


Predicción del Comportamiento, Clasificación Semántica y Ponderación de Riesgos de Incendios Rurales

Modelo Computacional Predictivo para la gestión en tiempo real de incendios rurales en entornos de vegetación heterogénea — Ecorregión Selva Misionera, Argentina

Carlos Roberto Brys 

Universidad Nacional del Nordeste | Universidad Nacional de Misiones | UTN — Facultad Regional Resistencia
Director: Dr. David Luis La Red Martínez · Codirector: Dr. Marcelo Julio Marinelli

RESUMEN — Se presenta un Modelo Computacional Predictivo del Comportamiento de Incendios Rurales compuesto por cuatro algoritmos integrados: (1) predicción de la Velocidad de Propagación del Fuego (VPF), (2) Escala de Peligrosidad de Incendios (EPI), (3) Índice de Riesgo de Incendios Rurales (IRIR) y (4) Escala Semántica de Riesgo (ERI). El modelo opera en tiempo real mediante consultas a APIs de datos abiertos y lógica difusa, adaptado a la Ecorregión de la Selva Misionera (Misiones, Argentina). Los resultados muestran un error <10% en VPF y superan al FWI canadiense en precisión de clasificación para entornos de vegetación heterogénea.

PALABRAS CLAVE — Riesgo de Incendios Rurales · Algoritmo Computacional · Lógica Difusa · Aprendizaje Automático · Velocidad de Propagación · Datos Abiertos · Modelado Geoespacial · Sistemas en Tiempo Real · Random Forest · Alternativas al FWI

I INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

Los incendios rurales representan una amenaza creciente para la biodiversidad, la infraestructura y la vida humana, agudizada por el cambio climático. En la provincia de Misiones (Argentina), el triple episodio consecutivo de *La Niña* (2019–2022) redujo las precipitaciones hasta un **55%** por debajo de la media anual, incrementando drásticamente el riesgo de incendios en los 29.800 km² de la ecorregión del Bosque Atlántico.

El estándar mundial **Índice Meteorológico de Peligro de Incendios (FWI)**^[1], desarrollado en Canadá en la década de 1970 para bosques boreales homogéneos, presenta limitaciones críticas en entornos rurales heterogéneos: no distingue tipos de combustible, no opera en tiempo real y subestima sistemáticamente el riesgo de ignición en zonas con usos del suelo diversificados.

Hipótesis: El FWI no es adecuado para entornos rurales con vegetación diversa y subestima el riesgo real de ignición. Un modelo computacional adaptado a condiciones locales, que integre datos abiertos en tiempo real y clasificación del uso del suelo, logrará una mayor precisión en la predicción del riesgo.

Área de estudio: Ecorregión Selva Misionera, provincia de Misiones, Argentina. 78 municipios, alta biodiversidad, más del 50% de cobertura forestal, presencia de comunidades aborígenes de la Nación Mbya Guaraní. Todos los incendios registrados son de origen antropogénico y se propagan a nivel del suelo.

La metodología de referencia sigue el estándar de modelado computacional, validada con datos históricos de sensores remotos de FIRMS-NASA y contrastada con el software experto Wildfire Analyst (WFA).

II OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

- 01 Diseñar un **algoritmo VPF** que prediga la velocidad de propagación del fuego a partir de un par de coordenadas GPS, usando APIs de datos abiertos en tiempo real.
- 02 Desarrollar una **Escala de Peligrosidad (EPI)** basada en lógica difusa de proximidad a elementos críticos (hospitales, comunidades aborígenes, escuelas, estaciones de combustible).
- 03 Construir el **Índice IRIR** — alternativa al FWI — basado en la inflamabilidad ponderada por tipo de cobertura del suelo en cada municipio.
- 04 Generar una **Escala Semántica de Riesgo (ERI)** mediante funciones de membresía difusa para la comunicación ciudadana y señalización vial.
- 05 Implementar un **sistema web interactivo** accesible en tiempo real para las autoridades competentes en la toma de decisiones estratégicas.

III PUBLICACIONES (JCR — CLARIVATE)

Q1 · JCR 2024
A Geospatial Model for Real-Time Predicting Rural Fire Propagation Velocity Using Dynamic Algorithms and Open Data for Advanced Emergency Management
Environmental Modelling & Software · ISSN 1364-8152 · Feb. 2025
doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106355

Q2 · JCR 2024
Machine Learning Methods for Wildfire Risk Assessment
Earth Science Informatics · ISSN 1865-0473 · Jan. 2025
doi.org/10.1007/s12145-024-01690-z

Algoritmos, conjuntos de datos y código fuente disponibles en: GitLab — *Ponderación del Riesgo y Predicción del Comportamiento de Incendios Rurales* (acceso abierto, CC BY-SA 4.0).

IV DIAGRAMA DEL PROCESO IRIR

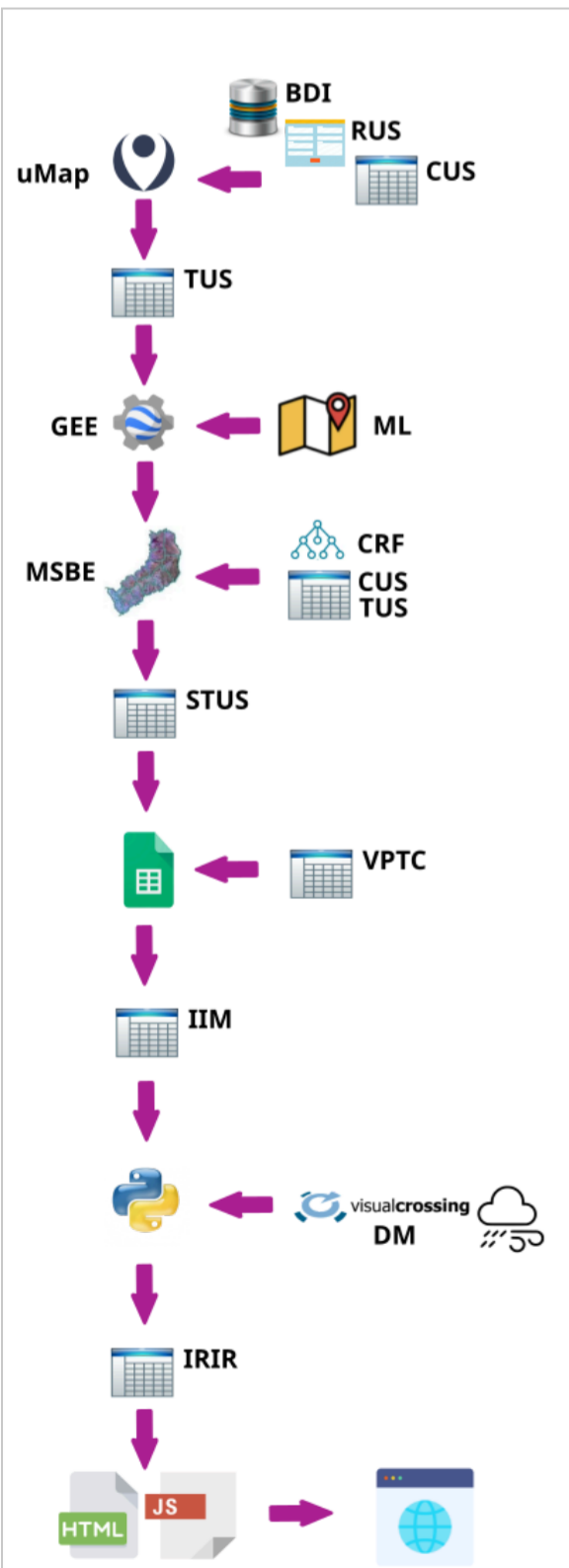
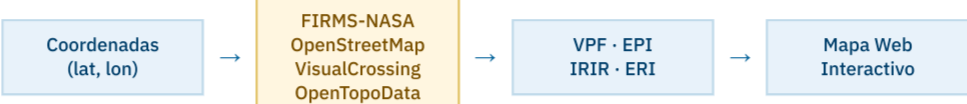


Diagrama del Proceso de Obtención del IRIR y su Visualización en Internet

IV MODELO COMPUTACIONAL PROPUESTO

El modelo integra cuatro algoritmos que operan bajo una arquitectura de flujo de datos unificada. La entrada es un único par de coordenadas GPS; todas las variables necesarias se obtienen en tiempo real a través de APIs de código abierto:



ALGORITMO 1
VPF — Velocidad de Propagación del Fuego
Predice la velocidad del frente de fuego (m/h) combinando tipo de combustible, humedad del suelo, viento, pendiente y hora del día.

ALGORITMO 3
IRIR — Índice de Riesgo de Incendios Rurales
Reemplaza al FWI: calcula el potencial de ignición por municipio a partir de la inflamabilidad del combustible del suelo + clima en tiempo real.

ALGORITMO 2
EPI — Escala de Peligrosidad
Clasifica el peligro de un incendio declarado mediante proximidad difusa a infraestructura crítica en radio de 500–2.000 m.

ALGORITMO 4
ERI — Escala Semántica de Riesgo
Convierte el valor numérico del IRIR en etiquetas lingüísticas (R1–R5) mediante funciones de membresía difusa para la comunicación ciudadana.

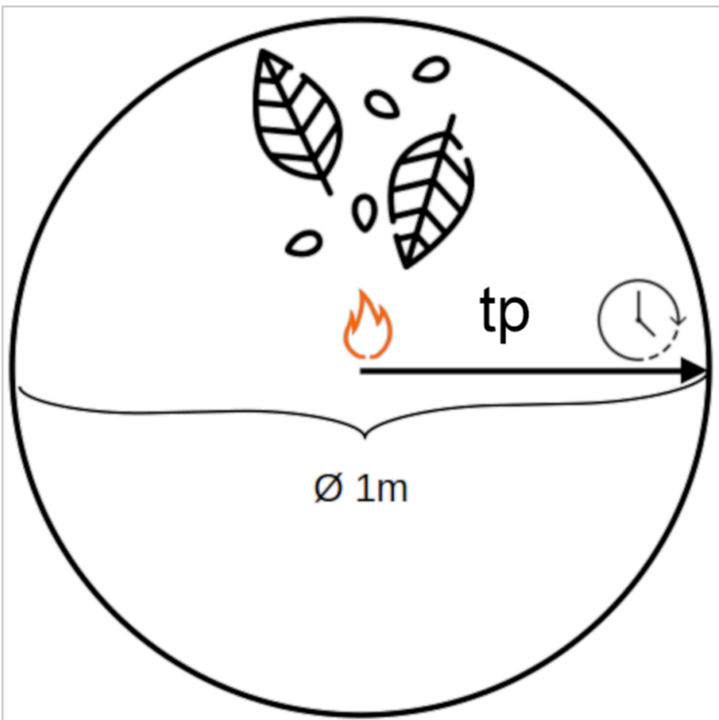
V ALGORITMO VPF — VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DEL FUEGO

$$vpf = vpif \cdot css \cdot fvv \cdot fvap \cdot fhd$$

Cada factor se obtiene o calcula a partir de APIs abiertas en tiempo real

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	RANGO
vpif	Velocidad inicial de propagación según tipo de combustible (m/h)	9,65 – 38,65
css	Factor de sequedad del suelo (días desde última lluvia)	0 – 1
fvv	Factor de velocidad del viento superficial: 10% de vv	0 – ~10
fvap	Factor combinado viento / aspecto / pendiente del terreno	0 – 15
fhd	Factor de radiación solar / hora del día	~0 – 1

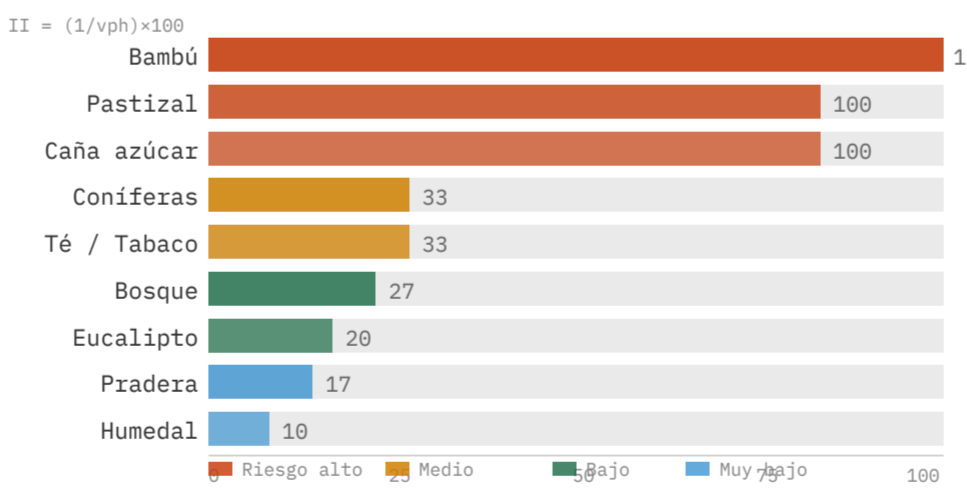
La pendiente se calcula mediante la **fórmula de Haversine** sobre 8 puntos de elevación circundantes (OpenTopoData / NASA SRTM 30 m). El secado del suelo se modela como función sinusoidal calibrada con datos empíricos de evaporación de la Estación Experimental INTA Cerro Azul (2022).



Medición del Tiempo de Combustión (tpp)

VI ÍNDICE DE INFLAMABILIDAD POR TIPO DE COBERTURA DEL SUELO

22 clases de cobertura clasificadas con Random Forest (Sentinel-1/2, Google Earth Engine). Precisión global = **0,87**; coeficiente Kappa = **0,85**.



Índice de Inflamabilidad (II = 1/vph × 100) por tipo de cobertura del suelo. Mayor II = mayor riesgo de ignición.



Velocidad del fuego (tpp) en m/h según Uso del Suelo

VII IRIR — ÍNDICE DE RIESGO DE INCENDIOS RURALES

$$IRIR_m = IIM_m \cdot FHS_m \cdot FT_m \cdot FPH_m \cdot FP02_m \cdot FVV_m$$

m = índice de municipio (1...78); calculado diariamente a las 12:00 h

IIM_m = Índice de Inflamabilidad Municipal = $\Sigma (ID_c \cdot PS_c) \times 10$ · Sumatoria sobre 22 tipos de cobertura del suelo; calculado semestralmente a partir de la clasificación de imágenes satelitales.

FACTOR	DESCRIPCIÓN
FHS	Factor de humedad del suelo (función de deuda hídrica)
FT	Efecto de temperatura sobre inflamabilidad (+50% con T alta)
FPH	Interacción presión atmosférica — humedad relativa
FP02	Disponibilidad de O ₂ según altitud (750–1.020 hPa)
FVV	Velocidad superficial del viento: 1 + (vv × 0,1)

Valor máximo del IRIR = **1.200** (100% pastizal, 7+ días sin lluvia, vientos a 100 km/h). Umbral de escala validado con registros diarios de los 78 municipios.

VIII ERI — ESCALA SEMÁNTICA DE RIESGO (LÓGICA DIFUSA)

R1	R2	R3	R4	R5
Bajo	Moderado	Alto	Muy Alto	Extremo

Membresía difusa: funciones trapezoidales para las categorías extremas (R1, R5) y triangulares para las categorías interiores (R2–R4). Las etiquetas son compatibles con el estándar CFFDRS para garantizar interoperabilidad con otros sistemas.

La **Escala EPI de Peligrosidad** aplica la misma lógica difusa pero evalúa el contexto de un incendio *declarado*: pondera la proximidad a comunidades aborígenes (w=10), hospitales, áreas urbanas, escuelas, reservas naturales, plantas de almacenamiento de gas y tendidos eléctricos de alta tensión en radio de 500–2.000 m, consultados vía API Overpass-turbo.

$$P_i = cat_i + ((w_i - 1) / 9) - 0,5$$
$$P_{max} = \max(P_1, P_2, \dots, P_n)$$

P ≥ 4,5 → Extremo (F5 / Rojo) · P ∈ [3,5; 4,5] → Muy Alto (F4 / Naranja)

IX VALIDACIÓN Y RESULTADOS

<10% Error del modelo VPF frente a datos históricos reales	120 m Margen de error en predicción de desplazamiento a 6 horas
20,7% Casos en que el FWI subestimó el riesgo frente al IRIR	78 Municipios analizados (vs. 17 departamentos del FWI)

Caso de validación — Salto Encantado (01/02/2022): GPS (–26.9491, –54.8313), pendiente 12% (6,84°), aspecto 135° (ESE), viento 8,6 km/h a 148°. VPF calculado: **108,8 m/h**. Wildfire Analyst (WFA, parámetros constantes): 150 m/h. La predicción dinámica a 6 horas del modelo estuvo dentro de los 120 m del desplazamiento real del foco registrado por satélite.

IRIR vs. FWI — Parcelas controladas (mismas condiciones meteorológicas):

PARCELA	COMPOSICIÓN	FWI	IRIR
A	75% coníferas + 25% pastizal	65,94	110,62
B	75% pastizal + 25% coníferas	65,94	138,37

El FWI asigna valores idénticos a ambas parcelas independientemente de la composición del combustible. El IRIR diferencia correctamente el riesgo de ignición según la distribución real de la cobertura. En el 55,6% del total de comparaciones diarias, el FWI subestimó o sobreestimó el valor respecto al IRIR.

X CONCLUSIONES

- ✓ El algoritmo VPF alcanza un error de predicción <10% utilizando únicamente APIs abiertas y un par de coordenadas GPS, sin preprocesamiento experto.
- ✓ El IRIR supera al FWI en entornos de vegetación heterogénea; diferencia el riesgo en 78 municipios frente a los 17 departamentos del FWI.
- ✓ La escala semántica difusa (R1–R5) permite una comunicación ciudadana efectiva e integración con la señalización vial de peligro de incendio.
- ✓ Desplegado como sistema web interactivo de código abierto en *sig.misiones.gov.ar* para las autoridades provinciales en tiempo real.
- ➔ **Trabajo futuro:** integración de aprendizaje profundo (CNN/LSTM), resolución espacial sub-municipal, fusión de datos de redes sociales, análisis de escenarios de cambio climático.

Referencias (selección):

- [1] Rothermel, R.C. (1972). *A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Forest Fuels*. USDA Forest Service.
- [2] Cruz, M.G. & Alexander, M.E. (2019). Simplified 10% rule for fire spread. *Int. J. Wildland Fire*.
- [3] Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353.
- [4] Brys et al. (2025). *Environ. Model. Softw.* doi:10.1016/j.envsoft.2025.106355
- [5] Brys et al. (2025). *Earth Sci. Inform.* doi:10.1007/s12145-024-01690-z



Descarga — Tesis de Doctorado en Informática