Centre de Recerca Aplicada en Hidrometeorologia
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ESTUDIO ENCARGADO POR

greenalia®
The Green Company

Informe Final

Estudio del impacto de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos en la capacidad de medida de la precipitación del radar meteorológico de MeteoGalicia

Barcelona, Diciembre de 2021
Informe CRAHI-INF-2021-03

Esta página ha sido dejada en blanco intencionadamente para facilitar la paginación de la impresión a doble cara.

ÍNDICE

1. Marco del estudio 1

1.1. Importancia de la energía eólica 2

1.2. Efecto de los aerogeneradores en los radares 5

1.2.1. Características de los aerogeneradores que afectan a la capacidad de medida por radar 5

1.3. El radar meteorológico 6

1.3.1. Función e importancia del radar meteorológico 7

1.3.2. Principio de medida y estimación cuantitativa de la lluvia mediante radar meteorológico 7

1.3.3. Estrategia de muestreo y representación de la información radar 8

1.3.4. Aplicaciones cuantitativas: Importancia de la obtención de medidas a baja altitud 9

1.4. Ecos no meteorológicos y apantallamientos: determinación y corrección 11

2. Efecto de los aerogeneradores en la medida del radar meteorológico 13

2.1. Primeros estudios del impacto de los aerogeneradores en las medidas por radar 13

2.2. Caracterización de los impactos debidos a los aerogeneradores 15

2.2.1. Caracterización de los impactos en el espectro Doppler 17

2.3. Metodologías de mitigación de los efectos inducidos por los aerogeneradores 18

2.3.1. Mitigación de los impactos de los aerogeneradores por modificaciones en el diseño de los parques 18

2.3.2. Metodologías para la corrección del espectro Doppler 19

2.3.3. Metodologías para la corrección de los efectos y restitución de los valores estimados de precipitación 20

2.4. Hacia la coexistencia de los aerogeneradores y los radares meteorológicos 21

2.5. Situación en Galicia en 2011 22

2.6. Situación en Galicia en 2021 23

3. Principios técnicos del estudio de impacto 26

3.1. Metodología de determinación de impactos propuesta por el *Radar Operation Center* (EUA) 26

3.2. Metodología propuesta en este estudio 28

3.3. Procedimiento para el cálculo de la línea de visión y de la intercepción del haz del radar 28

3.3.1. Determinación de la trayectoria del haz del radar en la atmósfera 29

3.3.2. Definición del haz del radar 30

3.3.3. Simulación de ecos no meteorológicos debidos a obstáculos y apantallamientos 30

3.3.4. Aplicación al cálculo de ecos y apantallamientos debidos a aerogeneradores 31

3.1. El radar de MeteoGalicia en Monte Xesteiras 32

4. Estudio de impacto de los emplazamientos de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos 33

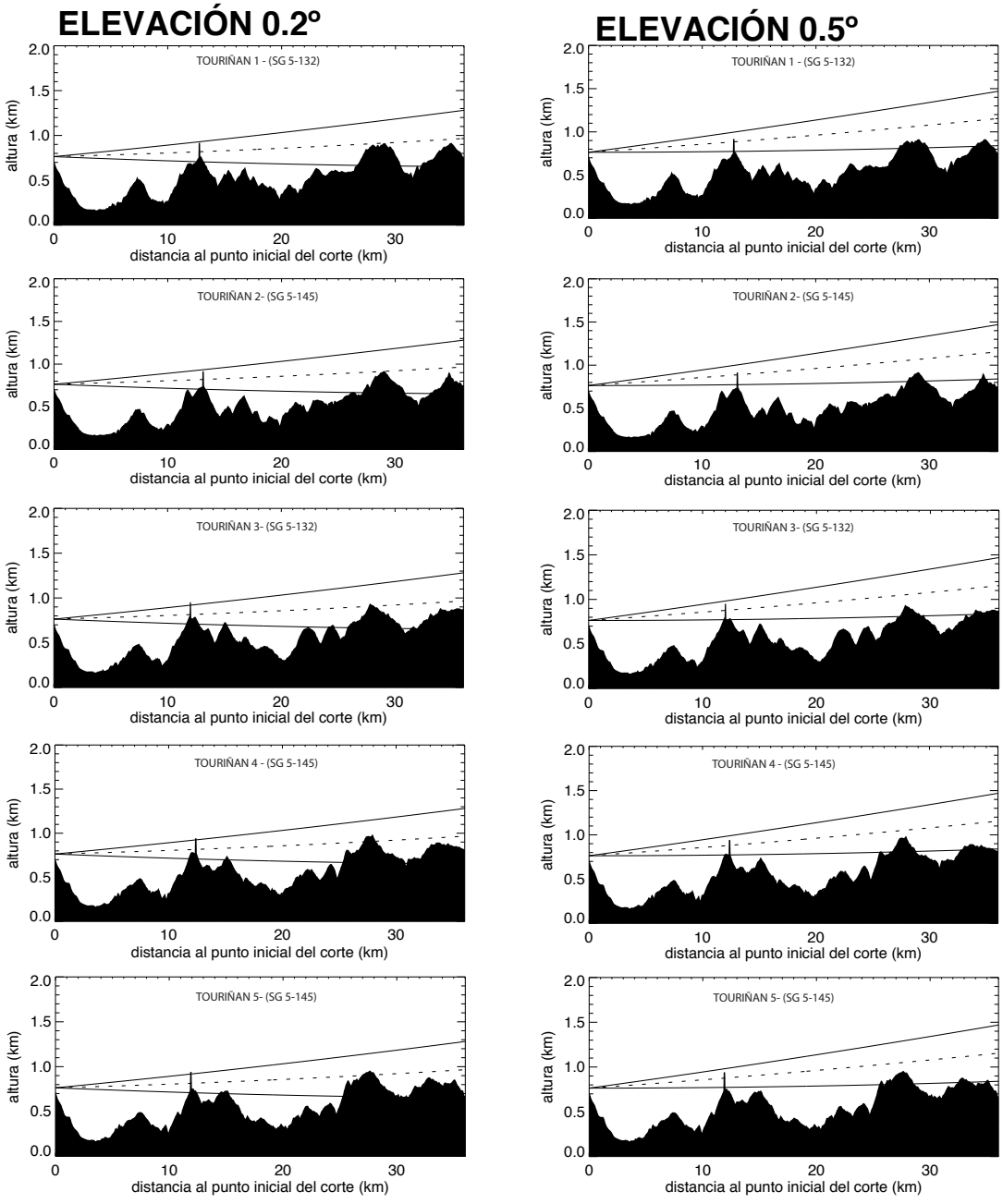
4.1. Situación de los parques eólicos propuestos 33
4.2. Impacto sobre el haz del radar: línea de visión y ecos no meteorológicos permanentes 36
4.2.1. Parque eólico Touriñán III-2 37
4.2.2. Parque eólico Rosa dos Ventos 41
4.3. Apantallamientos y zonas de subdetección 43
4.3.1. Apantallamientos debidos a la orografía 43
4.3.2. Apantallamientos inducidos por los aerogeneradores propuestos 46
4.3.3. Efecto de la combinación con otros apantallamientos 48
4.3.4. Medida de mitigación adicional 48
4.4. Ecos no meteorológicos no permanentes 51
4.5. Resumen de impactos esperables de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos 51
4.6. Necesidad de implementar medidas de mitigación o medidas compensatorias 52
5. Detalles técnicos de las medidas compensatorias propuestas 54
5.1. Procesado avanzado para la corrección de zonas afectadas por ecos no meteorológicos 54
5.2. Procesado avanzado de corrección de sectores apantallados o afectadas por interferencias 56
5.3. Introducción de medidas complementarias: pluviógrafos y disdrómetros (locales) 57
6. Resumen de las medidas propuestas para los parques de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos 59
7. Recomendación Final 60
8. Referencias 61

RESUMEN EJECUTIVO

Los emplazamientos seleccionados para los parques de aerogeneradores de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos se hallan **entre 11 y 13 km de distancia del radar** de MeteoGalicia, situado en el Monte Xesteiras (ver Figura 27 y Figura 28).

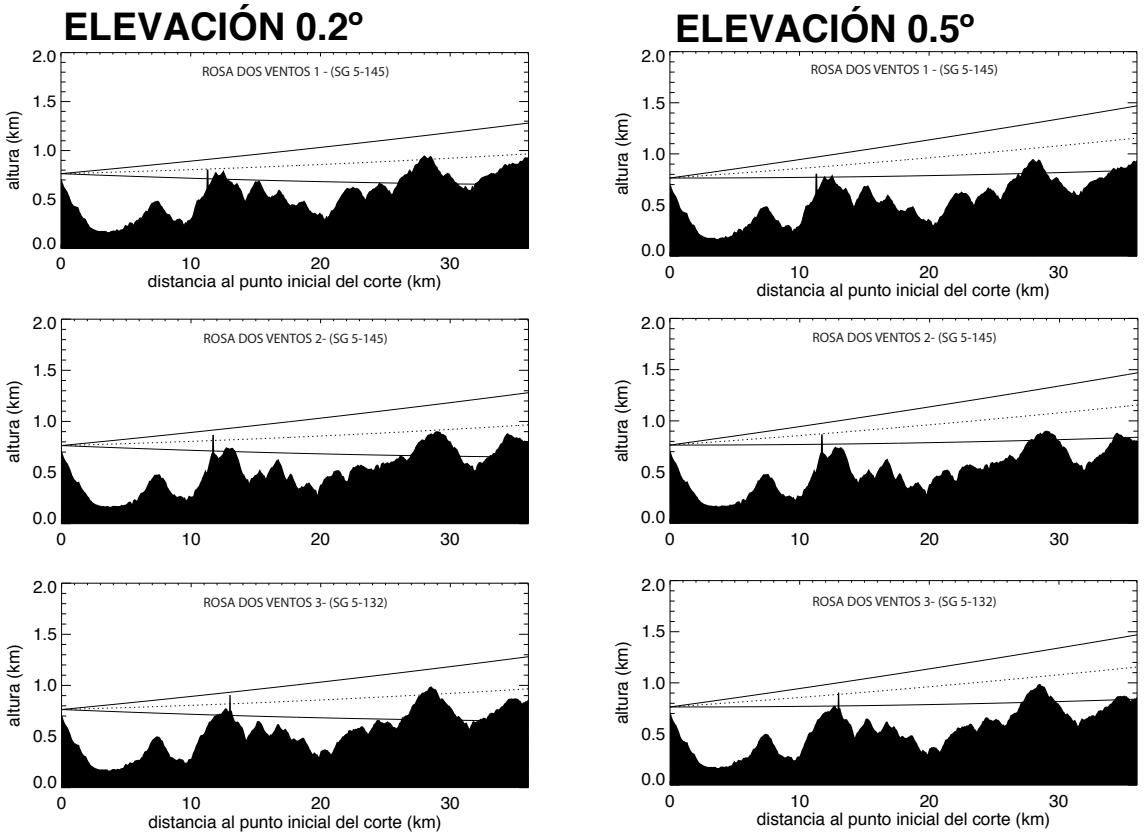
El análisis numérico de la trayectoria del haz permite mostrar que **los ocho aerogeneradores propuestos están dentro de la línea de visión del radar** e interceptan el haz principal en los dos primeros ángulos de elevación del radar (0,2º y 0,5º). Esto implica que **todos los aerogeneradores se encuentran en ZONA DE MITIGACIÓN, por lo que es preciso prescribir medidas de mitigación y compensatorias tanto para el parque eólico como para la operación del radar de MeteoGalicia.**

TOURIÑÁN III-2



Cortes transversales de la propagación del haz del radar en las direcciones de los emplazamientos previstos para el parque de Touriñán III-2 con respecto al radar meteorológico de Monte Xesteiras. Todos los aerogeneradores interceptarían el haz principal de apertura de 1º en los dos primeros tiros de elevación 0,2º y 0,5º

ROSA DOS VENTOS



Cortes transversales de la propagación del haz del radar en las direcciones de los emplazamientos previstos para el parque de Rosa dos Ventos con respecto al radar meteorológico de Monte Xesteiras. Todos los aerogeneradores interceptarían el haz principal de apertura de 1º en los dos primeros tiros de elevación 0,2º y 0,5º

Como resumen de los impactos previstos, la construcción de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos **producirá apantallamientos y ecos no meteorológicos que se combinarán con los ecos orográficos permanentes**, y que al tener velocidad no serán identificados por el filtrado en base al espectro de velocidades Doppler. También **generará zonas de apantallamientos parciales en el haz principal del radar que se superpondrán a los ya generados por la propia orografía.**

Sin embargo el estudio detallado muestra que **los apantallamientos adicionales debidos al parque son marginales**, y muy por debajo del apantallamiento natural de la zona montañosa de la Serra do Candán.

Por todo ello se recomiendan las siguientes medidas:

1. Dotar al radar de MeteoGalicia de un **post-procesado avanzado que permita la mejora de la corrección de ecos no meteorológicos** con velocidad Doppler no nula, **mejorando la restitución del campo estimado de la precipitación** en las zonas afectadas por el parque eólico propuesto.
2. Dotar al radar de un **procesado adicional que permita la corrección de sectores apantallados.**
3. Instalar **dos sensores de medida de intensidad de lluvia local en las inmediaciones de los aerogeneradores (uno de ellos un disdrómetro óptico)**, y añadir **un módulo de procesado avanzado que permita combinar de forma automática los datos radar con los de intensidad de lluvia** medidos localmente.

4. Aceptar que el procesado cuantitativo del radar **utilice como información primaria la del ángulo de elevación de 0,5º**

La aplicación de estas medidas mitigadoras y compensatorias permitiría instalar los aerogeneradores previstos en los emplazamientos de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos **manteniendo e incluso mejorando la calidad de la medida de lluvia del radar de MeteoGalicia**, ya que la instalación de los módulos de procesado avanzado propuestos también le permitiría a MeteoGalicia mitigar los actuales efectos de otros parques eólicos en la vecindad ya en funcionamiento.

Por todo ello se recomienda **informar favorablemente sobre la propuesta de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos condicionada a la puesta en marcha de las medidas de mitigación y compensatorias propuestas.**

Estudio del impacto de los futuros parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos en la capacidad de medida de la precipitación del radar meteorológico de MeteoGalicia

1. Marco del estudio

Greenalia Wind Power Touriñán SLU (en adelante **Greenalia**) tiene concedida la autorización administrativa de construcción para el proyecto de ejecución del parque eólico Touriñán III-2 (resolución de 13 de diciembre de 2019, de la Dirección General de Energía y Minas, por la que se otorgan las autorizaciones administrativas previa y de construcción del parque eólico Touriñán III-2; expediente IN661A 2011/13-4).

En el año 2021 Greenalia se ha planteado la realización de una modificación del parque eólico para lo cual está tramitando una modificación no sustancial del mismo, de cara a la optimización del emplazamiento debido al tiempo transcurrido y la evolución de la tecnología existente. La propuesta es un **cambio en el modelo de los aerogeneradores inicialmente previstos por aerogeneradores del tecnólogo Siemens Gamesa de 5 MW, SG 145 y SG 132** (con rotores de diámetro de 145 m y 132 m respectivamente), y una configuración de los ocho aerogeneradores previstos en parques eólicos con explotación independiente: Touriñán III-2 (5 aerogeneradores) y Rosa dos Ventos (3 aerogeneradores), pero manteniendo esencialmente el diseño de los emplazamientos originales (ver Tabla 2).

Para proceder a su construcción e instalación el constructor debe dar cumplimiento a todas las condiciones establecidas en la declaración de impacto ambiental de 24 de septiembre de 2013, así como las establecidas en el correspondiente programa de vigilancia y seguimiento ambiental. En particular, el promotor debe adoptar todas las medidas compensatorias a las que hace referencia el informe de la Subdirección General de Meteorología e Investigación, relativo a la valoración de la posible incidencia del parque eólico sobre un radar meteorológico propiedad de la Xunta de Galicia, sito en la cumbre del monte Xesteiras, de acuerdo con lo indicado en el apartado 10.5 de la declaración de impacto ambiental de 24 de septiembre de 2013.

En caso de que se manifestasen perturbaciones en el funcionamiento del citado radar meteorológico de la Xunta de Galicia, directamente atribuibles a las instalaciones del parque eólico, el promotor deberá adoptar las medidas necesarias para devolverle al funcionamiento del radar las anteriores condiciones de calidad.

Para dar cumplimiento al requerimiento, Greenalia ha solicitado la actualización del estudio de impacto de los futuros parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos sobre la capacidad de medida del radar meteorológico de MeteoGalicia situado en el monte Xesteiras.

Inicialmente este estudio de impacto fue realizado por la *Universitat Politècnica de Catalunya* en diciembre de 2011. Sin embargo, el tiempo transcurrido desde entonces y la necesaria actualización del modelo de aerogeneradores para no instalar un equipamiento obsoleto hacen imprescindible la realización de un nuevo estudio.

El objetivo de este informe es exponer los **resultados del estudio del impacto de los aerogeneradores previstos en el proyecto de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos sobre el radar meteorológico de MeteoGalicia**, analizar la incidencia sobre la calidad de la medida de la precipitación, y en caso necesario proponer medidas compensatorias de dichos efectos, garantizando la calidad de la estimación del campo de lluvia del radar del monte Xesteiras una vez entren en funcionamiento.

Dada la proximidad de los emplazamientos, en líneas de tiro consecutivas del radar, el informe estudia el **impacto conjunto de los 8 aerogeneradores propuestos sobre el radar meteorológico de MeteoGalicia**, con las características de las nuevas turbinas y rotores. Las características de los aerogeneradores de los dos parques propuestos se detallan en la Tabla 2, apareciendo de forma diferenciada en las Figuras para permitir la identificación de las máquinas asociadas a cada uno de ellos.

1.1. Importancia de la energía eólica

La energía del viento ha sido usada por el hombre desde la antigüedad. La navegación, los molinos para usos agrícolas o para elevar agua han ido dando paso progresivamente a usos más avanzados entre los que destaca la producción de electricidad.

Desde el primer aerogenerador instalado en 1.887, el uso de la energía eólica para la generación de electricidad se ha ido incrementado de forma extraordinaria debido a las ventajas que presentan las fuentes de energía renovables. La industria de la energía eólica se ha convertido así en una de las mejores alternativas para alcanzar los objetivos de descarbonización de la economía y de la lucha contra el calentamiento global y la emergencia climática. Objetivos que en estos días ha recibido un impulso legal muy importante a nivel estatal, tras años de moratoria y dificultades, con el propósito de que España tenga un sistema eléctrico 100% renovable antes de 2050 en línea con el Pacto Verde Europeo (https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-gobierno-aprueba-un-real-decreto-ley-con-medidas-para-impulsar-las-energ%C3%ADas-renovables-y-favorecer-la-reactivación-económica/tcm:30-510021).

Cabe destacar que ya a finales de 2010, la energía eólica representaba el 20% del total de la capacidad de producción eléctrica instalada en España, con 20.057 MW, y estaba previsto que siguiera creciendo hasta superar los 38 GW en 2020 (IDAE, 2010), convirtiéndose en la primera fuente de energía en España, con una potencia instalada por encima del 30%. Sin embargo, la realidad no fue así y, como muestra la Figura 1, el parón en las ejecuciones de parques eólicos a partir del año 2012 no permitió cumplir los objetivos marcados en el plan estratégico energético.

No obstante, incluso a pesar del parón en instalaciones debido a la moratoria de esos años, en 2020 se han alcanzado los 27.370 MW de potencia eólica instalada (REE, 2021), y España se ha convertido en el quinto país del mundo por potencia eólica instalada tras China, Estados Unidos, Alemania e India (ver Figura 2).

En cuanto a la generación y cobertura de demanda eléctrica, ya en 2013 la energía eólica permitió cubrir más del 20% de la demanda eléctrica anual en España (REE, 2018). Y en marzo de 2011 la energía eólica se convirtió por primera vez en la primera fuente de generación eléctrica de España, cubriendo el 21% de la demanda mensual. Pero el record en España se alcanzó por primera vez el 3 de noviembre de 2019 cuando la generación eólica alcanzó el 75,9% de la cobertura eléctrica horaria (REE, Informe mensual de Noviembre de 2019), un 53,5% de la cobertura diaria (https://www.ree.es/es/balance-diario/peninsula/2019/11/03/) y un el 48,9% a nivel de cobertura mensual (eso sin haber podido instalar la potencia inicialmente planeada).

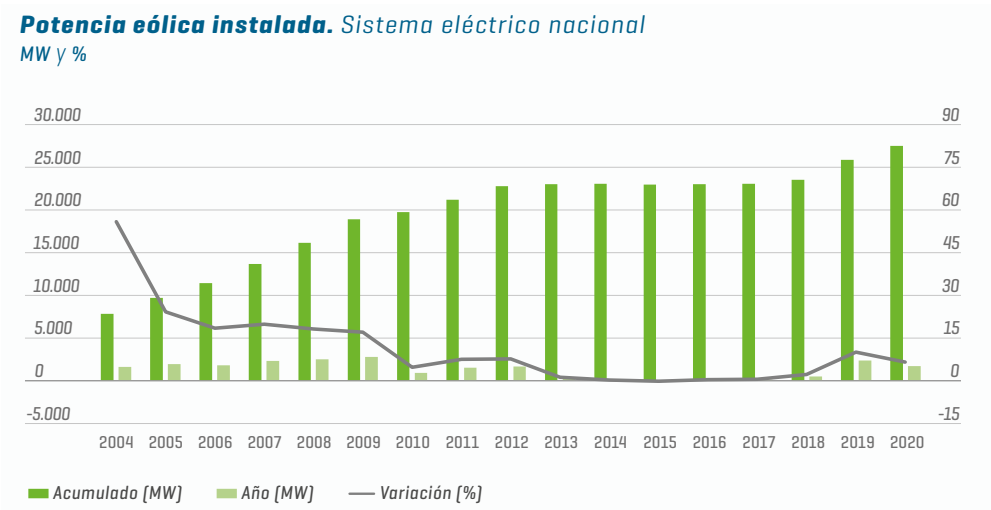


Figura 1: Evolución temporal de la potencia instalada Eólica (MW) en España entre 2004 y 2020. En 2020 la potencia instalada ha alcanzado los 27.370 MW. Se aprecia el efecto del "parón en las renovables" entre 2012 y 2018. Fuente: Datos de REE 2021.

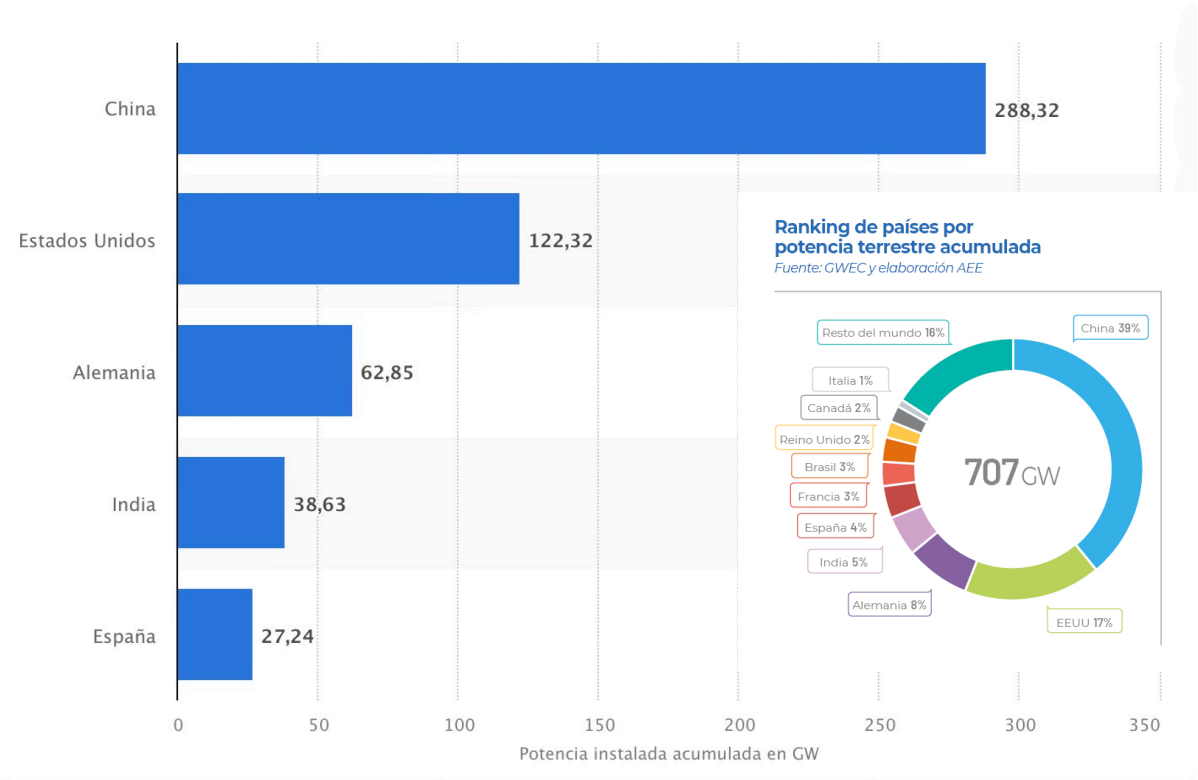


Figura 2: Ranking mundial de países por potencia instalada en energía eólica (en GW) en 2020. Fuente: GWEC y AEE.

Ese record de producción se ha batido por dos veces este mismo año: primero el 23 de enero alcanzando los 412 GWh (un 2,2% más que el anterior máximo de 2019), y a continuación el 8 de diciembre de 2021 superando los 416 Gwh (Fuente REE). Aunque el gran hito de este año 2021, ha sido que **la energía eólica se ha convertido en la primera fuente de generación eléctrica de España en 2021 (24,3%)**, tras haber sido cinco años consecutivos la segunda por detrás de las centrales nucleares, siendo la primera fuente de energía renovable y representando más del 55% de la potencia generada renovable en 2020 (REE, 2021, ver Figura 3).

A parte de su importancia en términos de generación eléctrica creciente y de satisfacción de la demanda (ya en 2007 producía el 20 % de la energía eólica mundial y en 2021 es la

primera fuente de generación eléctrica, por encima de la producida por las centrales nucleares), esta industria es además de extraordinaria importancia para nuestro país porque las empresas españolas del sector (producción de aerogeneradores, instalación, operación y mantenimiento de parques eólicos…) se han convertido en lideres mundiales en investigación, desarrollo y generación energética de origen eólica. Siendo hoy en día un motor económico incuestionable en España tanto por su capacidad tractora en I+D+i como por su capacidad de competir en mercados internacionales (de hecho es la única renovable en la que las empresas españolas pueden competir en toda la cadena de valor, desde la fabricación de turbinas a la explotación), en un contexto en el que los esfuerzos por descarbonizar las economías es una prioridad para poder mitigar el cambio climático.

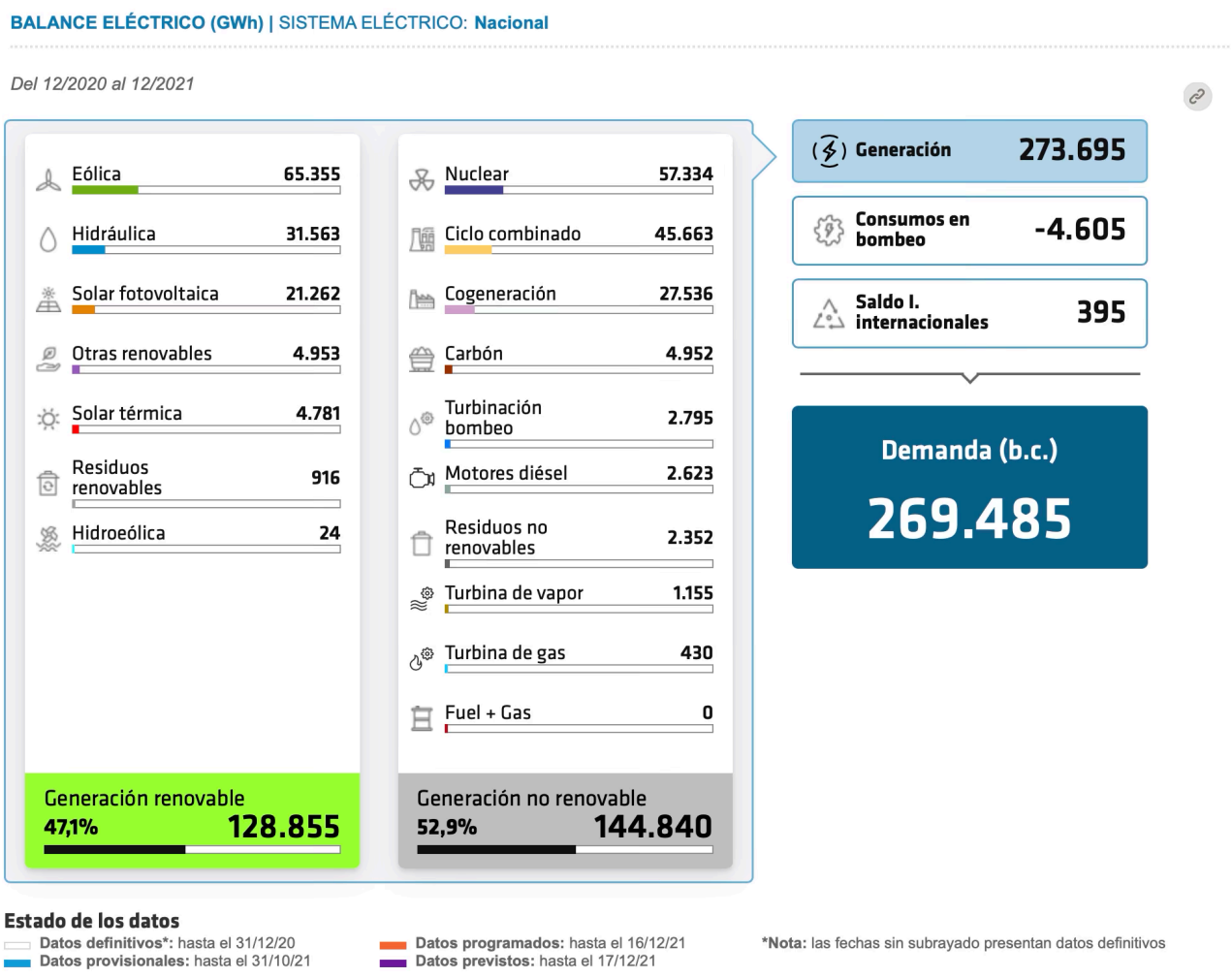


Figura 3: Porcentajes de la estructura de generación eléctrica en España en 2021 (de Diciembre de 2020 a Diciembre de 2021) para las diferentes fuentes de energía. Por primer año, la energía eólica se ha convertido en la **primera fuente de generación eléctrica de España en 2021 (24,3%)**. Fuente: REData. Balance Eléctrico nacional (a 17 de diciembre de 2021).

Este pequeño resumen de las cifras del sector de la energía eólica en España permite comprender la importancia de apoyar el desarrollo de este tipo de energía en un país como el nuestro, fuertemente dependiente del suministro externo de gas y petróleo y en el que no abundan los sectores en los que el país pueda ser considerado como líder tecnológico internacional.

1.2. Efecto de los aerogeneradores en los radares

En paralelo al rápido crecimiento de los parques eólicos, han ido apareciendo una serie de cuestiones asociadas a los impactos que este tipo de estructuras puede presentar. Uno de ellos es el impacto sobre la capacidad de medida de los radares, en general, y de los radares meteorológicos en particular.

Un radar (acrónimo que significa ***ra**dio **d**etection **a**nd **r**anging*) es un sistema de detección capaz de emitir radiación electromagnética en el espectro de las radiofrecuencias y captar la porción de radiación reflejada por un objetivo o blanco que esté en su línea de visión, detectando así su presencia y determinando con precisión su posición.

Los radares fueron un invento crucial de los años 40, que en buena parte permitió a los aliados ganar la segunda guerra mundial. Desde entonces se han desarrollado muchísimo y hoy en día son sistemas de detección ampliamente utilizados en múltiples aplicaciones comerciales y militares (diseñados en función de las características de los blancos que se pretende detectar). Los más conocidos por el gran público suelen ser los radares de tráfico, diseñados para detectar vehículos que circulan a más velocidad de la permitida, pero en verdad están presente en múltiples facetas de la vida cotidiana y son especialmente útiles para permitir la navegación aérea y marítima (radares diseñados para detectar barcos y aeronaves), como elemento crucial de los sistemas de defensa (radares diseñados para detectar aeronaves, misiles, etc.), y también como herramienta básica de los servicios meteorológicos en forma de radares meteorológicos (diseñados para detectar las gotas de lluvia presentes en un volumen de la atmósfera).

1.2.1. Características de los aerogeneradores que afectan a la capacidad de medida por radar

Los aerogeneradores modernos constan de tres elementos esenciales: la torre, que permite elevar el rotor (la parte en movimiento) sobre el terreno, la góndola (que es el módulo que alberga la turbina capaz de convertir el movimiento de las aspas en electricidad) y las aspas que son el elemento aerodinámico capaz de convertir la energía del viento en movimiento del rotor.

Las características exactas dependen del tipo de aerogenerador, pero esencialmente la torre (que puede llegar a ser de más de cien metros de altura) es una estructura fija, que suele ser metálica, o tener partes metálicas combinadas con partes de hormigón y/o fibra de vidrio. Lo que lo convierte en un reflector fijo de cara a los radares.

La góndola suele ser un cuerpo en forma de paralepípedo con dimensiones del orden de 10x3x4 m que abriga la turbina y los componentes eléctricos. El material exterior suele ser de fibra de vidrio o composites (materiales en principio "transparentes" a las microondas), combinado a veces con acero, pero las partes internas (esencialmente metálicas) lo convierten también en un excelente reflector para el radar. Las góndolas tienen capacidad de rotar 360º para así permitir que el aerogenerador se oriente contra el viento para aumentar su eficiencia. Esta rotación suele producirse a velocidades muy bajas, así que frente el radar la góndola se puede considerar esencialmente como un reflector estático.

Las aspas de los aerogeneradores suelen estar fabricadas con materiales composites (resinas epoxi) reforzados con fibra de vidrio o carbono (materiales en principio "transparentes" a las microondas). Sin embargo suelen incluir elementos metálicos, sistemas de amortiguamiento interno para evitar vibraciones y cables internos para la protección contra rayos, que las convierten en reflectores para los radares. Las velocidades de rotación de las aspas suelen estar entre las 10 a 20 rpm, es decir velocidades punta de entre 40 y 80 m s^{-1} (los

sistemas de control intentan evitar velocidades mayores para limitar así las fuerzas de aceleración centrífuga y minimizar la generación de ruido), velocidades que entran en el rango de las velocidades típicas de aeronaves volando a baja altitud, o de la propagación de algunos fenómenos meteorológicos.

En consecuencia, **un aerogenerador es para un radar un reflector que puede provocar ecos "ficticios" importantes** (independientemente del ángulo en el que se coloque el rotor en un momento dado), que además tienen una velocidad de desplazamiento aparente inducida por el giro de las aspas que se encuentra **en el rango de las velocidades tanto de las aeronaves como de los fenómenos atmosféricos.**

Un factor agravante del impacto sobre los radares es el gran tamaño de los aerogeneradores, que se espera siga creciendo en el futuro (una parte del éxito en la progresión de la contribución de la energía eólica a la generación eléctrica a nivel mundial se explica por el aumento de tamaño de los aerogeneradores) pudiendo alcanzar alturas de 200 m sobre el nivel del terreno en unos pocos años (ver Figura 4).

Ese aumento de tamaño convierte a los aerogeneradores en grandes blancos móviles que pueden ser vistos fácilmente por los radares que los tengan dentro de su campo de visión, pudiendo inducir la aparición de ecos ficticios capaces de generar errores en la capacidad de medida y falsas alarmas, efecto que con la proliferación de parques eólicos y con el aumento del tamaño esperable va a ir claramente en aumento en el futuro.

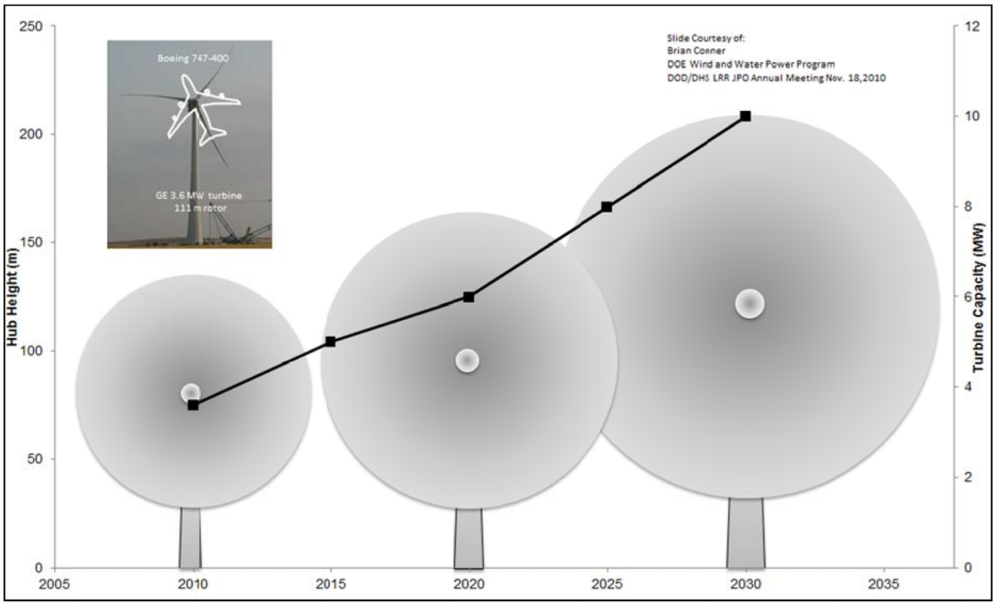


Figura 4: Evolución prevista entre 2010 y 2030 del crecimiento de las dimensiones de los aerogeneradores (eje de la izquierda). La altura de torre viene dada por el circulo central (representa la altura del buje) el diámetro del rotor por el circulo que representa la superficie de barrido de las aspas, siendo la altura máxima el punto superior de la figura. La capacidad de la turbina viene dada por la línea negra (la potencia está expresada en MW en el eje derecho). La representación superior izquierda del esquema de un avión sobre el eje de un aerogenerador permite comparar la sección transversal con el tamaño de un avión de pasajeros Boeing 747. Fuente: *US Department of Energy*, en Vogt et al., 2011.

1.3. El radar meteorológico

Para poder entender el impacto de los parques de aerogeneradores sobre la capacidad de medida de los radares, necesitamos primero comprender el principio del funcionamiento de la medida por radar. A continuación se describen de forma sucinta los principios básicos del funcionamiento del radar meteorológico.

1.3.1. Función e importancia del radar meteorológico

La capacidad de los sistemas radar para medir la precipitación fue descubierta durante la Segunda Guerra Mundial, cuando con fines defensivos se realizó un gran esfuerzo para desarrollar radares capaces de detectar a la aviación enemiga. Estos radares, muy similares a los actuales, detectaban ecos en principio no deseados, entre ellos ecos procedentes de blancos meteorológicos.

Finalizada la Segunda Guerra Mundial, en el Reino Unido, Estados Unidos y Canadá, comenzó a investigarse la posibilidad de utilizar radares para detectar específicamente la presencia de precipitación. Dicha investigación avanzó rápidamente, de modo que entre 1946 y finales de los 50 se sentaron las bases de la meteorología radar.

Durante la década de los cincuenta se avanzó considerablemente en la comprensión física de la medida de la precipitación mediante radar, aunque no fue hasta la generalización de los sistemas digitales de adquisición de datos, en los primeros años 70, que comenzó a ser posible procesar datos radar sobre extensas áreas con una resolución temporal aceptable. En la década de los 80, con los nuevos avances en la teoría de procesado de la señal y el desarrollo del radar Doppler (capaz de medir, además de la posición, la velocidad media de los blancos meteorológicos en dirección al radar) el radar meteorológico experimentó un gran avance, aunque no ha sido hasta los primeros años de este siglo en los que la mejora de los sistemas de procesado avanzado ha permitido realmente obtener medidas cuantitativas de lluvia fiables.

Así, hoy en día, prácticamente todos los países desarrollados poseen redes de radares meteorológicos operacionales que permiten a los servicios de meteorología efectuar labores de vigilancia meteorológica y generar productos cuantitativos de medida y previsión del campo de lluvia. Productos que son esenciales para múltiples aspectos de la vida cotidiana, desde los avisos y alertas tempranas por precipitaciones intensas a la mejora de la gestión de los recursos hídricos, pasando por la mejora de las previsiones meteorológicas especificas para sectores como la navegación aérea, el transporte terrestre y marítimo, las actividades expuestas a la intemperie o de ocio en general.

El radar meteorológico es pues una herramienta indispensable para la realización de las funciones básicas de cualquier servicio meteorológico, y por extensión una herramienta de gran importancia operativa y de gran trascendencia social.

1.3.2. Principio de medida y estimación cuantitativa de la lluvia mediante radar meteorológico

A medida que se propaga en la atmósfera la radiación electromagnética es dispersada por los objetos y partículas en ella existentes, entre otros los hidrometeoros (gotas de lluvia, cristales de hielo…). Los radares meteorológicos se basan en este fenómeno y en la capacidad de las antenas de emitir radiación electromagnética en una dirección y de captar la radiación reflejada.

De forma esquemática se puede decir que un radar consta de un transmisor (que genera una señal de voltaje de potencia considerable en una longitud de onda característica adaptada a la naturaleza del blanco que se quiere detectar), una antena (que confina la energía en un haz estrecho, de entre 0.5 y 2º, y permite emitir y recibir esa energía en una dirección determinada), un receptor (que recibe la señal de voltaje inducida en la antena cuando ésta capta radiación incidente en la longitud de onda emitida y es capaz de amplificarla y digitalizarla) y un procesador (capaz de realizar el procesado de esa señal para convertirla en una medida que permite caracterizar el eco del blanco y asociarle una intensidad, una posición y una velocidad).

En particular, el radar emite pulsos de radiación electromagnética con una determinada frecuencia (*Pulse Repetition Frecuency, PRF*), de modo que entre la emisión de un pulso y el siguiente permanece en modo escucha. Mientras permanece en modo escucha, la potencia recibida en los sucesivos instantes de tiempo corresponde a la radiación retrodispersada por cada uno de los volúmenes muestreados por el pulso recién emitido, los cuales se hallan a una distancia creciente del radar. La posición del volumen que retrodispersa la potencia recibida en un cierto instante de tiempo está determinada por el tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y la recepción del pulso retrodispersado, ya que la velocidad a la que se propaga la radiación electromagnética es una constante universal.

Además de medir como variable esencial la reflectividad de las gotas de lluvia (relacionada con la intensidad de lluvia a través de la función de distribución de tamaños de las gotas de lluvia), los radares son capaces de registrar también su velocidad radial utilizando el efecto Doppler. Este efecto se basa en medir la diferencia de fases entre pulsos consecutivos (diferencia que está relacionada con la velocidad de aproximación/alejamiento del blanco con respecto al radar), lo que permite obtener el espectro de velocidades Doppler de las partículas encerradas en el volumen de muestreo (ver una explicación más detallada en Doviak y Zrnic, 1993).

Finalmente, en la actualidad los radares meteorológicos más modernos (como el de MeteoGalicia) incluyen la capacidad de efectuar medidas de doble polarización. Estos radares, capaces de medir separadamente la potencia y la fase asociadas a cada componente del campo eléctrico (horizontal y vertical), extraen información adicional sobre la precipitación a partir de los cambios experimentados por la polarización de la radiación electromagnética (orientación del campo eléctrico) cuando ésta es dispersada por los hidrometeoros. Su definición así como una buena revisión de los principios de la polarimetría radar puede encontrarse también en Doviak y Zrnic (1993).

1.3.3. Estrategia de muestreo y representación de la información radar

La estrategia seguida por los radares meteorológicos para muestrear la atmósfera consiste en la rotación de su antena respecto al eje vertical con una cierta inclinación, de modo que para un ángulo de elevación dado el radar hace un barrido azimutal discreto (resolución aproximada de 1º) muestreando cada dirección radial con una resolución de entre 1 y 2 km. Como resultado se tiene la reflectividad (u otras variables medidas por el radar) en una malla de puntos sobre un cierto cono con su vértice en el radar y definido por el ángulo de elevación elegido (ver Figura 5). Si se repite el proceso para un número suficiente de elevaciones (entre 10 y 20) se tiene un muestreo volumétrico de la atmósfera.

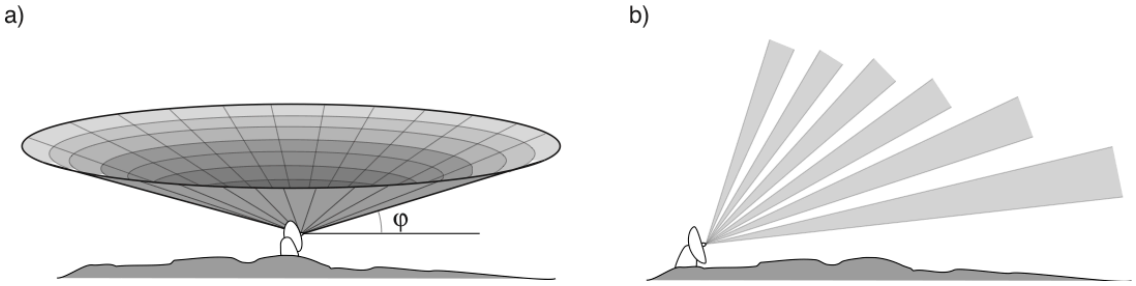


Figura 5: a) Muestreo realizado por un radar cuando rota en torno a su eje vertical con un cierto ángulo de elevación. b) Elevaciones sucesivas para las cuales el radar realiza un barrido azimutal completo como el representado en a). Fuente: Sánchez-Diezma (2001).

Para representar la reflectividad medida por el radar, se suelen utilizar representaciones 2-D a modo de mapas, usando una paleta de colores para indicar la reflectividad en cada píxel. La representación más usual se denomina PPI (Plan Position Indicator), la cual consiste en

proyectar sobre la superficie el cono de medidas radar asociado a cada elevación. De este modo se obtiene una imagen plana con el radar en el centro (ver Figura 6a).

En caso de disponer de información radar volumétrica es posible un tipo de representación denominada RHI (*Range Height Indicator*), la cual consiste en una imagen 2-D con la reflectividad medida en cada punto de una sección vertical (plano vertical que pasa por el radar), de modo que el eje horizontal es la distancia al radar y el eje vertical es la altura (ver Figura 6b). También se suele utilizar el producto conocido como CAPPI (*Constant Altitud Plan Position Indicator*), imagen 2-D en la cual se representa la reflectividad estimada en cada punto del plano horizontal a una determinada altura fija. Para generar un CAPPI se utilizan aquellos fragmentos de información de las diversas elevaciones que se encuentran más cerca de la altura a la que se desea generar el CAPPI.

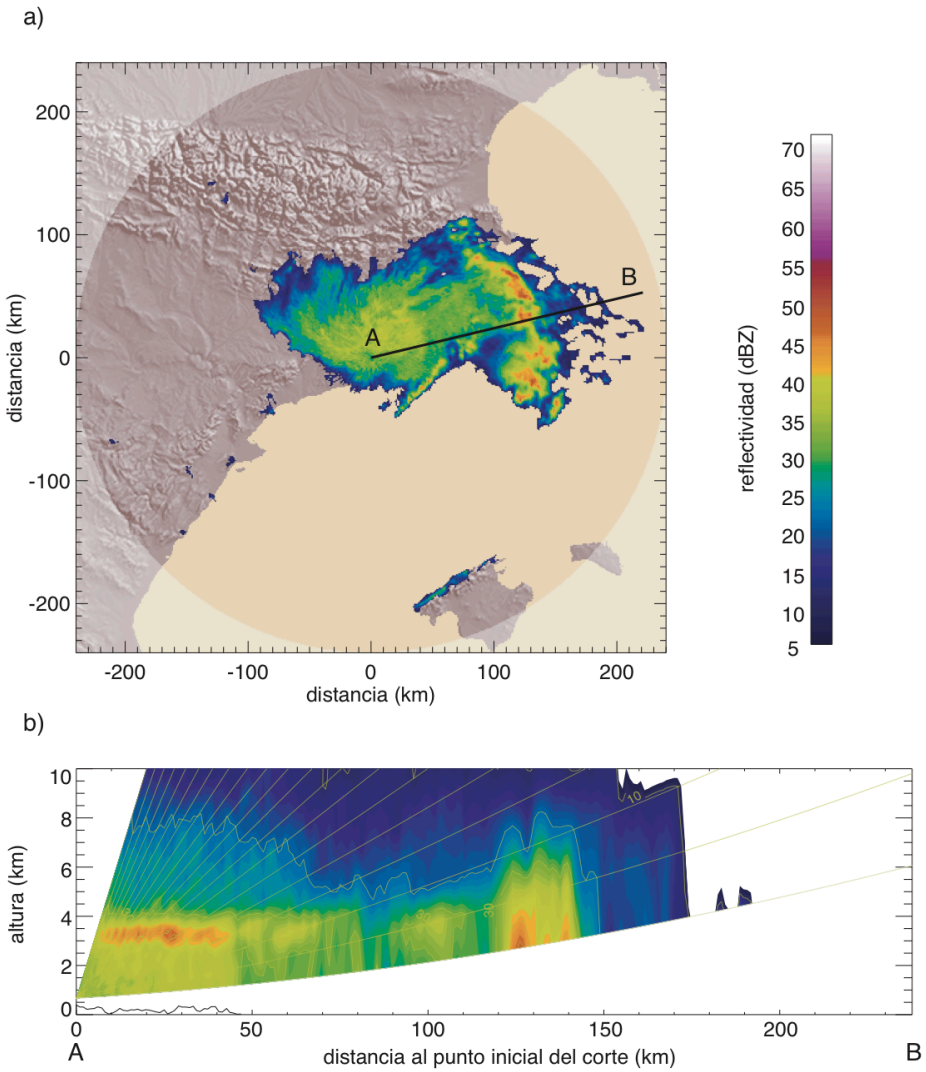


Figura 6: a) Ejemplo de PPI (*Plan Position Indicator*). Se muestra el PPI correspondiente a la primera elevación de un volumen de datos de reflectividad registrado por el radar de Corbera de Llobregat, Barcelona (en este caso 0,5º), perteneciente a la AEMET (03/09/2004@08:50 UTC). b) Ejemplo de RHI (*Range Height Indicator*), que corresponde a la sección vertical representada en a) mediante el segmento AB.

1.3.4. Aplicaciones cuantitativas: Importancia de la obtención de medidas a baja altitud

Como el radar tiene la capacidad de explorar la atmósfera variando el ángulo de elevación con el que apunta, en la mayoría de casos es posible evitar los obstáculos orográficos o antrópicos (edificios, torres de comunicaciones, aerogeneradores…) que pueden apantallar

(bloquear) a un radar, aumentando el ángulo de la elevación del tiro. Sin embargo eso determina que la trayectoria seguida por el haz se aleje de la superficie del terreno (ver sección 3.3.1) lo que comporta una pérdida en la calidad de la medida no deseada.

Para entender bien la importancia de esta limitación es oportuno recordar que la medida del radar meteorológico es una medida indirecta de la precipitación. De hecho lo que se mide es la reflectividad de la precipitación, *Z* (fracción de energía emitida por el radar que le es devuelta por las partículas de agua, líquida o sólida) de un determinado volumen de medida, o de muestreo, de la atmósfera.

Debido a la geometría del barrido del radar, la curvatura de la tierra y al hecho de que la energía se emite en forma de haz con un cierto ángulo de apertura (ver Figura 7) el volumen en el que mide el radar se ensancha y se eleva (en función del ángulo de elevación del tiro) con la distancia al radar. Así la medida promedia los valores de energía reflejada por las gotas de lluvia en volúmenes de muestreo cada vez de mayor tamaño, que además se encuentran a mayor altura, conforme nos alejamos del radar (ver Figura 7).

Eso implica que la precisión con la que se puede medir la cantidad de lluvia contenida en una unidad de volumen de la atmósfera decrece con la distancia al radar. Pero además que la corrección necesaria para poder ligar la variable medida a una altitud cada vez mayor con la variable de estudio (la intensidad de lluvia en la superficie del terreno) se hace cada vez más importante (y más difícil de estimar).

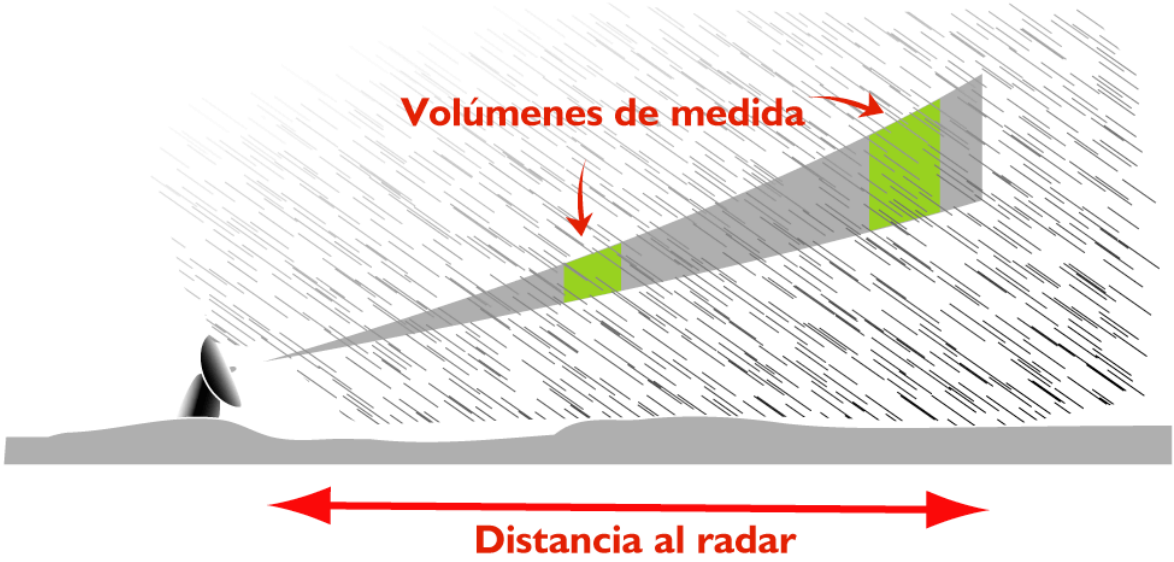


Figura 7: Esquema de la influencia de la distancia al radar en la calidad de la medida de precipitación (adaptado de Sánchez-Diezma, 2001). El volumen de muestreo aumenta en tamaño y en altitud sobre el terreno conforme nos alejamos del radar, lo que repercute en que la calidad de la medida decaiga con la distancia.

En el caso de la estimación cuantitativa de la lluvia es primordial disponer del mayor número de medidas posibles en las capas bajas de la atmósfera, lo más cerca posible de la superficie. Dado que la calidad de las estimaciones está fuertemente relacionada con la altura a la que se registran las medidas, será muy importante para los radares meteorológicos operar con programas de antena que permitan disponer de medidas a alturas bajas sobre las zonas de interés prioritario.

Por otro lado, la variable medida (reflectividad media en un volumen de 1 km^3 de atmósfera) y la que nos interesa medir (la intensidad de lluvia en la superficie del terreno), no están ligadas por una relación simple, sino a través de una relación entre momentos integrales de la distribución de tamaños de las gotas de agua en la atmósfera (distribución conocida con el nombre de DSD, *Drop Size Distribution,* ver Sempere Torres et al. 1994), que a su vez

depende del tipo de lluvia (del tipo de mecanismo microfísico predominante que determina el crecimiento de las gotas en el volumen de atmósfera en el que se realiza la medida; Zawadzki y Lee, 2004), por lo que se necesita una metodología de clasificación del tipo de lluvia para poder hacer correctamente esa transformación.

Todo ello determina que la medida de lluvia por radar con fines de estimación cuantitativa de la intensidad de precipitación sufra una degradación progresiva conforme el volumen de medida del radar se aleja del terreno al alejarnos del radar.

Así, es crucial que los emplazamientos de los radares estén elegidos no sólo teniendo en cuenta la minimización de los sectores apantallados debido a los obstáculos que los rodean, sino intentando mantener el haz lo más cerca posible de la superficie del terreno. Para ello es esencial priorizar emplazamientos situados en altitudes bajas, que el tamaño del haz sea el menor posible y que el programa de antena haya sido diseñado de forma que muestree de forma tan redundante como sea posible, las capas bajas de la atmósfera, para así **maximizar la visibilidad hidrológica del radar.**

1.4. Ecos no meteorológicos y apantallamientos: determinación y corrección

La energía emitida por el radar es concentrada por el reflector o antena en forma de haz estrecho (usualmente de 1º de apertura). Esto permite al radar poder determinar con precisión el ángulo en el que la energía ha sido emitida y el ángulo en el que recibe la energía reflejada por los blancos detectados.

Como las antenas no son perfectas, la energía no se confina al 100% en un solo haz, sino que aparecen una serie de haces menores, en formas de lóbulos secundarios alrededor del haz principal (ver Figura 8).

La calidad de una antena se mide por la capacidad de que esos lóbulos secundarios contengan la menor porción de energía posible, y que la distribución de potencia no tenga fluctuaciones en tiempo ni en el ángulo de orientación. La calidad de la antena, y la reducción de los lóbulos secundarios es un tema crucial en radares polarimétricos.

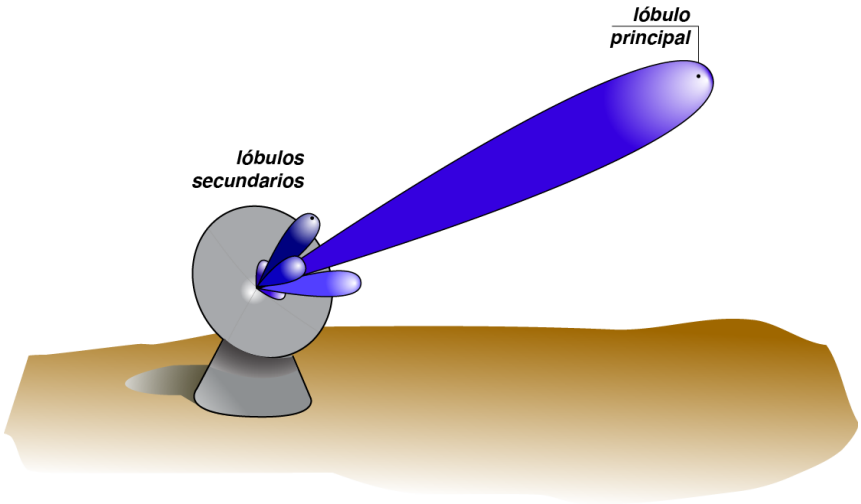


Figura 8: Esquema del haz principal del radar y de los lóbulos secundarios

La intercepción del haz del radar con los obstáculos que encuentra (mayoritariamente la orografía, pero en casos particulares también edificios, o en nuestro caso aerogeneradores, etc.) **produce medidas de reflectividad que no están relacionadas con la lluvia (ecos no meteorológicos).** De dicha intersección se derivan básicamente dos tipos de problemas (ver

Figura 9) que afectan de por si al radar pero que se agravan si existen parques eólicos que invadan su línea de visión:

a) En aquellas zonas donde el haz intercepte un obstáculo se registrará una reflectividad no relacionada con la lluvia, usualmente llamada eco no meteorológico. En caso de precipitación, el obstáculo y la lluvia interaccionarán de forma que la medida final de reflectividad estará contaminada (no representará únicamente la precipitación). Hablaremos de que el radar detecta ecos no-meteorológicos que se han de procesar para separarlos de la señal de la precipitación.

b) En las zonas situadas más allá de la intercepción aparecerán zonas de subdetección o apantallamiento de la medida radar debido que en dichas zonas la reflectividad se calcula suponiendo que éstas reciben la totalidad de la energía del haz, cuando en realidad sólo llega una parte debido al bloqueo del haz por el obstáculo. En caso de que el haz quede totalmente bloqueado aparecerán zonas ciegas en las que no se puede registrar la reflectividad.

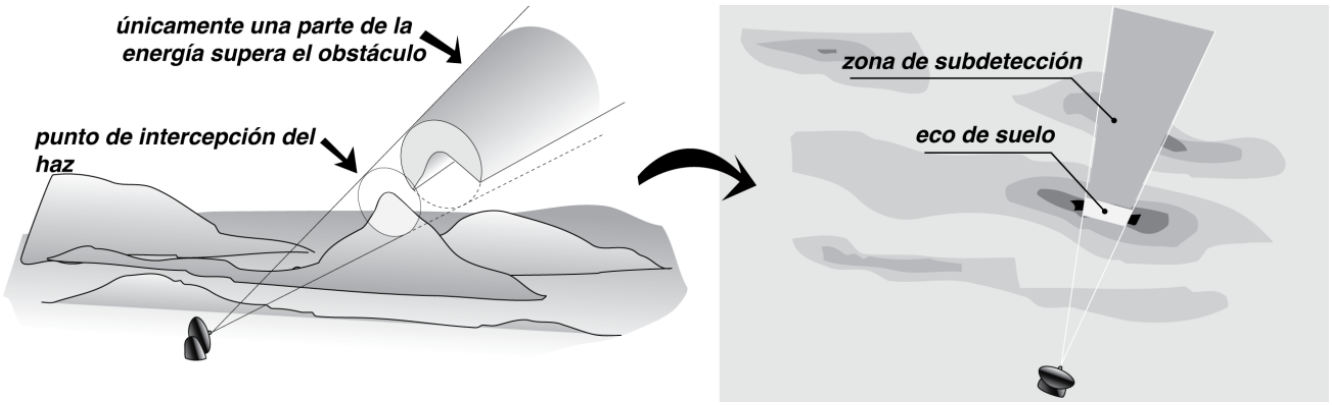


Figura 9: Ilustración de los errores ligados a la intercepción del haz del radar con el terreno (Sánchez-Diezma (2001). El mismo principio se puede aplicar a otro tipo de obstáculos como edificios o aerogeneradores

Estos efectos pueden afectar severamente la capacidad de medida del radar meteorológico y requieren de un procesado específico que en el caso de los radares no polarimetricos no son capaces de discriminar ni corregir ecos no-meteorológicos con velocidad no nula, como es el caso de los generados por los parques eólicos.

2. Efecto de los aerogeneradores en la medida del radar meteorológico

2.1. Primeros estudios del impacto de los aerogeneradores en las medidas por radar

El primer esfuerzo por comprender de forma exhaustiva el efecto de los aerogeneradores en las medidas de un radar fue llevado a cabo por el Ministerio de Defensa de Gran Bretaña en 1994. Tras haber constatado la aparición de interferencias permanentes en un radar de control aéreo, se relacionó estas interferencias con la construcción de un parque de aerogeneradores consistente en 14 unidades de 300 kW situadas a unos 7 km, dentro de la línea de visión del radar. La degradación de la capacidad de detección del radar llevó a la realización de una experiencia consistente en hacer volar un helicóptero alrededor del parque eólico con el objetivo de caracterizar el efecto de los aerogeneradores en la capacidad de detección de blancos situados encima o detrás de ellos, de estimar las características de los falsos ecos inducidos por los molinos y de investigar la afectación de la capacidad de medida de velocidades por efecto Doppler.

Los resultados de este experimento, recogidos en lo que se puede considerar el primer documento estructurado sobre los impactos de aerogeneradores en la medida por radar (*UK Royal Air Force*, 1994), permitieron concluir que **la presencia de aerogeneradores en la línea de visión de un radar causa interferencias que parecen ecos de aeronaves y que no pueden ser inhibidas con procesado basado en el filtraje del espectro de velocidades Doppler**, ya que se comportan como si fueran blancos móviles.

A raíz de estos resultados el Ministerio de Defensa de Gran Bretaña decidió que cualquier nuevo parque de aerogeneradores debería **requerir un permiso específico si se situaba a menos de 66 km de un radar de tráfico aéreo, o de 74 km en el caso de un radar de defensa, que sería denegado en el caso de que los aerogeneradores se situasen en la línea de visión del radar**.

Entre 2003 y 2005, el *Department of Trade and Industry* y el Ministerio de Defensa de Gran Bretaña encargaron diversos estudios para caracterizar con más detalle los efectos sobre los radares de la defensa aérea y los de control de tráfico aéreo. Los resultados (*UK Royal Air Force*, 2005) permitieron comprender mejor la naturaleza de las interferencias constatadas, confirmándose la **aparición sistemática de ecos no estáticos sobre los parques eólicos debidos a la rotación de las aspas de los aerogeneradores** (independientemente de la dirección del viento, y por lo tanto de la orientación del aerogenerador) que eran indistinguibles de los generados por aeronaves. Además estas pruebas confirmaron la aparición de zonas de subdetección en la capacidad de la medida de los radares inducidas por el efecto del apantallamiento de los aerogeneradores (bloqueo parcial o total del haz, y por consiguiente de la energía emitida por el radar), y que los ecos podían afectar a múltiples ángulos de elevación (no sólo a la más baja) debido a la intercepción por los aerogeneradores de los lóbulos secundarios del haz. La conclusión práctica del estudio fue el cambio de normativa en Gran Bretaña por la cual se exigía a cualquier nueva instalación de aerogeneradores un estudio para determinar que no se encontrase en la línea de visión de cualquier radar de defensa o de control aéreo, independientemente de la distancia a la que se encontrase del radar.

En 2006, el *Department of Defense* de los EUA encargó al *Air Force Research Laboratory* un estudio detallado utilizando un pequeño radar móvil del impacto de un parque de aerogeneradores situado en Fenner (NY, EUA, ver Figura 10), compuesto por 20

aerogeneradores de 1,5 MW, sobre la medida radar (*Air Force Research Laboratory*, 2006). Los resultados permitieron caracterizar ampliamente los efectos de los aerogeneradores sobre la capacidad de medida y detección del radar y mostrar su impacto en el espectro de velocidades Doppler.

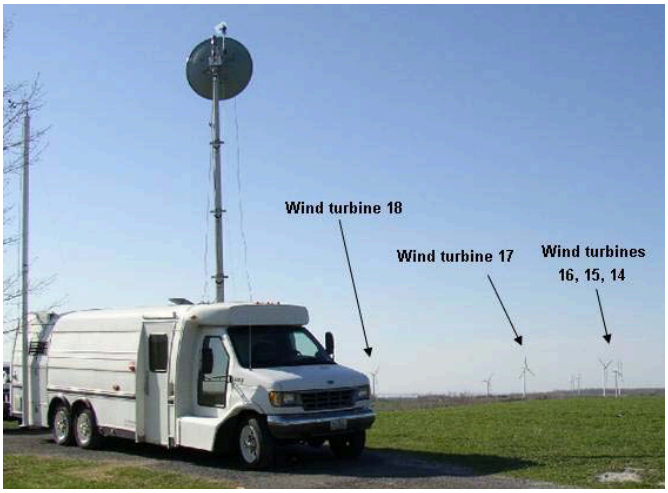


Figura 10: Equipo del *AFRL Mobile Diagnostics Laboratory* midiendo el impacto de los aerogeneradores del parque eólico de Fenner (NY, EUA) en el radar móvil. Fuente: *Air Force Research Laboratory*, 2006.

Como principal resultado del experimento se pudo concluir que **los aerogeneradores se comportan como grandes estructuras que bloquean la transmisión de la señal del radar produciendo ecos no meteorológicos de una forma similar a como lo hacen los edificios de gran altura**. Según la distancia y el ángulo de observación, el bloqueo producido por un único aerogenerador, debido a su forma esbelta, será relativamente pequeño, resultando en un área de sombra variable.

A su vez, **el efecto de la rotación de las aspas genera la creación de ecos falsos, que al tener velocidad se pueden confundir con los ecos típicos de un aeroplano comercial volando a baja altura**. La intensidad del eco es proporcional al número de aerogeneradores que se encuentren en el volumen de medida del radar pudiendo tener un efecto muy relevante para los radares de control aéreo y para los de defensa aérea.

En el momento en que se realizó el estudio, los únicos métodos de mitigación efectivos que se conocían eran los basados en evitar la localización de aerogeneradores en la línea de visión del radar, bien alejando los parques eólicos del radar, bien utilizando la orografía para localizarlos en las zonas de apantallamiento orográfico (que al ser obstáculos fijos son más fáciles de eliminar). Así que se recomendaba que se evitasen la ubicación de aerogeneradores en la línea de visión de los radares de control y defensa aérea.

A raíz de este informe, el *Department of Defense* (DoD) de los EUA identificó la necesidad de promover la investigación y el desarrollo de metodologías de procesado avanzado que permitiesen tratar el impacto de los aerogeneradores para permitir en el futuro la coexistencia de radares y parques eólicos (*Department of Defense*, 2006). Un elemento interesante de este informe es que el DoD identificó **la necesidad de preocuparse de los efectos de los aerogeneradores en los radares meteorológicos** y pidió al *National Weather Service* de los EUA de encargarse de velar por reducir los impactos de los parques eólicos en la capacidad de medida de los radares meteorológicos de la red norteamericana.

En Europa los Servicios Meteorológicos Nacionales alertaron por primera vez de los efectos negativos del emplazamiento de aerogeneradores cercanos a radares meteorológicos a través de un informe de EUMETNET (2005). La importancia de estos problemas fue reconocida públicamente en la Conferencia Europea de Radar en Meteorología e Hidrología (ERAD)

en 2006, en la que el entonces Chairman del *Steering Group on Radio-Frequencies Coordination* de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), y subdirector de MeteoFrance, presentó una comunicación (Tristan, 2006) llamando la atención sobre la necesidad de incidir en la concesión de permisos para evitar la instalación de nuevos parques en las zonas de línea de visión de los radares meteorológicos.

Es a partir de ese momento que comienza a aparecer una toma de conciencia de los efectos que los parques de aerogeneradores tienen sobre la capacidad de medida de los radares meteorológicos en los países europeos y que progresivamente se van tomando medidas para incluir estudios específicos de impacto en los tramites de autorización de las concesiones de los nuevos parques.

Fruto de esa preocupación creciente es el desarrollo de la metodología propuesta por el *Radar Operation Center* (ROC) de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) de los EUA en 2008, que aún en la actualidad sigue siendo la referencia internacional para los estudios de impacto de parques eólicos sobre radares meteorológicos (ver sección 3.1).

2.2. Caracterización de los impactos debidos a los aerogeneradores

A partir de 2006, y siguiendo el esfuerzo apadrinado primero por el *Department of Defense* (DoD) de los EUA y luego por toda la comunidad científica internacional, se comienzan a realizar numerosos estudios que llevan a una eclosión de publicaciones relacionadas con el impacto de los aerogeneradores en los radares. Inicialmente estos estudios y publicaciones se enfocan a mostrar casos reales de afectaciones de radares por el funcionamiento de los aerogeneradores de parques eólicos vecinos (por ejemplo, Haase et al., 2010; Seltmann et al., 2010) y progresivamente pasan a describir y caracterizar los impactos sobre las medidas del radar.

Estos impactos se presentan cuando la torre y las palas del aerogenerador interceptan el haz de energía del radar meteorológico (ver Figura 11). La intercepción del haz por las torres de los aerogeneradores produce ecos que en la imagen Doppler se identifican fácilmente pues tiene velocidad nula y por lo tanto pueden ser eliminados fácilmente. El efecto que producen las palas del aerogenerador en movimiento en cambio no puede ser eliminado filtrando el espectro de velocidades. Además, el efecto en la señal del radar es función del ángulo de posicionamiento del rotor y como la mayoría de los aerogeneradores presentan palas con superficies curvas, que dispersan la energía del haz del radar en todas las direcciones, se produce un efecto variable en la intercepción del haz que hace que el eco varíe en el tiempo además de tener velocidad no nula.

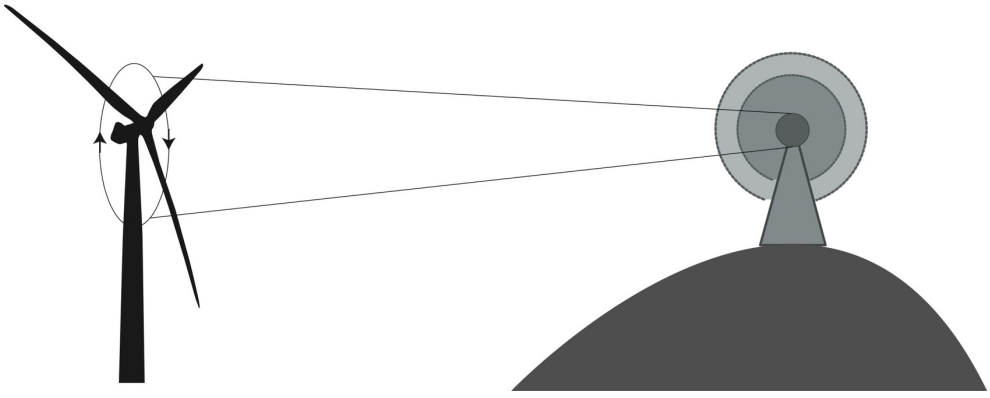


Figura 11: Esquema explicativo del fenómeno. El haz del radar impacta contra el aerogenerador, produciendo una contaminación en la señal.

Así que el impacto más importante sobre la medida del radar es la dispersión de la señal producida por el movimiento de las palas, que produce desplazamientos de las frecuencias del Doppler que pueden ser distribuidas en todo el espectro. Esto produce errores en la medida de la velocidad del viento, así como lecturas erróneas de la reflectividad (Gallardo-Hernando et al., 2008, 2011). Por otra parte, el apantallamiento producido por el aerogenerador puede producir errores en la medida de la precipitación al generar una zona de sombra en la imagen radar.

La conclusión generalizada es que resulta difícil diferenciar que fracción de la reflectividad producida alrededor de los aerogeneradores corresponde a lluvia, y en que medida corresponde a los efectos de eco del propio aerogenerador (ver Figura 12). Ya que la contaminación producida por los aerogeneradores produce una señal muy similar a la que produce la propia lluvia, y resultan indistinguibles en una imagen PPI de reflectividad. Además, si no se elimina correctamente la contaminación producida por los aerogeneradores, se producen sesgos en la potencia, la medida de la velocidad radial y el espectro de la señal del radar (Nai et al., 2011). Por lo tanto, los algoritmos que producen las estimaciones y previsiones de lluvia del radar meteorológico también producirán estimaciones sesgadas (Vogt et al., 2007).

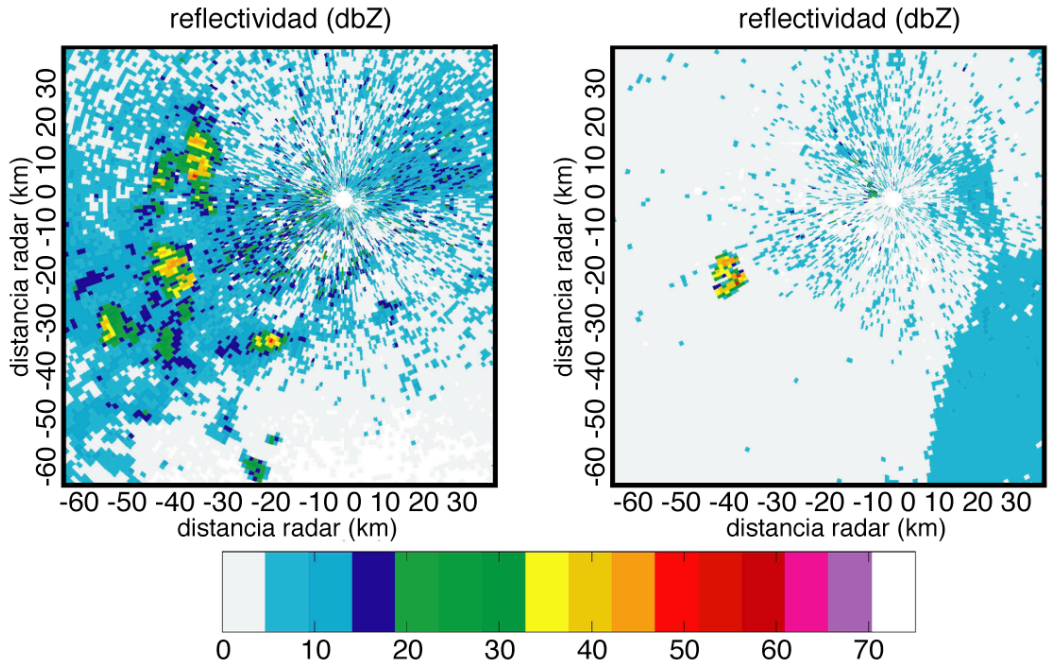


Figura 12: A la izquierda se muestra una imagen de radar en la que no puede diferenciarse la contaminación del aerogenerador y la lluvia. A la derecha se muestra la contaminación producida por el aerogenerador en un instante sin lluvia. Fuente: Isom et al., (2011).

Adicionalmente, a parte de las causas descritas anteriormente, la propagación anómala de la señal del radar (Berenguer et al., 2006) es otra de las consideraciones que deben tenerse en cuenta cuando se estudia la contaminación de los aerogeneradores. Al presentarse ciertas condiciones atmosféricas, puede ocurrir un fenómeno en el que la refractividad de la atmósfera se ve incrementada de forma notable, fenómeno conocido como súper refractividad, lo que incurva hacia el terreno el haz del radar produciendo que intercepte obstáculos que inicialmente estaban fuera de su línea de visión, y en particular que los aerogeneradores de un parque eólico que normalmente no se encuentra en la trayectoria de su haz, puedan aparecer inesperadamente. Este efecto se puede observar en la Figura 7 a, en donde se distinguen ecos sobre la Sierra de Tramuntana en Mallorca, que son ecos ficticios

no-meteorológicos causados por la propagación anómala que hace que el haz se incurve y intercepte la orografía.

2.2.1. Caracterización de los impactos en el espectro Doppler

En paralelo se multiplican también los estudios de caracterización de los errores inducidos por los aerogeneradores en el análisis del espectro Doppler de las imágenes radar. Esto se consigue comparando observaciones del radar meteorológico que se obtienen cuando la señal no tiene contaminación debida a los aerogeneradores, contra las que se obtienen en imágenes contaminadas por el efecto de los mismos. Las diferencias obtenidas entre ambas imágenes permiten caracterizar el efecto que producen los aerogeneradores en las estimaciones de la lluvia mediante el radar (Vogt et al., 2007; Palmer et al., 2008; Haase et al., 2010; Bachmann et al., 2010; Hood et al., 2010; Isom et al., 2011; Nai et al., 2011, Hall et al., 2017).

En la Figura 13a se presenta un ejemplo del espectro Doppler de una señal de radar en función de la dirección sin afectación por aerogeneradores. El eje horizontal corresponde a la velocidad Doppler de los hidrometeoros, el eje vertical es la distancia al radar y la paleta de colores corresponde a la potencia de la señal. En la Figura 13b se muestra el espectro Doppler de una señal del radar contaminada por el efecto de los aerogeneradores. La mayor parte de la contaminación es debida a las palas del aerogenerador, y es máxima cuando su plano de rotación es paralelo al haz del radar.

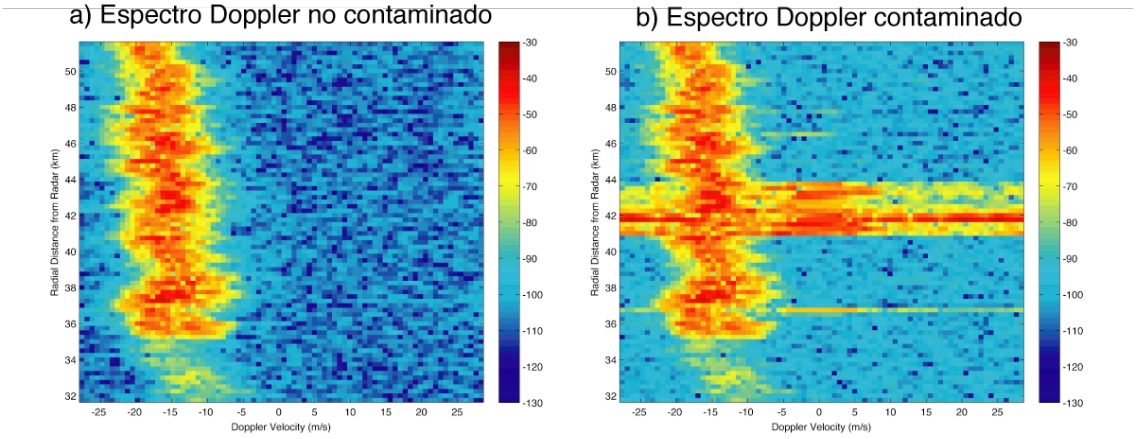


Figura 13: A la izquierda se muestra una señal de radar no contaminada, la cual es continua en el rango. A la derecha se muestra una señal contaminada por aerogeneradores, que presenta discontinuidades en el rango. Fuente: Nai et al., (2011).

Un segundo enfoque consiste en utilizar modelos a escala reducida de radares y aerogeneradores instalados en un laboratorio (Kong et al., 2011; Gallardo-Hernando et al., 2011; Zhang et al., 2011). Este enfoque surge a partir de la necesidad de caracterizar completamente la contaminación producida por los aerogeneradores, con el objetivo de conservar mejor la información meteorológica en la señal del radar para desarrollar técnicas de mitigación (Kong et al., 2011). En la Figura 14 se puede observar un ejemplo de este tipo de modelos a escala.

Mediante este tipo de experimentos en laboratorio y utilizando un muestreo a alta resolución es posible caracterizar el efecto que cada una de las componentes del aerogenerador produce en la señal del radar (Lok et al. 2010). Sin embargo estos efectos son muy difíciles de identificar cuando se utilizan observaciones empleando radares y aerogeneradores reales, en los que suele ocurrir que la velocidad de rotación de las palas es mucho más alta que la tasa

de muestreo del radar, y por lo tanto no siguen los patrones idealizados de los estudios de simulación.

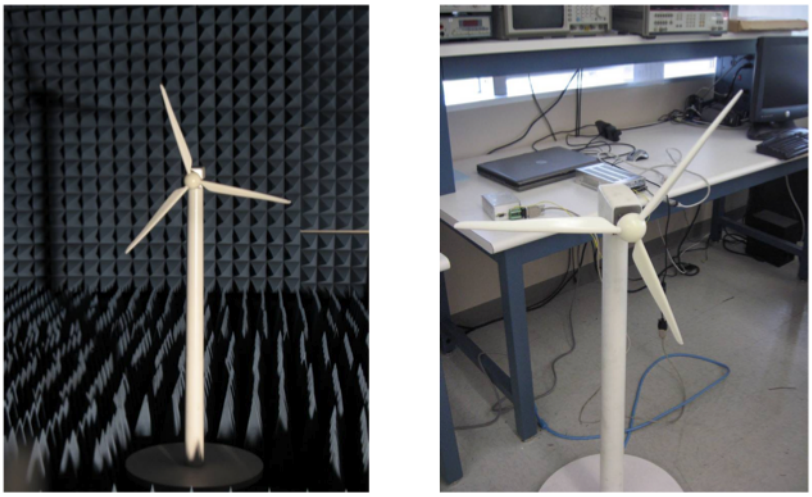


Figura 14: Modelos de aerogeneradores a escala utilizados en laboratorio para caracterizar la contaminación que producen en la señal del radar. Fuente: Zhang et al. (2011)

2.3. Metodologías de mitigación de los efectos inducidos por los aerogeneradores

Progresivamente conforme se avanza en los estudios de caracterización del efecto de los aerogeneradores en la señal del radar, comienzan a aparecer estudios y desarrollo de métodos para mitigar su impacto.

Estos se pueden clasificar en tres familias: los que inciden en el diseño de los parques, los que intentan reconstruir el espectro Doppler del radar y los que renuncian a la utilización del espectro Doppler y proponen metodologías de detección automática de las zonas afectadas y de restitución de los valores de la precipitación en el entorno de los parques eólicos.

2.3.1. Mitigación de los impactos de los aerogeneradores por modificaciones en el diseño de los parques

La primera familia de mitigación engloba los métodos que buscan corregir el efecto de los aerogeneradores a partir de la modificación de las características de los mismos o de complementar los parques eólicos con aparatos de medida adicionales que permitan corregir los errores inducidos.

A parte de una primera vía basada en mover los parques fuera de la línea de visión de los radares, existe una serie de estudios que proponen utilizar los métodos que se emplean en ingeniería aeroespacial, utilizando materiales y métodos de diseño que hacen los aerogeneradores invisibles al radar (Pinto et al., 2010). Aunque esta solución se ha llegado a implementar de forma experimental años después, resulta muy costosa tanto en implementación como en mantenimiento y no ha tenido excesivo éxito (el coste supera claramente el beneficio).

Con este enfoque también se proponen métodos para reconstituir la información que se obtiene con el radar, utilizando radares complementarios de baja potencia, de forma que se llenen los vacíos que se producen en la señal original debido a la contaminación del aerogenerador (Aarholt y Jackson, 2010).

Existen también métodos que proponen utilizar sistemas de radares que adaptan la fase de la señal para evitar interferencias con los aerogeneradores (Palmer et al., 2008), y métodos que

tienen en cuenta la caracterización del error y telemetría para mitigar corregir la señal de manera adaptativa mediante modelos paramétricos (Kong et al., 2010).

Sin embargo, entre este tipo de propuestas la más exitosa es la de **proponer que los constructores incluyan en los parques aparatos de medición de variables meteorológicas como pluviómetros y disdrómetros**, y compartan esta información con las agencias encargadas de operar el radar meteorológico (Vogt et al., 2009).

2.3.2. Metodologías para la corrección del espectro Doppler

La segunda familia de metodologías de mitigación se enfoca a corregir la señal del espectro Doppler afectada por el rotor de los aerogeneradores.

En este tipo de métodos se realiza un post-procesado de la señal del radar, teniendo en cuenta la caracterización de la contaminación producida por los aerogeneradores utilizando modelos conceptuales deducidos de las experiencias de laboratorio. Para ello se utilizan los diferentes momentos de la distribución del espectro Doppler de las zonas no contaminadas para completar los puntos de la imagen que están contaminados (Bachmann et al, 2010; Nai et al., 2010, Isom et al., 2011; Uysal et al., 2016). En la Figura 15 se muestra un ejemplo de los resultados que se obtienen a partir de este tipo de métodos. Para identificar la contaminación se buscan discontinuidades en el espectro del Doppler. Para cada rango de distancia al radar, se obtienen los momentos de la distribución de los datos limpios y se extrapolan a lo largo del rango. El proceso se repite hasta que se eliminan completamente las discontinuidades. El método funciona bien cuando la contaminación de la señal es fuerte y se identifican fácilmente las discontinuidades. Sin embargo, cuando la contaminación en la señal es débil, la efectividad de estos algoritmos decae.

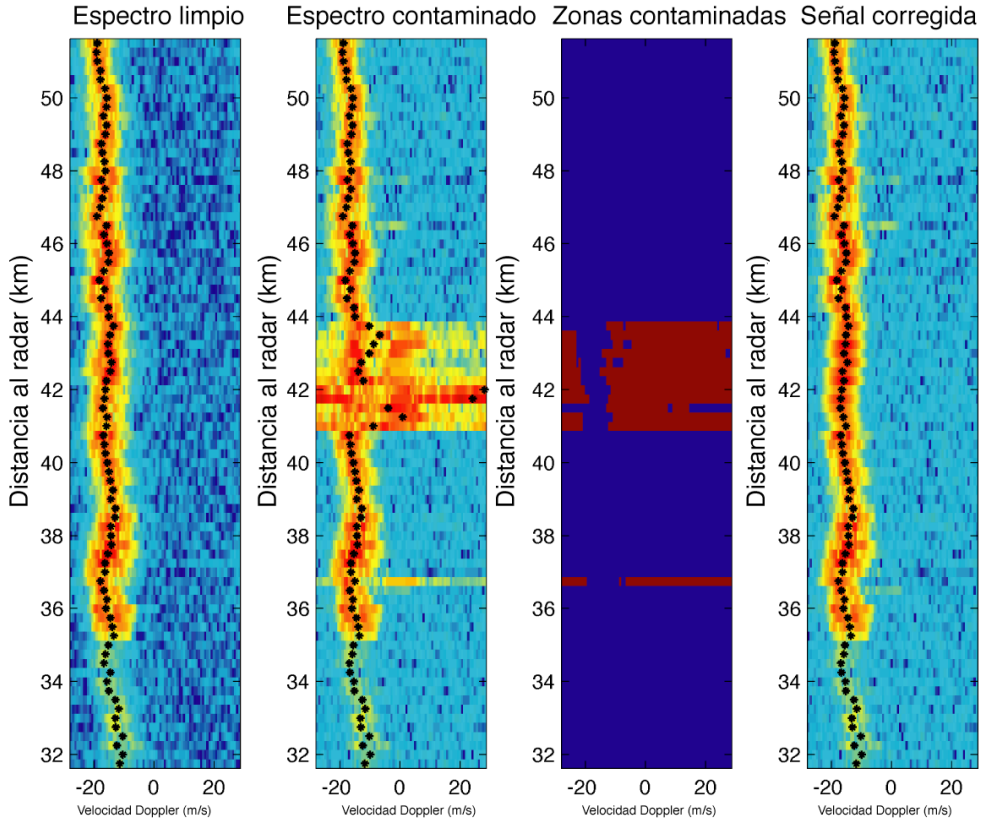


Figura 15: Resultados de un método de mitigación de la contaminación que realiza una interpolación de los momentos del espectro Doppler. A la izquierda, se presenta el espectro Doppler de una señal de radar en función de la dirección sin afectación por aerogeneradores. La segunda muestra el espectro Doppler con el efecto de los aerogeneradores. A la derecha el resultado del proceso de filtrado. Fuente: Nai et al. (2011)

Este tipo de métodos se basan en la idea de que "limpiando" el espectro Doppler a continuación se puede seguir aplicando toda la cadena de procesado radar habitual para la obtención de las estimaciones de precipitación ahora sin afectación de los aerogeneradores. En la práctica son procesos de filtrado muy complejos y pequeños errores en la restitución del espectro pueden acarrear errores significativos en la capacidad de medida de los hidrometeoros del radar, lo que les hace ser de difícil aplicación en aplicaciones operacionales.

2.3.3. Metodologías para la corrección de los efectos y restitución de los valores estimados de precipitación

La tercera familia, acepta de salida que el espectro Doppler es muy difícil de restituir, y se centra en solventar los problemas que afectan a la capacidad de medida de los hidrometeoros del radar, y en particular a la estimación del campo de precipitación.

Para ello, suelen emplearse métodos de detección automática de ecos no meteorológicos, para luego eliminarlos y posteriormente recuperar una estimación del valor del campo de lluvia y así corregir la contaminación de la señal (ver Figura 16). Como punto de partida, es necesario identificar los puntos de la imagen de la señal del radar que están contaminados por el efecto del aerogenerador, utilizando conceptos de lógica difusa para hacer la clasificación de los tipos de eco a partir de sus múltiples características en las variables radar integradas (como en Berenguer et al., 2006; Cho et al. 2006; Gourley et al. 2007; Hubbert et al., 2009) o en el espectro Doppler de las variables polarimétricas (Moisseev y Chandrasekar, 2009; Unal, 2009; Alku et al., 2015; Dufton et al., 2015; Ye et al., 2015; Seo et al. 2015). Una vez identificados, se escoge una vecindad de puntos alrededor del parque eólico en donde no se produzca contaminación de la señal. Utilizando estos datos 'limpios', se pueden emplear métodos de interpolación de base radial (Nuss y Titley, 1994; Barnes, 1995) para corregir los datos contaminados.

Una mejora de este tipo de métodos de reconstrucción es la propuesta por Sánchez-Diezma et al. (2001) que utiliza una clasificación previa en base al tipo de lluvia para elegir mejor los vecinos con los cuales realizar la interpolación del campo de lluvia sobre los pixeles de la imagen afectados. Teniendo en cuenta que los datos del radar son volumétricos, la interpolación se puede realizar en tres dimensiones, utilizando datos limpios que se encuentren a diferentes alturas. Esta solución es una de las más aceptadas, pues produce buenos resultados y su implementación es sencilla.

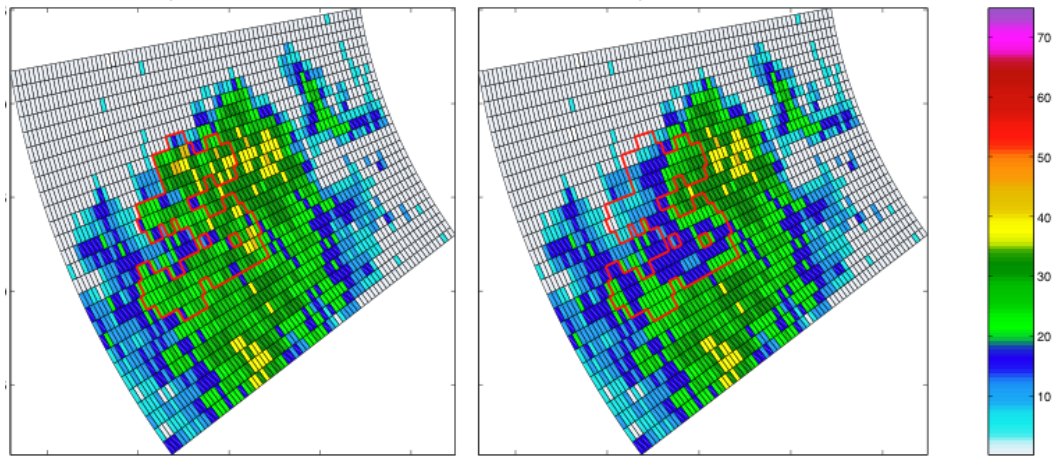


Figura 16: Resultados de un procedimiento de corrección de la contaminación de los aerogeneradores por interpolación, en la imagen de reflectividad de la señal. Fuente: Isom et al. (2011).

2.4. Hacia la coexistencia de los aerogeneradores y los radares meteorológicos

Aunque esta eclosión de estudios se mantuvo en plena efervescencia hasta hace unos años, la incorporación de técnicas de post-procesado avanzado en redes de radares operacionales fue progresivamente demostrando que, aunque los impactos eran innegables, podían ser corregidos con técnicas de post-procesado avanzado.

Así podemos decir que hasta el año 2010 la tendencia general era la de creer que los impactos de los parques eólicos podían afectar en tal medida el funcionamiento de los radares meteorológicos que lo más prudente era intentar impedir la instalación de nuevos parques eólicos si estos podían entrar en conflicto con los radares meteorológicos ya instalados (es decir invadir la línea de visión de los radares).

Desafortunadamente, la elección del emplazamiento de un nuevo parque no es una decisión trivial, ya que de hecho condiciona la viabilidad económica de una instalación, y se deben elegir las zonas más propicias para aprovechar la energía eólica, lo que suele llevar a seleccionar ubicaciones prominentes sobre la topografía, y por lo tanto de gran impacto visual, especialmente para los radares. Por lo tanto, progresivamente el aparente conflicto al que abocaba la postura inicial de los servicios meteorológicos se vio confrontado con la imperiosa necesidad de apoyar esta fuente de energía renovable clave para entre otras cosas enfrentar las consecuencias del calentamiento global y la emergencia climática. Y como consecuencia la visión se modificó para aceptar que el esfuerzo para mitigar y compensar los efectos sobre la capacidad de medida de los radares debía ser compartido entre las dos comunidades.

Así, en palabras de Vogt et al., 2009: "**la operación de una infraestructura como el radar meteorológico debe de hacerse de forma que permita la coexistencia con el desarrollo de nuevos parques eólicos allá dónde estos puedan ser rentables, minimizando el impacto a través de medidas de mitigación tomadas desde las dos partes"**.

En esa linea de impulsar la "coexistencia", el *Department of Energy* (DoE) de los EUA realizó un *Interagency Field Test & Evaluation of Wind Turbine – Radar Interference Mitigation Technologies* entre 2012 y 2013. Los resultados llevaron a la creación en 2014 del *Wind Turbine Radar Interference Mitigation* (WTRIM) *Working Group*, liderado por el *Sandia National Laboratory* (https://energy.sandia.gov/programs/renewable-energy/wind-power/wind-turbine-siting-and-barrier-mitigation/). El objetivo de la creación de WTRIM es *"to fully address wind turbine radar interference as an impact to critical radar missions, ensure the long-term resilience of radar operations in the presence of wind turbines, and* ***remove radar interference as an impediment to future wind energy, by 2025".***



Figura 17: Ejemplo de coexistencia entre radar meteorológico y aerogeneradores a distancias cortas. Fuente: WTRIM, https://energy.sandia.gov/programs/renewable-energy/wind-power/wind-turbine-siting-and-barrier-mitigation/ (2015).

En esa línea, la comunidad científica internacional ha hecho desde entonces un enorme esfuerzo por estudiar la caracterización del impacto de los aerogeneradores en las medidas de los radares meteorológicos y en proponer medidas de mitigación, que progresivamente se han ido implementando de forma operacional.

Así de la visión generalizada hasta el año 2012 orientada a corregir el espectro Doppler del Radar o a desplazar los parques de aerogeneradores situados a menos los 10 km de distancia fuera de la línea de visión del radar, se ha ido pasando a aceptar los emplazamientos propuestos por los promotores y a corregir los efectos inducidos bien utilizando datos de radares de doble Polarización capaces de detectar inequivocamente los pixeles con aerogeneradores (Hubbert et al., 2009; Hood et al., 2010; Keränen et al. 2014; Dufton et al., 2015; Ye et al., 2015; Seo et al. 2015) o bien con algoritmos de lógica difusa capaces de integrar las propiedades de los gradientes verticales y horizontales de diferentes magnitudes radar (Berenguer et al. 2006), algoritmo que se aplica operacionalmente con éxito incluso en radares no polarimétricos mostrando que actualmente existen herramientas de procesado capaces de permitir la coexistencia de parques de aerogeneradores y radares meteorológicos incluso a pequeñas distancias (< 5 km) y con invasión de la línea de visión del radar (Sempere Torres et al. 2012; Sempere Torres et al. 2013).

En ese sentido la propia experiencia de colaboración de MeteoGalicia con el CRAHI-UPC y VAISALA (Keränen et al. 2014) es todo un caso de éxito, habiendo permitido una gran mejoría en los productos de medida del radar de Monte Xesteiras entre 2011 y la actualidad (ver secciones 2.5 y 2.6).

El problema que queda aún por resolver más allá de la detección y eliminación de los falsos ecos inducidos por los aerogeneradores es **la reconstrucción eficiente de los campos estimados**. Aunque en los últimos años algunos fabricantes de radares han sido capaces de incluir en sus sistemas de procesado algoritmos de reconstrucción de los campos estimados de las variables polarimetrías, éste sigue sin una solución satisfactoria en la mayoría de radares y para el que **se necesita la incorporación de post-procesados avanzados específicos no incluidos en los sistemas de control de los radares.**

Finalmente cabe destacar que la prueba de la madurez a la que se ha llegado en este campo es que las publicaciones sobre el impacto de los aerogeneradores en los radares meteorológicos han prácticamente desaparecido desde 2015. El ROC de la NOAA ha dejado de producir nuevo material y los pocos artículos publicados recientemente han pasado de tratar mejoras de los métodos de corrección basado en algoritmos fuzzy-logic o de procesado de variables de doble polarización, a ser aplicaciones de los datos de radar para calcular la velocidad angular de rotación de las turbinas (Kladogenis et al., 2019) o para estimar el impacto del granizo en las palas de los aerogeneradores (Letson et al., 2020).

2.5. Situación en Galicia en 2011

Como se ha dicho, un primer estudio del impacto de los emplazamientos del parque eólico de Touriñán III-2 sobre el radar de MeteoGalicia fue realizado por el CRAHI-UPC en 2011.

En aquellos momentos la situación era que el radar de MeteoGalicia sufría de manera perceptible a simple vista del impacto de los numerosos parques eólicos ya instalados en aquel momento al carecer de un procesado adecuado que utilizase su potencial de radar polarimétrico, y el operador del radar se sentía impotente frente a los efectos de los nuevos parques en proceso de adjudicación.

La Figura 18 muestra capturas de la web de MeteoGalicia de 2011 con imágenes del radar de Xesteiras en la que los ecos no-meteorológicos de los parques eólicos situados en las sierras de O Candán, Ameixeiras-Testeiros Monte Seixo-Cando y TEA se veían de forma

permanente siendo fácilmente detectables en cualquier imagen sin lluvia ya que el procesado del que entonces disponía MeteoGalicia era insuficiente para eliminar estos ecos asociados a la presencia de aerogeneradores situados en altos orográficos importantes.

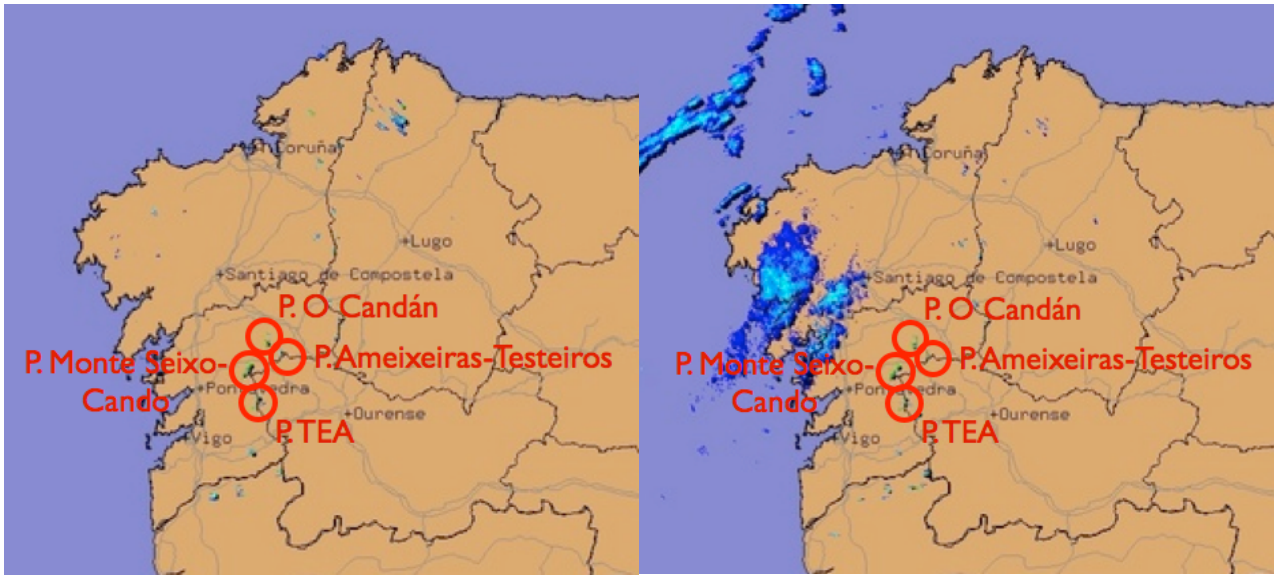


Figura 18: Imágenes del radar de MeteoGalicia extraídas de su página web para los instantes 20111128@11:05 (a la izquierda) y 20111129@11:45 (a la derecha). Los círculos rojos señalan los ecos no meteorológicos permanentes debidos a los parques eólicos de O Candán, Ameixeiras-Testeiros, Monte Seixo-Cando y TEA, que contaminaban la imagen de forma apreciable generando un ruido equivalente a una lluvia ficticia permanente. Fuente: página web de MeteoGalicia http://www.meteogalicia.es.

En ese contexto era muy difícil en ese momento no poner reparos a la instalación de nuevos parques eólicos que invadiesen la línea de visión del radar. Pero aún así MeteoGalicia aceptó que una mejora del procesado del radar más la instalación de puntos de medida de lluvia en los parques podía ser una medida compensatoria que permitiese conceder los permisos.

A raíz de la colaboración entre MeteoGalicia y el CRAHI-UPC para comprobar la eficiencia del procesado propuesto en la resolución de los problemas que ya tenían con los parques en funcionamiento (Sempere-Torres et al. 2012) y el posterior trabajo de MeteoGalicia con VAISALA, el fabricante del radar, se desarrolló un procesado en base a variables polarimétricas que fue probado en el radar de Galicia (Keränen et al. 2014) y que hoy es parte del paquete comercial de procesado IRIS.

Esas mejoras sirvieron para que el radar de Xesteiras incorporase una mejora de procesado significativa que llevó en 2014 a resolver parcialmente los problemas que en aquel momento generaban los parques eólicos ya en funcionamiento.

2.6. Situación en Galicia en 2021

La aplicación de esa mejora en el programa de procesado IRIS en el radar de Galicia desde 2014 ha permitido mejorar enormemente la situación. Así actualmente los ecos no-meteorológicos de los parques eólicos son automáticamente detectados por el radar de MeteoGalicia y eliminados de la estimación del campo de lluvia.

La Figura 19 muestra la comparación actual de los productos de estimación de lluvia por radar (en reflectividad) en base al radar de MeteoGalicia (izquierda) y del radar de A Coruña de la AEMET para el 24 de junio de 2020 a las 15h30. A pesar de las diferencias en la apariencia, se puede ver que el radar de MeteoGalicia muestra una situación sin ecos de precipitación. En el de la AEMET, que es un radar sin capacidades polarimétricas todos los ecos registrados son ecos de parques eólicos no filtrados (ver posición de los parques eólicos

en la Figura 21), que sin embargo no aparecen en el radar de MeteoGalicia porque sí cuenta con el procesado de eliminación de ecos en base a las medidas polarimétricas.

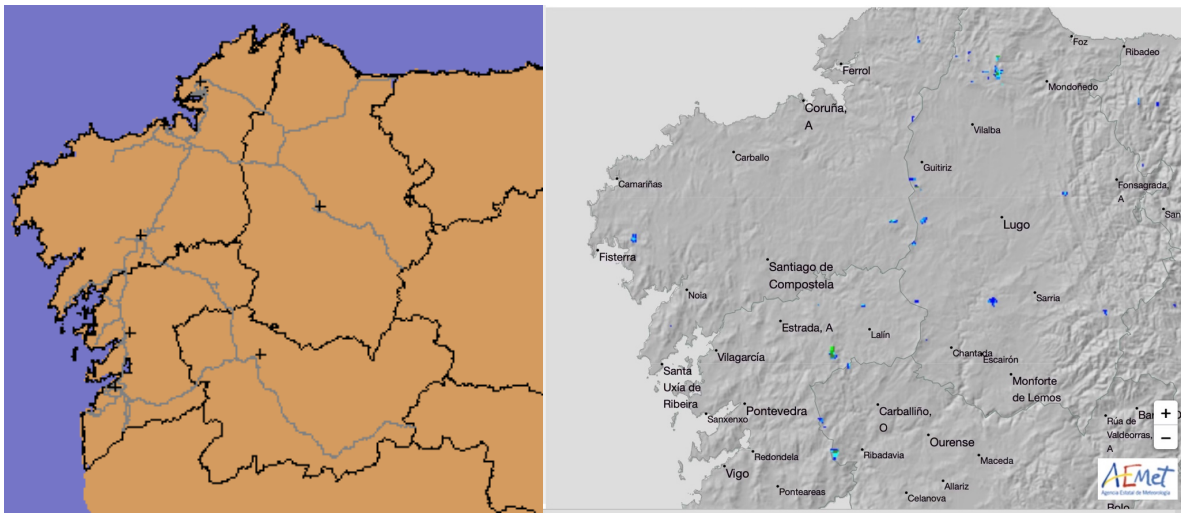


Figura 19: Comparación de los productos de estimación de lluvia por radar (en reflectividad) en base a radar de MeteoGalicia (izquierda) y del radar de A Coruña de la AEMET para el 24 de junio de 2020 a las 15h30. Fuente: páginas web de MeteoGalicia http://www.meteogalicia.es, y de AEMET http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/radar.

Estos ecos no-meteorológicos no eliminados en el radar de la AEMET acaban produciendo la sensación ficticia de que esta lloviendo permanentemente encima de los aerogeneradores. Así cuando se calculan mapas de lluvia acumulada, el efecto se hace mucho más notorio haciendo perder la fiabilidad en la capacidad de medida del radar de la AEMET, cosa que no sucede en el radar de MeteoGalicia.

La Figura 20 muestra la comparación del producto de acumulación de lluvia de 6h para el 23 de junio de 2020 de las 8 a las 14h (6-12h UTC) vistas por el radar de MeteoGalicia (izquierda) y el radar de la AEMET de A Coruña (derecha). Todos los ecos que se observan en el radar de la AEMET son ecos no meteorológicos generados por parques eólicos no corregidos (ver posición de los parques eólicos en la Figura 21) debido a que es un radar de tecnología obsoleta con una capacidad de procesado insuficiente, basado exclusivamente en el filtrado del espectro Doppler de la señal radar. Los ecos sobre el mar son también ecos no meteorológicos de reflexión en el mar por propagación anómala. El radar de MeteoGalicia en cambio es un radar de doble polarimetría que desde 2014 cuenta con procesado de eliminación de ecos no meteorológicos polarimétrico.

Esta constatación permite corroborar la estimación de impactos que se propuso en el informe del CRAHI-UPC en 2011 y comprobar que las medidas compensatorias entonces propuestas (tan sólo ejecutadas en parte) eran suficientes al menos para erradicar los problemas de ecos no-meteorológicos generados por los parques eólicos ya existentes, y por consiguiente de los de nueva instalación.

En la actualización del informe de impacto nos centraremos pues en seguir el procedimiento ya seguido en 2011, pero enfocando las medidas compensatorias en la resolución de los problemas que no se han resuelto de forma satisfactoria (procedimiento de mejora de la reconstitución de las estimaciones incluyendo medidas in situ ya que el procesado actual resulta excesivamente agresivo cuando hay lluvia y no es lo suficientemente fiable en la reconstrucción del campo de lluvia y resolución de los problemas ligados a los apantallamientos) y que permitirán no sólo mitigar los impactos que generará el nuevo parque eólico propuesto sino también la calidad de la medida del radar de MeteoGalicia de forma generalizada.

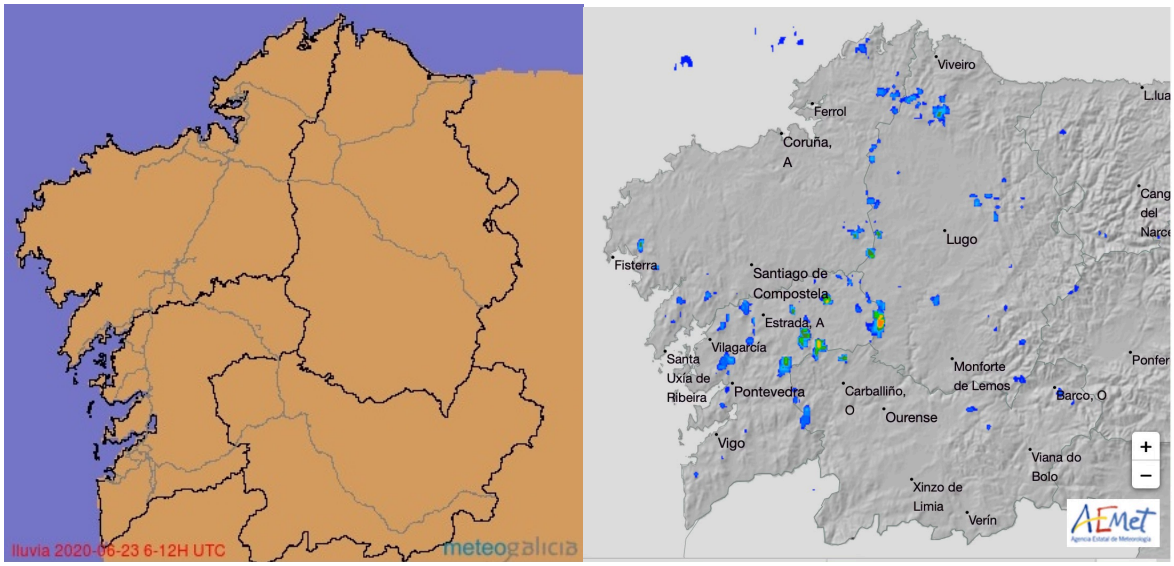


Figura 20: Comparación del producto de acumulación de lluvia de 6h para el 23 de Junio de 2020 de las 8 a las 14h (6-12h UTC) vistas por el radar de MeteoGalicia (izquierda) y el radar de la AEMET de A Coruña. Todos los ecos que se observan en el radar de la AEMET son ecos no meteorológicos no corregidos. Los ecos sobre el mar son también ecos no meteorológicos de reflexión en el mar por propagación anómala. Fuente: páginas web de MeteoGalicia http://www.meteogalicia.es, y de AEMET http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/radar.

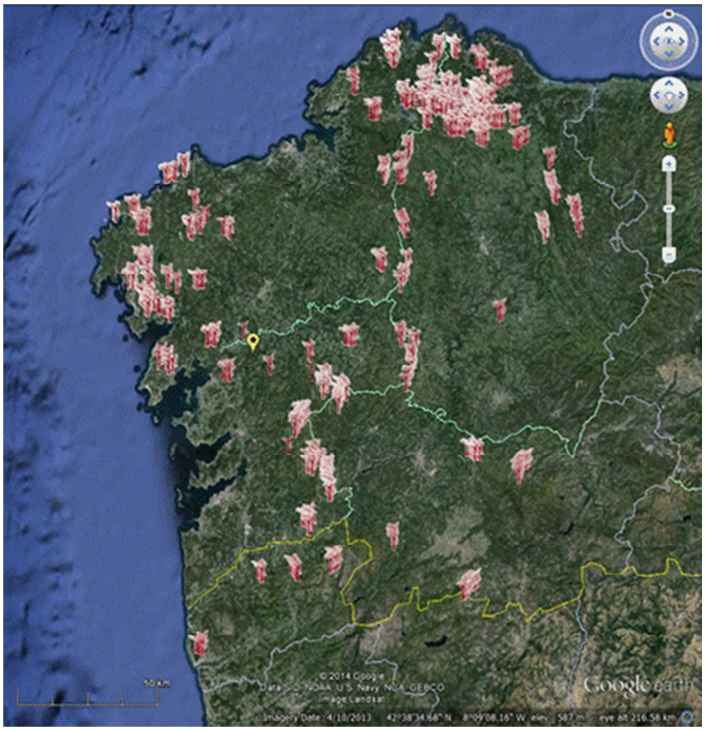


Figura 21: Mapa de aerogeneradores en Galicia en verano de 2014 extraído de Keränen et al. 2014. Se puede comparar con los ecos de la Figura 20 para comprobar de forma aproximada la alta correlación entre esos ecos no meteorológicos y la existencia de parques eólicos.

3. Principios técnicos del estudio de impacto

3.1. Metodología de determinación de impactos propuesta por el *Radar Operation Center* (EUA)

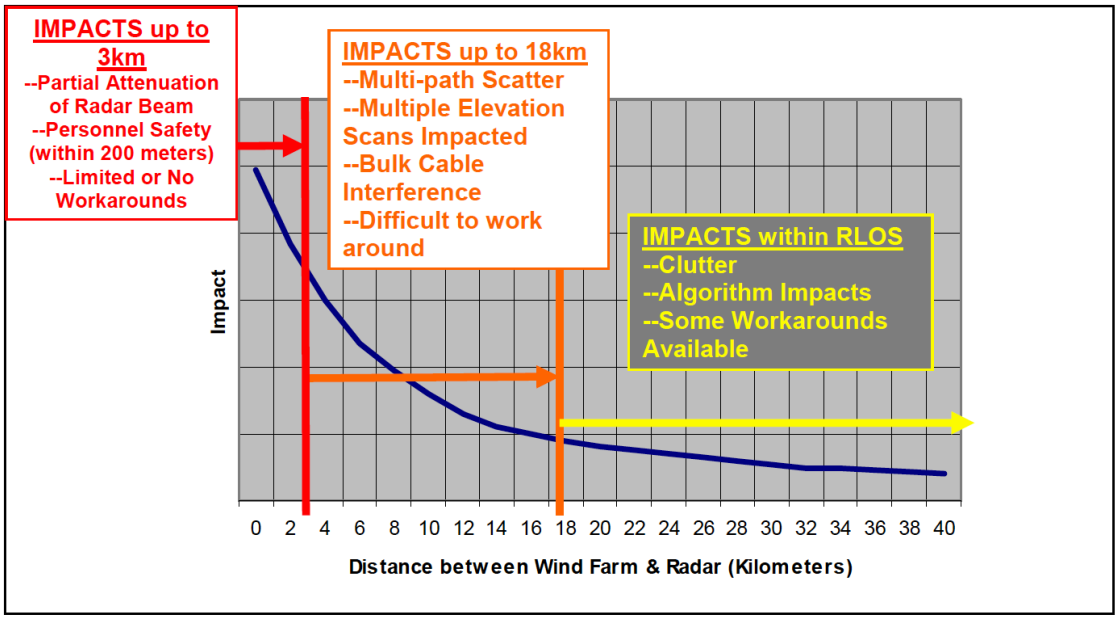


Figura 22: Esquema de identificación de impactos propuesto por el *Radar Operation Center* (EUA)

La metodología propuesta en 2008 por el *Radar Operation Center* (ROC) de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) de los EUA dividía el área entorno a un radar en tres zonas (ver Figura 22): Una primera zona de **hasta 3 km de distancia** considerada como un área de proximidad en la que los posibles impactos pueden ser muy difíciles de corregir y en la que se propone excluir la instalación de nuevos parques eólicos. Una de **entre 3 km y 18 km**, dónde se tiene que verificar que los aerogeneradores no entran en la línea de visión del radar (ya que las correcciones de los efectos asociados se consideraban en ese momento como difíciles) y una tercera **a partir de los 18 km** en la que se considera que incluso si hay intercepciones del haz hay metodologías que pueden mitigar suficientemente los impactos.

En los últimos años se han ido introduciendo pequeñas modificaciones fruto de la experiencia acumulada, aunque en esencia la metodología sigue siendo muy parecida, con el objetivo de proporcionar una guía simple que permita distinguir entre situaciones en los que el promotor del parque solo debe notificar su plan de instalación, y los diferentes grados de impacto que han de llevar a la consulta con el Servicio Meteorológico antes de poder contar con el permiso correspondiente.

En la página https://www.roc.noaa.gov/WSR88D/WindFarm/TurbinesImpactOn.aspx se puede ver la versión actualizada (febrero 2020) que sigue incluyendo la misma figura. Esta metodología sigue siendo la de referencia en los EUA, y la que se ha admitido también como referencia a nivel internacional.

Sin embargo, la implementación actual en los EUA distingue en verdad 4 zonas de impacto. Para determinar en que zona de impacto se encontraría el emplazamiento propuesto para el nuevo aerogenerador se cambia el criterio inicial de la simple distancia al radar (Figura 22) por una zonificación en la que el criterio fundamental es **si el nuevo aerogenerador invadirá o no la línea de visión del radar**. Y en ese caso, a que distancia del radar se produce la invasión de la línea de visión y si afectará a una o más elevaciones del programa

de antena. El resultado lleva a una clasificación en **cuatro categorías o zonas de impacto llamadas zona de exclusión, de mitigación, de consulta y de notificación, que ya no son zonas geométricas fijas,** y que llevan asociadas diferentes acciones para el promotor.

Este procedimiento implica que **para cada nuevo emplazamiento se ha de determinar si invade la línea de visión del radar** teniendo en cuenta la topografía del terreno circundante al radar, la altura que alcance el rotor del aerogenerador sobre el mismo, la distancia a la que se encuentra del radar y el número de ángulos de elevación de la operación del radar que se pueden ver afectados por las palas. Cálculo que se ha de **realizar para cada nuevo emplazamiento**, y que puede llevar a que dos aerogeneradores vecinos pudiesen estar en zonas de impacto diferentes. Las cuatro zonas definidas por el *Radar Operation Center* son:

1. EMPLAZAMIENTO EN ZONA DE EXCLUSIÓN: la zona en la inmediación del radar (hasta 4 km de radio alrededor del radar) se considera zona de exclusión. En esta zona **no se autorizan aerogeneradores que invadan la línea de visión del radar** debido a la posibilidad de impactos graves, especialmente inducido por la góndola de la turbina, que bloquearía el haz del radar y que incluso podría causar daños en el receptor del radar si se ubican en el campo cercano del mismo.

2. EMPLAZAMIENTO EN ZONA DE MITIGACIÓN: un emplazamiento se considera en la zona de mitigación si el aerogenerador propuesto (en función de las características del terreno y de la altura y diámetro del rotor) **invade la línea de visión del radar en más de un ángulo de elevación y se encuentra a distancias inferiores a 36 km de distancia del radar**. Los parques eólicos con emplazamientos ubicados en zona de mitigación tienen el potencial de generar impactos entre moderados a altos. Por lo tanto, el promotor deberá proporcionar información detallada del proyecto y realizar un análisis de impacto exhaustivo, así como discutir con el servicio meteorológico posibles soluciones de mitigación de los impactos.

3. EMPLAZAMIENTO EN ZONA DE CONSULTA: un emplazamiento se considera en la zona de consulta si el aerogenerador propuesto **invade la línea de visión del radar solamente en el primer ángulo de elevación a distancias inferiores a 36 km**, o si invade la línea de visión del radar en más de un ángulo de elevación, pero encontrándose a más de 36 km de distancia del radar. Debido al potencial de impacto en las operaciones del radar, el promotor deberá consultar al servicio meteorológico proporcionando información detallada del proyecto y realizar un análisis de impacto exhaustivo.

4. EMPLAZAMIENTO EN ZONA DE NOTIFICACIÓN: emplazamiento en el que un aerogenerador **invadiría la línea de visión del radar exclusivamente en el primer ángulo de elevación a distancias entre 36 km y 60 km del radar**. Dado que los impactos son típicamente mínimos más allá de 36 km y que existen soluciones alternativas para la invasión de un solo ángulo de elevación, no se considera necesario hacer un estudio de impacto pero se requiere la notificación de la instalación del parque.

Finalmente se ha de decir que la capacidad actual de procesar correctamente los datos radar ha avanzado mucho y que existen correcciones operacionales que superan las capacidades del procesado básico que integran la mayoría de los radares comerciales, y que permiten operacionalmente reducir los impactos en la capacidad de medida en los radares meteorológicos sea cual sea la zona de la ubicación del aerogenerador (excluyendo los que interceptan más de una elevación a distancias inferiores a 3 km del radar).

3.2. Metodología propuesta en este estudio

La metodología que seguiremos en este estudio incluye los siguientes puntos:

1) **Determinar si el emplazamiento respeta la distancia mínima de seguridad con respecto al radar**. Dadas las características del radar ubicado en el Monte Xesteiras se puede considerar que existe una distancia mínima de seguridad en la que no se debe emplazar ningún tipo de reflector. **Esta distancia se puede estimar en 500 m.**

2) **Determinar si el aerogenerador propuesto está dentro de la línea de visión del radar** (intercepta el haz), y en caso positivo **cuantos ángulos de elevación del programa de antena se ve afectados** (en este caso la ubicación se catalogará en una de las 4 zonas propuestas por la norma de los EUA). En caso afirmativo, al interceptar la línea de visión del radar si se coloca el aerogenerador propuesto se producirán **ecos no meteorológicos permanentes**, por ello se realizará una estimación del impacto sobre la capacidad de medida del radar y se propondrán medidas de mitigación y compensación.

3) **Estimar si los aerogeneradores propuestos pueden generar efectos significativos de apantallamiento y subdetección** y su efecto combinado con los apantallamientos orográficos. En caso afirmativo se calcularán cuantos ángulos de elevación del programa de antena se ve afectados y se propondrán medidas de mitigación y compensación.

4) En el caso de emplazamientos que no estén en la línea de visión del radar, pero **que estén en emplazamientos en los que se puedan generar ecos no meteorológicos no permanentes** (lo suficientemente próximos como para que se puedan producir intercepción de los lóbulos secundarios del haz o que se encuentren a distancias y en zonas proclives a la aparición de ecos no permanentes por propagación anómala), se valorará la frecuencia potencial de su aparición y si es necesario proponer medidas de mitigación y compensación que permitan minimizar su impacto.

3.3. Procedimiento para el cálculo de la línea de visión y de la intercepción del haz del radar

El principio de funcionamiento del radar meteorológico es el de emitir, a través de una antena, un pulso de energía electromagnética de duración τ (del orden de los microsegundos) y de longitud de onda λ (del orden de los centímetros). Cuando esa energía es interceptada por un 'blanco' (por ejemplo, una gota de agua) se dispersa en todas direcciones, de forma que una fracción es devuelta en dirección al radar y captada por el receptor de éste.

En realidad lo que registra el radar es la potencia devuelta en su dirección, por las gotas de agua situadas en el interior de un cierto volumen y viene dado por la ecuación:

$$\overline{P}(r_0) = \frac{P_t g^2 \pi^2}{64 \lambda^2} |K|^2 \int_{Vres} \frac{|W_s|^2 f^4}{r^4} Z \cdot dV \qquad (1)$$

donde $P(r_0)$ es la potencia media devuelta por las gotas situadas en el interior del volumen de muestreo o de resolución de la medida V_{res} situado a una distancia r_0 del radar. En esta ecuación, P_t es la potencia transmitida, g es la ganancia de la antena en el eje del haz y λ la longitud de onda del radar. $|W_s|^2$ es la función de ponderación del pulso en V_{res}, r es la distancia al radar y finalmente f^4 es el patrón normalizado de la potencia del haz al cuadrado, que expresa como se distribuye la potencia a través del lóbulo principal y los secundarios. V_{res} se suele fijar como aquel volumen limitado en la dirección angular al eje por aquel ángulo, Φ_3, en el que la potencia se ha reducido como mínimo a 1/2 del valor del pico, es decir $f^2(\Phi_3)$

=1/2. El ángulo Φ_3 es lo que se conoce como el ancho de 3 dB del haz, y contiene la mayor parte del lóbulo principal. Algo similar se hace en la dirección radial de V_{res}, limitándolo al intervalo $\Delta r = c\tau/2$. En la Figura 23 se esquematiza la relación que se establece entre el V_{res} asociado a $P(r_0)$ y la variación de f^4 y $|W_s|^2$ en su interior.

3.3.1. Determinación de la trayectoria del haz del radar en la atmósfera

La altura del haz del radar sobre la superficie de la Tierra aumenta con la distancia por tres motivos: el ángulo inicial de elevación, la curvatura de la Tierra y la refracción de la atmósfera. La refracción del haz en la atmósfera depende en gran medida de las condiciones atmosféricas (de los gradientes de presión, humedad y temperatura), por lo que normalmente se consideran condiciones de propagación medias.

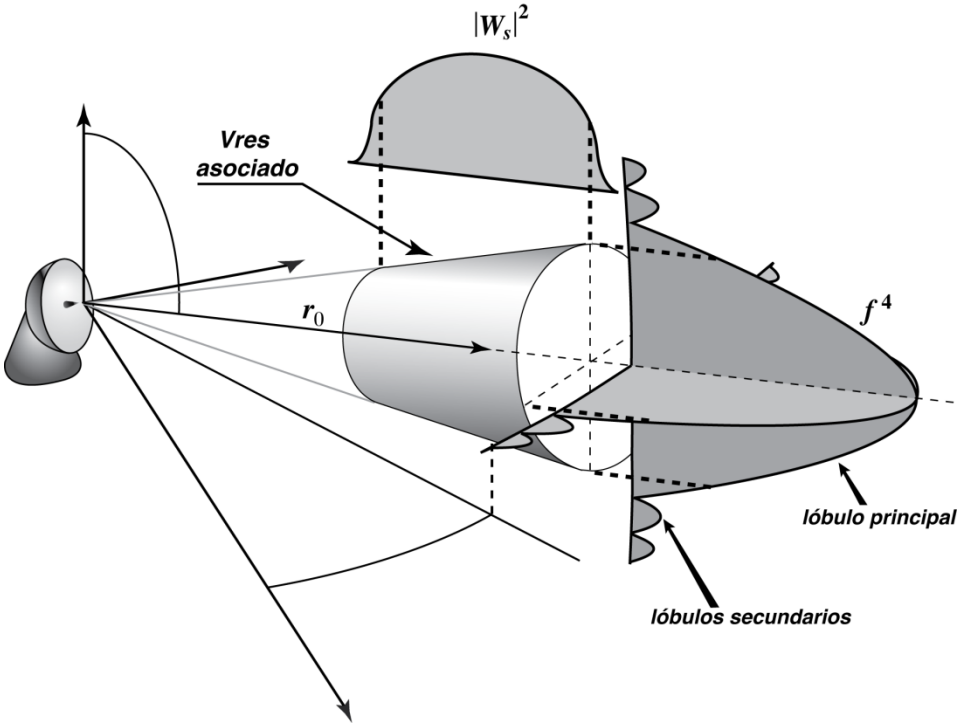


Figura 23: Esquema de la distribución de energía dentro del haz (Sánchez-Diezma, 2001).

Para calcular la evolución de esta altura con la distancia al radar y contrastarla con la altura de los obstáculos potenciales (en nuestro caso los aerogeneradores) afín de determinar la intercepción del haz, se utiliza un modelo de propagación. En este caso se utiliza el conocido como modelo "4/3" (ver detalles por ejemplo en Doviak y Zrnic, 1993). Así, la altura de cada volumen de muestreo del radar sobre el terreno se calcula como:

$$h_s = \frac{4}{3}\rho_E\left(\frac{\cos\theta_e}{\cos\left(\theta_e + s/\left(\rho_E\, 4/3\right)\right)} - 1\right) + h_{rad}\,\frac{1}{\cos\left(s/\left(\rho_E\, 4/3\right)\right)} \qquad (2)$$

donde ρ_E es el radio de la Tierra, h_{rad} es la altura del emplazamiento del radar sobre el nivel del mar, θ_e es el ángulo de elevación y s es la distancia sobre la superficie (ver Figura 24).

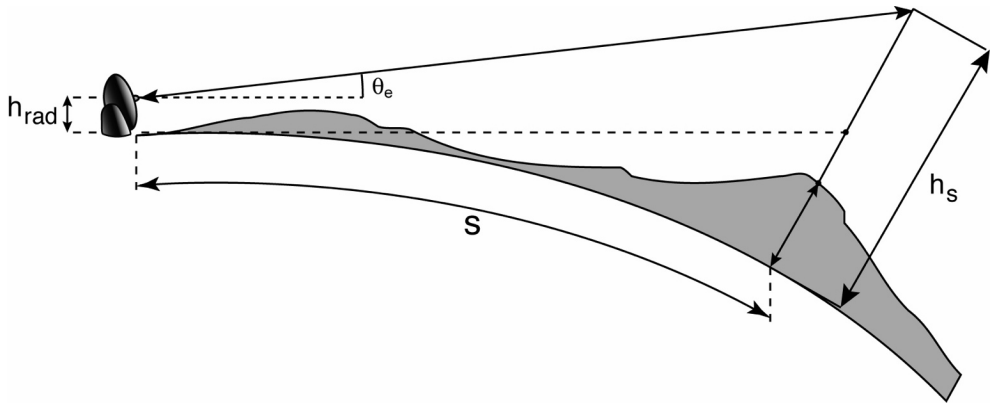


Figura 24: Altura del haz del radar sobre el terreno. Adaptada de Sánchez-Diezma (2001).

3.3.2. Definición del haz del radar

Se aproxima la distribución de potencia a un patrón Gaussiano (Probert-Jones, 1962) de manera que:

$$f^4(\phi) = \exp\left(-\frac{8Ln(2)\phi^2}{\phi_3^2}\right) \tag{2}$$

donde Φ es el ángulo respecto al eje de haz y Φ_3 es el ángulo correspondiente al haz de 3-dB (ángulo que define el haz principal del radar). Por otro lado, la expresión que utilizaremos para $|W_s|^2$ es la propuesta por Doviak y Zrnic (1993):

$$|W_s(r_0)|^2 = \left(\frac{1}{2}\left[erf(s+b) - erf(s-b)\right]\right)^2 \tag{3}$$

donde,

$$erf(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^y e^{-t^2}dt \tag{4}$$

y $b = B_6\tau\,\pi/(4(Ln(2)^{1/2}))$; $s = (2\,a\,B_6/c)r_b$; $a = \pi/(2(Ln(2)^{1/2}))$, donde, B_6 es el ancho angular de 6 dB del haz, τ es el ancho de pulso del transmisor, $r_b = r - r_0$ y c es la velocidad de la luz. Los lóbulos secundarios no se tienen en cuenta en las simulaciones.

3.3.3. Simulación de ecos no meteorológicos debidos a obstáculos y apantallamientos

La metodología de simulación seguida en el estudio de ecos no meteorológicos y apantallamientos es la propuesta por Delrieu et al. (1995), que fue implementada por Sánchez-Diezma (2001) como metodología para el cálculo de factores de corrección por apantallamiento del radar por intercepción del haz por obstáculos. Consiste en simular las áreas del terreno iluminadas por el radar a partir del cálculo de intercepción del haz por un modelo digital del terreno (MDT). Los resultados prácticos de esta técnica permiten determinar tanto las zonas afectadas por ecos no meteorológicos permanentes asociados a un obstáculo, como las áreas apantalladas y el grado de apantallamiento asociado a ese obstáculo.

Después de pasar las coordenadas del radar al sistema de coordenadas del Modelo Digital de Terreno (MDT) disponible, para cada volumen de muestreo se calcula el grado de intersección con la topografía. Para esto se tiene en cuenta la distribución de energía dentro del volumen de resolución, la trayectoria del haz del radar (según lo explicado anteriormente), y el ángulo de incidencia con la topografía.

La retrodispersión de las celdas de topografía interceptadas se considera proporcional al ángulo de incidencia. De esta forma, las celdas de la topografía que presentan ángulos de incidencia más bajos generan ecos menores que las celdas más "verticales" (para un mayor detalle de las ecuaciones de la simulación consultar Delrieu et al., 1995).

Para las simulaciones de ecos de suelo y apantallamientos realizadas en este estudio para el análisis de los emplazamientos propuestos se ha utilizado el Modelo Digital del Terreno con paso de malla de 25 m del Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (www). El sistema geodésico de referencia es el ETRS89 y la proyección es en coordenadas UTM en el huso correspondiente (29 en nuestro caso).

Las características del radar simulado (tamaño del volumen de resolución, ángulos de apertura, etc.) se corresponden con las especificaciones del radar de MeteoGalicia.

3.3.4. Aplicación al cálculo de ecos y apantallamientos debidos a aerogeneradores

En el caso de los aerogeneradores, lo más intuitivo de cara a la simulación sería suponer que su efecto sería equivalente al que produciría un obstáculo superpuesto al terreno con una dimensión horizontal igual a la del rotor y con una altura máxima de sobreelevación encima del terreno igual a la altura máxima de la pala.

Eso significaría que **estaríamos considerando el efecto de un aerogenerador equiparándolo al que generaría un edificio de las mismas dimensiones**. Además, si se toma en cuenta el efecto producido por el aerogenerador orientado en la dirección más desfavorable, estaríamos **calculando un efecto máximo del impacto del aerogenerador muy superior al real.**

Sin embargo, sabemos que **el rotor no se comporta como un obstáculo sólido** (como si fuera la fachada de un edificio), sino que en verdad la superficie angular realmente ocupada por los elementos reflectantes fijos (esencialmente la torre, y la góndola) y los móviles (las palas) es muy inferior a la que se le asigna si lo equiparamos a un edificio de las mismas dimensiones.

Si tomamos la parte superior del aerogenerador (la más crítica en los efectos sobre la capacidad de medida del radar), en verdad está ocupada en un instante dado como mucho por dos de las palas del rotor (separadas entre sí por 120º). Dado que la anchura de las palas es variable es difícil establecer un factor de llenado, pero asimilando la anchura a 4 m, tendríamos que cada pala ocuparía una superficie angular inferior a 8º. Lo que permite calcular que en cada instante la obstrucción real sería inferior a 16º / 180º, lo que significa que calculando el apantallamiento equivalente a un edificio de las mismas dimensiones estaríamos sobrestimando en un factor superior a 10 veces el efecto real del bloqueo debido al aerogenerador.

Así para quedarnos del lado de la seguridad **tomaremos como valores de energía apantallada por un aerogenerador el 10% de lo que obtendríamos considerando un obstáculo sólido de tamaño equivalente a un edificio de sus dimensiones**, es decir que presentase una sección eficaz de anchura el ancho del rotor y de altura la altura máxima de pala del aerogenerador.

Finalmente se ha de decir que los estudios previos muestran que más allá de la zona más cercana al aerogenerador, en dónde se pueden llegar a ocasionar problemas debidos a la difracción, los efectos de apantallamientos sobre el radar son muy reducidos en comparación a los ya generados por la orografía sobre la que se colocan los aerogeneradores.

3.1. El radar de MeteoGalicia en Monte Xesteiras

El radar meteorológico de MeteoGalicia está emplazado en el Monte Xesteiras. Sus características principales, y en particular su programa de antena está recogidas en la Tabla 1.



Figura 25: El radar de Monte Xesteiras

CARACTERÍSTICAS RADAR MONTE XESTEIRAS	
Modelo	Vaisala WRM200
Tipo antena	Reflector parabólico con alimentación central
Diámetro reflector	4,5 m
Pico de potencia	250 kW
Localización	42,675605 N; 8,586403 W
Altitud emplazamiento	716 m
Altitud radar (centro del reflector)	764 m
Anchura del haz	1º
Frecuencia / longitud de onda	5.33 cm
Capacidad Doppler / polarimétrica	Radar Doppler y polarimétrico (H+V)
Numero de azimuts	360 (Full circle a 1º)
Resolución temporal	10 min
Ángulos de elevación del programa de antena	0.2, 0.5, 1, 1.5, 3, 5, 7.5,10, 15, 20 y 45 grados
PRF	400 Hz
Resolución en distancia (bin)	300 m
Tamaño del pulso	1.0 μs
Ancho de banda de 6-dB del receptor	1.0 MHz

Tabla 1: Características del radar de MeteoGalicia

4. Estudio de impacto de los emplazamientos de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el estudio del impacto de los aerogeneradores de los futuros parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos.

4.1. Situación de los parques eólicos propuestos

Los emplazamientos seleccionados para los parques de aerogeneradores de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos, ver detalles en Tabla 2, se hallan a una **distancia del radar de MeteoGalicia de entre 11 y 13 km**, situado en el Monte Xesteiras (ver Figura 27 y Figura 28).

PARQUE TOURIÑÁN III-2: EMPLAZAMIENTOS DE LOS AEROGENERADORES						
Nº	COORDENADAS UTM ETRS8, HUSO 29		Cota base aerogenerador (m.s.n.m.)	Altura buje (m)	Diámetro (m)	Altura punta de pala (m)
	X	Y				
T1	540920	4714227	761	84	132	150
T2	540718	4713700	745	90	145	162,5
T3	540943	4715170	790	84	132	150
T4	541461	4715081	777	90	145	162,5
T5	541343	4715596	772	90	145	162,5

PARQUE ROSA DOS VENTOS: EMPLAZAMIENTOS DE LOS AEROGENERADORES						
Nº	COORDENADAS UTM ETRS8, HUSO 29		Cota base aerogenerador (m.s.n.m.)	Altura buje (m)	Diámetro (m)	Altura punta de pala (m)
	X	Y				
RV1	540437	4715679	636	90	145	162,5
RV2	540080	4714953	700	90	145	162,5
RV3	541249	4714177	743	84	132	150

Tabla 2 : Coordenadas y características de los aerogeneradores proyectados para el parque eólico de Touriñán III-2 y de Rosa dos Ventos. La altura de la punta de la pala es la sobreelevación que se habrá de sumar a la cota de la base del aerogenerador para obtener la cota máxima a simular en los cálculos. Nótese que se trata de dos parques mixtos, en el que se instalan dos máquinas con diámetros de rotor y potencia diferentes (SG5-132 y SG5-145) en función de los emplazamientos.

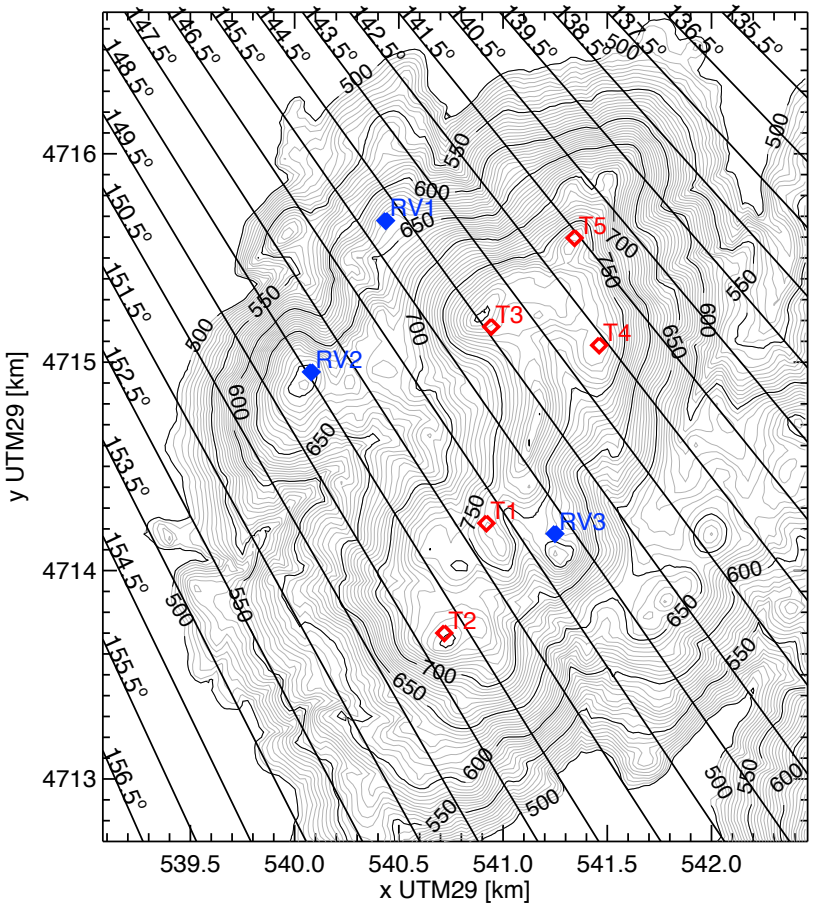


Figura 26: Detalle de los emplazamientos previstos en el parque eólico de Touriñán III-2 (T1 a T5) y Rosa dos Ventos (RV1 a RV3). Las líneas definen los corredores azimutales de 1º que representan los diferentes tiros del haz principal del radar. Los emplazamientos T1, T3 y RV3 se equiparán con máquinas SG5-132 (150 m de altura de pala) y el resto con máquinas SG5-145 (162,5 m de altura de pala).

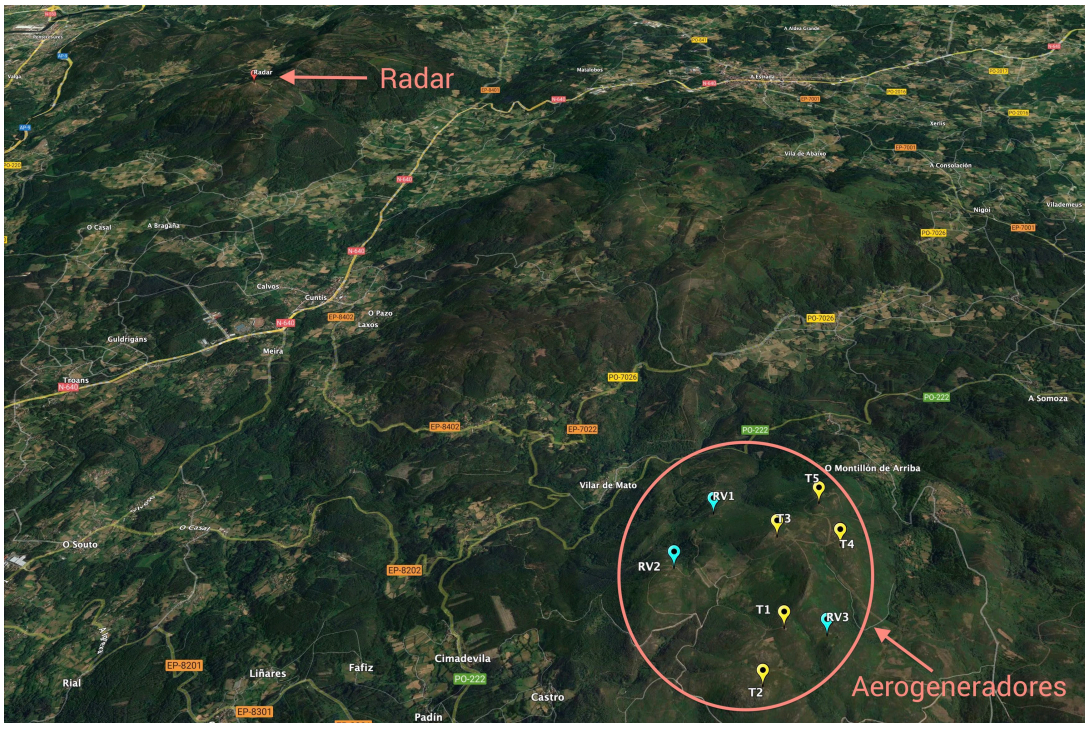


Figura 27: Mapa de situación general de los emplazamientos de los futuros parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos con respecto al radar meteorológico de Monte Xesteiras (en rojo). Los emplazamientos del parque de Tourinán III-2 aparecen en amarillo y los del de Rosa dos Ventos en azul claro.

El parque propuesto se encuentra en un rango de distancias al radar que supera la distancia mínima de seguridad, pero como los emplazamientos están situados en un alto que ya genera de por sí ecos y apantallamientos orográficos en el tiro más bajo del radar (ver Figura 28), es seguro que al menos los más altos se encontrarán dentro de la línea de visión del radar.

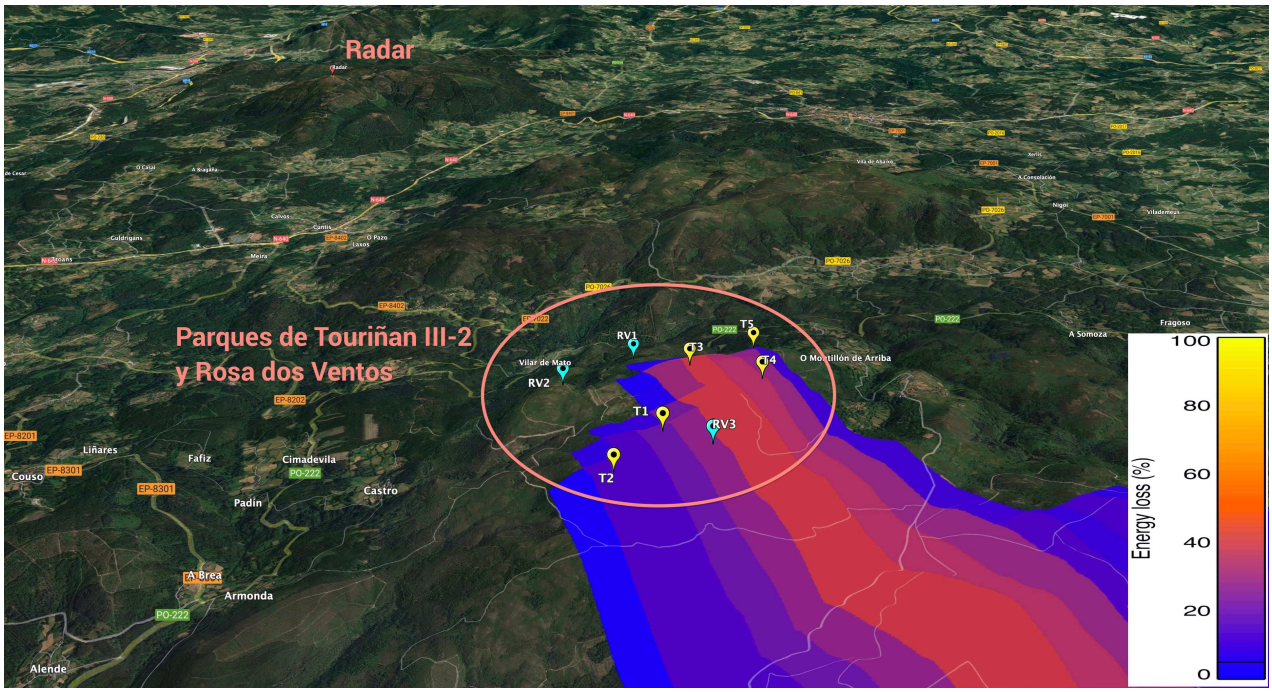


Figura 28: Emplazamientos de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos en relación al radar de MeteoGalicia (señalado en rojo). La zona sombreada indica los apantallamientos que la propia orografía ya inducen en la medida del radar (en el primer ángulo de elevación, de 0,2º), entre un 5 y un 43% de la energía es interceptada por la orografía.

En este caso se han de estudiar en detalle la naturaleza de los impactos y si es necesario prescribir medidas de mitigación y medidas compensatorias para minimizarlo y para que no afecten la calidad de la medida del radar meteorológico de MeteoGalicia.

4.2. Impacto sobre el haz del radar: línea de visión y ecos no meteorológicos permanentes

El análisis numérico de la trayectoria del haz con el ángulo de elevación más bajo del programa de antena del radar de MeteoGalicia (0,2º) permite mostrar que en condiciones atmosféricas normales, **todos los aerogeneradores propuestos están dentro de la línea de visión del radar** e interceptan el haz principal en el ángulo de elevación más bajo (ver Figuras 29, 30 y 33).

Esto implica que, al estar en la línea de visión del radar, **producirán apantallamientos y ecos no meteorológicos que se combinarán con los ecos orográficos permanentes**, y que al tener velocidad no serán identificados por el filtrado en base al espectro de velocidades Doppler.

Las mismas conclusiones aplican también para la segunda elevación del programa de antena de MeteoGalicia (0,5º), ver Figura 31, Figura 32 y Figura 34). Y nos tendríamos que ir a la tercera elevación (1,0º) para que los aerogeneradores propuestos no intercepten el haz y no generen ningún impacto. Esta constatación es importante por cuanto esta información podrá ser utilizada en el proceso de restitución de la estimación de lluvia sobre los píxeles afectados por los ecos debidos a los aerogeneradores.

Esta intercepción de la línea de visión del radar en dos ángulos de elevación implica que **todos los aerogeneradores del parque se encuentran en ZONA DE MITIGACIÓN, por lo que es preciso prescribir medidas de mitigación y compensatorias tanto para el parque eólico como para la operación del radar de MeteoGalicia.**

Sin embargo es importante destacar que **la instalación de los aerogeneradores de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos no generará ningún efecto que no esté ya presente en la medida del radar de MeteoGalicia**, puesto que los parques eólicos ya instalados sobre la orografía vecina (como Monte Arca, Serra de Meira, Serra do Cando o Monte Seixo) generan ya en estos momentos efectos similares o más importantes tanto en afectación por ecos permanentes como en zonas de apantallamiento. Además, dado que algunos están emplazados sobre obstáculos orográficos de mayor altitud, su impacto en la pérdida de calidad de la medida del radar de Monte Xesteiras es superior al que podrían generar los emplazamientos propuestos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos.

En todo caso, estos efectos de contaminación de la imagen por ecos no meteorológicos son corregibles si se dota al radar de MeteoGalicia de una **mejora en el procesado que perfeccione la capacidad actual de corrección y de restitución de los valores del campo de lluvia afectados** por ecos permanentes alrededor de estos emplazamientos (ver detalles en la sección 5.1).

Procesado que tendría la ventaja adicional de permitir también la reconstrucción mejorada sobre las zonas afectadas por los parques eólicos preexistentes que hoy en día merman la calidad de la medida del radar de MeteoGalicia.

4.2.1. Parque eólico Touriñán III-2

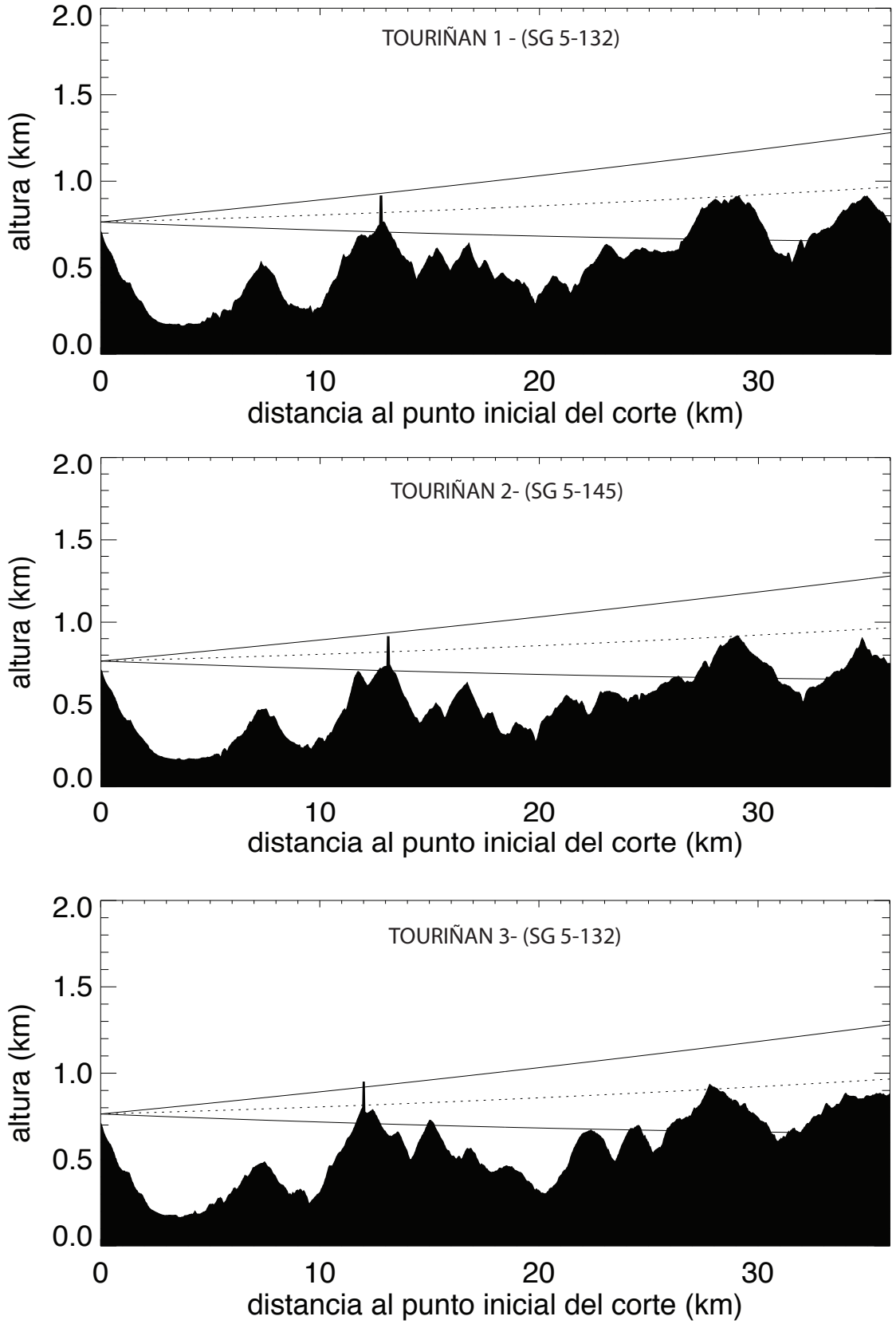


Figura 29: Cortes transversales de la propagación del haz del radar en las direcciones de los emplazamientos previstos para el parque de Touriñán III-2, de 1 a 3, con respecto al radar meteorológico de Monte Xesteiras. Los tres aerogeneradores interceptarían el haz principal de abertura de 1º en el tiro de elevación más baja del programa de antena de MeteoGalicia (0,2º).

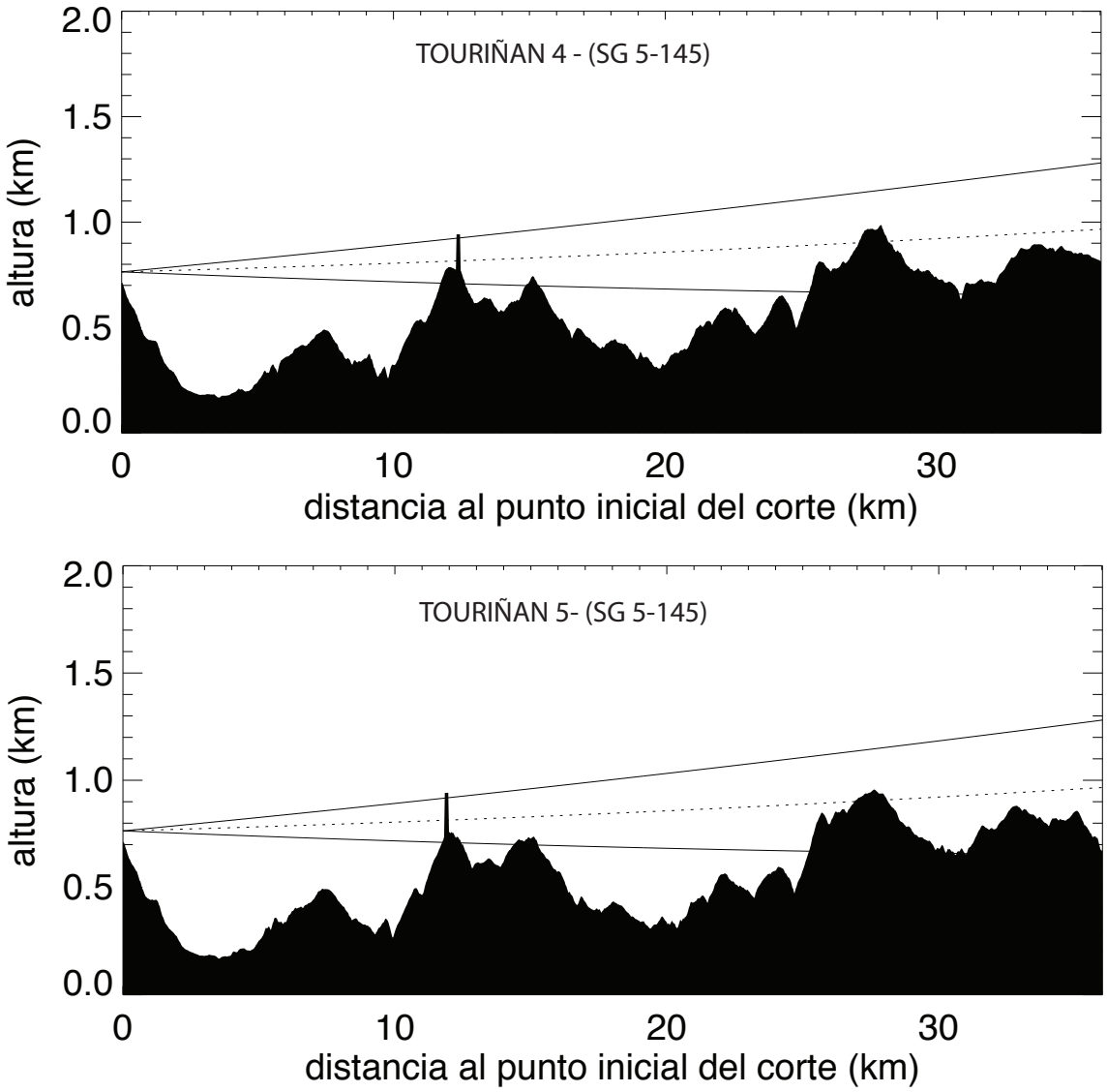


Figura 30: Cortes transversales de la propagación del haz del radar en las direcciones de los emplazamientos previstos para el parque de Touriñán III-2, de 4 a 5. Los dos aerogeneradores interceptarían el haz principal de abertura de 1º en el tiro de elevación más baja del programa de antena de MeteoGalicia (0,2º).

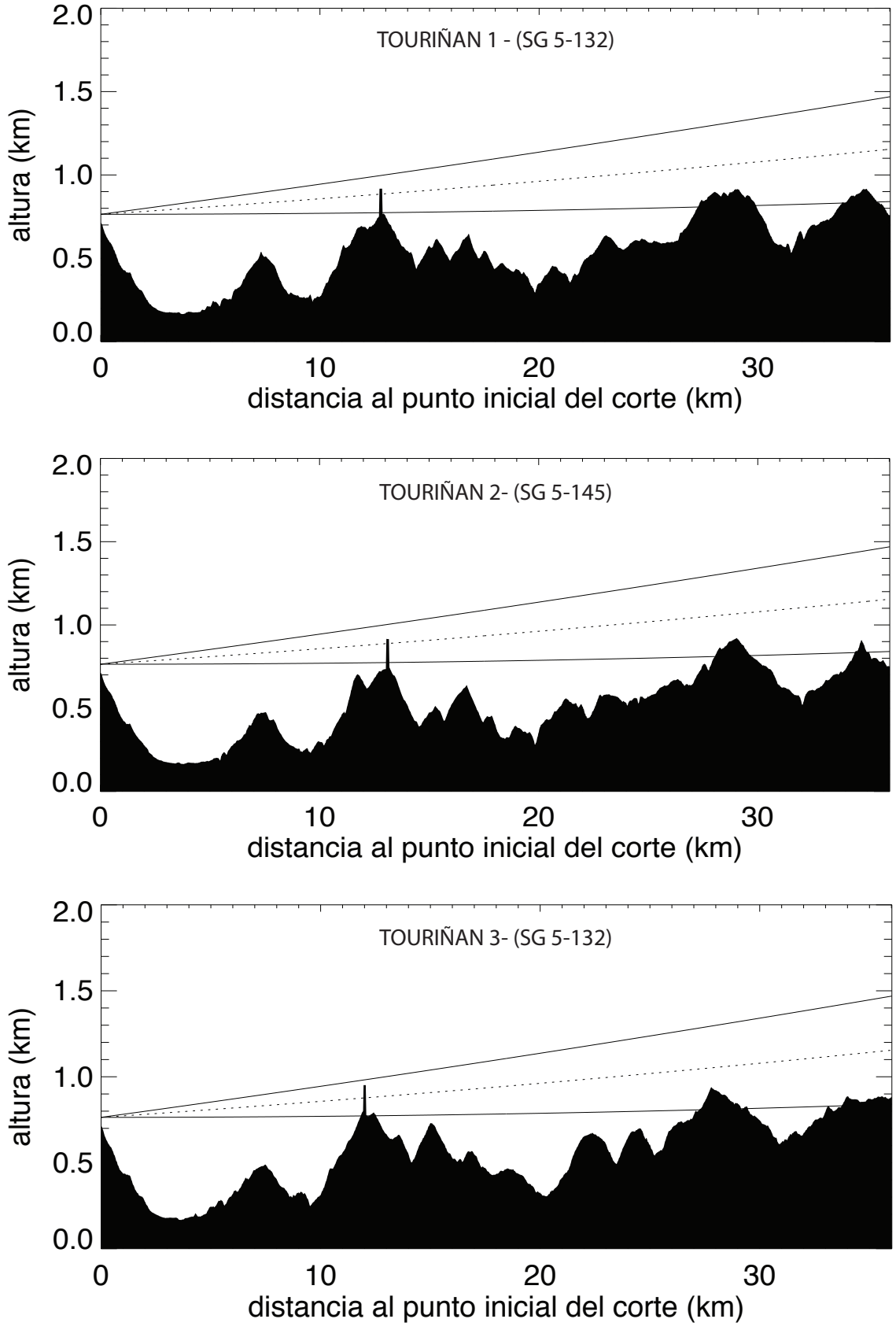


Figura 31: Cortes transversales de la propagación del haz del radar en las direcciones de los emplazamientos previstos para el parque de Touriñán III-2, de 1 a 3. Los tres aerogeneradores interceptarían el haz principal de apertura de 1º en el segundo ángulo de elevación del programa de antena de MeteoGalicia (0,5º).

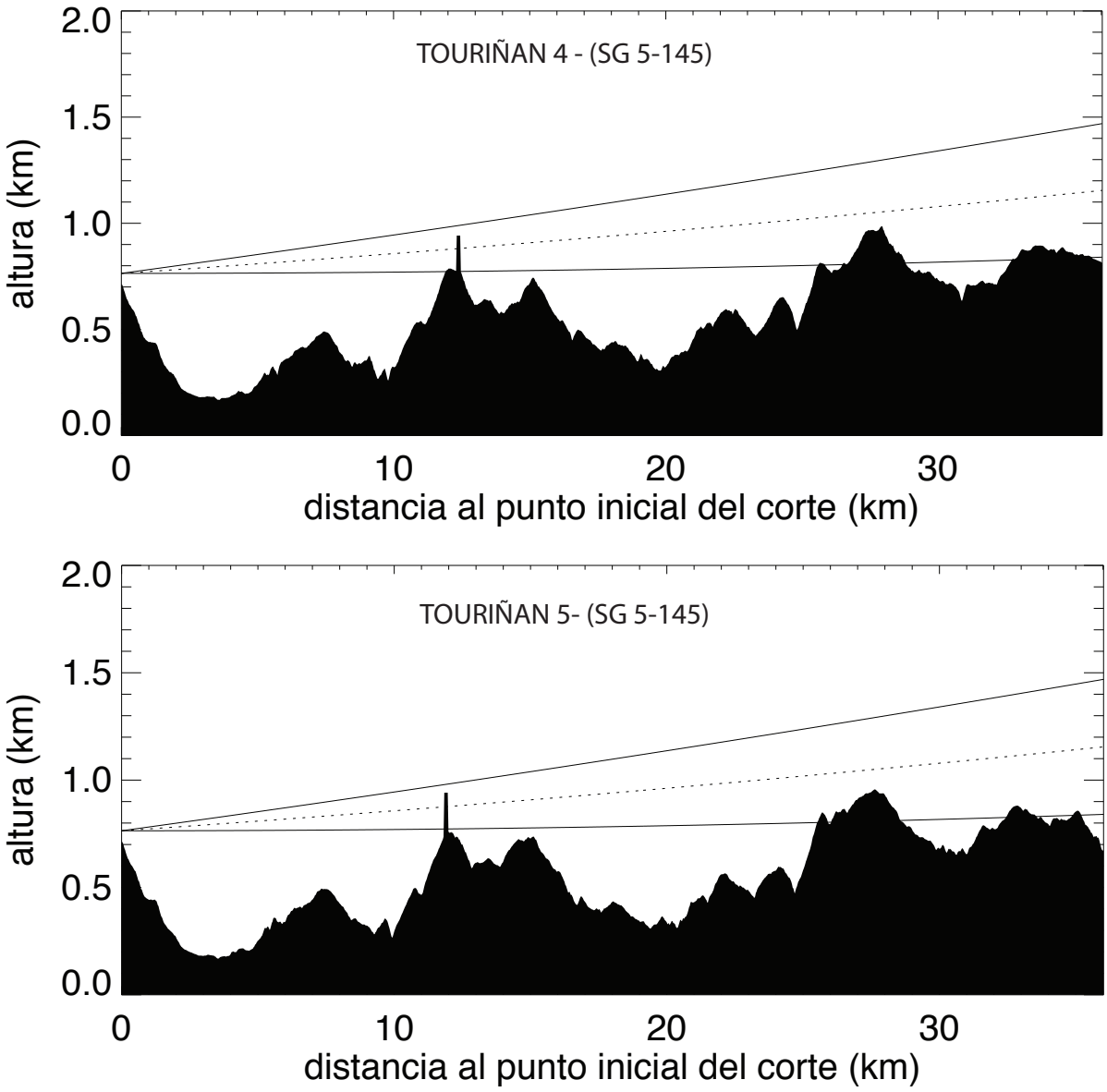


Figura 32: Cortes transversales de la propagación del haz del radar en las direcciones de los emplazamientos previstos para el parque de Touriñán III-2, de 4 a 5. Los dos aerogeneradores interceptarían el haz principal de apertura de 1º en el segundo ángulo de elevación del programa de antena de MeteoGalicia (0,5º).

4.2.2. Parque eólico Rosa dos Ventos

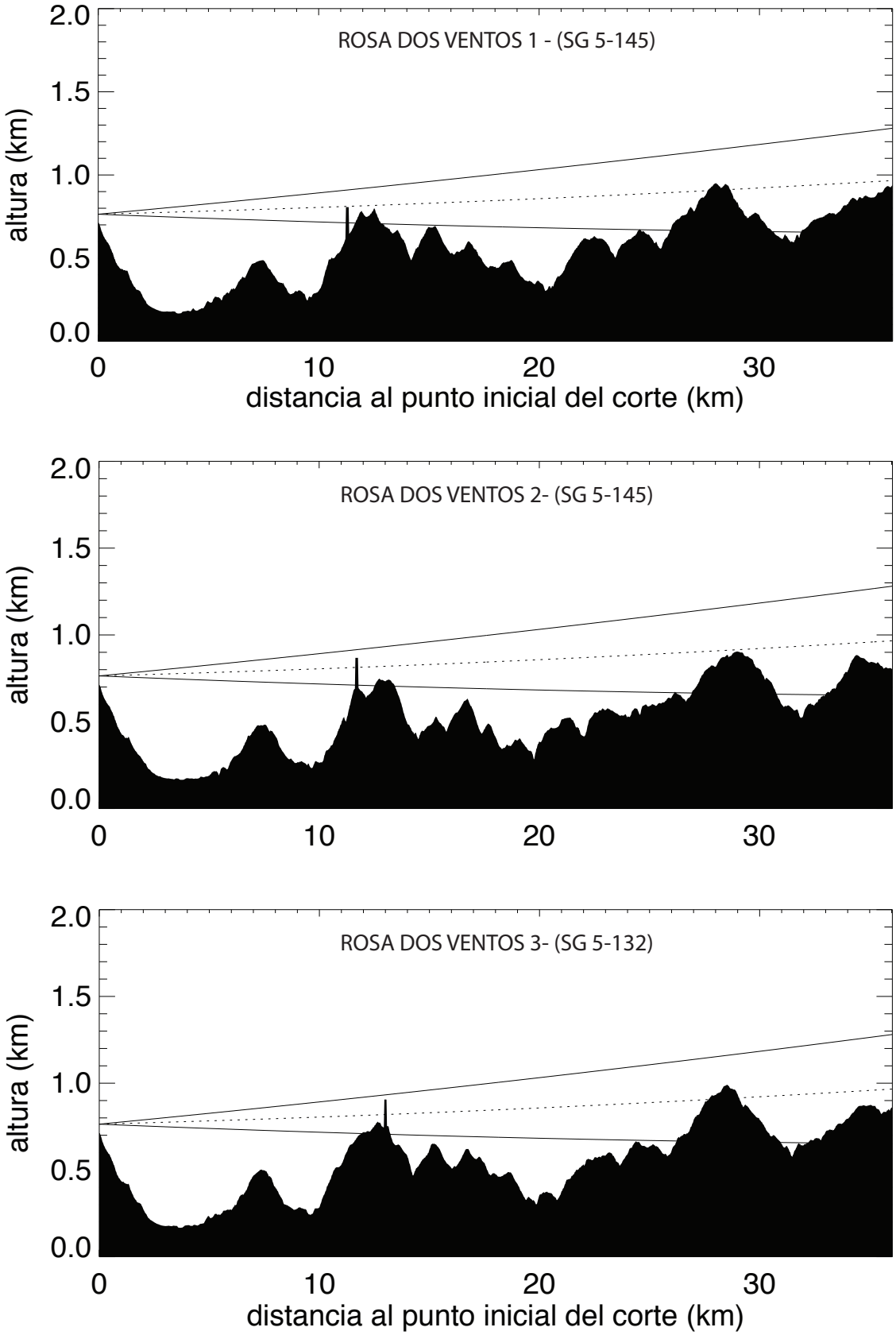


Figura 33: Cortes transversales de la propagación del haz del radar en las direcciones de los emplazamientos previstos para el parque de Rosa dos Ventos, de 1 a 3, con respecto al radar meteorológico de Monte Xesteiras. Los tres aerogeneradores interceptarían el haz principal de abertura de 1º en el tiro de elevación más baja del programa de antena de MeteoGalicia (0,2º).

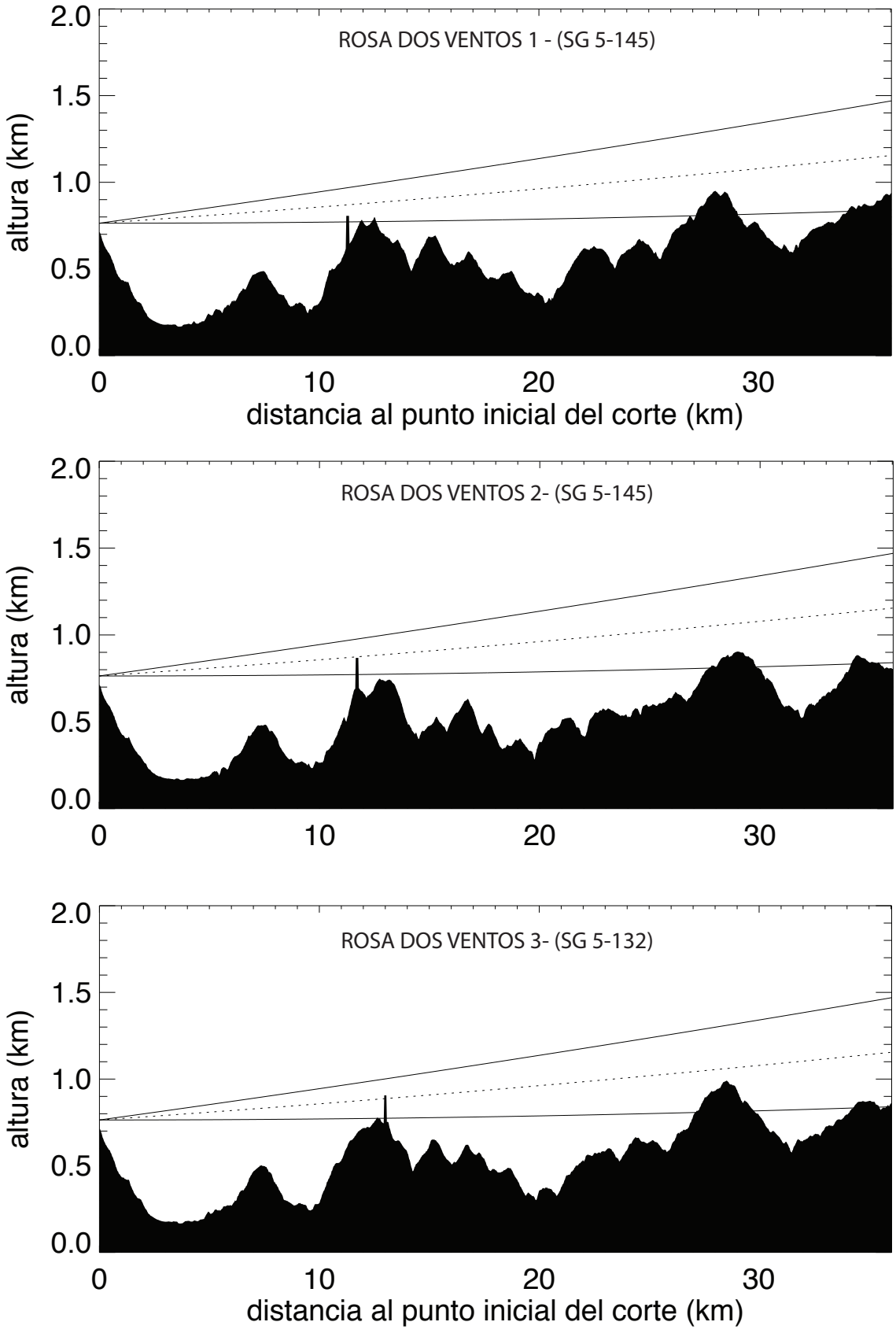


Figura 34: Cortes transversales de la propagación del haz del radar en las direcciones de los emplazamientos previstos para el parque de Rosa dos Ventos, de 1 a 3. Los tres aerogeneradores interceptarían el haz principal de apertura de 1º en el segundo ángulo de elevación del programa de antena de MeteoGalicia (0,5º).

4.3. Apantallamientos y zonas de subdetección

Como ya se ha dicho, los emplazamientos que interceptan el haz principal producen apantallamientos y zonas de subdetección en las imágenes del radar. **En este caso todos los emplazamientos son susceptibles de generar zonas de apantallamientos parciales en el haz principal del radar que se superponen a los ya generados por la propia orografía.**

La evaluación del impacto de los apantallamientos debidos a aerogeneradores se ha realizado siguiendo la metodología expuesta en la sección 3.3, y en particular en la sección 3.3.4.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos y los apantallamientos máximos esperables para los emplazamientos de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos, ya que por su proximidad el impacto se ha de estudiar teniendo en cuenta el efecto combinado de todos los aerogeneradores.

4.3.1. Apantallamientos debidos a la orografía

Antes de ver en detalle los apantallamientos debidos a los aerogeneradores, es conveniente analizar el entorno donde se sitúan los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos.

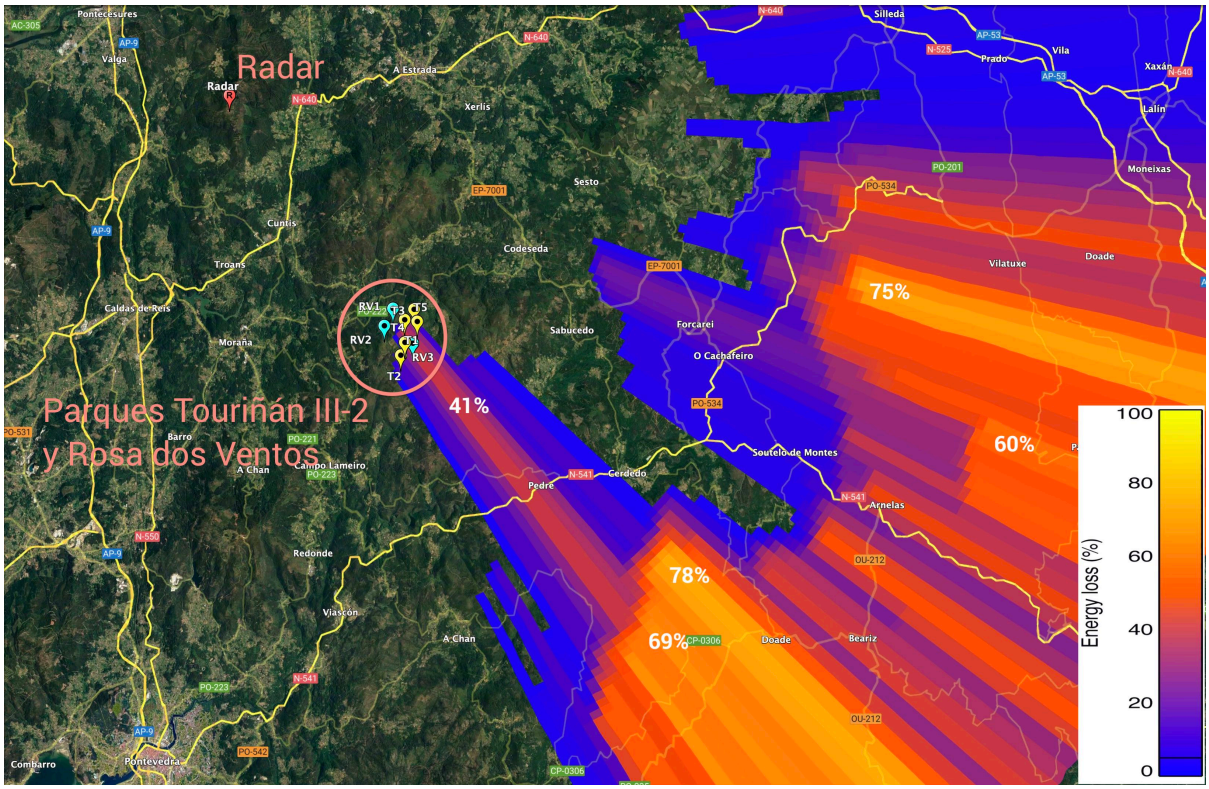


Figura 35: Detalle de las zonas apantalladas generadas por la orografía (sin aerogeneradores) sobre el radar de MeteoGalicia en el entorno de los emplazamientos de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos. Estos apantallamientos se pueden graduar en función del porcentaje de energía interceptado. Así apantallamientos hasta del 50% sobre sectores de pocos grados de ancho se pueden llegar a corregir sin problemas por un procesado específico de corrección de apantallamientos. Sin embargo, a partir de ese umbral y hasta el 80% de energía interceptada (colores de naranja a amarillo en los gráficos) los efectos sólo se pueden corregir de forma fiable si se dispone de un software de procesado radar avanzado. A partir del 85% (amarillos), se pueden considerar como zonas prácticamente ciegas de cara a la medida de lluvia por radar, que incluso si se dispone de un software avanzado de procesado radar sólo se pueden corregir de forma parcial si están situadas a distancias pequeñas del radar.

La colina elegida tiene de por sí una altura que intercepta el haz principal del radar y genera un eco orográfico (no meteorológico) que es eliminado por el filtro Doppler del procesado radar básico (eco sin velocidad), y por ello no afecta a la estimación de la precipitación.

Además produce un bloqueo parcial de la energía del haz principal que, aunque es pequeño**, ya genera un apantallamiento en la primera elevación del radar (0,2º) de entre el 5 al 43% de la energía** (gama de colores azules a rojos, ver detalle en la Figura 28 y en la Figura 35).

Siguiendo la línea de visión del radar, a unos 15 km de los emplazamientos propuestos, el relieve se hace aún más marcado, llegando a sobrepasar los 900 m (1.000 m en Monte Seixo y Serra do Cando), lo que significa un obstáculo que llega a apantallar más del 75% de la energía del haz principal (colores anaranjados-amarillos, ver Figura 35 y Figura 36).

En estos altos están emplazados los parques eólicos de Monte Seixo y Serra do Cando que, por estar ubicados a mayor cota, **ya producen zonas de apantallamientos y efectos de subdetección combinados con la orografía mayores del que podrían llegar a generar los futuros aerogeneradores de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos.**

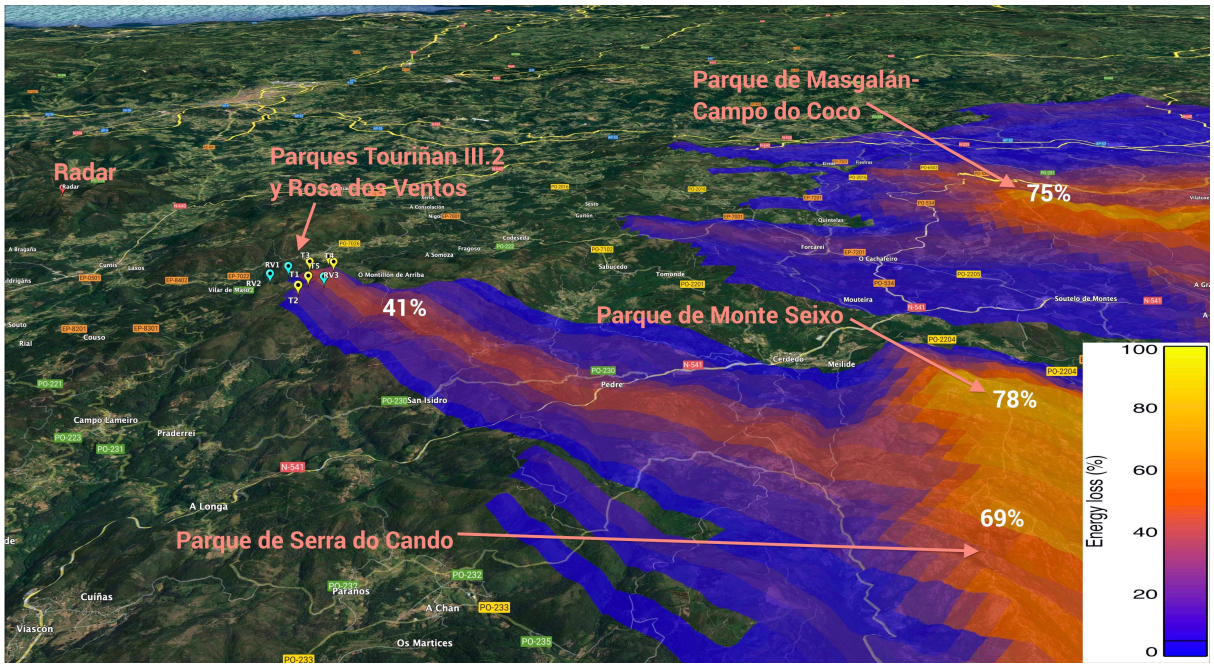


Figura 36: Relieve de las zonas apantalladas (de subdetección) generadas por la orografía (sin aerogeneradores) sobre el tiro de elevación más baja (0,2º) del programa de antena del radar de MeteoGalicia en el entorno de los emplazamientos de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos. Es importante constatar que tan sólo el efecto de la orografía situada detrás del parque previsto (Monte Seixo – Serra do Cando) genera ya un bloqueo permanente muy severo, que alcanza el 78% de la energía del radar.

Este efecto se reduce considerable cuando se utiliza el segundo ángulo de elevación de 0,5º, en el que los apantallamientos máximos se reducen al 40% de la energía del haz (ver Figura 37 y Figura 38). Así, en éste ángulo de tiro (que es el que MeteoGalicia utiliza en su página web) los apantallamientos orográficos se hacen imperceptibles al observador en imágenes instantáneas, y sólo son apreciables por un ojo experto en imágenes de acumulación de lluvia.

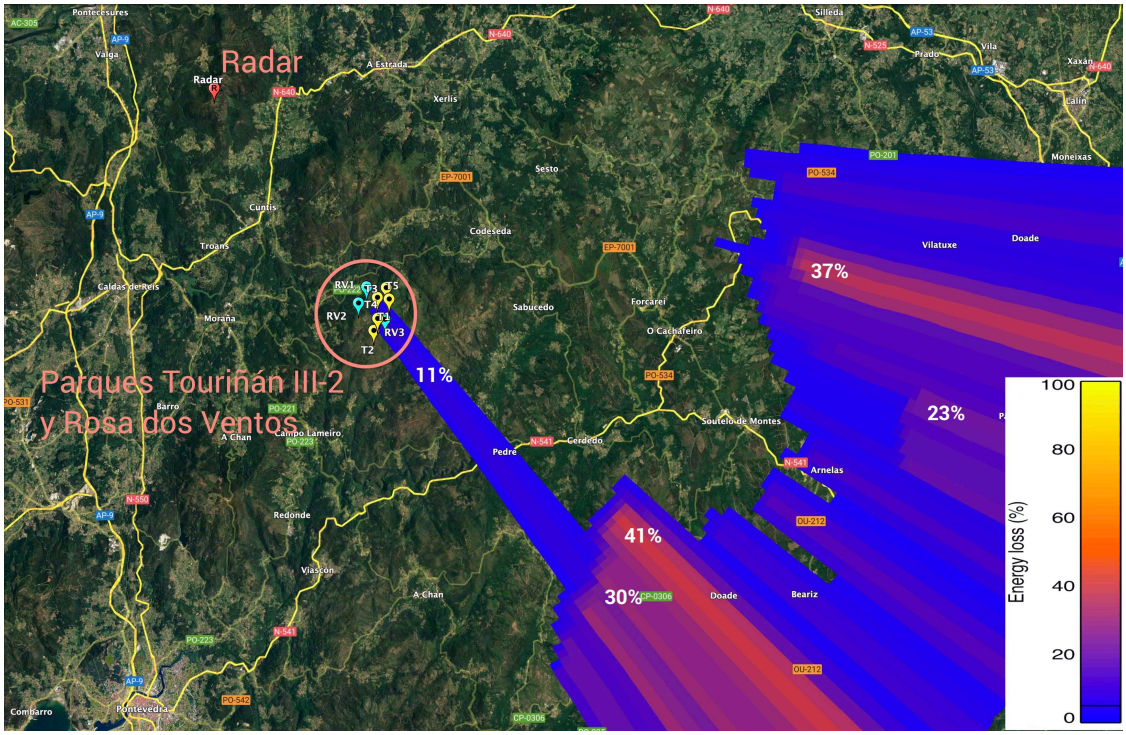


Figura 37: Detalle de las zonas apantalladas generadas por la orografía (sin aerogeneradores) sobre el segundo tiro (ángulo de elevación de 0,5º) del programa de antena del radar de MeteoGalicia en el entorno de los emplazamientos de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos. El bloqueo orográfico del haz se reduce de forma muy considerable, al 11% en la zona cercana al parque propuesto y a un máximo del 41% de energía interceptada en la zona de Monte Seixo.

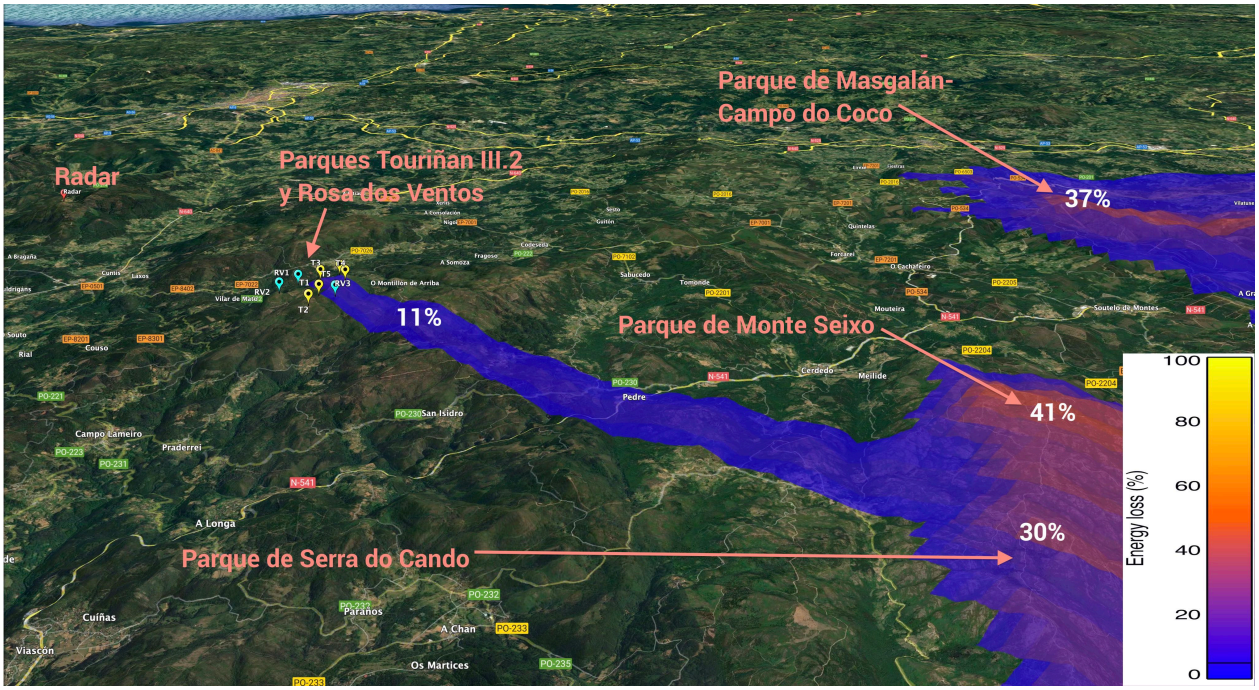


Figura 38: Relieve de las zonas apantalladas (de subdetección) generadas sólo por la orografía (sin aerogeneradores) sobre el segundo tiro (ángulo de elevación de 0,5º) del programa de antena del radar de MeteoGalicia en el entorno de los emplazamientos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos. El bloqueo orográfico del haz se reduce de forma muy considerablecon respecto a la elevación de 0,2º (Figura 36).

4.3.2. Apantallamientos inducidos por los aerogeneradores propuestos

El efecto esperado de los apantallamientos permanentes inducidos por los aerogeneradores propuestos se muestra en la Figura 39. La comparación con la Figura 35 nos permite comprobar que el efecto consiste esencialmente en un ligero reforzamiento de los apantallamientos debidos a la orografía siguiendo las direcciones de intercepción de los aerogeneradores propuestos, **obteniéndose valores máximos del 43% de energía interceptada en las inmediaciones del parque** (un pérdida adicional del 2% de la energía con respecto a la orografía de esa zona). Efecto que está **muy por debajo del apantallamiento máximo inducido por la zona montañosa de Monte Seixo de forma natural, que tiene un impacto sobre el radar muy superior al que tendría este parque eólico (78% de energía bloqueada).**

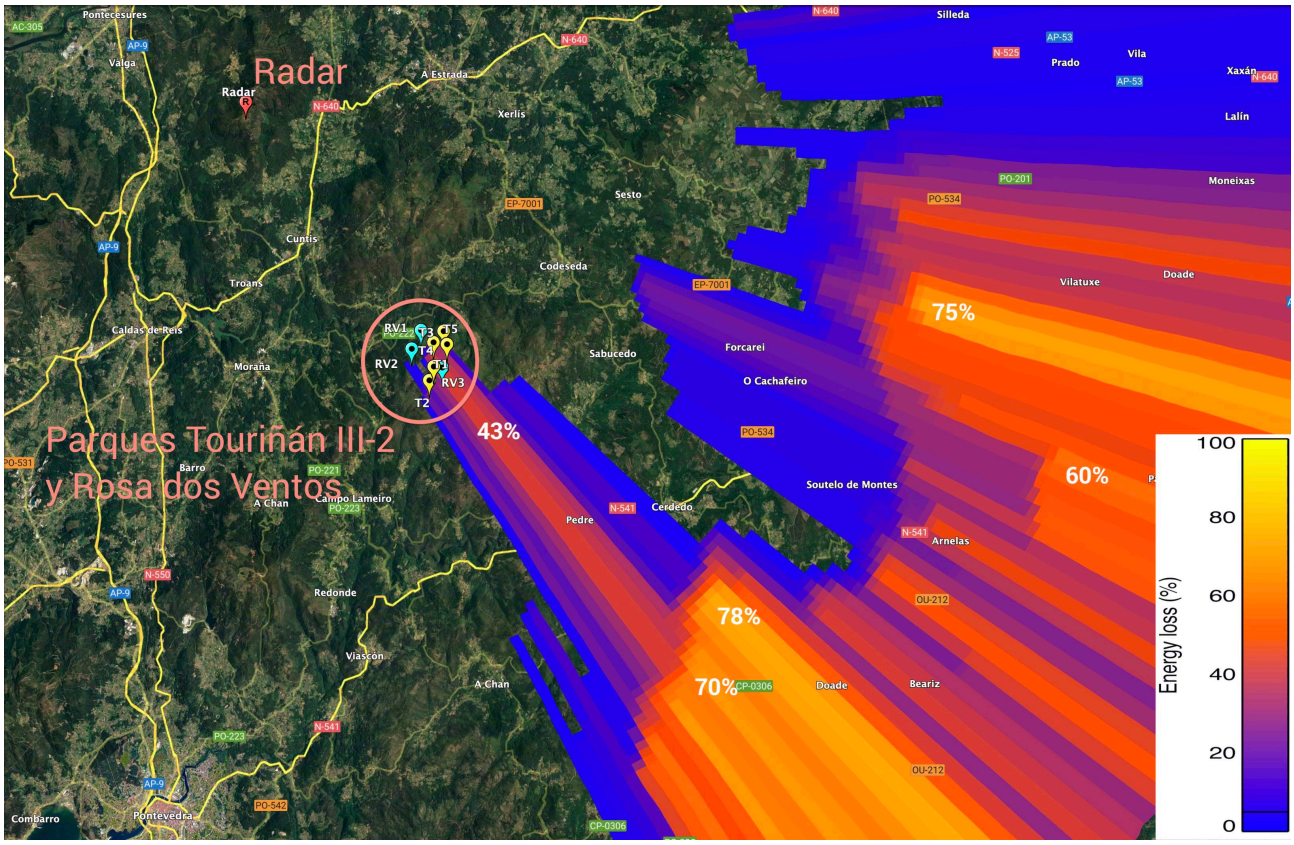


Figura 39: Detalle de las zonas apantalladas generadas por los aerogeneradores previstos en los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos en combinación con la orografía sobre el radar de MeteoGalicia (ángulo de elevación 0,2º). La comparación con los apantallamientos ya generados por la orografía sin aerogeneradores (ver Figura 35) permite comprobar que estos tienen un efecto marginal respecto al resto de apantallamientos orográficos.

La Figura 40 muestra en detalle el apantallamiento generado tan sólo por la orografía. La comparación con la Figura 41 (que muestra con el mismo detalle el efecto combinado de los aerogeneradores propuestos con la orografía) permite poner en evidencia que **el efecto de los aerogeneradores de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos es muy reducido y que se mantiene dentro de los umbrales que se pueden corregir de forma fiable por un procesado de corrección de apantallamientos del radar.**

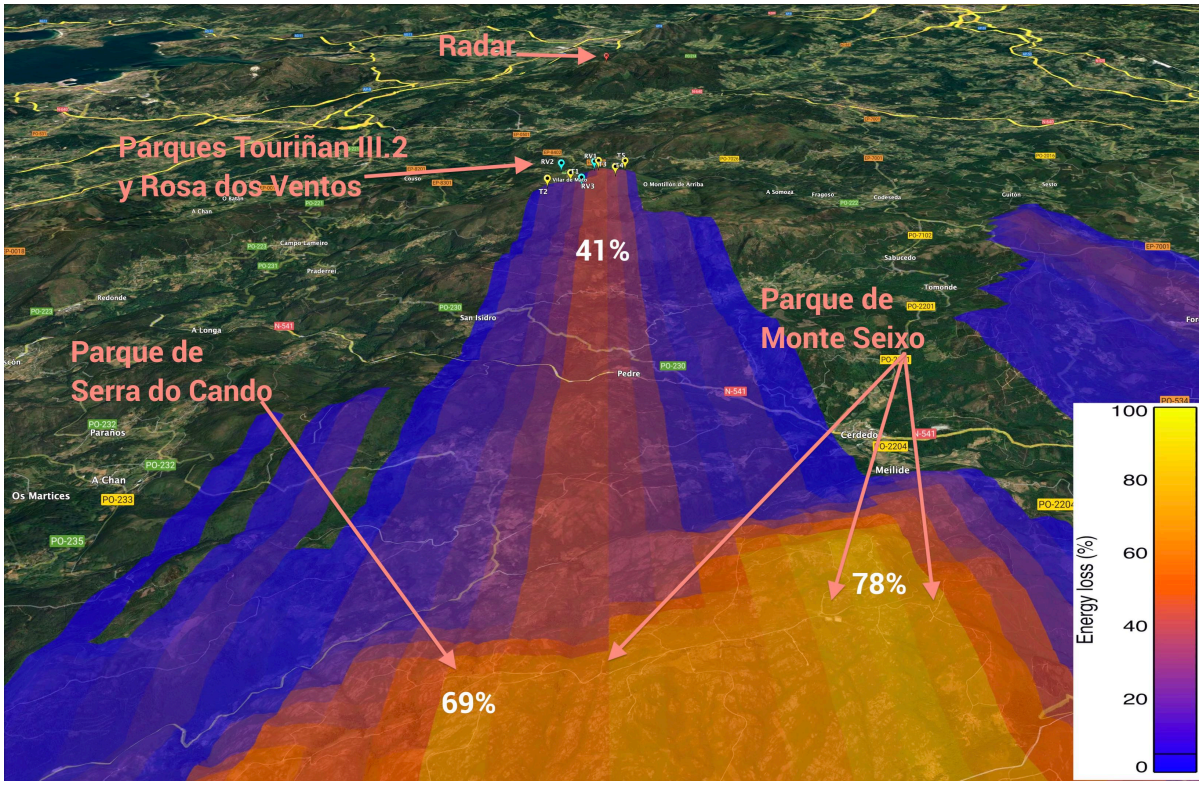


Figura 40: Relieve de las zonas apantalladas generadas por la orografía (sin el efecto de los aerogeneradores) sobre el radar de MeteoGalicia (ángulo de elevación 0,2º). La comparación con la Figura 41 permite comprender, por diferencia, el efecto añadido por los aerogeneradores de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos a los apantallamientos iniciales (orográficos), efecto que resulta marginal frente al generado por la propia orografía.

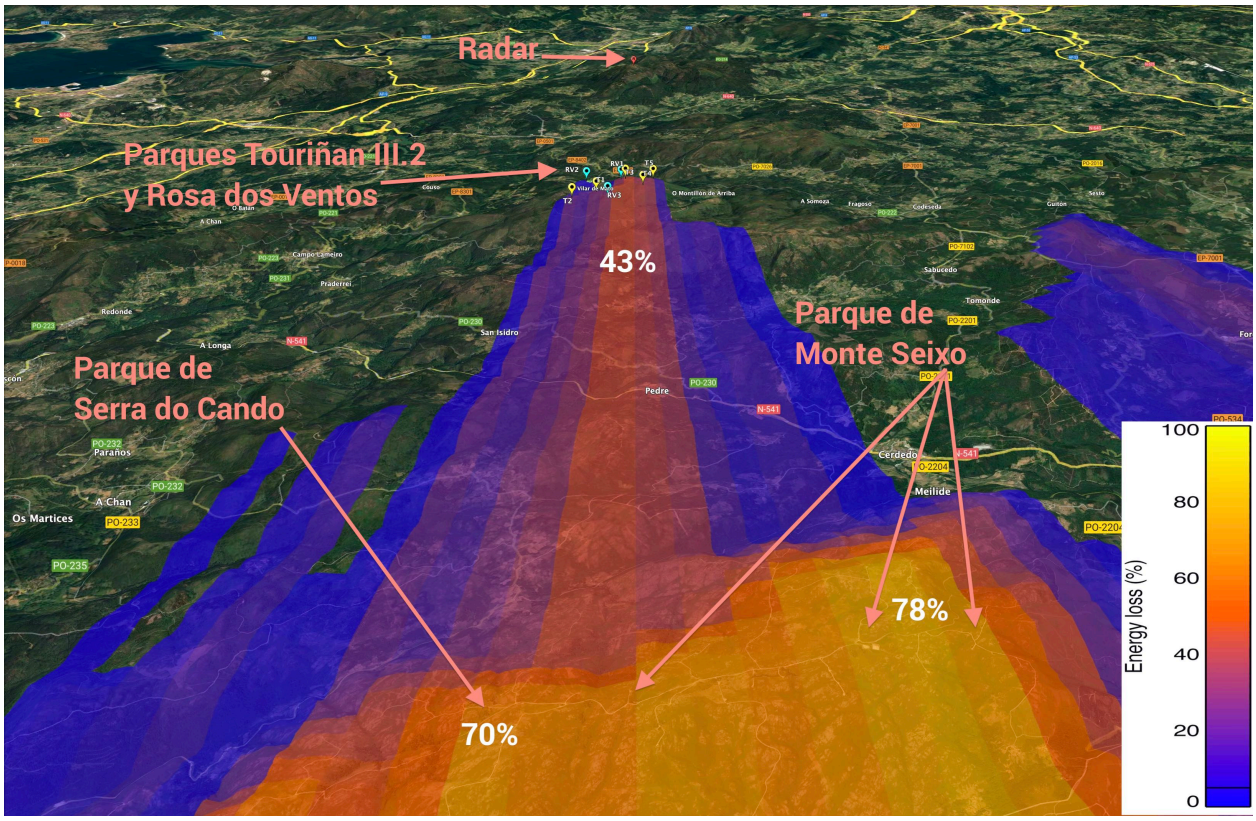


Figura 41: Relieve de las zonas apantalladas generadas por los aerogeneradores previstos en los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos en combinación con la orografía sobre el radar de MeteoGalicia (ángulo de elevación 0,2º).

4.3.3. Efecto de la combinación con otros apantallamientos

A parte del efecto de apantallamiento inducido en el área vecina al parque, se ha de analizar también si los aerogeneradores propuestos podrían ser un factor agravante de otros apantallamientos, como el generado por la orografía al alcanzar la zona del relieve de más altitud (a unos 15 km de distancia siguiendo el haz del radar, ver Figura 36).

En el caso del parque propuesto **la combinación con el relieve de la Serra do Cando hace que el efecto combinado de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos con la orografía aumente la energía bloqueada del 68,8% al 70,4%.** Este efecto es pues un efecto menor, no comparable con el problema ya generado por el apantallamiento orográfico, y que en todo caso se mantiene por debajo del umbral del 80% de energía bloqueada que es el que se considera el umbral límite para una corrección fiable de este tipo de subdetecciones.

Así, la segunda medida que se debería proponer para mitigar este efecto combinado es la de **dotar al procesado de MeteoGalicia de un módulo de procesado avanzado específico para el tratamiento de sectores apantallados de forma severa** (superiores al 60% de energía interceptada) **capaz de resolver sectores afectados de tamaño angular de más de 5º**. Este tipo de metodologías, no integradas en el procesado actual del radar de MeteoGalicia, deben integrar de forma conjunta el uso de factores de corrección de la energía interceptada con **procedimientos de corrección por perfil vertical de las variables polarimétricas** (que permitan utilizar la información de tiros con mayores ángulos de elevación, transformándola según el perfil vertical del tipo de precipitación de cada instante de tiempo), y procedimientos de **advección del campo de precipitación para utilizar convenientemente la información de sectores adyacentes** en la reconstrucción de la estimación de la lluvia en las zonas afectadas (ver detalles en sección 5.1). Este procesado debería de combinarse con el requerido para solucionar los efectos de ecos no meteorológicos permanentes propuesto en la sección 4.2.

En cualquier caso se ha de recordar que, con diferencia, el mayor efecto de apantallamiento lo genera la intercepción orográfica que ya de por sí padece el radar de MeteoGalicia, y que **la ejecución del parque eólico propuesto no agrava de forma substancial el problema que ya sufre el radar en la actualidad.**

4.3.4. Medida de mitigación adicional

Dado que el efecto de los nuevos aerogeneradores **se adiciona** al de los **apantallamientos debidos a la orografía, que ya afectan en estos momentos la medida del radar de Xesteiras**, se debería proponer como medida adicional de mitigación a implementar por MeteoGalicia la **renuncia a la utilización de la primera elevación (0,2º) con fines cuantitativos en estas zonas tan fuertemente apantalladas de inicio por la propia orografía**, medida que combinada con las anteriores permitiría resolver por completo el impacto analizado.

Así, si se analiza el efecto del nuevo parque sobre el radar, no en el tiro más bajo (ángulo de elevación de 0,2º) sino en el siguiente tiro (ángulo de elevación de 0,5º) como si fuera la primera elevación útil del radar, se puede comprobar que **la afectación de los apantallamientos sobre este ángulo de elevación es mucho más reducida** (ver Figura 42).

Tanto, que incluso **el efecto combinado de todos los factores expuestos (orografía, aerogeneradores ya existentes y nuevos aerogeneradores de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos) no superaría los valores de impacto generados por la simple orografía del emplazamiento del parque sobre el ángulo de elevación de 0,2º** (41% de energía retenida) y el impacto sobre la capacidad de medida del radar sería perfectamente corregible con el

conjunto de medidas de mitigación propuestas (comparar las Figura 44 y Figura 43 con las Figura 40 y Figura 41).

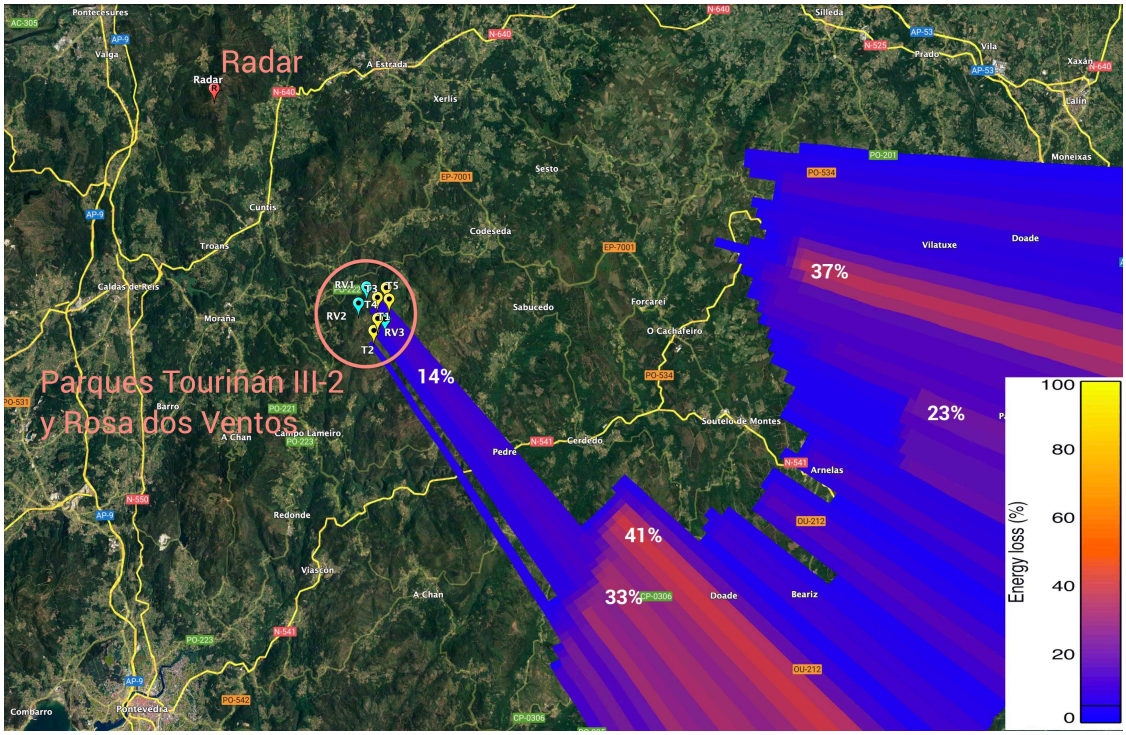


Figura 42: Detalle de las zonas apantalladas generadas por los aerogeneradores propuestos en combinación con la orografía el segundo tiro (ángulo de elevación de 0,5º) del programa de antena del radar de MeteoGalicia en el entorno de los emplazamientos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos. La comparación con la Figura 39 permite comprobar que los apantallamientos del haz se reducen de forma muy considerable, y que la utilización del ángulo de elevación de 0,5º es la medida más efectiva no sólo para minimizar el impacto del parque eólico propuesto, sino también para reducir los impactos debidos a la propia orografía.

En ese sentido la propuesta de medidas de mitigación incluiría esta medida adicional para MeteoGalicia en forma de **recomendación de no utilizar el ángulo de elevación más bajo en los sectores fuertemente apantalladas por la propia orografía**.

Cabe decir que sobre esas zonas se puede utilizar como información primaria la del tiro de ángulo de elevación de 0,5º, y que **gracias al procesado avanzado propuesto en las otras medidas compensatorias se pueda realizar una correcta re-estimación de las variables medidas por el radar,** y por ende de la lluvia en superficie gracias a la utilización de una metodología de corrección por perfil vertical (variable en el tiempo, en el espacio y en función del tipo de lluvia) lo cual permitiría minimizar el impacto de esta medida en la calidad de las estimaciones del radar.

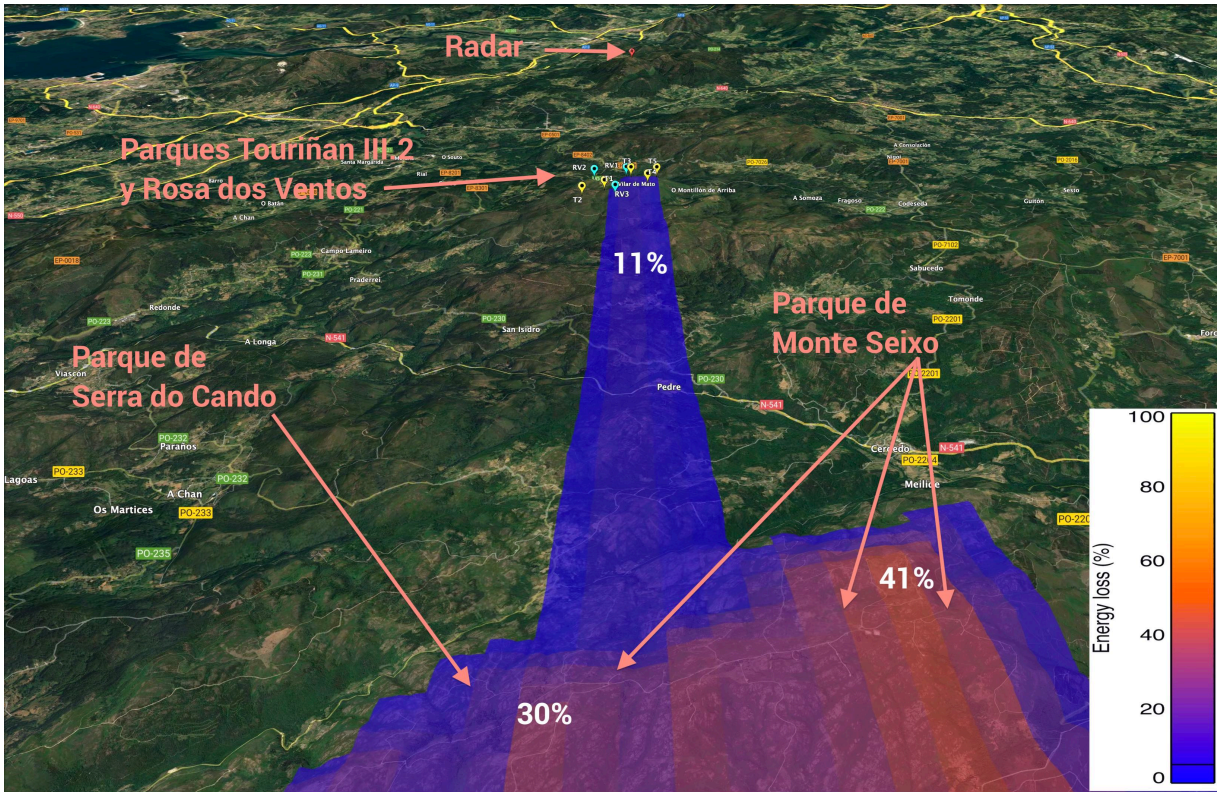


Figura 43: Relieve de las zonas apantalladas generadas por la orografía (sin el efecto de los aerogeneradores) sobre el radar de MeteoGalicia (ángulo de elevación 0,5º). La comparación con la Figura 44 permite comprender, por diferencia, el efecto añadido por los aerogeneradores de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos a los apantallamientos (orográficos), efecto que resulta marginal frente al generado por la simple orografía.

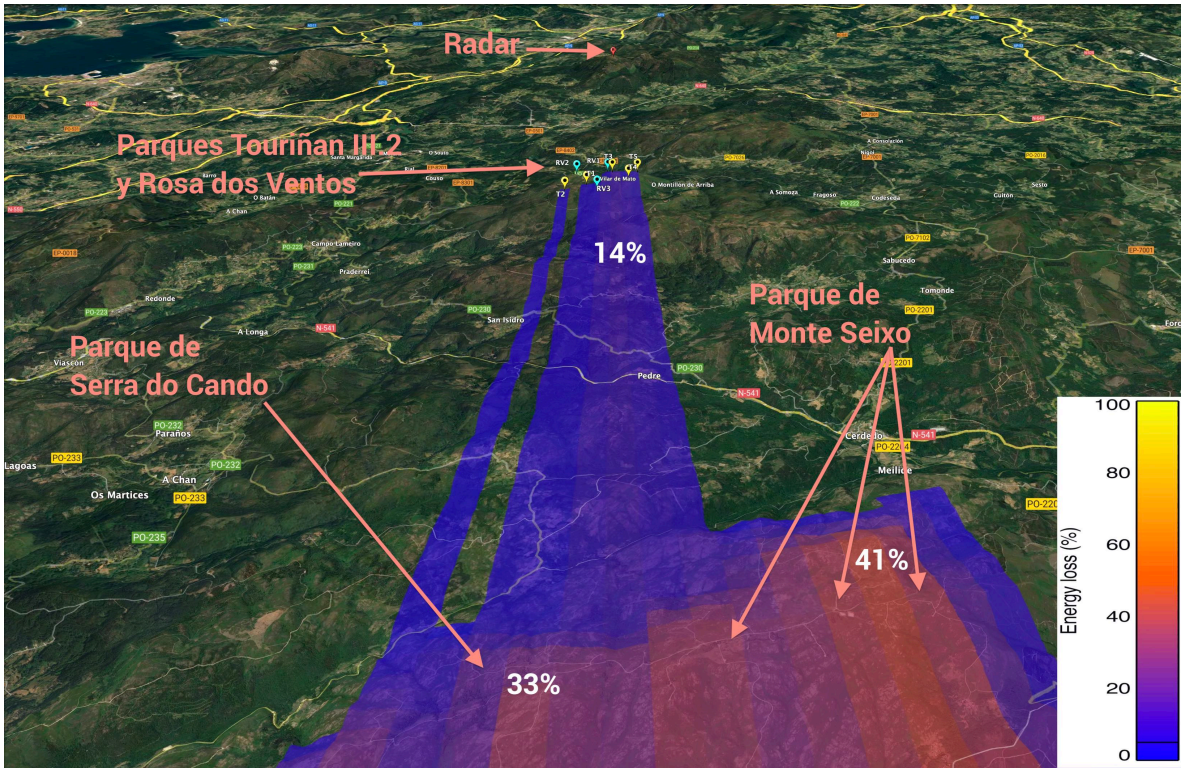


Figura 44: Relieve de las zonas apantalladas generadas por los parques de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos en combinación con la orografía sobre el tiro de ángulo de elevación de 0,5º del radar de MeteoGalicia. El porcentaje de energía retenida incluso en combinación con el efecto de apantallamiento orográfico (14%) es muy inferior al de la simple orografía en el ángulo de elevación de 0,2º (41%, ver Figura 40).

4.4. Ecos no meteorológicos no permanentes

No es descartable que **en situaciones de condiciones de propagación anómala severa** (es decir en situaciones asociadas a perfiles de humedad, presión o temperatura atípicos con la altura, como sería el caso de situaciones severas de inversión térmica, fenómenos severos de subsidencia atmosférica, o inversiones severas en los perfiles de humedad) **se puedan producir ecos no meteorológicos no permanentes debido a la incurvación del haz principal del radar por el fenómeno de súper refractividad atmosférica.**

En el caso de este parque, dada la corta distancia (inferior a 20 km) a la que se encuentra, las afectaciones de este tipo no deberían de ser frecuentes (sólo en caso de propagación anómala muy severa). Y en estas situaciones, la medida propuesta en el apartado anterior de utilizar el segundo ángulo de elevación del programa de antena del radar de MeteoGalicia (0,5º) (que es la utilizada por MeteoGalicia para generar el producto radar que se visualiza en su página web) en vez de la de 0,2º sería suficiente para resolver la afectación.

4.5. Resumen de impactos esperables de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos

Los emplazamientos seleccionados para el parque de aerogeneradores de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos interceptan el haz principal el radar en los dos primeros ángulos de elevación del radar, produciendo ecos no meteorológicos permanentes y zonas de subdetección, pero menos importantes que las que ya afectan al radar en estos momentos en la vecindad del parque.

De esta manera el parque propuesto tendría un impacto apreciable sobre la capacidad de medida de MeteoGalicia.

Sin embargo, es importante destacar que los la instalación de los aerogeneradores de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos **generaría impactos que son corregibles** si se dota al radar de MeteoGalicia de un **procesado adecuado que mejore la capacidad de detección, y sobretodo de restitución de los valores del campo de lluvia afectados** por ecos permanentes alrededor de estos emplazamientos. **Procesado que tendría la ventaja adicional de permitir subsanar los efectos inducidos por otros parques eólicos preexistentes que ya afectan hoy en día la medida del radar de MeteoGalicia.**

Adicionalmente la calidad de la medida en la zona afectada por los ecos no meteorológicos inducidos por los aerogeneradores **se puede mejorar emplazando sensores de medida de lluvia in situ que compensen la pérdida de calidad de la estimación en la zona del parque.** Si además se dota al radar de MeteoGalicia de un **procesado adicional que permita** la combinación de las medidas radar con la de los sensores de medidas in situ, **se puede minimizar de forma muy efectiva el impacto de los emplazamientos propuestos en el parque eólico de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos asegurando la calidad de la medida de lluvia del radar de MeteoGalicia.**

En cuanto a las zonas de subdetección es importante recordar que, dado que la instalación del parque haría pasar de un valor máximo del 41% al 43% de energía bloqueada en la zona inmediata al parque, y del 69% al 70% en la zona tras la Serra do Cando y Monte Seixo, **el impacto ocasionado no es excesivo y se podría mitigar hasta reducirlo a un impacto marginal sobre la calidad de la medida de lluvia del radar de MeteoGalicia si se implementan las medidas de mitigación y compensatorias propuestas.**

Eso implica un esfuerzo importante por las dos partes, para reconocer la complejidad de la situación (de hecho la calidad de la medida del radar ya está cuestionada en esta zona antes

de la instalación de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos) y para aceptar soluciones que permitan la operación simultánea, minimizando los impactos.

A cambio, la ventaja de la estrategia de medidas mitigadoras y compensatorias propuestas es que no sólo se pueden minimizar los impactos del nuevo parque, **sino también corregir los problemas que el radar registra actualmente debido a los apantallamientos orográficos y a los parques de aerogeneradores preexistentes, mejorando la calidad actual de la medida de lluvia del radar de MeteoGalicia.**

4.6. Necesidad de implementar medidas de mitigación o medidas compensatorias

Las medidas recomendadas para **mitigar y compensar el impacto de los emplazamientos propuestos de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos** mejorando la calidad de la medida de lluvia del radar de MeteoGalicia son las siguientes.

1) Dotar al radar de MeteoGalicia de un **procesado adicional que permita la mejora de la capacidad de corrección de ecos no meteorológicos** permanentes y no permanentes con signatura de velocidad espectral Doppler no nula, **y sobretodo mejorar la restitución del campo estimado de la precipitación en las zonas afectadas por el parque eólico propuesto**.

2) Dotar al procesado de MeteoGalicia de un **módulo adicional de procesado avanzado específico para el tratamiento de sectores apantallados de forma grave** (superiores al 60% de energía interceptada) **capaz de resolver sectores afectados con apertura angular de más de 5º**. Este tipo de metodologías no se pueden basar simplemente en el uso de factores de corrección de la energía interceptada, sino que deberían integrar también **procedimientos de corrección por perfil vertical** (que permitan utilizar la información de tiros con mayores ángulos de elevación, transformándola según el perfil vertical del tipo de precipitación de cada instante de tiempo), y procedimientos de **advección del campo de precipitación para utilizar convenientemente la información de sectores adyacentes** en la reconstrucción de la estimación de la lluvia en las zonas afectadas. Este procesado debería de integrarse en el procesado propuesto en la medida 1.

3) Como cualquiera de las alternativas para hacer estas correcciones presentaría un problema de incertidumbre en la reconstitución de los valores del campo en las áreas afectadas, sería necesario proponer una **medida compensatoria adicional** en forma de **instalación de dos sensores de medida de intensidad de lluvia local a instalar en las inmediaciones de los aerogeneradores** capaces de ocasionar un mayor impacto sobre la medida de lluvia por radar, con capacidad de ser interrogado remotamente por MeteoGalicia y de ser integrado en su red de medidas en tiempo real.

   Se recomienda que uno de estos sensores debería ser un disdrómetro óptico que, además de proveer el valor de intensidad de lluvia, permitiese disponer de una medida local de la distribución de tamaños de gotas de lluvia, función clave para la conversión de la reflectividad radar en intensidad de lluvia.

4) Para permitir que los datos de esos sensores locales de la medida compensatoria anterior se integrasen correctamente con el radar de MeteoGalicia, la instalación de los sensores se debería acompañar de una mejora del procesado del radar **dotándole de un procesado avanzado que permita combinar los datos de intensidad de lluvia y de distribución de tamaños de gotas de lluvia** medidos localmente en los emplazamientos de los aerogeneradores **con la estimación cuantitativa del campo**

de lluvia obtenida en base a la estimación directa del radar. De esta manera se integrarían las dos fuentes de datos de manera a que el producto final disponible por MeteoGalicia no sufriese merma alguna en su calidad. Este procesado debería de integrarse en el procesado propuesto en las medidas 1 y 2.

5) Finalmente y como medida de mitigación adicional a implementar por MeteoGalicia, **aceptar que el procesado cuantitativo del radar utilice como información primaria para la estimación la correspondiente al tiro de ángulo de elevación de 0,5º,** y que gracias a la utilización del procesado avanzado adicional de corrección por perfil vertical (variable en el tiempo, el espacio y en función del tipo de lluvia) pueda hacerse una correcta estimación de la lluvia en superficie. (Este procesado ya está incluido en el propuesto en las medida 1).

La aplicación de estas medidas mitigadoras y compensatorias permitiría instalar los aerogeneradores previstos en los emplazamientos de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos **manteniendo e incluso mejorando la calidad de la medida de lluvia del radar de MeteoGalicia**, ya que la instalación de los módulos de procesado avanzado propuestos también le permitiría a MeteoGalicia mitigar los actuales efectos de otros parques eólicos en la vecindad ya en funcionamiento.

5. Detalles técnicos de las medidas compensatorias propuestas

Como ya se ha visto la instalación de los aerogeneradores propuestos tiene un impacto apreciable sobre la calidad de la medida del radar meteorológico de MeteoGalicia. Sin embargo, se pueden proponer medidas de mitigación y compensatorias para reducirlo, y en el presente caso medidas que permiten minimizar la pérdida de calidad de la estimación en la zona del parque hasta hacerla marginal.

Más allá de la medida de mitigación propuesta en forma de recomendación a MeteoGalicia de utilizar la elevación de 0,5º como información primaria para el procesado cuantitativo del radar, se proponen 3 medidas compensatorias a asumir por el promotor del parque:

1. Dotar al radar de un **procesado adicional que permita la mejora de la capacidad de corrección y restitución del campo de precipitación** en las zonas afectadas por el parque eólico propuesto.
2. Dotar al radar de un **procesado adicional que permita la corrección de sectores apantallados.**
3. Instalar **dos sensores de medida de intensidad de lluvia local en las inmediaciones de los aerogeneradores (uno de ellos un disdrómetro óptico).**

   Esta medida compensatoria debe de incluir una medida de acompañamiento consistente en dotar al radar de un **modulo de procesado que permita combinar de forma automática los datos de esos sensores con los datos del radar**.

El resultado de estas medidas compensatorias es el de proponer una mejora del actual procesado del radar de MeteoGalicia que, conjuntamente con la instalación en las zonas afectadas de los sensores adicionales propuestos, permitan restituir los valores del campo de lluvia de forma que la calidad de los productos generados por MeteoGalicia no quede afectada de forma apreciable por la instalación del parque eólico propuesto.

A continuación, se dan los detalles técnicos de las medidas propuestas.

5.1. Procesado avanzado para la corrección de zonas afectadas por ecos no meteorológicos

La mayoría de sistemas de procesado de datos radar incluyen la **eliminación de ecos de origen no-meteorológico por filtrado del espectro de velocidades Doppler** de los blancos detectados en el procesado de señal básico. Este filtrado está basado en el **reconocimiento de los ecos con velocidad nula**, y por lo tanto supuestamente fijos, que se consideran en primera aproximación como ecos no meteorológicos. Este es el caso de la mayoría de los ecos orográficos (estáticos) o de propagación anómala (dinámicos).

La eliminación de los ecos no meteorológicos se basa pues en que las velocidades de este tipo de ecos suelen ser cercanas a cero, y se puede tratar de eliminar del espectro la porción de la potencia asociada a los blancos con velocidad cercana a cero.

Las metodologías de restitución del valor (la no restitución del valor de lluvia provoca que se subestimen de forma sistemática los píxeles afectados) **se suelen basar en la reconstitución del espectro Doppler, por interpolación**, lo que permite recalcular la señal asociada a un campo de reflectividades en el que se habría filtrado la contribución de los ecos fijos (supuestamente no meteorológicos).

Sin embrago, más allá de la utilidad de la velocidad Doppler para identificar ecos orográficos o de propagación anómala, está bien documentado que este reconocimiento no es óptimo y que este tipo de filtros sufre de una serie de limitaciones bien conocidas:

- Sobre-eliminación de los ecos asociados a velocidades Doppler bajas, que resulta en la subestimación generalizada de la reflectividad, especialmente en las zonas donde los ecos presentan velocidades tangenciales al radar.
- Errores importantes en la restitución del valor de la lluvia en las zonas eliminadas por el filtro.
- Extrema sensibilidad a los valores umbral de los parámetros del filtro, cuyo ajuste requiere estudios detallados para cada ubicación y que pueden variar en el tiempo. Un mal ajuste de estos parámetros puede llegar a causar incluso la eliminación de las zonas centrales de los núcleos de sistemas convectivos (zonas de velocidad preeminentemente vertical).
- Imposibilidad de eliminar los ecos debidos a blancos móviles tales como parques de aerogeneradores, aviones, ecos ocasionados por la reflexión sobre vegetación o sobre superficies de agua con oleaje (en condiciones de propagación anómala del haz radar) como el mar o grandes lagos.

Debido a que estas limitaciones se agravan con la presencia de parques de aerogeneradores, en los últimos 10 años se han desarrollado un buen número de técnicas de procesado avanzado de los datos radar capaces de proponer filtrados específicos para el caso de la señal inducida por aerogeneradores situados en la línea de visión del radar (Beauchamp y Chandrasekar, 2016, 2017; Hall et al., 2017; Norin, 2017). La mayoría de estos algoritmos consisten en filtros en el espectro de velocidades Doppler, desarrollados por simulación de la señal introducida de un aerogenerador, y permiten eliminar el efecto de los ecos permanentes de los aerogeneradores y restituir las medidas del radar. La principal limitación es que la mayoría de estos desarrollos se han quedado en la fase inicial de I+D y en estos momentos no conocemos ninguno que haya sido verificado y validado operacionalmente y esté disponible de forma comercial (ver por ejemplo Nai et al. 2011; Norin, 2017). Además, por la información de la que disponemos, ningún fabricante de radares meteorológicos ofrece como opción en su software de procesado radar un algoritmo específico para la cancelación y restitución de este tipo de ecos no meteorológicos.

Las alternativas operacionales más adecuadas basan la detección de las zonas afectadas por ecos no-meteorológicos en una combinación de variables, (y no sólo la velocidad Doppler), bien medidas directamente en el caso de radares polarimétricos (utilización de variables polarimétricas para identificar los distintos tipos de ecos no-meteorológicos.) o bien derivadas de ellas (como la altura máxima del eco, los gradientes verticales y horizontales de las reflectividades y de las fases, la textura, etc.) que es la mejor alternativa en el caso de radares más antiguos (no polarimétricos).

Los métodos más simples (Giuli et al., 1991; Ryzhkov y Zrnic, 1998) se basan en árboles de decisión, y la tendencia de los más avanzados es el uso de los conceptos de lógica difusa para hacer la clasificación de los tipos de eco a partir de sus múltiples características en las variables radar integradas (como en Berenguer et al., 2006; Cho et al. 2006; Gourley et al. 2007; Hubbert et al., 2009) o en el espectro Doppler de las variables polarimétricas (Moisseev y Chandrasekar, 2009; Unal, 2009; Alku et al., 2015; Dufton et al., 2015; Ye et al., 2015; Seo et al. 2015).

Los últimos años, los procesadores de datos radar han empezado a incluir algoritmos en base a datos polarimétricos (a veces con el análisis del espectro Doppler de las variables

polarimétricas o complementando los filtros habituales con los resultados de un algoritmo de clasificación del tipo de blanco). Este es el caso del procesador RVP900 (Vaisala, 2017), utilizado actualmente por MeteoGalicia.

La principal limitación de estos sistemas comerciales actuales es que, aunque son efectivos a la hora de identificar los ecos producidos por blancos no meteorológicos (incluidos los ecos debidos a los parques de aerogeneradores en el caso de radares polarimétricos), **la calidad de la restitución de las variables radar es en muchos casos bastante pobre.** Esto se debe a que la restitución de la señal se hace procesando el espectro Doppler. Sin embargo está bien documentado que este procedimiento no es óptimo incluso en el caso de utilizar el espectro Doppler de radares polarimétricos y que suelen provocar tanto la subestimación generalizada del campo de las reflectividades, como la subestimación sistemática de los valores en las áreas usualmente afectadas por ecos no meteorológicos.

Así pues, se recomienda **incluir un módulo de procesado avanzado que permita mejorar especificamente la restitución de las variables radar observadas en las zonas en las que se han identificado los ecos no meteorológicos**, como será la zona del parque propuesto. Como se ha comentado en la sección 2.3.3, se recomienda utilizar una técnica con **tratamiento diferencial en función del tipo de precipitación**.

Un ejemplo operacional de ese procesado es el incluido en la plataforma de procesado avanzado ProRad, que actualmente está en funcionamiento operacional en la red de radares del *Servei Meteorològic de Catalunya*.

5.2. Procesado avanzado de corrección de sectores apantallados o afectadas por interferencias

Más allá de las zonas donde la señal del radar está bloqueada parcialmente por la orografía (ver sección 3.3.3) aparecen zonas de subdetección en las que las variables relacionadas con la amplitud de la señal recibida (principalmente Z_H y Z_{DR}) son sistemáticamente subestimadas.

Para mitigar el efecto de estos bloqueos del haz se debe compensar la potencia perdida. Las metodologías existentes (fundamentalmente los propuestos por Delrieu et al. 1995, adaptada a la corrección de apantallamientos por Sánchez-Diezma, 2001, y Kucera et al. 2004 para compensar el efecto sobre Z_H) se basan en la simulación de la intercepción del haz utilizando un Modelo Digital del Terreno, lo cual permite estimar la proporción de la potencia transmitida responsable de los ecos registrados.

Por otra parte, las medidas relacionadas con la fase (Φ_{DP} y K_{DP}) están menos afectadas por los bloqueos parciales del haz radar por la orografía y su uso para la estimación de lluvia no se ve significativamente afectado (Friedrich et al. 2007), así que podrían utilizarse también como estimadores de forma alternativa si la calidad de los datos de estas variables fuera la adecuada.

Así, para corregir correctamente este tipo de problemas se debería **incluir en el procesado un módulo de corrección avanzada de zonas apantalladas** (por orografía, parques de aerogeneradores y en su caso contaminadas por interferencias electromagnéticas como antenas, WLAN etc...) que permita **restituir una buena estimación del valor que se hubiese medido sin el efecto de subdetección**, y que a ser posible utilice de forma combinada los factores de corrección por energía apantallada, los estimadores polarimétricos Φ_{DP} y K_{DP}, y la información de sectores vecinos (en vertical y horizontal) en la reconstrucción de la estimación de la lluvia en las zonas afectadas.

En el caso del radar de MeteoGalicia en el sector del parque eólico propuesto, esto requiere la utilización de un **módulo de procesado avanzado específico para el tratamiento de sectores apantallados capaz de resolver sectores con tamaño angular de más de 5º**. Este tipo de metodologías no suele estar integradas en los procesados básicos incorporados de salida por los fabricantes de radares meteorológicos, y tan sólo lo incorporan los paquetes más avanzados.

La solución sugerida es añadirle al procesado avanzado propuesto en el punto anterior un módulo de corrección de zonas apantalladas.

Un ejemplo de los que están disponibles actualmente es el módulo GapFilling del sistema ProRad. Este módulo incorpora un triple algoritmo para recuperar los valores del campo de precipitación en las zonas de subdetección que utiliza:

a) Corrección por **multiplicación por el factor de energía interceptada** previamente calculado para cada tiro del radar, lo que permite restituir un valor aproximado sin el efecto de subdetección. En caso de apantallamientos orográficos este procedimiento ofrece una buena reconstitución del campo en sectores de menos de 10º a distancias de hasta 75 km del radar con apantallamientos de hasta el 80%. En el caso de aerogeneradores, aunque este tipo de correcciones funciona muy bien como primera aproximación, los factores de corrección fluctúan y la estimación se obtiene de forma iterativa por combinación con los otros dos algoritmos detallados a continuación.

b) Corrección **por perfil vertical**. Para ello el módulo incluye la estimación del perfil vertical de reflectividad separando cada imagen en zonas homogéneas de tipo de lluvia, sobre las que se identifica un perfil vertical característico medio. Este procedimiento asegura una evolución temporal del perfil vertical característico y evita que perfiles de tipo *Bright Band* (Banda Brillante) puedan ser aplicados en zonas convectivas. El perfil vertical representativo se convoluciona con las medidas de cada sector, teniendo en cuenta la apertura característica del haz para cada rango de distancias lo que permite utilizar la información vertical (de tiros con mayores ángulos de elevación) para estimar la precipitación sobre el sector apantallado.

   ProRad incluye un algoritmo (propuesto por Franco et al. 2006 y Franco, 2008) que permite la identificación/aplicación de corrección por perfil vertical necesaria para utilizar como información primaria la de los tiros de ángulos de elevación superiores, transformándola para conseguir una correcta estimación de la lluvia en superficie.

La utilización conjunta de los dos algoritmos permite una estimación avanzada del campo de precipitación en superficie que si se combina con la utilización adicional de la información pluviométrica y disdrométrica propuesta (ver sección 5.3) permite una gran calidad en la medida final del campo de precipitación.

Este módulo forma parte de la plataforma de procesado avanzado ProRad, que actualmente está en funcionamiento operacional en la red de radares del *Servei Meteorològic de Catalunya*.

5.3. Introducción de medidas complementarias: pluviógrafos y disdrómetros (locales)

Un algoritmo de procesado avanzado como el propuesto permite hacer una corrección (reconstrucción de la señal en las zonas afectadas por los parques de aerogeneradores) y una estimación del campo de lluvia que es la mejor posible. Sin embargo todo algoritmo tiene un margen de incertidumbre que en ciertos casos puede llegar a ser importante.

Así, la única manera de restituir un valor que no implique un aumento de la incertidumbre original de la medida (y por lo tanto una pérdida de la calidad) es proponer una medida compensatoria consistente en añadir una **medida de intensidad de lluvia local en los emplazamientos afectados**. De esta manera, se puede tener una medida directa en el terreno que permite condicionar la estimación y reducir la incertidumbre asociada a la corrección.

Se propone pues la instalación de 2 puntos de medida compensatoria:

1. **un pluviógrafo** (sensor que permiten medir la intensidad de lluvia), equipado con un datalogger para el almacenamiento local de datos y una conexión telefónica a internet que tendría capacidad para ser interrogado remotamente por MeteoGalicia y de ser integrado en su red de medidas en tiempo real;
2. **un disdrómetro óptico que, además de proveer el valor de intensidad de lluvia permitirá disponer de una medida local de la distribución de tamaños de gotas de lluvia**, función clave para la conversión de la reflectividad radar en intensidad de lluvia.

Los valores locales de la lluvia medida en los emplazamientos de los aerogeneradores se deberían combinar con los campos de lluvia estimados por el radar, por lo que se propone una medida de acompañamiento en forma de módulo de combinación radar-pluviógrafos a añadir al procesado avanzado propuesto en los puntos anteriores.

Entre las diversas soluciones comerciales existentes, el módulo GenKrig (integrable en la plataforma de procesado avanzado ProRad) permite integrar operacionalmente una combinación geoestadística automatizada que tiene la ventaja de utilizar la función de estructura espacial del campo de lluvia definida a partir del radar, para cada imagen radar. Lo que permitie el tratamiento integral de la anisotropía y de la alta variabilidad temporal del campo de lluvia. A parte del campo combinado, permite obtener acumulaciones para diferentes periodos y definir indicadores de calidad para la detección de anomalías en el funcionamiento del radar. Este módulo de combinación está basado en el algoritmo inicialmente propuesto por Velasco Forero, et al. (2009), y revisado por Schiemann et al. (2011) y Cassiraga et al. (2020), módulo que que actualmente está en funcionamiento operacional en la red de radares del *Servei Meteorològic de Catalunya*.

6. Resumen de las medidas propuestas para los parques de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos

A continuación se resumen las medidas de mitigación y compensatorias propuestas.

Medidas compensatorias propuestas para los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos **Greenalia**
Modulo de post-procesado avanzado radar para el radar de MeteoGalicia. Ha de incluir modulo de **restitución de las zonas afectadas por ecos no meteorológicos**, **corrección de apantallamientos e interferencias**, estimación automática del Perfil Vertical de Reflectividad en función del tipo de lluvia y capacidad de integración de datos disdrométricos en la conversión de las variables polarimétricas radar a intensidad de lluvia. Ha de incluir implementación y ajuste de los algoritmos a los datos de MeteoGalicia
Módulo automático de combinación geoestadística de datos radar y pluvios adaptado a la utilización operacional de MeteoGalicia Ha de incluir capacidad de tratar la anisotropía y la variabilidad temporal propias del campo de lluvia. Ha de incluir implementación y ajuste de los algoritmos a los datos de MeteoGalicia.
Red de medida pluviométrica in situ
1 Punto de medida pluviométrica Pluvio (ARG314 CAMPBELL o similar) Datalogger (CR300-CELL215/ CR300-WIFI CAMPBELL o similar) Bateria caseta, conexión internet **1 Disdrometro Óptico** (**PARSIVEL2** o similar) Datalogger (CR300-CELL215/ CR300-WIFI CAMPBELL o similar)

7. Recomendación Final

En base a los resultados obtenidos **se considera que:**

1) Los aerogeneradores propuestos **invaden la línea de visión del radar en las elevaciones de ángulos 0,2º y 0,5º** se ubican en zona de mitigación y **requieren de medidas de mitigación y compensatorias.**

2) **En referencia a los ecos no meteorológicos** que generarían, estas afectaciones serán **inferiores a las generadas por los ecos y los bloqueos orográficos que ya afectan a la calidad de la medida radar en este sector de la imagen.**

3) **En referencia a los apantallamientos**, los aerogeneradores propuestos tienen un **efecto adicional local del 2% de energía interceptada** con respecto al apantallamiento que ya genera la orografía en el ángulo de elevación de 0,2º. Además el efecto global de este parque sobre el fuerte apantallamiento ya existente generado por la Serra do Cando y Monte Seixo (que en estos momentos ya bloquea más de un 68% de la energía emitida por el radar) **es inferior al 2% adicional,** lo que se puede considerar como un efecto irrelevante ya que la afectación global se mantiene dentro de los umbrales que permiten una corrección eficiente.

4) Además, si se llevan a cabo las medidas mitigadoras y de compensación propuestas, entre ellas que la operación del radar con fines de estimación cuantitativos utilice la segunda elevación del programa de antena (0,5º) y superiores; el impacto se reduce significativamente (apantallamientos combinados máximos del 14% de forma local y del 33% sobre la zona de más altura del relieve de la Serra do Cando), **pudiéndose asegurar que las medidas de mitigación y compensatorias propuestas permiten reducir el impacto a un efecto marginal sobre la capacidad de medida del radar de MeteoGalicia.**

Así, se concluye que la **instalación de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos no generará ningún efecto que no esté ya presente en la medida del radar de MeteoGalicia, y que estos efectos son corregibles si se aplican las medidas compensatorias propuestas.** Medidas que tendrían la ventaja adicional de permitir también la corrección de los efectos inducidos por los parques eólicos preexistentes que hoy en día ya afectan la medida del radar de MeteoGalicia

La experiencia acumulada en los últimos 10 años por MeteoGalicia y por otros casos donde se ha instalado procesado avanzado de corrección radar (como en la red de radares del Servei de Meteorologia de Catalunya) permite asegurar que no se ha de tener reparo en conceder el permiso solicitado, ya que **hoy en día se dispone de herramientas para corregir los impactos generados por aerogeneradores que incluso intercepten la línea de visión del radar a distancias inferiores.**

Por todo ello, con la certeza de que con la aplicación de las medidas de mitigación y compensatorias propuestas en la sección 4.6, y recogidas en la tabla de la sección 6, se puede instalar y operar los aerogeneradores previstos **sin mermar la calidad de la medida de lluvia del radar de MeteoGalicia,** se recomienda **informar favorablemente sobre la propuesta de los parques eólicos de Touriñán III-2 y Rosa dos Ventos condicionado a la puesta en marcha de las medidas de mitigación y compensatorias propuestas.**

8. Referencias

Aarholt, E. y Jackson, C., 2010. Wind Farm Gapfiller Concept Solution. En ***Preprints of the EuRAD Conference****, Paris 2010*.

Alku, L., D. Moisseev, T. Aittomäki, y V. Chandrasekar, 2015. Identification and suppression of nonmeteorological echoes using spectral polarimetric processing, IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 53, 3628–3638.

Air Force Research Laboratory (AFRL) Mobile Diagnostics Laboratory (MDL), 2006. Wind Farm Turbine Measurements Fenner, NY – ***Final Report***.

Bachmann, S., Al-Rashid, Y., Isom, B., y Palmer, R., 2010. Radar and Windfarms – mitigating negative effects through signal processing. En ***Preprints Of The European Conference On Radar In Meteorology And Hydrology***.

Barnes, S. L., 1995. Comments on ‘‘Use of multiquadric interpolation for meteorological objective analysis.’’ ***Monthly Weather Review*** 123, 2255–2256.

Beauchamp, R. M. y V. Chandrasekar, 2016. Dual-Polarization Radar Characteristics of Wind Turbines With Ground Clutter and Precipitation, ***IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing***, 54, 4833-4846.

Beauchamp, R. M. y V. Chandrasekar, 2017. Suppressing Wind Turbine Signatures in Weather Radar Observations. ***Transactions on Geoscience and Remote Sensing***, 55, 2546-2562.

Berenguer, M., Sempere-Torres, D., Corral, C., y Sánchez-Diezma, R., 2006. A Fuzzy Logic Technique for Identifying Nonprecipitating Echoes in Radar Scans. ***Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*** 23,1157–1180.

Burgess, D. W., Crum, T. D., y Vogt, R. J. .2008. Impacts of wind farms on WSR-88D radars. in 24th International ***Conference on IIPS for Meteorology, Oceanography, and Hydrology***. Cairns, Australia: Amer. Meteor. Soc., 2008.

Cassiraga, E. F., J.J. Gómez-Hernández, M. Berenguer, and D. Sempere-Torres, 2020: Spatiotemporal precipitation estimation from rain gauges and meteorological radar using geostatistics, ***Mathematiocal Geoscience***. https://doi.org/10.1007/s11004-020-09882-1

Corral, C., Velasco, D., Forcadell, D., y Sempere-Torres, D., 2009. Advances in radar-based flood warning systems. The EHIMI system and the experience in the Besòs flash-flood pilot basin. ***Flood Risk Management: Research and Practice***, P. Samuels, Ed.

Cho, Y. H., Lee, G., Kim, K. E. y Zawadzki, I. 2006. Identification and removal of ground echoes and anomalous propagation using the characteristics of radar echoes. ***Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*** 23**,** 1206-1222.

Delrieu, G., J. D. Creutin, and H. Andrieu, 1995: Simulation of Radar Mountain Returns Using a Digitized Terrain Model. ***Journal of Atmospheric and Oceanic Technology***, 12**,** 1038-1049.

Department of Defense, 2006. Report to the Congressional Defense Committees, The Effect of Windmill Farms on Military Readiness, ***Informe Técnico***. 62 pp.

Doviak RJ, Zrnic DS (1993) ***Doppler radar and weather observations***. Academic Press, New York, 562 pp

Dufton, D. R. L. and Collier, C. G., 2015: Fuzzy logic filtering of radar reflectivity to remove non-meteorological echoes using dual polarization radar moments. ***Atmos. Meas. Tech.***, 8: 3985–4000, doi:10.5194/amt-8-3985-2015.

Franco, M., 2008. Estimación cuantitativa de la lluvia mediante radar meteorológico. Corrección del error asociado a la variación vertical de la reflectividad. ***Tesis Doctoral***. Universitat Politècnica de Catalunya, 254pp.

Franco, M., Sánchez-Diezma, R., Sempere-Torres, D., 2006. Improvements in weather radar rain rate estimates using a method for identifying the vertical profile of reflectivity from volume radar scans. ***Meteorol. Z.*** 15, 521–536.

Gallardo-Hernando, B., Munoz-Ferreras, J., Perez-Martinez, F., y Aguado-Encabo, F., 2011. Wind turbine clutter observations and theoretical validation for meteorological radar applications**.** ***Radar, Sonar Navigation, IET***, 5, 111 –117.

Gallardo-Hernando, B., Pérez, F., y Aguado, F., 2008. Characterization Approach of Wind Turbine Clutter in the Spanish Weather Radar Network. En ***Preprints Of The 7th European Conference On Radar In Meteorology And Hydrology***.

Giuli, D., M. Gherardelli, A. Freni, T. A. Seliga, y K. Aydin, 1991. Rainfall and clutter discrimination by means of dual-linear polarization radar measurements. ***Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*** 8**,** 777-789.

Gourley, J. J., P. Tabary, y J. Parent du Chatelet, 2007. A Fuzzy Logic Algorithm for the Separation of Precipitating from Nonprecipitating Echoes Using Polarimetric Radar Observations. ***Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*** 24**,** 1439-1451.

Greving, G. y Biermann, W.D., 2008. Application of the radar cross section RCS for objects on the ground—Example of wind turbines. En ***Proceedings International Radar Symposium***, páginas 1–4.

Hall, W., Rico-Ramirez, M. A., Krämer, S. 2017. Offshore wind turbine clutter characteristics and identification in operational C-band weather radar measurements. Q. J. R. Meteorol. Soc. 143: 720–730. DOI:10.1002/qj.2959

Haase, G., Johnson, D., y Eriksson, K.Å., 2010. Analyzing the impact of wind turbines on operational weather radar products. En ***The Sixth European Conference On Radar In Meteorology And Hydrology***. Sibiu, Rumania.

Hood, K., Torres, S., y Palmer, R., 2010. Automatic detection of wind turbine clutter for weather radars. ***Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*** 27, 1868–1880.

Hubbert, J. C., M. Dixon, y S. M. Ellis, 2009. Weather Radar Ground Clutter. Part II: Real-Time Identification and Filtering. ***Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*** 26**,** 1181.

IDAE, 2010. ***Plan de acción nacional de energías renovables de España (PANER) 2011 - 2020***. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España, 173 páginas.

Isom, B.M., Palmer, R., Secrest, G., Rhoton, R., Saxion, D., Allmon, T.L., Reed, J., Crum, T., y Vogt, R., 2011. Detailed observations of wind turbine clutter with scanning weather radars. ***Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*** 26, 894–910. doi: 10.1175/2008JTECHA1136.1.

Keränen, R.; Alku, L. C.; Pettazzi, A. and Salsón, S. 2014. Weather Radar and Abundant Wind Farming – Impacts on Data Quality and Mitigation by Doppler Dual-Polarization. Proceedings of the **8th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology**. Garmisch-Partenkirchen, Germany. https://pdfs.semanticscholar.org/f3a5/74bb4ae3067e95b56375c180857ef62064e0.pdf

Kong, F., Zhang, Y., Palmer, R., y Bai;, Y., 2011. Wind turbine angular velocity estimation using polarimetry . En IEEE, editor, 1***3th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2019***

Kladogenis, C., Driessen, H., Krasnov, O. A., and Yarovoy, A. 2019. Wind turbine angular velocity estimation using polarimetry. In ***IEEE 13th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2019 (pp. 1-4).***

Kong, F., Zhang, Y., Palmer, R., y Bai;, Y., 2011. Wind Turbine radar signature characterization by laboratory measurements. En IEEE, editor, ***Radar***

Conference (RADAR), páginas 162–166.

Letson F. W., Barthelmie R. J. and Pryor S. C. 2020. RADAR-derived precipitation climatology for wind turbine blade leading edge erosion. ***Wind Energy Science***, 5: 331-347. DOI:10.5194/wes-5-331-2020

Lok, Y.F., Wang, J., y Palevsky, A., 2010. Simulation of radar signal on wind turbine. ***Radar Conference, IEEE*** , páginas 538-543.

Moisseev, D. N. y V. Chandrasekar, 2009. Polarimetric Spectral Filter for Adaptive Clutter and Noise Suppression. ***Journal of Atmospheric and Oceanic Technology***, 26**,** 215.

Nai, F., Palmer, R., y Torres, S., 2011. Range-Doppler domain signal processing to mitigate wind turbine clutter. En IEEE, editor, ***Radar Conference (RADAR)***. páginas 841–845.

National Weather Service, 2010. ***JetStream Max - online school for weather*** - volume coverage pattern. [Online]. En: http: //www.srh.noaa.gov/jetstream/doppler/vcp max.html

New, C., y Lavell-Smith, A., 2010. Method for mitigating the effects of clutter and inteference on a radar system. Patent number: WO 2010/067057 A2. Filled in December 8 2009 and Issued in 17 June 2010

Norin, L., 2017. Wind turbine impact on operational weather radar I/Q data: characterisation and filtering, ***Atmos. Meas. Tech.***, 10, 1739–1753.

Nuss, W. A., y D. W. Titley, 1994. Use of multiquadric interpolation for meteorological objective analysis. ***Monthly Weather Review*** 122, 1611–1631.

Palmer, R., Le, K., y Isom, B., 2008. Wind Turbine Clutter Mitigation using Fully Adaptive Arrays. En ***Proceeding of the 5th European Radar Conference***. páginas 356–359.

Palmer, R., S. Torres, y R. Zhang, 2008. Characterization, Detection, and Mitigating Wind Turbine Clutter on the WSR- 88D Network. ***Briefing to the NEXRAD Technical Advisory Committee Meeting***, Sept 2008, En: http://arrc.ou.edu/~rpalmer/ppt/TACMeeting_WTC_Palmer.pdf

Pinto, J., Matthews, J., y Sarno, G., 2010. Stealth technology for wind turbines. ***Radar, Sonar and Navigation, IET***, 4, 126–133.

QinetiQ Ltd, 2003. Report to the United Kingdom's Department of Trade and Industry, Wind Farm Impacts on Radar Aviation Interests—Final Report, Report W/14/00614/00/REP, 86 páginas.

REE, 2011. La energía eólica, primera fuente de electricidad en el mes de marzo. http://www.ree.es/sala_prensa/web/notas_detalle.aspx?id_nota=215.

REE, 2018. Las energías renovables en el sistema eléctrico español (2018). REE. https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/Renovables-2018.pdf.

REE, 2021. *El Sistema Eléctrico Español 2020*. Red Eléctrica de España, 100 páginas.

REE, 2021. Las energías renovables en el sistema eléctrico español (2020). REE. https://www.ree.es/sites/default/files/publication/2021/06/downloadable/informe_renovables_2020_0.pdf

ROC, GIS Methods for Evaluating Wind Turbine Impacts on NEXRAD. En http://www.roc.noaa.gov/WSR88D/WindFarm/GIS.aspx?wid=dev

ROC, How Rotating Wind Turbine Blades Impact The Nexrad Doppler Weather Radar. http://www.roc.noaa.gov/WSR88D/WindFarm/TurbinesImpactOn.aspx?wid=dev

ROC, How The Roc Analyses Wind Turbine Siting Proposals. En http://www.roc.noaa.gov/WSR88D/WindFarm/Analyses.aspx?wid=dev

ROC, Nexrad Program Efforts To Mitigate Turbine Clutter. En http://www.roc.noaa.gov/WSR88D/WindFarm/Efforts.aspx?wid=usr

ROC, Possible Wind Turbine Clutter (WTC) Mitigation Actions For Developers. En http://www.roc.noaa.gov/WSR88D/WindFarm/Actions.aspx?wid=dev

ROC, Possible Wtc Mitigation Actions For Radar Users/Operators. En http://www.roc.noaa.gov/WSR88D/WindFarm/Mitigate_Operators.aspx?wid=usr

Royal Air Force, 1994. Study Into the Effects of Wind Turbines On Radar Performance, Signals Engineering Establishment. ***Informe Técnico*** 94010

Royal Air Force, 2005. Further Evidence of the Effects of Wind Turbine Farms on AD RADARS, Air Warfare Center, Royal Air Force. ***Informe Técnico***.

Royal Air Force, 2005. The Effects of Wind Turbine Farms on AD RADARS, Air Warfare Center, Royal Air Force. ***Informe Técnico.***

Ryzhkov, A. V. y D. S. Zrnic, 1998. Polarimetric Rainfall Estimation in the Presence of Anomalous Propagation. ***Journal of Atmospheric and Oceanic Technology***, 15**,** 1320-1330.

Sánchez-Diezma, R., 2001: Optimización de la medida de lluvia por radar meteorológico para su aplicación hidrológica, ***Ph.D. Thesis***. Universitat Politècnica de Catalunya, 313pp.

Sánchez-Diezma, R., Sempere-Torres, D., Delrieu, G., y Zawadzki, I., 2001. An improved methodology for ground clutter substitution based on a pre-classificatioin of precipitation types. En ***30th International Conference on Radar Meteorology*** *Munich, Germany*. American Meteorological Society, páginas 271–273.

Schiemann, R., Erdin, R., Willi, M., Frei, C., Berenguer, M. y Sempere-Torres, D., 2011. Geostatistical radar-raingauge combination with nonparametric correlograms: methodological considerations and application in Switzerland. **Hydrology and Earth System Sciences**, 15: 1515-1536.

Sempere-Torres, D., Berenguer, M., Patazzi, A. y Salsón, S., 2012. Towards wind farms and meteorological radar coexistence: guidelines for mitigating impacts and examples of operational corrections, Proceedings of the ***7th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology***. Toulouse, France.

Sempere-Torres, D., Berenguer, M. y Zawadzki, I. 2013. Coexistence of meteorological radars and wind farms: successful operational stories, Proceedings of the **36th *Conference on Radar Meteorology***. Breckenridge (CO) USA. https://ams.confex.com/ams/36Radar/webprogram/Paper228928.html.

Sempere Torres, D., Porrà, J.M. y Creutin, J.D. 1994. A general formulation for rain Drop Size Distribution. ***Journal of Applied Meteorology***, 33: 1494-1502.

Seltmann, J., Lang, P., Stephan, K., y Hengstebeck, T., 2010. Impact of wind turbines on radar measurements and tracking processes. ***Informe técnico***, Internal study commissioned by TI.

Seo, B., Krajewski, W. F. y Mishra, K. V., 2015. Using the new dual-polarimetric capability ofWSR-88D to eliminate anomalous propagation and wind turbine effects in radar-rainfall. ***Atmospheric Research***, 153**,** 296-309.

Siggia, A. D. y Passarelli, R. E. Jr., "Gaussian model adaptive processing (GMAP) for improved ground clutter cancellation and moment calculation," in ***Proceedings of The 3rd European Conference on Radar Meteorology, ERAD 2004*** , páginas 67–73.

Tristant, P. 2006. Radio Frequency threats on meteorological radars operations. ***Proceedings of the European Conference On Radar In Meteorology And Hydrology***. Barcelona, España, 2006.

Tristant, P. (2006). Impact of wind turbines on weather radars band. *World Meteorological Organization, CBS/SG-RFC*.

Unal, C., 2009. Spectral polarimetric radar clutter suppression to enhance atmospheric

echoes, ***Journal of Atmospheric and Oceanic Technology***, 26, 1781–1797.

Uysal, F., Selesnick, I., Isom, B. M. 2016. Mitigation of Wind Turbine Clutter for Weather Radar by Signal. ***IEEE Transactions on geoscience and remote sensing***, 54 (5): 2925-2934.

Vaisala, 2017. User's manual: RVP900 digital receiver and signal processor, 513 pp.

Velasco-Forero, C. A., Sempere-Torres, D., Cassiraga, E. F. and Jaime Gómez-Hernández, J. 2009: A non-parametric automatic blending methodology to estimate rainfall fields from rain gauge and radar data. **Advances in Water Resources**, 32(7): 986-1002. DOI:10.1016/j.advwatres.2008.10.004.

Vogt, R. J., J. R. Reed, T. Crum, J. T. Snow, R. Palmer, B. Isom, y D. W. Burgess, 2007. Impacts of Wind Farms on WSR-88D Operations and Policy Considerations. ***Preprints, 23rd Int. Conf. on Interactive Information Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology***, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc., Paper 5B.7.

Vogt, R. J., T. Crum, J. R. Reed, C. A. Ray, J. Chrisman, R. Palmer, B. Isom, D. Burgess, y M. Paese 2007: Weather Radars and Wind Farms – Working Together for Mutual Benefit. ***Preprints, WINDPOWER 2007***, American Wind Energy Association Conference and Exhibition, Los Angeles, CA.

Vogt, R. J., T. D. Crum, J. B. Sandifer, E. J. Ciardi, y R. Guenther, 2009. A way forward wind farm - weather radar coexistence. ***Preprints WINDPOWER 2009***, American Wind Energy Association Conference and Exhibition, Chicago, IL.

Vogt, R. J., T. D. Crum, J. B. Sandifer, R. Steadham, T.L. Allmon, G. Secrest, E.J. Ciardi, R. Guenther, y R. Palmer, 2009. Continued Progress in Assessing and Mitigating Wind Farm Impacts on WSR-88Ds. ***Preprints, 25th Int. Conf. on Interactive Information Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology,*** Phoenix, AZ, Amer. Meteor. Soc., Paper 11B.6.

Vogt, R. J., T. D. Crum, W. Greenwood, E.J. Ciardi, y R.G. Guenther, 2011. New Criteria for Evaluating Wind Turbine Impacts on NEXRAD Radars. ***Preprints, WINDPOWER 2011***, American Wind Energy Association Conference and Exhibition, Anaheim, CA.

Vogt, R. J., T. D. Crum, W. Greenwood, E.J. Ciardi, y R.G. Guenther, 2011. Recent Efforts to Improve Estimates of and Mitigation of Wind Turbine Clutter Impacts on the WSR-88D. ***Preprints, 27th Int. Conf. on Interactive Information Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology***, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc., Paper 3A.1.

Vogt, R.J., T. D. Crum, E.J. Ciardi, R.G. Guenther, y W.H. Greenwood, 2010. How NEXRAD Weather Radar Data Can Benefit the Wind Energy Industry. ***Preprints, WINDPOWER 2010***, American Wind Energy Association Conference and Exhibition, Dallas, TX.

Ye, B.-Y., G. Lee, and H.-M. Park, 2015: Identification and removal of non-meteorological echoes in dualpolarization radar data based on a fuzzy logic algorithm. ***Adv. Atmos. Sci.***, 32(9), 1217–1230, doi: 10.1007/s00376-015-4092-0.

Zawadzki, I. and G. Lee, 2004: The physical causes of the variability of drop size distributions. ***Preprints 14th International Conference on Clouds and Precipitation***, 698-701.

Zhang, Y., Huston, A., Palmer, R.D., Albertson, R., Kong, F., y Wang, S., 2011. Using Scaled Models for Wind Turbine EM Scattering Characterization: Techniques and Experiments. ***IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*** 60, 1298–1306.