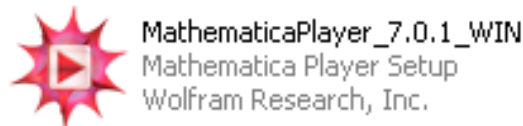


# Programa interactivo para visualizar datos de estaciones meteorológicas mundiales

## 1 Instalación del programa “Mathematica Player”

Para poder utilizar el programa interactivo, es necesario instalar el visor de los ficheros compilados con Mathematica™. Por conveniencia, se ha incluido una copia del instalador en el CD-ROM del hito. Alternativamente, este visor se puede descargar gratuitamente desde la página web del fabricante de Mathematica™, <http://www.wolfram.com/products/player/download.cgi>

Para instalar el programa, basta con pulsar dos veces el icono siguiente:



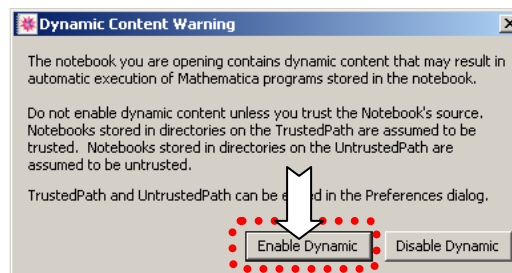
La instalación es un proceso muy sencillo y tarda unos 4 minutos. Al principio, el instalador permite instalar el inxador de documentos de Mathematica™, que es opcional y no es necesario para ejecutar los cálculos.

### 1.1 Apertura del fichero de cálculos

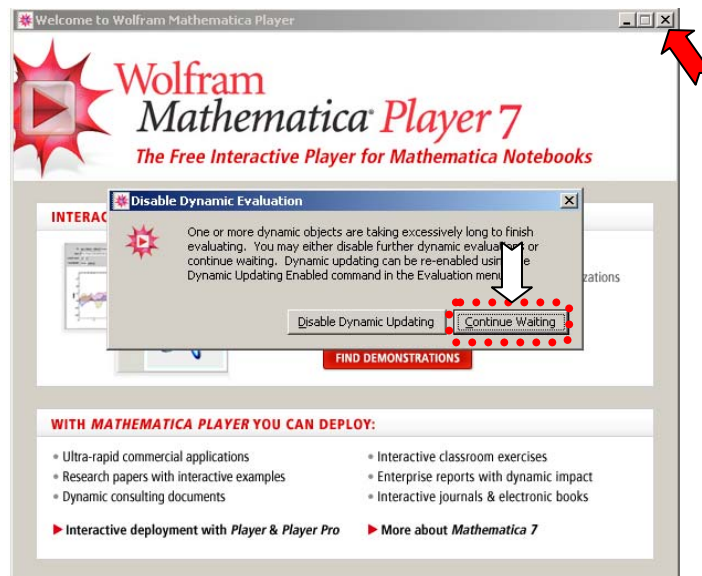
Los algoritmos de cálculo se encuentran en el siguiente fichero:



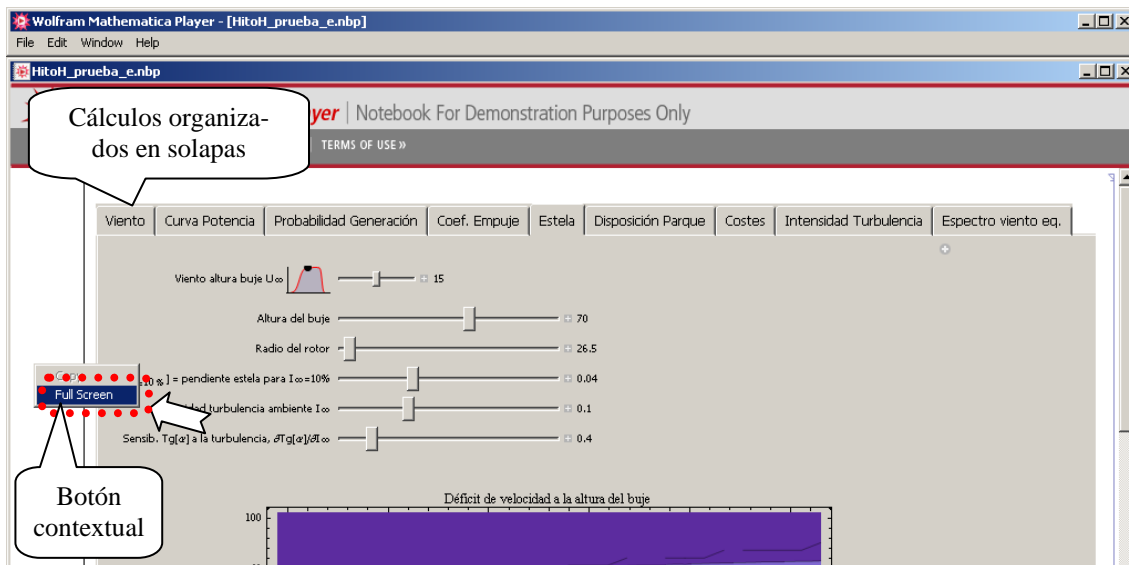
Al pulsar dos veces sobre el icono se abre el visor de Mathematica™ y nos advierte que estamos abriendo un fichero que contiene cálculos dinámicos. Para poder utilizar los cálculos, debemos habilitar dichos cálculos dinámicos pulsando el botón “Enable Dynamic”.



El visor de Mathematica™ puede avisarnos eventualmente si queremos cancelar los cálculos cuando éstos se ralentizan más de un minuto. Esto puede suceder en ordenadores antiguos y es suficiente con responder que continúe calculando. También debemos cerrar el cuadro de diálogo de bienvenida al visor de Mathematica™ que aparece las primeras veces que utilizamos el visor.



Para trabajar con los cálculos, se recomienda trabajar a *pantalla completa* pulsando la tecla de función “F12” o con el botón contextual sobre una parte blanca de la pantalla:



## **2 Programa de visualización de datos de estaciones meteorológicas mundiales**

El programa que se presenta a continuación está diseñado para estudiar la evolución del viento en emplazamientos cercanos y es parte de una tesis doctoral [1]. Para ello, el programa descarga automáticamente datos de las estaciones meteorológicas seleccionadas a través de Internet. Por ello, el ordenador en el que se utiliza debe estar conectado a Internet. Los datos utilizados se toman de organizaciones meteorológicas gubernamentales a través de los servidores de Wolfram Research.

En general, los datos de las estaciones meteorológicas institucionales debe ser tomado con precaución, ya que no se dispone de información precisa de su emplazamiento y puede presentar fallos de mantenimiento y técnicos. Además, las series de datos pueden presentar huecos y datos perdidos, lo que limita su tratamiento automático.

A pesar de estas deficiencias, lógicas en una amplia red de estaciones diseñadas para la predicción del tiempo y muchas veces mantenidas a través de instituciones con presupuestos limitados, estos datos son valiosos para el desarrollo de la energía eólica.

Las estaciones a las que se pueden acceder normalmente están situadas en emplazamientos sin calibrar y cuyas condiciones concretas no se suelen conocer. Muchas veces se encuentran en zonas semi-urbanas, con obstáculos cercanos y a alturas variadas.

El valor de estas estaciones en la energía eólica es debido a la disponibilidad de largas series temporales de datos en una amplia red mundial. Estas series pueden ayudar a corregir variaciones estacionales e interanuales del recurso eólico.

Las estaciones meteorológicas instaladas en aeropuertos proporcionan datos relativamente fiables y habitualmente se disponen de datos cada 30 minutos. Las estaciones de institutos meteorológicos estatales también pueden ser una fuente útil de datos, aunque su disponibilidad suele ser más reducida y la velocidad del viento no suele estar tan bien monitorizada. En los estudios que necesitan registros de datos sin huecos, los valores no disponibles se sustituyen por la interpolación entre los datos más próximos. El programa, en la versión actual, no incluye ningún filtro para compensar errores en las medidas ni realiza ninguna comprobación adicional excepto interpolar los datos no disponibles.

Este programa permite el análisis interactivo de las variaciones del viento en el rango de una semana hasta las variaciones horarias en función de los datos recogidos durante los últimos años con cadencias horarias o de 30 minutos. Las oscilaciones más largas del viento se pueden estudiar con las mismas herramientas, pero precisa series muy largas de datos que pueden presentar errores importantes en las medidas. Por ello, las series muy largas de datos se suelen tratar de forma manual o, como mucho, semi-automática.

No se ha incluido una opción para grabar los datos para que el programa pudiera ser utilizado el visor gratuito de programas escritos en el lenguaje de Mathematica™. No obstante, si se dispone de una licencia del programa Mathematica™ 7, los datos que se muestran en el programa se pueden almacenar en un fichero de texto separado por tabuladores tecleando el comando `Export["fichero1.txt",availabledata, "TSV"]` para la estación meteorológica de referencia y `Export["fichero2.txt",availabledata2, "TSV"]` para la estación comparada.

A día de hoy, el programa está en fase beta y, eventualmente, puede fallar si la base de datos no dispone de datos requeridos de la estación meteorológica o estos son erróneos (puede haber varios datos para el mismo instante, datos aberrantes, velocidades de viento negativas en vez de calmas, etc.). Estos fallos en los datos pueden generar errores numéricos que, en algunos casos, bloquean el programa. En el peor caso, este problema se resuelve cerrando el programa "Mathematica Player" y/o MathKernel y realizando otro análisis, seleccionando otras fechas u otra estación meteorológica cuyos datos no contengan errores. Puede contribuir al desarrollo del programa enviando un correo a [joako@unizar.es](mailto:joako@unizar.es) indicando la estación meteorológica, la variable y el periodo que ha generado un error en el programa. Estos correos ayudarán a diseñar un filtro inicial que evite los errores numéricos asociados a datos erróneos.

## 2.1 Solapas del programa

El programa se ha organizado por solapas para poder acceder a la información rápidamente. El funcionamiento de las solapas es análogo al comportamiento de las solapas de otros programas como navegadores, editores de textos, etc.

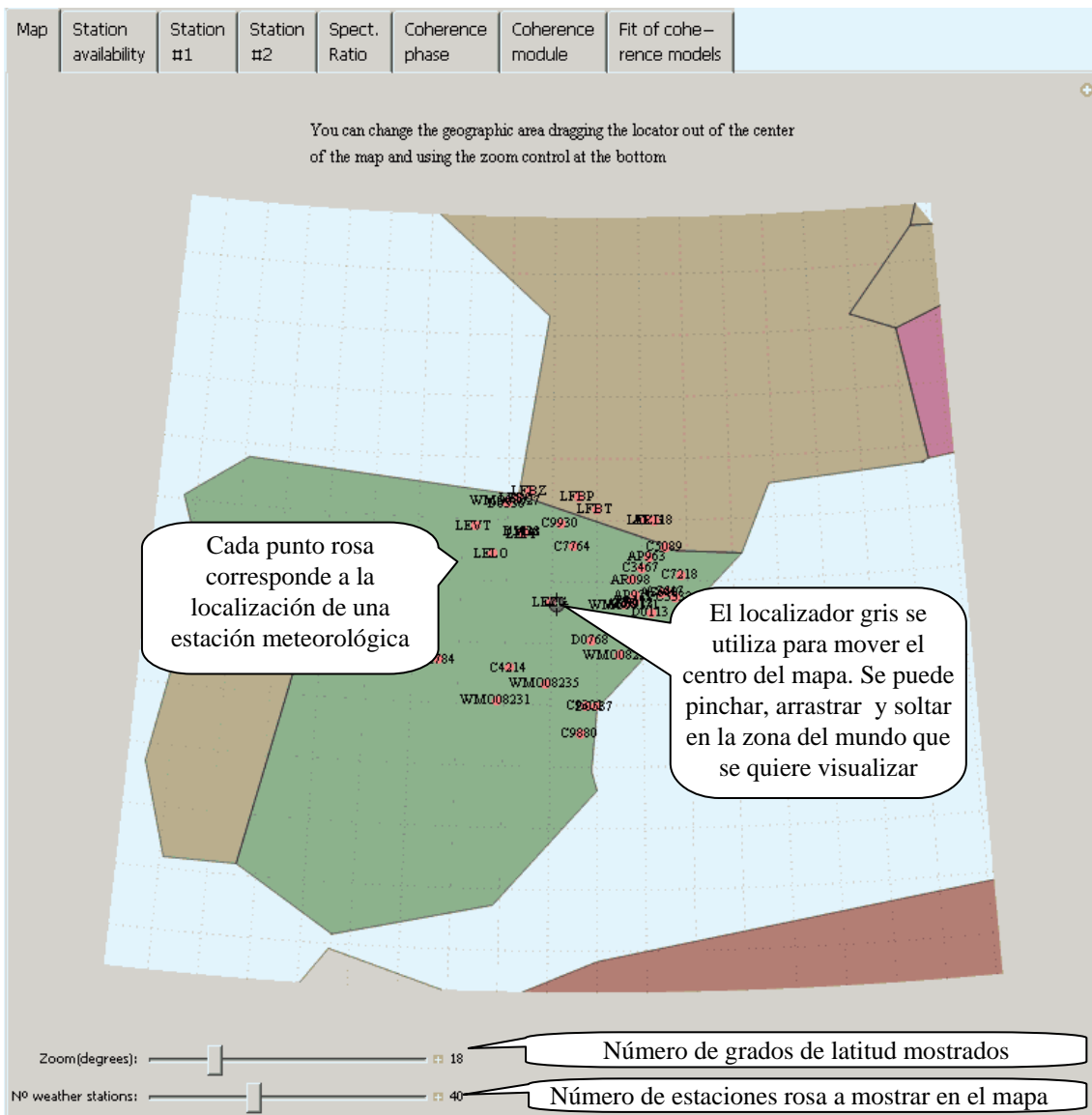
Cada solapa muestra una pantalla con información relacionada estrechamente. Las solapas actualmente disponibles son:

Map	Station availability	Station #1	Station #2	Spect. Ratio	Coherence phase	Coherence module	Fit of coherence models
-----	----------------------	------------	------------	--------------	-----------------	------------------	-------------------------

Las solapas de la izquierda se utilizan para seleccionar las estaciones meteorológicas y los datos que se quieren comparar. Las solapas de la derecha contienen las gráficas de la comparación.

A continuación se muestra una breve guía gráfica de la utilización más habitual del programa.

## 2.2 Mapa de las estaciones meteorológicas cercanas



Al abrir el fichero “EstacionesMeteorologicas.nbp”, el programa se inicializa y muestra la solapa “Map” con un mapa esquemático centrado en el lugar de utilización. En el centro del mapa aparece un localizador gris. El localizador está inicialmente en la ubicación más probable del ordenador en que se ejecuta el programa. Para cambiar la zona geográfica mostrada, basta con pinchar, arrastrar y soltar el localizador gris a la zona que se desea visualizar.

## 2.3 Disponibilidad de las estaciones meteorológicas

La solapa “Station availability” contiene una lista con la posición geográfica de las estaciones, la velocidad media del viento, la distancia al localizador del mapa y el rango de fechas disponibles. La velocidad del viento suele ser más fiable en aquellas estaciones con mayor disponibilidad de fechas, que tengan mayor velocidad media (**Wind**) [m/s] o que correspondan a Aeropuertos.

Map	Station availability	Station #1	Station #2	Spect. Ratio	Coherence phase	Coherence module	Fit of coherence models
		Latitude	Longitude	Elevation [m]	(Wind) [m/s]	Date availability	Distance [km]
	<a href="#">LEZG</a>	41.667	-1.	258.	8.94	1 Jan 1973 → 4 Sep 2009	10.81
	<a href="#">D0768</a>	41.052	-0.128	320.	1.17	24 Jun 2008 → 11 Aug 2008	89.9
	<a href="#">C7764</a>	See D0768 weather station in google maps			0.78	1 Mar 2008 → 13 Aug 2009	109.3
	<a href="#">WMO08171</a>	41.633	0.6	199.	1.78	1 Jan 1973 → 4 Sep 2009	123.3
	<a href="#">AR097</a>	41.651	0.69	188.	3.11	14 Mar 2008 → 23 Aug 2009	130.8
	<a href="#">AR112</a>	41.673	0.818	210.	2.72	1 Mar 2008 → 29 Aug 2008	141.5
	<a href="#">LEPP</a>	42.77	-1.646	459.	6.25	13 Mar 1973 → 4 Sep 2009	141.6
	<a href="#">AP971</a>	41.789	0.817	240.	3.89	1 Mar 2008 → 25 Nov 2008	142.3
	<a href="#">WMO08235</a>	40.35	-1.117	902.	2.22	1 Jan 1973 → 4 Sep 2009	143.5
	<a href="#">C4214</a>	40.594	-1.907	1187.	---	1 Mar 2008 → 14 Oct 2008	143.8
	<a href="#">AR098</a>	42.04	0.787	1670.	---	1 Mar 2008 → 4 Sep 2009	145.8
	<a href="#">D1438</a>	42.807	-1.662	448.	3.11	13 Oct 2008 → 4 Sep 2009	145.8
	<a href="#">C5711</a>	42.815	-1.644	452.	---	1 Mar 2008 → 4 Sep 2009	146.
	<a href="#">WMO08238</a>	40.817	0.5	50.	2.69	1 Jan 1973 → 4 Sep 2009	146.8
	<a href="#">C9930</a>	42.952	-0.803	1550.	1.17	18 Mar 2008 → 13 May 2008	147.
	<a href="#">LELO</a>	42.45	-2.333	363.	2.69	1 Jan 1973 → 4 Sep 2009	150.9
	<a href="#">C3467</a>	42.225	0.99	650.	---	1 Mar 2008 → 20 Aug 2009	168.6
	<a href="#">D0113</a>	41.504	1.187	781.	3.11	31 Mar 2008 → 19 Jul 2008	173.
	<a href="#">LERS</a>	41.147	1.167	76.	3.14	1 Jan 1973 → 4 Sep 2009	179.4
	<a href="#">LFBT</a>	43.179	-0.006	363.	6.69	1 Jan 1973 → 4 Sep 2009	186.5
	<a href="#">AP963</a>	42.409	1.133	711.	---	1 Mar 2008 → 10 May 2008	187.8
	<a href="#">C9301</a>	39.994	-0.241	227.	2.72	1 Mar 2008 → 4 Sep 2009	189.5
	<a href="#">AS648</a>	41.812	1.407	439.	1.17	1 Mar 2008 → 23 Jan 2009	191.4
	<a href="#">D0537</a>	39.985	-0.027	0.	---	14 May 2008 → 16 May 2008	196.3
	<a href="#">LFBP</a>	43.38	-0.419	183.	6.25	15 Jun 1936 → 4 Sep 2009	198.1
	<a href="#">AS647</a>	41.837	1.537	930.	---	1 Mar 2008 → 4 Sep 2009	202.4
	<a href="#">WMO08231</a>	40.067	-2.133	946.	0.89	1 Jan 1973 → 4 Sep 2009	203.2
	<a href="#">D0336</a>	43.269	-2.019	55.	1.94	15 Apr 2008 → 4 Sep 2009	204.8
	<a href="#">LEVT</a>	42.883	-2.724	510.	4.92	1 Jan 1973 → 4 Sep 2009	206.2
	<a href="#">LESO</a>	43.357	-1.791	8.	1.33	1 Jan 1973 → 4 Sep 2009	205.9
	<a href="#">WMO08027</a>	43.3	-2.033	259.	4.92	1 Jan 1973 → 4 Sep 2009	208.3
	<a href="#">LFBZ</a>	43.468	-1.523	71.	4.47	1 Aug 1929 → 4 Sep 2009	210.9
	<a href="#">C5532</a>	41.743	1.713	400.	1.94	1 Mar 2008 → 4 Sep 2009	216.2
	<a href="#">LFCG</a>	43.008	1.103	412.	3.58	1 Jan 1973 → 4 Sep 2009	223.9
	<a href="#">C5089</a>	42.562	1.53	1320.	---	4 Sep 2009 → 4 Sep 2009	224.6
	<a href="#">AS763</a>	41.26	1.771	100.	---	4 Sep 2009 → 4 Sep 2009	225.3
	<a href="#">C7218</a>	42.099	1.846	704.	0.78	1 Mar 2008 → 4 Sep 2009	232.2
	<a href="#">AR118</a>	42.993	1.287	522.	0.39	1 Mar 2008 → 3 Sep 2009	234.2
	<a href="#">C9880</a>	39.539	-0.35	45.	---	29 Mar 2008 → 9 Oct 2008	236.5
	<a href="#">C1784</a>	40.699	-3.449	752.	---	1 Mar 2008 → 20 Jul 2009	239.1

La velocidad del viento **{Wind} [m/s]** que se muestra en la tabla corresponde a la media la estación, sin corregir su valor por la altura del anemómetro o por los obstáculos cercanos. Las estaciones facilitan a la organización mundial de predicción la velocidad del viento en las unidades km/h y se convierten a m/s dividiendo por el factor 3,6. Muchas estaciones proporcionan los datos semi-horarios de velocidad sin cifras decimales o con errores significativos de discretización.

El entorno alrededor de cada estación se puede observar pulsando un botón. Entonces, el programa abre en Google maps la imagen del satélite. La estación puede estar a unos metros del centro de la imagen del satélite mostrada ya que no se suele conocer las coordenadas de las estaciones con más de 3 decimales.

Las estaciones de los aeropuertos españoles empiezan con las siglas LE y luego siguen las siglas de la ciudad. Por ejemplo, LEZG corresponde al aeropuerto Español de Zaragoza, LEPP corresponde al aeropuerto Español de Pamplona y LEVT corresponde al aeropuerto Español de Vitoria, LFBZ corresponde al aeropuerto Francés de Biarritz, etc.

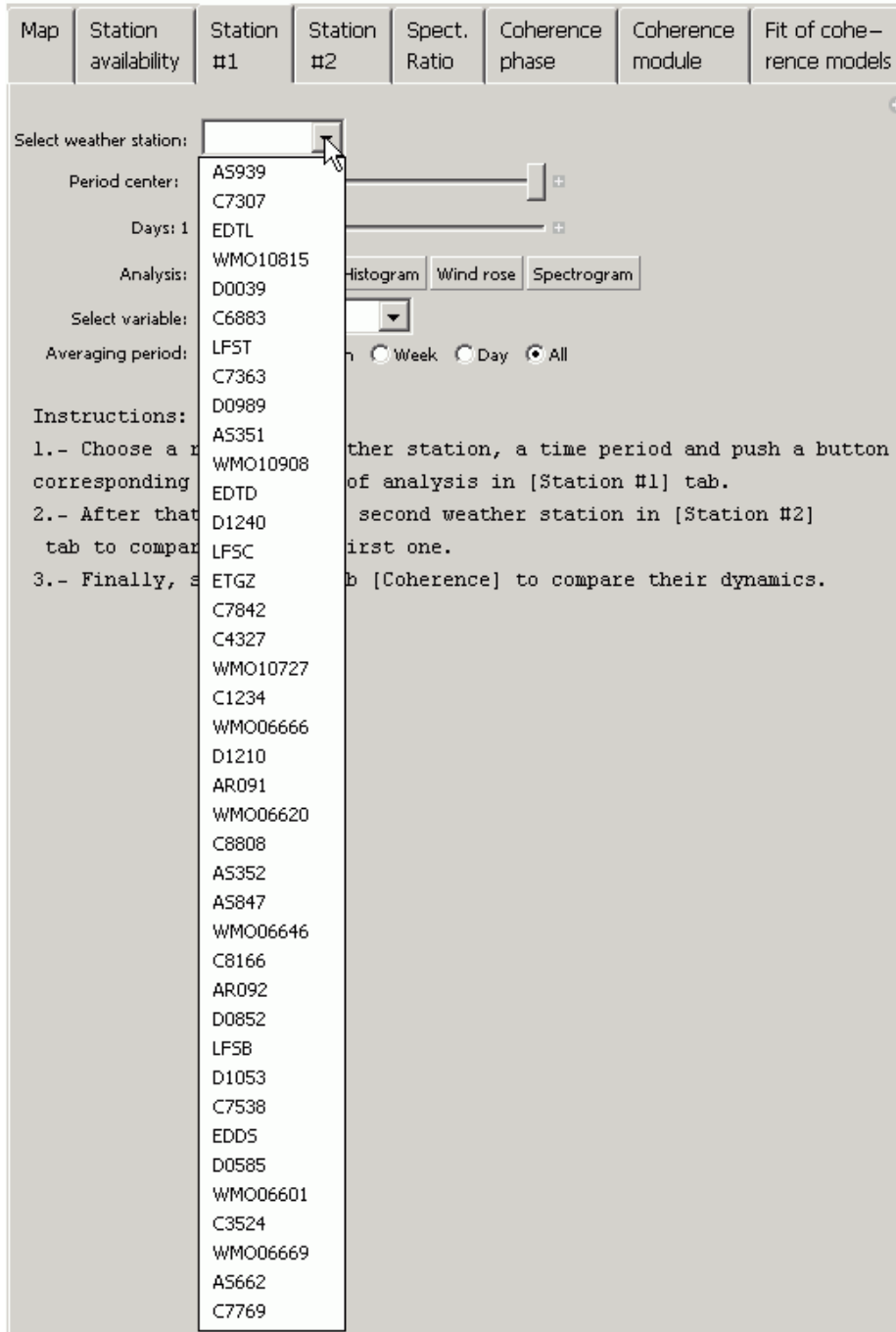
Las estaciones asociadas a la organización meteorológica mundial empiezan por WMO (correspondiente a Weather Meteorological Organization).

## 2.4 Selección de la estación meteorológica de referencia

Map	Station availability	Station #1	Station #2	Spect. Ratio	Coherence phase	Coherence module	Fit of coherence models
Select weather station: <input type="text"/>							
Period center: <input type="text"/>							
Days: 1 <input type="text"/>							
Analysis: <input type="button" value="Time series plot"/> <input type="button" value="Histogram"/> <input type="button" value="Wind rose"/> <input type="button" value="Spectrogram"/>							
Select variable: <input type="text" value="WindSpeed"/>							
Averaging period: <input type="radio"/> Year <input type="radio"/> Month <input type="radio"/> Week <input type="radio"/> Day <input checked="" type="radio"/> All							
<b>Instructions:</b>							
1.- Choose a reference weather station, a time period and push a button corresponding to the type of analysis in [Station #1] tab.							
2.- After that, select the second weather station in [Station #2] tab to compare with the first one.							
3.- Finally, select the tab [Coherence] to compare their dynamics.							

En esta solapa se puede visualizar un análisis de los datos facilitados por una estación meteorológica. Para ello, hay que elegir una estación de una lista desplegable, que corresponde al mapa y tabla mostrados anteriormente. Con el control “Period center” se selecciona la fecha

del centro del periodo que se va a estudiar. Si el control deslizante está a la izquierda, se utilizarán los primeros datos disponibles y si está a la derecha (opción por defecto), se utilizarán los últimos datos disponibles (el último dato disponible suele corresponder a unas dos horas antes de la hora actual). Por tanto, los datos se podrían utilizar incluso para predicción de generación eólica en las próximas horas.



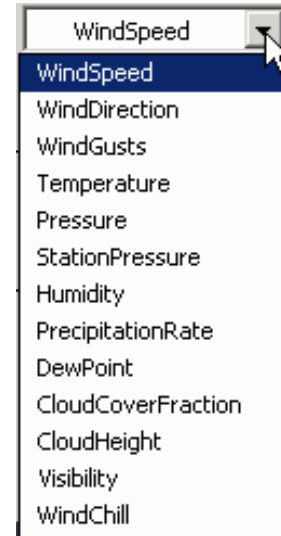
Con el control “Days” se selecciona la duración del periodo bajo estudio. Los periodos muy largos requieren más tiempo para descargar los datos y es más probable que contengan algún dato aberrante.



Por defecto, los análisis se realizan con los valores de mayor frecuencia guardados en la base de datos. Si los datos originales contienen errores o producen gráficos con excesiva variabilidad, se pueden utilizar los promedios diario, semanal, mensual o anual con sólo pulsar los botones de radio “Day”, “Week”, “Month” o “Year” respectivamente. Los promedios se encuentran están procesados en la base de datos de la organización mundial meteorológica y contienen menos errores que los originales.

La variable a estudiar se selecciona en la lista desplegable “Select a variable”. Las variables que se pueden demandar a la base de datos son:

- Velocidad del viento en km/h (*WindSpeed*).
- Dirección del viento en grados sexagesimales (*WindDirection*).
- Racha de viento máxima en km/h (*WindGusts*).
- Temperatura en grados Celsius (*Temperature*).
- Presión milibárica, corregida a la altura del mar (*Pressure*).
- Presión milibárica sin corregir por la altura (*StationPressure*).
- Humedad relativa, de 0 a 1 (*Humidity*).
- Tasa de precipitación en cm/hora (*PrecipitationRate*).
- Temperatura del punto de rocío en grados Celsius (*DewPoint*).
- Fracción de cielo cubierto por nubes, de 0 a 1 (*CloudCoverFraction*).
- Altura en metros de las nubes estimada en 5/8 del oscurecimiento de la nube (*CloudHeight*).
- Visibilidad en kilómetros (*Visibility*).
- Sensación térmica de temperatura (*WindChill*).



Muchas de estas variables no están disponibles en las estaciones meteorológicas. En general, cuando el programa no tiene más de 10 datos válidos, informa al usuario de este problema.

Los tipos de análisis disponibles son:

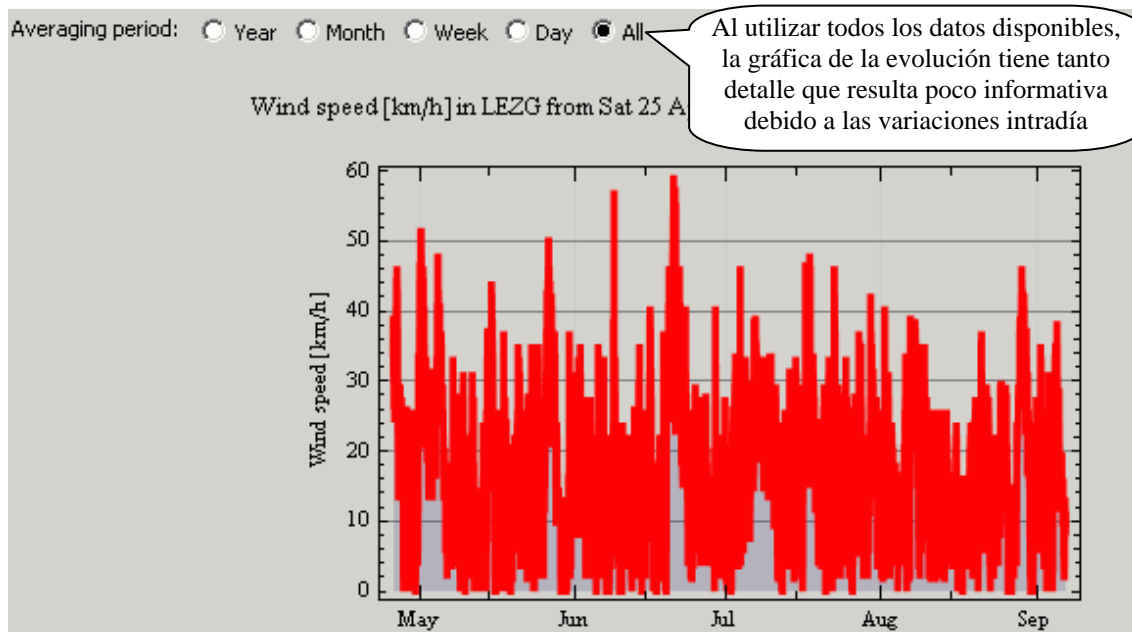


- Gráfico de la evolución de la variable en el tiempo (*Time series plot*).
- Histograma (*Histogram*) con la frecuencia de observación de la variable meteorológica, comparado con la distribución estadística normal y Weibull ajustada a partir de la media y varianza de los datos.
- Rosa de vientos (*Wind rose*), mostrada como un histograma bidimensional del vector de viento. La velocidad se descompone en componentes Norte-Sur y Este-Oeste y la frecuencia de observación es dibujada en una cuadrícula.
- Espectrograma (*Spectrogram*), que muestra la evolución del contenido frecuencial de la señal con el tiempo.

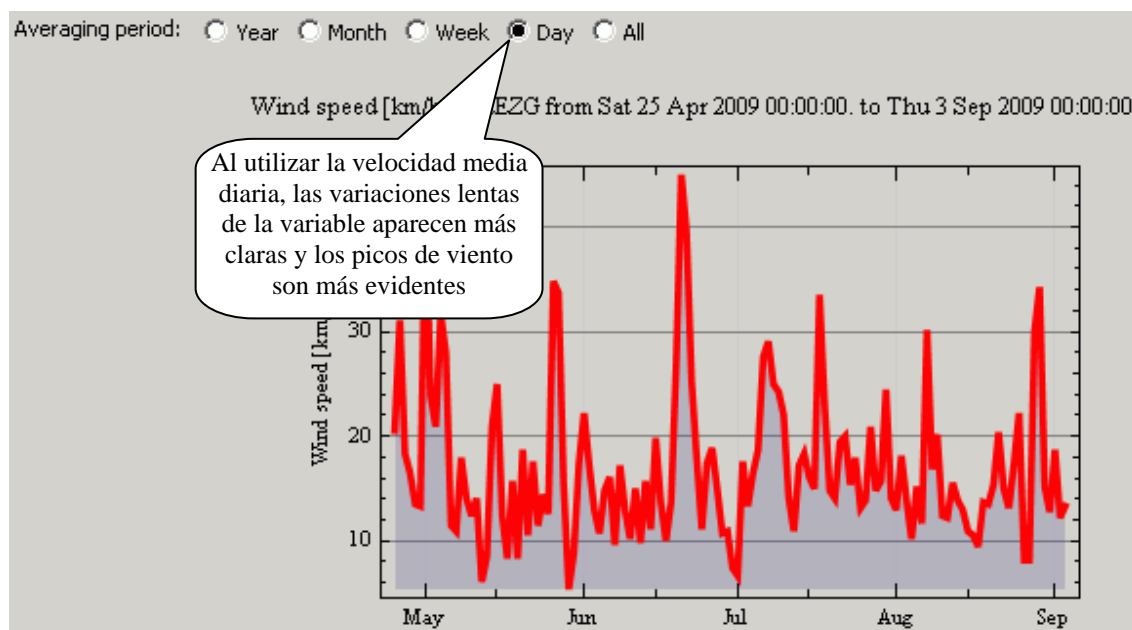
Al pulsar el tipo de análisis, se actualiza el número de días y el centro del intervalo de análisis.

### 2.4.1 Evolución de la variable en el tiempo (*Time series plot*)

El primer paso en un estudio de datos meteorológicos es visualizarlos para detectar posibles anomalías en la serie. Esto lo podemos realizar pulsando el botón “*Time series plot*”.



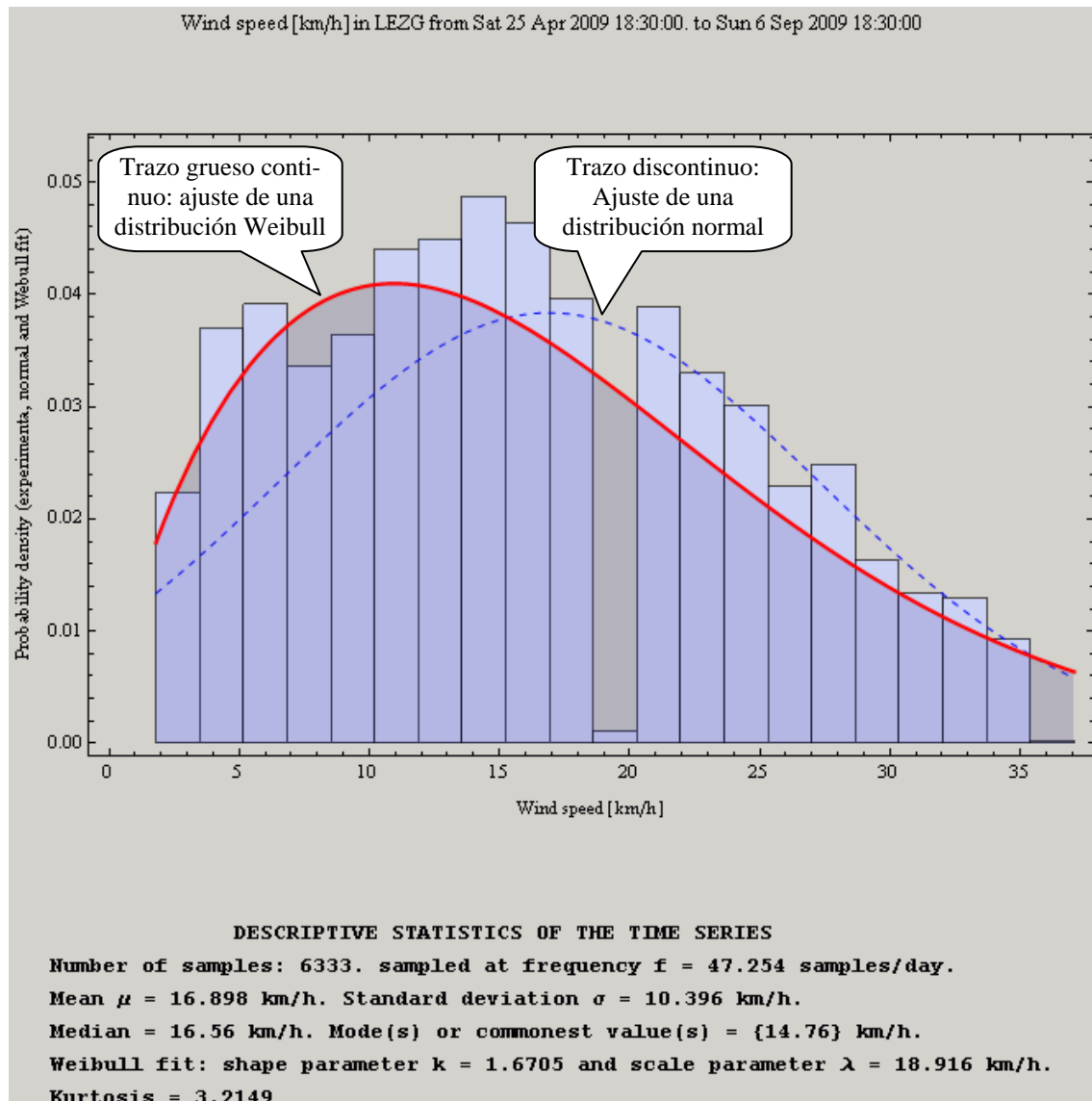
Por defecto, se muestran todos los datos disponibles. Las gráficas de más de una semana resultan poco informativas debido a las variaciones intradía. Dependiendo del periodo de estudio, es recomendable utilizar los datos diarios (que ocultan las variaciones intradías) o incluso las variaciones semanales, mensuales o anuales (que ocultan las variaciones estacionales).



### 2.4.2 Histograma (*Histogram*)

Para estudiar la variación estática del viento o el potencial eólico de un emplazamiento, se utiliza la frecuencia de ocurrencia del viento. En bastantes emplazamientos, la distribución estadística medida se puede aproximar a una distribución Weibull. El histograma también se puede realizar a otras variables meteorológicas, aunque en esos casos, la distribución normal puede ajustarse mejor a las observaciones.

Al igual que el dibujo de la serie temporal, el histograma se puede basar en todos los datos disponibles (habitualmente, valores cada media hora y horarios) o en los datos diarios.

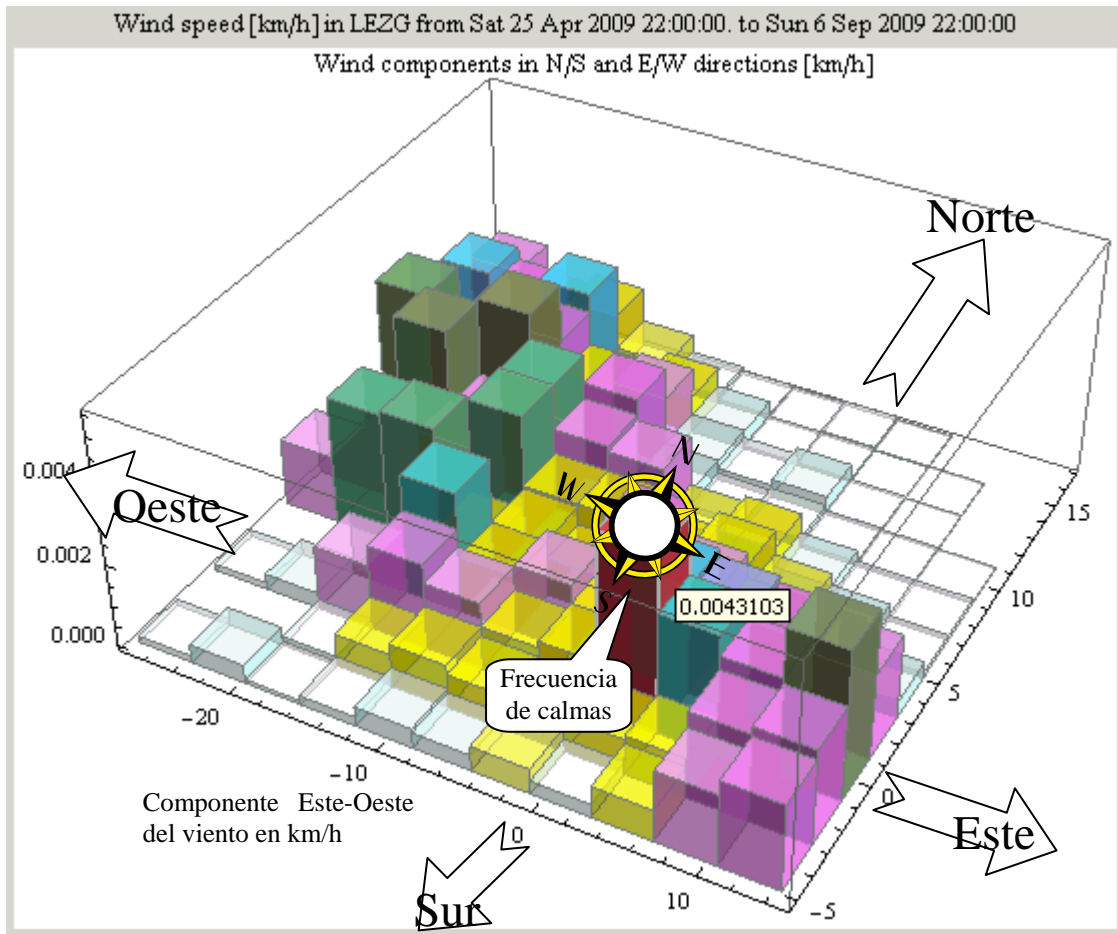


### 2.4.3 Rosa de vientos (*Wind rose*)

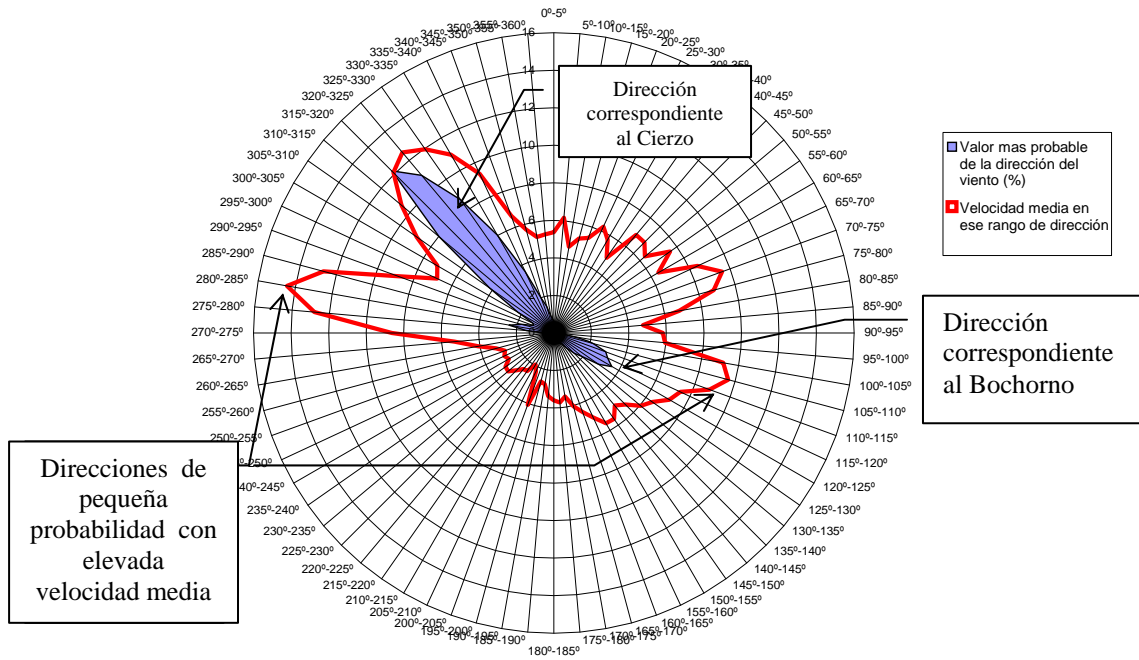
La rosa de viento se calcula en este programa como el histograma bidimensional del vector de viento. La velocidad se descompone en componentes Norte-Sur y Este-Oeste y la frecuencia de observación en cada rango de la cuadrícula se dibuja en forma de altura de la barra.

Aunque este formato es menos habitual que la representación polar del viento, permite una detección más rápida del rango habitual del viento en cada dirección y de la frecuencia de las calmas. Habitualmente, la barra de mayor altura corresponde a la cuadrícula con componentes del viento nulos (calmas).

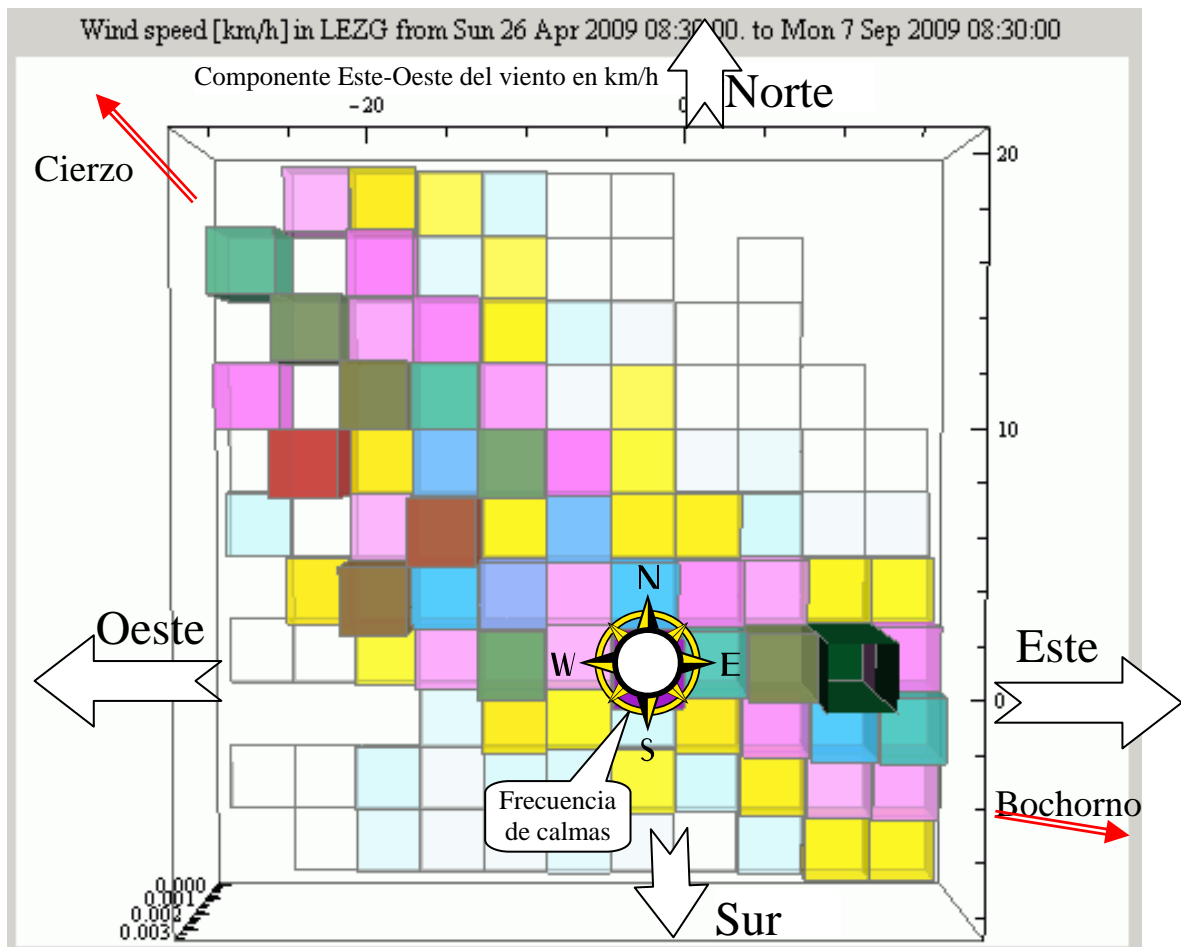
El histograma tridimensional puede girarse pulsando sobre él y arrastrando el ratón. A veces es útil la vista de pájaro para visualizar mejor la orientación del viento, ya que la frecuencia de ocurrencia de cada cuadrícula está codificado por colores con luminosidad proporcional a su frecuencia.



La representación más habitual de la rosa de vientos en coordenadas polares. Puede verse que ambas son equivalentes.



La vista de pájaro del histograma tridimensional proporciona una visualización similar a la representación polar de la rosa de vientos.



#### 2.4.4 Espectrograma (*Spectrogram*)

Las fluctuaciones de una magnitud aleatoria estacionaria (cuyas propiedades no varían en el tiempo) se puede realizar calculando la densidad espectral de varianza o PSD (del inglés “*Power Spectral Density*”). La densidad espectral de varianza indica en qué frecuencias se reparte la varianza de la señal. Esto permite cuantificar que porción de la varianza de la magnitud se debe a las oscilaciones diurnas, semidiurnas y de unos cuantos días.

En la práctica, las propiedades del viento y de otras variables meteorológicas cambian en función de la situación atmosférica. Por ello, es conveniente dividir series largas de tiempo en porciones de unos pocos días y observar la distribución de la varianza en la frecuencia. Esto permite constatar si se producen patrones diferentes a lo largo del tiempo.

El espectrograma consiste en una representación del contenido frecuencial de la señal en función del tiempo. Se suele estimar aplicando la transformada de Fourier a pequeñas porciones de la serie temporal. Esto permite estudiar señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia conjuntamente. Se emplea habitualmente en audio y en tratamiento de señales de frecuencia variable. Su uso para la energía eólica es novedoso.

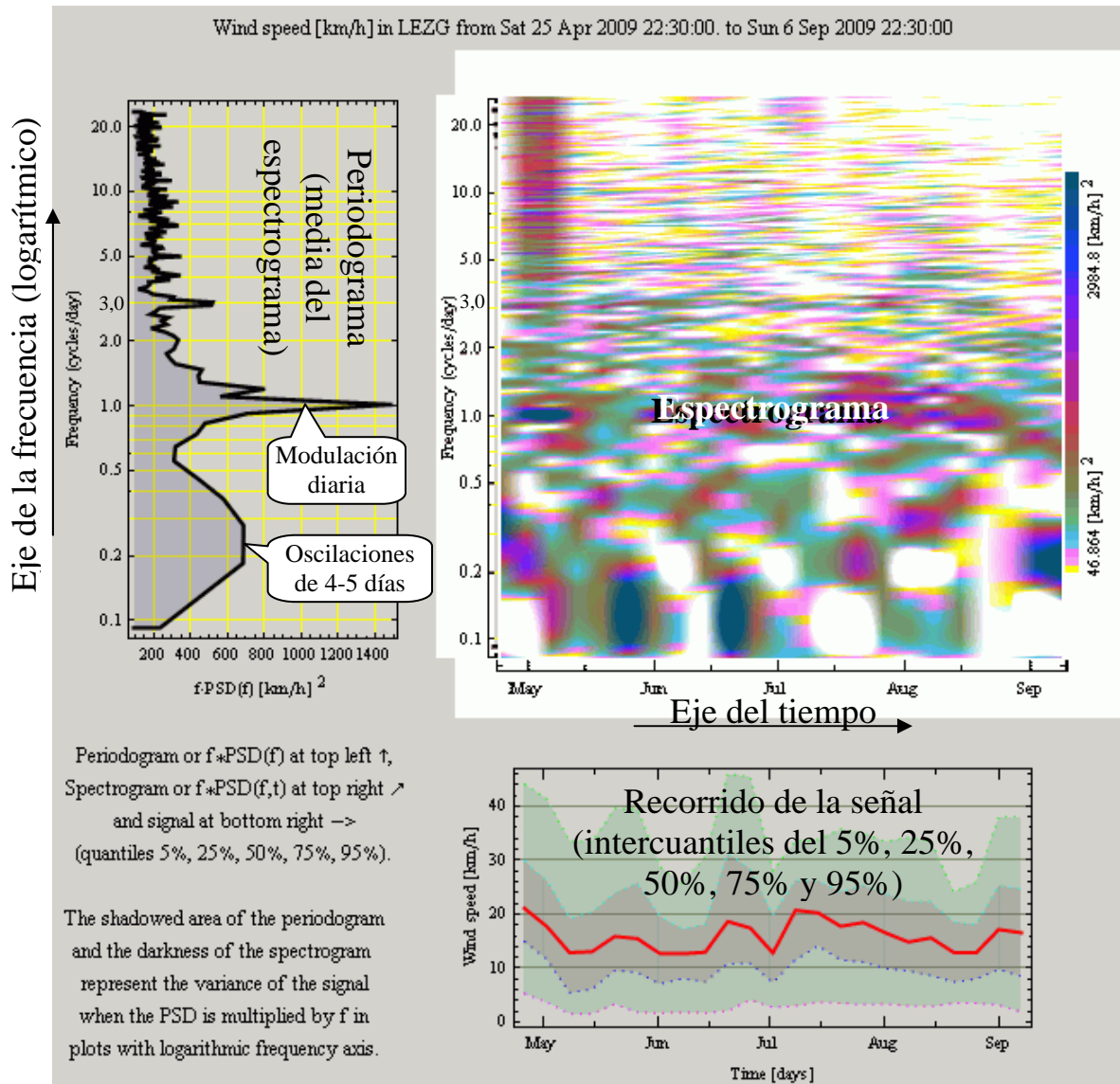
La disposición que se ha elegido para en esta aplicación consiste en:

- el periodograma en la esquina superior derecha;
- el recorrido intercuartil junto con la media y el cuantil 5% y 95% en la esquina inferior derecha;
- el espectrograma, propiamente dicho, en la esquina superior derecha..

El espectrograma muestra las oscilaciones que contiene una señal a lo largo del tiempo. El promedio del espectrograma, es decir, el promedio de las oscilaciones de la señal es el periodograma. En la página siguiente se muestra como ejemplo la gráfica del aeropuerto de Zaragoza.

Se ha utilizado la escala logarítmica para la frecuencia porque se observan mejor las oscilaciones de baja frecuencia en las variables meteorológicas. Cuando se utiliza la escala logarítmica en la frecuencia, se suele representar la densidad espectral de la varianza multiplicada por la frecuencia,  $f \cdot PSD$ , ya que así el área sombreada del periodograma y la oscuridad en el espectrograma representan la varianza de la señal. Es decir, los puntos más oscuros del espectrograma indican que se ha producido una oscilación en el tiempo y frecuencia correspondiente. Las zonas blancas del espectrograma indican ausencias de la frecuencia correspondiente al eje vertical en el instante de tiempo indicado por el eje horizontal.

Por ejemplo, los emplazamientos cercanos al mar suelen mostrar oscilaciones semi-diurnas (frecuencia  $f = 2$  ciclos/día, con 2 picos de viento y 2 periodos de menor viento por día) mientras que en la zona del valle del Ebro las oscilaciones intradía más habituales son de frecuencia  $f = 3$  ciclos/día (3 picos locales de viento y 3 periodos de menor viento por día).



## 2.5 Selección de la estación meteorológica a comparar

Uno de los objetivos del programa es comparar las oscilaciones entre dos estaciones. La estación de referencia (*Station #1*) se compara con una segunda estación (*Station #2*) en el dominio tiempo-frecuencia utilizando el ratio de los espectrogramas.

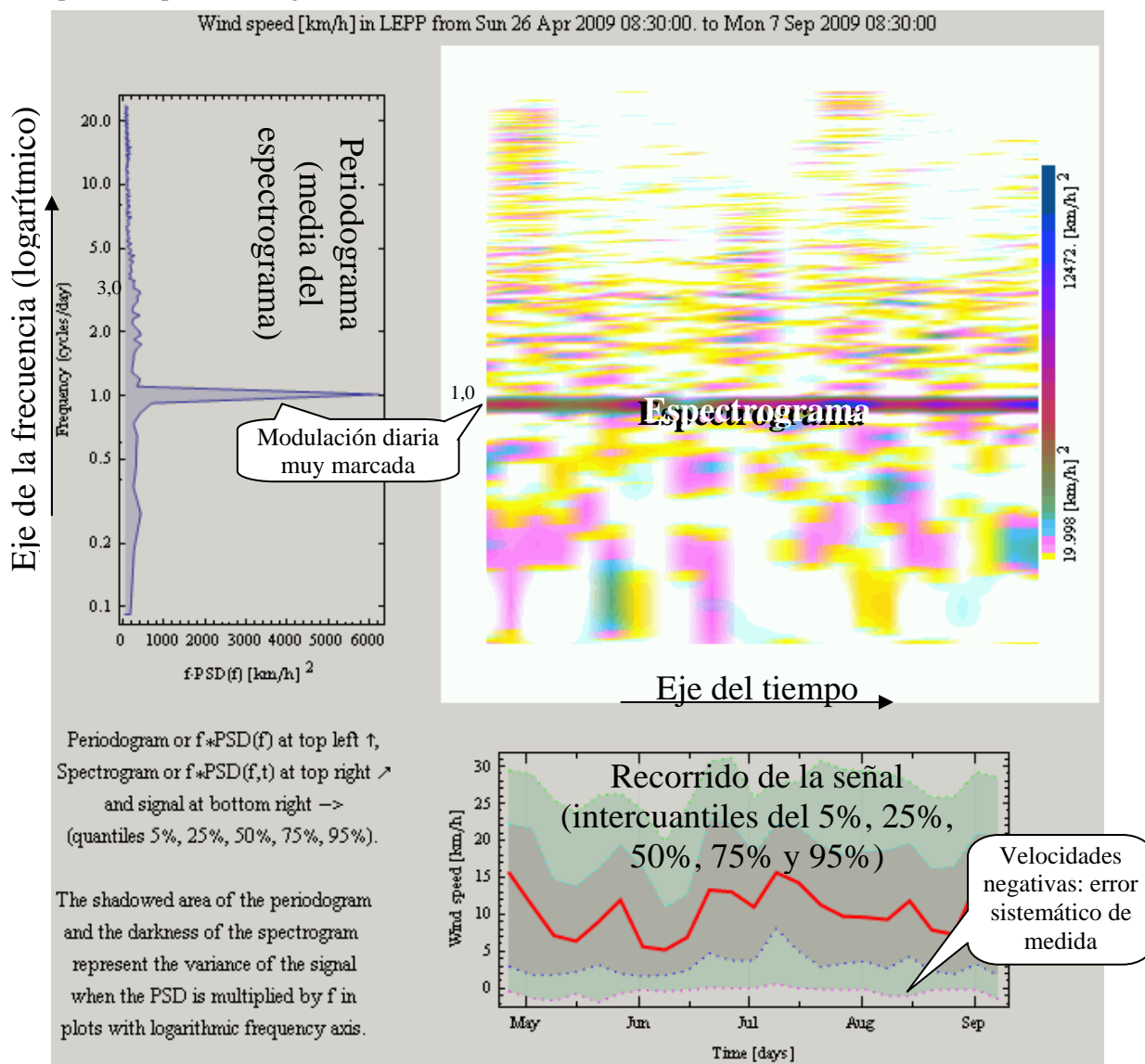
La solapa de la segunda estación es análoga a la primera, salvo que en la segunda estación (*Station #2*) se utiliza el intervalo de tiempo de análisis ajustado en la solapa en la estación de referencia (*Station #1*).

La gráfica siguiente muestra el espectrograma del viento en el aeropuerto de Pamplona como variable que se comparará posteriormente con el viento en el aeropuerto de Zaragoza. Lo primero que salta a la vista es el pico tan marcado que aparece en la frecuencia unidad (oscilación diaria). En el periodograma aparece como un pico mientras que en el espectrograma

aparece como una franja horizontal oscura mientras que el resto es más claro. Esto indica que, en todos los subperiodos analizados, las oscilaciones diarias han predominado.

Si nos fijamos en la escala de las gráficas, vemos que las oscilaciones del resto de frecuencias tienen un valor comparable en Pamplona y Zaragoza. Esto se observará mejor en la solapa de ratio de espectrogramas.

El cuantil del 5% es negativo en algunos periodos, indicando un error de medida sistemático que no se puede corregir al no tener más información de la estación.



## 2.6 Periodograma y ratio entre espectrogramas

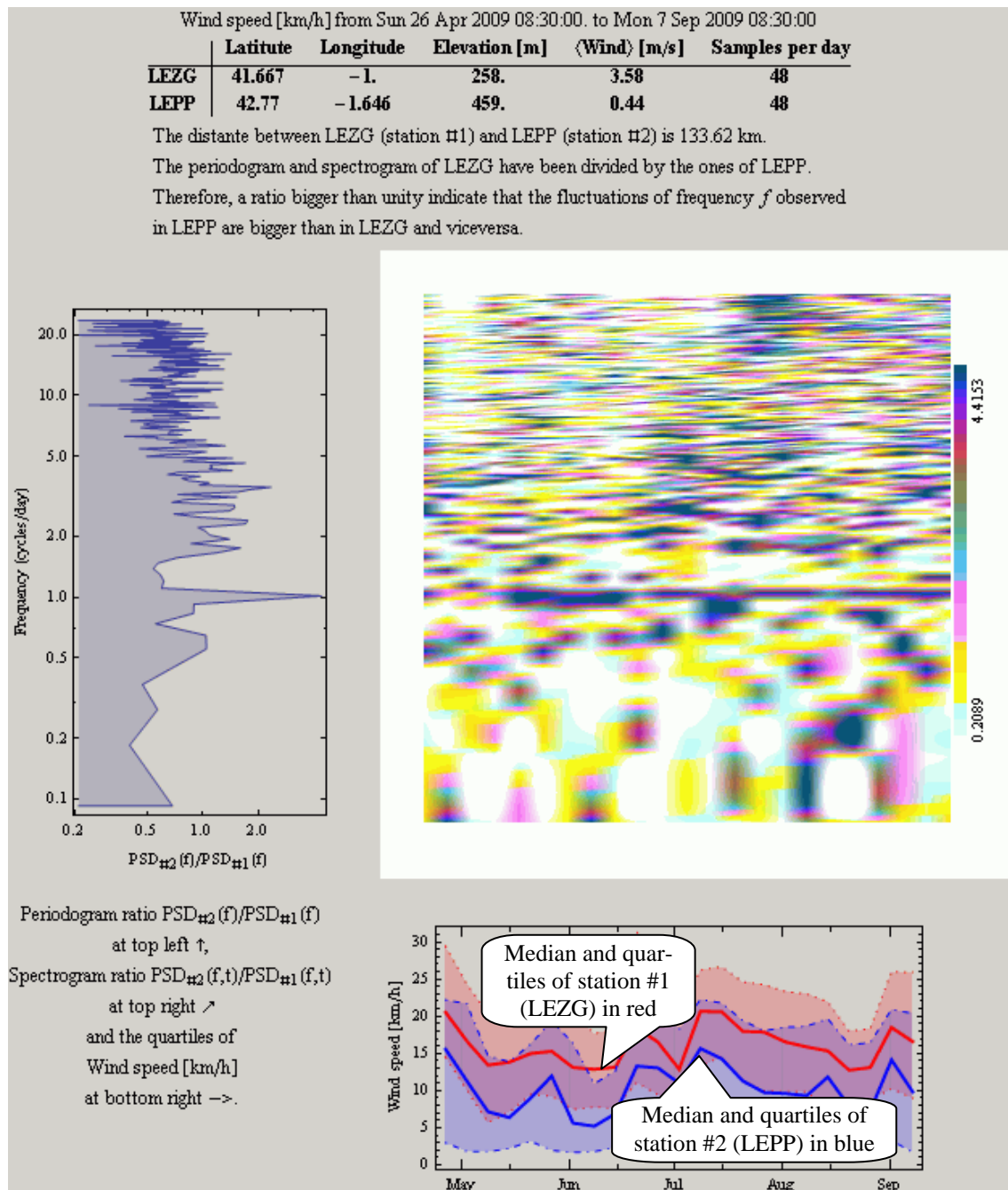
Para señales deterministas, se suele calcular la función de transferencia entre las dos magnitudes dividiendo el espectro de las señales. Utilizando la teoría clásica de sistemas lineales invariantes en el tiempo, las variables meteorológicas se podrían aproximar, a lo sumo, a un sistema multidimensional donde, en vez de utilizar una función de transferencia, habría que utilizar una



matriz de funciones de transferencia y en donde las incertidumbres de modelado y medida se considerarían ruido.

Un primer paso sería calcular el ratio de los espectros de la señal de salida (magnitud seleccionada en la segunda estación) respecto a la señal de entrada (magnitud seleccionada en la estación principal). En la práctica, este ratio es variable tanto en módulo como en fase y se representa en una gráfica de intensidad análoga a la utilizada para el espectrograma.

El programa permite seleccionar variables distintas para cada estación meteorológica, e incluso se puede seleccionar la misma estación en la solapa *Station #1* y *Station #2* para comparar las oscilaciones de distintas variables meteorológicas en una misma estación.



En la gráfica anterior, se puede ver que las estaciones están separadas 133 km y que la velocidad media del viento en la estación de Pamplona es mucho menor que en Zaragoza (0,44 m/s respecto 3.58 m/s). Esto también se observa en la gráfica temporal de la señal (la línea roja, correspondiente a la mediana de la velocidad en Zaragoza, estación #1 o de referencia, está por encima de la mediana de la velocidad en Pamplona, estación #2 o secundaria). Se han añadido los recorridos intercuartiles (cuantiles 25% y 75%) a la gráfica temporal del viento.

El hecho de que las velocidades de viento de Pamplona sean negativas durante las calmas hace que los resultados de la comparación deban tomarse con prudencia. Al no disponer de más datos sobre las estaciones, no se conoce si el anemómetro de Pamplona está en una posición relativamente más protegida del viento que el de Zaragoza. No obstante, el aeropuerto de Pamplona está rodeado de montañas y es lógico que la velocidad media sea menor allí.

Las oscilaciones por debajo de la unidad o con colores claros indican que las oscilaciones tienen mayor magnitud en la estación #1 o de referencia, mientras que las oscilaciones por encima de 1 o colores oscuros indican que las oscilaciones han sido más acusadas en la estación #2 o secundaria. En la gráfica anterior se puede observar que las oscilaciones diarias son mayores en la estación 2 (zona oscura horizontal correspondiente a frecuencia  $f = 1$  ciclo/día). El resto de frecuencias muestra alternancias en sentido horizontal entre zonas claras y oscuras, indicando que el ratio entre la magnitud de las oscilaciones es relativamente variable.

## 2.7 Coherencia entre dos series temporales

En el caso hipotético que la serie temporal medida en una estación fuese igual a la medida en la otra estación multiplicada por una constante y sumada una desviación constante, el coeficiente de correlación sería la unidad. Si el valor instantáneo medido en una estación fuese independiente del medido en la otra estación, entonces el coeficiente de correlación sería nulo.

En la práctica, las oscilaciones que se observan en una estación se reflejan parcialmente y con un cierto retraso o adelanto en la otra. Como hay una relación temporal entre las señales, es preferible utilizar la función de autocorrelación normalizada entre las dos señales, en vez del simple coeficiente de correlación.

Una de las técnicas más utilizadas para señales estacionarias es la coherencia, que muestra el coeficiente de correlación entre las oscilaciones de una cierta frecuencia entre las dos señales. Es de esperar que las fluctuaciones lentas sean bastante coherentes puesto que los cambios meteorológicos afectan amplias zonas geográficas. Por otra parte, las variaciones diurnas y semidiurnas están relacionadas en amplias zonas debido a la relación que existe con la radiación solar. Dado que las oscilaciones tienen magnitud y fase, la coherencia  $\vec{\gamma}_{\#1,\#2}$  es una magnitud compleja que tiene un módulo entre 0 y 1 (como el coeficiente de correlación) y un desfase, que representa el retraso (ángulos positivos) o el adelanto (ángulos negativos) de las oscilaciones en

la segunda magnitud respecto la de referencia. Se puede demostrar que la coherencia es la transformada de Fourier de la función de correlación entre las señales normalizada.

La coherencia a una determinada frecuencia  $f$  es nula si las señales presentan oscilaciones a la frecuencia  $f$  de magnitud independiente entre sí o con un desfase totalmente aleatorio, o bien con una relación totalmente no lineal entre los fasores. El argumento de la coherencia corresponde al desfase promedio  $\varphi$  entre las oscilaciones de frecuencia  $f$  (el retraso o adelanto promedio  $\tau$  se obtiene dividiendo el desfase  $\varphi$  en radianes por la frecuencia angular  $\omega = 2\pi f$ ).

### 2.7.1 Relación entre la fase y módulo de la coherencia

Existen dos diferencias principales entre el ratio entre espectrogramas y el módulo de la coherencia:

- El módulo de la coherencia está normalizado entre 0 y 1.
- Ambas magnitudes pueden exhibir oscilaciones de una cierta frecuencia  $f$  pero en donde el retraso o adelanto entre ellas no sea constante. En ese caso, el ratio entre espectrogramas mostraría la relación entre las magnitud promedio de las oscilaciones, pero la coherencia sería nula. Esta discrepancia entre ratio de espectrograma y módulo de la coherencia es típica de la relación no lineal y compleja de la atmósfera.

Si las perturbaciones que se observan en una estación, se experimentan con un cierto retraso o adelanto  $\tau = \varphi / (2\pi f)$  constante en el tiempo (el periodo que cuesta viajar la perturbación). Esta hipótesis de turbulencia congelada o de Taylor implica que la fase de la coherencia sea  $\varphi = 2\pi f \tau$ . Bajo esta hipótesis, el desfase es un valor determinístico y proporcional a la frecuencia y, por tanto, la coherencia será la unidad.

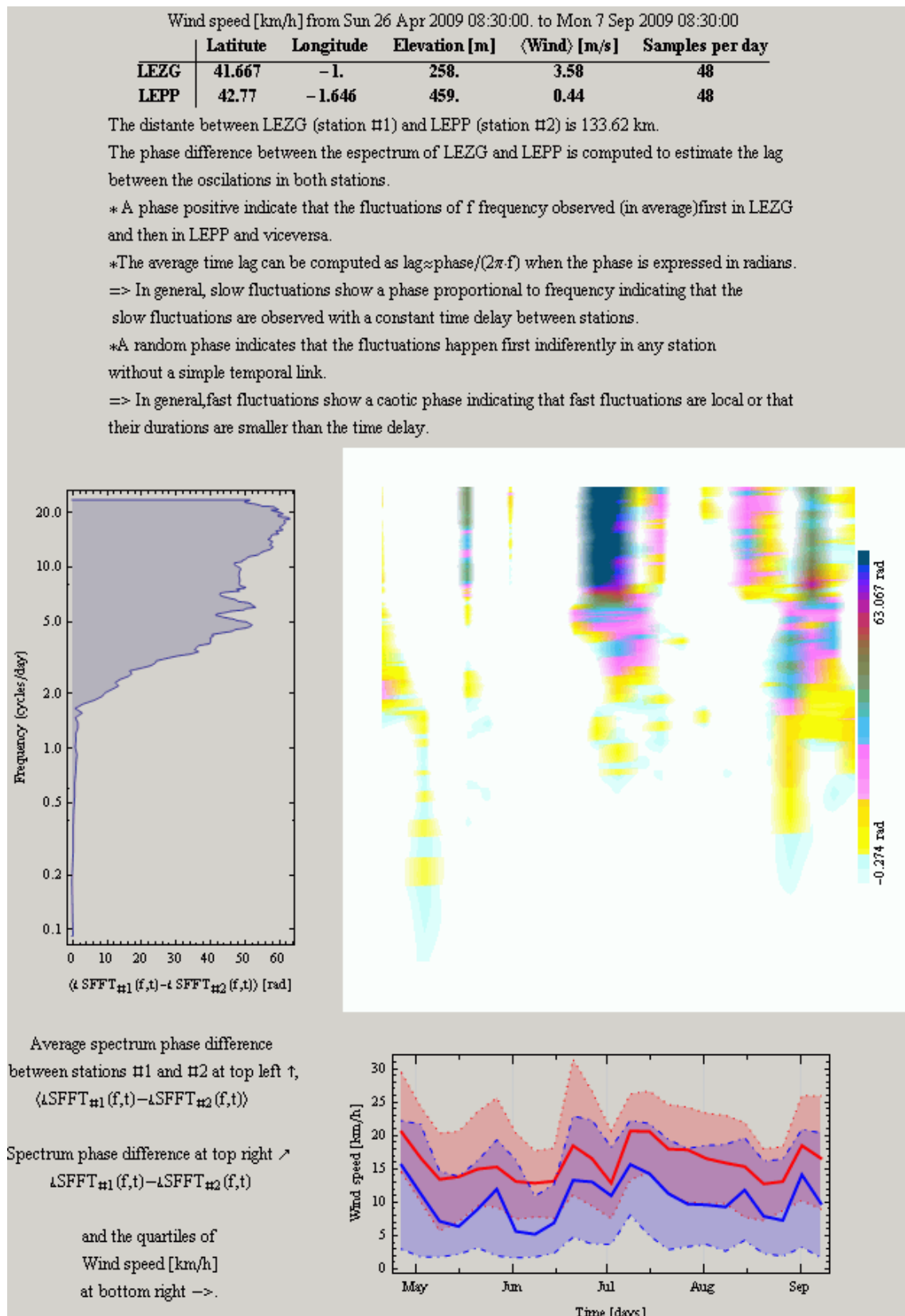
En la práctica, las perturbaciones evolucionan mientras se transmiten en la atmósfera y por ello la coherencia de las señales es menor de la unidad.

## 2.8 Fase de la coherencia entre dos estaciones (desfase entre los espectros)

La fase de la coherencia indica el retraso medio  $\tau$  entre las oscilaciones de cada serie temporal de frecuencia  $f$ . La fase se suele plegar al rango  $[-\pi, +\pi]$  o  $[0, 2\pi]$  por conveniencia, pero el retraso o adelanto entre las oscilaciones pueden exceder un periodo de oscilación ( $\tau > 1/f$ ).

En tal caso, la fase puede exceder del rango  $[-\pi, +\pi]$  o  $[0, 2\pi]$  y es importante desplegar la frecuencia para obtener una estimación real del retraso entre oscilaciones utilizando la fórmula  $\tau = \varphi / (2\pi f)$ . Los algoritmos básicos detectan saltos entre dos líneas espectrales de más de  $\pi$  radianes, pero en presencia de ruido y fenómenos no lineales es conveniente utilizar métodos más robustos. Para estimar la fase real del espectrograma se pueden utilizar algoritmos 2-D como los que se utilizan en tratamiento de imágenes (ver [2]).

La gráfica siguiente muestra el desfase entre los espectros estimado a la derecha y la fase de la coherencia a la izquierda. Por conveniencia se ha añadido los cuartiles de las dos señales en la parte inferior.



La estimación de la fase a bajas frecuencias no presenta problemas de estabilidad, ya que las señales muestran retrasos menores que el periodo de la oscilación. Estas oscilaciones lentas se observan con una diferencia de tiempo aproximadamente constante entre estaciones y para dichas oscilaciones la hipótesis de Taylor es aproximadamente válida.

Las oscilaciones intradía sí presentan retrasos significativamente mayores al periodo de la oscilación y la fase está muy replegada. Por tanto, es difícil estimar con precisión el número de pliegues de la fase para frecuencias mayores a 2 ciclos/día (oscilaciones más rápidas que las semidiurnas). El gráfico de intensidad muestra la elevada variabilidad de la fase de las oscilaciones intradía. Esta variabilidad indica que las fluctuaciones rápidas pueden ocurrir indistintamente en cualquiera de las dos estaciones primero, sin una relación temporal simple. Para dichas oscilaciones rápidas, la hipótesis de Taylor no es válida y estas fluctuaciones se pueden considerar locales y esencialmente independientes entre las dos estaciones.

## ***2.9 Módulo de la coherencia entre dos estaciones***

El módulo de la coherencia es muy informativo. La coherencia a la frecuencia  $f$  de las señales no es constante en el tiempo. En el gráfico de la página siguiente se puede ver zonas oscuras, que indican que se ha observado en ambas estaciones fluctuaciones significativas en el instante y frecuencia correspondiente. Las zonas blancas indican que no se han observado fluctuaciones significativas de las características correspondientes a las coordenadas en los ejes tiempo-frecuencia en, al menos, una de las dos estaciones.

Un ejemplo de la información que se puede obtener del módulo de la coherencia es la gráfica de la siguiente página. La gráfica muestra que las fluctuaciones lentas muestran una fuerte correlación (coherencia cerca de la unidad) hasta una frecuencia cerca de 0,3 ciclos/día entre los aeropuertos de Zaragoza y Pamplona. Entre 0,3 ciclos/día y 0,7 ciclos día, la coherencia disminuye hasta un valor de 0,2. Sin embargo, aumenta súbitamente para fluctuaciones diarias ( $f=1$  ciclo/día) debido a que la dinámica atmosférica y el calentamiento debido a la radiación solar relaciona las oscilaciones diarias entre emplazamientos lejanos. Este fenómeno también ocurre con las oscilaciones de frecuencia  $f=3$  ciclos/día (3 picos locales de viento y 3 periodos de menor viento por día) y otras frecuencias armónicas debido a que la modulación diaria del viento no es totalmente senoidal.

Exceptuando las frecuencias armónicas, las oscilaciones intradía están poco correladas y esto se puede deber a que las oscilaciones rápidas tienen una extensión geográfica significativamente menor que la distancia entre las estaciones meteorológicas (133 km).

Wind speed [km/h] from Sun 26 Apr 2009 08:30:00. to Mon 7 Sep 2009 08:30:00

	Latitude	Longitude	Elevation [m]	⟨Wind⟩ [m/s]	Samples per day
LEZG	41.667	-1.	258.	3.58	48
LEPP	42.77	-1.646	459.	0.44	48

The distance between LEZG (station #1) and LEPP (station #2) is 133.62 km.

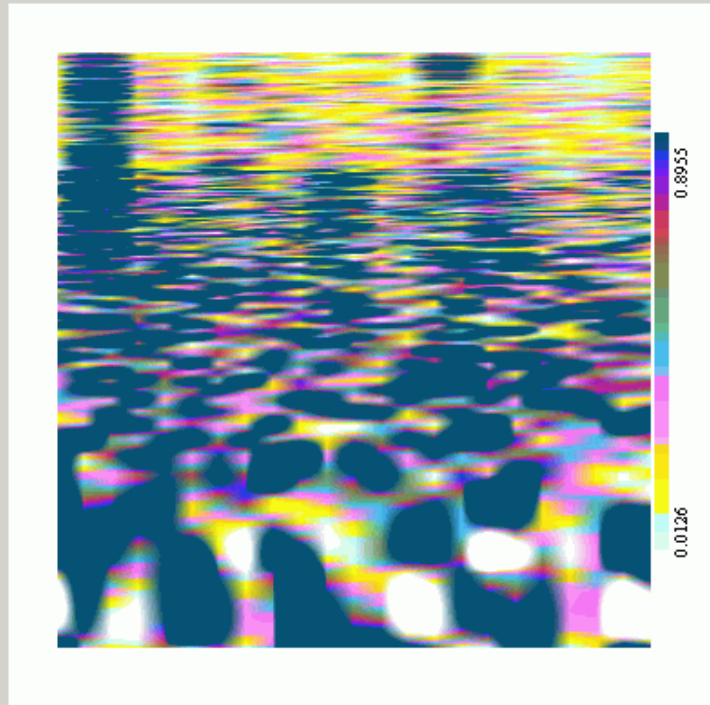
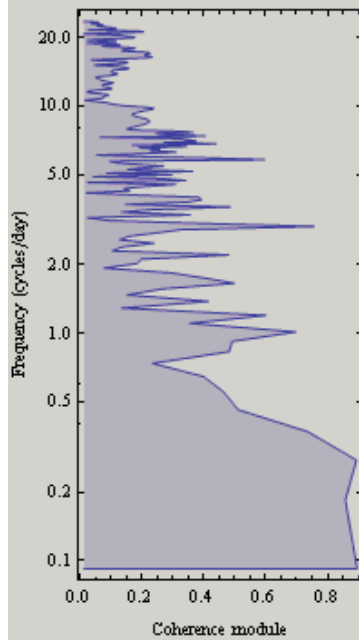
The coherence between the spectrum of LEZG and LEPP indicate the correlation between the oscillation magnitude at a given frequency in both stations.

\* A coherence near unity indicate that the fluctuations are almost fully linearly correlated and a coherence near zero indicate that the fluctuations are not linearly correlated.

=> In general, slow fluctuations show a strong correlation (coherence near unity) with a constant time delay between stations.

\* A random phase indicates that the fluctuations happen first indifferently in either station without a simple temporal link.

=> In general, fast fluctuations show a low correlation (coherence near zero) and random time delay indicating that fast fluctuations are local.



Average module of coherence between

stations #1 and #2 at top left ↑,

$$\frac{|\langle \text{SFFT}_1[f,t] \rangle \langle \text{SFFT}_2^*[f,t] \rangle|}{\sqrt{\text{PSD}_1[f] \text{PSD}_2[f]}}$$

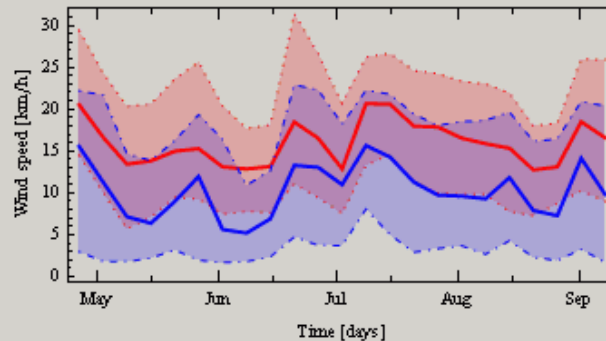
estimated from the top right ↗

$$\frac{|\text{SFFT}_1[f,t] \langle \text{SFFT}_2^*[f,t] \rangle|}{\sqrt{\text{PSD}_1[f] \text{PSD}_2[f]}}$$

and the quartiles of

Wind speed [km/h]

at bottom right →.

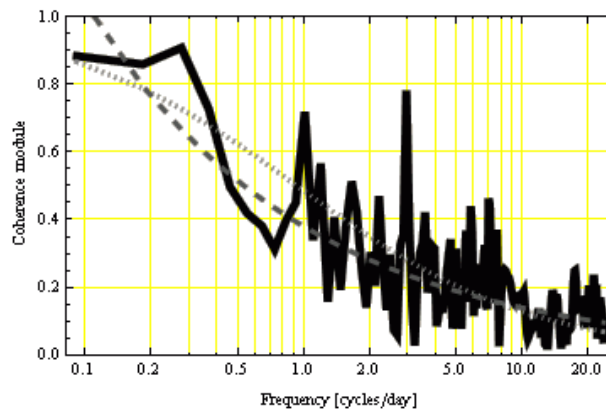


## 2.10 Conclusión final

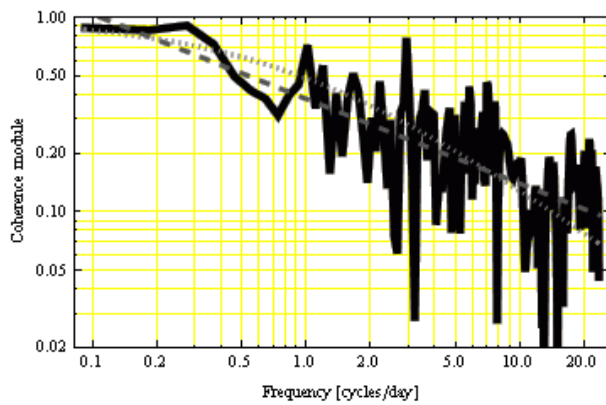
La siguiente gráfica muestra un resumen de la coherencia entre las estaciones y lapso promedio entre las fluctuaciones.

	Module of coherence[f]	Appearance
Measured module of coherence	$\frac{ \langle SFFT_1[f,t] \cdot SFFT_2^*[f,t] \rangle }{\sqrt{PSD_1[f] PSD_2[f]}}$	thick, solid line
Fractional model of coherence module	$\frac{0.971833}{0.971833 + 1.02898 f^{0.807536}}$	thin, dotted line
Power law model of coherence module	$\frac{0.28061}{f^{0.435098}}$	thin, long dashed line

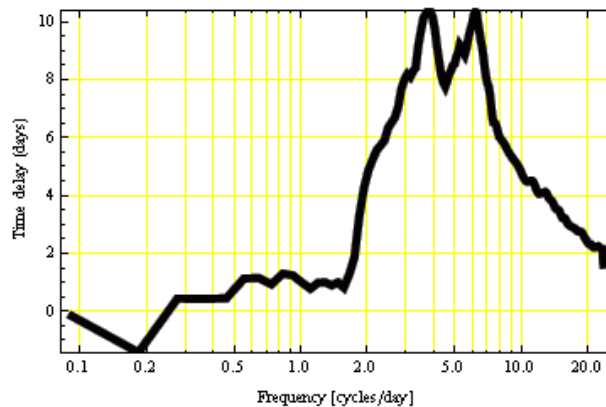
Comparison of the models in semi-logarithmic plot:



Comparison of the models in double-logarithmic plot:



Taylor hypothesis of frozen turbulence: Average time delay (in days) between the fluctuations in LEZG respect LEPP for a given frequency



En las estaciones de Pamplona y Zaragoza, separadas 133 km, el módulo de la coherencia, salvo a las frecuencia diurna y sus armónicos, se puede aproximar por un modelo fraccionario que decae con orden  $0,81 \approx 5/6$ . Es decir, la tendencia de la coherencia se comporta de forma parecida a los espectros habituales del viento (Kaimal, Von Karman,...), que decaen con orden  $5/6$ .

La tendencia de la coherencia se reduce a la mitad cerca de la frecuencia diaria, lo que indica que al agregar la generación eólica de los alrededores de Pamplona y de Zaragoza se produce, en promedio, un filtrado de las oscilaciones de frecuencias intradiarias no armónicas, con orden  $0,81$  (un filtrado menor que el que se esperaría de un filtro paso bajo de primer orden). No obstante, el comportamiento real se aleja significativamente del promedio en instantes concretos, tal como se ha visto en el análisis tiempo-frecuencia del viento.

El retraso entre la observación de una fluctuación en una estación y otra no es constante. Esto es una pequeña muestra de la complejidad de la predicción meteorológica. El retraso entre las observaciones depende grandemente de la dirección del viento, que no se ha considerado en esta comparación. Las estaciones meteorológicas se encuentran alineadas, en gran medida, con las dos direcciones de viento predominante (cierzo y bochorno). Por tanto, las conclusiones que se obtienen del retraso deben tomarse como valores medios, representativos de la dirección del viento más habitual (cierzo). Con bochorno, la diferencia de tiempo puede ser a la inversa, ya que los dos vientos predominantes tienen direcciones prácticamente opuestas.

Las oscilaciones que duran varios días se suelen presentar con un día de retraso (oscilaciones de 5 días de periodo o  $f \sim 0,2$  ciclos/día) o con un día de antelación (rango de frecuencias  $0,3$  ciclos/día  $< f < 1,5$  ciclos/día).

A partir de  $1,5$  ciclos/día (fluctuaciones intradiarias), el módulo de la coherencia tiene un valor alrededor de  $0,3$  o menor y, debido a la baja coherencia, la estimación de la fase tiene mucha incertidumbre, dependiendo en exceso del algoritmo utilizado y de los datos suministrados. En todo caso, retraso de hasta 10 días para fluctuaciones intradiarias no son verosímiles y no se puede concluir ningún patrón temporal con las herramientas utilizadas.

### 3 Bibliografía

- [1] J. Mur, "Wind Power Variability in the Grid", Ph.D Thesis, Zaragoza University, October 2009.
- [2] Dennis C. Ghiglia, Mark D. Pritt, "Two-Dimensional Phase Unwrapping : Theory, Algorithms, and Software", June, 1998.