, pues no todas las semillas son viables, por lo tanto la mortalidad puede ser más alta.

Ríos (2005) confronta varias zonas invadidas y concluye que los Cerros Orientales cuentan con condiciones ambientales propicias para la expansión de la especie invasora, a esto se suman sus características fisiológicas, la especie genera gran cantidad de semillas que pueden durar en latencia más de 30 años (Vargas, *et al.*, 2009). Para Torres (2009) la capacidad de germinación es grande por la densidad de sus matorrales, estos no permiten el desarrollo de otras especies. Esto la hace una colonizadora natural, sin embargo, la mortalidad se da en condiciones de altas temperaturas del suelo, por competencia interespecífica y por aumento de predadores, herbívoros y patógenos (Ec. 7).

$$Retamo\ espinoso(t) = Retamo\ espinoso(t - dt) + (Germinación - Mortalidad) * dt \quad (7)$$

Bienes y servicios. Para la realización del componente de bienes y servicios ecosistémicos se usaron encuestas basadas en la importancia de estos para los pobladores cercanos al área (Tabla 6). Los resultados obtenidos de esta encuesta, muestran que los bienes y servicios ecosistémicos más importantes para los pobladores de la reserva son agua (54%), oxígeno (40%), producción de oxígeno (66%) y almacenamiento de carbono (22%). Con respecto al clima, 76% los moradores mencionan que el clima es más seco y que este cambio puede haberse dado entre los últimos 5 años (54%) y 20 años (32%). En cuanto a los incendios forestales, presumen que 58% de ocurrencia de estos es debido al cambio en el uso del suelo y 28% por condiciones provocadas.

Los bienes y servicios ecosistémicos tienden a perderse justo después de la generación de un incendio forestal (Fig. 6), donde la oferta se disminuye en los primeros doce meses. Estos incendios se deben al cambio en el uso del suelo de los Cerros Orientales, que genera deforestación y presencia de retamo espinoso, que altera la generación de los beneficios ecosistémicos (Ec. 8). Céspedes y Moreno



(2010) concuerdan con los resultados obtenidos para el componente en este estudio. Estos autores precisan que la deforestación representa un problema ambiental ya que logra afectar la provisión de servicios ambientales, si bien, a pesar de tener procesos de restauración no todas las especies sobreviven debido a la adaptabilidad (también procesos técnicos de plantación), competencia, pastoreo y quemaduras. Por su parte, Bustamante y Grez (2004) consideran que la creciente intervención humana trae consecuencias ecológicas para los bosques, debido al crecimiento de las actividades agropecuarias que conllevan a la fragmentación de los bosques, perturbando el microclima y los nutrientes,

así como también, la distribución e interacción de las especies.

La forma en que los incendios forestales afectan a la provisión de bienes y servicios ecosistémicos es ocasionando la pérdida de condiciones propicias para su regeneración; la vegetación quemada muchas veces no se regenera (Castillo *et al.*, 2003), asimismo, puede verse afectada la provisión del agua, debido al cambio de uso del suelo (Oyarzún, Nahuelhual y Nuñez, 2005).

$$Bienes\ y\ servicios(t) = Bienes\ y\ servicios(t - dt) + (Oferta - Pérdida) * dt \tag{8}$$

TABLA 6. Priorización de bienes y servicios basado en el diagnóstico social en los Cerros Orientales.

Clasificación	Bienes y servicios ecosistémicos	Priorización
Servicio	Producción de oxígeno	33%
Bien	Agua	27%
Bien	Madera	20%
Servicio	Paisaje	10%
Servicio	Almacenamiento de carbono	6%
Servicio	Protección de ríos	4%
	Total	100%

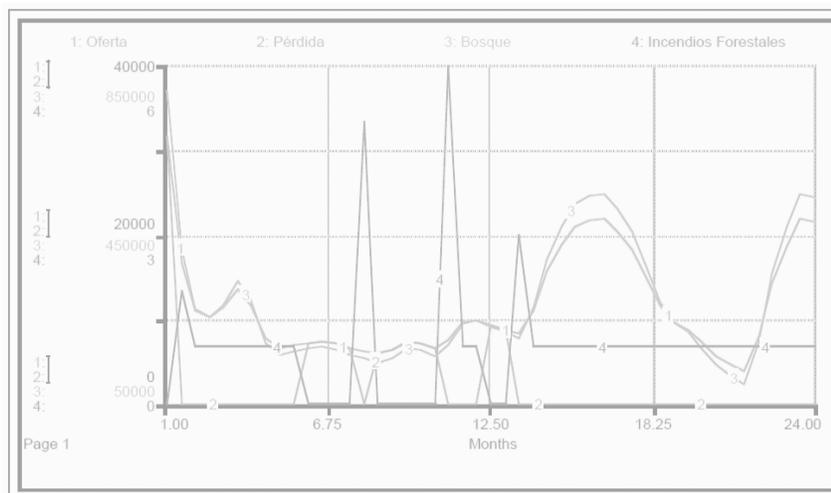


FIGURA 6. Modelación de la pérdida de bienes y servicios de los Cerros Orientales de Bogotá.

Incendios forestales. Para la construcción del componente final de incendios forestales se usaron datos como la causalidad, determinada por el porcentaje de generación del fuego debido a las quemaduras, el tránsito de vehículos, fumadores e intencionalidad. En la figura 7 se presenta el resultado de la modelación; esta sugiere que los componentes para iniciar un fuego se relacionan de manera que, cuando hay el combustible necesario (bosque), cuando se dan acciones para la generación de fuego (causalidad y cambio de uso del suelo) y hay poca cantidad de agua en el suelo (infiltración), es factible la presencia de un incendio forestal. Estas condiciones se dan en los meses de enero, agosto y noviembre (Ec. 9). En los últimos doce meses del estudio, la ocurrencia no fue alta, debido a la gran cantidad de lluvias; la infiltración es mayor al igual que el cambio del uso en el suelo y la deforestación, pero al no tener todos los componentes no hay evidencia su interacción.

$$Generación(t) = Generación(t - dt) + (Causalidad - Incendios forestales) * dt \quad (9)$$

El fuego es un proceso de disturbio con fuerte influencia en la estructura composición y dinámica forestal. Por esta

razón, la modelación debe ser considerada como una herramienta para orientar en acuerdos de protección y prevención de incendios (Altamirano *et al.*, 2013). Autores que han modelado los incendios forestales, como Villers (2006), indican que los componentes que pueden influenciar la generación de un incendio son la distribución de los combustibles forestales. Esta es una de las variables más difíciles de modelar dados sus continuos cambios, la humedad de los combustibles, determinada por la precipitación, y la interceptación y el tiempo atmosférico.

A su vez, la vegetación es dependiente del clima directa e indirectamente. Varios estudios han demostrado el aumento de incendios forestales durante eventos del fenómeno El Niño, los cuales afectan tanto la cobertura vegetal como las características físico-químicas de los suelos. Pero el clima también está fuertemente determinado por las características de la vegetación (Vélez *et al.*, 2002). En cuanto a la causal de los incendios, estudios como los de Alvear (2004) y Martín, Chuvieco y Aguado, (1998) mencionan que la causalidad estimada de incendios forestales está dada por las actividades humanas, quemaduras, fogatas y fumadores, además de que se tiene en cuenta la clase de ecosistema disturbado.

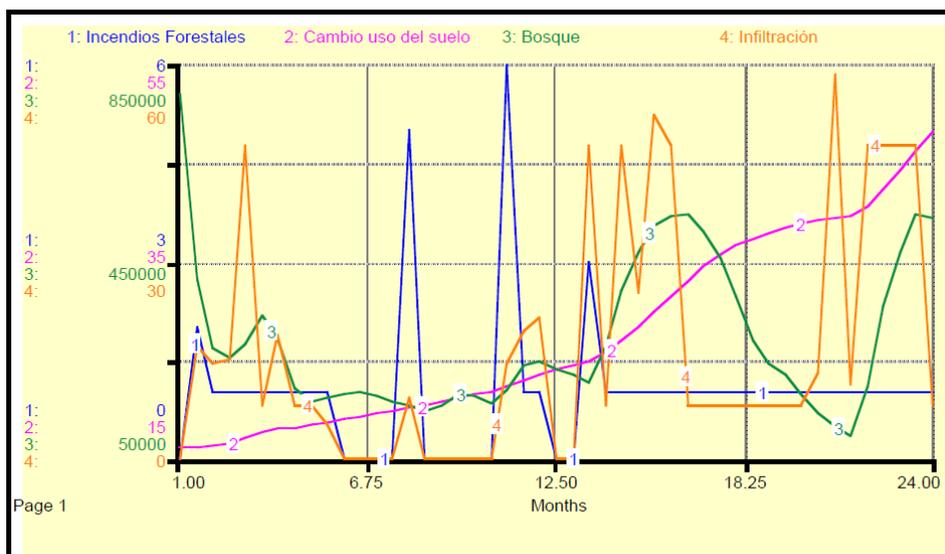


FIGURA 7. Modelación del número de incendios de los Cerros Orientales de Bogotá.



Variabilidad climática e incendios forestales. Los resultados de la modelación muestran que la disminución de la precipitación (épocas de verano y fenómeno El Niño) incentivan los incendios forestales a causa de la alta producción de necromasa, en especial, la generada por el retamo espinoso. De igual manera, se aprecia la actividad antrópica como factor generador de incendios forestales, con un impacto negativo importante sobre la disponibilidad de bienes y servicios ecosistémicos.

Zárate, Cordero, Kozanoglu y Lara, (2012) integraron la hidrodinámica, la transferencia de calor y de masa, incluyendo el fenómeno de la combustión en la modelación y llegaron a iguales resultados que en este estudio.

La relación entre la variabilidad climática y los incendios forestales en los Cerros Orientales es directamente proporcional, dado que las variables establecidas para la modelación de los incendios son afectadas directamente por el Fenómeno El Niño. Por ejemplo, un déficit de precipitaciones afectará el ciclo hidrológico, de forma que el número de incendios modelado sea igual o mayor. Esto concuerda con lo indicado por García, Piñeros, Bernal y Ardila, (2012) respecto a que, con el incremento en la temperatura, la vulnerabilidad a estos fenómenos es considerable.

El comportamiento del clima está ligado a la toma de decisiones con respecto a la continua emisión de gases de efecto invernadero, sumada a la precisión que tengan los modelos predictores del clima (Posada, 2007). Por esta razón son importantes los procedimientos de fortalecimiento de las medidas de prevención a los incendios forestales aún sin conocer las magnitudes de cambio, con respecto a la reducción de la oferta hídrica.

Otro aspecto a tener en cuenta sobre esta relación es el impacto que tiene la variabilidad climática sobre la vegetación, siendo la más importante por la probabilidad de cambio de la distribución de especies, la migración, la sustitución y la extinción, de manera que su nivel de

respuesta cambiará ante la ocurrencia de un fenómeno de incendio forestal tal como lo expresaron Flanningan, Stocks y Wotton, (2000).

La mayoría de los incendios forestales son de origen antrópico, puesto que la cantidad de horas luz y la inclinación del sol sobre los Cerros Orientales no podrían generar un fenómeno de tal magnitud (CAR, 2007), sin embargo, los parámetros naturales influyen en la propagación de estos cuando son causados por procesos de negligencia humana.

La tabla 7 establece la relación de las variables y los resultados obtenidos con la modelación dinámica.

CONCLUSIONES

Las variables elegidas para modelar el número de incendios forestales como balance hídrico, cobertura vegetal, servicios ecosistémicos, retamo espinoso e incendios forestales son precisas. Se encontró que la cantidad de incendios aumentará conforme se mantengan los cambios en el uso del suelo, la propagación de la especie retamo espinoso y se presente una temporada de sequía por largo tiempo.

Proponer la actualización periódica de datos sobre la cobertura vegetal, como el área por tipo de especie y las acciones silviculturales podrían presentar un modelo más actualizado. Para este mismo fin, sería importante integrar los nuevos valores de los periodos del fenómeno El Niño. El componente de retamo espinoso es uno de los más influyentes, puesto que no depende del balance hídrico para su incremento o disminución, mientras que sí puede generar cambio sobre las coberturas vegetales, servicios ecosistémicos e incendios forestales.

RECONOCIMIENTOS

Este estudio fue financiado por los autores adscritos al grupo de investigación INDESOS de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

TABLA 7. Resumen de los resultados de la modelación de incendios forestales en los Cerros Orientales.

Variable	Pregunta de Investigación	Diagnóstico	Resultados
Precipitación y evapotranspiración	¿Las variables que explican el comportamiento de la dinámica de los incendios forestales se pueden representar y predecir mediante la modelación dinámica?	Se establece la relación entre las variables hidroclimáticas.	La relación entre la precipitación y la evapotranspiración es inversamente proporcional, por lo que se pueden predecir los incendios forestales usando estas variables.
Pérdida de Bienes y Servicios Ecosistémicos	¿Se puede esperar que dadas las condiciones de alta variabilidad climática se presente una afectación de bienes y servicios ecosistémicos?	La deforestación afecta la oferta de beneficios ambientales para la sociedad.	La pérdida de bienes y servicios ecosistémicos está dada por el cambio en el uso del suelo, por la urbanización, las actividades agrícolas y extractivas.
Retamo espinoso (<i>Ulex europaeus</i>)	¿Permitirán los resultados de la modelación fenología establecer las características de esta especie como combustible?	Al ser una especie invasora, la germinación y dispersión de la especie es alta.	La especie es una gran competidora y gracias a su potencial de dispersión y establecimiento a lo largo de la reserva, logra servir en las actividades agrícolas, aunque también como un combustible por la liberación de mantillo.
Incendios forestales	¿Cuál es el número de incendios que se pueden presentar en la reserva, dadas las variables utilizadas en el modelo?	Se establece la relación entre las variables que generan los incendios.	El número de incendios potenciales es de 11 como el número más alto, dado por la interacción del combustible, el clima y la acción antrópica del hombre.

REFERENCIAS

- Abascal, E., & Grande, I. (2005). *Análisis de encuestas*. Madrid: Esic editorial.
- Aguado, I., & Camia, A. (1998). Fundamentos y utilización de índices meteorológicos de peligro de incendio. *Serie Geográfica*, 7, 49-58.
- Aguilar, M. (2010). Restauración ecológica de áreas afectadas por *Ulex europaeus* L. Madrid, España: Convenio 005/09 SDA-IDIPRON.
- Altamirano, A., Salas, C., Yaitul, V., Smith-Ramírez, C., & Ávila, A. (2013). Influencia de la heterogeneidad del paisaje en la ocurrencia de los incendios forestales en Chile Central. *Revista de Geografía Norte Grande*, 55, 157-170. doi: 10.4067/S0718-34022013000200011
- Alvear, G. (2004). *Gestión en la protección contra los incendios forestales en América del Sur*. Documento presentado en el Segundo Simposio internacional sobre políticas, planificación y economía de los programas de protección contra incendios forestales: una visión global, Córdoba, España.
- Amaya, D., & Armenteras, D. (2012). Indidencia de incendios sobre la vegetación de Cundinamarca y Bogotá D.C. (Colombia) entre 2001 y 2010. *Acta Biológica Colombiana*, 17(1), 143-157.
- Anderson, E., Marengo, J., Villalba, R., Halloy, S., Young, B., Cordero, D., ... Ruiz, D. (2012). Consecuencias del cambio climático en los ecosistemas y servicios ecosistémicos de los Andes Tropicales. En S. Herzog, R. Martínez, P. Jorgensen, & H. Tiessen (Eds.), *Cambio climático y biodiversidad en los Andes Tropicales* (pp. 16-17). París: Comité Científico sobre problemas del Medio Ambiente.
- Avila, D., Pompa, M., & Vargas, E. (2010). Análisis espacial de la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(2), 253-260. doi: 10.5154/r.rchscfa.2009.08.028



- Bodi, M., Cerdá, A., Mataix-Solera, J., & Doerr, S. (2012). Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: revisión bibliográfica. *Boletín de la asociación de Geógrafos Españoles*, 58, 33-55.
- Britos, A., & Barchuk, A. (2013). Dinámica de la cobertura vegetal y los usos de la tierra a través de modelos de no-equilibrio. *Revista de Teledetección*, 40, 88-109.
- Bustamante, R., & Grez, A. (2004). Fragmentación del bosque nativo: ¿en qué estamos? *Revista Ambiente y Desarrollo*, 20(1), 89-91.
- Carrillo, M. (2011). *La dinámica del crecimiento del borde urbano sobre los Cerros Orientales de Bogotá, posibilidades de gestión de ciudad en las zonas de ladera*. Bogotá D.C.: Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario.
- Castillo, M., Pedernera, P., & Peña, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 9(3), 44 - 53.
- Cayuela, L. (2006). Deforestación y fragmentación de bosques tropicales montanos en los Altos de Chiapas, México. Efectos sobre la diversidad de árboles. *Ecosistemas*, 15(3), 191-196.
- Céspedes F., S., & Moreno S., E. (2010). Estimación del valor de la pérdida de recurso forestal y su relación con la reforestación en las entidades federativas de México. *Investigación ambiental*, 2(2), 5-13.
- Cervantes, A., Chiappa, X., & Dias, N. (2009). *Stella, software para modelación dinámica en Biología. 2 - 14*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Clements, D., Peterson, D., & Prasad, R. (2001). The biology of Canadian weeds. 112. *Ulex europaeus* L. Canadian. *Journal of Plant Science*, 81, 325-336. doi: 10.4141/P99-128
- Cocero, D., Riaño, D., & Chuvieco, E. (1998). Estimación de la humedad de la vegetación usando imágenes de satélite e índices meteorológicos de peligro de incendios. *Serie Geográfica*, 7, 59-72.
- Corporación Autónoma de Cundinamarca [CAR] (2006). Plan de Manejo de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá. Bogotá D.C.: Corporación Autónoma de Cundinamarca.
- Corporación Autónoma de Cundinamarca [CAR] (2007). Ajuste del Plan de Manejo Ambiental de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá. Bogotá D.C.: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Cortés, S., Van der Hammen, T., & Rangel, O. (1999). Comunidades vegetales y patrones de degradación y sucesión de la vegetación de los Cerros Occidentales de Chia, Cundinamarca, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 23(89), 529-554.
- Díaz F., E., Gómez, A., Chávez H., Y., & Zepera C., H. (2006). Análisis comparativo sobre la interceptación pluvial entre hojarasca de pino, encino y pastizal utilizando un simulador de lluvia en la cuenca hidrográfica de Cointzio, Michoacán. Documento presentado en el Congreso Internacional y XI Nacional de Ciencias Ambientales, Morelos, México.
- Díaz, L. (2006). *Cerros de Bogotá ¿un espacio en vía de extinción?*. Bogotá D.C.: Centro de Investigación y Educación Popular, CINEP/Programa por la paz.
- Eppink, F., van den Bergh, J., & Rietveld, P. (2004). Modelling biodiversity and land use: urban growth, agriculture and nature in a wetland area. *Ecological Economics*, 51, 201-216. doi: 10.1016/j.ecolecon.2004.04.011
- Fernández, I., Morales, N., Olivares, L., Salvatierra, J., Gómez, M., & Montenegro, G. (2010). *Restauración Ecológica para ecosistemas nativos afectados por incendios forestales*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad de Chile.
- Flannigan, M., Stocks, B., & Wotton, B. (2000). Climate change and forest fires. *The science of the total Environment*, 262, 221-229. doi: 10.1016/S0048-9697(00)00524-6
- Franco, S., Regil, H., & Ordóñez, J. (2006). Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. *Madera y Bosques*, 12(1), 17-28. doi: 10.21829/myb.2006.1211247
- García, M., Piñeros, A., Bernal, F., & Ardila, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, (36), 60-64.
- Garzón, F. (2014). Educación ambiental y desarrollo sostenible el caso de los Cerros Orientales de Bogotá, Colombia. *Revista Latinoamericana de Bioética*, 14(18), 82-97. doi: 10.18359/rlbi.498
- Gerrits, M. (2010). *The role of interception in the hydrological cycle*. Technische Universiteit Delft.
- Guarín, G., & Poveda, G. (2013). Variabilidad espacial y temporal del almacenamiento de agua en el suelo de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(142), 89 - 113.
- Hurtado, J. (2000). *Metodología de la Investigación Holística*. Caracas: Instituto Universitario de Tecnología Caripito.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam] (2014). Archivo de información hidrometeorológica. Ideam.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2010). *Proceso estándar para encuestas por muestreo*. México: Inegi.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo [INSHT]. (2001). *NTP 283: Encuestas: Metodología para su utilización* (pp. 2-4). Madrid, España: Ministerio de Trabajo y asuntos Sociales de España.
- Isee systems inc. (2014). *Stella Software*. Isee systems inc.
- Jaque, C., Sánchez, C., & Álvarez, J. (2016). Metodología para la estimación de amenaza de incendios forestales en los Cerros Orientales de la Ciudad de Bogotá por medio de imágenes satelitales LANSAT TM 5 y Kriging Geostatístico. Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- León, O., & Vargas, O. (2011). Estrategias para el control, manejo y restauración de áreas invadidas por retamo espinoso (*Ulex europaeus*) en la Vereda El Hato, Localidad de Usme, Bogotá D.C. *La Restauración Ecológica en práctica: Memorias I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica & II Simposio Nacional de experiencias en Restauración Ecológica* (pp. 474-490). Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- López-Granados, E., Mendoza, M., & Acosta, A. (2002). Cambio de cobertura vegetal y uso de tierra. El caso de la cuenca endorreica del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Gaceta Ecológica*, 64, 19-34.
- Magaña, V., & Gay, C. (2002). Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos. *Gaceta Ecológica*, 65, 7-23.
- Martín, P., Chuvieco, E., & Aguado, I. (1998). La incidencia de los incendios forestales en España. *Serie Geográfica*, 7, 23-36.
- Méndez, J. (2013). *Metodología para la medición de variables hidrometeorológicas que faciliten la implementación de modelos dinámicos de interceptación de lluvia en el contexto Colombiano*. (U. N. Colombia, Ed.) Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/9678/1/JavierfernandoMendezmonroy.pdf>
- Mendoza, M., Bocco, G., López-Granados, E., & Bravo, M. (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, 49, 92-117.
- Meynard, C., Lara, A., Soto, M., Nahuelhual, D., Núñez, L., Echeverría, D., . . . Morey, F. (2007). La integración de la ciencia, la economía y la sociedad: servicios ecosistémicos en la ecoregión de los bosques lluviosos valdivianos en el cono sur de Sudamérica. *Gaceta Ecológica*, (84-85), 29-38.
- Montealegre, J. y Pabón, J. (2000). La variabilidad climática interanual asociado al ciclo El Niño – La Niña, Oscilación del sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana*, 2:7-21.
- Morales, J. (2017). Determinación del riesgo de ignición y propagación de incendios forestales en los Cerros Orientales de Bogotá a través del algebra de mapas y simulación. Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Muñoz, E. (2009). El Espinillo (*Ulex europaeus* L. 1753) un invasor biológico en el Sur de Chile: estado de su conocimiento y alternativas de control. *Gestión Ambiental*, 17, 23 - 44.
- Návar C., J. J. (2011). Modelación del contenido de agua de los suelos y su relación con los incendios forestales en la Sierra madre Occidental de Durango, México. *Madera y Bosques*, 17(3), 65-81. doi: 10.21829/myb.2011.1731143
- Ocampo-Zuleta, K., & Solorza-Bejarano, J. (2017). Banco de semillas de retamo espinoso *Ulex europaeus* L. en bordes del matorral invasor en un ecosistema zonal de bosque altoandino, Colombia. *Biota Colombiana*, 18(Suplemento 1), 89-98. doi: 10.21068/c001
- Otero, L., Contreras, A., & Barrales, A. (1994). Efectos ambientales de diferentes tipos de cortas en bosque nativo. El caso de las cortas de protección en fajas. *Ciencia e Investigación Forestal*, 8(1): 87-118.
- Oyarzún, C., Nahuelhual, L., & Núñez, D. (2005). Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 20(3), 88-5.
- Pabón, J. (2003). El cambio climático global y su manifestación en Colombia. *Cuadernos de Geografía*, XXII(1-2), 111-119.
- Pabón, J. (2012). Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(139), 261-278.
- Parra L., Á., & Bernal-Toro, F. (2010). Incendios de cobertura vegetal y biodiversidad: una mirada a los impactos y efectos ecológicos potenciales sobre la diversidad vegetal. *El Hombre y la Máquina*, 35, 67-81.



- Parra L., Á., & Bernal-Toro, F. (2011). Introducción a la ecología del fuego. En D. Armenteras-Pascual, F. Bernal-Toro, F. Gonzáles-Alonso, M. Morales-Rivas, J. Pabón-Caicedo, G. Páramo-Rocha, & Á. Parra-Lara. *Incendios de Cobertura Vegetal en Colombia* (pp. 17 - 52). Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente.
- Pompa-García, M., Vásquez-Vásquez, L., Zapata-Molina, M., & Solís-Moreno, R. (2012). Modelo conceptual del potencial de incendios forestales en Durango: avances preliminares. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(13), 95-102.
- Posada, C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia. *Revista de Ingeniería*, (26), 74-80.
- Poveda, G., Ramírez, J., & Jaramillo, A. (2001). *Modelación estocástica de la variabilidad anual e interanual de la humedad del suelo en Colombia bajo diferente cobertura vegetal*. (U. N. Colombia, Ed.). Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/4411/1/DD3406.pdf>
- Ríos, H. (2005). *Guía técnica para la restauración ecológica de áreas afectadas por especies vegetales invasoras en el Distrito Capital: complejo invasor retamo espinoso (Ulex europaeus L.) - retamo liso (Telina monspessulana (L) C. Koch)*. Bogotá D.C.: Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.
- Rodríguez, J. (2012). *Análisis de escenarios de cambio climático A1B, A2 y B1 para la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá años 2040, 2070 y 2095 utilizando MARKSIMGCM*. Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Rodríguez-Aizpeolea, J., Pérez-Badía, R., & Cerda-Bolinches, A. (1991). Colonización vegetal y producción de escorrentía en bancales abandonados: Vall de gallinera, Alacant. *Cuatenario y Geomorfología*, 5, 119-129.
- Rojo, G., Santillán, J., Ramírez, H., & Arteaga, B. (2001). Propuesta para determinar índices de peligro de incendio forestal en bosques de clima templado en México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7 (1), 39-48.
- Sarmiento P., C., & Fonseca T., C. (2010). *Incidencia de incendios forestales en biomas naturales y transformados en Colombia durante el periodo 1997 - 2009*. XIV Simposio Internacional SELPER. Guanajuato, México: Monitoreo de la Cobertura Terrestre de América (sesión especial).
- Shlisky, A., Waugh, J., González, P., González, M., Manta, M., Santoso, H., ... , & Fulks, W. (2007). *Fire, ecosystems and people: Threats and strategies for global biodiversity conservation* (GFI Technical Report 2007-2). Arlington, VA: The Nature Conservancy.
- Tellez-Aljure, A. M. (2004). *Construcción de un modelo de riesgo de incendios de la cobertura vegetal para el área de los cerros orientales de Bogotá*, D.C. Bogotá D.C.: Ideam-CDPMIF.
- Torres, N. A. (2009). *Banco de semillas germinable en áreas invadidas por retamo espinoso (Ulex europaeus) con diferentes edades de quema (alrededores del embalse de Chisacá, Bogotá, Localidad de Usme)*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Unidad Administrativa Especial Cuerpo de Bomberos Bogotá [Uaacob]. (2017). Análisis de los incidentes forestales atendidos en Bogotá D.C. 2017. Subdirección de Gestión del Riesgo. p. 43.
- Vargas, O., León, O., & Díaz, A. (2009). *Restauración ecológica en zonas invadidas por retamo espinoso y plantaciones forestales de especies exóticas*. Bogotá D.C.: Convenio Interinstitucional Secretaría Distrital de Ambiente- Universidad Nacional de Colombia.
- Vélez, J., Poveda, G., Mesa, O., Hoyos, C., Salazar, L., & Mejía, F. (2002). Modelo de interacción suelo-atmósfera para la estimación de caudales medios mensuales en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 6, 81-89.
- Verano-Velásquez, D. F. (2013). Modelamiento y simulación de propagación de incendios forestales en los Cerros Orientales de la ciudad de Bogotá D.C. usando Farsite. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes.
- Vilanova, E. (2011). Adaptación de los bosques tropicales al cambio climático: una oportunidad para la investigación interdisciplinaria. *Revista Forestal Venezolana*, 55(1), 93-101.
- Villanueva-Solis, J., Ranfla, A., & Quintanilla-Montoya, A. (2013). Isla de calor urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo. *Información tecnológica*, 24(1), 15-24. doi: 10.4067/S0718-07642013000100003
- Villers, M. (2006). Incendios Forestales. *Ciencias*, 81, 60 - 66.
- Watson, R., Zinyowera, M., & Moss, R. (1996). The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability (pp. 340-400). Cambridge: University Press.
- Yebra-Álvarez, M., de Santis, Á., & Chuvieco, E. (2005). Estimación del peligro de incendios a partir de teledetección y variables meteorológicas: variación temporal del contenido de humedad del combustible. *Recursos Rurais*, 1(1): 9-19.
- Younis, M., Gilabert, M., & Meliá, J. (1999). La Dinámica de la vegetación como indicador de la desertificación en la cuenca del Guadalentín, España. *Teledetección*, 12, 19-23.

Zárate, L., Cordero, M., Kozanoglu, B., & Lara, H. (2012). *Estudios de modelado y simulación de incendios mediante técnicas computacionales CFD*. Documento presentado en el XXXIII Encuentro Nacional y 2. Congreso Internacional de la AMIDIQ, (pp. 6). San José del Cabo, México.

Manuscrito recibido el 7 de noviembre de 2017
Aceptado el 1 de abril de 2018
Publicado el 9 de noviembre de 2018

Este documento se debe citar como:

Ocampo-Zuleta, K., & Beltrán-Vargas, J. (2018). Modelación dinámica de incendios forestales en los Cerros Orientales de Bogotá, (Colombia). *Madera y Bosques*, 24(3), e2431662. doi: 1021829/myb.2018.2431662



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.