

Ajuste de los índices meteorológicos de peligro de incendios forestales FMA+ y Telicyn para Jipijapa, Manabí, Ecuador

Adjustment of the FMA+ and Telicyn Fire Weather Indices for Jipijapa, Manabí, Ecuador

Kerly Monserrate Briones-Carreño¹  • Marcos Pedro Ramos-Rodríguez² 

Recibido: 26/2/2026

Aceptado: 9/6/2026

Abstract

Fire weather indices provide relevant information that facilitates the assessment and communication of wildfire risk and potential fire spread. The objective of this study was to calibrate the meteorological fire danger indices Altered Monte Alegre Formula (FMA+) and Telicyn for Jipijapa, Manabí, Ecuador. To conduct this research, daily meteorological data (dew point temperature, air temperature, relative humidity, wind speed, and precipitation) and forest fire occurrence records covering a six-year period (01/01/2020 to 12/31/2025) were used. Meteorological data were obtained from NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources database, while fire occurrence records were provided by the Jipijapa Fire Department. A total of 173 days with recorded forest fire occurrences were considered in the analysis. The performance of the indices was evaluated using the Skill Score (SS) and Percentage of Success (PS) methods. After adjusting the danger classes, the following values were obtained: FMA+ (SS = 0.1154 and PS = 63.96 %) and Telicyn (SS = 0.0983 and PS = 65.97 %). The results show a relative improvement in the performance indicators of both indices after local calibration. These findings suggest that the adjusted scales more adequately represent the local fire danger conditions in Jipijapa and may serve as a complementary tool for risk assessment and decision-making in fire management.

Keywords: Early warning, fire management, wildfire prevention, wildfire risk, meteorological variables.

1. Universidad Estatal del Sur de Manabí, Maestría en Gestión Ambiental. Jipijapa, Manabí, Ecuador.
briones-kerly6105@unesum.edu.ec
2. Universidad Estatal del Sur de Manabí, Carrera de Ingeniería Forestal. Jipijapa, Manabí, Ecuador.
marcos.ramos@unesum.edu.ec

Resumen

Los índices meteorológicos de peligro de incendios forestales proporcionan información relevante que facilita la evaluación y comunicación del riesgo de ocurrencia y propagación de los mismos. El presente trabajo tuvo como objetivo ajustar los índices meteorológicos de peligro de incendios Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+) y Telicyn en Jipijapa, Manabí, Ecuador. Para realizar esta investigación se utilizaron datos meteorológicos diarios (temperatura del punto de rocío, temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad del viento, precipitación) y datos de ocurrencia de incendios forestales de un periodo de seis años (01/01/2020 a 31/12/2025). Los datos meteorológicos fueron obtenidos de NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources y los registros de incendios en el Cuerpo de Bomberos de Jipijapa. Para el análisis se consideraron 173 días con ocurrencia de incendios forestales. El desempeño de los índices fue comprobado mediante el método Skill Score (SS) y del Porcentaje de Éxito (PE). Después de hacer el ajuste de las clases de peligro, los valores obtenidos fueron: FMA+ (SS = 0,1154 y PE = 63,96 %) y Telicyn (SS = 0,0983 y PE = 65,97 %). Los resultados muestran una mejora relativa de los indicadores de desempeño de ambos índices después del ajuste local. Estos resultados sugieren que las escalas ajustadas representan de forma más adecuada las condiciones locales de peligro de incendios en Jipijapa y pueden constituir una herramienta complementaria para la evaluación del riesgo y la toma de decisiones en el manejo del fuego.

Palabras clave: Alerta temprana, manejo del fuego, prevención de incendios forestales, riesgo de incendios forestales, variables meteorológicas.

Introducción

Los incendios forestales han causado enormes daños ambientales, sociales y económicos a lo largo de los años [1] representando una de las principales amenazas para los ecosistemas del mundo, afectando millones de hectáreas anualmente. Las presiones inducidas por el ser humano y el calentamiento global contribuyen al aumento en la frecuencia, intensidad y tamaño de estos incendios, lo que conlleva consecuencias significativas tanto para las comunidades naturales como para la sociedad en su conjunto [2]. Un componente clave en la planificación de las actividades de manejo del fuego (uso, prevención y extinción) son los índices meteorológicos de peligro de incendios forestales ajustados a las condiciones locales.

Los índices de peligro de incendios forestales son indicadores que reflejan, anticipadamente, la

probabilidad de que ocurra un incendio, así como la facilidad del mismo de propagarse, con base en las condiciones atmosféricas del día o de una secuencia de días [3], [4]. Su conocimiento es fundamental dentro de un plan de defensa de los bosques contra los incendios, ya que la previsión de este peligro permite conocer la situación del bosque en cada momento, de modo que, con la mayor economía, se obtenga el máximo rendimiento de las medidas preventivas y se pueda salir al paso de las dificultades de la extinción en mejores condiciones [4]. Los índices de peligro de incendios cuando son eficientes para una localidad determinada, constituyen una herramienta de apoyo para los gestores forestales, ya que facilitan la planificación de actividades de prevención, la adopción de medidas preventivas y la organización de acciones de combate [5], [6].

En 1933 se estructuró el primer índice de peligro de incendios forestales, la escala de Gisborne, basada en diversos componentes del clima [7]. Posteriormente fueron desarrollados en varios países diferentes índices meteorológicos de riesgo de incendios forestales. Dos de ellos son el índice logarítmico de Telicyn [8], desarrollado en la antigua Unión Soviética y la Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+) [9], desarrollada en Brasil a partir de modificar el índice Fórmula de Monte Alegre (FMA) [10].

El desempeño de los índices meteorológicos de peligro de incendios ha sido ampliamente evaluado en diversos contextos geográficos y climáticos. En particular, el Índice Logarítmico de Telicyn ha sido objeto de análisis empírico en varias localidades de Brasil [11]-[13], donde se ha examinado su capacidad predictiva en relación con la ocurrencia de incendios forestales. De manera similar, la Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+) ha sido validada y comparada con otros índices de riesgo en diferentes regiones, incluyendo Brasil [13]-[15], Cuba [16] y Mozambique [18], evidenciando su aplicabilidad bajo distintos regímenes meteorológicos y condiciones ecosistémicas.

Es importante destacar que, a pesar de la existencia de diversos índices de peligro de incendios, la utilización de un índice poco eficiente puede conducir a la toma de decisiones equivocadas en relación con los procedimientos de prevención y combate de los incendios forestales, mientras que un índice de predicción confiable puede ayudar a una mejor cuantificación y distribución de los recursos destinados a la prevención [11].

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 [19]. Aunque diversos estudios

han evaluado índices de peligro de incendios forestales en diferentes regiones tropicales y subtropicales, existe escasa evidencia sobre su calibración y desempeño en ecosistemas secos de la costa ecuatoriana. Esta ausencia de información limita la implementación de sistemas de alerta adaptados a las condiciones locales. Con el fin de cubrir este vacío de conocimiento, el presente estudio tuvo el objetivo de ajustar los índices meteorológicos de peligro de incendios Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+) y Telicyn en Jipijapa, Manabí, Ecuador, utilizando registros históricos de incendios y variables meteorológicas locales.

Material 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 (figura 1). 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.

Obtención y procesamiento 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, humedad relativa, velocidad del viento y las precipitaciones acumuladas en 24 horas hasta el momento de la medición. Esta información se obtuvo de POWER (NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources) (<https://power.larc.nasa.gov/>) que proporciona información climática y meteorológica en formato digital derivada de observaciones satelitales y sistemas de reanálisis atmosférico.

Los datos meteorológicos correspondieron a las coordenadas geográficas con longitud -80,5799 y latitud -1,3488, lugar donde se encuentra ubicado el Cuerpo de Bomberos de Jipijapa. Los registros de ocurrencia de incendios fueron obtenidos de las bitácoras operativas del Cuerpo de Bomberos de Jipijapa. Dichos registros corresponden a emergencias reportadas y gestionadas a través de los protocolos institucionales de respuesta, generalmente activados mediante alertas del sistema ECU 911. Debido a las características de la información disponible, no fue posible verificar de manera retrospectiva si algunos eventos reportados correspondieron a quemados agrícolas controlados u otras situaciones en las que finalmente no fue necesaria la intervención directa del personal operativo. Esta limitación debe ser considerada en la interpretación de los resultados. Todos los datos correspondieron al período comprendido entre el 01/01/2020 y el 31/12/2025, lo que equivale a seis años de observaciones. Los cálculos y figuras se realizaron con Microsoft Excel.

La selección de los índices FMA+ y Telicyn respondió a criterios operativos, metodológicos y de disponibilidad de datos. Ambos índices han sido ampliamente utilizados y evaluados en países de América Latina con condiciones climáticas tropicales y subtropicales, demostrando una implementación sencilla y una baja demanda de variables meteorológicas. A diferencia de otros sistemas más complejos, como el Canadian Fire Weather Index (FWI), o de modelos predictivos basados en aprendizaje automático, FMA+ y Telicyn pueden calcularse a partir de variables meteorológicas disponibles en estaciones convencionales o en bases de datos meteorológicos de acceso abierto. Cabe señalar también que en la localidad objeto de estudio ya habían sido analizados [19] los índices Fórmula de Monte Alegre (FMA) y Nesterov.

Asimismo, el objetivo principal de esta investigación no fue comparar diferentes familias de modelos predictivos, sino evaluar si dos índices ampliamente difundidos en América Latina pueden mejorar su capacidad predictiva mediante un proceso de calibración local para las condiciones específicas de Jipijapa. Por esta razón, el estudio se centró en la adaptación de índices ya consolidados y potencialmente aplicables por organismos locales con limitaciones de infraestructura y disponibilidad de datos.

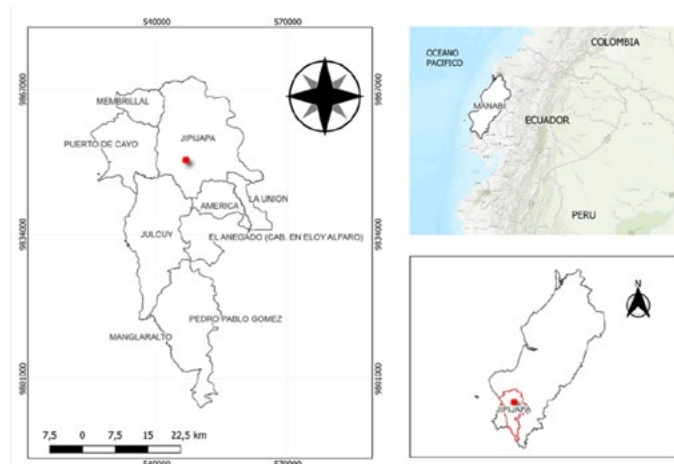


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Figure 1. Location of study area.

Cuadro 1. Restricciones a la sumatoria de los índices.

Table 1. Restrictions on the sum of the indices.

Índice	Precipitación diaria (mm)	Modificación en los cálculos
FMA+	≤ 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.
Telicyn	≥ 2,5	El cálculo debe suspenderse y retomarse nuevamente al día siguiente.

Cuadro 2. Escalas originales de los índices para interpretar el grado de peligro.

Table 2. Original index scales for interpreting hazard levels.

Índice	Valor del Índice	Grados de peligro
FMA+	≤ 3	I (Nulo)
	3,1 a 8,0	II (Pequeño)
	8,1 a 14,0	III (Medio)
	14,1 a 24,0	IV (Alto)
	> 24,0	V (Muy alto)
Telicyn	≤ 2	I (Nulo)
	2,1 a 3,5	II (Pequeño)
	3,6 a 5,0	III (Medio)
	> 5	IV (Alto)

El cálculo del grado de peligro diario según los índices FMA+ y Telicyn se realizó con las ecuaciones 1 [10] y 2 [8]. Se utilizaron las restricciones del cálculo debido a la precipitación y la escala para interpretar el grado de peligro propuestas de los cuadros 1 y 2. También se cuantificó y analizó el número de días previstos para cada clase de peligro, así como los porcentajes que representan dentro de cada categoría.

$$FMA^+ = \sum_{i=1}^n \left(\frac{100}{H_i} \right) e^{0,04v} \quad (1)$$

Donde: FMA+ es el Índice Fórmula de Monte Alegre Alterada; H es la humedad relativa del aire (%); n es el número de días sin lluvias mayores a 12,9 mm; v es la velocidad del viento (m s⁻¹) y e es la base de los logaritmos naturales (2,718282)

$$I = \sum_{i=1}^n \log(t_i - r_i) \quad (2)$$

Donde: I es el Índice Logarítmico de Telicyn; t es la temperatura del aire (°C); r es la temperatura del punto de rocío (°C); log es el logaritmo en base 10; n es el número de días sin lluvia

Durante el período analizado se registraron 173 días con incendios forestales, los cuales fueron utilizados para la calibración y evaluación de los índices. Dado que el objetivo principal del estudio fue la calibración local de los índices para las condiciones del cantón Jipijapa, la totalidad de la serie histórica disponible (2020–2025) fue utilizada tanto para la redefinición de los límites de las clases de peligro como para la evaluación de su desempeño. Este enfoque ha sido empleado previamente en estudios de ajuste de índices meteorológicos de peligro de incendios forestales, aunque se reconoce que futuras investigaciones deberían incorporar conjuntos de validación independientes para evaluar la estabilidad de los umbrales obtenidos.

El ajuste de las escalas de los índices se verificó considerando 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 [20], 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, siguiendo 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, se definieron nuevas clases para el área de estudio. La redefinición de los límites de las clases de peligro se realizó mediante un procedimiento iterativo de análisis numérico y gráfico, siguiendo los criterios establecidos por [20] y otros autores que han aplicado metodologías similares. El ajuste buscó obtener simultáneamente: (i) una distribución decreciente del número de días previstos desde las clases de menor a mayor peligro, (ii) una distribución creciente de la ocurrencia de

Cuadro 3. Tabla de contingencia.**Table 3.** Contingency table.

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

Cuadro 4. Cálculos de la tabla de contingencia.**Table 4.** Contingency table calculations.

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		$N1 = a+c$	1	2

incendios conforme aumenta el grado de peligro y (iii) los mayores valores posibles de Skill Score (SS) y Porcentaje de Éxito (PE). Para cada propuesta de límites se calcularon dichas distribuciones e indicadores de desempeño, modificándose sucesivamente los umbrales hasta alcanzar la configuración que mostró la mejor concordancia con los tres criterios establecidos.

El desempeño de los índices meteorológicos de peligro de incendios forestales fue evaluado mediante los indicadores Skill Score (SS) y Porcentaje de Éxito (PE), los cuales permiten cuantificar la capacidad predictiva de los índices a partir de la concordancia entre los eventos observados y los previstos. Dichos indicadores han sido utilizados en investigaciones previas [1], [6], [11], [12], [14], [16], [18]-[22], [24], [26], [29], [30].

El Skill Score 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 [20], 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, según la escala de cada índice. A partir de esta definición se calculó el Skill Score y el Porcentaje de Éxito de los índices para las escalas original y ajustada de las clases de peligro.

Los cuadros 3 y 4 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.

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 Éxito

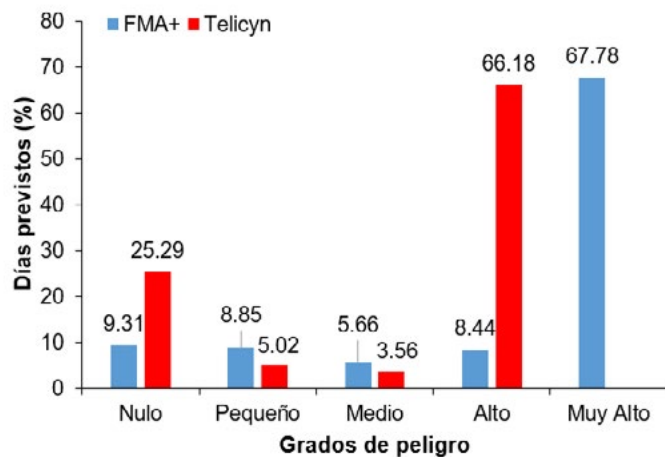


Figura 2. Distribución de los porcentajes del número de días previstos en cada clase de peligro según las escalas originales de los índices de FMA+ y Telicyn para Jipijapa.

Figure 2. Distribution of the percentages of forecast days in each hazard class according to the original FMA+ and Telicyn index scales for Jipijapa.

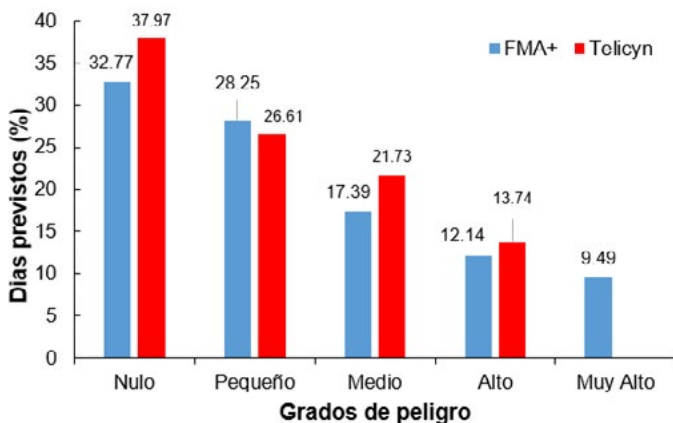


Figura 3. Distribución de los porcentajes del número de días previstos en cada clase de peligro según las escalas ajustadas de los índices FMA+ y Telicyn para Jipijapa.

Figure 3. Distribution of forecast days (%) among hazard classes according to the adjusted FMA+ and Telicyn index scales for Jipijapa.

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

La capacidad discriminativa de los índices fue evaluada mediante el cálculo del área bajo la curva ROC (AUC). Para ello se consideró como variable dependiente la ocurrencia diaria de incendios forestales (presencia/ausencia) y como variable independiente los valores continuos diarios de los índices FMA+ y Telicyn obtenidos con las escalas ajustadas. El análisis se

realizó utilizando los valores numéricos de los índices y no las clases de peligro, con el objetivo de evaluar la capacidad de cada índice para diferenciar entre días con y sin ocurrencia de incendios. Los valores de AUC y sus correspondientes niveles de significación estadística (p) fueron obtenidos mediante el software SPSS v.22.

Resultados

Número de días previstos en cada clase de peligro

Las escalas originales de los índices objeto de estudio (cuadro 2) generaron distribuciones no deseadas del número de días previstos en cada clase de peligro (figura 2) pues no siguen una tendencia decreciente de la clase Nulo hasta Alto o Muy Alto según sea la escala del índice, la cual debe ser la esperada para el comportamiento de esa variable. Esto es un indicador de que los índices se encuentran desajustados, por lo que fue necesario ajustarlos para que puedan ser utilizados 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 (cuadro 5). La distribución de los porcentajes de días previstos durante el período de estudio utilizando las escalas ajustadas (figura 3) presenta el comportamiento esperado para esta variable, ya que sigue una tendencia decreciente desde la clase Nulo hasta la clase Alto y Muy Alto para los índices FMA+ y Telicyn, respectivamente, lo cual representa el comportamiento esperado para esta variable y confirma que los índices están ajustados para el cantón Jipijapa.

Distribución de la ocurrencia de incendios forestales

En el caso de la variable ocurrencia de incendios forestales se obtuvo para los índices FMA+ y Telicyn, utilizando la escala ajustada, una distribución representativa de los eventos a lo largo de las clases de peligro (cuadro 6). Se observa una mejor correspondencia entre el aumento del grado de peligro y la ocurrencia de incendios forestales. Este comportamiento es el esperado para esta variable y evidencia que las escalas ajustadas de ambos índices representan de manera más adecuada la ocurrencia de incendios forestales, confirmando su ajuste para el cantón Jipijapa.

Desempeño de los índices FMA+ y Telicyn

A partir de las escalas original y ajustada de los índices FMA+ y Telicyn se obtuvieron los valores previstos y

Cuadro 5. Escala ajustada de los índices para interpretar el grado de peligro.

Table 5. Adjusted index scales for interpreting the degree of hazard.

Valor del Índice		Grados de peligro
FMA+	Telicyn	
≤ 25	≤ 7	I (Nulo)
26 a 130	8 a 43	II (Pequeño)
131 a 250	44 a 140	III (Medio)
251 a 390	>140	IV (Alto)
> 390		V (Muy Alto)

Cuadro 6. Distribución de la ocurrencia de incendios forestales según las clases de peligro de las escalas ajustadas de los índices FMA+ y Telicyn.

Table 6. Distribution of wildfire occurrences across hazard classes based on the adjusted FMA+ and Telicyn index scales.

Grados de peligro	FMA+		Telicyn	
	No.	%	No.	%
Nulo	12	6,94	24	13,87
Pequeño	42	24,28	47	27,17
Medio	49	28,32	52	30,06
Alto	43	24,86	50	28,90
Muy Alto	27	15,61		
Total	173	100,00	173	100,00

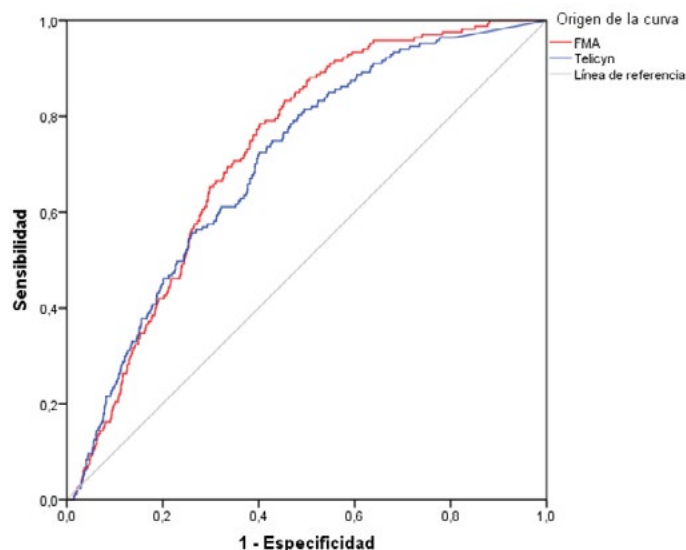


Figura 4. Representación del área bajo la curva (AUC) para los índices FMA+ y Telicyn en Jipijapa.

Figure 4. Representation of the Area Under the Curve (AUC) for the FMA+ and Telicyn indices in Jipijapa.

observados de incendios (cuadro 7). A partir de dichos datos fueron calculados los valores del cuadro 8, el cual muestra los eventos previstos que tuvieron o no ocurrencia en las escalas original y ajustada.

Los valores de Skill Score y Porcentaje de Éxito obtenidos para los índices FMA+ y Telicyn, tanto con la escala original como con la ajustada (cuadro 9) mostraron una mejora relativa en los indicadores de desempeño respecto a las escalas originales, aunque los valores obtenidos de Skill Score indican una capacidad predictiva moderada, característica común en estudios de calibración de índices meteorológicos de peligro de incendios forestales.

Los valores de AUC obtenidos en este trabajo demostraron que el uso de los índices meteorológicos de peligro FMA+ y Telicyn constituyen una metodología adecuada para clasificar el riesgo de incendio en Jipijapa. El AUC más alto correspondió al índice FMA+ con 0,727 ($p = 1,8414 \times 10^{-22}$); mientras que el área bajo la curva para el índice de Telicyn fue de 0,703 ($p = 2,2286 \times 10^{-18}$) (figura 4).

Discusión

Número de días previstos en cada clase de peligro

El resultado del número esperado de días en el cantón Jipijapa en cada clase de peligro con las escalas originales de los índices FMA+ y Telicyn generaba distribuciones no coherentes del número de días previstos. Esta conducta irregular evidenció un desajuste en la calibración de los índices, limitando la representación de la dinámica local de los incendios. Tras el ajuste de las escalas, la distribución se alineó con el patrón deseado, reflejando más días en las clases de menor riesgo y menos en las de mayor peligro, lo que confirma su adaptación a las condiciones locales. Estos resultados coinciden con estudios realizados en Brasil [22] y Cuba [16], donde fue necesario redefinir los límites de las clases de peligro para obtener distribuciones más consistentes. De igual forma, concuerdan con lo señalado por [17], quienes destacan que los índices meteorológicos de peligro de incendios suelen desarrollarse para regiones específicas y requieren ajustes locales para mejorar su desempeño. Asimismo, los resultados obtenidos confirman que [11] los índices de peligro de incendios no son universales y que su aplicación efectiva depende de procesos de calibración adaptados a las condiciones climáticas y operativas de cada región.

Cuadro 7. Número de días en que los índices FMA+ y Telicyn previeron ocurrencia y no ocurrencia de incendios y días con y sin ocurrencia de incendios para las escalas originales y ajustadas.

Table 7. Number of days predicted by the FMA+ and Telicyn indices as fire and non-fire days, and the observed number of days with and without fire occurrence, for the original and adjusted scales.

Escalas	Condición	No. de días - FMA+		No. de días - Telicyn	
		Observados	Previstos	Observados	Previstos
Original	Ocurrencia	167	1627	159	1369
	No ocurrencia	6	392	14	650
	Total	173	2019	173	2019
Ajustada	Ocurrencia	119	736	102	675
	No ocurrencia	54	1283	71	1344
	Total	173	2019	173	2019

Cuadro 8. Tabla de contingencia y los cálculos correspondientes para los índices con las escalas original y ajustada.

Table 8. Contingency table and corresponding calculations for the indices with the original and adjusted scales.

Escalas	Índices	Evento	Observado		Total previsto	
			Ocurrencia	No ocurrencia		
Original	FMA+	Previsto	Ocurrencia	0,9653	0,8058	1,7712
			No ocurrencia	0,0347	0,1942	0,2288
		Total observado	1	1	2	
	Telicyn	Previsto	Ocurrencia	0,9191	0,6781	1,5971
			No ocurrencia	0,0809	0,3219	0,4029
		Total observado	1	1	2	
Ajustada	FMA+	Previsto	Ocurrencia	0,6879	0,3645	1,0524
			No ocurrencia	0,3121	0,6355	0,9476
		Total observado	1	1	2	
	Telicyn	Previsto	Ocurrencia	0,5896	0,3343	0,9239
			No ocurrencia	0,4104	0,6657	1,0761
		Total observado	1	1	2	

Cuadro 9. Valores de skill score (SS) y porcentaje de éxito (PE) para los índices FMA+ y Telicyn con las escalas originales y ajustadas.

Table 9. Skill Score (SS) and Percentage of Success (PS) values for the FMA+ and Telicyn indices with the original and adjusted scales.

Índices	Escala original		Escala ajustada	
	SS	PE (%)	SS	PE (%)
FMA+	0,0302	25,50	0,1154	63,96
Telicyn	0,0526	36,91	0,0983	65,97

Distribución de la ocurrencia de incendios forestales

La distribución de la ocurrencia de incendios forestales según las escalas ajustadas mostró una relación consistente entre el aumento del grado de peligro y la frecuencia de los eventos registrados. Tanto para FMA+ como para Telicyn se observó una menor ocurrencia en las clases de peligro más bajas y un incremento progresivo hacia las categorías medias y altas, comportamiento esperado en índices adecuadamente calibrados. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por [19] para los índices Nesterov y FMA en Jipijapa, donde la distribución creciente de incendios desde las clases de menor a mayor peligro confirmó la adecuación de las escalas ajustadas al contexto local. De igual manera, [16] observaron que la reasignación de incendios por clases de peligro mejoró la correspondencia entre los valores del índice y la ocurrencia de eventos, concentrando los incendios en las categorías de peligrosidad media. Resultados similares fueron reportados por [23], [24], quienes indican que la utilidad de la Fórmula de Monte Alegre y sus modificaciones depende de su capacidad para identificar adecuadamente los días con mayor probabilidad de incendios. Asimismo, [11] señalaron que los índices presentan mejor desempeño cuando la mayoría de los incendios se concentra en las categorías de peligro Medio, Alto y Muy Alto. No obstante, estos resultados difieren parcialmente de los obtenidos por [12], donde la mayor ocurrencia de incendios se registró en las clases de peligro Nulo y Muy Alto, evidenciando que la distribución de los eventos puede variar significativamente entre regiones y condiciones ambientales.

Desempeño de los índices FMA+ y Telicyn

Los resultados obtenidos muestran una mejora de los indicadores de desempeño de los índices FMA+ y Telicyn cuando se utilizan las escalas ajustadas, reflejada en el incremento de los valores de Skill Score (SS) y Porcentaje de Éxito (PE). No obstante, los valores absolutos de SS indican una capacidad predictiva moderada, por lo que los resultados deben interpretarse como una mejora relativa respecto a las escalas originales. Debe considerarse que las escalas ajustadas fueron calibradas y evaluadas utilizando la misma serie histórica, por lo que no puede descartarse cierto grado de sobreajuste. En consecuencia, los valores de desempeño obtenidos podrían representar una estimación optimista de la capacidad predictiva real de los índices. La validación con registros independientes de incendios permitirá determinar la estabilidad temporal de los umbrales definidos y verificar su capacidad de generalización.

La mejora a que se hace referencia en el párrafo anterior

concuerda con lo reportado por [11], [12], quienes señalaron que la efectividad de estos parámetros de peligro de incendios forestales depende en gran medida de la correcta medición de sus clases de peligro, ya que las escalas originales pueden subestimar la verdadera prevalencia de los incendios.

Por su parte [16], [22], determinaron que los ajustes de los umbrales de peligro del índice FMA+ mejoran la concordancia entre los incendios observados y pronosticados, aumentando el poder discriminativo entre días de incendio y días sin incendio. Por ende, coincide con el comportamiento en Jipijapa, donde luego de aplicar la escala corregida, el índice FMA+ mostró un aumento para el valor del SS pasando de 0,0302 a 0,1154 y PE de 25,50 % a 63,96 %, sugiriendo que el índice responde favorablemente al proceso de calibración local. También [19], en el cantón Jipijapa, después del ajuste correspondiente, obtuvieron valores para el SS de 0,0815 y 0,0806 para Nesterov y FMA, respectivamente, siendo los valores de PE 59,56 % para Nesterov y 53,54 % para la FMA. Todos los valores reportados en ese trabajo para ambos indicadores de eficiencia de los índices, fueron inferiores a los obtenidos en este estudio para los índices FMA+ y Telicyn.

Por otro lado, estudios realizados en diferentes regiones por [25], [5] resaltan que ningún índice proporciona un rendimiento universalmente óptimo y que su efectividad varía dependiendo de las condiciones meteorológicas y ecológicas de la zona de estudio.

En el caso del índice logarítmico de Telicyn [26], [27], detectaron que este índice mejora su poder predictivo cuando se ajustan los intervalos de clasificación de peligros, especialmente en ambientes de zonas tropicales y subtropicales. Los resultados obtenidos para este índice en Jipijapa confirman que la redefinición de las clases de peligro aumenta la utilidad operativa en el pronóstico de los incendios forestales. Así mismo [28], refuerzan de manera clara el principio de que los sistemas de riesgos de incendios deben evaluarse utilizando la relación entre los eventos observados y los previstos, es decir, la validez del índice no solo depende de la construcción teórica, sino de la capacidad de reflejar la dinámica de los incendios en el sitio de evaluación.

Con respecto al área bajo la curva (AUC) puede decirse que los valores obtenidos en este estudio son similares a los reportados por [29] quienes obtuvieron valores entre 0,70 y 0,73 para localidades de la región central del estado de São Paulo, Brasil en su estudio sobre la adaptación de la FMA. Asimismo, estos valores son comparables con los obtenidos en estudios de modelación de ocurrencia de eventos, como el realizado por [30] en plantaciones de *Eucalyptus*, donde la Fórmula de Monte Alegre Modificada y el Índice Logarítmico de

Telicyn presentaron valores de AUC de 0,757 y 0,726, respectivamente, indicando una capacidad predictiva aceptable de los modelos evaluados.

A pesar de la mejora observada en los indicadores de desempeño, los valores de Skill Score obtenidos (0,1154 para FMA+ y 0,0983 para Telicyn) reflejan una capacidad de discriminación aún limitada entre días con y sin incendios. Además, dado que el ajuste y la evaluación se realizaron con la misma base de datos, los resultados deben interpretarse con cautela. En este sentido, futuros estudios deberían considerar la validación de las escalas ajustadas con series independientes para evaluar su capacidad de generalización y robustez operativa.

Desde una perspectiva operativa, la magnitud de los valores de Skill Score no implica que los índices carezcan de utilidad práctica. La ocurrencia de incendios forestales es un fenómeno complejo influenciado no solo por las condiciones meteorológicas, sino también por factores relacionados con la disponibilidad y continuidad de combustibles, actividades humanas, cambios en el uso del suelo y características topográficas. Debido a que los índices FMA+ y Telicyn consideran exclusivamente variables meteorológicas, es esperable que su capacidad predictiva sea limitada cuando se evalúa mediante métricas estrictas de concordancia. En este contexto, los valores de AUC obtenidos (0,727 para FMA+ y 0,703 para Telicyn) indican una capacidad aceptable para discriminar entre condiciones relativamente más y menos favorables para la ocurrencia de incendios, lo que respalda su utilización como herramientas complementarias de alerta temprana y apoyo a la gestión preventiva del fuego.

No obstante, los resultados también evidencian limitaciones que deben ser reconocidas para evitar interpretaciones excesivamente optimistas de la capacidad de los índices. La existencia de incendios registrados en categorías de peligro bajo y la ocurrencia de días clasificados con peligro elevado sin registros de incendios demuestran que una parte importante de la variabilidad del fenómeno no es capturada por los modelos meteorológicos evaluados. Por esta razón, los índices ajustados no deben considerarse herramientas suficientes para sustentar por sí solas decisiones institucionales relacionadas con la movilización de recursos o la respuesta operativa ante emergencias. Su principal utilidad radica en complementar otras fuentes de información, contribuyendo a la priorización de actividades de vigilancia, prevención y monitoreo, dentro de esquemas integrales de gestión del riesgo de incendios forestales.

Conclusiones

El ajuste local de las escalas de peligro de los índices meteorológicos FMA+ y Telicyn, realizado a partir de 173 días con incendios forestales registrados en el cantón Jipijapa durante el período 2020-2025, permitió obtener distribuciones del número de días previstos por clase de peligro más coherentes con los criterios utilizados para la calibración de índices de peligro de incendios forestales. Asimismo, la ocurrencia de incendios mostró una mejor correspondencia con el incremento de las clases de peligro después del ajuste.

Los valores de desempeño obtenidos mediante los indicadores Skill Score (SS) y Porcentaje de Éxito (PE) evidenciaron una mejora respecto a las escalas originales. El índice FMA+ alcanzó valores de SS = 0,1154 y PE = 63,96 %, mientras que el índice Telicyn obtuvo SS = 0,0983 y PE = 65,97 %. Aunque estos valores indican una capacidad predictiva moderada, son consistentes con resultados reportados en estudios previos de ajuste local de índices meteorológicos de peligro de incendios forestales.

Los valores del área bajo la curva (AUC) obtenidos para FMA+ (0,727) y Telicyn (0,703) mostraron una capacidad aceptable de discriminación entre días con y sin ocurrencia de incendios, respaldando la utilidad de ambos índices para la evaluación del peligro de incendios en las condiciones climáticas de Jipijapa.

Los resultados obtenidos respaldan la conveniencia de realizar ajustes locales en los índices meteorológicos de peligro de incendios antes de su aplicación operativa. En este sentido, las escalas ajustadas de los índices FMA+ y Telicyn constituyen herramientas de apoyo para la evaluación del peligro de incendios forestales y la toma de decisiones en el manejo del fuego en el cantón Jipijapa. No obstante, se recomienda realizar estudios adicionales con series temporales más extensas y conjuntos independientes de validación para evaluar la robustez y capacidad de generalización de los índices ajustados. Asimismo, la incorporación de enfoques de modelización más avanzados podría contribuir a mejorar su capacidad predictiva.

Referencias

- [1] M. C. Kossoski, et al., "Climate elements and fire hazard indexes in Santa Catarina," *Floresta*, vol. 54, no. 1, Jan., pp. 1-10, 2024, doi: 10.5380/rf.v54i1.92784
- [2] M. A. Perea Moreira and W. F. García Castro, "Propuesta para la prevención, mitigación y control de incendios forestales," *Rev. Soc. Front.*, vol. 4, no. 1, Feb., pp. 1-14, 2024, doi: 10.59814/resofro.2024.4(1)183

- [3] R. V. Soares, et al., Incêndios florestais: controle, efeito e uso do fogo, Segunda Ed. Curitiba: Gráfica Capital, 2017.
- [4] R. Vélez, "Los índices meteorológicos de peligro," in La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias., Segunda Ed., McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. U., 2009, pp. 151–161.
- [5] A. Holsten, et al., "Evaluation of the performance of meteorological forest fire indices for German Federal States," For. Ecol. Manage., vol. 287, Jan., pp. 123–131, 2013, doi: 10.1016/j.foreco.2012.08.035
- [6] T. R. Corrêa et al., "Índices de perigo de incêndios florestais em cinco municípios com características meteorológicas distintas Forest fire risk indexes in five municipalities with different meteorological characteristics," Nativa, vol. 12, no. 1, pp. 118–123, Mar., 2024.
- [7] C. M. Countryman, "Rating Fire Danger By the Multiple," J. For., vol. 64, no. 8, Augt., pp. 531–536, 1966, doi: 10.1093/jof/64.8.531
- [8] G. P. Telicyn, "Logarithmic index of fire weather danger for forests," Lesn. Khozyaistvo, vol. 11, Nov., 1970.
- [9] R. V. Soares, "Determinação de um Índice de perigo de incêndio para a região centro paranaense, Brasil", Tesis, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza / Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Turrialba, Cartago, Costa Rica. 1972.
- [10] R. S. Nunes, "FMA+ - um novo índice de perigo de incêndios florestais para o estado do Paraná - Brasil", Tesis, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. 2005.
- [11] F. T. P. Torres, G. S. Lima, S. V. Martins, and S. R. Valverde, "Análise da eficiência de índices de perigo na predição de incêndios florestais," Rev. Arvore, vol. 41, no. 2, Dec., pp. 1-10, 2017, doi: 10.1590/1806-90882017000200009
- [12] F. T. P. Torres and G. S. Lima, "Forest fire hazard in the Serra do Brigadeiro State Park (MG)," Floresta e Ambient., vol. 26, no. 2, Apr., pp. 1-9, 2019, doi: 10.1590/2179-8087.030417
- [13] G. J. D. Miranda, et al., "Large Fires and Fire Danger Indices in 'Governador' Indigenous Territory, Maranhão State," Floresta, vol. 52, no. 1, Jan., pp. 83–92, 2022, doi: 10.5380/RF.V52I1.78027
- [14] B. H. Casavecchia, et al., "Fire danger indices in the transition area of Cerrado-Amazonia," Rev. Ciências Agrárias, vol. 42, no. 3, Aug., pp. 842-854, 2019, doi: 10.19084/rca.17756
- [15] C. M. L. Beu, "Avaliação da Fórmula de Monte Alegre modificada aplicada aos dados da Flona de Ipanema, MERRA-2 e produtos de sensoriamento remoto," Rev. Bras. Climatol., vol. 31, Dec., pp. 857–878, 2022, doi: 10.55761/abclima.v31i18.15774
- [16] M. P. Ramos Rodríguez, et al., "Ajuste e desempenho dos índices de perigo de incêndios Nesterov, FMA e FMA+ na Empresa Florestal Macurije, Cuba," Floresta, vol. 42, no. 4, Oct./Dec., pp. 651–660, 2012, doi: 10.5380/rf.v42i4.28659
- [17] A. Shmuel, et al., "Fire weather indices tailored to regional patterns outperform global models," npj Nat. Hazards, vol. 2, no. 1, Jul., pp. 1–9, 2025, doi: 10.1038/s44304-025-00126-y
- [18] A. Mbanze, et al., "Desempenho dos índices de Nesterov e Fórmula de Monte Alegre no Distrito de Lichinga, Norte de Mocambique," Ciência Florestal, vol. 27, no. 2, Apr./Jun., pp. 687–696, 2017, doi: 10.5902/1980509827753
- [19] M. P. Ramos-Rodríguez, et al., "Calibración local de índices meteorológicos de peligro de incendios forestales en Jipijapa, Manabí, Ecuador," Rev. Cuba. Ciencias For., vol. 14, Feb., 2026.
- [20] J. R. S. Nunes, et al., "Desempenho da Fórmula de Monte Alegre (FMA) e da Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+) no distrito florestal de Monte Alegre," Floresta, vol. 40, no. 2, Apr./Jun., pp. 319–326, 2010.
- [21] R. B. L. Cavalcante et al., "Assessment of fire hazard weather indices in the eastern Amazon : a case study for different land uses," Acta Amaz., vol. 51, no. 4, Oct-Dec., pp. 352–362, 2021, doi: 10.1590/1809-4392202101172
- [22] J. R. S. Nunes, R. V. Soares, and A. C. Batista, "Ajuste da Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+) para o estado do Paraná," Floresta, vol. 37, no. 1, Jan./Apr., pp. 1–14, 2007.
- [23] A. F. Tetto, et al., "Comportamento e ajuste da Fórmula de Monte Alegre na Floresta Nacional de Irati, Estado do Paraná, Brazil," Sci. For., vol. 38, no. 87, Sep., pp. 401–417, 2010.
- [24] B. Kovalsyki, et al., "Avaliação da eficiência da Fórmula de Monte Alegre para o município de Ponta Grossa-Pr," Enciclopédia Biosf., vol. 10, no. 19, Dec., pp. 208-218, 2014.
- [25] A. Arpaci, et al., "Selecting the best performing fire weather indices for Austrian ecoregions," Theor.

Appl. Climatol., vol. 114, no. 3–4, Feb., pp. 393–406, 2013, doi: 10.1007/s00704-013-0839-7

- [26] A. D. P. Machado Neto, R. V. Soares, A. C. Batista, D. Biondi, A. Pedro, and R. Borges, “Desempenho do índice de perigo de incêndios FMA no Parque Nacional da Chapada dos Guimarães-MT,” *Nativa*, vol. 6, no. 2, Mar./Apr., pp. 153-158, 2018, doi: 10.31413/nativa.v6i2.4763
- [27] J. Marchesan, et al., “Risco de incêndios na Estação Ecológica do Taim, Rio Grande do Sul,” *Nativa*, vol. 8, no. 1, Feb., pp. 112–117, 2020, doi: 10.31413/nativa.v8i1.8180
- [28] L. Zhang et al., “Construction and assessment of a fire risk index system for typical grasslands in Xinjiang, China,” *Fire Ecol.*, vol. 20, no. 1, Sep., pp. 1-14, 2024, doi: 10.1186/s42408-024-00319-2
- [29] J. F. L. Santos et al., “Adaptation of the Fórmula de Monte Alegre for the danger prediction of forest fires in the central region of São Paulo State,” *Cienc. Florest.*, vol. 31, no. 4, Nov., pp. 1867–1884, 2021, doi: 10.5902/1980509852851
- [30] B. L. A. White, et al., “Development of a Fire Danger Index for Eucalypt Plantations in the Northern Coast of Bahia, Brazil,” *Floresta*, vol. 43, no. 4, Oct./Dec., pp. 601-609, 2013, doi: 10.5380/rf.v43i4.30973