



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i62.775>

Artículo

Análisis comparativo del número e intervalos de clases de riesgo de incendios forestales

Comparative analysis of the number and intervals of forest fire risk classes

José Germán Flores-Garnica¹ y Ana Graciela Flores-Rodríguez²

Abstract

The issue of forest fires involves prioritizing areas of attention, based on criteria such as risk, in order to locate and size them on specific thematic maps. Their classification includes: a) selecting the number of risk classes, and b) a process to establish class intervals. However, this varies depending on the appreciation of who specifies such classification. In order to prevent this variation, a comparative analysis is made between two class numbers (3 and 5) and the following alternative categories: Equal Intervals, Quantiles, Natural Breaks, and Geometric intervals. 1 000 validation sites (VS) were located at random on a forest fire risk map of the state of Jalisco (Mexico) in order to determine the number of classes and the method for establishing the intervals. An area of 100 km² was delimited around these sites, where the number of forest fires during the 2005-2014 period was determined. Thus, the risk class corresponding to each of these VS was associated with the number of fires that were located in the 100 km² area. Based on this, the variability (standard deviation) between the classes generated by each of the four methods for determining their intervals was compared. The results suggest that the Equal Interval method is the most suitable for defining the intervals of the fire risk class. As for the number of classes, there is a clear differentiation between the classes when five of these are utilized.

Keywords: Quantile, equivalent interval, geometric intervals, equal intervals, progression intervals, natural breaks.

Resumen

La problemática de incendios forestales conlleva a priorizar áreas de atención con base en criterios como el riesgo, para ubicarlas y dimensionarlas en cartografía temática específica; cuya clasificación implica: a) selección del número de clases de riesgo; y b) proceso para establecer los intervalos de clases. No obstante, esto varía dependiendo de la apreciación de quien especifica la clasificación; para evitarlo, se hace un análisis comparativo entre dos números de clases (3 y 5) y las siguientes alternativas de división de intervalos entre las clases: Intervalos iguales; Cuantiles; Rupturas naturales; e Intervalos geométricos. Se usó un mapa de riesgo de incendios forestales del estado de Jalisco (México), en el cual para definir el número de clases y el método para establecer los intervalos, se ubicaron al azar 1 000 sitios de validación (SV). Alrededor de ellos se delimitó una superficie de 100 km², para contar el número de incendios forestales del período 2005-2014. Así, se asoció la clase de riesgo que correspondía a cada uno de los SV con el número de incendios ubicados en el área de 100 km². A partir de esto, se comparó la variabilidad (desviación estándar) entre las clases generadas por cada uno de los cuatro métodos para definir sus intervalos. Los resultados sugieren que el método de intervalos iguales (II) es el más indicado para definir los intervalos de clase de riesgo de incendios. Referente al número de clases, existe una más clara diferenciación, entre las clases, al usar cinco clases.

Palabras clave: Cuantil, intervalo equivalente, intervalo geométrico, intervalos iguales, intervalos de progresión, rupturas naturales.

Fecha de recepción/Reception date: 25 de mayo de 2020

Fecha de aceptación/Acceptance date: 11 de septiembre de 2020

¹Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, Centro de Investigación Regional Pacífico Centro, INIFAP. México.

²Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. México

*Autor para correspondencia; correo-e: flores.german@inifap.gob.mx

Introducción

En México, año con año se presentan incendios que impactan los ecosistemas forestales; por ejemplo, durante el período 2005-2015 se contabilizaron en promedio 8 857.9 incendios, que afectan 326 524.4 ha por año (Conafor, 2015). Específicamente, el estado de Jalisco se ubica entre los 10 primeros lugares en cuanto a número, con un promedio de 595.9 incendios, los cuales afectan alrededor de 21 594 ha al año. Lo anterior implica que se tengan que establecer estrategias de prevención y combate de incendios forestales (Calkin *et al.*, 2014). No obstante, debido a que los recursos (económicos y humanos) disponibles son limitados es necesario priorizar las áreas de atención (Conafor, 2010; Mildrexler *et al.*, 2016), las cuales pueden ubicarse y dimensionarse mediante cartografía temática específica (de la Riva *et al.*, 2004).

La generación de esta cartografía se apoya en varios criterios, como el riesgo (Kuter *et al.*, 2011; Mohammadi *et al.*, 2014; Salvati y Ferrara, 2015) y el peligro de incendios forestales (Magaña y Romahn, 1987; Rojo *et al.*, 2001). Sin embargo, los estudios de riesgo de incendios en México son escasos (Villers y López, 2004; Vega-Nieva *et al.*, 2018), ya que la definición de criterios implica integrar, cartográficamente, una gran cantidad de información (Carrillo *et al.*, 2012), como la ocurrencia de incendios (Ávila *et al.*, 2010; Pérez *et al.*, 2013; Pan *et al.*, 2016); cercanía a caminos (de Torres *et al.*, 2008), pendiente, cargas de combustibles, etcétera.

En ocasiones, esta integración requiere de procesos complejos (Vilar *et al.*, 2011) y la cartografía resultante puede tener un uso limitado, si no se presenta en forma adecuada (Yeguez y Ablan, 2012); para lo cual se deben especificar mediante procedimientos que están bien definidos, entre otros aspectos, la escala, orientación, sistema de georreferencia, etcétera.

Unos de los aspectos al que poca atención se le ha dado, además de la especificación del número de las clases, en este caso, de riesgo o peligro de incendio (Torres *et al.*, 2007; Rodríguez *et al.*, 2011), es la definición de los intervalos de clases. Frecuentemente, se hace de manera aleatoria o desde una perspectiva subjetiva, basada

en la apreciación personal del generador de la cartografía. Es decir, en principio, al generar un mapa de riesgo de incendio se establecen, por lo general, tres (bajo, medio y alto) o cinco (muy bajo, bajo medio, alto y muy alto) clases de riesgo. Posteriormente, en forma tradicional, se especifican sus intervalos con base en una división de valor de riesgo más alto entre el número de clases, sin ningún criterio que lo justifique.

Existen varios métodos para la definición de los intervalos de cada clase, entre ellos los intervalos iguales, desviación estándar, intervalo geométrico, etcétera (Osaragi, 2002); los cuales se usan en forma indistinta y, más aun, se eligen subjetivamente. Sin embargo, es importante considerar que comparar diferentes clases de riesgo, o intervalos de clases puede resultar en diferencias operativas considerables en relación a la ubicación y dimensionamiento de esas clases.

De acuerdo con esto, el objetivo del presente trabajo fue hacer un análisis comparativo entre dos clasificaciones del número de incendios: tres [bajo, medio y alto] y cinco [muy bajo, bajo medio, alto y muy alto]; las clases se definieron en función de diferentes alternativas de división de los intervalos (intervalo equivalente, rupturas naturales, intervalo geométrico e intervalos por cuantiles). Con base en esto, se propone un proceso objetivo para definir el número de intervalo de clases (de número de incendios) en cartografía de riesgo de incendios forestales. De tal manera que, al usar el mismo criterio de clasificación, se podrán comparar mapas de riesgo de diferentes regiones. La propuesta se ejemplifica con información georreferenciada sobre riesgo, que se define en relación a la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Jalisco.

Número de clases de riesgo de incendios forestales. En forma práctica, se define como riesgo a la probabilidad de que se inicie un incendio forestal (Flores, 2017) y para su determinación se usan varios criterios: la cercanía a caminos, la ocurrencia de incendios, las causas, etcétera. A cada uno de ellos, se le asigna una serie de ponderaciones que, al integrarlas, determinan cierto valor de riesgo de incendio forestal en un lugar en particular.

Posteriormente, y debido a limitaciones presupuestales, se establecen áreas prioritarias de atención para lo cual se define un número de clases de riesgo específico y se generan mapas que representan su distribución espacial. Sin embargo, es importante remarcar que la especificación del número de clases de riesgo depende de que ilustren con el suficiente detalle la variación espacial del riesgo de incendios forestales. Por ello, se busca un punto de equilibrio entre un número muy bajo de clase, que no permita detallar adecuadamente el comportamiento del riesgo en el espacio, y uno muy alto que dificulte ubicar y dimensionar a cada una de las clases. Esto se define, generalmente, con base en aspectos perceptivos, así como en relación a la experiencia de quien está a cargo de interpretar la información.

Así, se especifican, sin ningún soporte estadístico, tres, cuatro, cinco o más clases de riesgo de incendios forestales; por ejemplo: a) alto, medio y bajo (Atienza *et al.*, 2012; Sevillano *et al.*, 2015); b) muy alto, alto, moderado, bajo (Jaiswal *et al.*, 2002); c) se añaden otras categorías extremas, como riesgo nulo y riesgo extremo (Julio, 1990), o muy bajo y muy alto (IDEAM, 2011). De igual manera, para la definición de mapas de índice de riesgo se pueden adoptar otros índices de determinación de riesgo: a) canadiense: bajo, moderado, alto, muy alto y extremo (Burriel *et al.*, 2006); b) australiano: bajo, moderado, alto, muy alto y extremo (Dowdy *et al.*, 2009); c) americano: bajo, moderado, alto, muy alto y severo (Jolly *et al.*, 2019); brasileño: nulo, pequeño, medio, alto y muy alto (Ziccardi *et al.*, 2020).

Especificación de intervalos de clase. Una vez que se define el número de clases de riesgo, se debe determinar el criterio para establecer los intervalos de cada una de ellas. Aunque se sigan procesos específicos, los intervalos se seleccionan de varias formas, lo cual implica que se pueden tener diferentes intervalos de clasificación para una misma área. La clasificación de dichos procesos es factible realizarla con una perspectiva matemática o estadística (Robinson, 1975); pero, generalmente se determinan bajo criterios empíricos (Evans, 1977). A su vez, estos se subdividen en exógenos y los determinados a partir de su distribución espacial (Evans, 1977). No

obstante, el enfoque tiende a ser, más bien, arbitrario con límites fáciles de identificar, sin considerar la distribución original de los datos (Evans, 1977).

En general, se usan procesos de carácter práctico, por ejemplo: 1) dividir matemáticamente entre el número de clases por establecer el intervalo de los valores de riesgo (Conafor, 2010; Castillo *et al.*, 2012); 2) definir la distribución de frecuencia de los valores de riesgo, con lo que la superficie correspondiente a la primera clase de prioridad corresponde a la mitad de la superficie de la segunda clase de prioridad, y esta a la mitad de la tercera clase (1/7, 2/7 y 4/7 del total, respectivamente) (Julio, 1990); y 3) a partir de la amplitud de los valores de riesgo generados, seguido de la implementación de la siguiente ecuación (IDEAM, 2011):

$$\text{Amplitud del rango} = [(Max1 - Min1)]/n$$

Donde:

Min1 = Valor mínimo normalizado del factor en toda el área de estudio

Max1 = Valor máximo normalizado presentado por el factor en toda el área de estudio

N = Número total de datos de cada factor

Cabe destacar que, en ningún caso se utiliza un soporte estadístico para la definición del intervalo de las clases de riesgo.

Esquemas de clasificación estándar. Al fijar los intervalos de las clases con los que se clasificará la información en el mapa de riesgo de incendio, primeramente, se debe examinar la distribución espacial de los datos, debido a que se pueden presentar las siguientes situaciones (Osaragi, 2002): a) omitir la naturaleza de los datos; b) pérdida de datos, cuando se clasifican los valores numéricos y se representan en mapas para su entendimiento visual; y c) como consecuencia de los puntos

anteriores, es posible hacer una mala interpretación de la realidad. Más aún, se debe considerar la propagación de la imprecisión generada mediante los procesos de elaboración de mapas con diferentes clases (Goodchild *et al.*, 1992). Además, se busca especificar el mejor arreglo de valores entre las diferentes clases; en general, se pretenden dos condiciones (Jenks y Coulson, 1963; Jenks 1967): a) que los valores dentro de las clases definan la menor variabilidad; y b) que se logre la mayor variabilidad entre las clases consideradas. De acuerdo a lo anterior, se tienen los siguientes esquemas de clasificación:

- **Intervalo equivalente o intervalos iguales.** Método que divide el intervalo de valores de atributo en un subintervalo del mismo tamaño (Olaya, 2014); se recomienda su empleo cuando la gama de datos es conocida, por ejemplo: porcentajes o datos de temperatura. Se puede utilizar, si se quiere enfatizar la cantidad de un valor, con respecto a los otros valores (Osaragi, 2002). Sin embargo, tiene la desventaja de que hay diferente número de elementos dentro de cada clase (unas con muchos y otras con pocos). Esto es relevante, ya que se pueden tener elementos con valores atípicos que desvirtúan el significado del máximo y el mínimo, al definir la amplitud de cada clase (Olaya, 2014).
- **Rupturas naturales.** Método que se basa en el algoritmo de ruptura natural de *Jenks* (Jenks, 1967), en el que se identifican puntos de interrupción o patrones de grupos propios de los datos. La separación de la clasificación se divide en clases, cuyos límites se establecen donde hay saltos, relativamente, grandes en los valores (Osaragi, 2002). De esta forma, se pretende definir clases lo más homogéneas posibles, a través de la disminución de la varianza dentro de cada una, con ello se definen clases bien diferenciadas entre sí (Olaya, 2014).
- **Intervalo geométrico o intervalos de progresión.** Herramienta, diseñada específicamente para acomodar datos continuos, con la que se determinan las clases creando rupturas en los intervalos de clase que tienen una serie geométrica. Para optimizarlos, este coeficiente puede cambiar una vez a su inverso; así, el algoritmo genera intervalos geométricos al minimizar la suma de cuadrados del

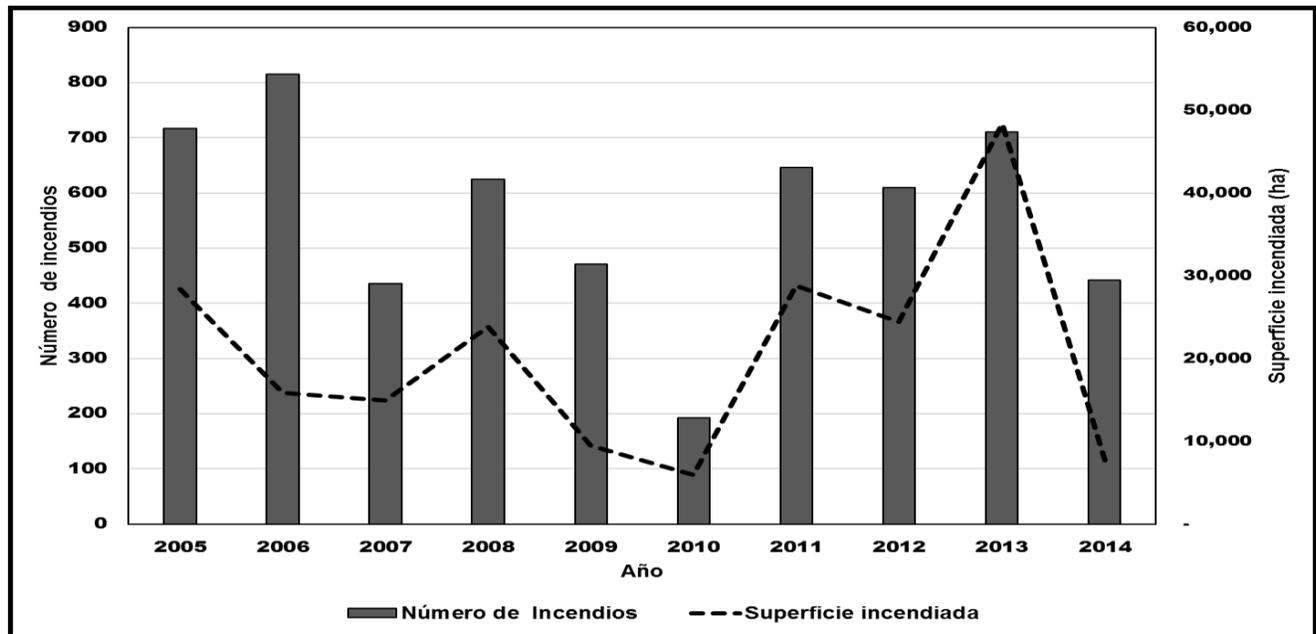
número de elementos de cada clase y se garantiza que cada intervalo de clases tenga, aproximadamente, el mismo número de valores; y que el cambio entre intervalos sea coherente (Olaya, 2014).

- **Intervalos por cuantiles.** A partir de una base de datos, la mediana se divide en dos partes iguales, o bien en más porciones, llamadas cuantiles (cuartiles, quintiles, deciles y percentiles). De esta forma, todas las clases contienen el mismo número de elementos. Por ejemplo, al definir cuartiles, la base de datos se dividirá en cuatro clases con igual número de elementos, cuyos límites se ubican en los percentiles 25, 50 y 75. El método es aplicable cuando los valores se distribuyen de manera lineal (Osaragi, 2002).

Materiales y Métodos

Área de estudio

El presente trabajo se desarrolló utilizando información del estado de Jalisco, el cual se ubica en el centro occidente de México, con una superficie de 78 588 km², donde 68 % del área presenta clima cálido subhúmedo a lo largo de la costa y zona centro. Mientras que, en 18 % es templado subhúmedo en las partes altas de las sierras y 14 % seco y semiseco en el norte y noreste. A nivel nacional, la entidad ocupa el décimo lugar, por el número de incendios forestales registrados, y el cuarto lugar en superficie afectada. En promedio, cada año se queman alrededor de 22 000 ha (Figura 1), que corresponden a 570 incendios anuales, con un promedio por incendio de 30 ha. El tipo de vegetación más dañado es el pastizal, con casi 12 000 ha en promedio por año; le siguen las áreas forestales con arbustos y matorrales, con alrededor de 8 500 ha anuales; y la superficie quemada con presencia de arbolado adulto asciende, en promedio, a 1 100 ha (Conafor, 2015).



Fuente: Conafor (2015).

Figura 1. Número de incendios forestales y superficie afectada durante el período 2005-2014, en el estado de Jalisco, México.

Establecimiento del riesgo de incendio

Para ubicar y dimensionar las áreas prioritarias de atención contra incendios forestales, se analizan factores como la topografía, actividades agropecuarias, modelos de combustibles, historial de ocurrencia de incendios, etcétera (Vilchis *et al.*, 2015). Con base en ellos, se elabora la cartografía de áreas de atención prioritaria, en la que se ubican las acciones preventivas pertinentes, bajo el correspondiente plan de manejo (Calkin *et al.*, 2014).

En México, esas áreas se localizan y dimensionan en función de la determinación de criterios de riesgo, peligro y valor (Conafor, 2010). Específicamente, el concepto de riesgo, en forma práctica, se refiere a la probabilidad de que se produzca un incendio forestal en una zona y en un periodo dado (Hardy, 2005); Lo cual depende de varios factores (Julio, 1990; Conafor, 2010; Rodríguez *et al.*, 2011), que a su vez, se dividen en una serie de variables que reciben una ponderación determinada (Cuadro 1). A partir de ellas, se determinó la variación espacial de las valoraciones de riesgo en el estado de Jalisco (Figura 2).

Cuadro1. Criterios de ponderación para determinar el riesgo de incendios forestales.

Factor	Variable	Criterio	Ponderación
Localidades	Cercanía	0 - 500 m	4
		500 - 1 000 m	3
		1 000 - 1 500 m	2
		1 500 - 2 000 m	1
	Densidad	> 50 000 habitantes	2
		< 50 000 habitantes	1
Caminos	Cercanía	0 - 500 m	4
		500 - 1 000 m	3
		1 000 - 1 500 m	2
		1 500 - 2 000 m	1
	Tipo	Terracería	2
		Pavimentado	1
Ocurrencia histórica de incendios	Cercanía	0 - 500 m	3
		500 - 1 000 m	2
		1 000 - 2 000 m	1
	Causas	Actividades agropecuarias, fumadores, fogatas	4
		Actividades forestales, cazadores, limpia de caminos, desconocidas	3
		Otras actividades productivas, quema en basureros, litigios, descargas eléctricas	2
		Aprovechamientos, ferrocarril, otras	1

Fuente: Conafor (2010).

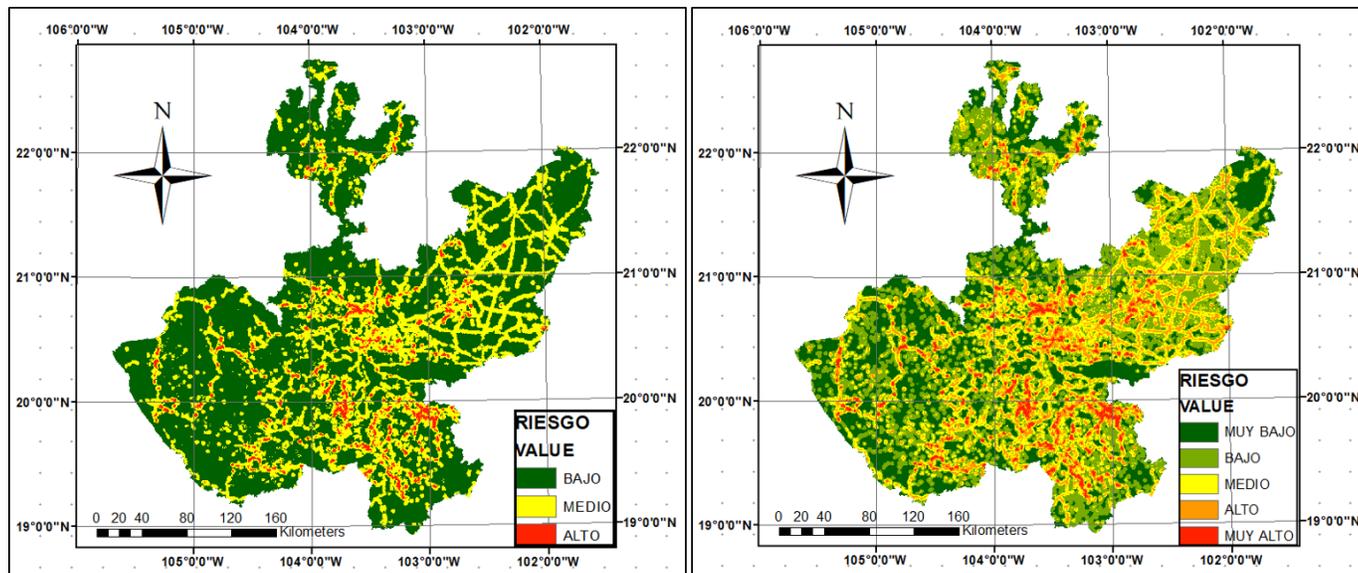


Figura 2. Distribución espacial del riesgo de incendios forestales en el estado de Jalisco, considerando tres y cinco clases.

Número e intervalo de clases

El mapa de riesgo de incendios forestales (Figura 2) se definió a escala estatal, por lo que se estructuró con base en una resolución de píxeles de 120×120 m, a cada uno de los cuales se le asignó un valor de riesgo. La frecuencia de estos valores se presenta en la Figura 3, cuya distribución tiende a la normalidad, con una media de 5.102 y una varianza de 3.929. Mientras que la mayoría de los píxeles con riesgo se ubican entre los valores 3 y 10, además de que se tuvieron pocos píxeles con valores altos de riesgo. A partir de esa distribución, se procedió a la definición de tres y cinco clases, ya que son las más usadas (IDEAM, 2011; Atienza *et al.*, 2012; Sevillano *et al.*, 2015), cuyos intervalos se definieron con los siguientes métodos: a) Intervalos iguales (II); b) Cuantiles (Q); c) Rupturas naturales (QN); y d) Intervalos geométricos (IG). Posteriormente, se hizo un análisis comparativo (ANOVA) entre métodos, para cada clase definida.

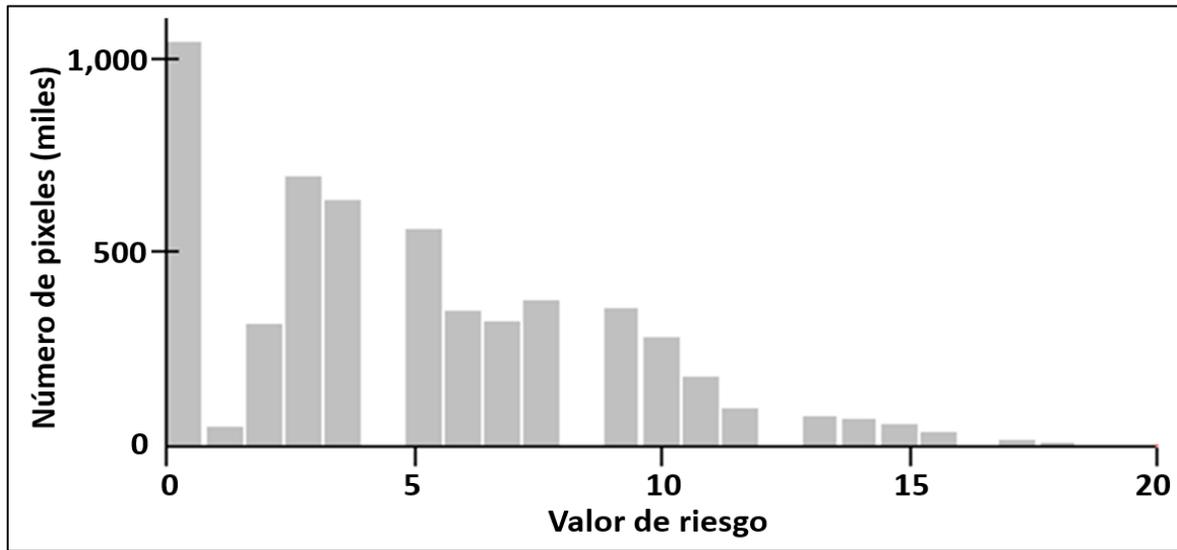


Figura 3. Frecuencia de los niveles de riesgo de incendios forestales derivados para el estado de Jalisco.

Criterio de selección

Para definir el número de clases y el método más adecuado para establecer los intervalos correspondientes, primero se ubicaron al azar 1 000 sitios de validación (SV) a lo largo del estado de Jalisco. Alrededor de cada uno, se situó una superficie de 100 km² (Figura 4) que corresponde al denominado factor de riesgo de incendio (Flores, 2017; Flores y Macías, 2018), dentro ella se contó el número total de incendios forestales ocurridos en el período 2005-2014. De esta manera, se asoció una clase por sitio (SV) con el número de incendios contabilizados en el área de 100 km² de cada SV.



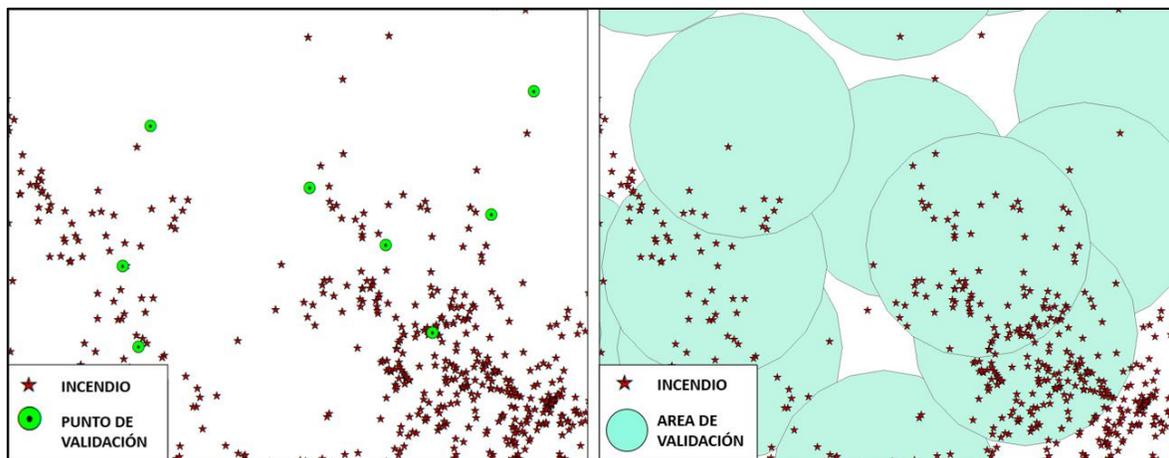
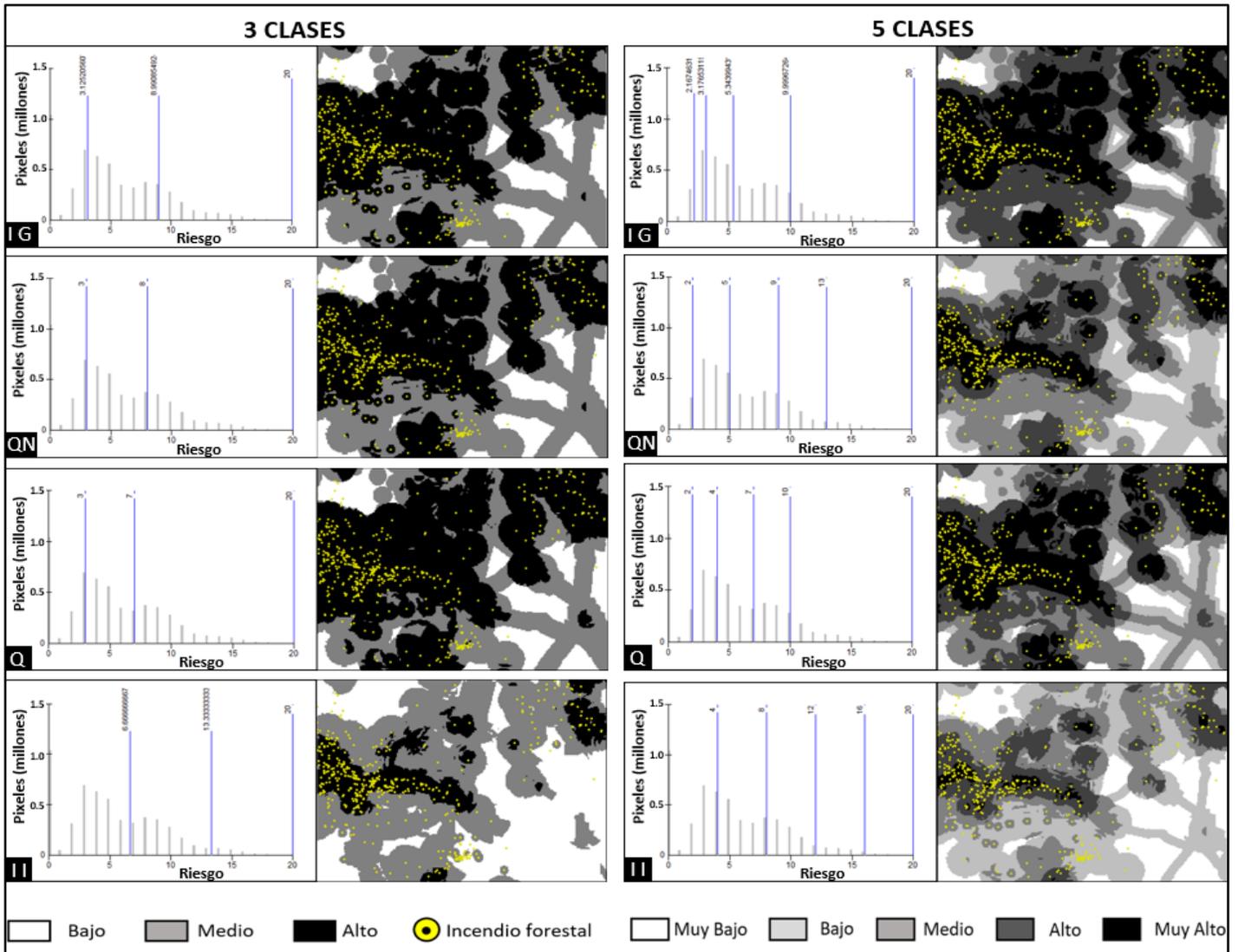


Figura 4. Detalle de la ubicación de los sitios (puntos) de validación y su correspondiente área de 100 km², dentro del estado de Jalisco.

De acuerdo al método usado para definir los intervalos de clases (tres y cinco), cada uno de los SV fue identificado con una clase de riesgo, la cual pudo ser diferente de acuerdo al método de clasificación. Con los valores del número de incendios de cada SV correspondientes a una clase de riesgo se calculó la desviación estándar, como parámetro de comparación entre los diferentes métodos de clasificación. Finalmente, se elaboraron los mapas temáticos, con el propósito de hacer, visualmente, una comparación cualitativa de las diferencias y similitudes entre los métodos de clasificación probados.

Resultados y Discusión

En la Figura 5 se presentan los mapas generados con los diferentes métodos de clasificación; en general, se observan similitudes entre algunos métodos. Sin embargo, es clara la diferencia que representa la distribución espacial de las clases de riesgo derivadas del método de intervalos iguales (II). Asimismo, se muestra la ubicación de los límites de cada intervalo, definidos por los métodos aplicados.



IG = Intervalos geométricos; QN = Rupturas naturales; Q = Cuantiles; II = Intervalos iguales.

Figura 5. Detalle de la cartografía sobre la clasificación de riesgo de incendios forestales, generada con diferentes métodos y número de clases.



Interpretación visual de clases de riesgo

El análisis de los mapas correspondientes a tres clases de riesgo de incendio evidenció que no hay diferencia entre los generados con los métodos IG, QN y Q; además, tanto la definición de los límites de los intervalos como su implementación espacial en los mapas fueron muy similares. No obstante, es clara la diferencia entre el método II con los métodos IG, QN y Q, ya que se redujo el área de la clase Alto riesgo, la cual fue absorbida, mayormente, por la clase de riesgo Medio. Esto se aprecia en la distribución grafica de los límites de cada una de las clases.

Por otra parte, los mapas que resultaron de considerar cinco clases, visualmente fueron muy diferentes, lo cual también se observó en las gráficas correspondientes a los límites de sus intervalos. Sin embargo, fue clara la similitud entre los mapas derivados de los métodos IG y Q, en los que las clases de riesgo Alto y Muy alto abarcaron una mayor superficie. Al igual que en el caso de las tres clases, el mapa generado con el método II tuvo la mayor diferencia. Aunque, es evidente la diferenciación entre las cinco clases, visualmente no se recomienda usar un número muy grande de clases, ya que se puede complicar la interpretación del mapa, al tratar de identificar la simbología de cada una de ellas, lo cual origina posibles equivocaciones (Olaya, 2014).

Incendios por clase de riesgo

Para caracterizar cada una de las clases de riesgo, se evaluó el número de incendios forestales presentes (Cuadro 2). Cuando se consideró la clasificación de solo tres clases, se observó para la clase 1 (riesgo Bajo) que el número de incendios fue el mismo, a excepción del método II que presentó un poco más del doble en comparación con los otros. En referencia a la clase 2 (riesgo Medio), el comportamiento fue similar, a diferencia de lo obtenido con el método Q, con el cual solo se registró 84.5 % de los incendios ubicados con los métodos IG y QN. Por el contrario, en la clase 3 (riesgo Alto) con el método Q se obtuvo 6.54 % más incendios,

en relación a IG y QN; mientras que, el II representó solo 43.3 % de incendios, en comparación con IG y QN.

Cuadro 2. Variación del número total de incendios (A), hectáreas promedio por incendio (B) y número de sitios de validación (C), por clase y método de definición de intervalos.

Clase		3-IG	3-QN	3-Q	3-II	5-IG	5-QN	5-II	5-Q
1	A	429	429	429	952	296	296	540	296
	B	7.00	7.00	7.00	5.48	6.79	6.79	7.24	6.79
	C	378	378	378	677	256	256	505	256
2	A	1317	1317	1116	2535	133	442	1206	244
	B	2.43	2.43	2.39	0.94	7.46	6.12	1.90	7.79
	C	424	424	355	294	122	349	297	249
3	A	3071	3071	3272	1330	309	1359	1450	1005
	B	0.54	0.54	0.67	0.20	5.53	1.47	0.89	1.75
	C	197	197	266	28	227	246	149	228
4	A					1359	1390	1282	993
	B					1.47	0.64	0.26	1.45
	C					246	120	46	183
5	A					2720	1330	339	2279
	B					0.42	0.20	0.09	0.33
	C					148	28	2	83

IG= Intervalos geométricos; QN = Rupturas naturales; Q = Cuantiles; II = Intervalos iguales.

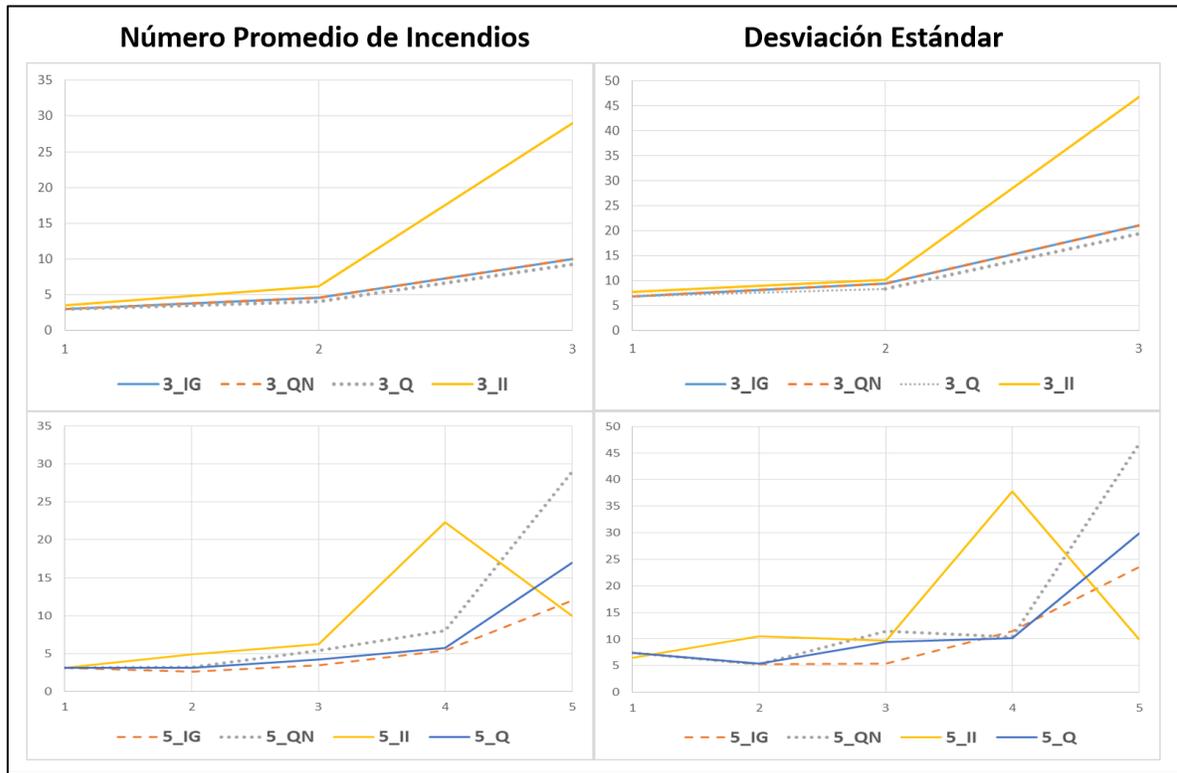
En la clasificación de cinco clases, el método II resultó en 82.4 % más incendios en comparación a los otros métodos. En cuanto a la clase 2, se presentó variación en todos los casos, destacó una diferencia de 390.3 % entre el número de incendios más bajo (IG) y el más alto (II). Las clases 3 y 4 fueron más similares en su número de incendios. Mientras que, en la clase 5 los métodos IG y Q resultaron en cantidades muy similares, aunque QN y II tuvieron 48.89 y 12.46 %, respectivamente del máximo registrado para la clase IG, con 2 720 incendios.

La superficie promedio por incendio fue muy similar entre los métodos, al comparar las clases en la clasificación de tres intervalos; aunque los métodos Q y II presentaron valores menores. En referencia a la clasificación de cinco clases, en general, no hubo una tendencia definida, pero con II se obtuvieron los menores valores en todas las clases, excepto en la clase 1. Los valores más altos variaron por método en cada una de las cinco clases.

Variabilidad entre clases de riesgo

Dado que en la definición de clases de riesgo se busca la existencia de una suficiente variabilidad entre las clases, en la Figura 6 se observa que cuando se usaron solo tres clases, la variabilidad (desviación estándar) fue prácticamente la misma entre las clases definidas con los métodos IG, QN y Q. No obstante, al considerar todos los métodos hubo un ligero incremento de la variabilidad al comparar las clases 1 y 2. La clase 3 (riesgo Alto) se diferencia ampliamente en el caso del método II; esto coincide con la interpretación visual de los mapas (Figura 5), en la cual fue clara la diferencia en la distribución y amplitud de las clases resultantes de la aplicación del método II. Por otra parte, cuando se consideró el número promedio de incendios (Figura 6) correspondiente a cada clase, el comportamiento observado fue muy similar.





IG = Intervalos geométricos; QN = Rupturas naturales; Q = Cuantiles; II = Intervalos iguales.

Figura 6. Variación del número de incendios promedio y de la desviación estándar, por cada una de las clases de riesgo de incendio forestal.

Al utilizar cinco clases (Figura 6), la variabilidad entre los cuatro métodos fue prácticamente la misma. Sin embargo, para la clase 2 de riesgo el método II definió una mayor desviación estándar; mientras que, los otros métodos presentaron una variabilidad similar. A partir de la clase 3 (riesgo Medio) se observó una mejor diferenciación en la variabilidad entre los cuatro métodos.

En la clase 4 (riesgo Alto) sobresalió, notablemente, la variabilidad resultante del método II, mientras que con el resto de los métodos la variabilidad fue muy similar y mucho menor. Finalmente, en la clase 5 (riesgo Muy alto) se evidenció una clara diferencia entre la variabilidad de todos los métodos. De acuerdo a lo anterior, al igual que en el caso de las tres clases, el método que mejor diferenciación generó, en la variabilidad entre sus

clases, fue el II, seguido de QN. Por otra parte, en relación al número de incendios promedio por clase y definidos por cada método, se observó una ligera variación entre las primeras tres clases, considerando todos los métodos. Esta tendencia también se presentó en la clase 4, pero solo con los métodos IG, QN y Q, ya que con el método II se obtuvo un mayor número de incendios. Respecto a la clase 5, se registró una diferencia más clara al comparar el número de incendios entre los cuatro métodos.

Estos resultados sugieren usar, primeramente, cinco clases en lugar de tres. El método de intervalos iguales (II) fue el mejor para definir los límites entre clases. De acuerdo con ello, el número de clases debe asegurar (Olaya, 2014): a) que no sea tan pequeño, que resuma en exceso la información; b) que permita tener un detalle adecuado de la variación espacial de la variable en estudio; y c) que no sea demasiado grande, para evitar los problemas que aparecían en el caso de no dividir los valores en clases. En general, se sugiere no utilizar más de ocho clases (Olaya, 2014).

Como se señaló, uno de los propósitos al seleccionar el intervalo de cada una de las clases consiste en garantizar una diferencia estadísticamente significativa; de esta forma, los ANOVAS resultantes (Cuadro 3) de la comparación de cada una de las clases respaldaron lo analizado en la Figura 6. Por ejemplo, en la clase 1, de la clasificación de tres clases, no se apreció diferencia entre los métodos usados, lo cual se ratificó con la probabilidad resultante ($p= 0.4430911$) que implicó la inexistencia de diferencia estadísticamente significativa. Mientras que en las clases 2 y 3, si se registró una diferencia significativa entre los métodos.



Cuadro 3. Resultados de los ANOVA al comparar cada una de las clases definidas con los diferentes métodos de delimitación de intervalos.

Número de clases	Clase	F	Probabilidad	Valor crítico para F
3	1	0.89481466	0.443091101	2.609832328
3	2	3.18112253	0.023160437	2.61087455
3	3	6.90044144	0.000139627	2.617925093
5	1	0.00021454	0.999995655	2.61193174
5	2	4.73216689	0.0027658	2.613689205
5	3	3.3029531	0.019820786	2.615426601
5	4	18.0573828	3.18473E-11	2.619980452
5	5	2.85170654	0.037876469	2.63972568

Por otra parte, en el caso de la clasificación con cinco intervalos, a excepción de la clase 1, el resto de las clases resultaron con diferencia estadísticamente significativa, al comparar los métodos.

Finalmente, se resalta la falta de trabajos recientes similares, por lo que no fue posible realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos. Esto implica que desde el estudio de Jenks (1967), poco se ha investigado sobre la definición de un proceso analítico para la selección del número de clases y del método más apropiado para la delimitación de los intervalos de esas clases, que conlleven a realizar una adecuada clasificación del riesgo de incendios forestales. Lo anterior permitirá tener bases estadísticas para una mejor ubicación o dimensionamiento de las clases de riesgo de incendio forestal.



Conclusiones

Los resultados sugieren que el método de intervalos iguales (II) es el más indicado para definir los intervalos de clase de riesgo de incendios. Ya que, en el caso de usar tres clases, aunque no hay diferencia en las clases 1 y 2, si es clara su mayor variabilidad en la clase 3. La variabilidad por clase con el resto de los métodos es prácticamente la misma. En el caso de emplear cinco clases, el método II presenta una variabilidad diferente en las clases 2, 4 y 5. En este caso, un método alternativo es el de IG, ya que presenta una diferenciación en su variabilidad en las clases 3 y 5.

Referente al número de clases, los resultados sugieren que existe una mayor diferenciación entre las clases, cuando se utilizan cinco clases; incluso esta se observa a partir de la clase 2 y es más evidente en la clase 5, en la cual todos los métodos presentan una variabilidad diferente en el número de incendios.

Por la definición de riesgo de incendio forestal, como lo muestran los resultados, se espera un mayor número de ellos en las clases de más riesgo, aunque es importante señalar que hubo poca variación en las primeras tres categorías de riesgo.

Es relevante destacar que, los resultados obtenidos en este trabajo no pueden estandarizarse para todas las situaciones de la definición de riesgo de incendios forestales. No obstante, el proceso metodológico que aquí se presenta es aplicable en futuras investigaciones cuyo objetivo sea definir tanto el número de clases de riesgo, como los límites de los intervalos de cada clase, y con ello dejar de usar clasificaciones subjetivas. Más aún, se sugiere probar variaciones en intensidades y formas de sitios de validación, así como otros números de clases.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

José Germán Flores-Garnica: planeación, desarrollo y análisis de la investigación, revisión y redacción del documento; Ana Graciela Flores-Rodríguez: procesamiento de información, estructura y redacción del documento.

Referencias

- Atienza H., J., P. Muñoz A. y P. Balladares S. 2012. Determinación de prioridades de protección contra incendios forestales en la región de Valparaíso, Chile. *Revista Cartográfica* (88):147-82.
https://www.researchgate.net/profile/Pedro_Munoz11/publication/327557748_Determinacion_de_Prioridades_de_Proteccion_Contra_Incendios_Forestales_en_la_Region_de_Valparaiso_Chile/links/5b9667d5a6fdccfd543a0e84/Determinacion-de-Prioridades-de-Proteccion-Contra-Incendios-Forestales-en-la-Region-de-Valparaiso-Chile.pdf#page=149 (12 de mayo de 2020).
- Ávila F., D. Y., M. Pompa G. y E. Vargas P. 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.
- Burriel M., J. A., F. X. Castro D., T. Mata B., D. Montserrat A., E. Gabriel de F. y J. J. Ibáñez I. M. 2006. La mejora del mapa diario de riesgo de incendio forestal en Cataluña. *In: XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*. Granada. 20 de septiembre de 2006. Editorial Universidad de Granada. Santa Perpetua de Moguda, España. pp. 651-666.
- Calkin, D. E., J. D. Cohen, M. A. Finney and M. P. Thompson. 2014. How risk management can prevent future wildfire disasters in the wildland-urban interface. *PINAS* 111 (2):746-751. Doi:10.1073/pinas.1315088111.

Carrillo G., R. L., D. A. Rodríguez T., H. Tchikoué, A. I. Monterroso R. y J. Santillán P. 2012. Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. INTERCIENCIA 37 (9):678-683. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33925502012.pdf> (29 mayo de 2020).

Castillo S., M., R. Garfias S., G. Julio A. y L. González R. 2012. Análisis de grandes incendios forestales en la vegetación nativa de Chile. INTERCIENCIA 37 (11):796-804. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33925550002.pdf> (29 de mayo de 2020).

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2010. Procedimiento para elaboración de un mapa de áreas de atención prioritaria contra incendios forestales. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jal., México. pp. 9-11.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2015. Reportes semanales de resultados de incendios forestales. Información de cierre de estadísticas de incendios forestales del 2007 al 2015. Comisión Nacional Forestal. Coordinación de Conservación y Restauración. Gerencia de Protección Contra Incendios Forestales. México, D.F., México. <https://snigf.cnf.gob.mx/incendios-forestales/> (29 de mayo de 2020).

de la Riva, J., F. Pérez-Cabello, N. Lana-Renault and N. Koutsias. 2004. Mapping wildfire occurrence at regional scale. Remote Sensing of Environment (92):288-294. Doi:10.1016/j.rse.2004.06.013.

de Torres C., M., L. Ghermandi y G. Pfister. 2008. Los incendios en el noroeste de la Patagonia: su relación con las condiciones meteorológicas y la presión antrópica a lo largo de 20 años. Ecología Austral 18 (2):153-167. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1667-782X2008000200001 (12 de febrero de 2020).

Dowdy, A. J., G. A. Mills, K. Finkele and W. de Groot. 2009. Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index. The Centre for Australian Weather and Climate Research. Melbourne, Australia. 84 p.

Evans, I. 1977. The selection of class intervals. Institute of British Geographers, Transactions (New Series) 2 (1):98-124.

<https://scihub.wikicn.top/10.2307/1791177> (12 de febrero de 2020).

Flores G., J. G. 2017. Unidad de muestreo para determinar la variabilidad espacial de la superficie quemada por incendios forestales. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 8 (43):117-142. Doi:10.29298/rmcf.v8i43.68.

Flores G., J. G. and A. Macías M. 2018. Bandwidth selection for kernel density estimation of forest fires. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 24 (3):313-327. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.12.074.

Goodchild, M. F., S. Guoqing and Y. Shiren 1992. Development and test of error model for categorical data. International Journal of Geographical Information Systems 6 (2):87-104. Doi:10.1080/02693799208901898.

Hardy, C. C. 2005. Wildland fire hazard and risk: Problems, definitions, and context. Forest Ecology and Management (211):73-82. Doi:10.1016/j.foreco.2005.01.029.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2011. Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Bogotá, D.C., Colombia. 109 p.

Jaiswal, R. K., S. Mukherjee, K. D. Raju and R. Saxena 2002. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. International journal of applied earth observation and geoinformation (4):1-10. Doi:10.1016/S0303-2434(02)00006-5.

Jenks, G. F. and M. Coulson. 1963. Class intervals for statistical maps. *International Yearbook of Cartography* 4 (3):119-134.

<https://www.semanticscholar.org/paper/Class-intervals-for-statistical-maps-Jenks-Coulson/28e9a6f1c5a56982147761c0a4a3cb6d5f2e4814> (18 de octubre de 2019).

Jenks, G.F. 1967. The data model concept in statistical mapping. *International Yearbook of Cartography* (7):186-190. Doi:10.1371/journal.pone.0061104.

Jolly, W. M., P. H. Freeborn, W. G. Page and B. W. Butler. 2019. Severe Fire Danger Index: A Forecastable Metric to Inform Firefighter and Community Wildfire Risk Management. *Fire*: 2(47): 2-24. Doi:10.3390/fire2030047.

Julio A., G. 1990. Diseño de índices de riesgo de incendios forestales para Chile. *Bosque* 11 (2):59-72. Doi: 10.4206/BOSQUE.1990.v11n2-06.

Kuter, N., F. Yenilmez and S. Kuter. 2011. Forest fire risk mapping by kernel density estimation. *Croatian Journal of Forest Engineering* 32 (2):599-609.

http://www.crojfe.com/site/assets/files/3793/13kuter_599-610.pdf (4 de marzo de 2020).

Magaña T., S. O. y F. C. Romahn V. 1987. Determinación del índice de peligro de incendio forestal para Tlahuapan, Puebla. *Ciencia Forestal* 12: 58- 67.

Mildrexler, D., Z. Yang, W. B. Cohen and D. M. Bell. 2016. A forest vulnerability index based on drought and high temperatures. *Remote Sensing of Environment* (173):314-325. Doi: 10.1016/j.rse.2015.11.024.

Mohammadi, F., M. R. Bavaghar and N. Shabanian 2014. Forest fire risk zone modeling using logistic regression and GIS: an Iranian case study. *Small-scale Forestry* (13): 117-125. Doi: 10.1007/s11842-013-9244-4.

Olaya, V. 2014. *Sistemas de información geográfica*. CreateSpace Independent Publishing Platform. Madrid, España. 854 p. <https://volaya.github.io/libro-sig/> (21 de abril de 2020).

- Osaragi, T. 2002. Classification methods for spatial data representation. Center for advanced spatial analysis (CASA). University College London. London, United Kingdom. Working Paper Series No. 40. 19 p.
- Pan, J., W. Wang and J. Li, 2016. Building probabilistic models of fire occurrence and fire risk zoning using logistic regression in Shanxi Province, China. *Natural Hazards* (81):1879-1899. Doi: 10.1007/s11069-016-2160-0.
- Pérez V., L. Márquez, O. Cortés y M. Salmerón 2013. Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques* 19(2):37-58. Doi:10.21829/myb.2013.192339.
- Robinson, A. H. and B. B. Petchenik 1975. The Map as a communication system. *Cartographic Journal* (12):7-15. Doi: 10.1179/caj.1975.12.1.7.
- Rodríguez, T., D. A., C. Tchikoué, C. Cántora G., R. Contreras A. y A. de la Rosa V. 2011. Modelaje del peligro de incendio forestal en las zonas afectadas por el huracán Dean. *Agrociencia* 45 (5):593-608.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952011000500006&script=sci_arttext&tlng=pt (4 de marzo de 2020).
- Rojo, M., P. Santillán, M. Ramírez y B. Arteaga M. 2001. Propuesta para determinar índices de peligro de incendio forestal en bosque de clima templado en México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7 (1):39-48.
- Salvati, L. and A. Ferrara 2015. Validation of MEDALUS Fire Risk Index using Forest Fire Statistics through a multivariate approach. *Ecological Indicators* 48:365-369. Doi:10.1016/j.ecolind.2014.08.027.
- Sevillano, M. E., O. A. Toro y P. A. Ruiz 2015. Aplicación de SIG al análisis de riesgo pro incendios forestales en el municipio de Yotoco Colombia, 2014. 2015. *In: Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI-México-UACJ-2015*. 12-16 de octubre de 2015. Ciudad Juárez, Chih., México. pp. 12-16.

Torres R., J. M., O. S. Magaña T. y. G. A. Ramírez F. 2007. Índice de peligro de incendios forestales de largo plazo. *Agrociencia* 41 (6):663-674.

<http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v41n6/1405-3195-agro-41-06-663-en.pdf>
(28 de mayo de 2020).

Vega-Nieva, D., J. Briseño-Reyes, M. Nava-Miranda, E. Calleros-Flores, P. López-Serrano, J. Corral-Rivas, E. Montiel-Antuna, M. I. Cruz-López, M. Cuahutle, R. Ressler, E. Alvarado-Celestino, A. González-Cabán, E. Jiménez, J. Álvarez-González, A. Ruiz-González, R. Burgan and H. Preisler. 2018. Developing Models to Predict the Number of Fire Hotspots from an Accumulated Fuel Dryness Index by Vegetation Type and Region in Mexico. *Forests* 9(4):190. Doi:10.3390/f9040190.

Vilar, H. L., M. P. Martín I. and F. J. Martínez V. 2011. Logistic regression models for human-caused wildfire risk estimation: analyzing the effect of the spatial accuracy in fire occurrence data. *European Journal of Forest Research* 130:983-996. Doi:10.1007/s10342-011-0488-2.

Vilchis, F., A. Y., C. Díaz D., D. Magaña L., K. M. Bá y M. A. Gómez A. 2015. Modelado espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la cuenca del río Balsas. *Agrociencia* 49 (7): 803-820.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952015000700008&script=sci_arttext&tlng=pt (18 de mayo de 2020).

Villers R., L. y J. López B. 2004. Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en las áreas forestales de México: un estudio en el Volcán la Malinche. *In: Villers R., L. y J. López B. (eds.). Incendios forestales en México. Métodos de evaluación.* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. México, D.F., México. pp. 57-74.

Yeguez, M. y M. Ablan. 2012. Índice de riesgo de incendio forestal dinámico para la cuenca alta del río Chama. *Revista Forestal Venezolana* 56 (2):127-134.
https://www.researchgate.net/profile/Magdiel_Ablan/publication/260427040_Indice_de_riesgo_de_incendio_forestal_dinamico_para_la_cuenca_alta_del_rio_Chama/links/004635313b5d7752a7000000/Indice-de-riesgo-de-incendio-forestal-dinamico-para-la-cuenca-alta-del-rio-Chama.pdf (16 de febrero de 2020).

Ziccardi, L., C. R. Thiersch, A. Miho Y., P. Fearnside and P. J. Ferreira F. 2020. Forest-fire risk indices and zoning of hazardous areas in Sorocaba, São Paulo state, Brazil. *Journal of Forestry Research* 31(2): 581-590. Doi:10.1007/s11676-019-00889-x.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.