

INFORME TÉCNICO

Sistemas de alerta de tormentas eléctricas: tecnologías de detección, clasificación normativa y desempeño medido

Qué eran las «clases» de detectores de las normas EN 50536:2011 e IEC 62793:2016, por qué la edición vigente de la norma (IEC 62793:2020) las eliminó, qué fenómeno físico mide cada tecnología de detección —con sus limitaciones intrínsecas— y qué desempeño reporta la literatura publicada.

VERSIÓN 1.1 · 21 AGOSTO 2026 · 9 SECCIONES · 27 REFERENCIAS

96 %

de avisos exitosos en el área objetivo — red LLS, método de la propia IEC 62793

≥20 min

de anticipación en más de 81 % de los avisos

40–80 %

FAR para avisos basados en EFM — revisión KNMI

Resumen. Las normas de sistemas de alerta de tormentas clasificaron a los detectores en «clases» (I–IV en EN 50536:2011; A–D en IEC 62793:2016) según la fase del ciclo de vida de la tormenta que cada tecnología alcanza a detectar — no según su desempeño. La edición vigente, IEC 62793:2020, eliminó expresamente esas clases y las reemplazó por una descripción neutra de tres arquitecturas y por métricas medibles: probabilidad de detección (POD), tasa de falsas alarmas (FAR) y tiempo de anticipación (LT). Esta revisión reconstruye esa trayectoria normativa a partir de los textos oficiales, describe el principio físico y las limitaciones de cada tecnología —medidor de campo electrostático, sensor puntual, red de localización de rayos—, y reúne el desempeño reportado por la literatura, con énfasis en las fuentes sin interés comercial (institutos meteorológicos y universidades). Las tecnologías no son comparables entre sí a nivel de sensor, porque miden fenómenos físicos distintos; lo comparable es la función de aviso que prestan, y ese es el nivel en el que la norma vigente y la literatura las evalúan. El documento cierra con los límites de la evidencia y con criterios de evaluación aplicables a cualquier oferta comercial.

Palabras clave: alerta de tormentas · IEC 62793 · EN 50536 · molino de campo eléctrico · sistema de localización de rayos (LLS) · probabilidad de detección · falsas alarmas · tiempo de anticipación

MATERIAL DE REFERENCIA PARA GERENCIAS DE SEGURIDAD Y SUPERINTENDENCIAS DE OPERACIONES · INCORPORA REVISIÓN TÉCNICA EXTERNA (VERSIÓN 1.1)

1

INTRODUCCIÓN

2020

edición vigente de la IEC 62793 — la de las clases quedó cancelada

0

clases en la norma vigente: la ed. 2020 las eliminó

Comprar un detector **no** es comprar un aviso: el aviso lo produce el sistema, no el instrumento suelto.

01

Introducción

En licitaciones y fichas técnicas de sistemas de alerta de tormentas todavía es común leer que un detector es «Clase A según IEC 62793». La frase suena a certificación de máxima categoría. Tiene un problema verificable: la edición vigente de esa norma, IEC 62793:2020, no contiene ninguna clase. El propio prólogo de la norma lista los cambios respecto a la edición anterior y uno de ellos es, textualmente, *“in Clause 5, classes of TWS have been deleted”* — las clases de sistemas de alerta de tormentas fueron eliminadas^[1].

Antes de avanzar conviene fijar el vocabulario, porque la confusión comercial explota justamente su mezcla. La norma distingue dos niveles. Las tecnologías —el medidor de campo, el sensor puntual, la red de localización— **detectan**: son «detectores de tormenta» (IEC 62793:2020, cláusula 5)^[1]. El **aviso** lo produce el sistema: la detección más un algoritmo que la convierte en decisión sobre un área definida. Eso es un «sistema de aviso de tormentas» (TWS) — la adopción española de la norma se titula, literalmente, *Protección contra el rayo. Sistemas de aviso de tormentas*^[3]. Ningún instrumento, por sí solo, es un sistema de alerta; comprar un detector no es comprar un aviso. Este documento usa «alerta» y «aviso» como sinónimos operativos, y reserva «detección» para lo que hacen los instrumentos.

Ese desencuentro entre el lenguaje comercial y el texto normativo es el punto de partida de esta revisión. Para resolverlo hay que responder tres preguntas en orden: qué clasificaban exactamente las clases (sección 3), qué puso la norma vigente en su lugar (sección 4), y qué mide en realidad cada tecnología — porque solo desde el principio físico se entienden sus limitaciones y por qué la comparación correcta no es entre sensores sino entre avisos (secciones 5 y 6).

02

Una tormenta tiene cuatro fases medibles, y cada una emite señales distintas

La base física es simple y las dos ediciones de la IEC 62793 la describen igual^[1,2]. Una celda de tormenta se electrifica antes de producir su primer rayo: las colisiones entre granizo pequeño y cristales de hielo separan carga dentro de la nube, y esa carga genera un campo electrostático medible en el suelo (fase 1, inicial). Minutos después aparecen las primeras descargas, casi siempre dentro de la nube (fase 2, crecimiento). Luego la tormenta madura y produce rayos nube-tierra (CG) e intra-nube (IC) a su máxima tasa (fase 3, madura). Al final la actividad decae hasta cesar (fase 4, disipación).

Cada fase emite señales físicas distintas: la fase 1 solo produce un campo casi estático de corto alcance; las fases 2 a 4 producen, además, pulsos electromagnéticos que viajan cientos o miles de kilómetros. Qué señal explota cada tecnología determina qué fases puede ver — y ese fue, precisamente, el criterio de las clases.

3

LAS CLASES

A–D

clases de la IEC 2016 (I–IV en EN 50536) — por fase, no por calidad

>90 %

DE exigida solo a la Clase C, la única con requisito numérico

La clase describía qué fase alcanza a ver un sensor, nunca su calidad ni su desempeño.

03

Las clases ordenaban a los sensores por la fase que alcanzan a ver — no por su calidad

La primera norma europea de sistemas de alerta de tormentas, EN 50536:2011, introdujo una clasificación de detectores en cuatro clases (I a IV)^[3]. Cuando la IEC la convirtió en norma internacional —IEC 62793:2016— renombró las clases con letras, A a D^[2]. El criterio de ambas era el mismo: **qué fases del ciclo de vida de la tormenta puede detectar el equipo**.

CLASE (IEC 2016)	EN 50536	FASES QUE DETECTA	TECNOLOGÍA TÍPICA	LECTURA PRÁCTICA
A	I	1–4 (desde la electrificación)	Medidor de campo electrostático (molino de campo, EFM)	En teoría avisa antes del primer rayo, pero solo a 5–20 km, sin ubicar la tormenta ni distinguir descarga a tierra de descarga en nube.
B	II	2–4 (desde la primera descarga IC)	Sensores VHF (~200 km)	Ve la tormenta desde su primera descarga en nube y mapea su extensión.
C	III	3–4 (rayos nube-tierra)	Redes LF de localización (LLS)	Ubica cada rayo a tierra. La propia norma exigía a esta clase eficiencia de detección >90 % y precisión <1 km — requisitos que las otras clases no tenían.
D	IV	3 (limitada)	Detectores LF simples	Cuenta rayos cercanos con discriminación pobre frente a interferencia electromagnética.

QUÉ FASE VE CADA CLASE · taxonomía IEC 62793:2016, hoy eliminada

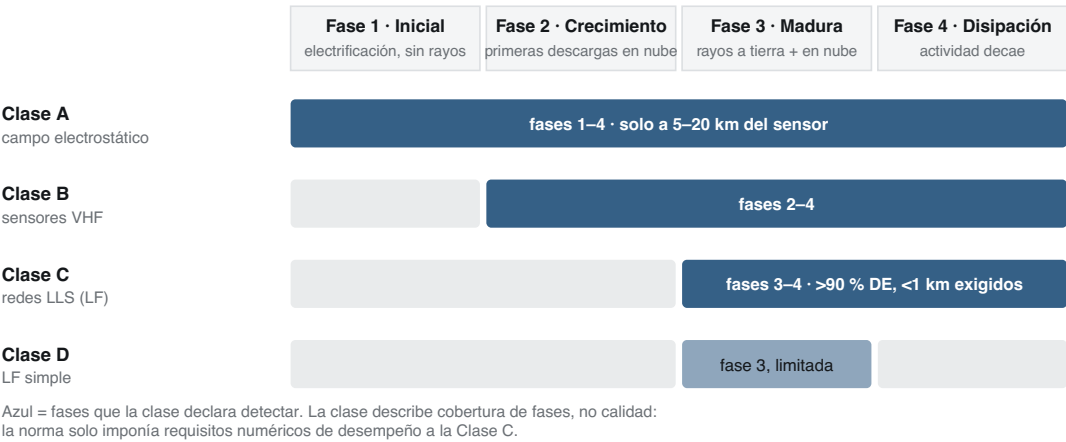


Figura 1. Las clases de IEC 62793:2016 (cláusula 5 y anexo B, edición cancelada en 2020)^[2]. Elaboración propia sobre el texto de la norma.

Dos precisiones importan aquí. La primera: **la clase nunca fue una medida de desempeño ni una certificación**. Un detector «Clase A» no era un detector mejor; era un detector que declara ver también la fase electrostática. De hecho, la única clase a la que la norma de 2016 exigía cifras concretas de desempeño era la C — las redes de localización—, con eficiencia de detección (DE) superior al 90 % y precisión mejor que 1 km^[2]. La segunda: la taxonomía envejeció mal. Las redes LF modernas ya no ven solo rayos a tierra: tras la modernización de 2013 de la red nacional de EE. UU. (NLDN), esa red detecta también entre 50 y 60 % de las descargas intra-nube^[11] — es decir, ve la fase 2 que la Clase C suponía fuera de su alcance. Una lectura posible, no explicitada por el comité, es que ese desfase entre las cajas de la taxonomía y la tecnología real contribuyó a su eliminación.

4

NORMA
VIGENTE

3

arquitecturas que descri-
be la ed. 2020, sin jerar-
quía

POD·FAR·LT

las métricas medibles que
reemplazaron a las clasesSi una oferta invoca una
«clase», está citando una
edición de la norma
cancelada en 2020.

04

La edición vigente eliminó las clases y puso métricas medibles en su lugar

IEC 62793:2020 (edición 2, publicada el 21 de septiembre de 2020) cancela y reemplaza a la edición 2016. Es la edición vigente en 2026 y su comité (IEC TC 81, protección contra el rayo) no tiene una tercera edición en curso publicada^[1]. El prólogo enumera los cambios técnicos significativos; el primero de fondo es la eliminación de las clases en la cláusula 5.

En su lugar, la norma describe hoy tres arquitecturas, sin jerarquía entre ellas: (a) un detector local —por ejemplo un medidor de campo electrostático—, (b) una red de detectores locales interconectados, y (c) un sistema de localización de rayos (LLS), remitiendo para este último a la norma IEC 62858^[4]. Y reemplaza la tabla de clases por una matriz de **parámetros medibles por tecnología**: probabilidad de detección (POD), tasa de falsas alarmas (FAR), tiempo de anticipación (*lead time*, LT), alarmas efectivas, fallas de aviso. La norma reconoce lo que cada arquitectura aporta: el detector local puede avisar antes de la primera descarga; el LLS ofrece visión uniforme de área amplia, localización de cada rayo, seguimiento de tormentas y mayor anticipación cuando la tormenta se aproxima. También anota una limitación del sensor electrostático: puede no distinguir una descarga a tierra de una descarga en nube^[1].

LA NORMATIVA, EN EL TIEMPO · de las clases a las métricas medibles

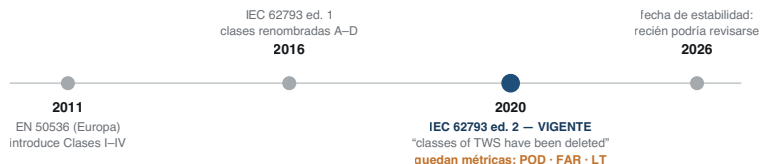


Figura 2. Trayectoria normativa, verificada contra el catálogo y los textos oficiales de IEC (webstore.iec.ch, publicación 64935)^[1,2,3]. Todo material que hoy invoque una «clase» está citando las ediciones de 2011 o 2016, ambas canceladas.

Vale la pena tener a mano el vocabulario completo que la norma define, porque es el idioma en el que debe exigirse cualquier evaluación:

PARÁMETRO (IEC 62793:2020)	QUÉ ES	LECTURA PRÁCTICA
TA / SA	Área objetivo (lo que se protege) y área envolvente donde un rayo ya es peligro.	Definirlas es el primer paso: sin TA y SA acordadas, ningún POD o FAR significa nada.
MA / CA	Área monitoreada para emitir la alarma, y área donde el equipo tiene desempeño suficiente.	La MA debe caber dentro de la CA del sistema — pregunta clave para sensores de corto alcance.
POD (= 1 – FTWR)	Alarmas efectivas sobre el total de situaciones con rayo en la SA.	La métrica de seguridad: cuánto del peligro real fue avisado.
POD _x	POD contando solo alarmas con anticipación ≥ x minutos.	La métrica operativa: un aviso sin tiempo para actuar no protege (p. ej. POD ₁₀).
LT (lead time)	Tiempo entre el inicio de la alarma y el primer rayo en la SA.	Toda acción preventiva debe caber dentro del LT.
FAR	Alarmas falsas sobre el total de alarmas. «Falsa» = sin actividad de tormenta en la MA.	Definición laxa: una alarma sin rayo en el objetivo no cuenta como falsa si hubo actividad en la MA. Exigir el método al comparar.
EAR / NEA	Proporción de alarmas efectivas; alarmas sin rayo en la SA durante su duración.	Complementan a la FAR para ver cuánta alarma «sobró».
TAD / TTC	Duración total de la alarma; tiempo entre el último rayo y su levantamiento.	Aquí vive el costo de producción: horas de parada por episodio.
LA (solo LLS)	Precisión mediana de localización.	La IEC 62858 exige a una LLS DE ≥ 80 % y LA < 500 m para que sus densidades de rayos sean utilizables en evaluación de riesgo ^[20] .
LRC (solo sensor electrostático)	Condiciones de campo eléctrico suficientes para esperar un rayo en la SA.	El único parámetro exclusivo del EFM: riesgo de primer rayo encima, sin ubicación.

Selección de la cláusula 3 y la tabla 1 de IEC 62793:2020^[1]. El «dwell time» del uso coloquial corresponde al TTC de la norma.

Un punto adicional para leer fichas técnicas: **la IEC 62793 no certifica productos**. Define características, métodos de evaluación y ensayos de laboratorio (su anexo E, normativo, describe cómo ensayar detectores). No existe un esquema de certificación IEC para esta norma; las declaraciones de mercado son auto-declaraciones de conformidad del fabricante. Varias fichas técnicas comerciales de detectores electrostáticos declaran hoy «Clase A» citando expresamente la edición 2016^[14], y el mismo argumento se usó antes con la EN 50536 («Clase I»). No es un error describir una tecnología con la taxonomía que la favorecía; sí es un error de evaluación leer esa clase como si fuera una categoría de calidad vigente.

5

PRINCIPIOS FÍSICOS

5–20 km

alcance del medidor de campo (EFM): sin dirección ni distancia

1/d³

caída del campo con la distancia — el origen del corto alcance

El campo eléctrico **no ubica** la amenaza; la red localiza y sigue cada rayo, uno por uno.

05

Principios físicos: qué mide cada tecnología, y qué le impide ver el resto

Un medidor de campo electrostático y una red de localización de rayos no miden lo mismo. Uno mide un campo casi estático generado por carga separada en la nube; la otra, los pulsos electromagnéticos de descargas que ya ocurrieron. Compararlos «sensor contra sensor» carece de sentido físico — son instrumentos de magnitudes distintas. Lo que sí es comparable es la **función que prestan**: el aviso. Sobre un área definida, cualquier sistema puede evaluarse con las mismas tres preguntas: cuántos episodios avisó a tiempo (POD), cuántas alarmas sobraron (FAR) y con cuánta anticipación (LT). Ese es exactamente el nivel en el que evalúan la IEC 62793:2020 y la literatura^[1,8]. Pero para interpretar esas cifras hay que entender primero de dónde salen las limitaciones de cada instrumento.

5.1 · Medidor de campo electrostático (molino de campo, EFM)

Principio. Mide la componente vertical del campo eléctrico casi estático en un punto del suelo. Con buen tiempo, ese campo vale 100–200 V/m; cuando una nube se electrifica encima, el campo invierte su polaridad y crece por encima de 1 000 V/m durante los minutos previos al primer rayo^[8]. Es el único instrumento que puede ver la fase 1.

Limitaciones que se derivan del principio. El campo observado es la superposición de todas las cargas en la atmósfera, pesadas por el inverso del cubo de la distancia. De ahí salen cuatro consecuencias, todas documentadas:

- **Alcance corto.** La dependencia 1/d³ hace que el sensor vea muy poco más allá de 5–10 km (la norma de 2016 le atribuía ~20 km típicos)^[2,8]. Una tormenta que se aproxima desde 30 km es invisible hasta que está casi encima.
- **Sin dirección ni distancia.** Un campo escalar medido en un punto no distingue «carga fuerte lejos» de «carga débil cerca»: el instrumento no informa dónde está la amenaza ni hacia dónde se mueve^[5].
- **Señales espurias.** Cualquier carga cercana produce la misma firma: polvo en suspensión, nieve, llovizna electrificada, rocío de mar, gases de escape^[8]. La propia IEC 62793:2020 pone la nieve y la arena como ejemplos de alarma falsa^[1]. El entorno define cuánto ruido: un tajo abierto con polvo es un entorno hostil para este principio de medición.
- **El umbral es un dilema.** El aviso se dispara cuando el campo cruza un umbral (típicamente ~2 kV/m). Umbral bajo: más detección y más falsas alarmas; umbral alto: lo contrario. La literatura reporta que con el umbral usual la POD puede ser alta pero la FAR también lo es^[8]. Y hay un límite duro: no todo rayo viene precedido por un aumento del campo en superficie^[9].

5.2 · Sensor puntual óptico + radiofrecuencia

Principio. Detecta descargas ya ocurridas exigiendo coincidencia entre el pulso óptico y la emisión de radio, y estima la distancia a partir de la amplitud de la señal. **Limitaciones:** el canal óptico se bloquea con montañas y edificios; el error de la distancia estimada es de 10 a 40 %; no ve la fase 1 ni puede mapear o seguir una tormenta^[8]. Su papel razonable es el de indicador local de bajo costo, no el de sistema de alerta de una operación.

5.3 · Red de localización de rayos (LLS)

Principio. Varios sensores separados por 100–350 km miden el pulso electromagnético de cada descarga (banda 1–500 kHz, que se propaga sobre la superficie terrestre). Un procesador central combina los tiempos de llegada (TOA) —y, en los sensores que lo miden, el ángulo de llegada (MDF)— para calcular la posición de cada rayo con precisión de cientos de metros^[8,10]. Las redes globales usan el mismo principio en banda más baja (<50 kHz, reflejada en la ionósfera) y detectan a miles de kilómetros con menor precisión.

Limitaciones que se derivan del principio.

- **Ciega a la fase 1.** Una red solo ve descargas: si la tormenta nace exactamente encima del punto a proteger, el primer rayo no tiene aviso previo. Este es el escenario que históricamente se usó para justificar añadir un molino de campo; la sección 8 examina por qué esa vía dejó de ser practicable y qué la cubre hoy.
- **El desempeño es propiedad de la red, no del sensor.** La eficiencia de detección depende del número de sensores, de la separación entre ellos, y del método de localización. El modelo clásico de Diendorfer lo cuantifica (Figura 3): la misma red de 6 sensores detecta 96,5 % de los rayos si sus sensores miden tiempo y ángulo, y 76,6 % si solo miden tiempo (que exige 4 sensores por rayo); cuando un sensor sale de servicio, la primera baja a 94,5 % y la segunda cae a 60,3 %^[10]. Dos ofertas «de red» pueden por tanto rendir muy distinto según su diseño — es una pregunta de compra, no un detalle.
- **Descargas débiles y clasificación.** Los rayos de corriente baja pueden no alcanzar el umbral de suficientes sensores, y la separación entre descarga a tierra y descarga en nube no es perfecta. La verificación independiente más reciente de la red de EE. UU. midió 92 % de detección de strokes a tierra con 92 % de acierto de clasificación (98 % en primeros strokes negativos)^[12]; con rayos provocados por cohete se midió 100 % a nivel de flash y precisión mediana de 173 m^[13]. Estos números existen porque la tecnología lleva décadas siendo auditada con datos de verdad-terreno — torres instrumentadas, cohetes, cámaras de alta velocidad^[10,12,13].
- **Cobertura intra-nube parcial en banda LF.** Una red LF moderna detecta del orden de la mitad de las descargas intra-nube (50–60 % en la red de EE. UU.)^[11]; el mapeo completo de la actividad en nube requiere sensores VHF, de alcance mucho menor.

5

PRINCIPIOS
FÍSICOS

5–20 km

alcance del medidor de campo (EFM): sin dirección ni distancia

 $1/d^3$

caída del campo con la distancia — el origen del corto alcance

El campo eléctrico **no ubica** la amenaza; la red localiza y sigue cada rayo, uno por uno.

Dos notas de arquitectura completan el cuadro. Primera: una red regional puede combinarse con una red global VLF en un solo algoritmo de localización, de modo que la red global respalda a la local ante la caída de un sensor y observa las tormentas mucho antes de que entren al área local — la implementación documentada de esta fusión es la de Vaisala, que combina en un mismo procesador las mediciones de sensores locales LS7002 y de los sensores globales GLD360^[15]. Segunda: esa visión lejana tiene valor de aviso para el problema más difícil de todos — la primera descarga del día. Si una tormenta aislada ya produjo su primer rayo sobre una cordillera vecina, las mismas condiciones meteorológicas suelen estar presentes sobre el sitio de interés, y ese dato lejano permite escalar el estado de alerta local antes de que el peligro sea propio^[16]. El argumento proviene de un memo técnico de un especialista en meteorología de rayos (no publicado); se consigna con esa procedencia.

EL DESEMPEÑO ES PROPIEDAD DEL DISEÑO DE LA RED · modelo de 6 sensores · azul = tiempo+ángulo · ámbar = solo-tiempo

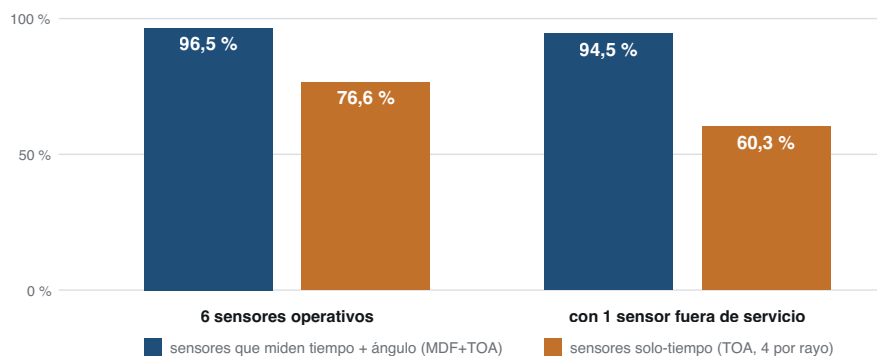


Figura 3. Eficiencia de detección de rayos nube-tierra en una red modelo de 6 sensores con línea base de 200 km (Diendorfer, IX SIPDA, 2007, tabla 1)^[10]. La figura no compara al EFM con la red: compara dos diseños de red entre sí, e ilustra que en los sistemas de localización el desempeño —y su resiliencia ante la caída de un sensor— es una propiedad del diseño que debe preguntarse y verificarse, no asumirse.

HASTA DÓNDE VE CADA TECNOLOGÍA · escala logarítmica

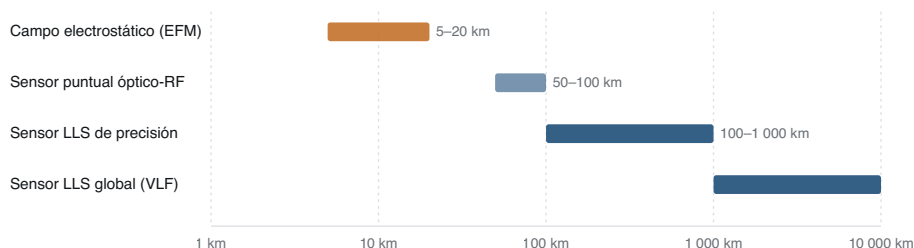


Figura 4. Alcance típico por tecnología^[2,8]. La escala es logarítmica: entre el EFM y una red global hay tres órdenes de magnitud. La anticipación de una red no viene de predecir la fase 1, sino de ver la tormenta aproximarse desde lejos y seguirla; la del EFM viene de la fase 1, pero solo para tormentas que nacen encima.

6

DESEMPEÑO
MEDIDO

96 %

avisos exitosos de una red
LLS — método de la pro-
pia IEC 62793

≥20 min

de anticipación en más de
81 % de esos avisos

40–80 %

FAR de avisos por campo
eléctrico (EFM) — revisión
KNMIEl medidor de campo
avisa mucho y avisa
mal; la red convierte
cada tormenta en objeto
seguido.

o 6

Medido como aviso, así rinde cada tecnología

Con los principios claros, las cifras publicadas se leen sin sorpresa. Se citan aquí los estudios con datos de tormentas reales; entre ellos, se da prioridad a los de instituciones sin producto que vender.

Medidores de campo. La revisión del instituto meteorológico de los Países Bajos (KNMI) sobre la literatura y la experiencia operativa de aeropuertos concluyó: POD de 20 a 60 % y FAR de 40 a 80 % para avisos basados en EFM^[5]. En España, mediciones sobre tormentas reales dieron, según el método, POD de 37 a 47 % y FAR de 78 a 88 %, con anticipaciones medias de 6,5 a 8 minutos^[6]. Y un estudio en Florida encontró algo más incómodo: agregar molinos de campo a una red de detección **empeoró** el desempeño conjunto del sistema de alerta respecto de usar la red sola (POD de 16–38 % combinados, contra 67 % de la red sola), porque en su muestra el 89 % de las tormentas llegó ya madura desde fuera del alcance de los molinos^[7]. El experimento conceptual se repitió en los Andes colombianos con datos locales: en Medellín (1 600 m, orografía compleja), la red de localización sola con criterios de seguimiento de celdas dio POD 51 % y FAR 41 %; al añadirle todos los criterios de campo eléctrico, la FAR subió a 85 % (204 alarmas, 164 falsas), y el mejor ajuste combinado quedó en POD 68 % y FAR 46 %^[24]. La montaña no rescató al principio electrostático.

Dos adiciones recientes completan el cuadro sin cambiarlo. El estado del arte del procesamiento de señal —un sensor de campo micro-electromecánico en la Torre de Cantón, con filtrado adaptativo, análisis tiempo-frecuencia y verdad-terreno de una red validada— logró en 2023 su mejor resultado con POD 77 %, FAR 40 % y 22 minutos de anticipación media^[25]; los propios autores reconocen que la FAR sigue alta y que el sensor no informa posición, y una relectura de sus cifras —según cómo se cuenten los días sin rayos que el método marcó con aviso— eleva la FAR efectiva hacia el 70 % (M. J. Murphy, revisión técnica de este documento, agosto de 2026). En el otro extremo, la literatura contiene reclamos extraordinarios para el EFM —POD 91 % y FAR 8 % en Calcuta^[26]— cuyo método ilustra el problema de fondo: área de aviso de 17,5 km (mayor que el alcance físico del sensor), clima monzónico de tormenta casi diaria y verdad-terreno tomada de un detector puntual de consumo. Es exactamente el tipo de cifra que no resiste la pregunta por el método y las áreas (sección 8).

Redes de localización. Evaluada con la metodología de la propia IEC 62793 sobre 105 sitios durante cinco años, una red LLS europea logró más de 96 % de avisos exitosos en el área objetivo, y más de 81 % de avisos con anticipación de al menos 20 minutos^[9]. La misma referencia reporta la experiencia operativa con sensores de campo: falsas alarmas por tormentas de polvo y arena, y fallas de aviso por mantenimiento deficiente^[9].

Las tres tecnologías, lado a lado. Existe una única comparación simultánea de las tres tecnologías conocida por esta revisión, y proviene de un informe técnico interno de un fabricante de redes — se incluye por transparencia documental, con esa procedencia declarada. Durante 14 semanas de 2015, en un campo de pruebas en Colorado, operaron a la vez un molino de campo, un sensor puntual óptico-RF y la red nacional de EE. UU., con la misma área de interés (10 km de radio) y el mismo criterio de anticipación (≥2 minutos). Resultado: la red logró una probabilidad de detección unos 30 puntos porcentuales mayor que el molino, con una tasa de falsas alarmas 5 puntos menor; el sensor puntual generó mayormente falsas alarmas^[15]. El detalle que da peso al resultado es que las condiciones favorecían al molino: sitio despejado, sin líneas eléctricas cercanas y sin nieve durante el periodo. Su límite es el evidente: no está publicado ni revisado por pares, y su autor tiene producto en la comparación.

Para el sensor puntual, sin embargo, ya existe evaluación independiente: un sistema comercial de «predicción de rayos» —cuyo fabricante declara más de 4 000 unidades en operación, en uso por equipos deportivos profesionales e instituciones públicas— fue evaluado durante cinco años (2020–2024) en una instalación deportiva de Florida contra la red de localización de EE. UU.: más de 700 avisos analizados en un radio de 4 km, con alta probabilidad de detección pero también alta tasa de falsas alarmas, y un índice de éxito crítico consecuentemente bajo, variable año a año^[27]. El patrón coincide con el del experimento de Colorado: el sensor puntual avisa mucho, y por eso mismo avisa mal.

DESEMPEÑO MEDIDO, ESTUDIO POR ESTUDIO · azul = probabilidad de detección (POD) · ámbar = tasa de falsas alarmas (FAR) · tono claro = rango reportado

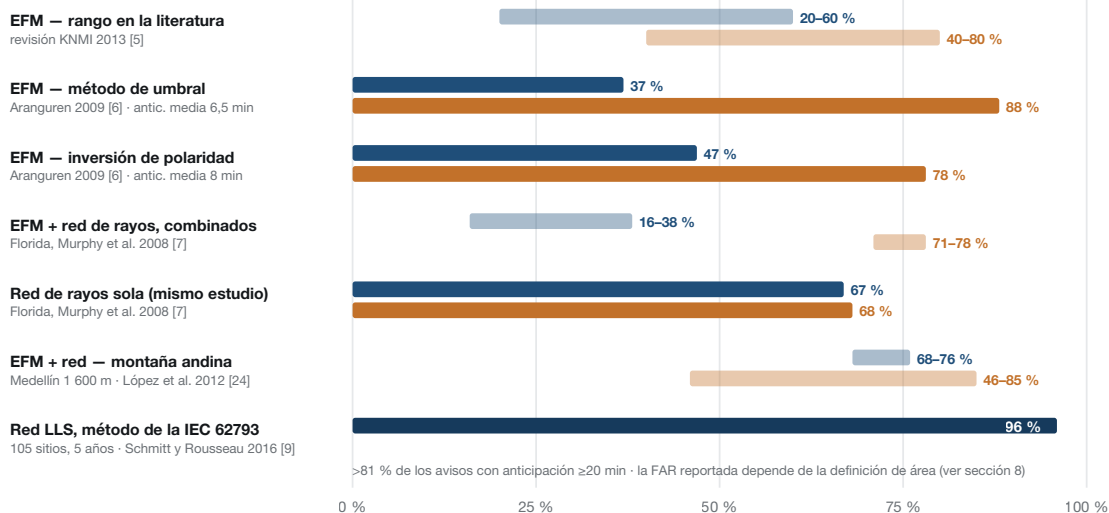


Figura 5. POD y FAR reportados por estudio. Las cifras **no son directamente comparables entre estudios** — cada uno usa áreas de aviso, criterios de anticipación y climas distintos — pero la dirección es consistente en todos. Barras claras = rangos reportados.

La lectura práctica: el medidor de campo compra unos minutos de anticipación teórica a costa de operar la mayor parte del tiempo entre la falsa alarma y el aviso tardío; la red convierte cada tormenta en un objeto ubicado y seguido, y su anticipación sale de ver la tormenta acercarse desde decenas o cientos de kilómetros. **Las falsas alarmas no son una cifra académica:** la literatura de seguridad documenta que las evacuaciones repetidas e innecesarias erosionan la disposición de la gente a obedecer la siguiente alarma^[8].

6

DESEMPEÑO MEDIDO

96 %

avisos exitosos de una red LLS — método de la propia IEC 62793

≥20 min

de anticipación en más de 81 % de esos avisos

40–80 %

FAR de avisos por campo eléctrico (EFM) — revisión KNMI

El medidor de campo avisa mucho y avisa mal; la red convierte cada tormenta en objeto seguido.

07

Panorama 2026: qué redes de precisión existen y qué territorio cubren

La pregunta natural que sigue es dónde existe, de hecho, cobertura de precisión. El censo siguiente refleja el estado a agosto de 2026, sobre la base de los sitios de los operadores y la literatura de validación; conviene leerlo con dos advertencias. Primera: las cifras «declaradas» por los operadores son consistentemente más optimistas que las validaciones independientes — la red sudafricana, por ejemplo, declara 90 % de detección y 500 m de precisión, y la evaluación académica de 2022 midió 84,9 % y 59–124 m sobre Johannesburgo^[18] — por eso la tabla distingue ambas. Segunda: el mapa de operadores se movió mucho en los últimos años (Earth Networks pasó a AEM; la red BLIDS de Siemens pasó a OVE/ALDIS en 2023; la red de TOA Systems fue adquirida por AccuWeather en 2025), así que la vigencia del operador es en sí misma un dato a verificar al contratar^[22].

RED DE PRE-CISIÓN	COBERTURA (2026)	OPERADOR	SENSORES · TECNOLOGÍA	DESEMPEÑO PUBLICADO
NLDN	EE. UU. continental (+200–300 km costa afuera)	Vaisala (privado)	>100 · LF, MDF+TOA	Declarado: DE flash CG >95 %, LA ~84 m ^[21] . Validación por pares continua desde los años 90 ^[12,13] .
CLDN (con NLDN forma la NALDN)	Canadá	ECCC (gobierno)	~80 · LF Vaisala, MDF+TOA	Validación académica con 20 años de datos ^[22] .
EUCLID	Europa, ~31 países	Consortio de redes nacionales (ALDIS, Météorage, BLIDS, AEMET, NORD-LIS...)	~168 · LF, MDF+TOA	Validado: DE flash CG ~96–98 %, LA ~100 m en el centro de la red ^[17] .
LINET	Europa, 17 países	nowcast GmbH (datos del servicio meteorológico alemán)	~90 · VLF/LF, TOA	Validado 2009: DE ≥95 %, LA ~150 m; el operador declara hoy ~75 m ^[22] .
ENTLN	~100 países, densidad muy variable	Earth Networks / AEM (privado)	>1 600 · banda ancha, TOA	Declarado: DE hasta 95 % y LA <100 m donde la red es densa. Validado en Florida con rayos provocados: DE flash CG 94–97 % ^[19] .
JLDN	Japón	Franklin Japan (privado)	31 · LF, MDF+TOA	Declarado: error medio <300 m; conformidad IEC 62858 auto-declarada ^[22] .
KLDN	Corea del Sur	KMA (gobierno)	~21 · LF + VHF	Validado: DE CG ~90 %, LA 150–250 m ^[22] .
ADTD / CNLDN	China continental	CMA (gobierno)	>400 · TOA+MDF (desarrollo propio)	Literatura: DE flash ~90 %, LA 300–500 m ^[22] .
ILLN	India	IITM / MoES (gobierno)	83–112 · tecnología EN-TLN	Declarado: LA <500 m; validaciones académicas 2021 y 2025 ^[22] .
GPATS · WZ-TLN	Australia	GPATS (privado) · DTN APAC	TOA propia · integrada con ENTLN	Proveedores de datos del Bureau of Meteorology; desempeño público escaso ^[22] .
SALDN	Sudáfrica	SAWS (gobierno)	~24 · LF Vaisala, MDF+TOA	Declarado: DE 90 %, LA 500 m. Validado 2022: DE flash 84,9 %, LA 59–124 m (Johannesburgo) ^[18] .
RINDAT	Brasil sur, sureste y centro-oeste	CEMIG + FURNAS + INPE + SIMEPAR	~34 · LF Vaisala, MDF+TOA	Operativa desde los años 90; documentación pública de desempeño limitada ^[22] .
Keraunos	Colombia (parcial: Venezuela, Panamá, Caribe)	Keraunos SAS (privado)	~20 · LINET, TOA	Única red de precisión andina; validaciones académicas 2016 y 2021 ^[22] .

Las redes globales de largo alcance son una categoría distinta — precisión kilométrica, cobertura planetaria — y completan el cuadro donde no hay red de precisión:

Tecnologías de detección, clasificación normativa y desempeño medido

8

EVIDENCIA

27

referencias; el peso recae en fuentes sin interés comercial

20–25 %

de las celdas nacen con un rayo a tierra: nadie avisa antes

Un molino de campo, hoy, entra solo como sistema subordinado: su señal jamás detiene la mina sola.

o 8

Lo que la evidencia permite concluir — y lo que no

- **El escenario del medidor de campo es real; el instrumento ya no es la respuesta.** Cuando la tormenta nace exactamente encima del sitio, ningún sistema basado en rayos avisa antes del primer rayo, y en algunas regiones hasta 20–25 % de las celdas abren con un rayo a tierra^[6]. Ese escenario justificó históricamente añadir un molino de campo como complemento, y la IEC 62793:2020 aún reconoce al detector local^[1]. Pero la evidencia y el mercado apuntan hoy en la dirección contraria, por cuatro razones convergentes. Primera, el resultado medido: cuando se combinó el molino con una red, el sistema conjunto **empeoró** — el instrumento aportó más ruido que aviso^[7]. Segunda, la física de la integración: un procesador de localización fusiona mediciones de descargas (tiempos y ángulos de pulsos electromagnéticos), y el molino no mide descargas — no entrega nada que un procesador pueda fusionar. Lo único combinable es su *alarma*, en la capa de decisión, y eso fue precisamente lo que se probó en Florida. Un molino junto a una red moderna no forma un sistema integrado: forma dos sistemas de alarma paralelos. Tercera, el mercado: los fabricantes que operan redes validadas descontinuaron sus molinos — el EFM550 de Vaisala está fuera de catálogo y el CS110 de Campbell Scientific figura «retired» en la web de su propio fabricante^[23] — y la oferta vigente proviene de fabricantes especializados sin red de localización validada, los mismos que sostienen el claim «Clase A»^[14]. Cuarta, el entorno: el polvo en suspensión, ambiente normal de un tajo abierto, es su fuente clásica de falsa alarma^[1,8,9].
- **Lo que cubre hoy ese escenario.** Tres vías, todas dentro de un sistema moderno: la **detección total** (en la mayoría de las tormentas las primeras descargas son intra-nube, minutos antes del primer rayo a tierra^[8]); los **precursores meteorológicos** — los criterios de radar sobre la zona de carga de la nube logran POD (probabilidad de detección) de 84 a 100 % con anticipaciones de 7,5 a 17 minutos^[8, tabla 19.7]; y la **cuantificación del escenario** con los datos de la propia red: un año de operación dice qué fracción de los episodios del sitio nació encima. Si esa fracción resultara material y aun así se evaluara un molino, tendría que entrar como segundo sistema subordinado — su señal jamás como disparador único de una parada — y con su soporte de largo plazo resuelto por escrito.
- **La geografía modula el resultado.** Los autores del estudio de Florida advierten que en sitios de gran altitud el campo eléctrico en superficie puede crecer más antes del primer rayo, y el EFM rendir mejor que en sus datos^[7] — un matiz relevante para operaciones de montaña. En contrapeso, el polvo en suspensión, abundante en minería de tajo abierto, es una de las fuentes clásicas de falsa alarma del principio electrostático^[1,8,9].
- **Parte de la literatura tiene interés comercial, y esta revisión lo declara en lugar de esconderlo.** Varios de los estudios citados fueron escritos por científicos de fabricantes u operadores de redes^[7,9,11], y dos documentos son material no publicado: un informe interno de fabricante^[15] y un memo técnico de especialista^[16]. Se incluyen porque aportan evidencia que no existe en otra parte — la única comparación simultánea de las tres tecnologías, y un argumento de arquitectura sobre la primera descarga — siempre con su procedencia a la vista. Las cifras de fondo de esta revisión, sin embargo, descansan en las fuentes sin interés comercial — instituto meteorológico estatal^[5], universidades^[6,12,13], instituto de investigación austriaco^[10] — y las direcciones coinciden.
- **Las FAR (tasa de falsas alarmas) declaradas no son comparables entre proveedores.** La definición 2020 de falsa alarma es laxa: una alarma sin rayo en el objetivo no cuenta como falsa si hubo actividad en el área de monitoreo^[1]. Dos fichas técnicas pueden declarar FAR muy distintas midiendo lo mismo. Sin el método y las áreas definidas, el número aislado no dice nada.
- **Ninguna cifra de esta revisión reemplaza una evaluación en sitio.** Los números provienen de Florida, España, Países Bajos, Francia y Austria. La dirección es consistente entre climas, pero el desempeño exacto en un emplazamiento específico se verifica con la metodología de la cláusula 9 y el anexo D de la propia norma, sobre datos del sitio^[1].

Las ocho preguntas que un responsable de operación debe hacer

Todo este documento cabe en ocho preguntas. Están escritas como las haría quien maneja la seguridad y la producción de una operación — y debajo de cada una, cómo exigir la respuesta con las herramientas de la norma.

LA PREGUNTA, EN SIMPLE	CÓMO EXIGIR LA RESPUESTA
1 · ¿Se entera de todos los rayos que amenazan mi operación?	Pida el POD (probabilidad de detección) medido sobre datos de su propio sitio, con el método de la norma. Referencia: las redes superan el 90 %; los molinos de campo quedan entre 20 y 60 % (secciones 4 y 6).
2 · ¿Sabe dónde cayó cada rayo — y cómo logra esa precisión aquí, donde no hay red nacional?	Pida la precisión mediana de localización y con qué se sostiene. En los Andes, la precisión de cientos de metros solo se logra sumando sensores locales a una red global — pregunte cuántos sensores locales incluye la oferta y cómo se fusionan con la red global (secciones 5.3 y 7).
3 · ¿Con cuánta anticipación me avisa que la tormenta viene?	Pida el POD con anticipación mínima (por ejemplo POD ₁₀ : avisos con 10 minutos o más). Una red que ve la tormenta a 100 km da decenas de minutos; un sensor local aislado, minutos (secciones 4 y 6).
4 · ¿Cuántas veces me hará parar sin necesidad?	Pida la tasa de falsas alarmas (FAR) y cómo se midió — la definición de la norma es laxa y dos ofertas pueden declarar cifras incomparables. Cada parada en falso cuesta producción y, peor, credibilidad de la alarma (secciones 4, 6 y 8).
5 · ¿Y la tormenta que nace justo encima de la mina?	Pregunte cómo la cubre el sistema: detección de descargas intra-nube (las primeras de casi toda tormenta) y precursores meteorológicos. Si le ofrecen un molino de campo, tres preguntas bastan: ¿quién lo fabrica y lo soportará en cinco años?, ¿cómo se integra —o no— con el procesador de la red?, ¿puede su señal, por sí sola, parar la mina? (secciones 5 y 8).
6 · ¿Sigue protegiendo cuando un sensor se malogra?	Pida la eficiencia con un sensor fuera de servicio. Con sensores de tiempo y ángulo la red conserva 94,5 %; con solo tiempo cae a 60,3 % (figura 3). La falla de un sensor es rutina, no excepción.
7 · ¿Cuándo puedo volver a trabajar con seguridad?	Pida cómo se define el fin de la alarma y la duración total por episodio (TTC y TAD en la norma): ahí viven las horas de parada — y el riesgo de reanudar antes de tiempo (secciones 4 y 6).
8 · ¿Quién comprobó todo esto, además del que me lo vende?	Pida validaciones de universidades o institutos meteorológicos con datos reales. Lo declarado por los operadores supera sistemáticamente a lo medido por terceros, y la IEC no certifica productos: sin tercero, todo es auto-declaración. Y si la oferta invoca una «clase», está citando una norma cancelada (secciones 3, 4 y 7).

Este documento es una revisión técnica de referencia: describe lo que dicen las normas y la literatura publicada, con sus límites. No constituye una recomendación de compra ni una especificación de ingeniería para un sitio particular.

Agradecimientos y referencias

Agradecimientos. Los borradores de este documento fueron revisados técnicamente por Martin J. Murphy (Vaisala Inc.) y Ronald L. Holle (Holle Meteorology & Photography); sus correcciones y las referencias adicionales que aportaron están incorporadas en esta versión. Los juicios —y cualquier error remanente— son responsabilidad del autor.

REFERENCIAS

1. IEC 62793:2020, *Thunderstorm warning systems – Protection against lightning*, ed. 2.0, IEC TC 81, 21-sep-2020 (vigente; webstore.iec.ch, pub. 64935). Prólogo: “in Clause 5, classes of TWS have been deleted”.

2. IEC 62793:2016, ed. 1.0 — cancelada y reemplazada por la ed. 2020. Cláusula 5 y anexo B: clases A–D.

3. EN 50536:2011 (CENELEC), *Protection against lightning – Thunderstorm warning systems* — clases I–IV; sustituida por EN IEC 62793:2020. Adopción española vigente: UNE-EN IEC 62793:2022, *Protección contra el rayo. Sistemas de aviso de tormentas*.

4. IEC 62858, *Lightning density based on lightning location systems*.

5. Bloemink, H., *Static electricity measurements for lightning warnings – an exploration*, KNMI IR 2013-01, De Bilt, Países Bajos, 2013.

6. Aranguren, D., Montanyà, J., Solà, G., March, V., Romero, D., Torres, H., *On the lightning hazard warning using electrostatic field: Analysis of summer thunderstorms in Spain*, Journal of Electrostatics 67 (2009) 507–512.

7. Murphy, M. J., Holle, R. L., Demetriades, N. W. S., *Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations*, 20th International Lightning Detection Conference, Tucson, 2008.

8. Murphy, M. J., Cummins, K. L., Holle, R. L., “Lightning warning systems”, cap. 19 en Cooray, V. (ed.), *Lightning Protection*, IET, Londres, 2010.

9. Schmitt, A., Rousseau, A., *Thunderstorm Warning Systems: IEC 62793 standard*, 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), Estoril, Portugal, 2016.

10. Diendorfer, G., *Lightning Location Systems (LLS)*, IX International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Foz do Iguaçu, 2007.

11. Murphy, M. J., Nag, A., *Cloud lightning performance and climatology of the U.S. based on the upgraded U.S. National Lightning Detection Network*, 7th Conf. on Meteorological Applications of Lightning Data, AMS, 2015.

12. Zhu, Y., Rakov, V. A., Tran, M. D., Nag, A., *A study of National Lightning Detection Network responses to natural lightning based on ground truth data acquired at LOG with emphasis on cloud discharge activity*, J. Geophys. Res. Atmos. 121 (2016) 14 651–14 660.

13. Mallick, S., Rakov, V. A., et al., *An update on the performance characteristics of the NLDN*, 23rd International Lightning Detection Conference, Tucson, 2014.

14. Fichas técnicas y publicaciones comerciales de detectores electrostáticos que declaran «Clase A» citando IEC 62793:2016 — p. ej. INGESCO (Previstorm, ficha técnica: “IEC 62793:2016. CLASS A”), Aplicaciones Tecnológicas (ATSTORM), Wxline (Strike Guard con molino CS110). Se citan como evidencia documental del uso comercial del término, no como fuentes de desempeño.

15. Said, R. K. (con participación de M. J. Murphy), *Lightning warning using different types of detection technology*, informe técnico interno, Vaisala Inc. (estudio de campo, Boulder, Colorado, 2015). No publicado; citado con procedencia declarada.

16. Holle, R. L., *Lightning Detection at a Mine in Peru*, memo técnico, Holle Meteorology, marzo de 2026. No publicado; citado con procedencia declarada.

17. Schulz, W., Diendorfer, G., Pedebay, S., Poelman, D. R., *The European lightning location system EUCLID – Part 1: Performance analysis and validation*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 16 (2016) 595–605.

18. Evaluación independiente de la SALDN (Johannesburg Lightning Research Laboratory, Part 3), Electric Power Systems Research, 2022.

19. Zhu, Y., et al., evaluación de la ENLTN con rayos provocados por cohete en Florida, J. Geophys. Res. Atmos., 2017.

20. IEC 62858:2019, *Lightning density based on lightning location systems (LLS) – General principles*, ed. 2.0 (vigente).

21. Vaisala Xweather, *Annual Lightning Report 2025* y anuncio de GLD360 v4.0 (feb-2025) — cifras del operador, señaladas como tales.

22. Sitios oficiales y documentación de operadores consultados en agosto de 2026 (fuentes de operador, señaladas como tales): EUCLID/euclid.org; ECCC (CLDN); OVE/ALDIS y BLIDS; Météorage (Météo-France 65 % + Vaisala 35 %); AEMET (red española); nowcast GmbH (LINET); AEM/Earth Networks (EN-TLN); Franklin Japan (JLDN); KMA (KLDN, con validación en Atmos. Res. 2014); CMA/literatura ADTD (Atmos. Res. 2022); IITM (ILLN, validaciones en Natural Hazards 2021 y Atmos. Res. 2025); BoM/GPATS; DTN APAC (WZTLN); SAWS (SALDN); INPE (RINDAT); Keraunos SAS (validaciones de Aranguren et al. 2016, 2021); Met Office (ATDnet); AccuWeather (adquisición de TOA Systems, ene-2025); U. Washington (WWLLN, evaluación NHESS 2024).

23. Estado de producto verificado en agosto de 2026: Vaisala EFM550 discontinuado (fuera del catálogo activo del fabricante; disponible solo en revendedores de equipo discontinuado) y Campbell Scientific CS110 «retired» (campbellsci.com/cs110).

24. López, J., Pérez, E., Herrera, J., Aranguren, D., Porras, L., *Thunderstorm warning alarms methodology using electric field mills and lightning location networks in mountainous regions*, International Conference on Lightning Protection (ICLP), Viena, 2012.

25. Li, X., Yang, L., Yin, Q., Yang, Z., Zhou, F., *Lightning risk warning method using atmospheric electric field based on EEWT-ASG and Morpho*, Atmosphere 14 (2023) 1002.

26. Jana, S., Chakraborty, R., Maitra, A., *Prediction of lightning strikes using electric field at a tropical location*, 12th Int. Conf. on Microwaves, Antenna, Propagation & Remote Sensing (ICMARS), Jodhpur, 2017. Se cita como ejemplo metodológico, no como fuente de desempeño.

27. Vagasky, C. A. (National Lightning Safety Council / U. de Wisconsin-Madison), *Cloud-to-Ground Lightning Warning Performance of a Lightning Prediction System*, 12th Conf. on the Meteorological Application of Lightning Data, 105th AMS Annual Meeting, Nueva Orleans, 13 de enero de 2025, ponencia 4.3 (resumen oficial del programa; la grabación requiere acceso de la AMS).