

# LA MEDIDA DEL RECURSO EÓLICO

**Jornada Formativa DESARROLLO DE PROYECTOS DE ENERGÍA EÓLICA - AEE**

**Marcos Blanco**

24 Abril 2025



# Repsol hoy

**25.000** empleados

Activos  
de compañía  
en  
**+20** países

**24 M** de clientes

**9,3 M**  
de clientes digitales



## Upstream

**571.000** bep/d

de producción media  
Proyectos en **12 países**  
en áreas geográficas clave

## Industrial

**7** complejos  
industriales  
en España, Portugal y Perú

**1ª** Planta de  
combustibles  
**100% renovables**  
a escala industrial  
en la Península Ibérica

## Renovables

Proyectos en España,  
Estados Unidos y Chile

**~3.700 MW**  
en operación

## Tecnología y digitalización

**+800** iniciativas  
de digitalización

**250** proyectos  
tecnológicos  
en Repsol Technology Lab

## Cliente

**+4.500**  
estaciones  
de servicio

en España, Portugal,  
Perú y México



**+840**

estaciones de servicio  
suministran combustibles  
100% renovables

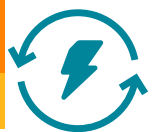
**2.800**

puntos públicos de  
recarga eléctrica instalados  
en España



**2,5 M**

de clientes  
de electricidad y gas



## Generación Baja en Carbono

Estamos construyendo una cartera de generación renovable diversificada desde el punto de vista geográfico, con presencia principalmente en **España, Estados Unidos y Chile**.

**3.659 MW**

Capacidad renovable instalada

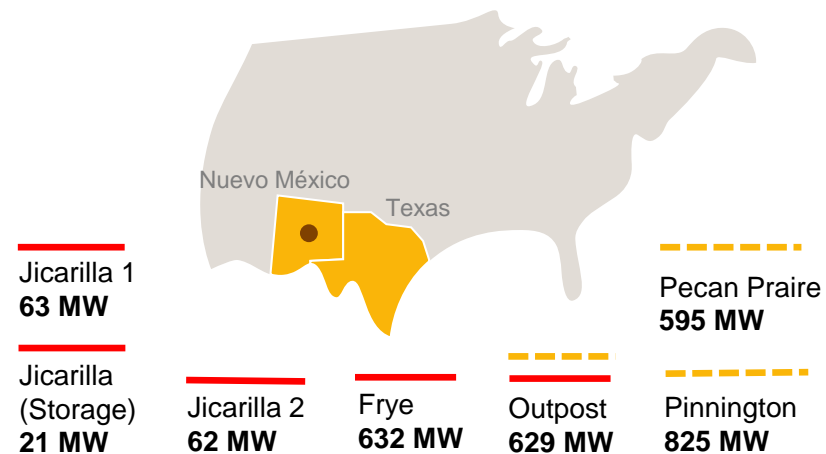
**3.106 MW**

Capacidad renovable en desarrollo

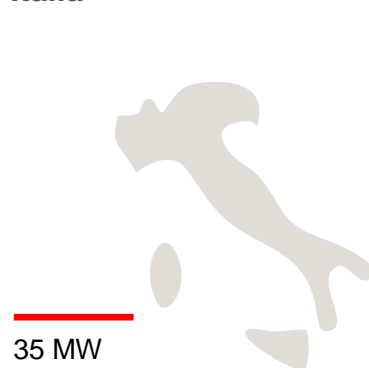
**9-10 GW**

Capacidad renovable instalada en 2027

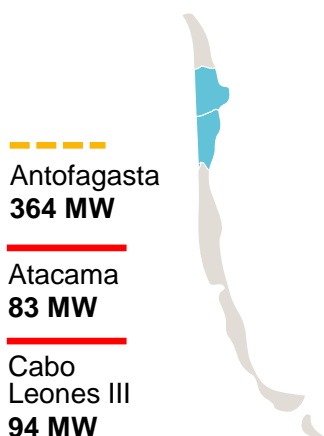
### Estados Unidos



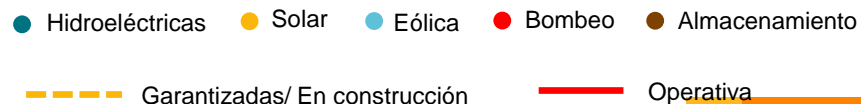
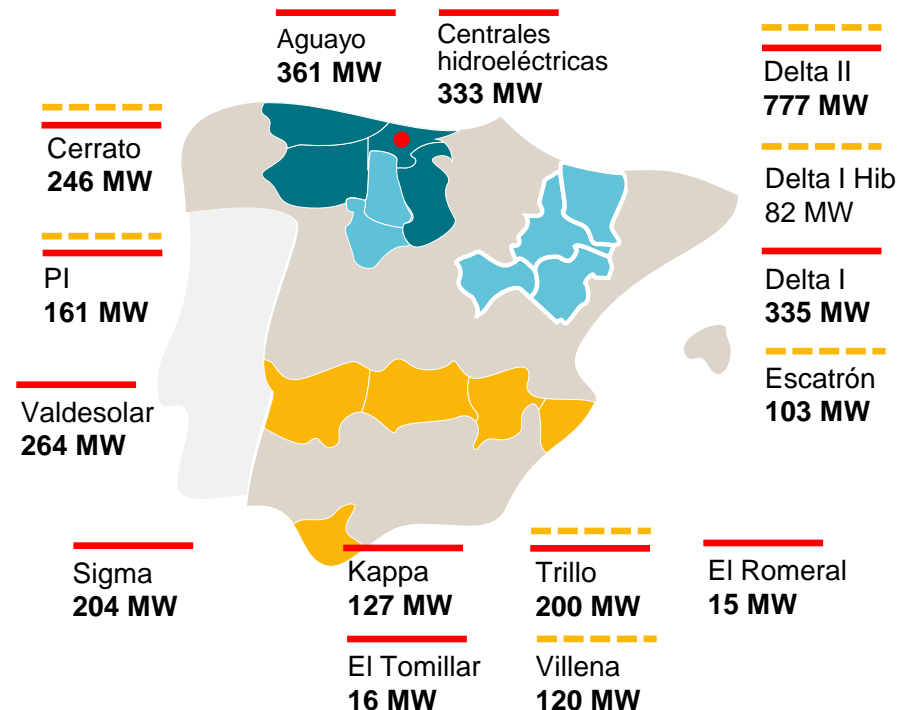
### Italia



### Chile



### España



# Contenidos

---

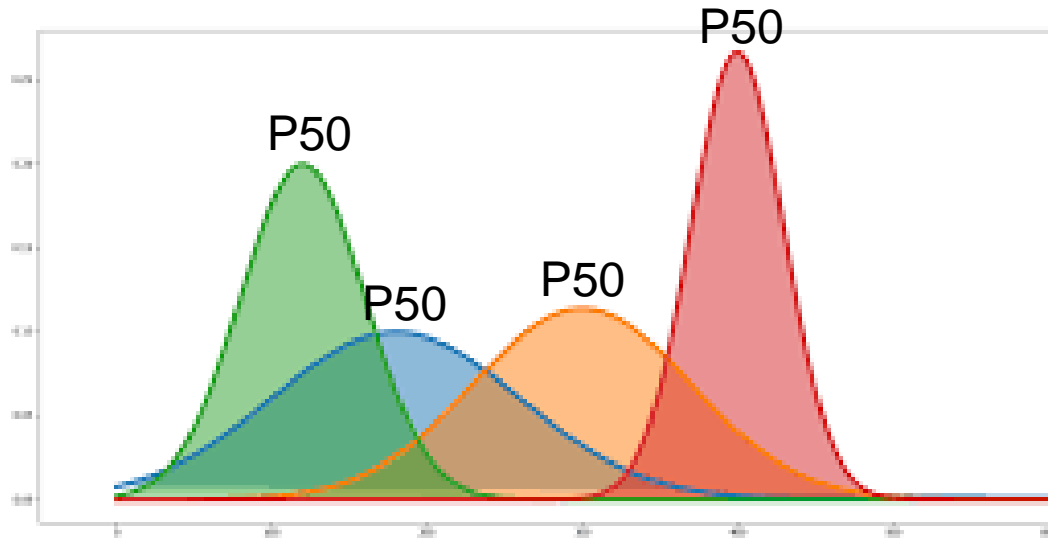
- Objetivo de la medida del recurso eólico
- Herramientas para cada fase de proyecto
  - Prospección
  - Desarrollo
  - Operación
- Conclusiones

# Objetivo de la medida de recurso eólico

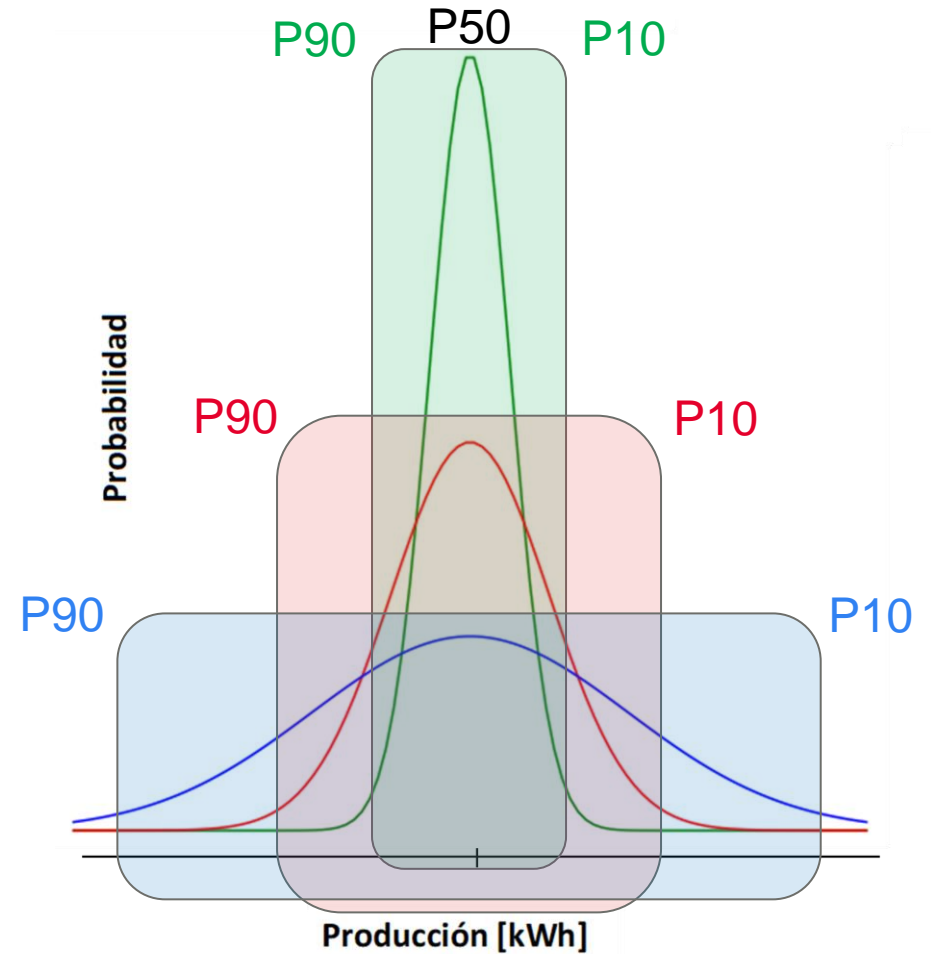
- **Estimar la producción esperada en un parque eólico con la mayor precisión posible...**

Sensibilidad	Cambio	TIR de Proyecto		Cambio	Comentarios
Producción	-10%	-3,8%	4,0%	+10%	Cambio del P50
Capex	+10%	-2,0%	2,9%	-10%	Cambio del CAPEX
Pool price	-10%	-1,7%	2,0%	+10%	Cambio del precio anual del pool

# Objetivo de la medida de recurso eólico



- ... y reducir la incertidumbre del cálculo de producción



# Objetivo de la medida de recurso eólico

- Otros objetivos o **usos importantes** de una buena medida del recurso eólico son:
  - **Optimización** del proyecto (micrositing, reducción estelas, etc.) ✓
  - **Validación** de la turbina por el fabricante ✓
  - Estimación de **pérdidas específicas**. ✓
    - Wind Sector Management
    - Avifauna, quirópteros...
  - Análisis de **perfiles** de generación (12x24, 8760, hibridaciones...) ✓

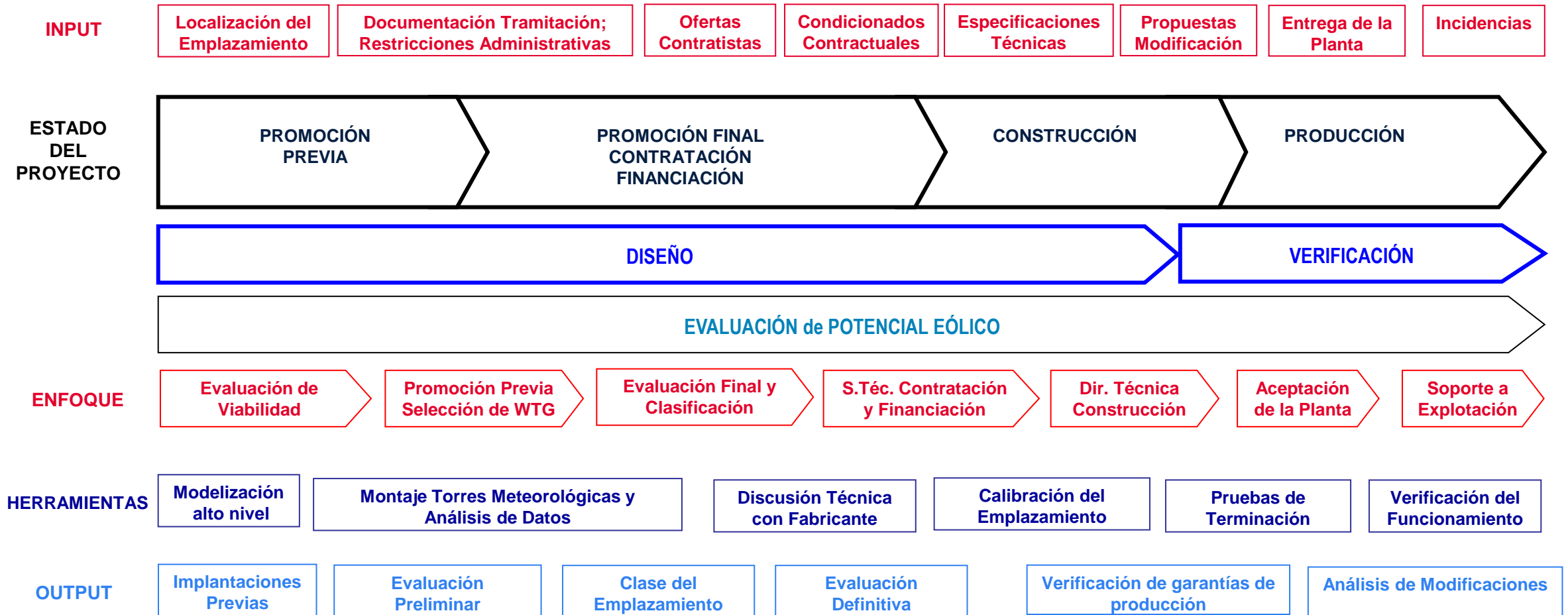
# Enfoque para cada fase de proyecto

Dependiendo de la fase del Proyecto en la que nos encontremos, tendremos **diferentes necesidades de información** y también diferentes **presupuestos** y en base a eso podremos abordar el análisis de recurso desde **diferentes enfoques**.



El departamento de recurso está involucrado en todas las fases de desarrollo del Proyecto, desde la prospección a la operación de los parques.



# Enfoque para cada fase de proyecto

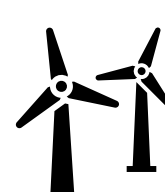
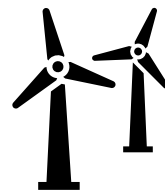
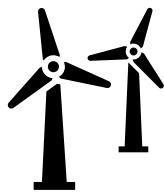


# Prospección o Promoción inicial

En esta fase del proyecto lo que se busca es tener una **estimación preliminar** de si el proyecto puede ser **viable o no**.  



Se hace un **análisis de alto nivel**, con información de mapas de Viento, usando la mesoescala o reanálisis y en muchos casos de manera **relativa** entre emplazamientos.

Se realiza también una **implantación preliminar** para estimar la potencial **capacidad (MW o número de aerogeneradores)** del emplazamiento (para ello es necesario conocer la rosa de viento).

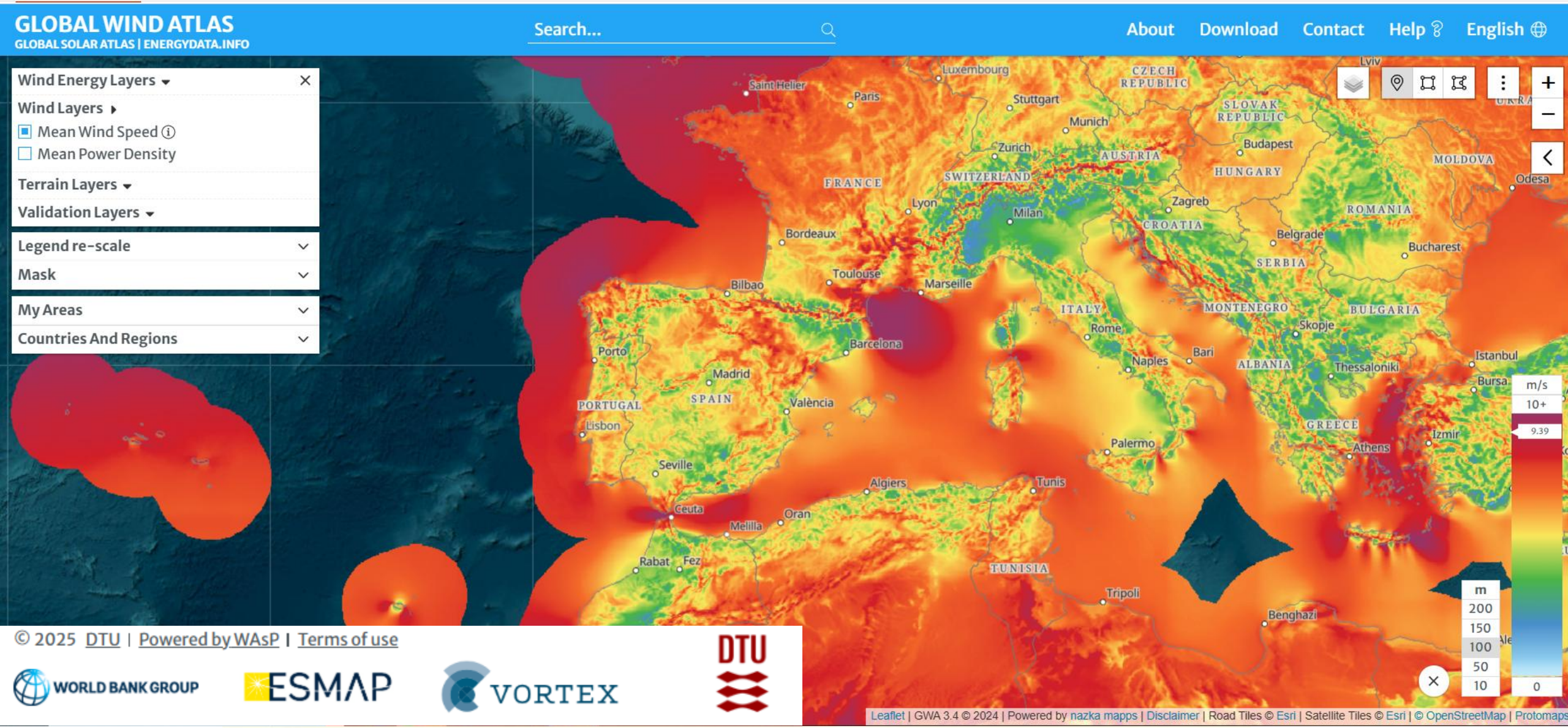


# Prospección o Promoción inicial

Las “herramientas” que se pueden usar en esta fase del proyecto son:

- **MAPAS DE VIENTO**
  - NEWA (New European Wind Atlas): <https://map.neweuropeanwindatlas.eu/>
  - GLOBAL WIND ATLAS: <https://globalwindatlas.info/en/>
  - Otros proveedores (con mayor o menor grado de resolución, de precisión y de coste)
- **DATOS DE REANÁLISIS** (ERA5, MERRA2, CFSR,...) 
- **INFORMACIÓN GEOGRÁFICA** (elevación, restricciones, rugosidad...) 

# Prospección o Promoción inicial



# Prospección o Promoción inicial

## VENTAJAS

- ✓ **FACILIDAD DE ACCESO** A LAS FUENTES
- ✓ **RAPIDEZ** DE ACCESO A LAS FUENTES
- ✓ **COSTE** DE LAS FUENTES
- ✓ POSIBILIDAD DE COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES FUENTES
- ✓ **ROSA DE VIENTOS** REPRESENTATIVA (de forma general)

## INCONVENIENTES

- ✓ **ALTA INCERTIDUMBRE** EN EL VALOR DE LA VELOCIDAD DE VIENTO (**hasta >20%**)
- ✓ **DISPERSIÓN** DE LOS RESULTADOS POR ZONA O POR CARACTERÍSTICAS DEL EMPLAZAMIENTO
- ✓ FALTA DE INFORMACIÓN DETALLADA (intensidad de turbulencia, inflow angle, perfiles de generación, etc.)

# Promoción avanzada - Desarrollo

En esta fase del proyecto lo que se busca es tener una **estimación precisa** de la **producción** esperada para apoyar el cálculo de **rentabilidad** del proyecto así como de su configuración final. El objetivo es poder llevar el proyecto a una **decisión** de inversión (FID).

Se hace un **análisis de detalle**, con **información medida** en el emplazamiento apoyada por datos de reanálisis (ajuste de largo plazo).

Se realiza un **diseño de la campaña de medida** necesaria para el emplazamiento: número de equipos de medida y ubicación. El objetivo es que sea **lo más representativa posible**.

# Diseño de la campana de medida

La identificación de los lugares de medida deberá realizarse orientada a la reducción de incertidumbres atendiendo ciertos criterios:

- El número de estaciones meteorológicas dependerá de la **disparidad de tipologías del terreno** (complejo, simple, etc.) Este número se verá incrementado de forma que permitan reducir las incertidumbres provenientes de elementos singulares, de proximidad de zonas costeras, o lugares donde las condiciones de estabilidad atmosférica pueda introducir singularidades.
- La instalación de, al menos **un par**, de estaciones meteorológicas se hace imprescindible **en terreno complejo**, siendo recomendable en terrenos de suaves pendientes.
- Las estaciones meteorológicas deberán disponer de varios **anemómetros** a diferentes alturas, **veletas** (al menos dos), **termómetro** y **barómetro** (al menos uno de cada por zona).
- Deben seleccionarse las ubicaciones de los equipos de medición para que sean **lo más representativos posible del viento en el parque**. Bien expuestos, pero ni en la mejor zona ni en la peor. Buscar que todas las posiciones de las turbinas estén dentro de un radio de **3km** de la torre.

# Campaña de medida - Torres



Celosía  
Arriostrada



Celosía  
Autosoportada



Tubular  
Arriostrada

# Campaña de medida – Torres. Consideraciones.

- Diseño de la configuración de la torre:
  - Orientación: minimizar interferencia de la torre y ajustar vientos al terreno.
  - Alturas de medida: al menos 2/3 de la altura de buje, y a varios niveles para tener el perfil vertical (shear) bien definido
  - Redundancia de sensores: al menos los niveles top de anemómetros y las veletas
- Permisología: proyecto (visado), licencia de obra al ayuntamiento, servidumbre aeronáutica (AESA)
  - **<100m** No necesario permiso de AESA
  - **≥ 100m** Necesario permiso de AESA

# Campaña de medida - Sensores

Veleta



Termómetro



Barómetro



Termohigrómetro



Anemómetro



Ejemplos de Registrador



# Campaña de medida - LiDAR

## LIDAR (Light Detection And Ranging)

- Sistema de medida remota para medición de velocidad y dirección de viento
- Envía pulsos de luz láser a través de la atmósfera y detecta la luz reflejada por el polvo y otras pequeñas partículas en el aire, llamadas aerosoles, se puede obtener:
  - Velocidad y dirección de viento a muchas alturas diferentes

▶ Perfil vertical



### VENTAJAS

- ✓ FACILIDAD Y RAPIDEZ DE INSTALACIÓN
- ✓ MUCHAS ALTURAS AL MISMO TIEMPO
- ✓ COSTE (dependiendo del tiempo de campaña)

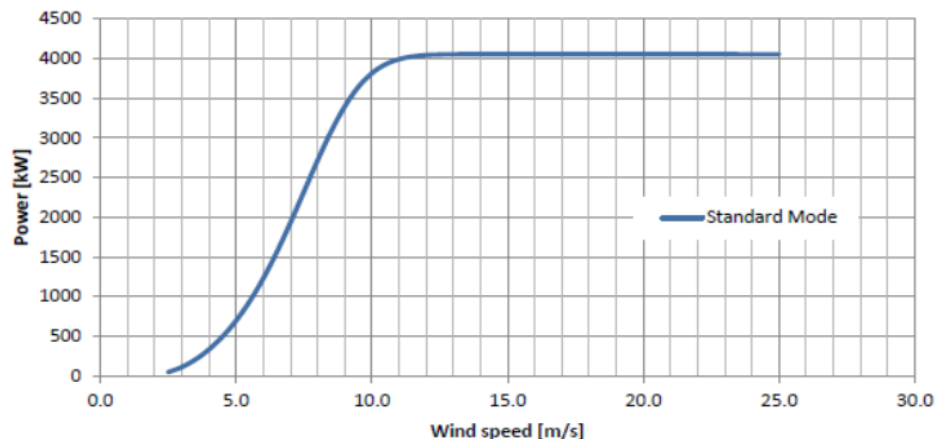
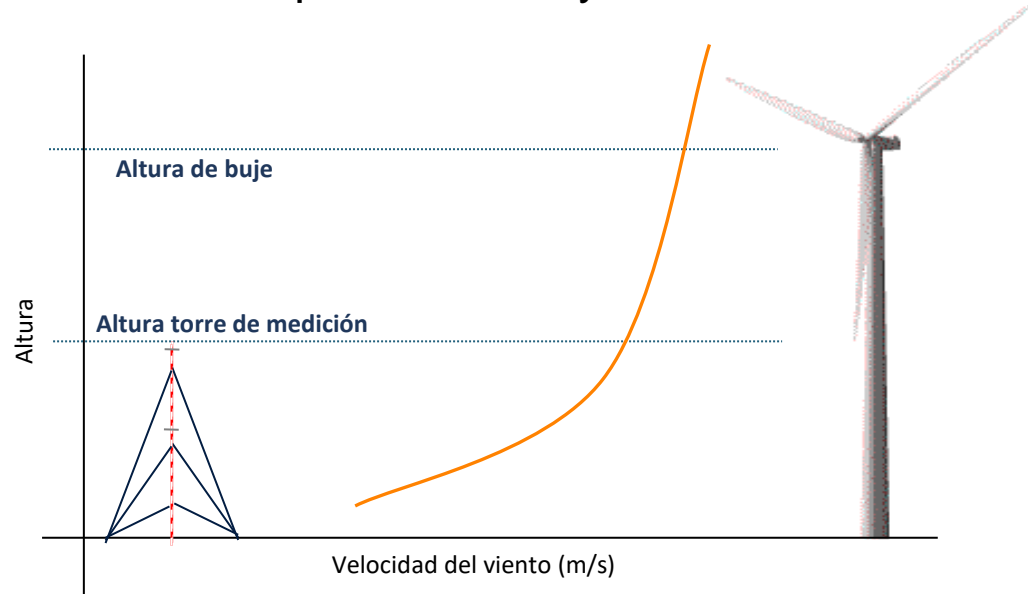
### INCONVENIENTES

- X MEDIDA DE VARIABLES ADICIONALES (IT, INFLOW,)
- X PRECISIÓN Y DISPONIBILIDAD
- X BANCABILIDAD



# Campaña de medida - PERFIL VERTICAL

Es **IMPRESCINDIBLE** medir a diferentes alturas (y cuanto más cercano a la potencial altura de buje, mejor) para poder definir el perfil vertical y así conocer la velocidad a la altura de buje:



	Velocidad (m/s)	
ALTURA	Torre 1	Torre 2
30 metros	5.6	5.3
60 metros	6.0	6.0
Alpha	0.10	0.18
120 metros	6.43	6.79

1 m/s = 3.6 km/h

0.36 m/s = 1.3 km/h

Diferencia en producción para una TURBINA de 4 MW a 120m:

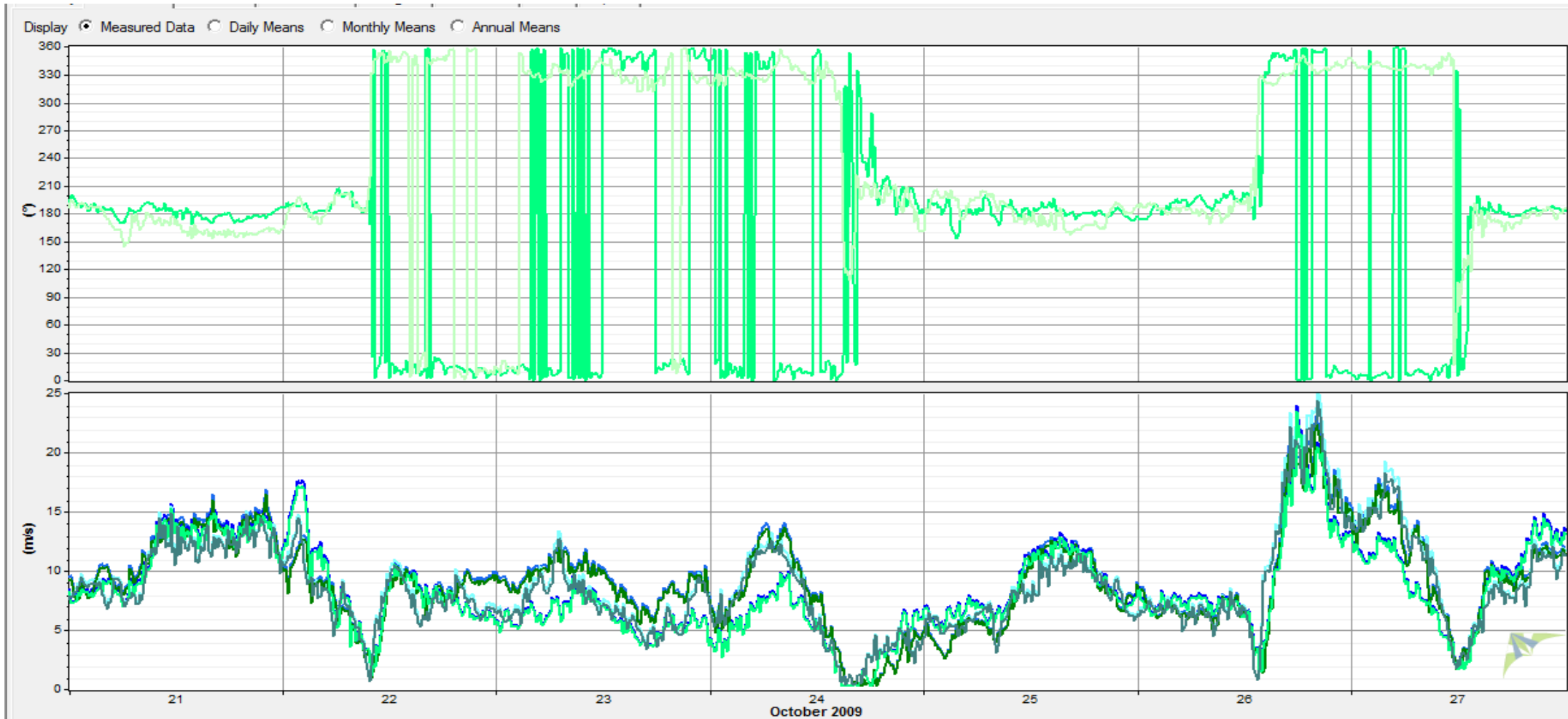
	Torre 1	Torre 2
NEH	3353	3601
MWh/Año	14084	15125



**La Torre 2  
produce un 7.5%  
más de energía**

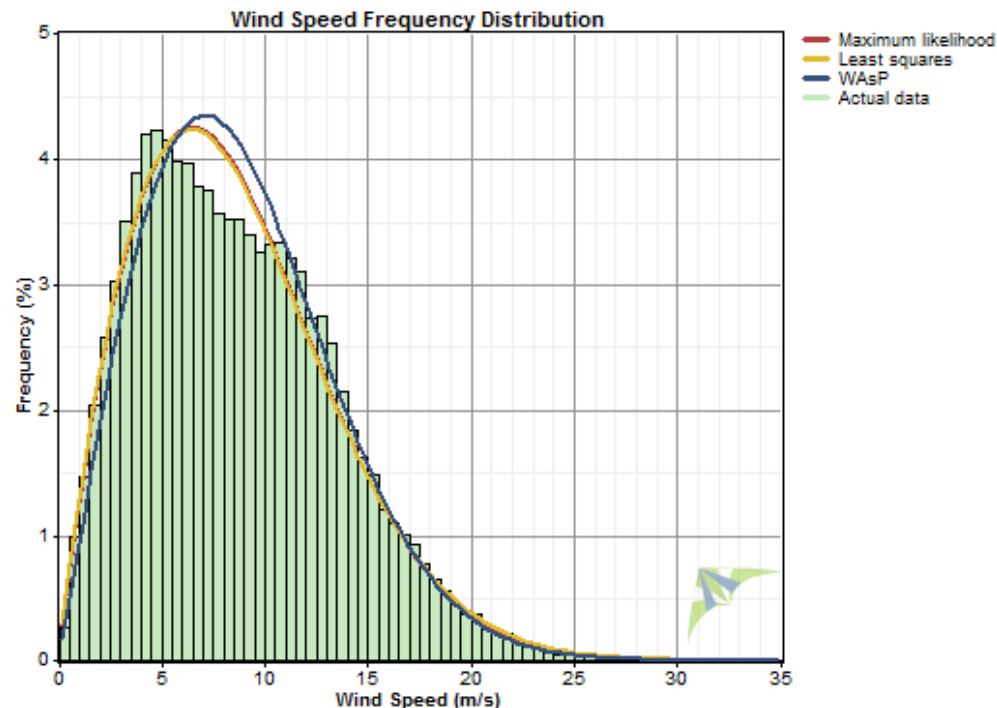
# Campaña de medida - Tratamiento de Datos

Es necesario realizar una transformación de los datos brutos recogidos y un posterior control de calidad y procesado de los mismos (relleno de huecos, extrapolación vertical, ajuste de largo plazo)

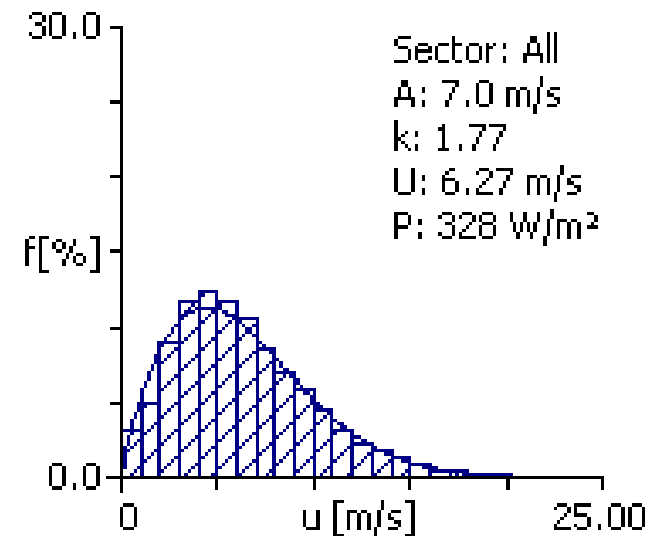


# Campaña de medida - INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

La variación del viento en un emplazamiento típico suele describirse utilizando la llamada **Distribución de Weibull** (la distribución de Rayleigh es un caso particular de esta distribución, con un factor de forma  $k=2$ ). La frecuencia de aparición de valores de velocidad de viento (en el histograma, por cada bin 0.5 m/s).

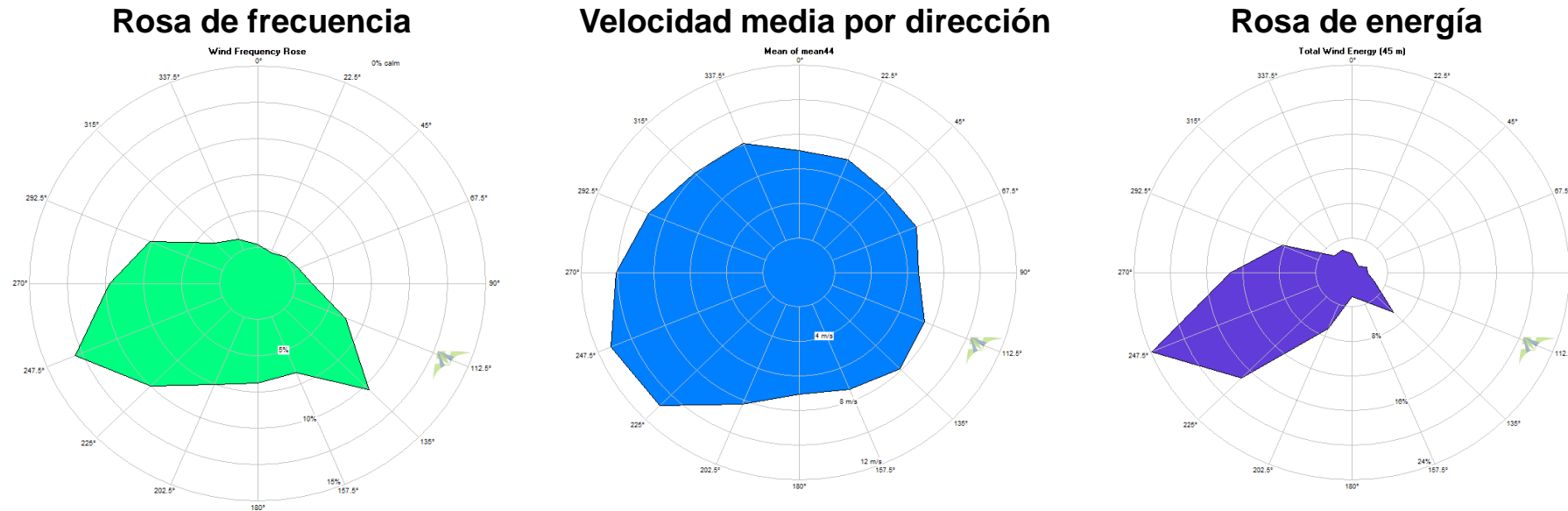


$$F(x, A, k) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k}$$



# Campaña de medida - INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

Se representa la frecuencia de las diferentes direcciones de viento por sectores.



Lo que nos interesa es **capturar la mayor cantidad de energía posible**, por lo que nos fijaremos siempre en la rosa de energía para el diseño del parque (layout). Se ve más **marcada la rosa de energía** (la energía varía con el cubo de la velocidad).

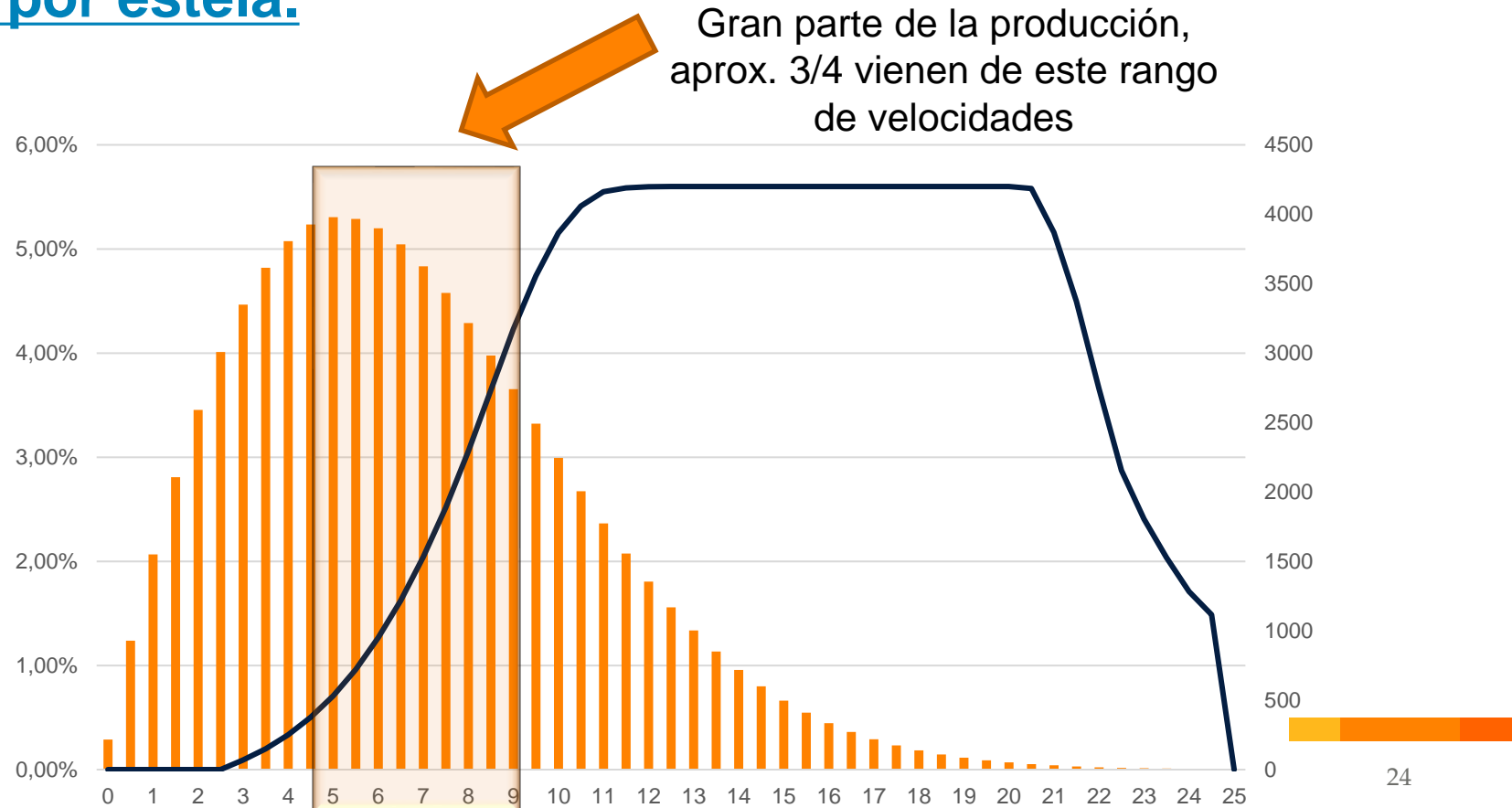
$$P_x = \frac{1}{2} \rho V_x^3 \frac{\pi D_x^2}{4}$$

# MODELIZACIÓN DEL RECURSO

Una vez que tenemos los datos listos para ser usados, los utilizaremos como punto de inicio del modelo de viento para realizar la extrapolación horizontal (llevar el viento desde la torre a cada posición de turbina) y el cálculo de producción y de pérdidas por estela.

Cálculo de producción a partir de la distribución de frecuencias

El procedimiento básico consiste en **cruzar la frecuencia de velocidades con la curva de potencia** de la máquina



# MODELIZACIÓN DEL RECURSO

## TIPOS DE HERRAMIENTAS DE MODELIZACIÓN DE RECURSO EÓLICO

### Modelos lineales

- WAsP
- WindPro
- WindFarmer
- Openwind
- Furow

Más sencillos  
Más rápidos  
Menor  
necesidad de  
cálculo

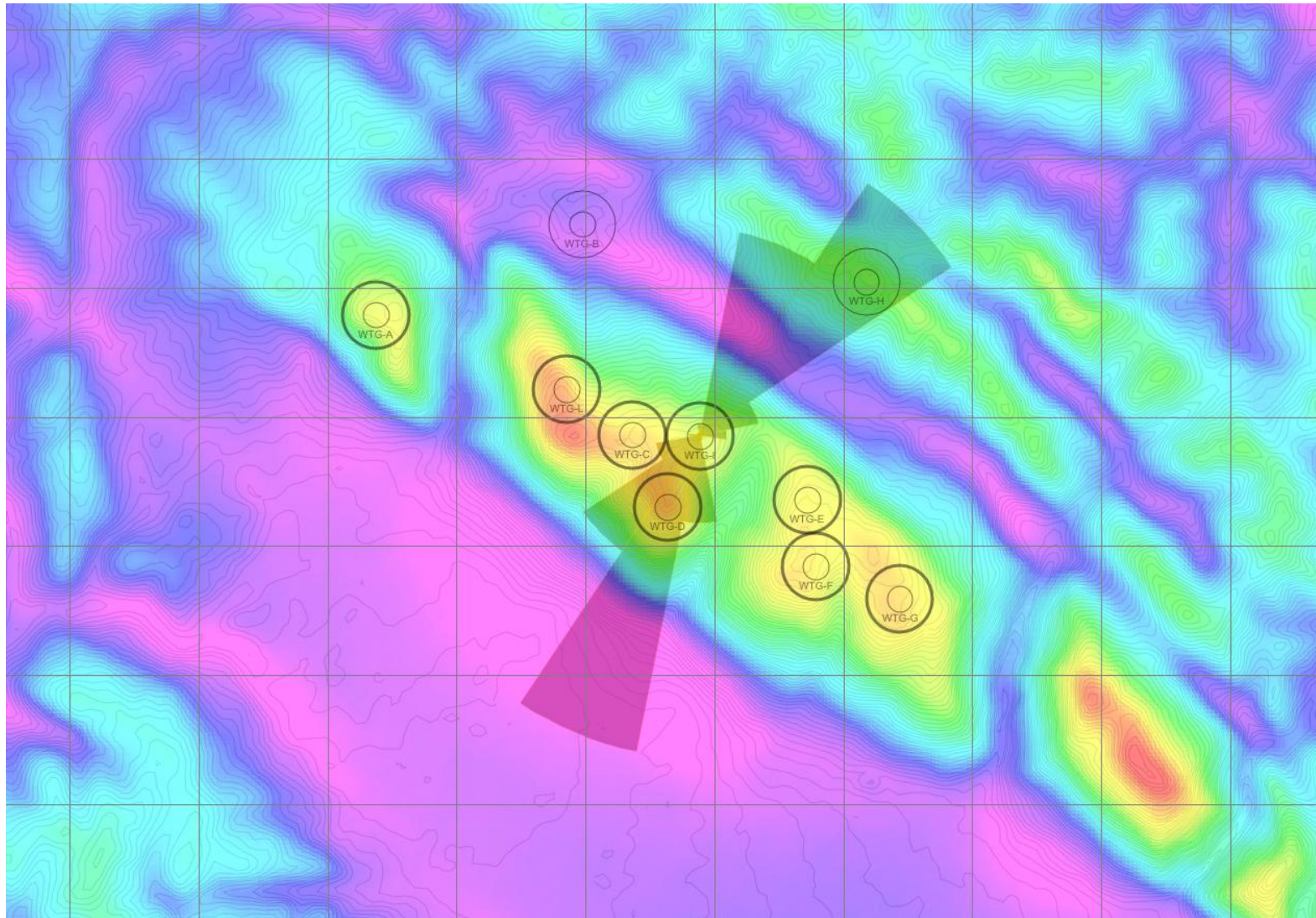
### Modelos CFD

- WindSim
- Meteodyn
- OpenFoam
- WAsP CFD

Más complejos  
Más lentos  
Mayor  
necesidad de  
cálculo  
Especialmente  
para terreno  
complejo

# Campaña de medida - MODELIZACIÓN

## TIPOS DE HERRAMIENTAS DE MODELIZACIÓN DE RECURSO EÓLICO

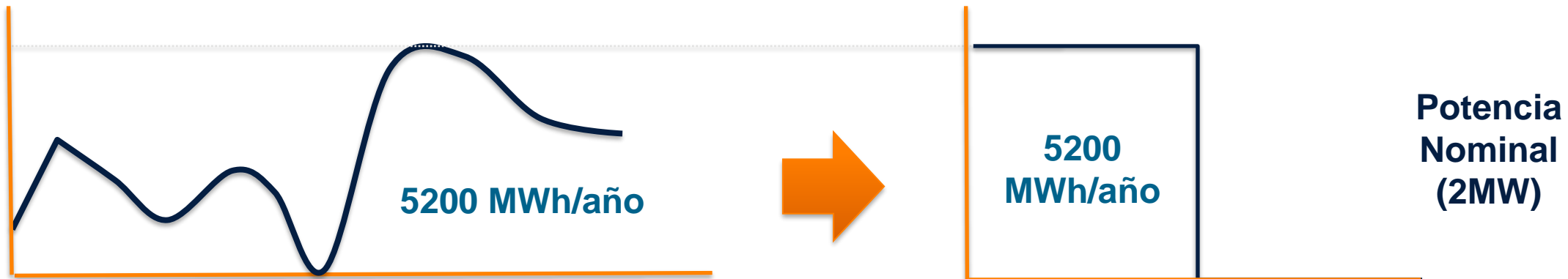


# CÁLCULO DE PRODUCCIÓN

La producción de un aerogenerador o un grupo de aerogeneradores se expresa en términos de Energía/año, por ejemplo MWh/año.

Con el fin de hacer comparables distintos aerogeneradores en un mismo emplazamiento, o de un mismo aerogenerador en distintos sitios, o incluso distintos parques eólicos, se utiliza el **Factor de Carga o Utilización (NCF)**. Se define como la Producción de una Aerogenerador (o parque), dividido por su potencia nominal, y se expresa en %.

Otra forma típica de expresar el **Factor de Carga** son las llamadas 'Horas Equivalentes' (NEH), que representan el tiempo (horas) que durante de un año debería producir la instalación al 100% de su potencia nominal para producir lo mismo que produce en la realidad a régimen variable ( $NEH = 8766 * NCF$ ).



# FASE DE CONSTRUCCIÓN

---

Durante la fase de construcción, desde la parte de recurso podemos dar apoyo en:

- Cálculo de windy days (días no hábiles para la instalación por alto viento)
- Seguimiento de la instalación y apoyo a **reclamaciones** (paradas por viento)
- Cálculo de **lucro cesante** por descargos (en parques muy cercanos)
- Calibración de emplazamiento para la posterior medida de curva. Importante la coordinación con el equipo de construcción para interferir lo menos posible en el planning de obra.

# FASE DE OPERACIÓN

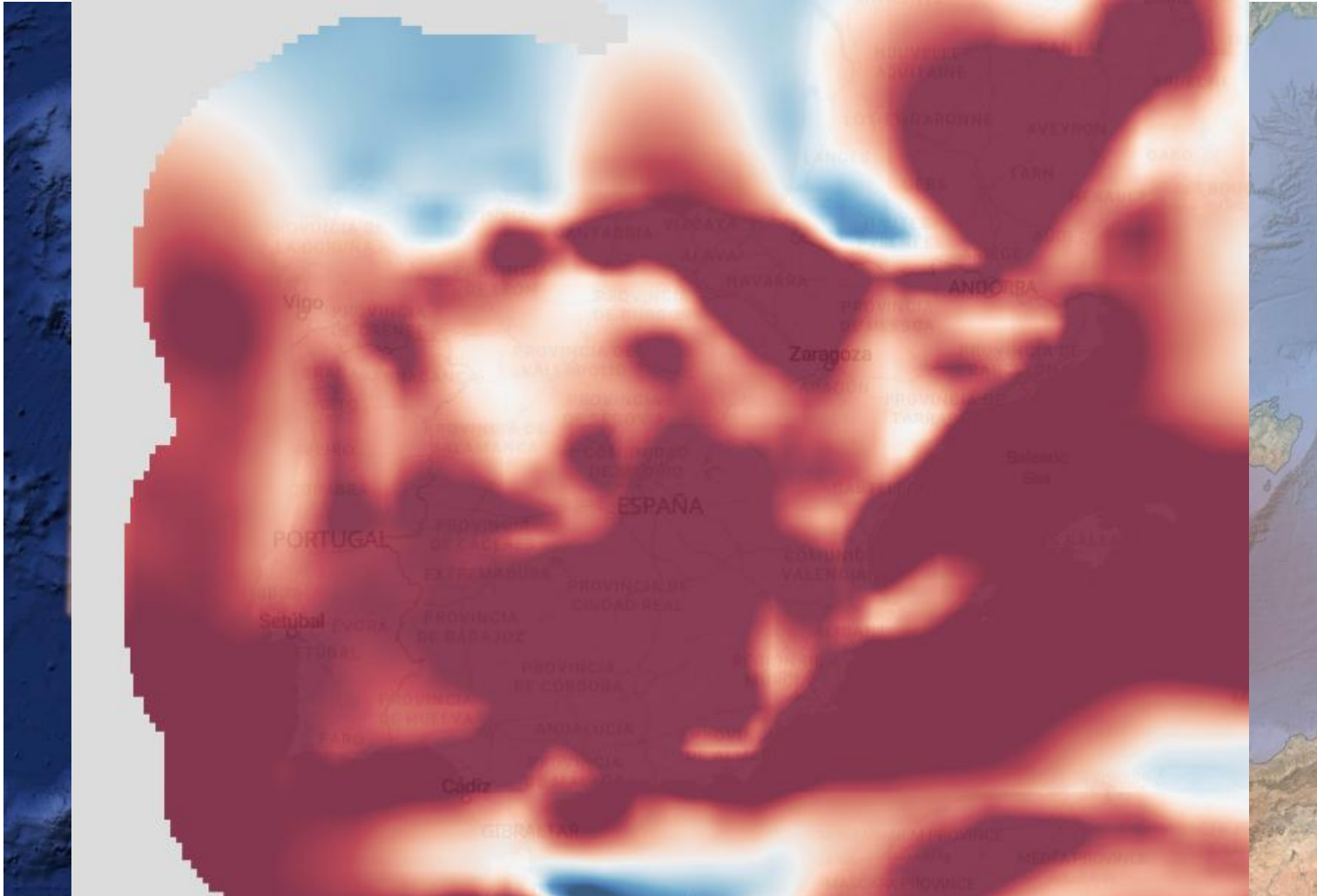
---

Durante la fase de OPERACIÓN del activo, desde la parte de recurso podemos dar apoyo en:

- Cálculo de **lucro cesante** por indisponibilidades y descargos
- **MEDIDA DE CURVA** tras la realización de la calibración de emplazamiento. Es la única manera de **reclamar garantía** de performance a los fabricantes.
- **SEGUIMIENTO DE PRODUCCIÓN** real de los parques para **ajustar el presupuesto** anual de producción. En base a este estudio se puede diagnosticar el **origen de la desviación** de producción (performance, disponibilidad, anomalía climática, error en la estimación...)

# FASE DE OPERACIÓN – Anomalía Climática

Nos ayuda a saber si las desviaciones en producción corresponden con desviaciones del promedio de velocidad de viento en la zona:





# CONCLUSIONES

# CONCLUSIONES

La medida y análisis del recurso eólico nos aporta:

- Una mayor precisión en la estimación de la producción esperada.
  - **Mejor selección** de proyectos en fases preliminares
  - **Mejor** ajuste del **P50** y menor ratio **P90/P50** (financiación)
- Una **mejor selección** de equipos y optimización del proyecto.
- Posibilidad de **reclamación de garantías** gracias a la medida de curva.
- Seguimiento de producción y **mejora continua** de las estimaciones.



Mayor IRR



Menor incert.  
Menor coste  
financiero



Mayor IRR



**Q&A**

**¡MUCHAS GRACIAS POR VUESTRA  
ATENCIÓN!**