

MODELADO CARTOGRÁFICO DE RIESGO DE INCENDIOS EN EL PARQUE NACIONAL HENRI PITTIER. ESTUDIO DE CASO: VERTIENTE SUR, ÁREA COLINDANTE CON LA CIUDAD DE MARACAY¹

Oscar I. Abarca* y José G. Quiroz G.*

RESUMEN

Se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG), aplicado a la vertiente sur del Parque Nacional Henry Pittier, en especial sus herramientas de análisis multi-criterio, para lo cual se digitalizaron algunas variables como topografía, uso de la tierra, hidrografía, vialidad y vegetación. Cada una de estas variables se procesó para generar los criterios de las dos capas, objetivos principales escogidas en el modelo de evaluación: riesgo de ignición (RI) y riesgo de propagación (RP). La capa objetivo RI está constituida por los criterios pisos altitudinales, uso de la tierra colindante con el parque, accesibilidad y vegetación sensible a la ignición. La capa objetivo RP fue evaluada para los criterios pendiente, vegetación sensible a la propagación, influencia del viento, pisos altitudinales, hidrografía y cortafuegos. Estos criterios se ponderaron utilizando el Método de las Jerarquías Analíticas y posteriormente se introdujeron en la regla de decisión multi-criterio estructurada e incorporada al SIG, generando la cartografía de riesgo para cada capa objetivo. Finalmente se integraron las dos capas objetivos para generar la cartografía definitiva de riesgo de incendios de vegetación. Se determinó que existen aproximadamente unas 139 ha con muy alto riesgo, 6 186 ha con alto riesgo, 3 695 ha de moderado riesgo y 728 ha con bajo riesgo a los incendios de vegetación, en promedio durante los meses afectados. Igualmente se ubicaron las zonas donde es necesario aplicar medidas de prevención y control para actuar sobre este grave problema ambiental que afecta a la población de la ciudad de Maracay y sus alrededores.

Palabras Clave: Sistema de información geográfica (SIG); riesgo de ignición; riesgo de propagación; evaluación multi-criterio; evaluación multi-objetivo; Parque Nacional Henri Pittier; modelaje cartográfico; incendios de vegetación.

1 Estudio financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT) ahora Fonacit a través del Proyecto S1-2540.

* Profesores. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Instituto de Ingeniería Agrícola. Apdo. 4800. Maracay 2101-A, estado Aragua. Venezuela.

Nota: Trabajo en mano del autor desde el año 2002.

RECIBIDO: marzo 01, 2002.

INTRODUCCIÓN

Todos los años, la ciudad de Maracay, estado Aragua, se ve sometida a extensos incendios de vegetación que literalmente la hacen arder por sus cuatro costados. Esta ciudad, ubicada en los fértiles valles de Aragua, está bordeada por grandes superficies de cultivos, principalmente caña de azúcar, *Saccharum officinarum*. Sus límites urbanos se extienden desde los cañaverales del sur y sur-este y desde el Lago de Valencia por el sur-oeste, hasta el piedemonte de la Serranía del Litoral por el norte. Este límite norte está bien definido por el lindero legal del Parque Nacional Henri Pittier, que se inicia en esas montañas y que ha detenido, por ese flanco, el voraz crecimiento urbano.

Apenas finalizada la temporada de lluvias, lo que en promedio ocurre en el mes de diciembre, comienzan a observarse en todas direcciones las columnas de humo que se desprenden de los incendios. La vegetación de sabana, que año tras año va avanzando en el parque en perjuicio de los bosque mónicos, es consumida completamente por el fuego, dándole un aspecto deprimente a las laderas montañosas que adornan la ciudad. El aire-ciudadino es contaminado por partículas de ceniza provenientes de la vegetación quemada en las montañas del parque, a las que se suman las de la caña de azúcar que es quemada para la cosecha en esos meses de sequía.

La pérdida de vegetación en las montañas, el tono oscuro que adquiere el suelo por efecto de la quema y el inhumano desarrollo urbano-industrial, carente de medidas de arborización y saturado de concreto, incrementan intolerablemente la temperatura de la ciudad en los meses más calurosos del año, desmejorando aceleradamente la calidad de vida de los habitantes de la otrora "ciudad jardín".

Así mismo, cuando comienza la temporada de lluvias, las intensas tormentas que caracterizan la precipitación en esta zona, encuentran las empinadas laderas completamente desnudas, produciendo un importante arrastre de sedimentos que afecta la red de drenajes colectores de la ciudad y que se deposita en gran medida en el Lago de Valencia. Este proceso erosivo, acelerado por la quema de la vegetación natural y producido en una zona de características geomorfológicas que la hace muy sensible a los movimientos en masa, puede contribuir con el desarrollo de un evento catastrófico de consecuencias incalculables en el norte de

la ciudad, tal como el ocurrido el 6 de septiembre de 1987 que dejó innumerables pérdidas de vidas y bienes.

El estudio se realizó con el objeto de adaptar y aplicar un modelo que evalúe el riesgo a incendios de vegetación desarrollado por Chuvieco en 1990, en un área piloto del Parque Henri Pittier, en el sector conformado por la vertiente sur, generando cartografía digital de riesgo permanente a partir de diferentes variables integradas, con la finalidad de determinar las zonas prioritarias de acción en la prevención y control de este grave problema ambiental que afecta particularmente a la ciudad de Maracay.

En su recorrido por los valles de Aragua, en febrero de 1800, el sabio Alejandro Humboldt se refiere con preocupación a la acción imprudente de los colonos al destruir los bosques de las llanuras y montañas de Aragua para uso agrícola. En mediciones realizadas en la Hacienda Cura, cerca de Maracay, este autor obtuvo para el mes de febrero una temperatura media de 24,3 °C, con máximo promedio, en sus registros de pocos días, de 26,16 °C. Así mismo, señaló una temperatura media anual de 25,5 °C, para toda la región de los Valles de Aragua.

También indica: "...Hasta mediados del último siglo las montañas circundantes de los valles de Aragua estaban pobladas de selvas. Crecidos árboles de la familia de las Mimosas, Ceibas e Higueros sombreaban las orillas del lago esparciendo allí el frescor. La llanura, entonces poco habitada, estaba llena de matorrales, sembrada de troncos de árboles diseminados y de plantas parásitas, arropada por una espesa hojarasca, siendo menos susceptible de emitir el calórico radiante que el suelo cultivado, no abrigado por eso mismo contra los ardores del sol. Con la destrucción de los árboles, con el incremento del cultivo de la caña, el añil y el algodón, los manantiales y todos los afluentes naturales del Lago de Valencia han disminuido de año en año" (Humboldt, 1991).

La información climatológica actual de la zona no indica un cambio importante con relación a los valores medios de temperatura observados por Humboldt (1991), sin embargo, los valores extremos al parecer, de acuerdo a la apreciación colectiva de los habitantes de la región, se han modificado al disminuirse el efecto regulador de la vegetación (la temperatura máxima promedio del mes de febrero en los últimos 20 años es de 33 °C). Los adversos efectos ambientales descritos y padecidos por la sociedad, hacen impostergable el control del problema de los incendios, definiendo las áreas prioritarias de acción, para aplicar medidas de prevención y control con la mayor eficiencia posible.

Casi la totalidad de los incendios de vegetación que se producen en el Parque Henri Pittier ocurren en su vertiente sur, iniciándose en los principales centros urbanos (San Joaquín, Mariara, Aguas Calientes, Maracay, Turmero; Rivero, 1994; Rojas, 1982). Así mismo, la zona que se incendia con mayor frecuencia es la colindante con la ciudad de Maracay. Por esta razón se seleccionó como área de estudio la vertiente sur del Parque Henri Pittier, en el sector colindante con la ciudad de Maracay (Figura 1).

En el modelo de riesgo de incendios de vegetación a evaluar se consideraron dos objetivos: el riesgo de ignición (RI) o inicio del fuego y el riesgo de propagación (RP) o difusión de las llamas en el espacio.

Los principales factores considerados en los modelos de inicio o RI son, según Sarandon y Wysiecky (1992): 1. la vegetación; 2. la topografía (elevación, pendiente, orientación de laderas); 3. los antecedentes de ocurrencia; 4. factores meteorológicos; 5. proximidad a carreteras, caminos y senderos, áreas urbanas y sitios turísticos.

Los factores que influyen en la dirección, velocidad e intensidad de RP de un incendio, según Todd (1979), son: 1. el grado de combustibilidad de la vegetación (tipo de vegetación, cantidad, contenido de agua); 2. La topografía (elevación, pendiente, configuración de valles y orientación de laderas); 3. Factores meteorológicos (viento, humedad relativa, temperatura, pluviosidad).

Tomando en cuenta las características particulares de un área dada, factores como los mencionados pueden integrarse en un modelo cartográfico que permita evaluar el riesgo al desarrollo potencial de incendios.

La diversidad de factores que afectan el RI y RP de los incendios forestales requiere de un análisis integrado de las variables que permita establecer áreas de RI, lo cual es posible mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG; Chuvieco y Congalton, 1989).

Cada una de esta múltiple cantidad de variables tiene un peso particular en su participación para el desarrollo de los incendios, por tal razón, el analista debe decidir entre una amplia gama de alternativas de combinaciones de variables o criterios para cumplir una determinada función objetivo, tales como el RI o el RP de incendios.



FIGURA 1. Área de estudio. Fuente: Fernández-Badillo (1997).

Los SIG disponen de una herramienta muy importante para la toma de decisiones que es la Evaluación Multi-criterio (EMC). Como esta se entiende a un conjunto de conceptos, aproximaciones, modelos y métodos, que sirven de soporte a los entes decisorios para describir, seleccionar, evaluar, jerarquizar o rechazar objetos, sobre la base de una evaluación (expresada en puntuaciones, valores o intensidades de preferencia), de acuerdo a varios criterios seleccionados en apoyo a la toma de decisiones (Barredo, 1996). En el caso de modelos ambientales (riesgos de incendios), este método valora las posibles alternativas de selección (vegetación, pendiente, uso, vientos, etc.) que van a ser considerados como los diversos criterios a evaluar según uno o más objetivos.

Un objetivo se puede entender como una función a desarrollar; el objetivo indica la estructuración de la regla de decisión. Un criterio es cierta base para la toma de una decisión, base que puede ser medida y evaluada. Es la evidencia sobre la cual se basa una decisión (Eastman *et al.*, 1993).

Al valorar los diferentes tipos de criterios, es decir, al darle puntuaciones a los criterios estos se pueden integrar a través de una regla de decisión que elegirá entre las alternativas (Eastman *et al.*, 1993; Barredo, 1996; Gutiérrez, 1998).

En el presente estudio los criterios constituyen las diferentes capas cartográficas generadas, consideradas como desencadenantes de la RI o RP de un incendio (por ejemplo, la pendiente del terreno o los pisos altitudinales). Los objetivos o funciones objetivo a desarrollar son por una parte el RI y por la otra el RP. Un método para la asignación de pesos a los criterios es el llamado Método de las Jerarquías Analíticas, desarrollado por Saaty (1977, 1980), citado por Eastman *et al.* (1993) y Barredo (1996).

Según el método se asignan los pesos, de acuerdo a una escala establecida, basándose en estudios preliminares relacionados con el objetivo de la evaluación y el conocimiento del problema evaluado, sea por consulta a expertos, trabajos anteriores o por deducción del grupo que realiza la evaluación. Finalizada la asignación de pesos se recodifican las variables temáticas expresadas en escalas cualitativas cuantificándolas, para posteriormente aplicar un método de EMC. Una vez realizados los procesos de recodificación, se preparan las capas criterio para cada objetivo, luego se corre la regla de decisión para el objetivo RI y para el objetivo RP.

En este trabajo se utilizó el método de evaluación llamado Sumatoria Lineal Ponderada (Chuvieco y Congalton, 1989; Eastman *et al.*, 1993; Chuvieco y Salas, 1994; Barredo, 1996). Este método es una técnica aditiva donde las puntuaciones de las alternativas o variables de cada criterio han sido normalizadas en forma homogénea.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el logro de los objetivos planteados, este trabajo se desarrolló usando los siguientes materiales y secuencia metodológica:

Software

- IDRISI para Windows, versión 2.0 (Sistema de Información Geográfica).
- ROOTS Versión 2,4 (Sistema de digitalización cartográfica).
- Microsoft Excel (Manejo de datos).
- Corel Draw (Edición cartográfica).

Datos

- Cartas topográficas a escala 1:25 000 (6646-I-NO; 6647-II-SO; 6647-II-SE; 6646-I-EN) de Cartografía Nacional (SAGECAN).
- Mapa de cobertura vegetal y uso actual del Parque Nacional Henri Pittier (Pérez, 1986).
- Registros climáticos de la estación meteorológica CENIAP (serial 0447).
- Base de datos de incendios de vegetación (Defensa Civil – Aragua, 1998).

Procesamiento de la Información Básica

Los mapas en papel fueron digitalizados con el programa ROOTS (LCGSA, 1991) y exportados al sistema IDRISI (Eastman, 1997).

Modelado de Riesgo

Se adaptó el modelo de riesgo de incendios de Chuvieco (1990) al Parque Henri Pittier, considerando sus características tropicales, por lo que se

descartaron algunas capas criterio utilizadas por este autor y se incorporaron otras de mayor pertinencia. Para la evaluación se utilizó la tecnología de la toma de decisiones a través de una EMC-Multiobjetivo. Los objetivos de la evaluación son: RI y RP.

Cada objetivo se estructuró con sus diferentes capas criterios. A su vez cada capa se reclasificó con los siguientes valores asignados, en función del tipo asociado de riesgo, bajo: 1; moderado: 2; alto: 3; muy alto: 4. Posteriormente las capas criterios fueron ponderados para luego ser evaluados en una regla de decisión que genera un mapa de riesgo para cada objetivo. Finalmente los objetivos se ponderan y se evalúan para generar el mapa de RI de vegetación definitivo.

Riesgo de Ignición (RI)

Este objetivo está formado por las variables (capas-criterio) relacionadas con la posibilidad de que se inicie un incendio. Las capas usadas para este objetivo son las siguientes: uso de la tierra en el lindero del parque, vegetación sensible a la ignición, accesibilidad (vías que cruzan el área de estudio) y pisos altitudinales.

Uso de la tierra

Se identificaron 11 áreas de uso de la tierra las cuales se muestran en la Figura 2. Estas fueron reclasificadas en las cuatro categorías de riesgo, con base en los criterios obtenidos por consultas a expertos (Bomberos de INPARQUES, Bomberos de Palmarito, Sociedad Conservacionista Aragua, Bomberos de Valle Verde). Los valores de reclasificación que permitieron obtener el mapa correspondiente (capa-criterio) se presentan en el Cuadro 1.

Vegetación

Pérez (1986) identifica 11 formaciones vegetales en el área de estudio, mostradas en la Figura 3, las cuales fueron reclasificadas en las categorías de riesgo, de acuerdo al Cuadro 2.

Accesibilidad

Se calcularon áreas buffer a lo largo de las vías de comunicación del sector (asfaltadas y de tierra) y estas se reclasificaron de acuerdo a la categoría de riesgo, tal como se indica en el Cuadro 3.

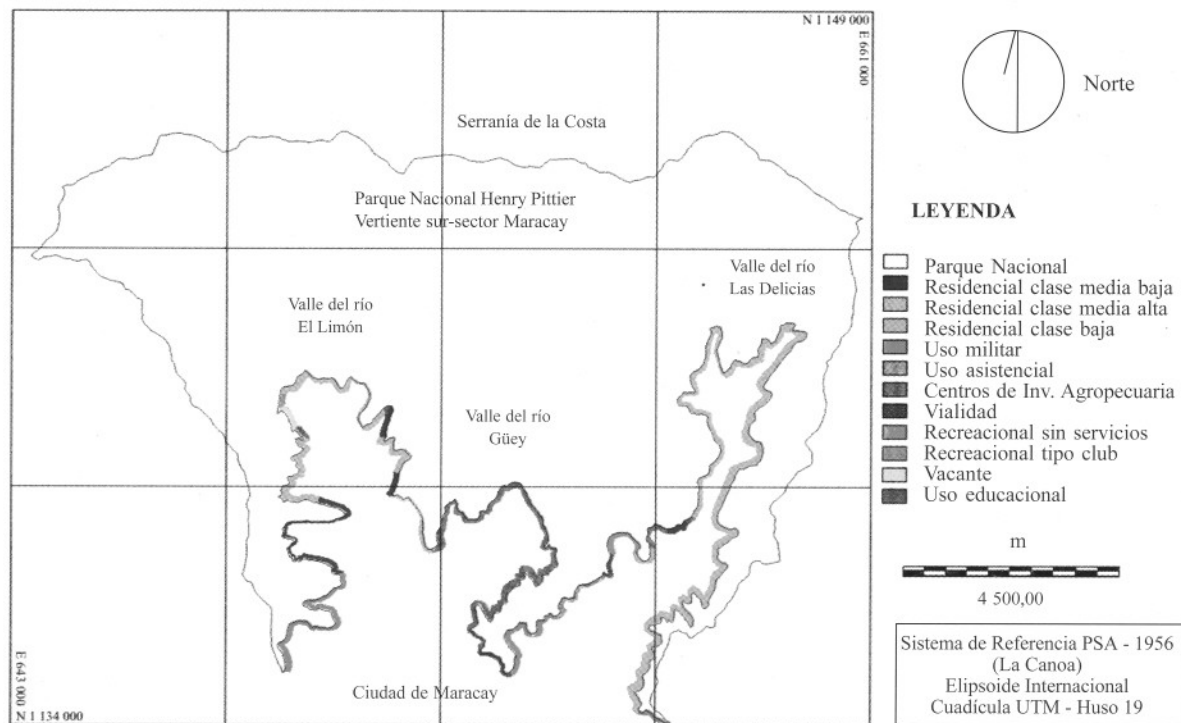


FIGURA 2. Uso de la tierra en la franja limítrofe del área de estudio.

CUADRO 1. CRITERIO - FACTOR: Uso de la tierra en el lindero del parque.

Reclasificación de usos	Clase de riesgo	Coefficiente
Militar, Campos Experimentales de Investigación Agropecuaria, vialidad, recreación sin equipamientos	Muy alto	4
Residencial Clase Media Baja y Clase Baja, Recreacional tipo Club, Vacante.	Alto	3
Residencial Clase Media Alta, Asistencial, Educativa	Moderado	2
Resto de la imagen (Parque Nacional).	Bajo	1

Pisos altitudinales

Se reclasificó el modelo digital de elevación (MDE) de la zona, obtenido a partir del mapa topográfico digitalizado, en pisos altitudinales, los que a su vez fueron categorizados por riesgo, de acuerdo al Cuadro 4.

Riesgo de Propagación (RP)

Este objetivo es función de los factores físico-ambientales que inciden en el comportamiento del fuego ya iniciado. Estas capas-criterio son poco manejables por tratarse de la propagación del fuego. Las capas-criterio que integran este índice de riesgo son: la vegetación, la pendiente, la altitud y la dirección del viento. En este objetivo también se trabajó con dos criterios limitantes: la hidrografía y los cortafuegos existentes, factores que restringen la propagación del fuego.

Vegetación

Para este objetivo se reclasificaron las 11 formaciones vegetales existentes, de acuerdo a la escala de riesgo y considerando su propensión a la propagación del fuego. Los valores empleados se presentan en el Cuadro 5.

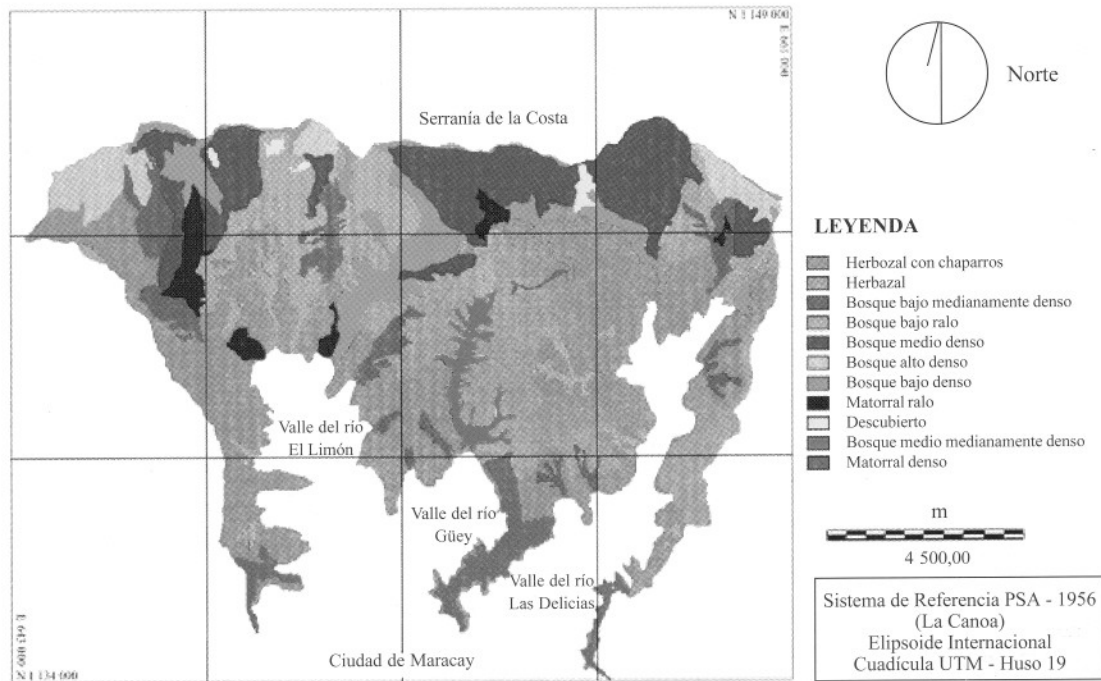


FIGURA 3. Vegetación de la vertiente sur-sector Maracay del Parque Nacional Henri Pittier. Fuente: Pérez (1986).

CUADRO 2. CRITERIO - FACTOR: Vegetación sensible a la ignición.

Formación Vegetal	Clase de riesgo	Coefficiente
Herbazal, Herbazal con Chaparros, matorral ralo	Muy alto	4
Terreno descubierto, Matorral Denso	Alto	3
Bosque Bajo Ralo, Bosque Bajo Medianamente Denso, Bosque Bajo Denso y Bosque Medio Medianamente Denso	Moderado	2
Bosque Medio Denso y Bosque Alto Denso	Bajo	1

CUADRO 3. CRITERIO - FACTOR: Accesibilidad por carreteras de tierra y asfalto.

Reclasificación según cercanía a la vía	Clase de Riesgo	Coefficiente
Asfalto 50 m Tierra 20 m	Muy alto	4
Asfalto 100 m Tierra 40 m	Alto	3
Asfalto 150 m Tierra 80 m	Moderado	2
Resto de la imagen	Bajo	1

CUADRO 4. CRITERIO - FACTOR: Pisos altitudinales.

Reclasificación Altura en m.s.n.m.	Clase de riesgo	Coefficiente
450 – 900	Muy Alto	4
900 – 1 300	Alto	3
1 300 – 1 900	Moderado	2
1 900 en adelante	Bajo	1

CUADRO 5. CRITERIO - FACTOR: Vegetación sensible a la propagación.

Formación Vegetal	Clase de riesgo	Coefficiente
Herbazal, Herbazal con Chaparros, Matorral Denso	Muy alto	4
Terreno Descubierto, Matorral Ralo	Alto	3
Bosque Bajo Ralo, Bosque Bajo Denso y Bosque Bajo Medianamente Denso	Moderado	2
Bosque Medio Medianamente Denso, Bosque Medio Denso y Bosque Alto Denso	Bajo	1

Pendiente

A partir del MDE se obtuvo el mapa de pendientes del terreno, el cual fue reclasificado de acuerdo a las categorías de riesgo indicadas en el Cuadro 6.

Pisos altitudinales

Se utilizó la misma imagen reclasificada del objetivo ignición.

CUADRO 6. CRITERIO – FACTOR: Pendiente del terreno.

Rangos de Pendiente (Grados)	Tipo de Propagación	Clase de Riesgo	Coefficiente
0----10°	Lenta	Bajo	1
10----30°	Media	Moderado	2
30----45°	Rápida	Alto	3
45----90°	Muy rápida	Muy alto	4

Vientos

En el valle de Maracay el viento es ascendente durante el día, lo que sumado al efecto de la pendiente hace que la propagación del incendio sea altamente intensa y veloz. De noche, las corrientes locales descendentes favorecen la extinción del fuego en las laderas, al oponerse al sentido de desarrollo del incendio.

Para la obtención de la imagen de influencia de vientos, se generó, a partir del MDE, el mapa de orientación de laderas, el cual se reclasificó en función de las 8 orientaciones de la Rosa de los vientos. La imagen generada se combinó con los datos de la estación meteorológica CENIAP. En esta estación se recolectaron datos mensuales de dirección dominante de los vientos durante un período de 15 años. Estas orientaciones se convirtieron en grados. Posteriormente se realizó un análisis de frecuencia para obtener las direcciones mensuales más frecuentes de esos 15 años en el período de incendios (diciembre a abril). En la Figura 4 se presenta la imagen resultante para el mes de diciembre.

Hidrografía

La red hidrográfica es tomada como un criterio limitante a la propagación dentro del modelo. Se le agregó un área buffer de 20 m asumiendo que el ambiente se mantiene húmedo a ambos lados del cauce de los ríos en esa distancia. La capa criterio se reclasificó entonces, en esa área, con un riesgo de cero (sin riesgo).

Cortafuegos

Las vías dentro del área de estudio cumplen una función limitante a la propagación del fuego, pues allí el suelo está desnudo. Esta capa se reclasificó también con un riesgo de cero.

Ponderación de criterios

En la ponderación se utilizó el Método de las Jerarquías Analíticas, para lo cual se construyó una matriz de comparación por pares de criterios para el cálculo de los pesos relativos de cada uno de ellos. Para el objetivo RI la matriz de comparación se presenta en el Cuadro 7 y para el objetivo RP en el Cuadro 8. Estas matrices se elaboraron a partir de juicios de valor emitidos por expertos en la problemática ambiental del Parque

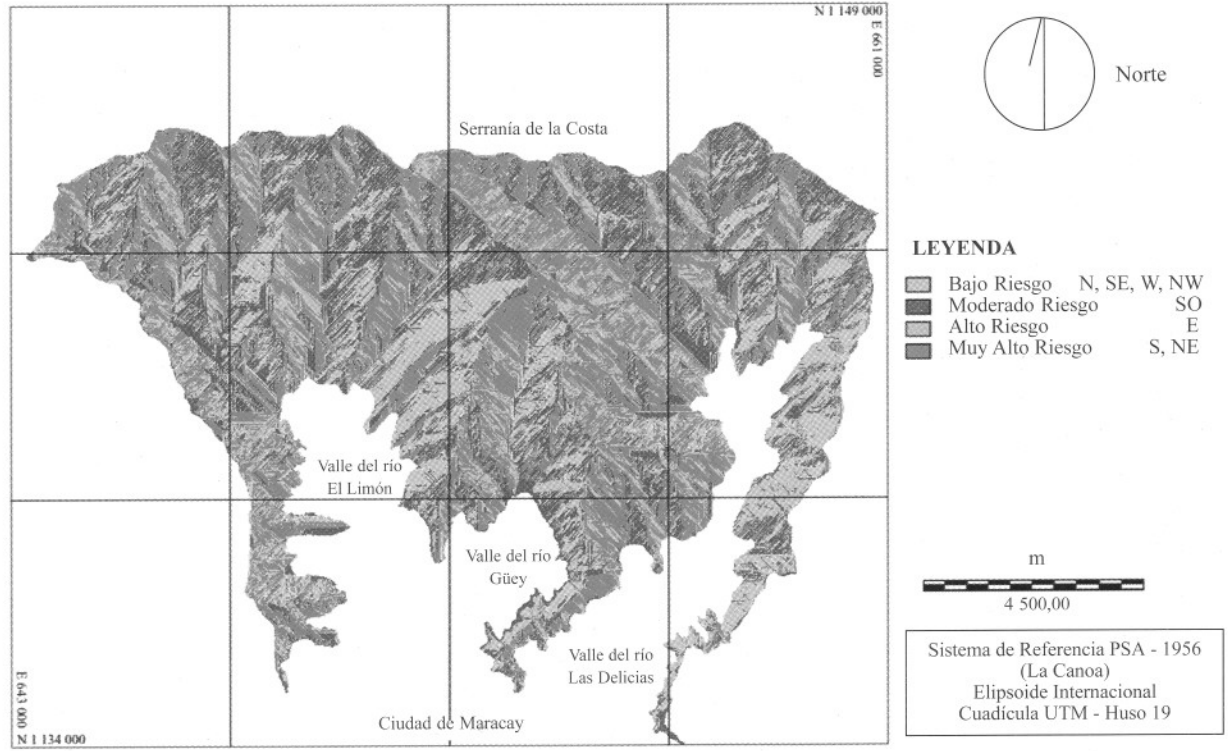


FIGURA 4. Dirección de los vientos en relación con la orientación de laderas, para el mes de diciembre.

Henri Pittier, consultados en el Instituto Nacional de Parques, en los cuerpos de bomberos locales, en Defensa Civil-Aragua y en la Universidad Central de Venezuela-Maracay, y apoyándose en la base de datos de incendios de vegetación disponible en Defensa Civil-Aragua (1998).

En el Cuadro 7 se puede interpretar que el criterio uso colindante es dos veces más importante, en lo que respecta al inicio de un fuego, que la vegetación. También que la accesibilidad al parque, por las vías que lo cruzan, y la vegetación, tienen igual importancia para la ignición y que la altitud es dos veces menos importante que la vegetación y que la accesibilidad, y tres veces menos importante que el uso colindante. La matriz de comparación por pares de criterio para el objetivo RP, presentada en el Cuadro 8, se interpreta de manera similar. Se determinó que las relaciones de importancia entre los criterios son consistentes, ya que la razón de consistencia estuvo por debajo de 0,10 en ambas matrices.

Se calcularon los pesos ponderados para cada criterio de cada objetivo usando el SIG, el cual calcula el autovector principal de cada matriz de comparación para obtener el mejor ajuste de los pesos. En los Cuadros 9 y 10 se presentan los pesos ponderados obtenidos por el SIG para cada criterio de cada objetivo. Aquí se observa que el criterio más importante para el objetivo RI resultó ser el uso colindante con el parque (42,36%), ya que el inicio de la gran mayoría de los incendios tiene que ver con la presencia humana en los linderos (Cuadro 9). En relación al RP, la mayor ponderación se asignó a la vegetación (43,93%), explicable por el aporte de combustible que esta hace para el RP de los incendios.

CUADRO 7. Matriz de comparación por pares de criterios para el objetivo ignición.

Criterio	Vegetación	Uso colindante	Accesibilidad	Altitud (Pisos)
Vegetación	1	1/2	1	2
Uso colindante	2	1	2	3
Accesibilidad	1	1/2	1	2
Altitud (Pisos)	1/2	1/3	1/2	1

Razón de consistencia: 0,00

CUADRO 8. Matriz de comparación por pares de criterios para el objetivo propagación.

Criterio	Vegetación	Pendiente	Vientos	Altitud (Pisos)
Vegetación	1	2	2	5
Pendiente	1/2	1	1/2	3
Vientos	1/2	2	1	4
Altitud (Pisos)	1/5	1/3	1/4	1

Razón de consistencia: 0,02

CUADRO 9. Pesos de los criterios para el objetivo ignición.

Criterio	Ponderación
Vegetación (Vi)	0,2270
Uso colindante (Uc)	0,4236
Accesibilidad (A)	0,2270
Pisos altitudinales (Pa)	0,1224

CUADRO 10. Pesos de los criterios para el objetivo propagación.

Criterio	Ponderación
Vegetación (Vp)	0,4393
Pendiente (P)	0,1925
Vientos (V)	0,2944
Pisos altitudinales (Pa)	0,0738

Evaluación Multi-criterio y Multi-objetivo

Se utilizó el método de Sumatoria Lineal Ponderada como regla de decisión de la evaluación de cada objetivo. Luego de ser completados los objetivos, se ponderan de forma arbitraria tomando en cuenta la importancia de cada objetivo y se corre de nuevo la regla de decisión en el SIG para obtener el mapa definitivo.

Objetivo 1: Riesgo de ignición (RI)

Se estructuró la regla de decisión en función a los criterios anteriormente ponderados, tomando en cuenta que es un modelo cartográfico, en el cual los criterios son imágenes espacialmente definidas con georeferencias absolutas. Esta regla de decisión funciona por la superposición de las imágenes ya reclasificadas en las alternativas normalizadas con valores del 1 al 4, y se resume en la siguiente fórmula para las 4 capas:

$$\begin{aligned} \text{RI} &= (\text{USO} * (\text{Uc})) + (\text{Vegetación} * (\text{Vi})) + (\text{Accesibilidad} * (\text{A})) + (\text{Pisos Altitudinales} * (\text{Pa})) \\ \text{RI} &= (\text{Uc} * 0,4236) + (\text{Vi} * 0,2270) + (\text{A} * 0,2270) + (\text{Pa} * 0,1224) \end{aligned}$$

El SIG, realiza esta operación por pixel superpuesto y arroja resultados dentro del rango de las 4 alternativas (1 al 4) a través de algoritmos de cálculo en él incluidos. De esta forma se genera la imagen de RI como se puede apreciar en la Figura 5.

Objetivo 2: Riesgo de propagación (RP)

La metodología es la misma que la del RI con la diferencia de que en el objetivo RP se tienen dos criterios limitantes (la red hidrográfica de drenaje y los cortafuegos), por consiguiente, en la superposición, donde coincidan espacialmente los criterios (capas) con una limitante, se están multiplicando las celdas de la capa-criterio con el valor cero de la celda limitante, obteniéndose por tanto celdas con valor cero.

Este procedimiento se puede resumir en las fórmulas siguientes:

Caso sin criterio limitante

$$\begin{aligned} \text{RP} &= (\text{Vegetación} * (\text{Vp})) + (\text{Pendiente} * (\text{P})) + (\text{Vientos} * (\text{V})) + (\text{Pisos Altitudinales} * (\text{Pa})) \\ \text{RP} &= (\text{Vp} * 0,4393) + (\text{P} * 0,1925) + (\text{V} * 0,2944) + (\text{Pa} * 0,0738) \end{aligned}$$

Caso con criterio limitante – red hidrográfica de drenaje (D)

$$\begin{aligned} \text{RP} &= (\text{Vp} * \text{D}) + (\text{P} * \text{D}) + (\text{V} * \text{D}) + (\text{Pa} * \text{D}) \\ (\text{D}) &= 0 \end{aligned}$$

$$\text{RP} = (\text{Vp} * 0) + (\text{P} * 0) + (\text{V} * 0) + (\text{Pa} * 0)$$

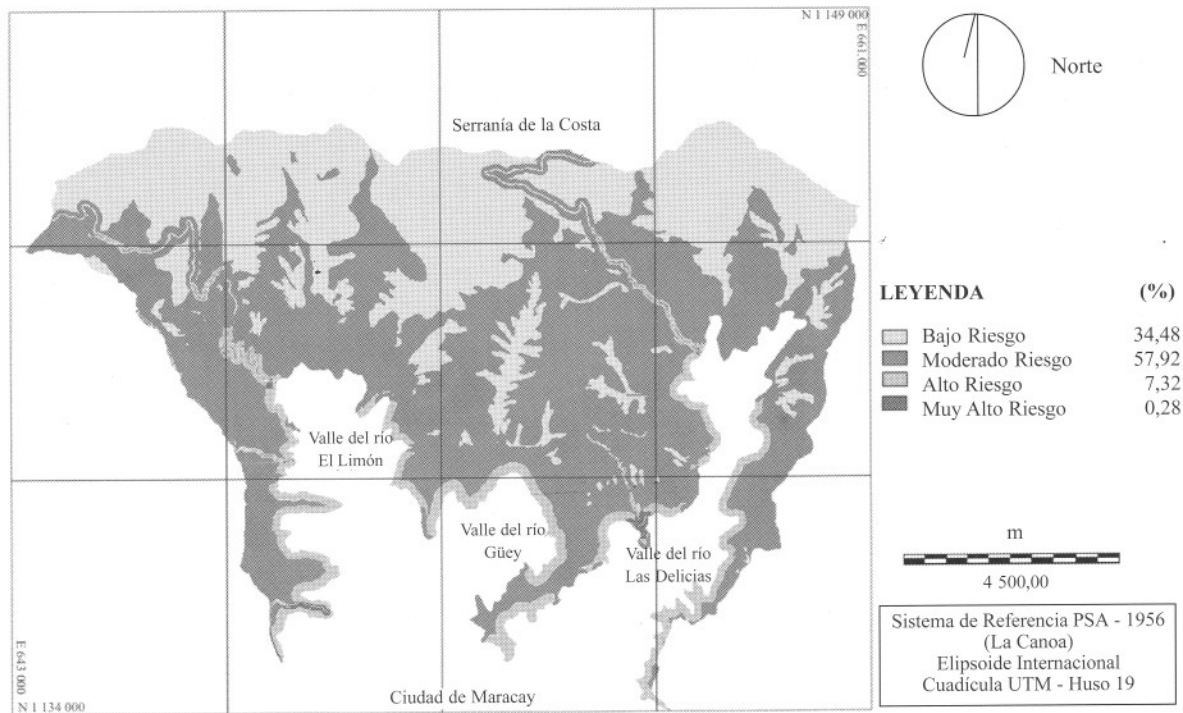


FIGURA 5. Riesgo de ignición de incendios de vegetación.

Para el caso con criterio limitante cortafuegos (C), se utiliza el mismo procedimiento. El resultado de esta evaluación se presenta en la Figura 6, correspondiente al mes de diciembre.

Evaluación final riesgo de incendios de vegetación

Al tener las dos capas objetivo se construyó el modelo de decisión multi-objetivo, estructurando la regla de decisión final para obtener el modelo de evaluación de riesgo de incendios de vegetación. Como resultado de la consulta a expertos se seleccionó una ponderación de 0,51 y 0,49 para los objetivos RP y RI, respectivamente. La aplicación de la regla de decisión permitió obtener una imagen definitiva de riesgo para cada mes del período de incendios (de diciembre a abril). En la Figura 7 se presenta el resultado del mes de diciembre.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 8 se presentan los resultados del RI en el área de estudio. De las 10 872 ha estudiadas el 34,48% tiene bajo RI. Esta categoría se ubica en las zonas que están a alturas mayores a los 1 700 m.s.n.m., en los bosques medios y bosques altos densos siempre verdes del parque, alejados de las vías de acceso y del lindero con la ciudad de Maracay. El riesgo moderado ocupa más de la mitad de todo el área de estudio (57,2%) e incluye extensiones cubiertas por herbazales alejados de las vías de acceso y del lindero del parque, así como otros tipos de vegetación alejadas de las vías de comunicación, pero, cercanas al lindero. La categoría alto riesgo (7,32%) se ubica en las zonas de intersección del lindero del parque con las vías de acceso. La superficie de muy alto riesgo (0,28%) se localiza en los sitios donde coincide el lindero del parque con las vías de acceso y vegetación herbácea.

En la Figura 9 se presentan los resultados del RP en el área de estudio. En este caso hay una variación mensual de los resultados dado que se incluye la variable vientos que cambia en el tiempo. Para el mes de diciembre se presenta el mayor porcentaje de zonas con muy alto riesgo (19,84%), ubicadas en los herbazales y matorrales de laderas con fuertes pendientes orientadas hacia el nordeste y hacia el sur. Las zonas de alto riesgo cubren casi la mitad del área de estudio (49,12%), ubicándose en los herbazales y matorrales de laderas con pendientes relativamente fuertes orientadas hacia el oeste.

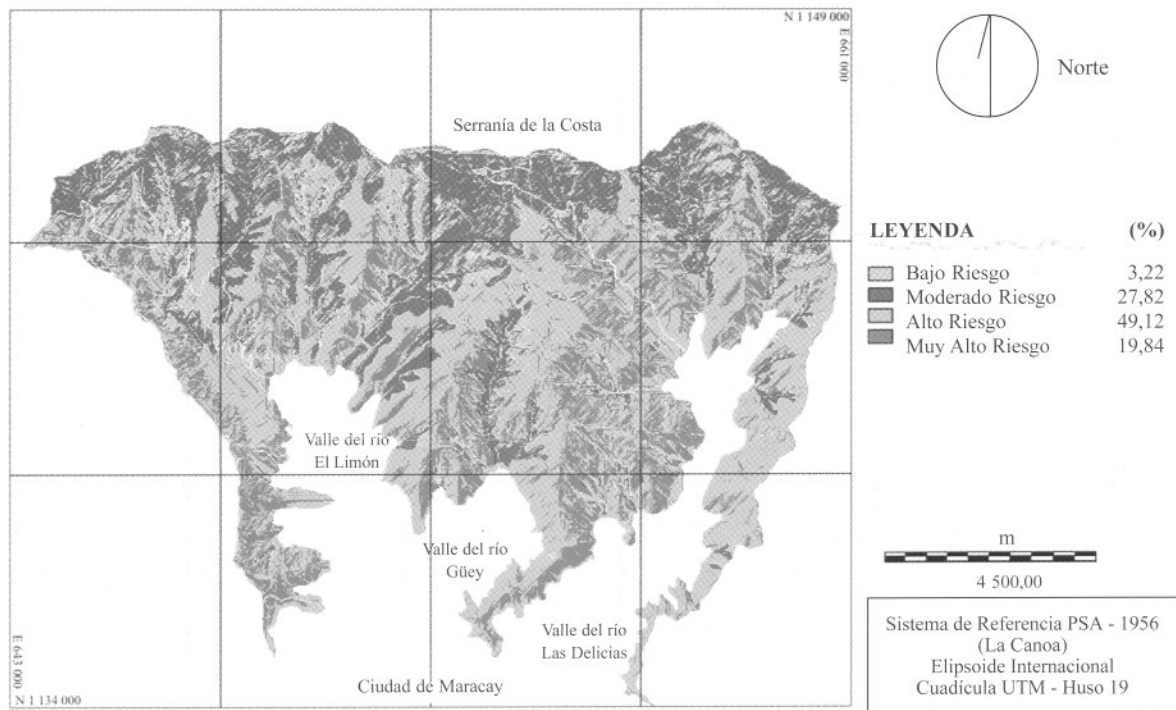


FIGURA 6. Riesgo de propagación de incendios de vegetación, para el mes de diciembre.

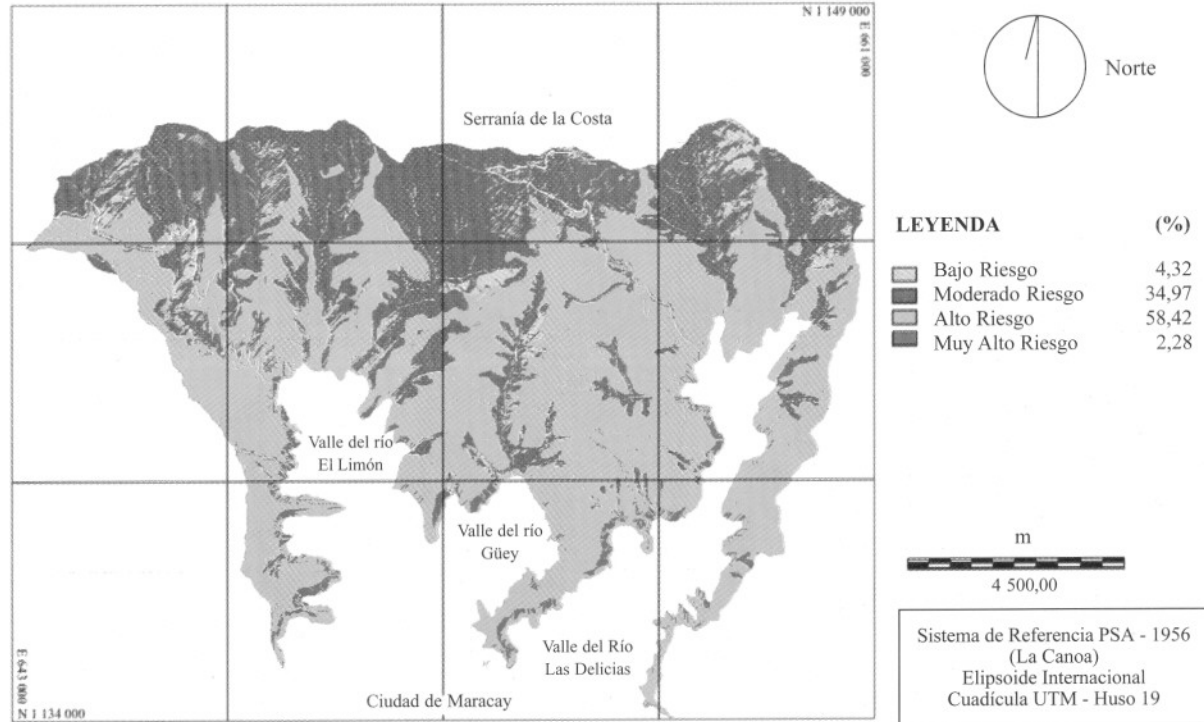


FIGURA 7. Riesgo total de incendios de vegetación, para el mes de diciembre.

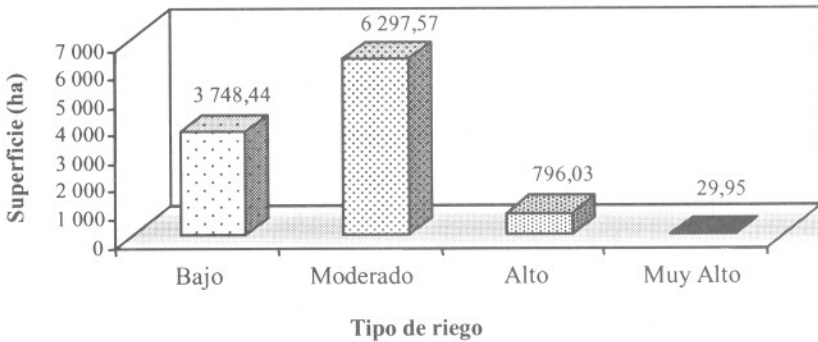


FIGURA 8. Tipo de riesgo de ignición por superficie del área de estudio.

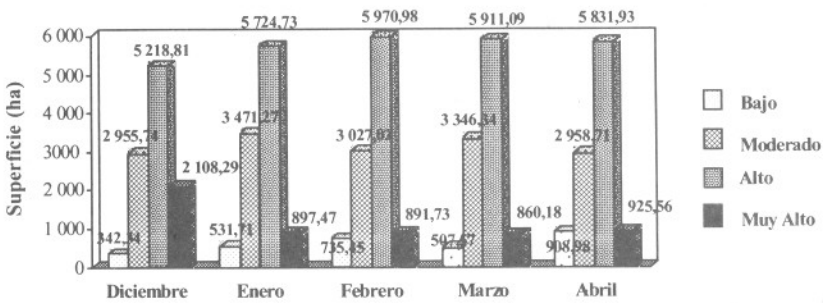


FIGURA 9. Tipo de riesgo de propagación por superficie por mes del período de incendios.

Las zonas de moderado riesgo (27,82%) se ubican en lugares de vegetación boscosa alta densa y mediana densa, con laderas de pendientes moderadas orientadas principalmente hacia el sùroeste. Las zonas de bajo riesgo (3,22%) se localizan en lugares de vegetación boscosa alta densa y mediana densa, con laderas de pendientes moderadas orientadas hacia el norte, oeste y noroeste. Para los meses de enero a abril disminuye el porcentaje de las zonas de muy alto riesgo y se incrementa el porcentaje de las zonas de alto riesgo, con cambios porcentuales relativamente bajos en las otras categorías, producto del cambio equivalente en la dirección de los vientos.

En la Figura 10 se presentan los resultados finales del riesgo de incendios de vegetación en el área de estudio (RI + RP). Aquí se observa la disminución continua de la superficie de zonas de muy alto riesgo y el incremento continuo de las superficies de zonas con bajo riesgo, a través de los meses del período seco. La superficie de zonas de moderado y alto riesgo se mantiene aproximadamente igual todos los meses.

En promedio para los meses del período, las zonas de bajo riesgo ocupan una superficie de 727,7 ha (6,8%), las zonas de moderado riesgo unas 3 694,9 ha (34,4%), las zonas de alto riesgo unas 6.186,4 ha (57,5%) y las zonas de muy alto riesgo unas 138,7 ha (1,3%). Al analizar la Figura 10 se puede deducir la interrelación entre la vegetación, la orientación de las laderas, la pendiente y los pisos altitudinales, asociados al RP, con los factores antrópicos del RI, pues el comportamiento de los tipos de riesgo, en los meses del período de incendios, es proporcional a los resultados del RP; con la salvedad de que las áreas de muy alto riesgo sólo se ubican cerca de las vías de acceso o del lindero del parque, que coincide con el área urbana más sensible a la ocurrencia de un incendio.

En las imágenes resultado (Figura 7) se pueden identificar sitios específicos de muy alto riesgo de RI y/o RP, en los cuales deben acometerse con urgencia medidas de prevención y control. Estos son:

- Las inmediaciones del cerro CAVIM, en la fila La Cabrera, terrenos de propiedad militar (cuenca del río El Limón).
- El inicio del cortafuego del barrio Mata Seca (cuenca del río El Limón).
- El inicio de la carretera Maracay-Ocumare de la Costa (cuenca del río El Limón).
- El área experimental del CENIAP (cuenca del río Güey).
- El área de la planicie del cortafuego ubicado frente al Hotel Maracay (cuenca del río Las Delicias).
- El inicio de la carretera Maracay-Choroní (cuenca del río Las Delicias).

En recorridos de campo realizados por la zona estudiada se verificó la correspondencia entre algunos de los resultados arrojados por la evaluación del modelo y la realidad de la distribución de los incendios

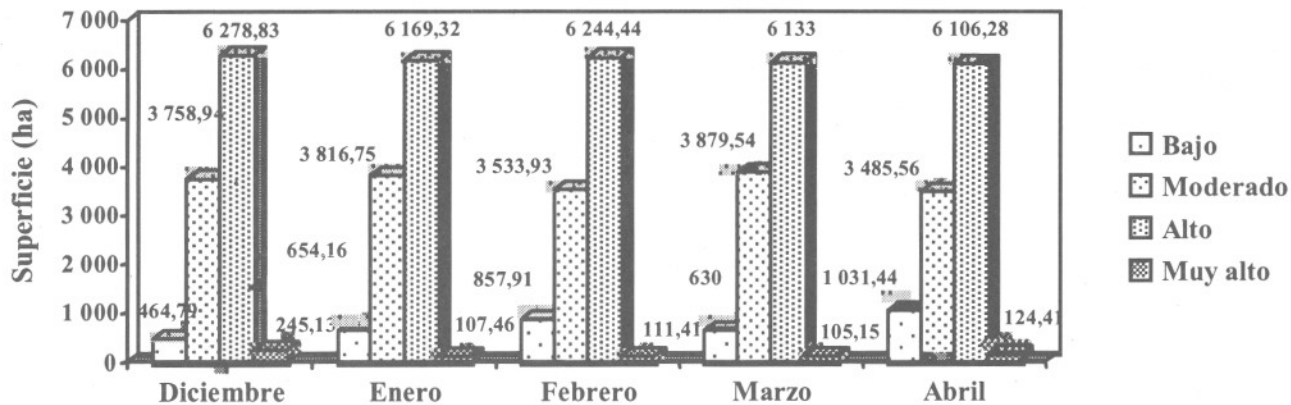


FIGURA 10. Tipo de riesgo total de incendios de vegetación por superficie por mes.

en la temporada seca del año, en particular para los sitios anteriormente mencionados (áreas de muy alto RI). A pesar de la gran cantidad de componentes físico-naturales incluidos en el modelo, el elemento humano es preponderante en el desarrollo de los incendios de vegetación, principalmente en el RI, por lo cual es importante mencionar la falta de conciencia de las instituciones que se desenvuelven en la zona y que son responsables de la mayor parte de los incendios al efectuarlos intencionalmente con fines de limpieza de terrenos, sin ningún tipo de control.

También las autoridades gubernamentales de la ciudad tienen una alta cuota de responsabilidad por no establecer mecanismos preventivos y represivos para el control del problema. Sin embargo, el ciudadano común es el principal responsable al mantener una actitud indolente ante un problema de semejante magnitud.

Los mapas generados con este trabajo pueden ser utilizados para la definición de las medidas de prevención y control, en particular el trazado y prediseño de cortafuegos (para lo cual es útil el mapa de RP) y la planificación de medidas de vigilancia y educación ambiental. Para la planificación de medidas de orden físico, como cortafuegos y torres de vigilancia, los resultados del modelo cartográfico se pueden apoyar en la interpretación de imágenes multi-temporales de sensores remotos, como imágenes de satélite y fotografías aéreas.

SUMMARY

A GIS was used, especially their multi-criteria analysis tools, thus variables such as topography, land use, hydrography, roads and vegetation were digitized. Each one of these variables were processed to generate the criteria of the two main target layers chosen in the evaluation model: ignition risk and propagation risk. The ignition risk target layer is constituted by floors heights, park adjacent land use, accessibility and ignition sensitive vegetation criteria. The propagation risk target layer was evaluated by the slope, propagation sensitive vegetation, wind influences, floors heights, hydrography and firewalls criteria. These criteria were pondered using the Analytical Hierarchy Process and were introduced in the multi-criteria decision rule structured and incorporated into the GIS, generating the risk cartography for each target layer. Finally, the two target layers were integrated to generate the definitive vegetation fires risk cartography. It was found that exist proximately 139 ha with

very high risk, 6 186 ha with high risk, 3 695 ha with moderate risk and 728 ha with low risk of fire. At the same time, there were detected areas where it is necessary to apply some practices to prevent and to control this serious environmental problem that affects Maracay city and its surroundings population.

Key Words: Geographical Information System (GIS); ignition risk; propagation risk; multi-criteria evaluation; multi-objective evaluation; Henri Pittier National Park; cartographic modeling; vegetation fires.

BIBLIOGRAFÍA

BARREDO, J. 1996. Sistemas de información geográfica y evaluación multi-criterio en la evaluación del territorio. RA-MA. Madrid. España.

CHUVIECO, E. 1990. Aplicación de un SIG al riesgo de incendios forestales. Universidad de Alcalá de Henares. España.

CHUVIECO, E. and R. G. CONGALTON. 1989. Application of remote sensing and Geographic Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping. Remote Sensing of environment. Vol 29. p. 147-159.

CHUVIECO, E. and J. SALAS. 1994. Geographic Information System for Wildland Fire Risk Modelling, International Journal of Wildland Fire.

DEFENSA CIVIL ARAGUA. 1998. Estadísticas de incendios forestales ocurridos durante la temporada 1997 – 1998 en el Parque Henri Pittier. Maracay. Venezuela.

EASTMAN, J., P. KYEM, J. TOLEDANO and W. JIM. 1993. GIS and Decision making. United Nations Institute for Training and Research (UNITAR). Ginebra. Suiza.

EASTMAN, J. 1997. Idrisi for Windows. User's Guide. Version 2.0. Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis. University Graduate School of Geography. Worcester, MA, EE.UU.

FERNÁNDEZ-BADILLO A. 1997. El Parque Nacional Henri Pittier. Tomo I Caracterización Físico-Ambiental. Maracay, Ven. Universidad Central. Facultad de Agronomía.