

FireRank White Paper

Libro Blanco del Protocolo FireRank

Hacia un estándar internacional para la evaluación inteligente del riesgo de incendios forestales

Versión: 0.1 (Documento Fundacional)

Estado: Borrador de trabajo

Prólogo

Los incendios forestales representan uno de los mayores desafíos ambientales, económicos y sociales del siglo XXI. El aumento de las temperaturas, la modificación de los usos del suelo, el abandono rural y la mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos han incrementado la severidad y complejidad de los incendios en numerosas regiones del mundo.

Aunque existen múltiples herramientas para estimar el peligro meteorológico, cartografiar combustibles o modelizar la propagación del fuego, sigue existiendo una necesidad creciente de disponer de una metodología capaz de integrar toda esta información en un único indicador comprensible, reproducible y útil para la toma de decisiones.

FireRank nace para cubrir esa necesidad.

No es únicamente un software ni un modelo de inteligencia artificial. FireRank es una metodología diseñada para evaluar el riesgo de incendio forestal mediante la integración de información geoespacial, imágenes aéreas, datos ambientales y modelos de aprendizaje automático, manteniendo siempre un principio fundamental: toda decisión debe poder explicarse.

Este documento constituye la primera especificación del **FireRank Protocol**, cuya finalidad es establecer las bases técnicas, científicas y metodológicas para su desarrollo y evolución.

1. Propósito

El propósito de FireRank es proporcionar un estándar abierto y reproducible que permita evaluar el riesgo de incendio de cualquier territorio utilizando un procedimiento homogéneo, independientemente del origen de los datos.

FireRank persigue cinco objetivos principales:

- Cuantificar el riesgo mediante una puntuación única de 0 a 100.
 - Explicar de forma transparente cómo se obtiene esa puntuación.
 - Priorizar actuaciones preventivas según su impacto esperado.
 - Mejorar continuamente mediante aprendizaje automático validado.
 - Facilitar la comparación objetiva entre territorios y periodos temporales.
-

2. Filosofía

FireRank se fundamenta en una idea sencilla:

No basta con saber dónde existe riesgo; es necesario comprender por qué existe, cuánto puede reducirse y con qué grado de confianza se está evaluando.

Por ello, cada análisis generado por FireRank responde siempre a cinco preguntas:

1. ¿Cuál es el nivel de riesgo?
 2. ¿Qué factores lo explican?
 3. ¿Qué consecuencias tendría un incendio?
 4. ¿Qué actuaciones reducirían el riesgo?
 5. ¿Cuál sería la mejora estimada tras aplicarlas?
-

3. Principios rectores

El protocolo se basa en siete principios:

Objetividad

Solo se utilizan datos observados o inferidos con fundamento técnico.

Explicabilidad

Toda puntuación debe ser justificable.

Reproducibilidad

El mismo conjunto de datos produce siempre el mismo resultado.

Escalabilidad

La metodología es válida desde una hectárea hasta un municipio completo.

Neutralidad tecnológica

FireRank puede integrar información procedente de cualquier plataforma o sensor compatible.

Aprendizaje continuo

El modelo evoluciona mediante validación científica y aprendizaje automático, manteniendo la trazabilidad entre versiones.

Utilidad práctica

Cada informe debe facilitar decisiones concretas y priorizadas.

4. Alcance inicial

La primera versión del protocolo se desarrollará y validará en la Península Ibérica.

La validación piloto se realizará en la comarca de La Vera (Cáceres), por reunir una elevada diversidad de masas forestales, usos del suelo, pendientes y antecedentes de incendios.

La expansión a otras regiones requerirá un proceso específico de recalibración y validación para garantizar que el protocolo mantiene su capacidad predictiva en ecosistemas diferentes.

5. La visión a largo plazo

La ambición de FireRank no es convertirse únicamente en una herramienta de análisis.

Su objetivo es consolidarse como un lenguaje común para describir el riesgo de incendio forestal.

Del mismo modo que el índice UV permite comunicar el riesgo asociado a la radiación solar o las escalas sísmicas permiten comparar terremotos ocurridos en cualquier parte del mundo, FireRank aspira a proporcionar una referencia única, objetiva y comprensible para evaluar el riesgo de incendios forestales.

Ese objetivo solo será alcanzable mediante una metodología transparente, una validación científica rigurosa y una mejora continua basada en evidencia.

El presente Libro Blanco constituye el primer paso hacia esa meta.

Capítulo 1. Visión, misión y fundamentos

1.1 Introducción

Los incendios forestales constituyen uno de los mayores retos ambientales, económicos y sociales del siglo XXI. El aumento de las temperaturas, la prolongación de los periodos de sequía, el abandono de los usos tradicionales del territorio y la creciente interfaz urbano-forestal han incrementado tanto la frecuencia como la intensidad de los grandes incendios en numerosas regiones del planeta.

En este contexto, la prevención adquiere un papel estratégico. La capacidad para identificar, priorizar y reducir el riesgo antes de que se produzca un incendio resulta más eficiente, sostenible y rentable que actuar exclusivamente durante la emergencia.

Sin embargo, la evaluación del riesgo continúa dependiendo en muchos casos de metodologías heterogéneas, criterios subjetivos o herramientas centradas únicamente en variables parciales, como la meteorología, el combustible o la topografía.

FireRank nace con la vocación de integrar estas dimensiones en un único marco metodológico, proporcionando un índice objetivo, explicable y reproducible que facilite la toma de decisiones en materia de prevención y gestión del territorio.

No pretende sustituir el criterio profesional de ingenieros forestales, técnicos de prevención o servicios de extinción, sino aportar una herramienta de apoyo basada en evidencia, capaz de sintetizar grandes volúmenes de información geoespacial y transformarlos en conocimiento útil y accionable.

1.2 ¿Qué es FireRank?

FireRank es un protocolo metodológico para la evaluación inteligente del riesgo de incendios forestales.

Su finalidad es analizar un territorio mediante la integración de imágenes aéreas, información geográfica, variables ambientales y modelos de inteligencia artificial para

obtener una valoración cuantitativa del riesgo expresada mediante un índice normalizado de 0 a 100.

Más allá de una simple puntuación, FireRank proporciona una explicación detallada de los factores que influyen en el resultado, identifica las actuaciones con mayor capacidad para reducir el riesgo y estima el impacto potencial de dichas actuaciones.

FireRank constituye un sistema abierto, escalable y evolutivo. Su arquitectura permite incorporar nuevas fuentes de información, mejorar continuamente sus modelos predictivos y adaptarse a distintos ecosistemas sin alterar los principios fundamentales del protocolo.

1.3 Una nueva forma de entender el riesgo

Tradicionalmente, el riesgo de incendio se ha representado mediante mapas cualitativos o clasificaciones discretas que identifican zonas con mayor o menor peligrosidad.

Aunque estas herramientas resultan útiles, presentan limitaciones cuando se requiere comparar territorios, justificar inversiones o priorizar actuaciones preventivas.

FireRank propone un cambio de paradigma.

En lugar de limitarse a clasificar el territorio, evalúa el riesgo como un fenómeno dinámico, multifactorial y cuantificable.

Cada análisis combina múltiples dimensiones del territorio para generar un resultado único, transparente y comparable.

Este enfoque permite responder no solo a la pregunta de dónde existe riesgo, sino también a cuestiones fundamentales como:

- ¿Qué factores generan ese riesgo?
 - ¿Qué variables tienen mayor influencia?
 - ¿Qué actuaciones producirían la mayor reducción?
 - ¿Con qué grado de confianza puede interpretarse el resultado?
-

1.4 Visión

La visión de FireRank es convertirse en el estándar internacional de referencia para la evaluación preventiva del riesgo de incendios forestales.

Un estándar que permita que una administración pública, una empresa forestal, una aseguradora, un propietario o un investigador interpreten una puntuación FireRank con el mismo significado, independientemente del lugar donde se haya generado.

Del mismo modo que los índices de calidad del aire, radiación ultravioleta o eficiencia energética han establecido un lenguaje común para comunicar riesgos complejos, FireRank aspira a convertirse en el lenguaje universal para describir el riesgo de incendio forestal.

Esta visión implica desarrollar una metodología científicamente sólida, técnicamente transparente y suficientemente flexible para evolucionar conforme avancen el conocimiento científico y las capacidades de la inteligencia artificial.

1.5 Misión

La misión de FireRank consiste en facilitar decisiones preventivas más eficaces mediante la generación de análisis objetivos, explicables y reproducibles del riesgo de incendio forestal.

Para ello, FireRank persigue cinco metas permanentes:

- Evaluar cualquier territorio utilizando un procedimiento homogéneo.
 - Integrar automáticamente múltiples fuentes de información espacial y ambiental.
 - Priorizar actuaciones según su impacto esperado sobre la reducción del riesgo.
 - Aprender continuamente a partir de datos reales y procesos de validación científica.
 - Democratizar el acceso a herramientas avanzadas de análisis del riesgo mediante una plataforma comprensible para perfiles técnicos y no técnicos.
-

1.6 Valores del protocolo

El desarrollo de FireRank se fundamenta en un conjunto de principios que deben mantenerse independientemente de la evolución tecnológica del sistema.

Rigor científico

Las metodologías empleadas deberán apoyarse en conocimiento técnico contrastado y procesos de validación continuos.

Transparencia

Toda puntuación deberá poder justificarse mediante las variables que la han originado.

Prudencia

Cuando la información disponible resulte insuficiente, FireRank indicará expresamente las limitaciones del análisis y reducirá el nivel de confianza asociado al resultado.

Neutralidad

El protocolo no favorecerá una tecnología, proveedor o fuente de datos concreta. Cualquier información que cumpla los requisitos de calidad podrá incorporarse al análisis.

Evolución continua

El modelo mejorará mediante aprendizaje automático, pero siempre preservando la trazabilidad entre versiones y la comparabilidad histórica de los resultados.

1.7 Los cinco pilares de FireRank

El protocolo se articula sobre cinco componentes inseparables.

FireRank Score

Representa el nivel global de riesgo mediante una escala continua de 0 a 100.

FireRank Confidence Index

Indica el grado de confianza asociado al análisis considerando la calidad, actualidad y completitud de la información utilizada.

FireRank Explain

Describe las variables que han influido en el resultado y cuantifica su contribución relativa.

FireRank Action Plan

Propone actuaciones preventivas ordenadas según su impacto esperado sobre la reducción del riesgo.

FireRank Delta

Estima la variación del índice FireRank tras la aplicación de las medidas recomendadas, permitiendo evaluar el beneficio potencial de cada intervención.

1.8 Alcance de la primera versión

La primera implementación del protocolo se desarrollará para la Península Ibérica.

La calibración inicial se realizará utilizando información procedente de la comarca de La Vera (Cáceres), seleccionada como territorio piloto por su diversidad de ecosistemas, condiciones topográficas, usos del suelo y antecedentes de incendios forestales.

Esta fase permitirá validar el comportamiento del modelo antes de su extensión progresiva al resto de la Península Ibérica y, posteriormente, a otros contextos biogeográficos mediante procesos específicos de adaptación y validación.

1.9 Declaración fundacional

FireRank nace con una convicción clara:

La prevención de los incendios forestales debe apoyarse en conocimiento verificable, decisiones explicables y herramientas que permitan actuar antes de que el incendio se produzca.

La inteligencia artificial representa una oportunidad extraordinaria para comprender el territorio con un nivel de detalle sin precedentes. Sin embargo, su verdadero valor no reside únicamente en su capacidad para analizar grandes volúmenes de datos, sino en transformar ese análisis en decisiones útiles, comprensibles y fundamentadas.

FireRank aspira a convertirse en ese puente entre la información y la acción.

Más que un algoritmo, FireRank es un compromiso con una gestión forestal preventiva basada en evidencia, transparencia y mejora continua. Su éxito no se medirá únicamente por la precisión de sus modelos, sino por su capacidad para ayudar a proteger los bosques, reducir el impacto de los incendios y contribuir a un territorio más resiliente frente a uno de los mayores desafíos ambientales de nuestro tiempo.

Capítulo 2

Estado del arte de la evaluación del riesgo de incendios forestales

2.1 Introducción

La evaluación del riesgo de incendios forestales ha experimentado una evolución significativa durante las últimas décadas gracias al desarrollo de la teledetección, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la modelización del comportamiento del fuego y la disponibilidad de imágenes satelitales de alta resolución.

Actualmente existen numerosas metodologías capaces de estimar diferentes componentes del riesgo. Sin embargo, la mayoría de ellas fueron desarrolladas para resolver problemas específicos y no como un sistema integral de evaluación preventiva.

Algunas metodologías estiman el peligro meteorológico diario, otras caracterizan el combustible forestal, otras modelizan la propagación del fuego y otras apoyan la planificación de la extinción.

FireRank parte del reconocimiento de todas estas aportaciones y propone integrarlas dentro de un único protocolo explicable y orientado a la toma de decisiones.

2.2 Comprender el concepto de riesgo

Uno de los principales problemas detectados en la literatura técnica es el uso indistinto de términos como:

- peligro
- riesgo
- vulnerabilidad
- amenaza
- exposición
- severidad

Aunque relacionados, representan conceptos diferentes.

En FireRank se establece la siguiente diferenciación:

Peligro (Hazard)

Probabilidad de que existan condiciones favorables para la ignición y propagación del fuego.

Exposición (Exposure)

Presencia de personas, infraestructuras, valores ambientales o recursos susceptibles de verse afectados.

Vulnerabilidad (Vulnerability)

Capacidad de esos elementos para sufrir daños.

Capacidad de respuesta (Response Capacity)

Facilidad para detectar, acceder y extinguir un incendio.

Riesgo (Risk)

Resultado de la interacción dinámica entre todos los factores anteriores.

Esta definición constituye uno de los principios fundamentales del protocolo FireRank.

2.3 Métodos tradicionales

Históricamente la evaluación del riesgo ha seguido cuatro grandes aproximaciones.

Índices meteorológicos

Evalúan el efecto de la temperatura, humedad, precipitación y viento sobre la probabilidad de incendio.

Son esenciales para la predicción diaria.

Sin embargo:

No consideran el estado real del combustible.

No incorporan información territorial.

No evalúan accesibilidad.

No consideran infraestructuras.

No permiten priorizar actuaciones selvícolas.

Inventarios forestales

Analizan:

- especies
- densidad
- edad
- estructura

Su principal ventaja es el detalle.

Su principal limitación es que suelen actualizarse con poca frecuencia.

Cartografía temática

Los Sistemas de Información Geográfica permiten combinar múltiples capas:

pendiente

orientación

hidrografía

vegetación

infraestructuras

suelos

usos del territorio

Aunque constituyen una herramienta extraordinaria, requieren normalmente un elevado conocimiento técnico para su interpretación.

Modelos de propagación

Permiten simular cómo evolucionaría un incendio bajo determinadas condiciones.

Representan una de las áreas más avanzadas de la ingeniería forestal.

No obstante, requieren un elevado número de parámetros y no están diseñados para proporcionar un índice único y fácilmente interpretable para cualquier usuario.

2.4 La revolución de la teledetección

Durante la última década la disponibilidad de información geoespacial ha crecido de forma extraordinaria.

Actualmente es posible disponer de:

ortofotos de alta resolución

satélites multiespectrales

LiDAR

modelos digitales del terreno

sensores térmicos

imágenes procedentes de drones

datos climáticos casi en tiempo real

Esta revolución ha permitido conocer el territorio con un nivel de detalle impensable hace pocos años.

Sin embargo, disponer de datos no implica disponer de conocimiento.

La dificultad ya no consiste en obtener información, sino en integrarla de forma coherente y útil.

2.5 Inteligencia Artificial aplicada a incendios

La inteligencia artificial ha comenzado a utilizarse en múltiples ámbitos relacionados con los incendios forestales.

Entre ellos destacan:

detección automática de humo

segmentación de vegetación

clasificación de combustibles

predicción meteorológica

estimación de humedad

detección de cambios

clasificación de imágenes

Aunque estos avances son extraordinarios, presentan una limitación común.

La mayoría resuelven tareas concretas.

FireRank propone una aproximación diferente.

Utilizar la inteligencia artificial como un motor de integración capaz de sintetizar múltiples fuentes de información dentro de un protocolo metodológico único.

2.6 Problemas identificados

Tras analizar las metodologías existentes se identifican varias limitaciones recurrentes.

Fragmentación

Cada herramienta resuelve únicamente una parte del problema.

Escasa explicabilidad

Muchos modelos modernos generan resultados difíciles de interpretar.

Dependencia del experto

La interpretación final continúa dependiendo en gran medida del conocimiento individual del técnico.

Dificultad de comparación

Dos territorios analizados mediante metodologías distintas no siempre son comparables.

Escasa orientación a la prevención

La mayoría de herramientas describen el problema, pero pocas cuantifican el efecto esperado de las actuaciones preventivas.

2.7 El espacio que ocupa FireRank

FireRank no pretende sustituir las metodologías existentes.

Su objetivo es actuar como una capa superior de integración.

Mientras otras herramientas responden preguntas específicas, FireRank sintetiza la información disponible para responder una pregunta más amplia:

¿Cuál es el nivel global de riesgo de este territorio y qué actuaciones reducirían ese riesgo de la forma más eficiente?

FireRank integra:

datos geográficos

teledetección

conocimiento forestal

modelos físicos

aprendizaje automático

criterio experto

explicabilidad

priorización de actuaciones

2.8 Diferencias respecto a otros enfoques

FireRank introduce varios elementos diferenciales.

No produce únicamente mapas.

Produce decisiones.

No calcula únicamente riesgo.

Calcula también incertidumbre.

No analiza únicamente combustible.

Analiza el territorio completo.

No genera únicamente un diagnóstico.

Propone un tratamiento priorizado.

No funciona como una caja negra.

Explica cada resultado.

No permanece estático.

Aprende continuamente mediante validación.

2.9 Una nueva generación de herramientas

La próxima generación de sistemas de evaluación del riesgo no estará definida únicamente por algoritmos más complejos.

Su verdadero valor residirá en su capacidad para combinar rigor científico, transparencia, escalabilidad y utilidad operativa.

FireRank se sitúa dentro de esta nueva generación.

Su objetivo no consiste únicamente en aprovechar la inteligencia artificial, sino en construir un protocolo capaz de transformar grandes volúmenes de datos heterogéneos en decisiones objetivas, comparables y fácilmente interpretables.

Desde esta perspectiva, la inteligencia artificial deja de ser el producto y pasa a convertirse en una herramienta al servicio de una metodología científica estable, abierta y en permanente evolución.

Capítulo 3

Arquitectura del Protocolo FireRank

3.1 Introducción

El protocolo FireRank ha sido diseñado como una arquitectura modular, escalable y evolutiva para la evaluación inteligente del riesgo de incendios forestales.

Su objetivo no es únicamente generar una puntuación de riesgo, sino transformar información heterogénea procedente de múltiples fuentes en conocimiento útil para la toma de decisiones.

La arquitectura desacopla el protocolo metodológico del motor de inteligencia artificial, garantizando que la evolución tecnológica no comprometa la estabilidad, trazabilidad ni comparabilidad del estándar.

Cada módulo puede evolucionar de manera independiente, siempre que respete las especificaciones definidas por el FireRank Protocol.

3.2 Arquitectura general

El protocolo se estructura en ocho capas funcionales.

Capa 1 — Adquisición de datos

Recepción y normalización de toda la información disponible.



Capa 2 — Control de calidad

Evaluación automática de la calidad y completitud de los datos.



Capa 3 — Extracción de variables

Identificación automática de variables observables.



Capa 4 — Motor FireRank

Integración de variables mediante el modelo híbrido.



Capa 5 — Motor de explicabilidad

Generación de las causas que justifican el resultado.



Capa 6 — Simulador preventivo

Estimación del impacto de posibles actuaciones.



Capa 7 — Generación de informes

Producción automática de mapas, informes y archivos GIS.



Capa 8 — Aprendizaje continuo

Retroalimentación del modelo mediante validaciones reales.

3.3 Capa 1 — Adquisición de datos

FireRank acepta cualquier fuente de información geoespacial compatible.

Entre ellas:

- ortofotos
- drones RGB
- multiespectral
- hiperespectral
- imágenes térmicas
- LiDAR
- Sentinel
- Copernicus
- PNOA
- SAN3
- MDT
- cartografía forestal
- Catastro
- OpenStreetMap
- inventarios forestales
- datos meteorológicos
- sensores IoT

Todas las fuentes son convertidas a un modelo interno común.

El protocolo nunca depende de un proveedor concreto.

3.4 Capa 2 — Control de calidad

Antes de iniciar cualquier análisis, FireRank evalúa automáticamente la calidad de la información recibida.

Se analizan aspectos como:

- resolución espacial
- resolución espectral
- resolución temporal
- antigüedad
- nubosidad
- sombras
- desenfoque
- porcentaje cubierto
- precisión geométrica
- consistencia entre capas

El resultado es un informe interno de calidad que alimenta posteriormente el FireRank Confidence Index.

3.5 Capa 3 — Extracción automática de variables

Esta capa constituye el primer nivel de inteligencia.

Su función consiste en convertir imágenes y datos geográficos en variables cuantificables.

Ejemplos:

Vegetación

- continuidad horizontal
- continuidad vertical
- densidad
- cobertura
- altura estimada
- mosaico forestal
- discontinuidades

Topografía

- pendiente
- orientación
- curvatura
- elevación

Infraestructuras

- caminos
- viviendas
- depósitos
- líneas eléctricas
- puntos de agua

Accesibilidad

- distancia a pistas
- radios de giro
- accesibilidad para autobombas

Variables ambientales

- humedad
- viento
- temperatura
- sequía

Cada variable incorpora:

- valor
- origen
- precisión
- nivel de confianza
- fecha de obtención

3.6 Capa 4 — Motor FireRank

Esta constituye la capa central del protocolo.

Su misión consiste en transformar cientos de variables en un único índice FireRank Score.

Durante las primeras versiones utilizará un modelo híbrido compuesto por:

- conocimiento experto
- reglas metodológicas
- aprendizaje automático

Conforme aumente el número de casos validados, el aprendizaje automático asumirá progresivamente un mayor protagonismo.

El protocolo permanecerá estable.

Únicamente evolucionará el motor interno.

3.7 Capa 5 — Motor de explicabilidad

Una puntuación sin explicación carece de valor operativo.

Por ello, FireRank genera automáticamente una explicación estructurada.

Cada informe identifica:

Variables que aumentan el riesgo.

Variables que reducen el riesgo.

Importancia relativa.

Nivel de evidencia.

Limitaciones del análisis.

La explicación debe ser comprensible tanto para un ingeniero forestal como para un propietario.

3.8 Capa 6 — Simulador preventivo

Este módulo constituye uno de los principales elementos diferenciales del protocolo.

No se limita a describir el riesgo.

Simula cómo cambiaría el FireRank Score tras aplicar actuaciones preventivas.

Ejemplos:

desbroces

podas

franjas auxiliares

nuevos caminos

depósitos de agua

tratamientos selvícolas

cada actuación genera:

reducción estimada

nivel de confianza

prioridad

coste relativo

beneficio esperado

3.9 Capa 7 — Generación de productos

FireRank transforma automáticamente el análisis en diferentes formatos.

Entre ellos:

PDF técnico.

Informe ejecutivo.

GeoJSON.

SHP.

Capas GIS.

API.

Panel web.

Mapa interactivo.

Ficha resumida.

Todos los formatos comparten exactamente la misma información.

Únicamente cambia su representación.

3.10 Capa 8 — Aprendizaje continuo

Cada análisis validado alimenta el sistema.

El protocolo registra:

predicción inicial

actuaciones realizadas

evolución del territorio

incendios posteriores

comportamiento real

Este conocimiento se incorpora al entrenamiento de futuras versiones del modelo.

Nunca modifica retrospectivamente análisis anteriores.

3.11 Arquitectura desacoplada

Uno de los principios fundamentales del protocolo consiste en separar claramente:

FireRank Protocol

de

FireRank AI Engine

El protocolo define:

qué debe calcularse

cómo debe explicarse

cómo debe validarse

cómo debe documentarse

La IA decide únicamente cómo aprender a calcularlo.

Esta separación garantiza que futuras tecnologías puedan sustituir completamente al motor de IA sin alterar el estándar FireRank.

3.12 Escalabilidad

La arquitectura ha sido diseñada para crecer durante las próximas décadas.

Podrá incorporar:

nuevos sensores

nuevos satélites

nuevos modelos climáticos

nuevas variables

nuevas técnicas de IA

nuevos países

nuevos ecosistemas

sin modificar la estructura del protocolo.

Esta capacidad de evolución constituye uno de los pilares estratégicos de FireRank.

3.13 Arquitectura orientada a la confianza

El objetivo último del protocolo no es únicamente generar predicciones precisas.

Su propósito es generar confianza.

Cada decisión tomada por FireRank debe ser:

objetiva

explicable

auditable

reproducibile

trazable

validable

La confianza no se obtiene mediante algoritmos más complejos, sino mediante un proceso metodológico sólido, transparente y sometido a mejora continua.

Por este motivo, la arquitectura de FireRank ha sido concebida como un sistema abierto, modular y científicamente verificable, preparado para evolucionar junto con el conocimiento forestal y la inteligencia artificial sin perder la coherencia del estándar.

Capítulo 4

Modelo de Variables FireRank (FVM – FireRank Variable Model)

4.1 Introducción

El **FireRank Variable Model (FVM)** constituye el núcleo semántico del protocolo FireRank.

Su objetivo es definir, clasificar y normalizar todas las variables que pueden influir en el riesgo de incendio forestal, garantizando que cualquier análisis realizado mediante FireRank utilice un lenguaje común, independientemente de la fuente de datos, el territorio analizado o la tecnología empleada.

El FVM no define únicamente una lista de variables. Define una estructura de conocimiento sobre el territorio que permite integrar información heterogénea en un modelo coherente, explicable y evolutivo.

Cada variable del modelo posee una definición única, una unidad de medida cuando procede, una fuente de obtención, un nivel de confianza y un mecanismo de validación.

4.2 Filosofía del modelo

FireRank parte de un principio fundamental:

No analiza imágenes. Analiza territorios.

Las imágenes son únicamente una fuente de información.

El objeto de estudio siempre es el territorio.

Por ello, todas las variables describen características físicas, biológicas, ambientales o funcionales del terreno, nunca características propias de la fotografía.

4.3 Clasificación general

Las variables FireRank se agrupan inicialmente en doce grandes familias.

Código	Familia	Descripción
FV	Vegetación	Características del combustible vegetal
FT	Topografía	Relieve y morfología
FM	Meteorología	Variables atmosféricas
FH	Hidrología	Agua superficial y disponibilidad
FI	Infraestructuras	Elementos construidos
FA	Accesibilidad	Facilidad de acceso para extinción
FU	Usos del suelo	Actividad humana
FR	Historial	Incendios y tratamientos previos
FC	Calidad de datos	Calidad del análisis
FE	Exposición	Personas y bienes
FVU	Vulnerabilidad	Fragilidad del territorio
FD	Dinámica	Variables temporales

Cada familia contiene decenas de variables individuales.

4.4 Estructura de una variable

Todas las variables del protocolo siguen la misma estructura.

Ejemplo:

Código

FV-017

Nombre

Continuidad horizontal del combustible

Descripción

Grado de conexión lateral entre masas combustibles.

Unidad

%

Método de obtención

IA + ortofoto + validación topológica.

Nivel de confianza

0–100

Fecha

Automática.

Actualización

Cada nuevo análisis.

Importancia

Aprendida por el modelo.

4.5 Variables de vegetación (FV)

La vegetación constituye uno de los pilares del protocolo.

Inicialmente se definen las siguientes categorías.

Estructura

- altura media
- altura máxima
- estratificación

- continuidad vertical
- continuidad horizontal
- densidad

Cobertura

- porcentaje arbóreo
- porcentaje arbustivo
- porcentaje herbáceo
- suelo desnudo
- roca
- cultivos

Estado

- vigor
- estrés hídrico
- mortalidad
- regeneración

Combustible

- combustible fino
- combustible grueso
- carga estimada
- distribución
- acumulación

Gestión

- podas
- clareos
- desbroces
- tratamientos recientes

4.6 Variables topográficas (FT)

El relieve condiciona de forma decisiva la propagación del fuego.

Variables iniciales:

pendiente

orientación

elevación

curvatura

rugosidad

posición topográfica

crestas

vaguadas

barrancos

divisorias

4.7 Variables meteorológicas (FM)

Aunque FireRank es un protocolo preventivo, incorpora variables atmosféricas cuando están disponibles.

temperatura

humedad relativa

velocidad del viento

dirección del viento

precipitación acumulada

días sin lluvia

sequía

olas de calor

estabilidad atmosférica

4.8 Variables hidrológicas (FH)

disponibilidad de agua

ríos

arroyos

embalses

depósitos

hidrantes

charcas

humedad del suelo

proximidad a recursos hídricos

4.9 Infraestructuras (FI)

viviendas

urbanizaciones

industrias

líneas eléctricas

subestaciones

carreteras

pistas forestales

ferrocarril

instalaciones críticas

parques fotovoltaicos

parques eólicos

4.10 Accesibilidad (FA)

Una de las familias más importantes para los servicios de extinción.

anchura de caminos
pendiente de acceso
estado del firme
radio de giro
zonas de maniobra
distancia a pistas
tiempo estimado de llegada
accesibilidad para autobombas
accesibilidad aérea

4.11 Exposición (FE)

personas
viviendas
infraestructuras críticas
valor económico
valor ecológico
espacios protegidos
patrimonio histórico
equipamientos estratégicos

4.12 Vulnerabilidad (FVU)

resistencia de las edificaciones
materiales combustibles
continuidad urbano-forestal

protección perimetral

franjas auxiliares

capacidad de evacuación

4.13 Historial (FR)

incendios anteriores

fecha

superficie afectada

causa

intensidad

tratamientos posteriores

reincidencia

4.14 Calidad del dato (FC)

Esta familia alimenta directamente el FireRank Confidence Index.

Incluye:

resolución espacial

resolución temporal

resolución espectral

cobertura

sombras

nubosidad

ruido

precisión geométrica

consistencia

completitud

actualidad

4.15 Variables dinámicas (FD)

Estas variables evolucionan continuamente.

crecimiento de la vegetación

abandono agrícola

expansión urbana

variación climática

tratamientos forestales

nuevas infraestructuras

cambios de uso

4.16 Metadatos

Cada variable almacenará obligatoriamente:

identificador único

fecha

fuentes

método de cálculo

nivel de confianza

versión del algoritmo

precisión estimada

observaciones

Esto permitirá reconstruir cualquier análisis realizado años atrás.

4.17 Aprendizaje automático

El protocolo **no asigna pesos fijos** a las variables.

Cada una de ellas aprenderá progresivamente su influencia sobre el FireRank Score mediante entrenamiento con incendios reales, validaciones de campo y revisión por expertos.

El protocolo define las variables.

La inteligencia artificial aprende su importancia relativa.

Esta separación garantiza que el conocimiento científico acumulado permanezca estable mientras evolucionan los modelos predictivos.

4.18 Evolución del modelo

El FireRank Variable Model ha sido diseñado como una ontología abierta.

Las futuras versiones podrán incorporar nuevas variables sin romper la compatibilidad con versiones anteriores.

Toda nueva variable deberá cumplir cinco requisitos:

1. Definición inequívoca.
 2. Método de obtención documentado.
 3. Unidad de medida o escala normalizada.
 4. Criterio de validación.
 5. Justificación científica o técnica para su incorporación.
-

4.19 Hacia un lenguaje universal del riesgo

El objetivo último del FireRank Variable Model no es únicamente mejorar la precisión del algoritmo.

Su verdadera finalidad es crear un lenguaje común para describir el territorio desde la perspectiva del riesgo de incendio.

Cuando un técnico en Cáceres, un investigador en Portugal o un gestor forestal en Grecia utilicen el código **FV-017**, deberán estar describiendo exactamente el mismo fenómeno.

Ese lenguaje común constituye uno de los pilares estratégicos del protocolo FireRank y permitirá que la metodología evolucione durante décadas sin perder coherencia, trazabilidad ni capacidad de comparación entre territorios.

Capítulo 5

El Motor de Inteligencia FireRank (FireRank Intelligence Engine)

5.1 Introducción

El FireRank Intelligence Engine (FRIE) es el componente encargado de transformar la información del territorio en conocimiento operativo.

Su función no consiste únicamente en calcular una puntuación de riesgo, sino en interpretar el territorio de forma similar a como lo haría un equipo multidisciplinar formado por ingenieros forestales, analistas geoespaciales, especialistas en incendios y científicos de datos.

El diseño del FRIE parte de un principio fundamental:

Ningún modelo único puede representar adecuadamente toda la complejidad de un incendio forestal.

Por ello, FireRank adopta una arquitectura distribuida basada en múltiples motores especializados.

5.2 Filosofía del motor

Los incendios forestales son fenómenos complejos.

No dependen exclusivamente del combustible.

Ni exclusivamente del viento.

Ni únicamente de la pendiente.

Surgen de la interacción simultánea de numerosos factores.

Por este motivo, FireRank evita concentrar toda la inteligencia en un único algoritmo.

En su lugar, divide el problema en dominios de conocimiento independientes que posteriormente son integrados mediante un mecanismo de consenso.

Este enfoque mejora:

- la explicabilidad
 - la estabilidad
 - la capacidad de auditoría
 - la evolución futura
-

5.3 Arquitectura distribuida

El FireRank Intelligence Engine está compuesto por varios motores especializados.

Cada uno analiza un aspecto concreto del territorio.

Todos utilizan la misma base de datos de variables, pero generan evaluaciones independientes.

Posteriormente, una capa superior integra sus resultados.

5.4 FireVision

Especialización:

Interpretación visual.

Funciones:

- segmentación del terreno
- identificación de vegetación
- detección de infraestructuras
- clasificación de coberturas

- detección de cambios
- reconocimiento de elementos relevantes

Entradas:

ortofotos

drones

satélites

LiDAR

Salida:

Variables observadas.

Nunca genera directamente el FireRank Score.

5.5 FireFuel

Especialización:

Modelo de combustible.

Analiza:

continuidad horizontal

continuidad vertical

densidad

estratificación

combustible fino

combustible grueso

acumulaciones

Su misión consiste en estimar la capacidad potencial de propagación.

5.6 FireTerrain

Especialización:

Relieve.

Analiza:

pendiente

orientación

barrancos

crestas

curvaturas

elevación

accesibilidad topográfica

Estima cómo influye el terreno sobre el comportamiento potencial del fuego.

5.7 FireClimate

Especialización:

Condiciones ambientales.

Integra:

temperatura

humedad

viento

precipitación

sequía

olas de calor

No predice el tiempo.

Interpreta cómo afectan las condiciones meteorológicas al territorio analizado.

5.8 FireAccess

Especialización:

Capacidad de respuesta.

Evalúa:

red viaria

anchura

radios de giro

depósitos

hidrantes

tiempos de llegada

accesibilidad aérea

Su función consiste en estimar la dificultad operativa para la extinción.

5.9 FireAssets

Especialización:

Elementos expuestos.

Analiza:

viviendas

urbanizaciones

industrias

infraestructuras críticas

espacios protegidos

valor ecológico

patrimonio

Su objetivo es estimar el impacto potencial de un incendio.

5.10 FireHistory

Especialización:

Memoria territorial.

Analiza:

incendios anteriores

tratamientos forestales

abandono

evolución temporal

cambios de uso

Permite incorporar conocimiento histórico al análisis.

5.11 FireExplain

Especialización:

Explicabilidad.

No modifica el resultado.

Su misión consiste en justificar:

por qué aumenta el riesgo

por qué disminuye

qué variables han sido determinantes

qué limitaciones existen

Todo análisis FireRank deberá poder reconstruirse mediante FireExplain.

5.12 FirePlanner

Especialización:

Prevención.

Calcula:

actuaciones óptimas

prioridad

coste relativo

beneficio esperado

FireRank Delta

No analiza únicamente el territorio.

Propone cómo mejorarlo.

5.13 FireConfidence

Especialización:

Calidad del análisis.

Calcula el FireRank Confidence Index.

Tiene en cuenta:

calidad de imagen

calidad cartográfica

cantidad de datos

precisión

incertidumbre

similitud con casos conocidos

No evalúa el territorio.

Evalúa la fiabilidad del propio análisis.

5.14 FireLearning

Especialización:

Aprendizaje continuo.

Registra:

predicciones

validaciones

resultados reales

retroalimentación de expertos

No modifica directamente los análisis.

Entrena futuras versiones del modelo.

5.15 FireConsensus

Este módulo constituye el núcleo del protocolo.

Recibe los resultados de todos los motores.

Analiza posibles discrepancias.

Detecta inconsistencias.

Calcula:

FireRank Score

FireRank Confidence

FireRank Delta

Explicación final.

El objetivo no consiste en promediar resultados.

Consiste en alcanzar un consenso razonado entre motores especializados.

5.16 Evolución del aprendizaje

FireRank evoluciona mediante tres fases.

Fase 1

Modelo experto.

Las decisiones se apoyan principalmente en conocimiento técnico.

Fase 2

Modelo híbrido.

Las reglas expertas conviven con modelos de aprendizaje supervisado.

Fase 3

Modelo adaptativo.

El aprendizaje automático asume progresivamente mayor protagonismo.

Las reglas metodológicas permanecen como mecanismo de seguridad y explicabilidad.

5.17 Gobernanza del aprendizaje

Uno de los principios fundamentales del protocolo es que el aprendizaje nunca podrá modificar automáticamente la metodología.

Toda nueva versión deberá:

mantener la trazabilidad

registrar cambios

documentar mejoras

permitir auditorías

conservar compatibilidad con análisis anteriores

El protocolo evoluciona mediante versiones controladas.

Nunca mediante cambios invisibles.

5.18 Inteligencia explicable

FireRank adopta un enfoque de Inteligencia Artificial Explicable (Explainable AI).

Cada resultado deberá responder, como mínimo, a las siguientes cuestiones:

¿Qué variables han tenido mayor influencia?

¿Cuál ha sido su contribución relativa?

¿Qué evidencias sustentan esa conclusión?

¿Qué incertidumbre existe?

¿Qué datos adicionales mejorarían el análisis?

Una puntuación sin explicación se considera un análisis incompleto.

5.19 Principio de prudencia

FireRank nunca afirmará aquello que no pueda justificar.

Cuando la información resulte insuficiente:

disminuirá el FireRank Confidence Index

identificará las limitaciones

propondrá los datos necesarios para mejorar el análisis

La prudencia metodológica constituye un principio irrenunciable del protocolo.

5.20 El conocimiento como activo principal

El verdadero valor del FireRank Intelligence Engine no reside en los modelos de inteligencia artificial que utilice en cada momento.

Su principal activo es el conocimiento estructurado que integra, la metodología que aplica y la capacidad para evolucionar sin perder coherencia.

Las tecnologías cambiarán.

Los modelos predictivos mejorarán.

Nuevos sensores aparecerán.

Sin embargo, el FireRank Protocol permanecerá como el marco estable que garantiza que cualquier evaluación del riesgo siga siendo objetiva, explicable, reproducible y científicamente defendible.

Ese principio convierte a FireRank en mucho más que una herramienta de análisis.

Lo convierte en un sistema de conocimiento para la prevención de incendios forestales.

Capítulo 6

FireRank Index (FRI): definición del índice de riesgo

6.1 Introducción

El **FireRank Index (FRI)** constituye la medida central del protocolo FireRank.

Su finalidad es expresar, mediante un único valor normalizado entre **0 y 100**, el nivel relativo de riesgo de incendio de un territorio, integrando información procedente de múltiples dominios: vegetación, topografía, meteorología, accesibilidad, exposición, vulnerabilidad, historial y calidad de los datos disponibles.

El FRI no pretende representar una probabilidad exacta de que ocurra un incendio, sino un **índice compuesto de riesgo relativo**, diseñado para facilitar la comparación entre territorios, priorizar actuaciones preventivas y apoyar la toma de decisiones.

6.2 ¿Qué representa el FireRank Index?

El FRI responde a una única pregunta:

¿Cuál es el nivel de riesgo preventivo de este territorio considerando toda la información disponible en el momento del análisis?

El índice integra factores relacionados con:

- facilidad de ignición
- potencial de propagación
- continuidad del combustible
- dificultad de extinción
- exposición de bienes y personas
- vulnerabilidad del territorio
- capacidad de respuesta
- incertidumbre asociada a los datos

El resultado es un valor continuo comprendido entre 0 y 100.

6.3 Qué NO representa el FRI

El FireRank Index **no debe interpretarse** como:

- la probabilidad matemática de que mañana se produzca un incendio;
- una predicción meteorológica;
- una simulación exacta del comportamiento del fuego;
- una certificación de seguridad;
- una sustitución del criterio técnico de los profesionales.

El índice es una herramienta de apoyo a la decisión.

6.4 Escala oficial FireRank

Se establecen cinco niveles oficiales.

FireRank Index	Nivel	Interpretación
0–20	Muy bajo	Condiciones favorables para la prevención. Riesgo reducido.

21–40	Bajo	Riesgo contenido. Se recomienda mantenimiento periódico.
41–60	Moderado	Existen factores que aconsejan actuaciones preventivas planificadas.
61–80	Alto	Riesgo significativo. Deben priorizarse medidas de reducción del combustible y mejora de la respuesta.
81–100	Extremo	Condiciones críticas. Alta prioridad para actuaciones preventivas y vigilancia.

6.5 Interpretación del índice

El FireRank Index es un índice **ordinal y continuo**.

Una diferencia de diez puntos entre dos territorios indica que uno presenta un nivel de riesgo superior, pero no implica necesariamente una relación lineal entre ambos.

Por este motivo, el FRI debe interpretarse siempre junto con:

- FireRank Confidence Index (FCI)
- FireRank Explain
- FireRank Delta
- FireRank Action Plan

Nunca de forma aislada.

6.6 Componentes del índice

El FRI se obtiene mediante la integración de ocho dominios principales:

1. Combustible forestal.
2. Topografía.
3. Condiciones ambientales.
4. Accesibilidad y capacidad de respuesta.
5. Infraestructuras y exposición.
6. Vulnerabilidad.
7. Historial del territorio.
8. Calidad y disponibilidad de la información.

La importancia relativa de cada dominio no se fija manualmente de forma permanente.

Será aprendida progresivamente mediante procesos de entrenamiento y validación.

6.7 Filosofía de cálculo

FireRank no utiliza una suma simple de variables.

Cada territorio constituye un sistema complejo en el que las variables interactúan entre sí.

Por ejemplo:

- una elevada carga de combustible puede tener un efecto diferente según la pendiente;
- una misma pendiente puede comportarse de forma distinta dependiendo de la orientación y de la humedad;
- una buena accesibilidad puede reducir significativamente el riesgo operativo incluso en zonas con elevada continuidad del combustible.

El motor FireRank modela estas interacciones mediante aprendizaje supervisado y conocimiento experto.

6.8 Principio de estabilidad

Uno de los objetivos del protocolo es garantizar la comparabilidad entre versiones.

Por ello:

- el significado del FireRank Index permanecerá estable;
 - la metodología evolucionará únicamente mediante versiones documentadas;
 - cualquier cambio deberá estar respaldado por validaciones objetivas.
-

6.9 FireRank Confidence Index (FCI)

Todo FireRank Index irá acompañado de un **FireRank Confidence Index**, expresado entre 0 y 100.

Mientras el FRI responde:

¿Cuál es el riesgo?

El FCI responde:

¿Con qué confianza puede interpretarse ese resultado?

La confianza dependerá, entre otros factores, de:

- calidad de las imágenes;
 - resolución espacial;
 - actualidad de los datos;
 - disponibilidad de información auxiliar;
 - coherencia entre fuentes;
 - similitud con casos previamente validados.
-

6.10 FireRank Explain

Cada índice deberá incluir una explicación estructurada.

Como mínimo deberá identificar:

- las cinco variables que más incrementan el riesgo;
- las cinco variables que más lo reducen;
- las principales incertidumbres detectadas;
- las limitaciones del análisis.

Esta información forma parte inseparable del protocolo.

6.11 FireRank Delta

El protocolo incorpora un indicador diferencial denominado **FireRank Delta**.

Este valor representa la reducción estimada del FireRank Index tras la aplicación de actuaciones preventivas.

Ejemplo:

FireRank Index inicial: 76

FireRank Index proyectado: 48

FireRank Delta: -28 puntos

Esta métrica permite cuantificar el beneficio esperado de una intervención y priorizar inversiones de forma objetiva.

6.12 FireRank Action Plan

El índice debe ir acompañado de un plan de actuaciones priorizado.

Cada recomendación incluirá:

- objetivo;
- impacto estimado sobre el FRI;
- coste relativo;
- prioridad;
- nivel de confianza.

De esta forma, FireRank deja de ser un sistema descriptivo para convertirse en una herramienta de planificación.

6.13 Interpretación responsable

Ningún análisis FireRank deberá utilizarse sin considerar el contexto territorial, la experiencia de los profesionales y las limitaciones de los datos disponibles.

El protocolo ha sido concebido como un instrumento de apoyo a la decisión y no como un sustituto del juicio técnico.

6.14 Hacia una referencia internacional

El FireRank Index aspira a convertirse en una referencia común para la evaluación preventiva del riesgo de incendios forestales.

Su utilidad no dependerá únicamente de la precisión de sus modelos, sino de su capacidad para mantener un significado estable, ser comprensible por distintos perfiles profesionales y evolucionar mediante evidencia científica.

Ese equilibrio entre innovación y estabilidad constituye el fundamento del protocolo FireRank y uno de sus principales elementos diferenciadores.

Capítulo 7

FireRank Confidence Index (FCI): el modelo de confianza del protocolo

7.1 Introducción

Toda decisión basada en datos incorpora un grado de incertidumbre.

En la evaluación del riesgo de incendios forestales, esta incertidumbre puede originarse por múltiples causas: imágenes de baja resolución, información desactualizada, ausencia de datos topográficos, modelos poco entrenados para determinados ecosistemas o limitaciones inherentes a la observación remota.

Por este motivo, FireRank incorpora un segundo índice oficial denominado **FireRank Confidence Index (FCI)**.

Mientras el FireRank Index responde a la pregunta:

¿Cuál es el riesgo?

El FireRank Confidence Index responde a una cuestión igualmente importante:

¿Con qué grado de confianza podemos interpretar ese resultado?

El FCI constituye un elemento inseparable del protocolo FireRank y debe acompañar a todo análisis.

7.2 Filosofía

El protocolo parte de un principio de prudencia:

Cuando disminuye la calidad de la información, debe disminuir también la confianza del análisis.

FireRank nunca ocultará la incertidumbre.

Al contrario.

La cuantificará y la comunicará explícitamente.

Este principio diferencia a FireRank de numerosos sistemas que proporcionan una predicción sin indicar el nivel de fiabilidad asociado.

7.3 Definición

El FireRank Confidence Index es un indicador normalizado entre **0 y 100** que representa el grado de confianza global asociado a un análisis FireRank.

No mide el riesgo.

No mide la precisión matemática del algoritmo.

Mide la solidez del conocimiento disponible para realizar la evaluación.

7.4 Estructura del FCI

El índice se compone de cinco dimensiones principales.

1. Image Quality Index (IQI)

Evalúa la calidad de la información visual.

Incluye:

- resolución espacial;
 - resolución espectral;
 - resolución radiométrica;
 - nitidez;
 - desenfoque;
 - sombras;
 - nubosidad;
 - cobertura efectiva;
 - fecha de adquisición.
-

2. Data Completeness Index (DCI)

Mide la cantidad y diversidad de información disponible.

Considera la presencia de:

- topografía;
- meteorología;
- cartografía forestal;
- inventarios;

- LiDAR;
- usos del suelo;
- historial de incendios;
- infraestructuras;
- hidrología.

Cuanto mayor sea la cobertura de datos relevantes, mayor será el DCI.

3. Model Confidence Index (MCI)

Representa el grado de experiencia acumulada por el modelo de inteligencia artificial en escenarios similares.

Depende de factores como:

- número de casos comparables utilizados en entrenamiento;
- similitud ecológica;
- similitud climática;
- similitud topográfica;
- estabilidad del modelo.

Este índice crecerá conforme FireRank aumente su base de conocimiento.

4. Validation Confidence Index (VCI)

Mide el respaldo científico del análisis.

Tiene en cuenta:

- validaciones de campo;
- comparación con incendios históricos;
- revisión por expertos;
- coherencia con observaciones independientes.

Es el componente que conecta FireRank con la evidencia empírica.

5. Operational Confidence Index (OCI)

Evalúa la coherencia operativa del resultado.

Analiza aspectos como:

- consistencia entre variables;
 - ausencia de contradicciones;
 - cobertura territorial;
 - estabilidad del análisis;
 - robustez frente a pequeñas variaciones de los datos.
-

7.5 Interpretación del FCI

FCI	Interpretación
90–100	Muy alta confianza
75–89	Alta confianza
60–74	Confianza moderada
40–59	Baja confianza
0–39	Muy baja confianza

7.6 Principio de transparencia

FireRank nunca ocultará un nivel bajo de confianza.

Cuando el FCI sea reducido, el sistema deberá indicar:

- qué información falta;
 - qué datos presentan baja calidad;
 - qué incertidumbres afectan al resultado;
 - qué acciones permitirían mejorar el análisis.
-

7.7 Incertidumbre explicada

Toda incertidumbre identificada deberá clasificarse.

Se distinguen cuatro categorías:

Incertidumbre observacional

Limitaciones derivadas de las imágenes o sensores.

Incertidumbre de datos

Información incompleta o desactualizada.

Incertidumbre del modelo

Escasez de ejemplos comparables o baja capacidad predictiva en un contexto concreto.

Incertidumbre operacional

Factores externos que puedan afectar a la interpretación práctica del resultado.

7.8 Evolución del FCI

El FireRank Confidence Index no es un valor estático.

Debe mejorar conforme:

- se incorporen nuevos datos;
- aumente la resolución de las imágenes;
- existan más validaciones de campo;
- el modelo aprenda con nuevos incendios.

En consecuencia, un mismo territorio puede mantener un FireRank Index similar y, sin embargo, aumentar significativamente su nivel de confianza con el paso del tiempo.

7.9 Aplicaciones del FCI

El FireRank Confidence Index permite:

- priorizar campañas de adquisición de datos;
 - identificar territorios poco caracterizados;
 - justificar inspecciones de campo;
 - optimizar inversiones en información geoespacial;
 - informar al usuario sobre las limitaciones del análisis.
-

7.10 FCI como criterio de calidad

El protocolo establece que ningún análisis deberá interpretarse únicamente a partir del FireRank Index.

Toda decisión deberá considerar simultáneamente:

- FireRank Index (FRI);
- FireRank Confidence Index (FCI);
- FireRank Explain;
- FireRank Action Plan;
- FireRank Delta.

Solo la combinación de estos elementos proporciona una evaluación completa.

7.11 Hacia una cultura de la incertidumbre

Uno de los objetivos de FireRank es promover una cultura de decisión basada no solo en la información disponible, sino también en el conocimiento explícito de sus limitaciones.

Reconocer la incertidumbre no constituye una debilidad del protocolo.

Al contrario.

Representa una muestra de rigor científico, transparencia y responsabilidad.

En un contexto donde las decisiones sobre prevención de incendios implican importantes consecuencias ambientales, económicas y sociales, comunicar adecuadamente el grado de confianza asociado a cada análisis resulta tan importante como el propio índice de riesgo.

El FireRank Confidence Index materializa este compromiso y se convierte en uno de los elementos diferenciales del protocolo FireRank.

Capítulo 8

FireRank Explain (FRE): explicabilidad, trazabilidad y auditoría

8.1 Introducción

Uno de los principios fundamentales del protocolo FireRank establece que **ninguna evaluación del riesgo puede considerarse completa si no es explicable**.

El FireRank Explain (FRE) constituye el sistema oficial de explicabilidad del protocolo. Su misión es documentar de forma estructurada las razones que justifican cada análisis, permitiendo comprender, revisar y auditar el proceso seguido hasta la obtención del FireRank Index (FRI).

La explicabilidad no es un elemento adicional del protocolo.

Es una condición obligatoria para la validez de cualquier análisis FireRank.

8.2 Principio de explicabilidad

Todo resultado generado mediante FireRank deberá responder, como mínimo, a las siguientes preguntas:

- ¿Qué factores incrementan el riesgo?
- ¿Qué factores reducen el riesgo?
- ¿Qué evidencias sustentan esas conclusiones?
- ¿Qué incertidumbres existen?
- ¿Qué actuaciones modificarían el resultado?
- ¿Qué datos adicionales mejorarían el análisis?

Si alguna de estas preguntas no puede responderse, el análisis deberá considerarse incompleto.

8.3 Niveles de explicación

FireRank genera tres niveles de explicación adaptados al perfil del usuario.

Nivel 1. Ejecutivo

Dirigido a propietarios, responsables políticos y gestores.

Incluye:

- FireRank Index.
- Nivel de riesgo.
- Resumen de las causas principales.
- Actuaciones prioritarias.
- FireRank Delta esperado.

Su objetivo es facilitar una comprensión rápida de la situación.

Nivel 2. Técnico

Dirigido a ingenieros forestales, técnicos de prevención y administraciones.

Incluye:

- variables relevantes;
 - análisis espacial;
 - justificación metodológica;
 - incertidumbres;
 - nivel de evidencia;
 - recomendaciones detalladas.
-

Nivel 3. Científico

Dirigido a investigadores y procesos de auditoría.

Incluye:

- todas las variables utilizadas;
- procedencia de cada dato;
- versión del protocolo;
- versión del modelo;
- métricas internas;
- trazabilidad completa;
- registros de cálculo.

Este nivel permite reproducir íntegramente el análisis.

8.4 Factores impulsores del riesgo

El protocolo identifica automáticamente los factores con mayor influencia sobre el FireRank Index.

Cada factor incluirá:

- descripción;
- magnitud de influencia;
- nivel de evidencia;
- fuente de información;
- confianza asociada.

Ejemplo:

Continuidad horizontal elevada del combustible

Influencia: Muy alta.

Evidencia: Nivel A.

Fuente: Ortofoto RGB + LiDAR.

Confianza: 95.

8.5 Factores reductores del riesgo

Del mismo modo, FireRank identifica aquellos elementos que disminuyen el riesgo.

Ejemplos:

- tratamientos selvícolas recientes;
- discontinuidades del combustible;
- caminos operativos;
- puntos de agua accesibles;
- franjas auxiliares;
- zonas agrícolas.

Estos factores deberán reflejarse explícitamente para evitar una interpretación sesgada del análisis.

8.6 Árbol de decisión explicativo

Cada análisis incorpora un árbol lógico que resume el razonamiento del sistema.

Ejemplo conceptual:

Alta continuidad del combustible

↓

Elevada capacidad de propagación

↓

Pendiente pronunciada

↓

Mayor velocidad potencial del frente

↓

Accesibilidad limitada

↓

Mayor dificultad de extinción

↓

Incremento del FireRank Index

Este árbol constituye una representación simplificada del razonamiento interno del protocolo.

8.7 Trazabilidad

Todo análisis FireRank deberá poder reconstruirse íntegramente.

Para ello se registrarán:

- fecha;
- versión del protocolo;
- versión del modelo de IA;
- fuentes utilizadas;
- variables calculadas;
- parámetros internos;
- FireRank Index;
- FireRank Confidence Index;

- FireRank Evidence Level;
- usuario responsable;
- observaciones.

Esta información permanecerá asociada permanentemente al informe.

8.8 Auditoría

El protocolo define tres niveles de auditoría.

Auditoría técnica

Verifica la correcta ejecución del protocolo.

Auditoría científica

Comprueba la coherencia metodológica y la consistencia de los resultados.

Auditoría operativa

Evalúa la utilidad práctica del análisis para la toma de decisiones.

8.9 Reproducibilidad

Uno de los objetivos prioritarios del protocolo consiste en garantizar que cualquier análisis pueda repetirse en condiciones equivalentes.

Para ello será necesario conservar:

- imágenes originales;
- datos auxiliares;
- variables derivadas;
- configuración del análisis;
- versión exacta del protocolo.

Este principio garantiza la comparabilidad histórica de todos los resultados.

8.10 Gestión de discrepancias

Cuando existan diferencias significativas entre:

- la interpretación automática;
- la validación de campo;
- el criterio experto;

FireRank deberá registrar dichas discrepancias.

Estas observaciones alimentarán el proceso de aprendizaje continuo del sistema y permitirán mejorar futuras versiones del modelo.

8.11 Registro de decisiones

Cada informe FireRank incorporará un Registro de Decisiones (Decision Log).

Este registro documentará:

- decisiones automáticas relevantes;
- hipótesis adoptadas;
- limitaciones detectadas;
- fuentes descartadas;
- advertencias emitidas.

El objetivo es proporcionar transparencia completa sobre el razonamiento del sistema.

8.12 FireRank Explain Report

Todo análisis generará un informe estructurado compuesto por:

1. Resumen ejecutivo.
2. FireRank Index.
3. FireRank Confidence Index.
4. FireRank Evidence Level.
5. Variables principales.
6. Factores de riesgo.
7. Factores protectores.
8. Mapa de riesgo.
9. Incertidumbres.
10. Plan de actuaciones.

- 11. FireRank Delta.
- 12. Limitaciones.
- 13. Metadatos.
- 14. Registro de decisiones.

Este documento constituye la representación oficial del análisis FireRank.

8.13 Principio de responsabilidad

FireRank nunca ocultará información relevante para favorecer una determinada interpretación.

Cuando existan dudas razonables sobre un resultado, estas deberán comunicarse explícitamente.

La transparencia constituye un requisito metodológico y ético del protocolo.

8.14 La confianza como consecuencia de la transparencia

La confianza en un sistema de inteligencia artificial no depende exclusivamente de la precisión de sus modelos.

Depende también de la capacidad para explicar sus decisiones, documentar sus limitaciones y permitir que cualquier profesional pueda revisar el razonamiento seguido.

El sistema FireRank Explain convierte cada análisis en un proceso verificable, auditable y reproducible.

Esta filosofía sitúa la explicabilidad en el centro del protocolo y constituye uno de los elementos que diferencian a FireRank de otras herramientas basadas exclusivamente en modelos predictivos.

En FireRank, la inteligencia artificial no reemplaza el criterio técnico; lo complementa mediante un proceso transparente y fundamentado en evidencia.

Capítulo 9

Validación científica y metodología de evaluación

9.1 Introducción

La utilidad de cualquier protocolo de evaluación depende de su capacidad para demostrar, mediante evidencia objetiva, que sus resultados son consistentes, reproducibles y útiles para la toma de decisiones.

Por este motivo, FireRank incorpora un marco específico de validación científica que constituye uno de los pilares fundamentales del protocolo.

El objetivo no consiste únicamente en comprobar que el modelo funciona, sino en establecer un procedimiento permanente para medir su rendimiento, detectar limitaciones y mejorar progresivamente su capacidad predictiva.

La validación no se considera una fase del desarrollo.

Forma parte del propio protocolo.

9.2 Principios de validación

Toda validación FireRank deberá cumplir cinco principios.

Independencia

Los datos utilizados para validar el modelo deberán ser diferentes de los empleados durante su entrenamiento.

Reproducibilidad

Cualquier investigador deberá poder repetir el proceso utilizando los mismos datos y obtener resultados equivalentes.

Representatividad

Los escenarios de validación deberán cubrir la diversidad de condiciones presentes en el ámbito de aplicación.

Transparencia

Todos los procedimientos utilizados deberán estar documentados.

Mejora continua

Las conclusiones obtenidas deberán incorporarse al proceso de evolución del protocolo.

9.3 Objetivos de la validación

La validación persigue responder a cuatro preguntas fundamentales:

1. ¿El FireRank Index representa adecuadamente el riesgo observado?
 2. ¿Las recomendaciones propuestas reducen efectivamente el riesgo?
 3. ¿El FireRank Confidence Index refleja correctamente el grado de incertidumbre?
 4. ¿El protocolo mantiene un comportamiento consistente en distintos escenarios?
-

9.4 Escenarios de validación

El protocolo contempla cuatro tipos de validación.

Validación histórica

Comparación con incendios documentados.

Validación territorial

Comparación entre territorios con diferentes características.

Validación experimental

Evaluación mediante parcelas instrumentadas y campañas de campo.

Validación operativa

Uso del protocolo por técnicos y administraciones en situaciones reales.

9.5 Zona piloto

La primera validación oficial del protocolo se desarrollará en la comarca de **La Vera (Cáceres)**.

La elección responde a criterios científicos:

- diversidad de masas forestales;
- fuerte gradiente altitudinal;
- variedad de usos del suelo;
- presencia de interfaz urbano-forestal;
- historial significativo de incendios;
- disponibilidad de información cartográfica y ortofotográfica.

La Vera actuará como laboratorio metodológico para las primeras versiones del protocolo.

9.6 Diseño experimental

La validación se estructurará en cinco fases.

Fase 1. Caracterización territorial

Inventario de variables del FireRank Variable Model.

Fase 2. Generación de análisis FireRank

Aplicación del protocolo sobre diferentes unidades territoriales.

Fase 3. Validación de campo

Inspección presencial por técnicos especializados.

Fase 4. Comparación con incendios históricos

Evaluación del comportamiento del índice frente a eventos documentados.

Fase 5. Recalibración

Incorporación de mejoras al modelo manteniendo la estabilidad del protocolo.

9.7 Indicadores de rendimiento

El protocolo monitorizará, entre otros:

- precisión;
- sensibilidad;
- especificidad;
- falsos positivos;
- falsos negativos;
- estabilidad temporal;
- consistencia espacial;
- capacidad explicativa.

La selección definitiva de métricas podrá ampliarse conforme evolucione el proyecto.

9.8 Validación por expertos

FireRank no se validará únicamente mediante indicadores estadísticos.

También incorporará la evaluación cualitativa de:

- ingenieros forestales;
- agentes del medio natural;
- servicios de prevención;
- servicios de extinción;
- investigadores universitarios.

Las discrepancias entre el modelo y los expertos constituirán una fuente de aprendizaje.

9.9 Validación longitudinal

El protocolo evaluará periódicamente territorios previamente analizados.

Este seguimiento permitirá comprobar:

- evolución del riesgo;
- impacto de tratamientos;
- cambios en la vegetación;

- estabilidad del índice;
 - comportamiento del FireRank Delta.
-

9.10 Gestión de versiones

Cada campaña de validación quedará asociada a:

- versión del protocolo;
- versión del modelo de IA;
- fuentes de datos;
- fecha;
- metodología utilizada.

Esto garantizará la trazabilidad histórica de todas las mejoras.

9.11 Publicación de resultados

Uno de los compromisos del protocolo consiste en favorecer la revisión científica.

Siempre que sea posible se promoverá:

- publicación de artículos;
- participación en congresos;
- colaboración con universidades;
- proyectos de investigación;
- comparación con metodologías existentes.

La transparencia científica constituye un elemento esencial del desarrollo de FireRank.

9.12 Evolución del protocolo

La validación no tiene como finalidad demostrar que FireRank es perfecto.

Su objetivo es identificar continuamente oportunidades de mejora.

Cada nueva validación incrementará el conocimiento acumulado y permitirá perfeccionar el modelo sin alterar los principios metodológicos del protocolo.

De este modo, FireRank evoluciona como un sistema científico vivo, sustentado en evidencia, revisión y aprendizaje continuo.

Capítulo 10

FireRank Living Lab: La Vera (Cáceres) como territorio piloto

10.1 Introducción

El desarrollo de un protocolo científico requiere un proceso de validación progresivo en condiciones reales.

Con este objetivo, FireRank establece como primera zona oficial de experimentación y validación la comarca de **La Vera (Cáceres, España)**, concebida como el primer **FireRank Living Lab**.

Un *Living Lab* es un entorno real de experimentación donde la tecnología, el conocimiento científico y la experiencia de los usuarios evolucionan conjuntamente mediante procesos continuos de observación, análisis, validación y mejora.

La Vera constituye el escenario idóneo para iniciar este proceso por su elevada diversidad ambiental, forestal y territorial.

10.2 ¿Por qué La Vera?

La elección de La Vera responde a criterios técnicos y científicos.

La comarca reúne, en un espacio relativamente compacto, una amplia representación de los factores que condicionan el riesgo de incendio en la Península Ibérica.

Entre ellos destacan:

- gradiente altitudinal desde el valle hasta la Sierra de Gredos;
- mosaico de usos agrícolas y forestales;
- masas de robles, castaños, pinos y vegetación mediterránea;

- elevada presencia de matorral en determinadas zonas;
- fuerte interfaz urbano-forestal;
- abundante red hidrográfica;
- diversidad de pendientes y orientaciones;
- historial de incendios de distinta tipología.

Esta heterogeneidad convierte a La Vera en un laboratorio natural excepcional para evaluar el comportamiento del protocolo.

10.3 Objetivos del Living Lab

El FireRank Living Lab persigue cinco objetivos principales.

Objetivo 1

Validar científicamente el FireRank Protocol.

Objetivo 2

Entrenar progresivamente el modelo de aprendizaje automático.

Objetivo 3

Comparar las predicciones con observaciones de campo.

Objetivo 4

Evaluar el impacto real de actuaciones preventivas.

Objetivo 5

Generar conocimiento transferible al resto de la Península Ibérica.

10.4 Escala de análisis

El protocolo permitirá trabajar en distintos niveles territoriales.

Nivel 1

Parcela.

Nivel 2

Finca.

Nivel 3

Monte.

Nivel 4

Entidad local.

Nivel 5

Municipio.

Nivel 6

Comarca completa.

Todos los niveles compartirán exactamente la misma metodología.

Únicamente cambiará la resolución espacial y el volumen de información procesada.

10.5 Diseño experimental

El Living Lab se desarrollará mediante un proceso iterativo.

Etapas 1

Construcción de la línea base territorial.

Inventario inicial.

Obtención de ortofotos.

Integración cartográfica.

Definición de variables.

Etapas 2

Generación de FireRank Index.

Análisis de todas las unidades territoriales.

Obtención del FireRank Confidence Index.

Producción de informes.

Etapas 3

Verificación de campo.

Visitas técnicas.

Registro fotográfico.

Contraste con expertos.

Corrección de variables.

Etapas 4

Seguimiento temporal.

Nuevas imágenes.

Cambios de vegetación.

Tratamientos realizados.

Eventos de incendio.

Actualización del modelo.

Etapas 5

Transferencia.

Extensión progresiva del protocolo a otras regiones.

10.6 Participación de actores

El Living Lab promoverá la colaboración entre:

- propietarios forestales;
- comunidades de montes;
- ayuntamientos;
- Diputación Provincial;
- Junta de Extremadura;
- universidades;
- centros tecnológicos;
- empresas forestales;
- ingenierías;
- aseguradoras;
- servicios de prevención;
- servicios de extinción.

La participación de distintos perfiles permitirá validar el protocolo desde perspectivas complementarias.

10.7 Datos de referencia

Durante la fase piloto se recopilarán, entre otros:

- ortofotos históricas;
- vuelos con drones;
- modelos digitales del terreno;
- información LiDAR;
- cartografía forestal;
- inventarios de vegetación;
- red de caminos;
- puntos de agua;
- meteorología;
- historial de incendios;
- actuaciones selvícolas;
- observaciones de campo.

Toda esta información se integrará siguiendo las especificaciones del FireRank Protocol.

10.8 Indicadores del Living Lab

El seguimiento del proyecto utilizará indicadores específicos.

Científicos

- precisión del FireRank Index;
- evolución del FireRank Confidence Index;
- estabilidad temporal;
- reproducibilidad.

Territoriales

- superficie analizada;
- número de fincas;
- número de municipios;
- porcentaje de cobertura.

Operativos

- actuaciones recomendadas;
- actuaciones ejecutadas;
- reducción del FireRank Delta;
- tiempo medio de generación de informes.

Sociales

- administraciones participantes;
 - técnicos colaboradores;
 - usuarios registrados;
 - proyectos derivados.
-

10.9 Casos de estudio

El Living Lab documentará diferentes escenarios representativos.

Entre ellos:

- masas forestales densas;
- dehesas;
- cultivos abandonados;
- interfaz urbano-forestal;
- zonas agrícolas;
- áreas previamente incendiadas;
- espacios protegidos.

Cada caso contribuirá al entrenamiento y validación del protocolo.

10.10 Aprendizaje territorial

Uno de los principios del Living Lab es que el territorio también evoluciona.

Por ello FireRank no almacenará únicamente imágenes.

Construirá una memoria histórica del paisaje.

Cada nuevo análisis permitirá conocer:

- cómo cambia la vegetación;
- cómo evolucionan los tratamientos;
- cómo varía el riesgo;
- cómo responden las actuaciones preventivas.

Esta memoria constituye uno de los activos estratégicos del protocolo.

10.11 Replicabilidad

La Vera representa únicamente el primer escenario de validación.

Una vez consolidada la metodología, el Living Lab servirá como modelo para crear nuevos laboratorios FireRank en otras regiones.

Cada nuevo territorio incorporará conocimiento al protocolo sin perder la coherencia metodológica.

10.12 El territorio como laboratorio permanente

El FireRank Living Lab convierte el territorio en un espacio de aprendizaje continuo.

Cada ortofoto, cada inspección de campo, cada tratamiento forestal y cada incendio documentado aportan información valiosa para mejorar el protocolo.

La Vera no será únicamente el lugar donde FireRank comenzó a validarse.

Será el primer territorio donde la inteligencia artificial, el conocimiento forestal y la gestión preventiva trabajen conjuntamente para construir un estándar internacional basado en evidencia científica.

Este enfoque refleja la filosofía del proyecto: aprender del territorio para proteger el territorio.

Capítulo 11

Arquitectura tecnológica y ecosistema FireRank

11.1 Introducción

El FireRank Protocol define la metodología para evaluar el riesgo de incendios forestales.

La Plataforma FireRank constituye la implementación tecnológica de dicha metodología.

Ambos conceptos son independientes.

El protocolo puede mantenerse estable mientras la plataforma evoluciona tecnológicamente.

Esta separación garantiza la continuidad del estándar y facilita la incorporación de nuevas tecnologías sin alterar los fundamentos metodológicos.

11.2 Filosofía de la plataforma

La Plataforma FireRank se concibe como una infraestructura modular, interoperable y escalable.

Su misión consiste en transformar el protocolo científico en servicios digitales accesibles para diferentes perfiles de usuario.

La plataforma deberá poder operar tanto en entornos locales como en infraestructuras cloud, permitiendo el procesamiento de pequeñas parcelas o de grandes extensiones territoriales.

11.3 Arquitectura general

La plataforma se organiza en seis grandes capas.

Capa 1

Fuentes de información.

Capa 2

Motor de integración geoespacial.

Capa 3

FireRank Intelligence Engine.

Capa 4

Servicios FireRank.

Capa 5

Interfaces de usuario.

Capa 6

Gobernanza y administración.

Cada capa podrá evolucionar de forma independiente.

11.4 Fuentes de información

La plataforma deberá ser capaz de integrar información procedente de múltiples orígenes.

Entre ellos:

- drones;
- satélites;
- ortofotos;
- sensores IoT;
- estaciones meteorológicas;

- LiDAR;
- cartografía oficial;
- catastros;
- plataformas GIS;
- aplicaciones de terceros;
- datos aportados por los usuarios.

Todas las fuentes serán normalizadas antes de iniciar cualquier análisis.

11.5 Motor geoespacial

Este componente será responsable de:

- gestionar geometrías;
- transformar coordenadas;
- integrar capas;
- realizar análisis espaciales;
- generar cuadrículas;
- calcular distancias;
- identificar relaciones espaciales;
- mantener la consistencia cartográfica.

Constituye la base sobre la que opera el protocolo.

11.6 FireRank Intelligence Engine

El motor de inteligencia implementa la metodología descrita en los capítulos anteriores.

Sus principales responsabilidades son:

- extraer variables;
- calcular el FireRank Index;
- estimar el FireRank Confidence Index;
- generar explicaciones;
- proponer actuaciones;
- mantener el aprendizaje continuo.

La implementación podrá evolucionar sin modificar la definición del protocolo.

11.7 Servicios FireRank

La plataforma ofrecerá servicios independientes reutilizables.

Entre ellos:

FireRank Analysis Service

Generación completa del análisis.

FireRank Mapping Service

Producción de mapas temáticos.

FireRank Explain Service

Explicación del resultado.

FireRank Planning Service

Simulación de actuaciones preventivas.

FireRank Monitoring Service

Seguimiento temporal del territorio.

FireRank Reporting Service

Generación automática de informes.

Cada servicio podrá utilizarse de forma independiente mediante API.

11.8 Interfaces

La plataforma dispondrá de diferentes interfaces adaptadas a distintos perfiles.

Portal web

Orientado a propietarios y técnicos.

Aplicación móvil

Inspecciones de campo.

Captura de fotografías.

Validación de actuaciones.

Panel profesional

Administraciones.

Ingenierías.

Servicios forestales.

API

Integración con aplicaciones externas.

SDK

Desarrollo de nuevas soluciones compatibles con FireRank.

11.9 Usuarios

La arquitectura contempla múltiples perfiles.

Propietarios forestales

Consulta del riesgo.

Seguimiento de actuaciones.

Ingenierías

Elaboración de proyectos.

Administraciones

Planificación territorial.

Servicios de extinción

Apoyo a la prevención.

Aseguradoras

Evaluación objetiva del riesgo.

Investigadores

Validación científica.

Empresas energéticas

Protección de infraestructuras críticas.

Cada perfil visualizará únicamente la información necesaria para su actividad.

11.10 Ecosistema FireRank

La plataforma se concibe como un ecosistema abierto.

Podrán integrarse:

- proveedores de imágenes;
- plataformas GIS;
- herramientas meteorológicas;
- software forestal;
- aplicaciones móviles;
- soluciones de análisis territorial;
- sistemas corporativos.

El objetivo es evitar dependencias tecnológicas y favorecer la interoperabilidad.

11.11 Escalabilidad

La arquitectura deberá soportar distintos niveles de procesamiento.

Desde:

- una única parcela;

hasta:

- millones de hectáreas analizadas de forma simultánea.

La capacidad de crecimiento constituye un requisito fundamental del protocolo.

11.12 Seguridad

Toda la información gestionada por FireRank deberá cumplir principios de:

- confidencialidad;
- integridad;
- disponibilidad;
- trazabilidad;
- autenticidad.

Las decisiones críticas deberán quedar registradas para permitir auditorías posteriores.

11.13 Evolución tecnológica

El protocolo permanecerá independiente de:

- modelos de IA;
- proveedores cloud;
- bases de datos;
- lenguajes de programación;
- sistemas operativos.

La plataforma podrá incorporar nuevas tecnologías sin afectar a la estabilidad metodológica.

11.14 FireRank Digital Ecosystem

La visión de FireRank no consiste únicamente en desarrollar una aplicación informática.

Su objetivo es crear un ecosistema tecnológico donde distintas organizaciones puedan construir soluciones compatibles con el FireRank Protocol.

Este ecosistema favorecerá la innovación, la interoperabilidad y la adopción progresiva del estándar por parte de administraciones, empresas, universidades y desarrolladores.

La plataforma tecnológica constituye el vehículo que hace posible la aplicación práctica del protocolo, pero el verdadero activo permanece siendo la metodología científica que lo sustenta.

Capítulo 12

Gobernanza, Protocolo Abierto y Ecosistema FireRank

12.1 Introducción

FireRank nace con la vocación de convertirse en un estándar internacional para la evaluación del riesgo de incendios forestales.

Para alcanzar este objetivo, el protocolo debe trascender a una única organización, empresa o tecnología.

El conocimiento metodológico constituye un bien común cuya utilidad aumenta cuando puede ser comprendido, implementado, revisado y mejorado por la comunidad científica y técnica.

Por este motivo, FireRank adopta un modelo de **Protocolo Abierto (Open Protocol)**.

12.2 Filosofía

FireRank diferencia claramente tres conceptos:

El protocolo

Describe la metodología.

Es público.

Es documentado.

Es auditable.

Es estable.

Las implementaciones

Son los programas informáticos que aplican el protocolo.

Pueden ser:

- abiertas;
- comerciales;
- institucionales;
- académicas.

Todas ellas pueden coexistir.

La certificación

Garantiza que una implementación respeta las especificaciones oficiales del protocolo.

12.3 ¿Qué significa Open Protocol?

Open Protocol significa que cualquier persona u organización podrá:

- estudiar la metodología;
- implementar el protocolo;
- desarrollar nuevas herramientas compatibles;
- validar científicamente sus resultados;
- proponer mejoras.

Todo ello respetando las reglas de gobernanza establecidas por FireRank.

12.4 Qué permanece abierto

El protocolo mantendrá públicos:

- la definición del FireRank Index;
- el FireRank Confidence Index;
- el FireRank Evidence Level;
- el FireRank Variable Model;
- las especificaciones metodológicas;
- los formatos de intercambio;
- las reglas de validación;
- el sistema de auditoría;
- el proceso de certificación.

La transparencia constituye un principio irrenunciable.

12.5 Qué puede ser propietario

El carácter abierto del protocolo no impide el desarrollo de soluciones comerciales.

Podrán ser propietarios, entre otros:

- modelos específicos de inteligencia artificial;
- optimizaciones de rendimiento;
- interfaces de usuario;
- plataformas SaaS;
- aplicaciones móviles;
- herramientas de gestión;
- servicios cloud;
- integraciones empresariales.

El protocolo y las implementaciones evolucionan de forma independiente.

12.6 Gobernanza

La evolución del protocolo deberá seguir un procedimiento transparente.

Toda modificación significativa requerirá:

- documentación técnica;
- justificación científica;
- evaluación del impacto;
- revisión por especialistas;
- aprobación conforme al procedimiento de gobernanza.

El objetivo es preservar la estabilidad del estándar.

12.7 Compatibilidad entre versiones

FireRank seguirá un sistema de versionado semántico.

Ejemplos:

FireRank Protocol 1.0

FireRank Protocol 1.1

FireRank Protocol 2.0

Las versiones menores introducirán mejoras compatibles.

Las versiones mayores podrán incorporar cambios metodológicos relevantes, siempre documentados y justificados.

12.8 FireRank Compliance

Para garantizar la interoperabilidad, cualquier implementación podrá solicitar la certificación **FireRank Compliance**.

Como mínimo deberá demostrar que:

- calcula correctamente el FireRank Index;
- implementa el FireRank Confidence Index;
- genera el FireRank Explain Report;
- mantiene la trazabilidad completa;
- registra las versiones utilizadas;
- produce resultados reproducibles;
- cumple las especificaciones oficiales del protocolo.

Solo entonces podrá utilizar el distintivo:

FireRank Protocol Certified

12.9 Comunidad FireRank

El protocolo fomentará una comunidad abierta formada por:

- universidades;
- centros tecnológicos;
- administraciones públicas;
- empresas;
- ingenierías;
- propietarios forestales;
- investigadores independientes.

La colaboración entre estos actores favorecerá la mejora continua del estándar.

12.10 FireRank Research Network

Se promoverá la creación de una red internacional de investigación encargada de:

- validar nuevas metodologías;
- ampliar el modelo de variables;
- estudiar nuevos ecosistemas;
- desarrollar casos de estudio;
- publicar resultados científicos;
- coordinar proyectos colaborativos.

Esta red actuará como soporte científico permanente del protocolo.

12.11 FireRank Foundation

Como evolución natural del proyecto, se propone la creación de una entidad independiente denominada provisionalmente **FireRank Foundation**.

Sus funciones serían:

- custodiar el protocolo;
- coordinar la gobernanza;
- mantener la documentación oficial;
- gestionar el proceso de certificación;
- impulsar la investigación;
- organizar grupos de trabajo;
- promover la colaboración internacional.

La Fundación no tendría como objetivo desarrollar productos comerciales, sino garantizar la estabilidad, independencia y continuidad del estándar.

12.12 Una metodología abierta para un problema global

Los incendios forestales constituyen un desafío compartido que trasciende fronteras, administraciones y tecnologías.

Por ello, FireRank adopta una filosofía de apertura metodológica.

El conocimiento que define el protocolo debe poder ser revisado, comprendido y mejorado por la comunidad científica internacional.

Al mismo tiempo, esta apertura es compatible con el desarrollo de soluciones comerciales, siempre que respeten las especificaciones oficiales del estándar.

Esta combinación entre ciencia abierta, innovación tecnológica y gobernanza transparente constituye uno de los principios fundacionales de FireRank y una de las bases sobre las que aspira a consolidarse como referencia internacional en la evaluación del riesgo de incendios forestales.

Capítulo 13

Ética, limitaciones y uso responsable del Protocolo FireRank

13.1 Introducción

El desarrollo de sistemas basados en inteligencia artificial para apoyar la toma de decisiones requiere un compromiso permanente con la transparencia, la responsabilidad y el rigor científico.

FireRank ha sido concebido como una herramienta de apoyo a la prevención de incendios forestales. Su finalidad es facilitar la interpretación del territorio mediante la integración de información geoespacial, conocimiento forestal y modelos de inteligencia artificial.

El protocolo no pretende sustituir el criterio profesional, sino reforzarlo mediante análisis objetivos, explicables y reproducibles.

Este capítulo establece los principios éticos y las limitaciones inherentes al protocolo, definiendo las condiciones para un uso responsable de FireRank.

13.2 Principios éticos

Todo desarrollo basado en el FireRank Protocol deberá respetar los siguientes principios.

Transparencia

Los resultados deberán poder explicarse de forma comprensible.

No se admitirán conclusiones que no puedan justificarse mediante evidencia.

Responsabilidad

Las decisiones finales corresponderán siempre a las personas u organizaciones responsables de la gestión del territorio.

FireRank proporciona información.

No sustituye la responsabilidad profesional.

Prudencia

Cuando existan dudas relevantes o información insuficiente, el sistema deberá comunicar expresamente dichas limitaciones.

La incertidumbre nunca deberá ocultarse.

Trazabilidad

Todo análisis deberá conservar un registro completo que permita reconstruir el proceso seguido.

Mejora continua

El protocolo evolucionará mediante validación científica, revisión técnica y evidencia empírica.

13.3 Limitaciones del protocolo

FireRank reconoce explícitamente las siguientes limitaciones.

Dependencia de la información disponible

La calidad del análisis depende directamente de la calidad, actualidad y completitud de los datos utilizados.

Información incompleta puede reducir la fiabilidad del resultado.

Observación remota

Las imágenes aéreas no permiten identificar todas las características relevantes del territorio.

Existen factores que únicamente pueden verificarse mediante inspección de campo.

Dinámica del territorio

El territorio evoluciona continuamente.

Cambios recientes en la vegetación, tratamientos forestales o nuevas infraestructuras pueden no estar reflejados en la información disponible.

Condiciones meteorológicas

El protocolo incorpora información meteorológica cuando está disponible.

Sin embargo, cambios repentinos en las condiciones atmosféricas pueden modificar significativamente el comportamiento potencial de un incendio.

Incertidumbre inherente

Todo modelo predictivo incorpora incertidumbre.

El FireRank Confidence Index y el FireRank Evidence Level forman parte del protocolo precisamente para comunicar esa incertidumbre de forma explícita.

13.4 Qué puede hacer FireRank

FireRank puede:

- evaluar el riesgo relativo de un territorio;
 - integrar múltiples fuentes de información;
 - identificar factores de riesgo;
 - proponer actuaciones preventivas;
 - estimar el impacto potencial de dichas actuaciones;
 - documentar el proceso de análisis;
 - facilitar la comparación entre territorios.
-

13.5 Qué no puede hacer FireRank

FireRank no puede:

- garantizar que un incendio vaya a producirse o no;
 - sustituir una inspección presencial;
 - reemplazar un proyecto técnico forestal;
 - emitir resoluciones administrativas;
 - determinar responsabilidades legales;
 - asegurar el éxito de una actuación preventiva;
 - sustituir el criterio profesional de los servicios competentes.
-

13.6 Uso recomendado

FireRank ha sido diseñado para apoyar procesos como:

- planificación preventiva;
 - priorización de inversiones;
 - gestión forestal;
 - elaboración de proyectos;
 - evaluación comparativa del riesgo;
 - seguimiento de tratamientos;
 - investigación científica;
 - apoyo a la toma de decisiones.
-

13.7 Uso no recomendado

No se recomienda utilizar FireRank como única fuente de información para decisiones que impliquen:

- riesgos inmediatos para la vida humana;
- actuaciones de emergencia en tiempo real;
- procedimientos sancionadores;
- determinaciones jurídicas;
- certificaciones oficiales sin validación adicional.

En estos casos deberá complementarse con información adicional y con el criterio de los profesionales competentes.

13.8 Protección de la información

Toda implementación del protocolo deberá garantizar:

- confidencialidad de los datos;
 - integridad de la información;
 - trazabilidad de los análisis;
 - conservación de versiones;
 - cumplimiento de la normativa aplicable en materia de protección de datos y seguridad de la información.
-

13.9 Supervisión humana

FireRank adopta el principio de supervisión humana significativa.

Las decisiones con impacto relevante sobre personas, bienes o recursos naturales deberán contar con revisión por parte de profesionales cualificados.

La inteligencia artificial constituye una herramienta de apoyo y no un sustituto del juicio técnico.

13.10 Compromiso científico

El protocolo se compromete a:

- publicar su metodología;
- documentar las modificaciones relevantes;
- favorecer la revisión científica;
- promover la validación independiente;
- reconocer las limitaciones detectadas.

La credibilidad del protocolo dependerá de su capacidad para evolucionar mediante evidencia y no mediante afirmaciones no verificadas.

13.11 Principio de mejora permanente

FireRank considera cada análisis como una oportunidad para aprender.

Los errores identificados, las discrepancias observadas y las nuevas evidencias científicas deberán incorporarse al proceso de revisión del protocolo.

El objetivo no es alcanzar un modelo perfecto, sino desarrollar un sistema cada vez más preciso, transparente y útil para la prevención de incendios forestales.

13.12 Declaración de responsabilidad

FireRank se fundamenta en una convicción sencilla:

La inteligencia artificial debe ayudar a comprender mejor el territorio, no sustituir la experiencia de quienes lo conocen y gestionan.

El protocolo ha sido diseñado para aportar conocimiento, no certezas absolutas.

Su valor reside en ofrecer una evaluación objetiva, explicable y verificable que complemente el trabajo de propietarios, ingenieros, administraciones, investigadores y servicios de prevención.

La confianza en FireRank no nace de prometer infalibilidad, sino de reconocer sus límites, comunicar su incertidumbre y mejorar continuamente mediante evidencia científica.

Ese compromiso con la transparencia constituye uno de los principios esenciales del FireRank Protocol y la base sobre la que aspira a consolidarse como un estándar internacional de referencia.

Capítulo 14

Hoja de Ruta Estratégica 2026–2035

14.1 Introducción

FireRank se concibe como un proyecto de largo recorrido cuyo objetivo es consolidar un protocolo científico, abierto y explicable para la evaluación preventiva del riesgo de incendios forestales.

La presente hoja de ruta establece una visión orientativa para su evolución durante la próxima década. Su finalidad es coordinar el desarrollo metodológico, tecnológico y científico del protocolo, promoviendo una implantación progresiva basada en evidencia y colaboración institucional.

14.2 Fase I — Fundación (2026)

Objetivos:

- Publicación del FireRank White Paper v1.0.
- Definición oficial del FireRank Protocol v1.0.
- Desarrollo del primer prototipo funcional.
- Creación del FireRank Variable Model.
- Inicio del FireRank Living Lab en La Vera.
- Primeras validaciones de campo.
- Constitución de la comunidad científica inicial.

Resultado esperado:

Disponer de un protocolo completamente documentado y una primera implementación funcional.

14.3 Fase II — Consolidación (2027–2028)

Objetivos:

- Validación en diferentes ecosistemas de Extremadura.
- Integración de nuevas fuentes de información.
- Entrenamiento del modelo híbrido.
- Publicación de los primeros artículos científicos.
- Desarrollo de la API FireRank.
- Inicio del programa FireRank Compliance.

Resultado esperado:

Disponer de un protocolo validado regionalmente y reconocido por la comunidad técnica.

14.4 Fase III — Expansión Nacional (2028–2030)

Objetivos:

- Extensión progresiva al conjunto de la Península Ibérica.
- Adaptación a distintos ecosistemas mediterráneos y atlánticos.
- Desarrollo de nuevos FireRank Living Labs.
- Integración con plataformas SIG y sistemas institucionales.
- Colaboración con administraciones públicas.

Resultado esperado:

Consolidar FireRank como metodología de referencia para la evaluación preventiva del riesgo de incendios forestales en la Península Ibérica.

14.5 Fase IV — Internacionalización (2030–2032)

Objetivos:

- Adaptación metodológica a nuevos biomas.
- Validaciones en países mediterráneos.
- Colaboración con universidades y organismos internacionales.
- Publicación de nuevas versiones del protocolo.
- Creación de grupos de trabajo internacionales.

Resultado esperado:

Transformar FireRank en un protocolo internacional adaptable a diferentes contextos ecológicos.

14.6 Fase V — Madurez (2032–2035)

Objetivos:

- Consolidación de FireRank Foundation.
- Ampliación del FireRank Research Network.
- Evolución hacia modelos de aprendizaje continuo.
- Certificación de implementaciones compatibles.
- Revisión periódica del protocolo.

Resultado esperado:

Disponer de un estándar ampliamente reconocido para la evaluación preventiva del riesgo de incendios forestales.

14.7 Principios de evolución

Toda evolución del protocolo deberá respetar los siguientes principios:

- estabilidad metodológica;
- compatibilidad entre versiones;
- evidencia científica;
- transparencia;
- explicabilidad;
- trazabilidad;
- interoperabilidad.

La innovación nunca deberá comprometer estos principios.

14.8 Visión de futuro

FireRank aspira a convertirse en un lenguaje común para describir el riesgo de incendios forestales.

Su éxito no dependerá únicamente de la precisión de sus modelos, sino de su capacidad para generar confianza, facilitar la cooperación entre instituciones y contribuir a una gestión preventiva basada en conocimiento verificable.

La presente hoja de ruta constituye un compromiso con esa visión y un marco para orientar el desarrollo futuro del protocolo.

Capítulo 15

Declaración de La Vera

Un compromiso con la prevención basada en evidencia

Los incendios forestales representan uno de los mayores desafíos para la conservación del patrimonio natural, la protección de las personas y el desarrollo sostenible de los territorios.

Su prevención requiere conocimiento, cooperación y herramientas capaces de transformar la información disponible en decisiones útiles y transparentes.

FireRank nace con esa finalidad.

No como un algoritmo.

No como una aplicación informática.

Sino como un protocolo abierto para comprender mejor el territorio y facilitar una gestión preventiva fundamentada en evidencia científica.

FireRank reconoce que ningún modelo puede eliminar por completo la incertidumbre.

Por ello, sitúa la transparencia, la explicabilidad y la mejora continua en el centro de su metodología.

El protocolo está concebido para evolucionar mediante la colaboración entre propietarios, técnicos, administraciones, universidades, empresas y centros de investigación.

Su desarrollo responde a la convicción de que el conocimiento compartido constituye la herramienta más eficaz para afrontar un problema que afecta a toda la sociedad.

La elección de La Vera como primer territorio de validación simboliza el compromiso de iniciar este camino desde un entorno real, diverso y representativo, donde la innovación pueda contrastarse con la experiencia de quienes conocen y gestionan el territorio.

FireRank aspira a convertirse en un lenguaje común para la evaluación del riesgo de incendios forestales.

Un lenguaje abierto.

Comprensible.

Auditable.

Reproducible.

Y en permanente evolución.

Invitamos a investigadores, administraciones públicas, profesionales del sector forestal, empresas, propietarios y organizaciones de cualquier país a participar en el desarrollo del protocolo, aportar conocimiento, validar sus resultados y contribuir a una metodología compartida al servicio de una gestión forestal más resiliente.

La protección de los bosques no depende únicamente de la tecnología.

Depende de la capacidad colectiva para comprender el territorio, anticipar el riesgo y actuar antes de que el incendio se produzca.

Ese es el compromiso que inspira FireRank.

Epílogo

El presente Libro Blanco constituye la primera especificación pública del FireRank Protocol.

No representa un documento cerrado, sino el punto de partida de una metodología abierta a la revisión, la validación y la mejora continua.

Las futuras versiones incorporarán nuevos conocimientos científicos, nuevas tecnologías y nuevas experiencias derivadas de su aplicación en diferentes territorios.

La estabilidad del protocolo y su evolución basada en evidencia constituyen los principios que permitirán a FireRank mantener su utilidad y relevancia a lo largo del tiempo.

Con este documento se inicia un proyecto cuyo propósito trasciende el desarrollo de una herramienta tecnológica.

Su verdadera aspiración es contribuir a una cultura de prevención donde la inteligencia artificial, el conocimiento forestal y la cooperación institucional trabajen conjuntamente para proteger el territorio frente a uno de los mayores desafíos ambientales de nuestro tiempo.

Agradecimientos

Este Libro Blanco reconoce la contribución del conocimiento acumulado por la comunidad científica, los profesionales de la gestión forestal, los servicios de prevención y extinción de incendios, las administraciones públicas y todas aquellas personas que, mediante su trabajo e investigación, han contribuido al avance de la prevención y gestión de los incendios forestales.

FireRank se concibe como un proyecto abierto a esa comunidad y comprometido con el desarrollo de soluciones basadas en evidencia, transparencia y colaboración.

Este documento desea expresar un reconocimiento muy especial a **José Antonio**, vecino, amigo y sabio del bosque, cuya profunda comprensión del territorio, fruto de una vida de observación, experiencia y respeto por la naturaleza, fue el gran catalizador de este proyecto.

Su manera de interpretar el monte recordó a los impulsores de FireRank que la mejor tecnología solo cobra sentido cuando es capaz de aprender de quienes llevan toda una vida leyendo el paisaje. Muchas de las preguntas que hoy intenta responder este protocolo nacieron, antes que de un algoritmo, de conversaciones compartidas, paseos entre árboles y de la sabiduría transmitida por alguien que entendía el bosque no solo como un ecosistema, sino como un legado que merece ser protegido.

A él, y a todas las personas que conservan y transmiten el conocimiento del territorio, dedicamos este primer Libro Blanco de FireRank.

FireRank White Paper v1.0

Primera edición

La Vera (Cáceres, España)

2026