

Revista Cubana de Ciencias Forestales

Volumen 14, 2026, enero-diciembre



**LIBER
CIENCIA**
EDITORIAL CIENTÍFICA
UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RÍO



**UNIVERSIDAD
DE PINAR DEL RÍO**
HERMANOS SAÍZ MONTES DE OCA



CFORES
REVISTA CUBANA DE
CIENCIAS FORESTALES

Artículo original

Calibración local de índices meteorológicos de peligro de incendios forestales en Jipijapa, Manabí, Ecuador

Local calibration of meteorological forest fire danger indices in Jipijapa, Manabí, Ecuador

Calibração local de índices meteorológicos de perigo de incêndios florestais em Jipijapa, Manabí, Equador

Marcos Pedro Ramos-Rodríguez^{1*} , Kerly Monserrate Briones-Carreño² ,
Joel Alexis Zambrano-Muñoz² 

¹Universidad Estatal del Sur de Manabí. Ecuador.

²Consultor independiente. Ecuador.

*Autor para la correspondencia: marcos.ramos@unesum.edu.ec

Recibido: 01/06/2025.

Aprobado: 02/04/2026.



RESUMEN

El monitoreo del peligro de incendios forestales mediante índices meteorológicos constituye una herramienta clave para la gestión preventiva del fuego. Sin embargo, su efectividad depende de la adecuación a las condiciones locales. Este estudio tuvo como objetivo ajustar localmente los índices meteorológicos de peligro de incendios forestales Nesterov y Fórmula de Monte Alegre (FMA) en Jipijapa, Manabí, Ecuador. Se utilizaron datos meteorológicos históricos y registros de incendios para desarrollar escalas ajustadas de peligro, evaluando la distribución del número de días por clase de peligro y la correspondencia con la ocurrencia de incendios. Las escalas originales presentaron distribuciones no deseadas para el comportamiento esperado, mientras que las escalas ajustadas mostraron una tendencia decreciente en el número de días desde las clases de menor a mayor peligro, y una tendencia creciente en la ocurrencia de incendios. Los valores de skill score (SS) y porcentaje de éxito (PE) mejoraron sustancialmente tras el ajuste: el índice de Nesterov alcanzó un SS de 0,0815 y un PE de 59,56 %, mientras que el FMA obtuvo un SS de 0,0806 y un PE de 53,54 %. Estos resultados demuestran que ambos índices, una vez calibrados, son aplicables en el contexto local de Jipijapa. No obstante, se sugiere el uso operativo del índice FMA por su simplicidad de cálculo. Este estudio refuerza la necesidad de adaptar los índices meteorológicos a nivel regional para una evaluación más precisa del peligro de incendios forestales y una gestión preventiva más eficaz.

Palabras clave: manejo del fuego, porcentaje de éxito, prevención de incendios forestales, skill score, variables meteorológicas.

ABSTRACT

The monitoring of forest fire danger through meteorological indices constitutes a key tool for preventive fire management. However, their effectiveness depends on their adaptation to local conditions. This study aimed to locally calibrate the Nesterov Index and the Monte Alegre Formula (FMA), two meteorological fire danger indices, in Jipijapa, Manabí, Ecuador. Historical weather data and fire occurrence records were used to develop locally adjusted danger scales, evaluating the distribution of the number of days per danger class and their correspondence with fire occurrence. The original scales exhibited distributions inconsistent with expected fire behavior, while the



adjusted scales showed a decreasing trend in the number of days from lower to higher danger classes, and an increasing trend in fire occurrence. The values of skill score (SS) and percentage of success (PS) improved substantially after calibration: the Nesterov Index reached an SS of 0.0815 and a PS of 59.56%, while the FMA achieved an SS of 0.0806 and a PS of 53.54%. These results show that both indices, once calibrated, are applicable to the local context of Jipijapa. Nevertheless, the operational use of the FMA is recommended due to its computational simplicity. This study reinforces the need to adapt meteorological indices at the regional level to improve the accuracy of forest fire danger assessment and enhance preventive fire management strategies.

Keywords: fire management, percentage of success, forest fire prevention, skill score, meteorological variables.

RESUMO

O monitoramento do perigo de incêndios florestais por meio de índices meteorológicos constitui uma ferramenta fundamental para a gestão preventiva do fogo. No entanto, sua eficácia depende da adequação às condições locais. Este estudo teve como objetivo calibrar localmente os índices meteorológicos de perigo de incêndios florestais Nesterov e Fórmula de Monte Alegre (FMA) em Jipijapa, Manabí, Equador. Foram utilizados dados meteorológicos históricos e registros de ocorrências de incêndios para desenvolver escalas ajustadas de perigo, avaliando a distribuição do número de dias por classe de perigo e a correspondência com a ocorrência de incêndios. As escalas originais apresentaram distribuições incompatíveis com o comportamento esperado do fogo, enquanto as escalas calibradas mostraram uma tendência decrescente no número de dias das classes de menor para maior perigo e uma tendência crescente na ocorrência de incêndios. Os valores do skill score (SS) e do percentual de acerto (PA) melhoraram substancialmente após a calibração: o índice de Nesterov atingiu um SS de 0,0815 e um PA de 59,56 %, enquanto a FMA obteve um SS de 0,0806 e um PA de 53,54 %. Esses resultados demonstram que ambos os índices, uma vez calibrados, são aplicáveis ao contexto local de Jipijapa. No entanto, recomenda-se o uso operacional da FMA devido à sua simplicidade de cálculo. Este estudo reforça a necessidade de adaptar os índices meteorológicos em nível regional para uma avaliação mais precisa do perigo de incêndios florestais e uma gestão preventiva mais eficaz.



Palavras chave: manejo do fogo, percentual de acerto, prevenção de incêndios florestais, skill score, variáveis meteorológicas.

INTRODUCCIÓN

En un área forestal, se pueden distinguir dos tipos de factores determinantes del grado de peligro de incendios: los de carácter permanente (material combustible, topografía y tipo de bosque) y los variables (condiciones meteorológicas). Los factores de carácter permanente no son apropiados para la determinación del grado de peligro de ocurrencia de incendios, pues, a corto plazo, no varían. Pero los factores variables presentan una base sólida para la determinación del grado de peligro de ocurrencia de incendios debido a la variación que presentan en corto espacio de tiempo (Soares *et al.*, 2017). Asignar un índice de peligrosidad de incendio en función de las condiciones meteorológicas es una forma de proporcionar herramientas a los organismos responsables de la prevención y lucha contra los incendios forestales (Kossoski *et al.*, 2024).

Varios investigadores han fundamentado la relación entre el surgimiento y propagación de los incendios forestales y las variables meteorológicas. Ramos Rodríguez *et al.* (2017) verificaron que la distribución anual de las variables meteorológicas tiene relación directa o inversa con la distribución de la ocurrencia de incendios y las áreas quemadas en la provincia Pinar del Río, Cuba, durante el período 2010-2014. También Torres *et al.* (2019) encontraron altas correlaciones entre algunas variables del comportamiento del fuego con las variables ambientales.

La influencia de las condiciones meteorológicas en el comportamiento y la propagación de los incendios forestales se ha reconocido mediante el desarrollo de una variedad de índices meteorológicos de incendios, que combinan información sobre la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento, entre otros factores (Sharples, 2022). Los principales índices de peligro de incendios utilizados en Brasil son los de Angström, Nesterov, fórmula de Monte Alegre (FMA) y fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+) (Soares *et al.*, 2017). La FMA+, al incluir la velocidad del viento, ha demostrado mejorar la predicción del comportamiento del fuego (Almeida *et al.* 2022).



En África, el índice de Nesterov es el más extendido, aunque en Mozambique también se utiliza con frecuencia el FMA (Mbanze *et al.*, 2017). Su eficacia ha sido confirmada en estudios en diferentes biomas, aunque generalmente requiere adaptación a las condiciones locales (Pérez-Sánchez *et al.*, 2017). En Europa, especialmente en países como Austria, Alemania y Suiza, se ha demostrado que el rendimiento de un índice varía significativamente según la región ecológica y la estación del año, lo cual refuerza la importancia de realizar ajustes locales (Steinfeld *et al.*, 2022).

A pesar de existir varios índices de peligrosidad de incendios, el uso de un índice ineficiente puede llevar a una toma de decisiones errónea con relación a los procedimientos de prevención y combate de incendios forestales, al mismo tiempo que un índice de predicción fiable puede ayudar a una mayor cuantificación y distribución de los recursos para la prevención (Torres *et al.*, 2017). En este sentido, estudios recientes han mostrado que los ajustes locales de los índices Nesterov y FMA mejoran considerablemente su desempeño predictivo. Por ejemplo, en plantaciones de eucalipto del estado de São Paulo, la calibración de la FMA permitió una clasificación más precisa del peligro de incendios (Santos *et al.*, 2021). Asimismo, en el Parque Nacional Chapada dos Guimarães, la FMA mostró buen rendimiento predictivo luego de ajustar los umbrales de las clases de peligro (Machado Neto *et al.*, 2018).

En Ecuador, tanto la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos a través de la Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos, como el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, proporcionan información gráfica sobre el índice de Haines para todo el país. No obstante, de acuerdo con Potter (2018), dicho índice, publicado en 1988 como índice de gravedad atmosférica inferior, fue ampliamente adoptado en EE. UU., pero su validez científica ha sido cuestionada. Estudios han sugerido que carece de fundamento empírico sólido y su relación con eventos de crecimiento de incendios es inconsistente. Por otro lado, Pazmiño (2019), al analizar el peligro de incendios forestales asociado a factores climáticos, determinó que el índice de peligro de incendios de McArthur resulta una métrica útil en la región andina del país.



Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, y considerando que existen varios índices meteorológicos de peligro de incendios forestales que se utilizan desde hace más de 100 años en diferentes regiones del mundo, este estudio tuvo el objetivo de ajustar localmente los índices meteorológicos de peligro de incendios forestales Nesterov y fórmula de Monte Alegre en Jipijapa, Manabí, Ecuador, basados en la hipótesis de que los índices Nesterov y FMA, una vez que se ajusten sus respectivas escalas de interpretación del peligro, pueden ser utilizados en el cantón Jipijapa, lo cual constituiría el inicio de la introducción del uso de estos índices en distintas regiones del país y una contribución significativa a la *Estrategia Nacional para el Manejo Integral del Fuego en Ecuador*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del área de estudio

El cantón Jipijapa, compuesto por tres parroquias urbanas y siete rurales, se encuentra en el extremo sur de la provincia de Manabí, Ecuador. El clima predominante es cálido seco en la zona oeste y cálido húmedo con temporadas secas en la zona este, con una temperatura media de 24 °C afectada por la presencia de dos temporadas: seca (entre mayo y octubre) y de lluvias (entre noviembre y abril). Los valores más altos de humedad y temperatura se registran en marzo, mes en que la temperatura media del aire alcanza los 28 °C. La precipitación promedio anual es de 670 mm, concentrándose la mayor cantidad entre los meses de febrero y marzo (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Jipijapa, 2024).

Obtención y análisis de los datos

La base de datos meteorológicos estuvo formada por los valores diarios medidos a las 13:00 horas de las variables temperatura seca del aire, temperatura del punto de rocío y humedad relativa, así como las precipitaciones acumuladas en 24 horas hasta el momento de la medición. Estas informaciones se obtuvieron de NASA *Prediction Of Worldwide Energy Resources* (<https://power.larc.nasa.gov/>) en las coordenadas UTM Longitud -80.5799 y Latitud -1.3488, lugar donde se encuentra ubicado el Cuerpo de



Bomberos de Jipijapa, mientras que los datos sobre ocurrencia de incendios fueron proporcionados por dicha institución. Todos los datos corresponden al período comprendido entre el 01/01/2018 y el 31/12/2023, lo que equivale a seis años de observaciones.

El cálculo del grado de peligro diario según los índices de Nesterov y Fórmula de Monte Alegre se realizó con las ecuaciones 1 y 2. Se utilizaron las restricciones del cálculo debido a la precipitación y las escalas para interpretar el grado de peligro propuesto por Soares *et al.* (2017) (Tablas 1, 2 y 3). Asimismo, se cuantificó y analizó el número de días previstos para cada clase de peligro, así como los porcentajes que representan dentro de cada categoría.

$$I = \sum_{n=1}^n Ts_i (Ts_i - Tpr_i) \quad (1)$$

Donde: I - Índice de Nesterov; n - número de días con lluvias mayores a 10 mm; Ts - temperatura seca del aire en °C; Tpr - temperatura del punto de rocío en °C.

$$FMA = \sum_{i=1}^n \left(\frac{100}{H_i} \right) \quad (2)$$

Donde: FMA - Índice fórmula de Monte Alegre; n - número de días con lluvias mayores a 12,9 mm; H - humedad relativa en %.

Tabla 1. - Restricciones a la sumatoria del índice de Nesterov

Precipitación diaria (mm)	Modificación en los cálculos
≤ 2	Ninguna
2,1 a 5,0	Disminuir un 25 % el valor de I calculado en la víspera y sumar Ts(Ts-Tpr) del día.
5,1 a 8,0	Disminuir un 50 % el valor de I calculado en la víspera y sumar Ts(Ts-Tpr) del día.
8,1 a 10,0	Abandonar la suma anterior y recomenzar un nuevo cálculo, es decir, I = Ts(Ts-Tpr) del día.
> 10,0	Interrumpir el cálculo (I = 0), recomenzando la sumatoria el día siguiente o cuando cese la lluvia.



Tabla 2. - Restricciones a la sumatoria del índice fórmula de Monte Alegre

Precipitación diaria (mm)	Modificación en los cálculos
$\leq 2,4$	Ninguna
2,5 a 4,9	Disminuir un 30 % en la FMA calculada en la víspera y sumar (100/H) del día.
5,0 a 9,9	Disminuir un 60 % en la FMA calculada en la víspera y sumar (100/H) del día.
10,0 a 12,9	Disminuir un 80 % en la FMA calculada en la víspera y sumar (100/H) del día
$> 12,9$	Interrumpir la sumatoria (FMA = 0) y recomenzar el cálculo el día siguiente o cuando cese la lluvia.

Tabla 3. - Escala original para interpretar el grado de peligro

Valor del Índice		Grados de peligro
Nesterov	FMA	
≤ 300	≤ 1	I (Nulo)
301 a 500	1,1 a 3	II (Pequeño)
501 a 1000	3,1 a 8	III (Medio)
1001 a 4000	8,1 a 20	IV (Alto)
> 4000	> 20	V (Muy alto)

Para verificar el ajuste de las escalas de los índices, se tuvo en cuenta la tendencia de la concentración de la distribución de la ocurrencia de incendios en las clases de peligro durante el periodo de estudio, considerándose dos distribuciones que indican el ajuste de los índices. Según Nunes *et al.* (2010), lo ideal en un índice es que el número de días previstos en cada clase de peligro tenga una relación inversa con la clase de peligro, es decir, mientras mayor sea la clase de peligro, menor debe ser el número de días previstos para ella. Para el caso de la variable ocurrencia de incendios en cada clase de peligro, se buscó establecer una relación directa, de tal manera que, a mayor clase de peligro, mayores son los valores observados para esta variable.

Con base en los criterios anteriores, y utilizando las clases de peligro originales de los índices (Tabla 3), fue necesario definir nuevas clases que fueran más adecuadas para la localidad objeto de estudio. Se realizaron análisis numéricos y gráficos de las variables número de días previstos en cada clase de peligro y ocurrencia de incendios, con el objetivo de definir los límites de las nuevas clases de peligro para los índices objeto de estudio.



El desempeño de los índices estudiados se obtuvo por el método conocido como *skill score*, el cual se basa en una tabla de contingencia que contiene los valores observados y los valores previstos para un evento en una población en un determinado período de tiempo. El punto que indica la ocurrencia y la no ocurrencia de incendio se definió siguiendo a Nunes *et al.* (2010), quienes consideran indicativos de probabilidad de no ocurrencia de incendios las clases de peligro nulo y pequeño y como indicativo de la probabilidad de ocurrencia, las clases de peligro medio, alto y muy alto. A partir de esta definición se calculó el *skill score* y el porcentaje de éxitos de los índices para las escalas original y ajustada de las clases de peligro. Las Tablas 4 y 5 ilustran cómo se realizaron los cálculos para obtener el *skill score* (SS), definido como la razón de la diferencia entre los aciertos en la previsión (G) y el número esperado de aciertos (H) y la diferencia entre el número de días observados (N) y el número de días con previsión de aciertos.

Tabla 4. - Tabla de contingencia

Eventos		Observado		Total previsto
		Ocurrencia	No ocurrencia	
Previsto	Ocurrencia	A	B	N2 = a+b
	No ocurrencia	C	D	N4 = c+d
Total observado		N1 = a+c	N3 = b+d	N = a+b+c+d

Tabla 5. - Cálculos de la tabla de contingencia

Eventos		Observado		Total previsto
		Ocurrencia	No ocurrencia	
Previsto	Ocurrencia	a/(a+c)	b/(b+d)	-
	No ocurrencia	c/(a+c)	d/(b+d)	-
Total observado		1	1	2

Las variables necesarias para realizar los cálculos son:

N – Número total de observaciones

$$N = a + b + c + d$$



a – Días en que se previó la ocurrencia de incendios y ocurrieron

d – Días en que se previó la no ocurrencia de incendios y no ocurrieron

b – Días en que se previó la ocurrencia de incendios y no ocurrieron

c – Días en que se previó la no ocurrencia de incendios y ocurrieron

G – Número de aciertos en la previsión

$$G = a + d$$

H – Número esperado de aciertos

$$H = N * (1 - p) * (1 - q) + N * p * q$$

$$p = N1 / N \text{ y } q = N2 / N$$

SS – Skill score

$$SS = (G - H) / (N - H)$$

PE – Porcentaje de éxitos

$$PE = (G / N) * 100$$

RESULTADOS

Número de días previstos en cada clase de peligro

Las escalas originales de los índices objeto de estudio (Tabla 3) generaron distribuciones no deseadas del número de días previstos en cada clase de peligro (Figura 1), pues no siguen una tendencia decreciente de la clase nulo para muy alto, la cual debe ser la esperada para el comportamiento de esa variable, lo cual es un indicador de que los índices se encuentran desajustados, por lo que fue necesario ajustarlos para que puedan ser utilizados en Jipijapa.



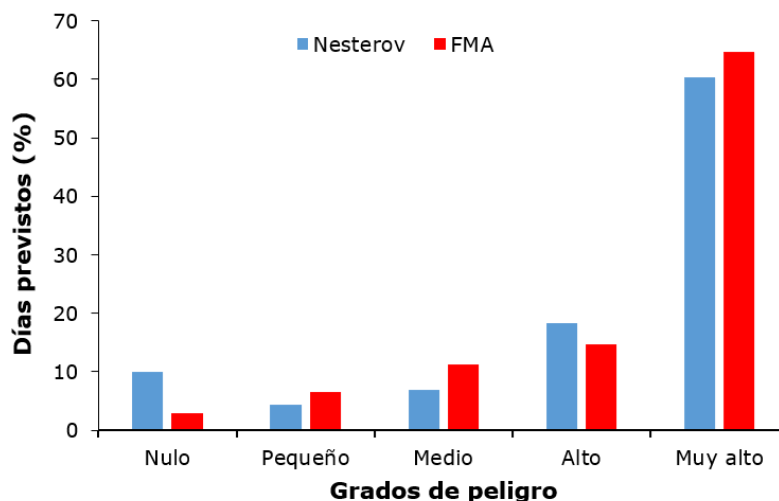


Figura 1. - Distribución de los porcentajes del número de días previstos en cada clase de peligro según las escalas originales de los índices de Nesterov y FMA en Jipijapa

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, a través de análisis numéricos y gráficos de las variables número de días previstos en cada clase de peligro y ocurrencia de incendios, se definieron los límites de las nuevas clases de peligro para los índices objeto de estudio (Tabla 6). La distribución de los porcentajes de días previstos en el período con las escalas ajustadas de los índices (Figura 2) es una condición deseable para el comportamiento del número de días previstos, ya que sigue una tendencia decreciente desde la clase nulo para muy alto, lo cual representa el comportamiento esperado para esta variable y confirma que los índices están ajustados para el cantón Jipijapa.

Tabla 6. - Escala ajustada para interpretar el grado de peligro de los índices Nesterov y FMA en Jipijapa

Valor del Índice		Grados de peligro
Nesterov	FMA	
≤ 3000	≤ 12	I (Nulo)
3001 a 16000	12,1 a 55	II (Pequeño)
16001 a 34000	55,1 a 150	III (Medio)
34001 a 56000	150,1 a 320	IV (Alto)
> 56000	> 320	V (Muy alto)



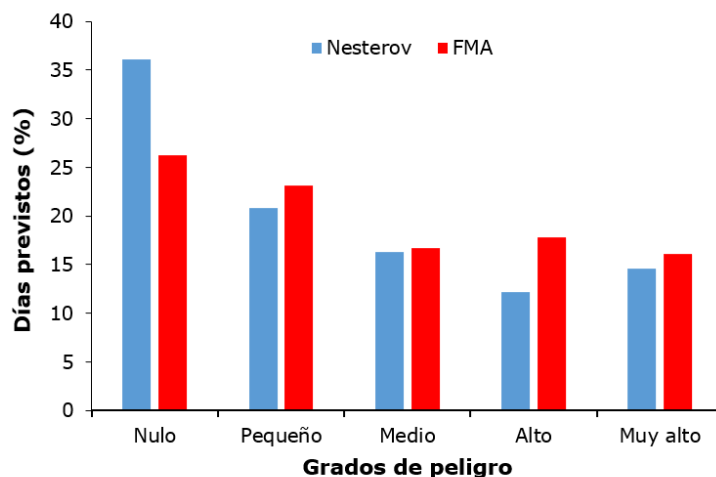


Figura 2. - Distribución de los porcentajes del número de días previstos en cada clase de peligro según las escalas ajustadas de los índices de Nesterov y FMA en Jipijapa

Distribución de la ocurrencia de incendios forestales

En el caso de la variable ocurrencia de incendios forestales, se obtuvo para los índices Nesterov y FMA, utilizando la escala ajustada, una distribución creciente desde la clase I (nulo) para la clase V (muy alto) (Tabla 7). Este comportamiento es deseable para esta variable a lo largo de las clases de peligro de los índices, por lo que se demuestra que las escalas de ambos índices se encuentran ajustadas para el cantón Jipijapa.

Tabla 7. - Distribución de la ocurrencia de incendios forestales según las clases de peligro de las escalas ajustadas de los índices Nesterov y FMA

Grados de peligro	Nesterov		FMA	
	No.	%	No.	%
Nulo	17	11,89	10	6,99
Pequeño	25	17,48	16	11,19
Medio	31	21,68	33	23,08
Alto	35	24,48	45	31,47
Muy alto	35	24,48	39	27,27
Total	143	100,00	143	100,00



Desempeño de los índices Nseterov y FMA

A partir de las escalas original y ajustada de los índices Nesterov y FMA, se elaboró la Tabla 8 con los valores previstos y observados de incendios. A partir de dichos datos fueron calculados los valores de la Tabla 9, que muestra los eventos previstos que tuvieron o no ocurrencia en las escalas original y ajustada.

Tabla 8. - Número de días en que los índices Nesterov y FMA previeron ocurrencia y no ocurrencia de incendios y días con y sin ocurrencia de incendios para las escalas original y ajustada en el cantón Jipijapa

Escalas	Condición	No. de días - Nesterov		No. de días - FMA	
		Observados	Previstos	Observados	Previstos
Original	Ocurrencia	139	1876	142	1986
	No ocurrencia	4	315	1	205
	Total	143	2191	143	2191
Ajustada	Ocurrencia	101	945	117	1109
	No ocurrencia	42	1246	26	1082
	Total	143	2191	143	2191

Tabla 9. - Tabla de contingencia y los cálculos correspondientes para los índices Nesterov y FMA con las escalas original y ajustada en el cantón Jipijapa

Escalas	Índices	Evento		Observado		Total previsto
				Ocurrencia	No ocurrencia	
Original	Nesterov	Previsto	Ocurrencia	0,9720	0,8481	1,8202
			No ocurrencia	0,0280	0,1519	0,1798
		Total observado		1	1	2
	FMA	Previsto	Ocurrencia	0,9930	0,9004	1,8934
			No ocurrencia	0,0070	0,0996	0,1066
		Total observado		1	1	2
Ajustada	Nesterov	Previsto	Ocurrencia	0,7063	0,4121	1,1184



			No ocurrencia	0,2937	0,5879	0,8816
		Total observado		1	1	2
	FMA	Previsto	Ocurrencia	0,8182	0,4844	1,3026
			No ocurrencia	0,1818	0,5156	0,6974
		Total observado		1	1	2

Los valores de *skill score* y porcentaje de éxito obtenidos para los índices Nesterov y FMA, tanto en la escala original como en la ajustada (Tabla 10), muestran un mejor desempeño para ambos índices en el caso de la escala ajustada, siendo muy similares los valores obtenidos para ambos indicadores, aunque es posible sugerir el uso del índice FMA por su facilidad de uso, ya que el cálculo considera solo dos variables meteorológicas.

Tabla 10. - Valores de *skill score* (SS) y porcentaje de éxito (PE) para los índices Nesterov y FMA con las escalas original y ajustada en el cantón Jipijapa

Índices	Escala original		Escala ajustada	
	SS	PE (%)	SS	PE (%)
Nesterov	0,0187	20,54	0,0815	59,56
FMA	0,0132	15,79	0,0806	53,54

DISCUSIÓN

Número de días previstos en cada clase de peligro

Los resultados obtenidos en Jipijapa evidencian que las escalas originales de los índices meteorológicos de Nesterov y Fórmula de Monte Alegre (FMA) no representan adecuadamente la dinámica local del peligro de incendios. La distribución no decreciente del número de días previstos por clase de peligro contradice el patrón



esperado descrito en la literatura científica especializada en evaluación de desempeño de índices de riesgo (Nunes *et al.*, 2010).

Los resultados obtenidos en la presente investigación revelan que el índice de Monte Alegre (FMA), con ajustes locales, mostró un desempeño significativamente superior frente al comportamiento observado bajo las condiciones meteorológicas de Jipijapa, particularmente en los meses de mayor déficit hídrico y temperaturas elevadas. Esta observación concuerda parcialmente con estudios como el de Machado Neto *et al.* (2018), quienes reportaron que, aunque el FMA requiere ajustes en su categorización, logró identificar eficazmente días de alto riesgo en el Parque Nacional de Chapada dos Guimarães, Brasil. En el presente estudio, el ajuste local no solo corrigió la sobrerrepresentación de clases de peligro bajo, sino que también incrementó la sensibilidad del índice frente a eventos de ignición.

En contraste, el estudio de Borges *et al.* (2011) en plantaciones de eucalipto en Espíritu Santo evidenció que el índice FMA⁺, una versión modificada del FMA, alcanzó mejores resultados en términos de porcentaje de éxito y *skill score* que el FMA original. En Jipijapa, sin embargo, los índices modificados (como el FMA⁺) no superaron significativamente al FMA ajustado, lo que sugiere que la precisión del modelo está fuertemente condicionada por el contexto climático local. Este hallazgo destaca la necesidad de validaciones regionales antes de adoptar versiones alteradas de los índices clásicos.

La experiencia cubana reportada por Ramos Rodríguez *et al.* (2012) también refuerza este hallazgo, mostrando que tanto el índice Nesterov como el FMA incrementan su sensibilidad y precisión cuando se ajustan a condiciones específicas de sitio. En el caso de este estudio, el rediseño de las clases de peligro para ambos índices en Jipijapa proporcionó una curva de distribución deseable, indicativa de una mejora operativa del sistema de alerta temprana. En contraste, el estudio de Mbanze *et al.* (2017) en Lichinga mostró un mejor desempeño del índice Nesterov frente a la FMA sin ajustes. Sin embargo, los autores subrayan que la eficacia de cada índice depende de su calibración regional. En su estado original, ambos índices resultaron inadecuados para Jipijapa, pero con ajustes, presentaron una distribución esperada y funcional.



Además, Torres *et al.* (2017) advierten sobre la importancia de considerar no solo las condiciones meteorológicas, sino también el comportamiento del fuego y la humedad del combustible para seleccionar el índice más adecuado en cada región. Aunque este estudio no incluyó análisis directos del comportamiento del fuego en Jipijapa, la necesidad de integración de variables biofísicas y antropogénicas en futuras investigaciones se mantiene vigente.

El estudio de Eugenio *et al.* (2020) también es clave, al evidenciar que el éxito en la predicción de incendios mediante FMA⁺ depende del ajuste metodológico a las condiciones locales. Aunque en este trabajo no se aplicó FMA⁺, los principios metodológicos utilizados para la recalibración de clases se alinean con sus recomendaciones.

Mediante el ajuste de las escalas para ambas metodologías, se logró una distribución decreciente de días desde la clase “nulo” hasta “muy alto”, lo que indica una correcta adaptación al contexto climático de Jipijapa. Esta mejora es coherente con estudios como el de Santos *et al.* (2021), quienes demostraron que la calibración local de los umbrales de FMA mejora sustancialmente su desempeño predictivo.

Similarmente, Almeida *et al.* (2022), al evaluar el desempeño del FMA⁺ en la Reserva Serra do Tombador (Goiás), identificaron su efectividad especialmente en áreas de vegetación de cerrado, donde la acumulación de combustible superficial y la estacionalidad climática son factores predominantes. No obstante, las condiciones semiáridas de Jipijapa imponen restricciones distintas, con una estacionalidad más prolongada y menor cobertura vegetal, lo que obliga a reconsiderar los umbrales de clasificación del índice para mantener la sensibilidad sin comprometer la especificidad.

Además, la investigación desarrollada en la Estación Ecológica do Taim por Marchesan *et al.* (2020), que integró variables estáticas y dinámicas mediante SIG, destaca una limitación metodológica de este estudio: la ausencia de factores topográficos y de uso del suelo en la modelación del riesgo. Si bien el enfoque meteorológico es operativo y replicable, su capacidad predictiva podría mejorarse significativamente con un enfoque espacial multivariado.



Un aspecto relevante es la escasez de estudios específicos sobre el desempeño de los índices en ecosistemas secos del trópico ecuatorial. Se identifica un vacío crítico en la literatura, dado que la mayoría de los estudios se concentran en zonas de bosques templados o tropicales húmedos, con escasa evidencia en ambientes de transición o sabanas secas como las del sur de Manabí. En este sentido, el presente estudio aporta evidencia novedosa y contextualizada sobre el ajuste local de índices meteorológicos de peligro de incendios, evidenciando la necesidad de recalibraciones regionales para mejorar la efectividad de los sistemas de alerta temprana.

Distribución de la ocurrencia de incendios forestales

Los resultados obtenidos para la variable “ocurrencia de incendios forestales” validan empíricamente la adecuación de las escalas ajustadas de los índices Nesterov y FMA al contexto climático y operativo del cantón Jipijapa. La distribución creciente de la ocurrencia de incendios desde la clase de peligro “nulo” hasta “muy alto” demuestra una correlación positiva entre el nivel de peligro estimado por los índices y la ocurrencia real de eventos de ignición, lo cual es una condición esencial para la utilidad operativa de cualquier índice de riesgo.

Este comportamiento esperado también ha sido documentado en estudios como el de Ramos Rodríguez *et al.* (2012), quienes recalibraron las clases del índice FMA⁺ en condiciones tropicales, obteniendo mejoras significativas en la predicción de ocurrencias reales. En Jipijapa, si bien se empleó el índice FMA original, los ajustes en la escala permitieron obtener una distribución casi idéntica en las clases IV (alto) y V (muy alto), con más del 50 % de los incendios observados.

De igual forma, los resultados coinciden con los de Mbanze *et al.* (2017), quienes también observaron una asociación progresiva entre clases de peligro y frecuencia de incendios al evaluar índices en Lichinga, Mozambique. Sin embargo, sus resultados mostraron una mayor eficacia del índice Nesterov, mientras que, en Jipijapa, el FMA ajustado mostró una ligera superioridad, captando el 58,74 % de los incendios entre las clases IV y V, frente al 48,96 % del índice Nesterov. Esto refuerza la necesidad de adaptaciones locales y la imposibilidad de extrapolar rendimientos entre ecosistemas sin recalibraciones previas.



Por su parte, Almeida *et al.* (2022), al analizar el FMA⁺ en Goiás, reportaron una distribución coherente de eventos con el incremento de las clases de peligro, pero alertaron sobre la subestimación de incendios en la clase “Medio”, lo que también es observable en el caso de Jipijapa, donde aún ocurren incendios relevantes en clases intermedias. Esta dispersión indica que, aunque el modelo mejora con el ajuste, sigue siendo sensible a condiciones no plenamente consideradas por los índices meteorológicos.

Asimismo, White *et al.* (2013) proponen desarrollar nuevos índices a partir de bases de datos regionales históricas, precisamente para mejorar la correspondencia entre clases de peligro y eventos reales. Aunque este enfoque puede ser más preciso, también requiere series de tiempo robustas que, en el caso de Jipijapa, aún están en desarrollo.

Finalmente, es importante destacar que otros estudios como el de Marchesan *et al.* (2020), quienes incorporaron variables estáticas y dinámicas en un modelo multivariado para mapear riesgo en el sur de Brasil, sugieren que complementar los índices meteorológicos con información de uso de suelo y topografía podría mejorar la precisión predictiva de eventos reales. En Jipijapa, esta integración aún no ha sido aplicada, lo que representa una línea de investigación futura clara.

Desempeño de los índices Nesterov y FMA

La comparación entre las escalas original y ajustada de los índices Nesterov y FMA, a partir de sus respectivas matrices de contingencia, muestra una mejora clara y sustancial en el desempeño predictivo tras la recalibración local. Los valores de *skill score* (SS) y porcentaje de éxito (PE) aumentaron de forma notoria: en el caso del índice Nesterov, el SS pasó de 0,0187 a 0,0815, mientras que el PE creció de 20,54 % a 59,56 %. El FMA también mostró una evolución comparable (SS de 0.0132 a 0.0806 y PE de 15,79 % a 53,54 %). Estos resultados reflejan una transición efectiva desde una capacidad de predicción cercana al azar hacia un nivel de acierto moderadamente alto, confirmando la validez del ajuste de clases aplicado.



Este patrón se alinea con los hallazgos de Ramos Rodríguez *et al.* (2012), quienes, tras ajustar localmente los umbrales de peligro de Nesterov, FMA y FMA⁺, reportaron mejoras significativas en el porcentaje de éxito del FMA⁺ (hasta 57,1 %). Del mismo modo, Mbanze *et al.* (2017) destacaron que el desempeño de estos índices en Mozambique dependía más de su adecuación a la dinámica regional que de la fórmula en sí misma. También Santos *et al.* (2021) reportaron que el establecimiento de nuevos umbrales para las definiciones de clases de peligro proporcionó mejoras en la eficiencia de la Fórmula de Monte Alegre en la predicción de la ocurrencia de incendios en cinco áreas de cultivo de eucalipto en el Estado de São Paulo, Brasil. Los valores con las escalas originales para el PE estuvieron entre 27,3 % (Avaí) y el 33,2 % (Iaras), mientras que los del SS oscilaron entre 0,0159 (Lençóis Paulista) y 0,0215 (Iaras). Después del ajuste de las escalas a cada área, el PE osciló entre 61,2 % (Lençóis Paulista) y 67,4 % (Pratânia) y el SS fue de 0,03 (Pratânia y Lençóis Paulista) a 0,04 (Avaí, Iaras y Paulistânia).

Los resultados obtenidos en Jipijapa también confirman lo observado por Almeida *et al.* (2022), quienes validaron el índice FMA⁺ como eficaz en áreas del Cerrado brasileño tras recalibraciones basadas en datos empíricos. Sin embargo, al igual que en el presente estudio, los autores advirtieron que, incluso tras el ajuste, persisten errores de clasificación que deben ser mitigados con la inclusión de variables complementarias.

Adicionalmente, White *et al.* (2013) propusieron desarrollar un índice meteorológico propio para el bioma cerrado, al considerar que los modelos existentes no captaban adecuadamente la variabilidad local del riesgo. Si bien la presente investigación no desarrolló un índice nuevo, los resultados fortalecen la recomendación de que las escalas de los índices existentes deben ser vistas como herramientas adaptables, no como estándares fijos.

Por otra parte, Borges *et al.* (2011) señalaron que la simplicidad operativa del FMA y FMA⁺ —al requerir solo dos variables meteorológicas— representa una ventaja importante en regiones con infraestructura meteorológica limitada. Este argumento cobra particular relevancia en Jipijapa, donde, pese a que ambos índices mostraron mejoras similares tras el ajuste, se sugiere el uso preferente del FMA por su mayor facilidad de aplicación y menor requerimiento de datos.



Además, los trabajos de Marchesan *et al.* (2020) y Eugenio *et al.* (2020) destacan la importancia de integrar variables como el uso del suelo, la altitud o la pendiente en los modelos predictivos. El presente estudio, al limitarse al componente meteorológico, podría beneficiarse de futuras mejoras metodológicas en esa dirección. También pudiera considerarse la evaluación del desempeño de otros índices como el FMA⁺ y el *Fire Weather Index* (FWI), así como del impacto de la variabilidad interanual de fenómenos como El Niño en la predictibilidad de los índices, validar los ajustes propuestos mediante modelos predictivos multivariados y análisis de ROC, ampliar el análisis temporal a más años para robustecer las correlaciones y desarrollar un índice adaptado a zonas secas tropicales basado en datos locales y técnicas de aprendizaje automático.

CONCLUSIONES

El ajuste local de los índices Nesterov y FMA ha demostrado ser esencial para mejorar su utilidad predictiva y operativa en el cantón Jipijapa. La metodología de ajuste aplicada resultó eficaz para lograr una distribución de clases coherente con lo esperado teóricamente y validada por estudios comparables.

La adecuada correspondencia entre las clases ajustadas de los índices Nesterov y FMA y la ocurrencia observada de incendios forestales en Jipijapa demuestra su validez como herramientas de alerta temprana. No obstante, se reconoce la necesidad de futuros estudios con índices que integren variables ecológicas, antrópicas y topográficas para elevar la sensibilidad espacial y temporal de la predicción.

La evaluación comparativa del desempeño de los índices Nesterov y FMA, con escalas originales y ajustadas, demuestra que el ajuste local mejora sustancialmente su eficacia operativa en Jipijapa. Aunque el índice de Nesterov presentó un desempeño ligeramente superior, la simplicidad del FMA le confiere una ventaja práctica, por lo que se recomienda su adopción con validaciones periódicas.



AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Cuerpo de Bomberos de Jipijapa por proporcionar los datos sobre la ocurrencia de incendios forestales utilizados en el estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, D.F., KOVALSYKI, B., LUCAS, F.M.F., SANTOS, J.F.L. dos y TETTO, A.F., 2022. Performance of the FMA⁺ Forest Fire Hazard Index for the Serra Do Tombador Natural Reserve, Goiás, Brazil. *Floresta*, [en línea], vol. 52, no. 4, pp. 484-491. ISSN 19824688. DOI 10.5380/rf.v52i4.80322. Disponible en: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20230335153>
- BORGES, T.S., FIEDLER, N.C., SANTOS, A.R. dos, LOUREIRO, E.B. y MAFIA, R.G., 2011. Desempenho de alguns índices de risco de incêndios em plantios de eucalipto no norte do Espírito Santo. *Floresta e Ambiente*, [en línea], vol. 18, no. 2, pp. 153-159. ISSN 21798087. DOI 10.4322/floram.2011.033. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/floram/a/8tNSzkkZ3xZP9VNWTPKJz4Q/?lang=pt>
- EUGENIO, F.C., SANTOS, A.R., PEDRA, B.D., PEZZOPANE, J.E.M., THIENGO, C.C. y SAITO, N.S., 2020. Methodology for determining classes of forest fire risk using the modified monte alegre formula. *Ciencia Florestal*, [en línea], vol. 30, no. 4, pp. 1085-1102. ISSN 19805098. DOI 10.5902/1980509839899. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/McWGGSTqVT5ftfgJGfDYDzp/?format=html&lang=en>
- GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO MUNICIPAL DE JIPIJAPA., 2019. *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2019-2023 - Cantón Jipijapa* [en línea]. 2019. S.l.: s.n. Disponible en: https://jipijapa.gob.ec/images/Planes/PDyOTGAD_JIPIJAPA_2019-2023_signed.pdf.



KOSSOSKI, M.C., MUZA, M.N., VITOR, A. y LEAL DE QUADRO, M.F., 2024. Climate elements and fire hazard indexes in Santa Catarina. *Floresta*, [en línea], vol. 54, no. 1. DOI <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v54i1.92784>. Disponible en: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/download/92784/51905>

MACHADO NETO, A.D.P., SOARES, R.V., BATISTA, A.C., BIONDI, D., PEDRO, A. y BORGES, R., 2018. Desempenho do Índice de Perigo de Incêndios FMA no Parque Nacional da Chapada dos Guimarães-MT. *Nativa*, [en línea], vol. 6, no. 2, pp. 153. DOI [10.31413/nativa.v6i2.4763](https://doi.org/10.31413/nativa.v6i2.4763). Disponible en: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20183231966>

MARCHESAN, J., ALBA, E., TABARELLI, C., PIVOTO MELLO, E., HONNEF, D.H. y SOARES PEREIRA, R., 2020. Risco de incêndios na Estação Ecológica do Taim, Rio Grande do Sul. *Nativa*, [en línea], vol. 8, no. 1, pp. 112-117. DOI [10.31413/nativa.v8i1.8180](https://doi.org/10.31413/nativa.v8i1.8180). Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/8180&ved=2ahUKEwifq5-XiMCSAxX1SzABHZHDC1wQFnoECBsQAQ&usg=AOvVaw1u-H1AR_ETkhV41jLKI8yJ

MBANZE, A., BATISTA, A. y TETTO, A.F., 2017. Desempenho dos índices de Nesterov e Fórmula de Monte Alegre no Distrito de Lichinga, Norte de Mocambique. *Ciência Florestal, Santa Maria*, [en línea], vol. 27, no. 2, pp. 687-696. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/VyN3WQyNkgXDd7zpxtrQKDq/?lang=pt>

NUNES, J.R.S., FIER, I.S.N., SOARES, R.V. y BATISTA, A.C., 2010. Desempenho da Fórmula de Monte Alegre (FMA) e da Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+) no Distrito Florestal de Monte Alegre. *Floresta* [en línea], vol. 40, no. 2, pp. 319-326. Disponible en: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/viewFile/17827/11629>.



- PAZMIÑO, D., 2019. Peligro de incendios forestales asociado a factores climáticos en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, [en línea], vol. 1, no. 1, pp. 10-18. ISSN 1390-7042. DOI 10.29166/revfig.v1i1.1800. Disponible en: <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/view/1800>
- PÉREZ-SÁNCHEZ, J., SENENT-APARICIO, J., DÍAZ-PALMERO, J.M. y CABEZAS-CEREZO, J. de D., 2017. A comparative study of fire weather indices in a semiarid south-eastern Europe region. Case of study: Murcia (Spain). *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 590-591, pp. 761-774. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.03.040. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.040>.
- POTTER, B., 2018. The Haines Index-it's time to revise it or replace it. *International Journal of Wildland Fire*, [en línea], vol. 29, no. 2, pp. 437-440. ISSN 10498001. DOI 10.1071/WF18015. Disponible en: https://www.fs.usda.gov/pnw/pubs/journals/pnw_2018_potter001.pdf
- RAMOS RODRÍGUEZ, M.P., CARRASCO RODRÍGUEZ, Y., MIRANDA SIERRA, C.A., BATISTA, A.C. y TETTO, A.F., 2017. Relación entre variables meteorológicas e incendios forestales en la provincia Pinar del Río, Cuba. *Floresta* [en línea], vol. 47, no. 3, pp. 343-352. ISSN 19824688. DOI 10.5380/rf.v47i1.50900. Disponible en: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/50900/33615>.
- RAMOS RODRÍGUEZ, M.P., SOARES, R.V., BATISTA, A.C., TETTO, A.F., SIERRA MIRANDA, C.A. y CARRASCO RODRÍGUEZ, Y., 2012. Ajuste e desempenho dos índices de perigo de incêndios Nesterov, FMA e FMA+ na Empresa Florestal Macurije, Cuba. *Floresta* [en línea], vol. 42, no. 4, pp. 651-660. ISSN 00153826. DOI <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v42i4.28659>. Disponible en: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/28659/19823>.
- SANTOS, J.F.L. dos, KOVALSYKI, B., FERREIRA, T. de S., PAJEWSKI, F., BATISTA, A.C., TETTO, A.F. y SOARES, R.V., 2021. Adaptation of the Fórmula de Monte Alegre for the danger prediction of forest fires in the central region of São Paulo State. *Ciencia Florestal*, [en línea], vol. 31, no. 4, pp. 1867-1884. ISSN 1980-5098. DOI 10.5902/1980509852851. Disponible en:



<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/download/52851/pdf/304900>

SHARPLES, J.J., 2022. A note on fire weather indices. *International Journal of Wildland Fire*, [en línea] vol. 31, no. 7, pp. 728-734. DOI <https://doi.org/10.1071/WF21134>. Disponible en: <https://connectsci.au/wf/article-abstract/31/7/728/88902/A-note-on-fire-weather-indices?redirectedFrom=fulltext>

SOARES, R.V., BATISTA, A.C. y TETTO, A.F., 2017. *Incêndios florestais: controle, efeito e uso do fogo*. [en línea] Segunda Ed. Curitiba: Gráfica Capital. ISBN 978-85-904353-6-5. Disponible en: https://books.google.com.cu/books/about/Inc%C3%AAndios_florestais.html?id=DmTxZwEACAAJ&redir_esc=y

STEINFELD, D., PETER, A., MARTIUS, O. y BRÖNNIMANN, S., 2022. Assessing the performance of various fire weather indices for wildfire occurrence in Northern Switzerland. *In Review - EGU Sphere* [en línea], no. April, pp. 1-23. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-92>.

TORRES, F.T.P., LIMA, G.S., MARTINS, S.V. y VALVERDE, S.R., 2017. Análise da eficiência de índices de perigo na predição de incêndios florestais. *Revista Arvore* [en línea], vol. 41, no. 2. ISSN 18069088. DOI 10.1590/1806-90882017000200009. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/FHd4RNWRsyvnxV99LgBYHDn/?lang=en&format=pdf>.

TORRES, F.T.P., SILVA JÚNIOR, M.R. da y LIMA, G.S., 2019. Influência dos Elementos Meteorológicos Sobre o Comportamento do Fogo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, [en línea] vol. 34, no. 1, pp. 33-41. ISSN 0102-7786. DOI <https://doi.org/10.1590/0102-7786334014>. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/RLWTSJVpgqRcrjshQCxksdb/?lang=pt>



WHITE, B.L.A., WHITE, L.A.S., RIBEIRO, G.T. y FERNANDES, P.A.M., 2013.
Development of a Fire Danger Index for Eucalypt Plantations in the Northern
Coast of Bahia, Brazil. *Floresta* [en línea], vol. 43, no. 4, pp. 601. ISSN 1982-4688.
DOI 10.5380/rf.v43i4.30973. Disponible en:
<http://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/30973>.

Conflictos de intereses:

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores:

Los autores han participado en la redacción del trabajo y análisis de los documentos.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial
4.0 Internacional.

