Ejemplo tipo de TESELA hecho con datos públicos. No es un encargo ni constituye asesoramiento.

TESELA

Abel Tortosa-Andreu
Física aplicada a la energía
Meteorología, territorio y datos públicos de alta resolución

¿Qué amenaza climática tumba de verdad la red de transporte?

Cinco años de averías de la red de 220 y 400 kV, línea a línea, frente al fuego, el viento y la lluvia. Y lo que cambia a mitad de siglo.

Edición noviembre de 2026. Fuentes: REE, Copernicus (ECDE, EFFIS, ERA5), Universidad de Alcalá y OpenStreetMap.



Las 683 líneas de REE con su trazado real; en ámbar, el 10 % que concentra la mitad del riesgo de avería por fuego

×2,1
averías por km en las líneas cuyo trazado cruza monte de fuego alto

50 %
del riesgo de avería por fuego, en el 10 % de las líneas

+35 a +74 %
averías por fuego en 2041-2070, según escenario

Resumen

- **El fuego se ve en las averías.** Con fuego dentro del trazado, la avería fortuita llega al 28 % de las líneas-año, frente al 12 %, y dura más.
- **Probado contra lo que pasó.** Con el riesgo de fuego fijado en 2020, el modelo ordena las averías de 2021-2025: 25 % en el décimo más expuesto, 6 % en el más seguro.
- **Viento y lluvia, no.** Los días extremos de cada año no cambian la probabilidad de avería; la riada de 2024 es un caso único.
- **Concentrado y priorizable.** 5.409 km de línea reúnen la mitad del riesgo, y ahí la probabilidad de que arda sube del 16 % al 27 % al año.

Autor

Abel Tortosa-Andreu convierte datos meteorológicos y geoespaciales públicos en decisiones de energía y territorio. Es ingeniero sénior de I+D en energía, clima y previsión en un grupo español de ingeniería y consultoría. Antes dirigió la previsión en Vortex, donde creó un algoritmo de extrapolación a largo plazo de series de viento que se vendió a Vestas, y trabajó en recurso eólico, previsión y rendimiento de flotas en UL y GE Vernova. Astrofísico por la Universidad de La Laguna, con investigación doctoral en física solar en el IAC.

abel.tortosa@teselamaps.com

EJEMPLO

1 Panorama

Cinco años de averías reales de la red de transporte, línea a línea, frente a cada amenaza climática que se puede medir con datos públicos.

Casi todos los estudios de riesgo climático de una red empiezan por el mapa de la amenaza y terminan en una lista de tramos expuestos. Pocos comprueban si esa exposición se traduce en averías. Aquí se hace al revés. REE publica cada año, línea a línea, las horas que cada circuito estuvo fuera de servicio y por qué causa. Con los informes de 2021 a 2025 y el trazado real de cada línea se han reunido 3.285 líneas-año de 683 líneas de 220 y 400 kV, con 434 años con avería fortuita (causa D: fallo dentro de las condiciones de diseño). Sobre ese panel se ha probado cada amenaza, separando el efecto de la longitud y la tensión de la línea.

Amenaza	Dato	Efecto en la avería	¿Se demuestra?	Fiabilidad (0-10)
Incendio dentro del trazado ese año	Copernicus EFFIS, perímetros	×1,9 (p = 0,001)	Sí	8
Monte de fuego alto en el trazado, medido en 2020	Modelo TESELA congelado en 2020	×1,40 por cada 30 puntos (p < 0,001)	Sí	8
Días de viento extremo del año	Copernicus ECDE sobre ERA5	×1,05 (p = 0,41)	No	6
Lluvia máxima en 5 días del año	Copernicus ECDE sobre ERA5	×1,01 (p = 0,87)	No	6
Días de lluvia extrema del año	Copernicus ECDE sobre ERA5	×1,02 (p = 0,69)	No	6
Riada de octubre de 2024 en Valencia	REE, líneas del entorno de Catadau	9 líneas con avería en el año	Un caso, sin regla general	9

LECTURA

El fuego es la única amenaza climática que se ve en las averías de la red de transporte, y se ve con claridad. Que ardiera dentro del trazado ese año casi duplica la probabilidad de avería, y el riesgo de fuego que el modelo calculaba en 2020, sin ver ni un dato de después, ya ordenaba qué líneas iban a fallar. El viento y la lluvia, medidos año a año en la rejilla de ERA5, no explican nada: la red de 220 y 400 kV está diseñada para ellos y, cuando fallan, lo hacen en eventos que un dato anual no recoge. No los vendería como riesgo probado. La riada de Valencia de 2024 sí aparece, pero como un suceso único, sin una regla que sirva para el resto de la red.

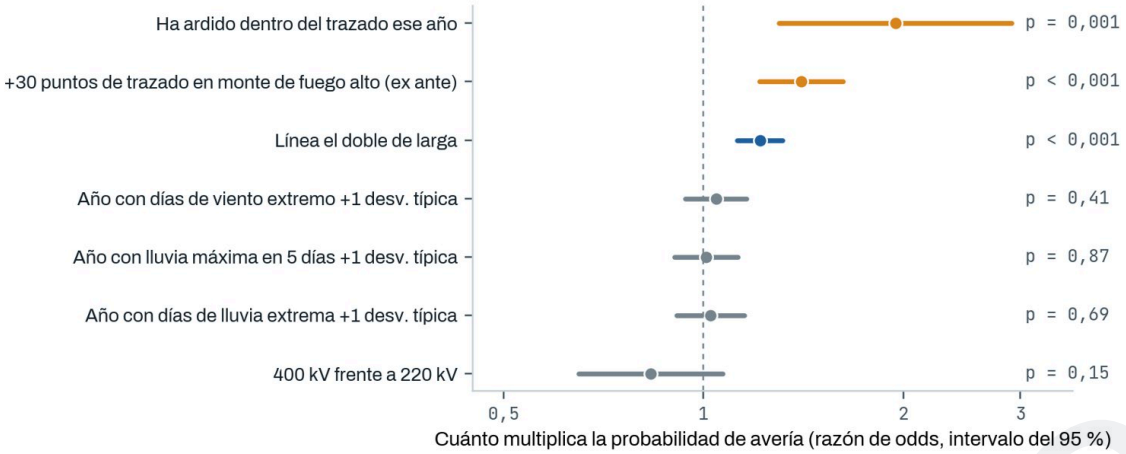
2 La prueba

Un modelo de averías ajustado a lo que pasó, con un único dato de riesgo fijado antes de 2021.

Cada barra mide cuánto multiplica una condición la probabilidad de que la línea tenga una avería fortuita en el año, con todas las condiciones a la vez y el intervalo de confianza del 95 %. Los errores se agrupan por línea, para no contar cinco veces la misma línea como si fueran cinco pruebas.

EJEMPLO TIPO

El fuego, dentro del trazado o como riesgo previo, es lo único climático que separa las líneas que fallan de las que no.



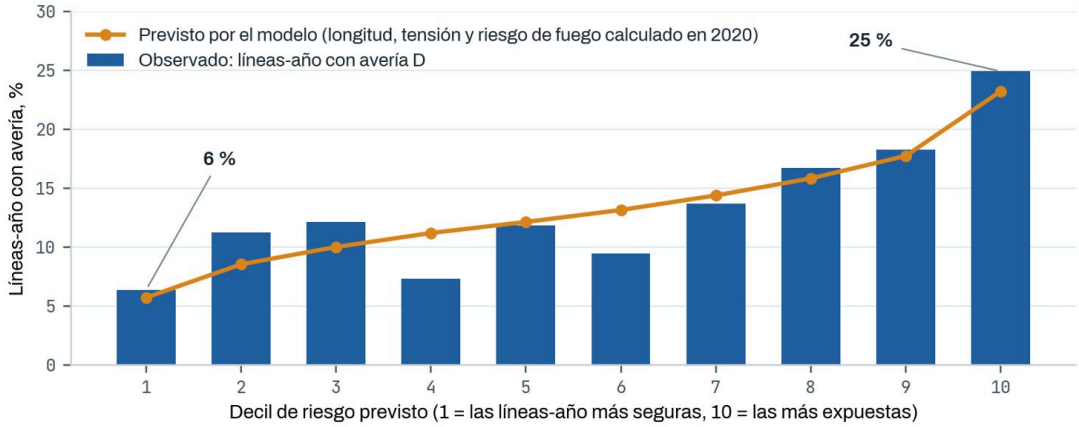
Fuente: REE, auditorías de calidad de servicio 2021-2025; Copernicus EFFIS y ECDE (ERA5); modelo de incendio TESELA congelado en 2020. Regresión logística, 3.285 líneas-año, errores agrupados por línea. Elaboración TESELA.

La prueba más limpia no necesita modelo. Basta con agrupar las líneas según cuánto de su trazado cruzaba monte de fuego alto en el mapa de 2020 y contar sus averías por kilómetro. Las que tienen más del 30 % del trazado en ese monte tuvieron 2,1 veces más averías por km que las que no lo cruzan. El grupo de hasta el 10 % queda por debajo porque sus líneas son las más largas, y por km una línea larga falla menos.

Trazado en monte de fuego alto (modelo de 2020)	Líneas	Km medio	Líneas-año con avería D	Averías D por 100 km y año
No cruza monte de fuego alto	392	23	10,7 %	0,33
Hasta el 10 % del trazado	110	59	12,0 %	0,17
Del 10 al 30 %	75	37	20,4 %	0,43
Más del 30 %	106	20	18,6 %	0,70

El modelo completo ordena bien de punta a punta. En el décimo de líneas-año que marcaba como más expuesto hubo avería en el 25 % de los casos; en el décimo más seguro, en el 6 %. Ajustado con 2021-2023 y probado en 2024-2025, distingue mejor que un modelo que solo mira longitud y tensión (área bajo la curva de 0,62 frente a 0,57).

Lo previsto y lo observado, por décimos de riesgo.



Fuente: REE 2021-2025 y modelo TESELA. Elaboración TESELA.

EJEMPLO TIPO

CÓMO SE CALCULA

Para cada línea y año, P(avería D) = 1 / (1 + e^{-z}), con z = −3,0 + 0,30·ln(km) − 0,18·(400 kV) + 1,15·(fracción del trazado en fuego alto) + 0,66·(ha ardido dentro del trazado ese año). Ejemplo: Pesoz – Salas, 400 kV, 51 km, con el 88 % del trazado en monte de fuego alto. En un año sin fuego, z = −3,0 + 0,30·3,94 − 0,18 + 1,15·0,88 = −0,99 y P = 27 %; si arde dentro del trazado, z = −0,33 y P = 42 %. Tuvo avería fortuita tres de los cinco años. No incluye las averías por fuerza mayor ni las de terceros (causa E), que REE no suma a la indisponibilidad.

Cuando arde dentro del trazado, la avería no solo es más probable: dura más. La mediana de horas fuera de servicio de una avería fortuita fue de 4,5 h con fuego en el año y de 1,0 h sin él. En total, 169 líneas-año tuvieron fuego dentro del trazado; de ellas, el 28 % tuvo avería, frente al 12 % del resto.

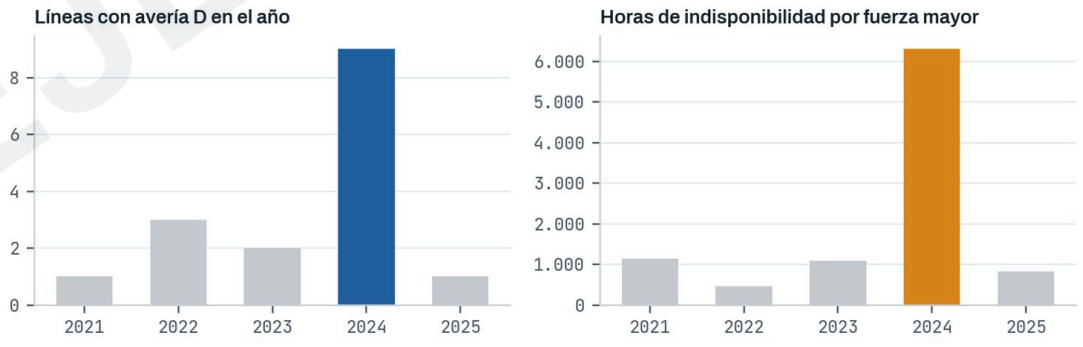
3 Lo que no se ve: viento y lluvia

Las dos amenazas que más se citan y que los datos anuales no sostienen.

Los días de viento extremo y la lluvia extrema de cada año, medidos sobre el trazado con los indicadores de Copernicus sobre ERA5, no cambian la probabilidad de avería. Tampoco al quitar 2024, ni al contar las averías por fuerza mayor, ni al probar solo los años más extremos (más de 2 o 2,5 desviaciones). Hay dos razones. La red de transporte se diseña con márgenes amplios frente al viento y la lluvia, y los fallos que provocan son locales y de horas, algo que una rejilla de 25 km y un dato anual no captan. Para probarlos hace falta la racha horaria sobre cada vano; está en descarga y entra en la próxima edición.

La riada del 29 de octubre de 2024 en Valencia es la excepción visible. De las 18 líneas que cruzan el entorno de Catadau, Torrent y Aldaia, nueve tuvieron avería fortuita ese año, cuando lo normal en esa zona es una o dos, y la fuerza mayor sumó más de 6.000 horas fuera de servicio.

Líneas de REE en el entorno de la riada de 2024: averías fortuitas y horas por fuerza mayor de cada año.



Fuente: REE, auditorías de calidad de servicio 2021-2025, líneas entre 39,15 y 39,6° N y 0,25 y 0,75° O. Elaboración TESELA.

4 2050

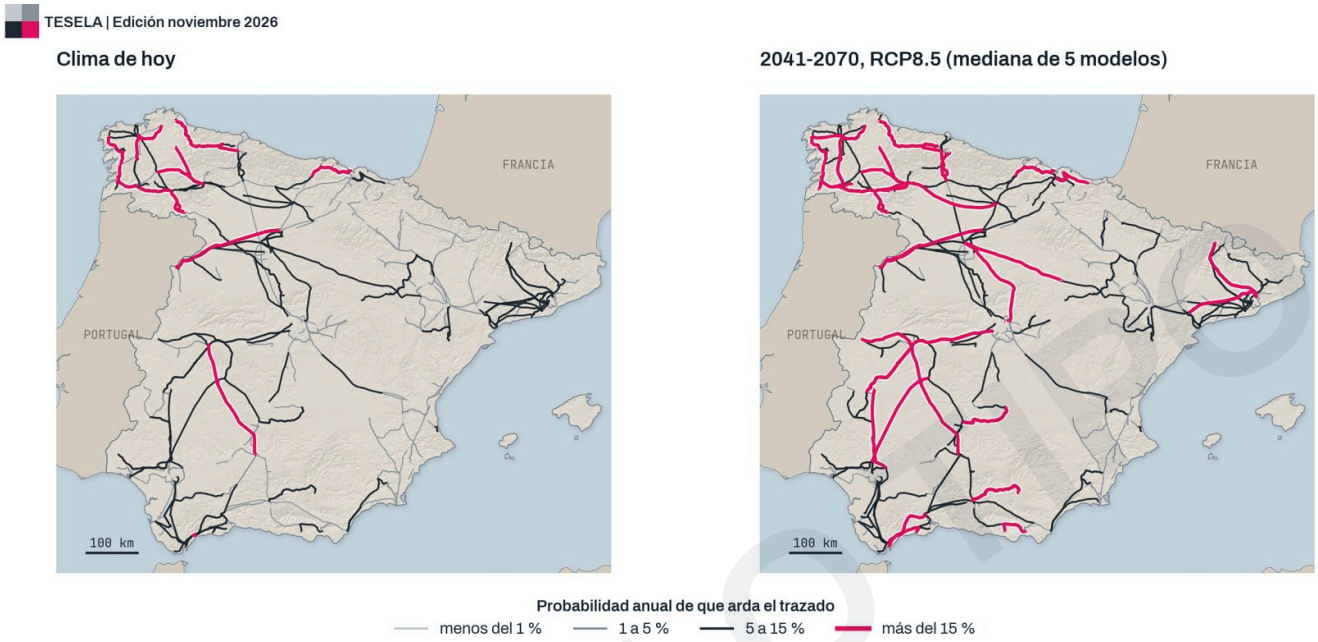
El índice de incendio de cinco modelos climáticos, traducido a probabilidad de que arda cada trazado y a averías.

El índice meteorológico de incendio (FWI) mide cuánto favorece el tiempo de un año la propagación del fuego. Su valor medio no explica dónde arde: el sur seco tiene el índice más alto y

EJEMPLO TIPO

menos combustible. Lo que sí explica cuándo arde es la anomalía del año respecto al clima del sitio: cada desviación típica de más multiplica por 1,38 la probabilidad de que arda el trazado ($p < 0{,}001$). Los cinco modelos regionalizados de Copernicus desplazan esa anomalía, de media en la red, 1,2 desviaciones típicas en 2041-2070 con RCP4.5 y 1,6 con RCP8.5. Un año que hoy es malo pasa a ser un año normal.

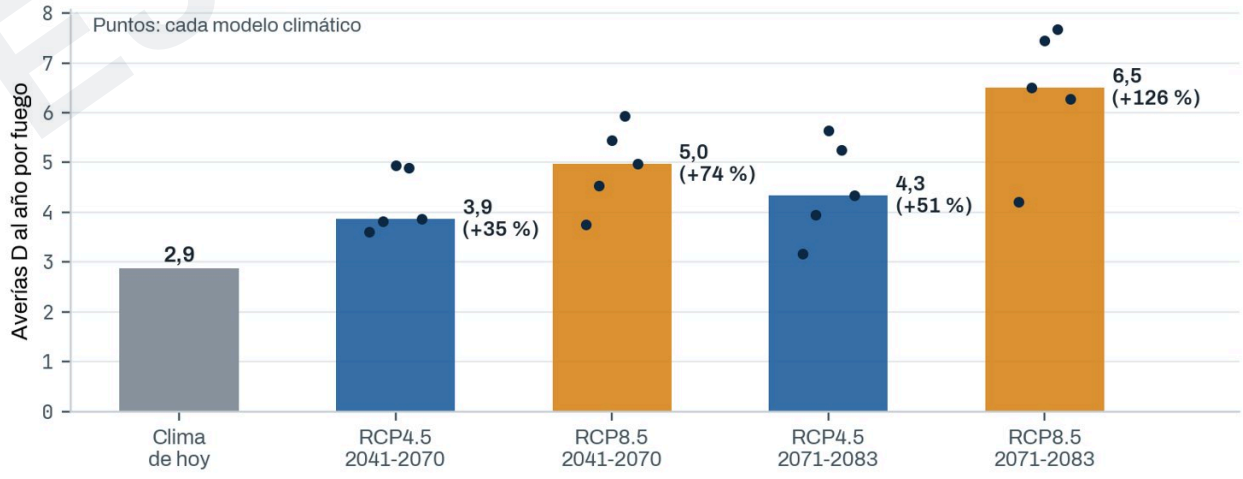
Probabilidad anual de que arda el trazado de cada línea, con el clima de hoy y a mitad de siglo.



Fuente: REE (líneas casadas con su trazado), Copernicus ECDE (FWI, 5 modelos) y EFFIS, modelo TESELA. Trazados: OpenStreetMap (28-10-2026). Elaboración TESELA.

El cambio es mayor en el oeste: Extremadura, el eje Sevilla – Badajoz – Cáceres, el Duero y el interior de Tarragona se suman al noroeste, que ya hoy es el foco. En el conjunto de la red, las averías fortuitas atribuibles al fuego pasan de 2,9 al año a 3,9 con RCP4.5 (+35 %) y a 5,0 con RCP8.5 (+74 %). Los cinco modelos coinciden en que sube; difieren en cuánto.

Averías fortuitas al año atribuibles al fuego en las 683 líneas, hoy y en cada escenario.



Fuente: modelo TESELA ajustado a REE 2021-2025; Copernicus ECDE, FWI de 5 modelos (el último periodo termina en 2083). Elaboración TESELA.

EJEMPLO

El viento y la lluvia, que no se ven hoy en las averías, tampoco empeoran de forma clara. Los nueve pares de modelos EURO-CORDEX dan -6,9 % de días de viento extremo con RCP4.5 y -6,0 % con RCP8.5 sobre el trazado de las líneas, y coinciden en el signo en el 78 % de los casos. Los días de lluvia extrema suben un 3,4 y un 3,9 %, con un acuerdo menor (72 %).

> **LECTURA**
> El riesgo climático de la red de transporte está concentrado y se puede priorizar. El 10 % de las líneas, 5.409 de los 27.012 km estudiados, reúne el 50 % del riesgo de avería por fuego. En esas líneas, la probabilidad media de que arda el trazado en un año pasa del 16 % hoy al 23 % con RCP4.5 y al 27 % con RCP8.5, y ya hoy fallan el doble (24,9 % de los años frente al 11,9 %). Es ahí donde tiene sentido gastar en fajas de protección, desbroce y vigilancia, no en reforzar toda la red contra el viento.

5 Las líneas que más pesan

Las dieciocho líneas con más riesgo de avería por fuego, con cada cuánto arde hoy su trazado y cada cuánto arderá.

Ordenadas por averías esperadas por fuego, que combinan la probabilidad de que arda el trazado y cuánto sube la avería cuando arde. La última columna es lo que pasó de verdad.

Línea	kV	Km	Trazado en fuego alto	Arde el trazado, hoy	2041-2070, RCP4.5	2041-2070, RCP8.5	Años con avería D, 2021-2025
Aguayo – Abanto	400	98	75 %	cada 2 años	cada 2 años	cada 2 años	2 de 5
Pesoz – Salas	400	51	88 %	cada 2 años	cada 2 años	cada 2 años	3 de 5
Salas – Soto de Ribera	400	49	84 %	cada 3 años	cada 2 años	cada 2 años	0 de 5
Castrelo – Pazos de Borbén	220	45	84 %	cada 3 años	cada 2 años	cada 2 años	2 de 5
Aparecida – Trives	400	61	75 %	cada 3 años	cada 2 años	cada 2 años	0 de 5
Lubián – San Agustín	220	23	100 %	cada 3 años	cada 3 años	cada 2 años	3 de 5
Pazos de Borbén – Tomeza 1	220	20	97 %	cada 4 años	cada 3 años	cada 3 años	2 de 5
Belesar – Lomba	220	97	44 %	cada 4 años	cada 3 años	cada 3 años	2 de 4
Ludrio – Montearenas	400	100	44 %	cada 4 años	cada 3 años	cada 3 años	0 de 5
Abanto – Udalla	400	41	71 %	cada 4 años	cada 3 años	cada 3 años	2 de 5
Lousame – Tibo 1	220	41	68 %	cada 5 años	cada 3 años	cada 3 años	2 de 2
Mazaricos – Regoelle	220	14	100 %	cada 5 años	cada 4 años	cada 3 años	1 de 5
Lousame – Mazaricos 1	220	28	78 %	cada 5 años	cada 4 años	cada 3 años	3 de 5
Tibo – Tomeza 1	220	27	75 %	cada 6 años	cada 4 años	cada 3 años	0 de 5
Narcea – Salas	400	13	100 %	cada 6 años	cada 4 años	cada 3 años	0 de 5
Boimente – Pesoz 2	400	82	42 %	cada 5 años	cada 4 años	cada 3 años	1 de 5
Boimente – Pesoz 1	400	82	42 %	cada 5 años	cada 4 años	cada 3 años	1 de 5
Saucelle – Villarino 1	220	41	61 %	cada 6 años	cada 4 años	cada 3 años	0 de 5

Galicia, Asturias y el Cantábrico oriental llenan la lista: Aguayo – Abanto, Pesoz – Salas y Salas – Soto de Ribera, Castrelo – Pazos de Borbén, Aparecida – Trives. Las líneas que más suben no están

EJEMPLO TIPO

todas aquí: las del oeste parten de un riesgo bajo y lo multiplican por dos o tres. Para un plan de inversiones importan las dos listas.

6 Método y trazabilidad

Qué dato sale de dónde, cómo se cruza y qué no se sabe.

Dato	Fuente pública	Periodo	Uso
Indisponibilidad de cada línea por causa	REE, Informe de auditoría de la calidad de servicio de la red de transporte, anexo 3.1 (ediciones 2021 a 2025)	2021-2025	La verdad de campo
Trazado de las líneas	OpenStreetMap (capa no oficial), extracto del 28-10-2026, casado con los nombres de REE	2026	Dónde cruza cada línea
Perímetros de incendio	Copernicus EFFIS (2021-2025) y Universidad de Alcalá, ESFire30 (1985-2020)	1985-2025	Incendio real y modelo
Viento, lluvia e índice de incendio	Copernicus, European Climate Data Explorer (ECDE), indicadores sobre ERA5, 0,25°	1940-2025	Clima de cada año
Proyección del índice de incendio	Copernicus ECDE, FWI con 5 modelos CMIP5 regionalizados, RCP4.5 y RCP8.5	1985-2083	Clima futuro
Proyección de viento y lluvia extremos	Copernicus ECDE, 9 pares EURO-CORDEX, RCP4.5 y RCP8.5	1950-2100	Contexto futuro
Uso del suelo y relieve	ESA WorldCover 2021 y Copernicus DEM	2021	Combustible y pendiente del modelo de fuego

- **Verdad de campo.** Del anexo 3.1 de cada informe de auditoría de REE se toman las horas de indisponibilidad por causa de cada línea: D (fortuita, dentro de las condiciones de diseño) y E (fuerza mayor o terceros). Se excluyen las líneas-año fuera de servicio todo el año. El informe de 2020 está escaneado y no entra.
- **Trazado.** Cada nombre de REE se casa con sus dos subestaciones y con la línea de OpenStreetMap que las une; si no hay una línea directa, con el camino más corto por la red. De 1.205 líneas, 683 tienen trazado fiable (583 directas y 100 por la red).
- **Riesgo de fuego previo.** El modelo de incendio, de aprendizaje automático sobre 36 años de perímetros, combustible, relieve, clima y presión humana, se entrenó solo con datos hasta 2020 y se congeló. Para cada línea se mide qué parte del trazado cae en el décimo de mayor probabilidad.
- **Clima de cada año.** Los indicadores de Copernicus sobre ERA5 se leen cada 2 km a lo largo del trazado y se expresan como anomalía respecto a 1991-2020 en cada celda, de modo que miden si el año fue raro para ese sitio y no si el sitio es ventoso o lluvioso.
- **Proyección.** Para cada modelo, la anomalía futura del FWI es la diferencia entre 2041-2070 y 1985-2010 dividida por la variabilidad de un año a otro de 1985-2010. El paisaje se deja como está: si el abandono rural añade monte, el riesgo será mayor.
- **Fiabilidad.** Relación entre fuego y avería, 8 sobre 10; proyección del fuego, 6 (cinco modelos de acuerdo en el signo, un solo índice); viento y lluvia como causa de avería, 6 para decir que no se ve, no para decir que no existe.
- **Límites.** Cinco años son pocos para sucesos raros. OpenStreetMap no es el inventario de REE y algunos trazados por la red pueden desviarse del real. Las averías por terceros (causa E) incluyen fuegos que REE clasifica como fuerza mayor; si se cuentan, el efecto del fuego es aún mayor.

EJEMPLO TIPO

7 Qué recibe el cliente

La misma prueba y la misma proyección sobre los activos del cliente.

- **Evaluación de riesgo físico para financiación.** Para una planta, una batería o su línea de evacuación, la evaluación de riesgos climáticos y vulnerabilidad que pide el apéndice A del Reglamento Delegado de Taxonomía de la UE: cada amenaza, su periodo de retorno hoy y a 2041-2070, y qué está probado contra averías reales en España.
- **Plan de inversiones de una red.** Para una distribuidora o un transportista, cada línea con su probabilidad de avería por fuego hoy y en dos escenarios, su orden de prioridad y la prueba con su propio histórico de incidencias si lo aporta.
- **Entregables.** Informe en PDF, GIS con una capa por línea y por escenario, y la tabla de averías esperadas. Actualización cada otoño con la temporada de incendios y el nuevo informe de REE.
- **Encargos:** abel.tortosa@teselamaps.com

C Glosario y referencias

Términos y fuentes, y por qué son solventes.

- **Causa D y causa E.** Clasificación de la indisponibilidad del RD 1955/2000: D, sucesos fortuitos dentro de las condiciones de diseño; E, fuerza mayor o acciones de terceros.
- **Informe de auditoría de la calidad de servicio.** Publicación anual de REE, auditada, con la indisponibilidad de cada elemento de la red de transporte.
- **ERA5.** Reanálisis del ECMWF para Copernicus, 1940 a hoy, 0,25° (Hersbach et al., 2020, Q. J. R. Meteorol. Soc. 146, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803).
- **ECDE.** European Climate Data Explorer de Copernicus y la Agencia Europea de Medio Ambiente: indicadores homogéneos sobre ERA5 y proyecciones regionalizadas.
- **FWI.** Índice meteorológico de incendio del sistema canadiense, el que usa EFFIS para el peligro diario en Europa.
- **RCP4.5 y RCP8.5.** Trayectorias de concentración del IPCC (AR5): intermedia y alta.
- **EURO-CORDEX.** Iniciativa de regionalización de modelos globales para Europa, a 12 km.
- **Razón de odds.** Cuánto se multiplican las probabilidades a favor de un suceso (p / (1 − p)); para sucesos poco frecuentes, se parece al cociente de probabilidades.
- **Apéndice A de la Taxonomía.** Criterios de "no causar perjuicio significativo" a la adaptación (Reglamento Delegado (UE) 2021/2139): evaluación de riesgos climáticos físicos del activo.

EJEMPLO TIPO