

CB 1017360
17451

Sig: OT
SUSOT
64



NOTA TÉCNICA DEL SERVICIO DE
MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL TIEMPO

10 4 AGO 1997

Análisis bivariante del viento a 10 m por interpolación óptima

Alberto Cansado Auría
Servicio de Modelización Numérica del Tiempo
Nota Técnica nº 64

AEMET-BIBLIOTECA



1017360

Indice

1. Introducción	1
2. Desarrollo Teórico	2
3. Elección del modelo de correlación	5
4. El cálculo de las covarianzas	6
5. Descripción de los experimentos	7
5.1 Experimentos univariantes	7
5.2 Experimentos multivariantes	8
5.2.1 Observación única	13
5.2.2 Observaciones reales sin dependencia en la vertical y $v= 0.3$. Experimento WND037	16
5.2.3 Observaciones reales con dependencia en la vertical y $v= 0.3$. Experimento WND038	17
5.2.4 Relajación de los controles de calidad de las observaciones. Experimento WND039	20
5.2.5 Aumento del error de las observaciones. Experimento WND040	24
5.2.6 Experimento con flujo totalmente divergente $v= 1.0$. Experimento WND041	30
5.2.7 Experimento con flujo totalmente rotacional $v= 1.0$. Experimento WND042	31
6. Estudio de los histogramas	39
7. Aspectos informáticos. Modificaciones en el software del análisis	43
8. Conclusiones	44
9. Agradecimientos	45
Bibliografía	46

Análisis bivariante del viento a 10 m por interpolación óptima

Alberto Cansado Auría
Servicio de modelización numérica del tiempo
21 / 7 / 2003

1.- Introducción

En el trabajo anterior, se introdujo el campo de presión a nivel del mar en el análisis de superficie de HIRLAM para su utilización con fines de diagnóstico como un análisis que, en principio, ofrece ventajas frente al que se viene utilizando ahora de forma operativa basada en análisis de Barnes.

Posteriormente se continuó ampliando el sistema de análisis de superficie de HIRLAM, siempre con fines de diagnóstico, a una nueva variable: el viento a 10 metros. Además se decidió que dicho análisis no fuera univariante (analizando las componentes u y v del viento de forma independiente) sino multivariante (analizando ambas componentes de forma simultánea)

El algoritmo de interpolación óptima permite llevar a cabo este tipo de análisis simultáneo de varias variables, en este caso las componentes u y v del viento a 10 m. El algoritmo para dos variables (componentes u y v del viento) debe contener cuatro tipos de covarianzas para los errores del background. Dos de ellas son autocorrelaciones C_{uu} y C_{vv} . Las otras dos son correlaciones cruzadas: C_{uv} y C_{vu} . La condición que deben cumplir las covarianzas cruzadas es la misma que la que ya cumplen las autocovarianzas en el análisis univariante: Los valores propios de las matrices deben ser positivos. Esta condición ha de ser verificada por cualquier matriz de covarianza y por lo tanto es necesario tener cuidado al escoger los modelos de correlación.

Por otra parte, vamos a suponer que la dependencia vertical y la horizontal son separables y por ahora no nos preocuparemos de la dependencia vertical.

Las cuatro covarianzas anteriores pueden ser relacionadas con simples autocovarianzas escalares con la ayuda del teorema de Helmholtz que permite descomponer un flujo en la suma de un término puramente divergente y uno puramente rotacional.

$$\mathbf{v} = \nabla \chi + \mathbf{k} \times \nabla \psi$$

donde χ es un potencial de velocidad y ψ es una función de corriente.

La ecuación anterior puede ser expandida para obtener la dependencia de las componentes con la función de corriente y el potencial de velocidad.

$$u = \frac{\partial \chi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial y}$$
$$v = \frac{\partial \chi}{\partial y} + \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

Las cuatro covarianzas pueden escribirse en función de χ y ψ .

2.- Desarrollo teórico

Consideremos dos posiciones en el plano (2D) que vienen dados por dos vectores de posición cuyo origen es el de un sistema de referencia dado.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1 &= (x_1, y_1) \\ \mathbf{r}_2 &= (x_2, y_2) \end{aligned}$$

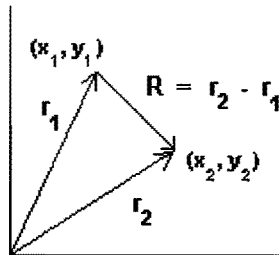


Figura 1

Definimos ahora el campo de viento horizontal que tiene unas componentes hacia el este (u) y hacia el norte (v) que en \mathbf{r}_1 y \mathbf{r}_2 valen

$$\begin{aligned} u_1 &= u(x_1, y_1) & v_1 &= v(x_1, y_1) \\ u_2 &= u(x_2, y_2) & v_2 &= v(x_2, y_2) \end{aligned}$$

Existirán, por lo tanto, cuatro covarianzas en estos dos puntos \mathbf{r}_1 y \mathbf{r}_2 . Para mayor comodidad vamos a establecer una nueva notación para estas covarianzas a las que denotaremos del siguiente modo:

$$\begin{aligned} C_{uu}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) &= \langle u_1 u_2 \rangle \\ C_{uv}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) &= \langle u_1 v_2 \rangle \\ C_{vu}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) &= \langle v_1 u_2 \rangle \\ C_{vv}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) &= \langle v_1 v_2 \rangle \end{aligned}$$

Vamos a comenzar calculando $C_{uv}(x_1, y_1, x_2, y_2) = \langle u_1 v_2 \rangle$

Sustituyendo u y v por su expresión en función de χ y ψ tenemos que:

$$\langle u_1 v_2 \rangle = - \left\langle \frac{\partial \psi_1}{\partial y_1} \frac{\partial \psi_2}{\partial x_2} \right\rangle - \left\langle \frac{\partial \psi_1}{\partial y_1} \frac{\partial \chi_2}{\partial y_2} \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \chi_1}{\partial x_1} \frac{\partial \psi_2}{\partial x_2} \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \chi_1}{\partial x_1} \frac{\partial \chi_2}{\partial y_2} \right\rangle$$

donde

$$\psi_1 = \psi(x_1, y_1) \quad \chi_1 = \chi(x_1, y_1)$$

$$\psi_2 = \psi(x_2, y_2) \quad \chi_2 = \chi(x_2, y_2)$$

Si además suponemos que el flujo es homogéneo, se cumplirá que las covarianzas no son función de los vectores \mathbf{r}_1 y \mathbf{r}_2 , sino del vector diferencia: $\mathbf{R} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$.

$$C_{uv}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = C_{uv}(x_1, y_1, x_2, y_2) = C_{uv}(X, Y) = C_{uv}(\mathbf{R})$$

y donde $X = x_2 - x_1$ e $Y = y_2 - y_1$.

Vamos a calcular el primer término del segundo miembro.

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{\partial \psi_1}{\partial y_1} \frac{\partial \psi_2}{\partial x_2} \right\rangle &= \left\langle \lim_{\Delta y_1 \rightarrow 0} \left[\frac{\psi_1(x_1, y_1 + \Delta y_1) - \psi_1(x_1, y_1)}{\Delta y_1} \right] \frac{\partial \psi_2}{\partial x_2} \right\rangle = \\ &= \lim_{\Delta y_1 \rightarrow 0} \left[\frac{\left\langle \psi_1(x_1, y_1 + \Delta y_1) \frac{\partial \psi_2}{\partial x_2} \right\rangle - \left\langle \psi_1(x_1, y_1) \frac{\partial \psi_2}{\partial x_2} \right\rangle}{\Delta y_1} \right] = \\ &= \frac{\partial}{\partial y_1} \left\langle \psi_1 \frac{\partial \psi_2}{\partial x_2} \right\rangle \end{aligned}$$

Repetiendo la operación para la variable x_2 y obtenemos

$$\left\langle \frac{\partial \psi_1}{\partial y_1} \frac{\partial \psi_2}{\partial x_2} \right\rangle = \frac{\partial^2}{\partial y_1 \partial x_2} \langle \psi_1 \psi_2 \rangle$$

y dado que se verifica que $y_1 = y_2 - Y$ y $x_2 = x_1 + X$

$$\left\langle \frac{\partial \psi_1}{\partial y_1} \frac{\partial \psi_2}{\partial x_2} \right\rangle = - \frac{\partial^2}{\partial Y \partial X} \langle \psi_1 \psi_2 \rangle$$

Si hacemos lo mismo con cada uno de los cuatro términos de cada una de las cuatro covarianzas del viento obtenemos las siguientes expresiones

$$\langle \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_2 \rangle = - \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \langle \psi_1 \psi_2 \rangle - \frac{\partial^2}{\partial X^2} \langle \chi_1 \chi_2 \rangle + \frac{\partial^2}{\partial X \partial Y} [\langle \psi_1 \chi_2 \rangle + \langle \chi_1 \psi_2 \rangle]$$

$$\langle \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_2 \rangle = - \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \langle \chi_1 \chi_2 \rangle - \frac{\partial^2}{\partial X^2} \langle \psi_1 \psi_2 \rangle - \frac{\partial^2}{\partial X \partial Y} [\langle \psi_1 \chi_2 \rangle + \langle \chi_1 \psi_2 \rangle]$$

$$\langle \mathbf{u}_1 \mathbf{v}_2 \rangle = \frac{\partial^2}{\partial X \partial Y} [\langle \psi_1 \psi_2 \rangle - \langle \chi_1 \chi_2 \rangle] + \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \langle \psi_1 \chi_2 \rangle - \frac{\partial^2}{\partial X^2} \langle \chi_1 \psi_2 \rangle$$

$$\langle \mathbf{v}_1 \mathbf{u}_2 \rangle = \frac{\partial^2}{\partial X \partial Y} [\langle \psi_1 \psi_2 \rangle - \langle \chi_1 \chi_2 \rangle] + \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \langle \psi_1 \chi_2 \rangle - \frac{\partial^2}{\partial X^2} \langle \chi_1 \psi_2 \rangle$$

La forma relativamente sencilla de estas covarianzas se debe a la hipótesis de homogeneidad.

Además, para derivar estas expresiones, es necesario suponer que $\langle \chi_1 \chi_2 \rangle$, $\langle \psi_1 \psi_2 \rangle$, $\langle \chi_1 \psi_2 \rangle$ y $\langle \psi_1 \chi_2 \rangle$ son funciones continuas y diferenciables.

Podemos también emplear una nomenclatura similar a la utilizada en las covarianzas entre las componentes u y v para las autocovarianzas y covarianzas cruzadas del potencial de velocidad χ y la función de corriente ψ .

$$\begin{aligned} C_{\psi\psi}(\mathbf{R}) &= \langle \psi_1 \psi_2 \rangle \\ C_{\chi\chi}(\mathbf{R}) &= \langle \chi_1 \chi_2 \rangle \\ C_{\chi\psi}(\mathbf{R}) &= \langle \chi_1 \psi_2 \rangle \\ C_{\psi\chi}(\mathbf{R}) &= \langle \psi_1 \chi_2 \rangle \end{aligned}$$

Haciendo la suposición adicional de isotropía, las covarianzas de χ y ψ ahora sólo dependerán del módulo del vector que une los dos puntos (x_1, y_1) y (x_2, y_2) . Dicho de otra forma: dependen sólo de la distancia entre los puntos.

Hay que decir que el hecho de suponer isótropas las covarianzas $C_{\psi\psi}$, $C_{\chi\chi}$, $C_{\chi\psi}$ y $C_{\psi\chi}$ no implica que C_{uu} , C_{vv} , C_{uv} y C_{vu} también lo sean necesariamente.

Introducimos ahora las funciones de correlación.

Para ello, en primer lugar definimos $E_u^2 = C_{uu}(0)$, $E_v^2 = C_{vv}(0)$.

Lo que nos mide en cierto modo la cantidad $E_u^2 + E_v^2$ es una especie de energía cinética (de los errores) del flujo horizontal.

A continuación, las funciones de correlación se definen así:

$$\begin{aligned} C_{uu}(r, \phi) &= E_u^2 \rho_{uu}(r, \phi) & C_{vv}(r, \phi) &= E_v^2 \rho_{vv}(r, \phi) \\ C_{\chi\chi}(r) &= E_\chi^2 \rho_{\chi\chi}(r) & C_{\psi\psi}(r) &= E_\psi^2 \rho_{\psi\psi}(r) \end{aligned}$$

con longitudes de correlación L_ψ y L_χ que vienen definidas por las expresiones (válidas en el caso homogéneo e isótropo) :

$$\begin{aligned} L_\psi^2 &= - \left. \frac{2\rho_{\psi\psi}}{\nabla^2 \rho_{\psi\psi}} \right|_{r=0} \\ L_\chi^2 &= - \left. \frac{2\rho_{\chi\chi}}{\nabla^2 \rho_{\chi\chi}} \right|_{r=0} \end{aligned}$$

Es posible dividir ahora la varianza de los errores de predicción en una parte divergente (v) y una parte rotacional ($1-v$). De esta forma se cumplirá que la varianza total será la suma de las varianzas de la parte divergente y la rotacional.

Asumiremos en este trabajo que los errores se reparten equitativamente en las componentes u y v del viento, de forma que tienen igual valor para ambas.

$$E_v^2 = E_u^2 = \frac{E_\chi^2}{L_\chi^2} + \frac{E_\psi^2}{L_\psi^2}$$

$$\frac{E_\psi^2}{L_\psi^2} = (1 - \nu) E_u^2$$

$$\frac{E_\chi^2}{L_\chi^2} = \nu E_u^2$$

y donde ν es la relación entre la energía cinética divergente y la energía cinética horizontal total.

Si $\nu = 0$, el flujo es completamente rotacional, mientras que si $\nu = 1$, el flujo resulta totalmente divergente.

En la atmósfera, normalmente, la componente divergente es menor que la componente rotacional, especialmente a escalas grandes (sinóptica). El artículo de Hollingsworth y Lönnberg (1986) sugiere valores de ν entre 0.1 y 0.2 para las covarianzas de los errores del background.

Otros estudios posteriores, elevan algo el grado de divergencia del viento, conforme nos adentramos en la capa límite, hasta valores próximos a 0.3.

El análisis va a depender ahora de tres parámetros: las dos longitudes de escala L_ψ y L_χ y el grado de divergencia ν . Al sintonizar el análisis debemos escoger los valores más adecuados de estos parámetros de forma que el RMS se reduzca hasta el máximo posible.

3. Elección del modelo de correlación

Ya hemos visto el desarrollo teórico de las covarianzas y ahora resulta necesario escoger el modelo de correlación de los errores del background.

Nosotros hemos escogido un modelo gaussiano. La elección no es única y existen otras posibilidades.

En otros trabajos se utilizan otro tipo de funciones, por ejemplo el análisis de altura actual de HIRLAM utiliza como función de correlación funciones de Bessel de orden cero. Los trabajos originales de Hollingsworth y Lönnberg también lo hacían.

$$\rho(r) = \sum_n A_n J_0 \left(\frac{K_n r}{D} \right)$$

Sin embargo, el escoger un modelo gaussiano hace que cumplamos automáticamente las condiciones de una matriz de correlación (definida positiva) utilizando una función muy sencilla.

Los modelos que se escogieron fueron:

$$\rho_{xx} = \exp\left(-\frac{r^2}{2L_x^2}\right)$$

$$\rho_{\psi\psi} = \exp\left(-\frac{r^2}{2L_\psi^2}\right)$$

$$\rho_{x\psi} = 0$$

con unas longitudes de escala L_x y L_ψ .

4.- El cálculo de las covarianzas

Operando podemos calcular las covarianzas entre las componentes de viento en función de las covarianzas del potencial de velocidad y de la función de corriente.

Así:

$$\langle u_i u_j \rangle = E_\psi^2 \frac{\partial}{\partial y_1} \frac{\partial}{\partial y_2} \rho_{\psi\psi}(r) + E_x^2 \frac{\partial}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_2} \rho_{xx}(r) - E_\psi E_x \left(\frac{\partial}{\partial y_1} \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial y_2} \right) \rho_{\psi x}(r)$$

$$\langle v_i v_j \rangle = E_\psi^2 \frac{\partial}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_2} \rho_{\psi\psi}(r) + E_x^2 \frac{\partial}{\partial y_1} \frac{\partial}{\partial y_2} \rho_{xx}(r) + E_\psi E_x \left(\frac{\partial}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial y_2} + \frac{\partial}{\partial y_1} \frac{\partial}{\partial x_2} \right) \rho_{\psi x}(r)$$

$$\langle u_i v_j \rangle = -E_\psi^2 \frac{\partial}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial y_2} \rho_{\psi\psi}(r) + E_x^2 \frac{\partial}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial y_2} \rho_{xx}(r) + E_\psi E_x \left(\frac{\partial}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial y_1} \frac{\partial}{\partial y_2} \right) \rho_{\psi x}(r)$$

$$\langle v_i u_j \rangle = \langle u_i v_j \rangle$$

Las correlaciones $\rho_{\psi\psi}$ y ρ_{xx} únicamente dependen de r (la distancia entre los dos puntos considerados) y r la podemos expresar en función de las coordenadas de dichos puntos como si fuera una distancia euclídea de la siguiente forma.

$$r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Ahora, aplicando la regla de la cadena podemos simplificar el cálculo de las derivadas de las funciones de correlación respecto a las coordenadas transformandolas en derivadas radiales:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} = \frac{\partial r}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial r} = -\frac{(x_2 - x_1)}{r} \frac{\partial}{\partial r}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_2} = \frac{\partial r}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial r} = \frac{(x_2 - x_1)}{r} \frac{\partial}{\partial r}$$

$$\frac{\partial}{\partial y_1} = \frac{\partial r}{\partial y_1} \frac{\partial}{\partial r} = -\frac{(y_2 - y_1)}{r} \frac{\partial}{\partial r}$$

$$\frac{\partial}{\partial y_2} = \frac{\partial r}{\partial y_2} \frac{\partial}{\partial r} = \frac{(y_2 - y_1)}{r} \frac{\partial}{\partial r}$$

De esta forma, es posible derivar simplemente respecto de r , obtener las covarianzas de forma analítica y rellenar la matriz de covarianzas que es utilizada por el algoritmo de interpolación óptima multivariante para calcular el análisis del viento a 10 m.

En primer lugar vamos a calcular los valores de E_x y E_ψ en función de E_u y de v , el parámetro que nos mide el grado de divergencia del viento.

$$E_\psi^2 = (1-v)E_u^2 L_\psi^2 \quad E_x^2 = v E_u^2 L_x^2$$

Ahora estamos en condiciones de deducir las covarianzas de las componentes del viento.

Tras un poco de cálculo llegamos a las siguientes expresiones analíticas para estas covarianzas en función del error de observación para las componentes de viento (E_u), el parámetro v y las longitudes de escala L_x y L_ψ y asumiendo $\rho_{x\psi} = 0$ tenemos.

$$\langle u_1 u_2 \rangle = (1-v) E_u^2 \left[1 - \frac{(y_2 - y_1)^2}{L_\psi^2} \right] \exp\left(\frac{-r^2}{2L_\psi^2}\right) + v E_u^2 \left[1 - \frac{(x_2 - x_1)^2}{L_x^2} \right] \exp\left(\frac{-r^2}{2L_x^2}\right)$$

$$\langle v_1 v_2 \rangle = (1-v) E_u^2 \left[1 - \frac{(x_2 - x_1)^2}{L_\psi^2} \right] \exp\left(\frac{-r^2}{2L_\psi^2}\right) + v E_u^2 \left[1 - \frac{(y_2 - y_1)^2}{L_x^2} \right] \exp\left(\frac{-r^2}{2L_x^2}\right)$$

$$\langle u_1 v_2 \rangle = \langle v_1 u_2 \rangle = (x_2 - x_1)(y_2 - y_1) E_u^2 \left[\frac{(1-v)}{L_\psi^2} \exp\left(\frac{-r^2}{2L_\psi^2}\right) - \frac{v}{L_x^2} \exp\left(\frac{-r^2}{2L_x^2}\right) \right]$$

5.- Descripción de los experimentos

Para llevar a cabo experimentos de control del análisis se utilizó la misma situación que empleamos en el caso de la presión a nivel del mar: la ciclogénesis atlántica del 5 y 6 de noviembre de 1997 que dio lugar a una "flash-flood" o inundación repentina en la ciudad de Badajoz que ocasionó más de una veintena de muertos y numerosos daños materiales. Ya mencionamos en la nota técnica anterior que esta situación no fue correctamente recogida por los modelos y, en particular, por HIRLAM.

5.1. Experimentos univariantes

En primer lugar, en el análisis de superficie se introdujeron cambios para realizar un análisis univariante del viento a 10 m. Es decir se analizaban independientemente las componentes u y v .

Se ensayaron funciones de estructura gaussiana para cada componente de la forma

$$\rho_u = \exp\left(-\frac{r^2}{2L_u^2}\right) \quad \rho_v = \exp\left(-\frac{r^2}{2L_v^2}\right)$$

y dos longitudes de escala: $L_u = L_v = 200$ km y $L_u = L_v = 100$ km.

De las dos opciones se optó por unos valores de 100 km para las longitudes de escala L_u y L_v por ser éstas la que mejor se adaptaban a nuestras necesidades - análisis mesoscalar -.

5.2 Experimentos multivariantes

Posteriormente se hicieron nuevos cambios en las rutinas del análisis de superficie para que el análisis del viento a 10 m fuera multivariante.

Como hemos visto en el cálculo de las covarianzas, en un análisis multivariante tenemos tres parámetros para sintonizar: L_x , L_ψ y ν .

Una vez hecho esto se desconectaron las covarianzas cruzadas (imponiendo que fueran iguales a 0) y se compararon con los experimentos univariantes. Para hacerlos equivalentes se buscó unas longitudes que fueran equivalentes a $L_u = L_v = 100$ km.

Se puede demostrar que la longitud de escala equivalente L_{eq} calculada en el eje Y en función de ν y de las longitudes de escala L_x , L_ψ viene dada por:

$$L_{eq}^2 = -\frac{2\rho}{\nabla^2 \rho} \Rightarrow L_{eq}^2 = \frac{L_\psi^2 L_x^2}{\nu L_\psi^2 + 3(1-\nu)L_x^2}$$

Se investigó el comportamiento de las covarianzas $\langle u u \rangle$ al movernos en el eje X y en el eje Y con diversos valores para las longitudes L_x y L_ψ y ensayando varias posibilidades ($L_x = L_\psi$, $L_x > L_\psi$, $L_x < L_\psi$).

En las siguientes gráficas vemos en azul la covarianza $\langle u u \rangle$ en el caso antiguo (univariante) y en verde la covarianza $\langle u u \rangle$ en el caso multivariante, dependiendo ya de los tres parámetros. Se estudiaron los siguientes casos:

$L_x = L_\psi$	$L_x > L_\psi$	$L_x < L_\psi$
$L_x = 100$ km $L_\psi = 100$ km	$L_x = 100$ km $L_\psi = 50$ km	$L_x = 50$ km $L_\psi = 100$ km
$L_x = 200$ km $L_\psi = 200$ km	$L_x = 200$ km $L_\psi = 100$ km	$L_x = 100$ km $L_\psi = 200$ km
$L_x = 300$ km $L_\psi = 300$ km	$L_x = 300$ km $L_\psi = 150$ km	$L_x = 150$ km $L_\psi = 300$ km

Se repitió lo mismo con las covarianzas $\langle v v \rangle$ para los mismos casos.

Como ejemplos vamos a ver dos gráficos el primero con $L_\psi = 50$ km y $L_x = 100$ km para grados de divergencia $\nu = 0.0, 0.1, 0.5$ y 1.0 . al movernos en el eje X.

El segundo tiene $L_\psi = L_x = 100$ km para los mismos valores de ν , pero al movernos sobre Y.

En las gráficas observamos:

1. La longitud equivalente, que cambia al variar ν (medida como la anchura de las curvas a determinada altura)
2. El diferente comportamiento que tienen las covarianzas para distintos grados de divergencia del viento.
3. Las covarianzas del caso multivariante no sólo llegan a anularse sino que se hacen negativas en algunos casos, frente a las univariantes (que son gaussianas puras) que no se anulan nunca.

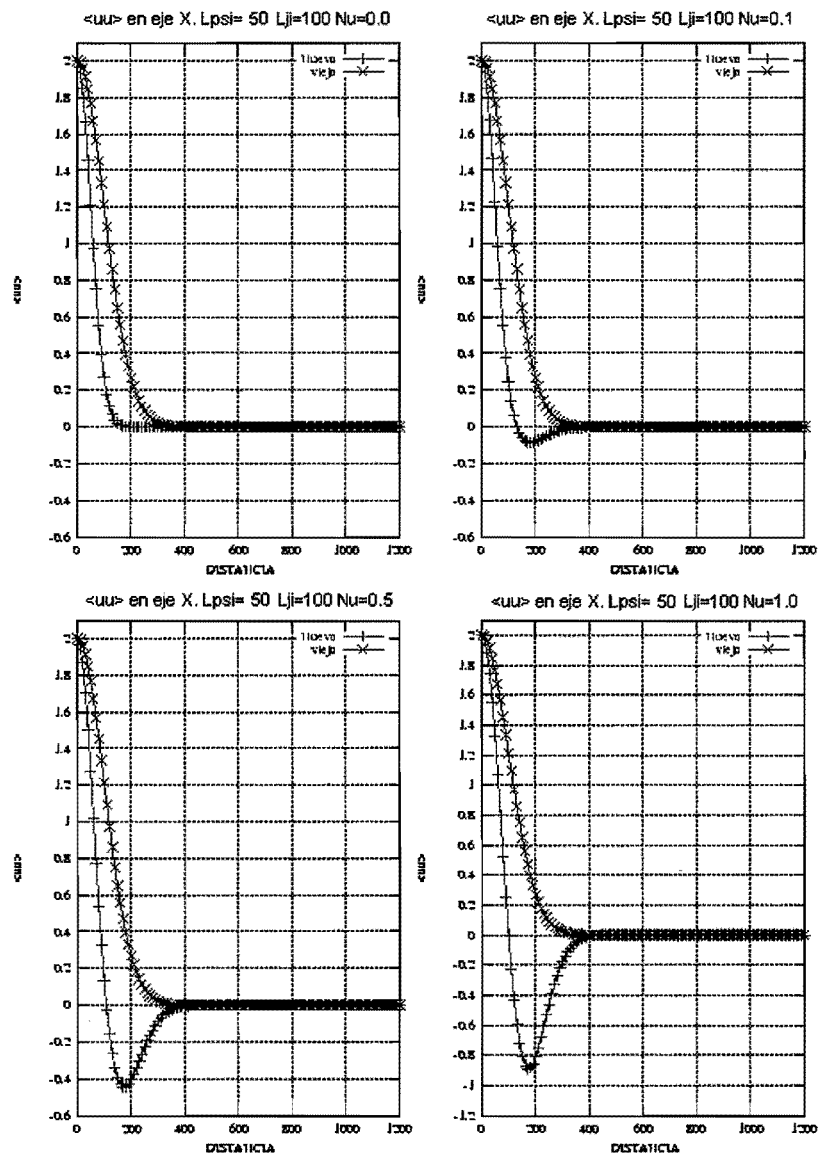


Figura 2. Dependencia de las covarianzas $\langle u u \rangle$ con la distancia al movernos a lo largo del eje X, con $L_x = 100$ km y $L_{\psi} = 50$ km para diferentes grados de divergencia

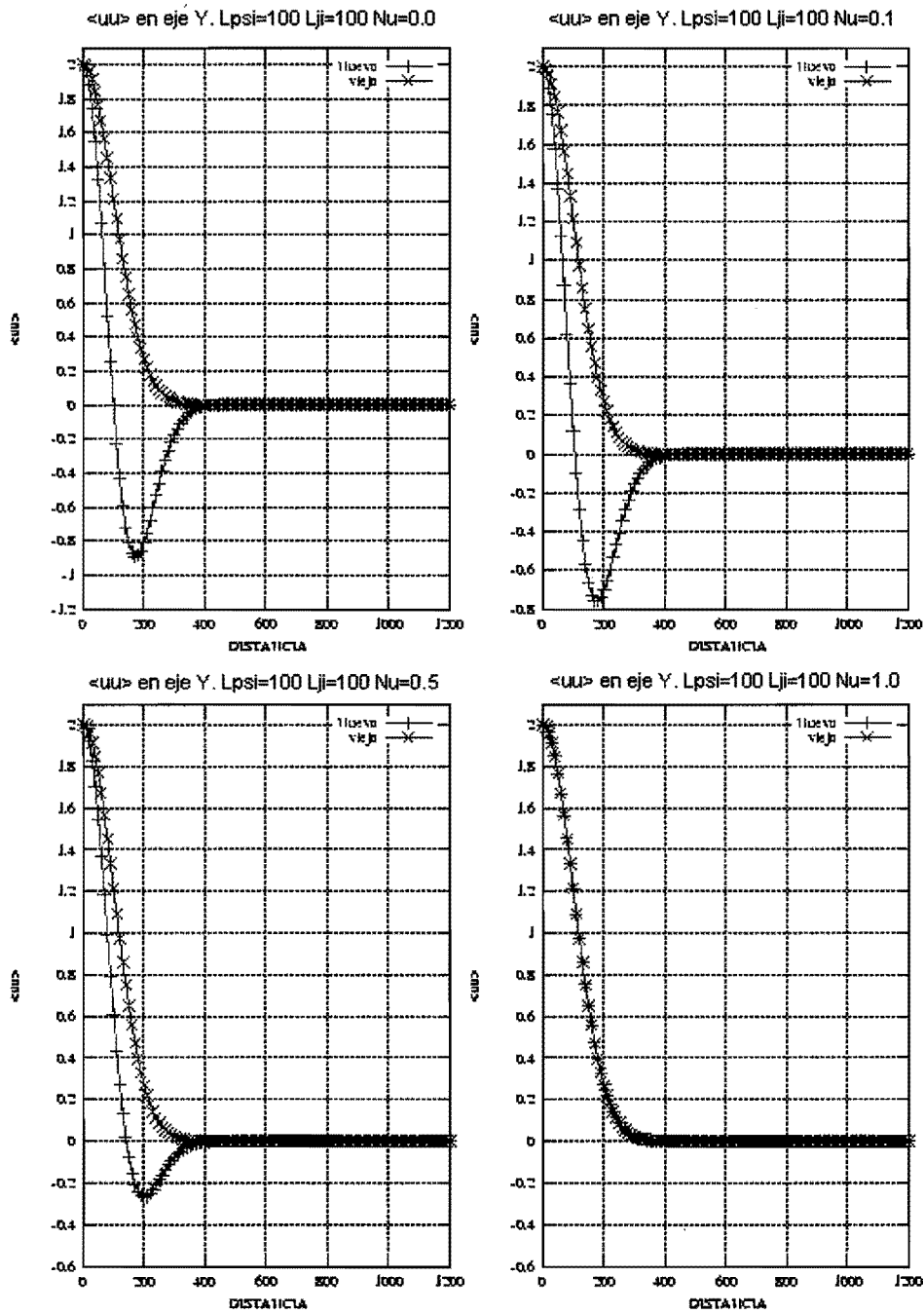


Figura 3. Dependencia de las covarianzas $\langle u \rangle$ con la distancia al movernos a lo largo del eje Y, con $L_{\chi} = 100$ km y $L_{\psi} = 100$ km para diferentes grados de divergencia

Imponiendo que L_x sea igual que L_y , para que resulte "equivalente" el experimento al univariante con $L_u = 100$ km y $L_v = 100$ km con $\nu = 0.5$ debemos escoger $L_x = L_y = \sqrt{2} L_u = 141.42$ km.

También dibujamos la covarianza $\langle v v \rangle$ para $L_x = L_y = 141.42$ km. En este caso veremos como para $\nu = 0.5$ la longitud equivalente (gráfica verde) coincide con la univariante.

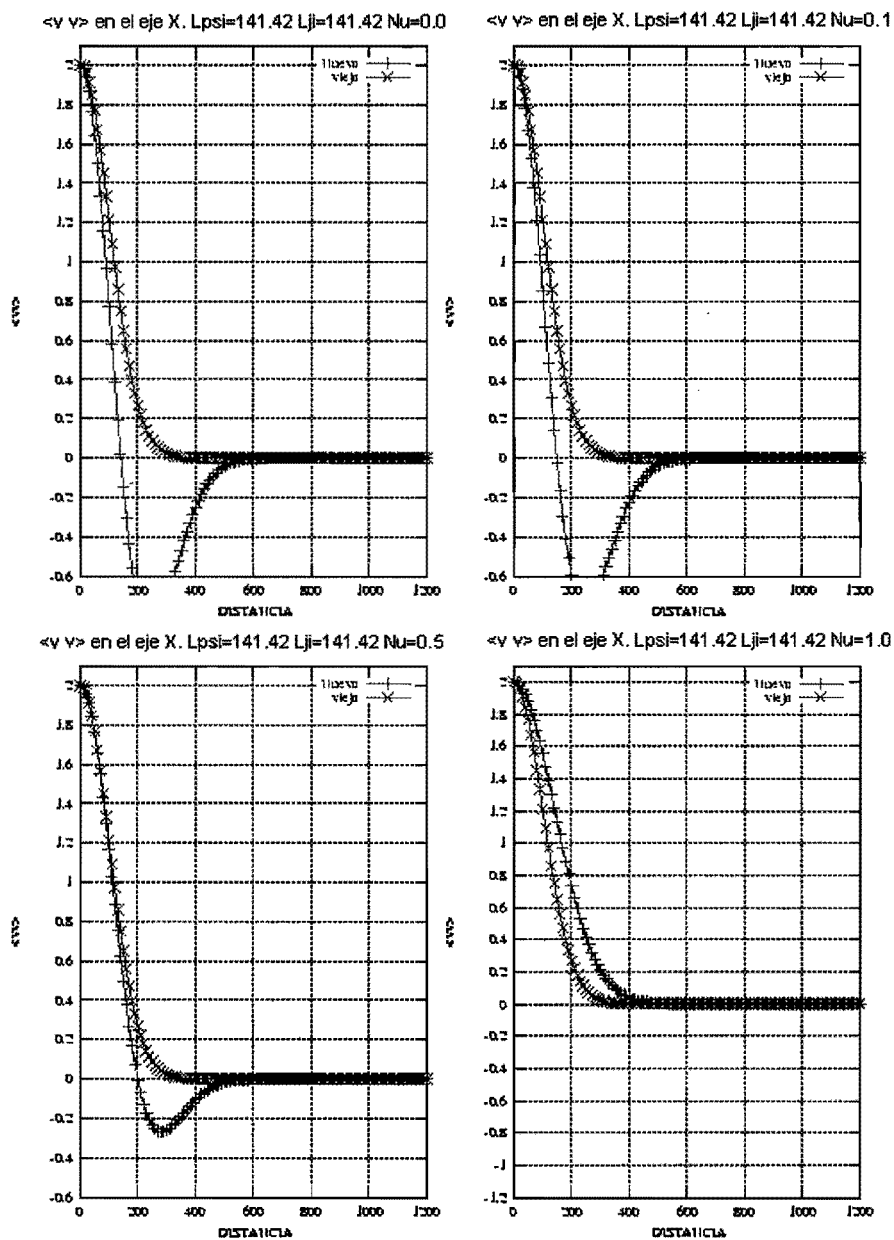


Figura 4. $\langle v v \rangle$ para el caso de $L_x = L_y = 141.42$ km

En la siguiente figura vemos como varía la longitud característica equivalente frente a v dependiendo de L_x y L_y .

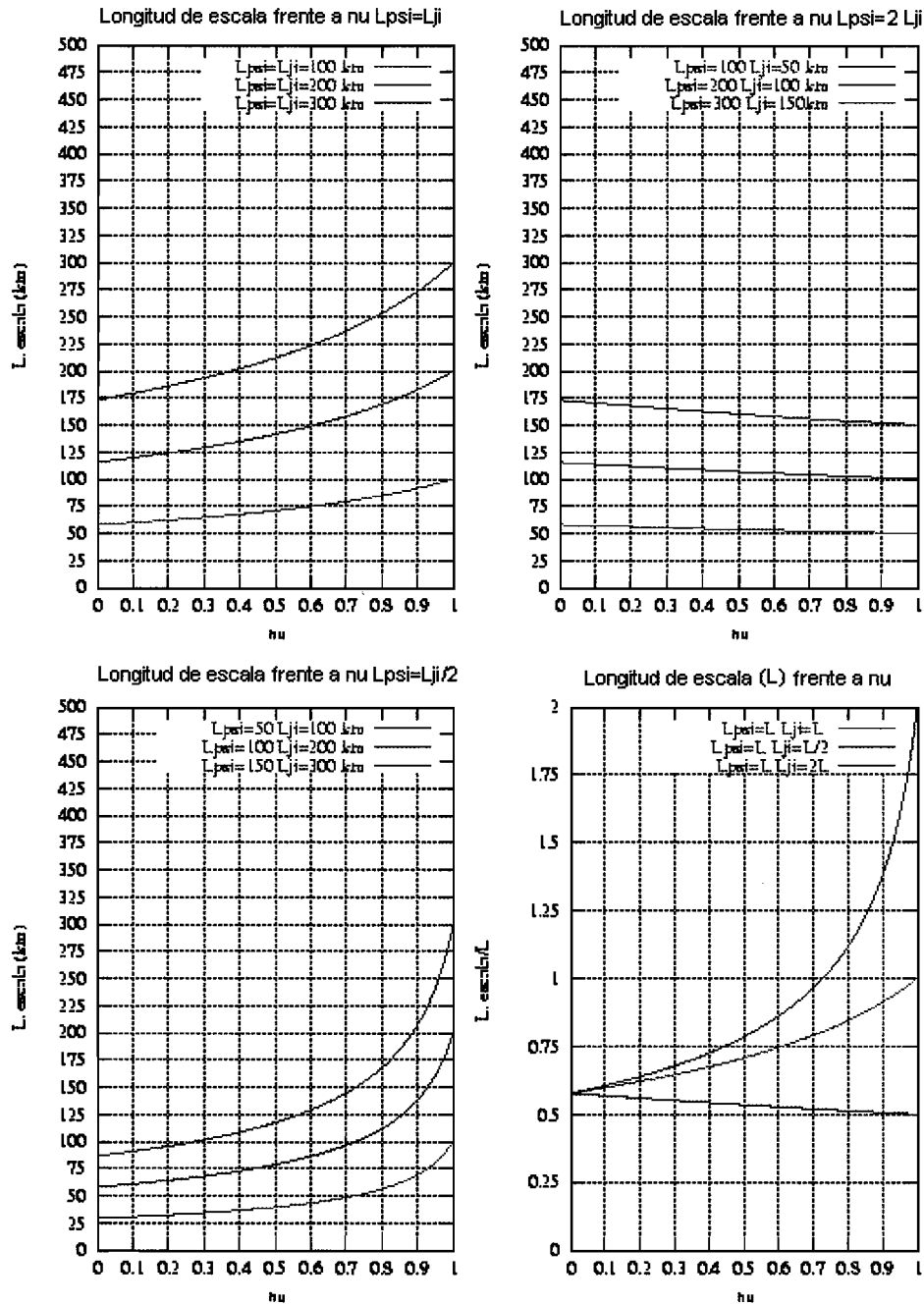


Figura 5. Longitud de escala equivalente (km) para el análisis multivariante frente al grado de divergencia v , para diferentes longitudes L_x y L_y . La última gráfica nos presenta un resumen de los resultados: longitud equivalente en unidades de L siendo L_x o L_y , tal como se indica.

El resultado fue el esperado obteniéndose análisis similares a los univariantes, lo que nos permitió comprobar que el análisis funcionaba correctamente.

5.2.1 Observación única

Los experimentos con observación única resultan muy útiles en asimilación de datos puesto que permiten observar directamente el comportamiento de la función de estructura del análisis.

En un análisis univariante las correlaciones (y por tanto las covarianzas) cruzadas son nulas siempre. Un análisis con un incremento en una componente nunca puede modificar la componente ortogonal.

En la siguiente figura podemos ver el aspecto de los incrementos del análisis para un análisis univariante del viento a 10 m en el caso de una única observación con un incremento de 1 m/s en la dirección del eje X.

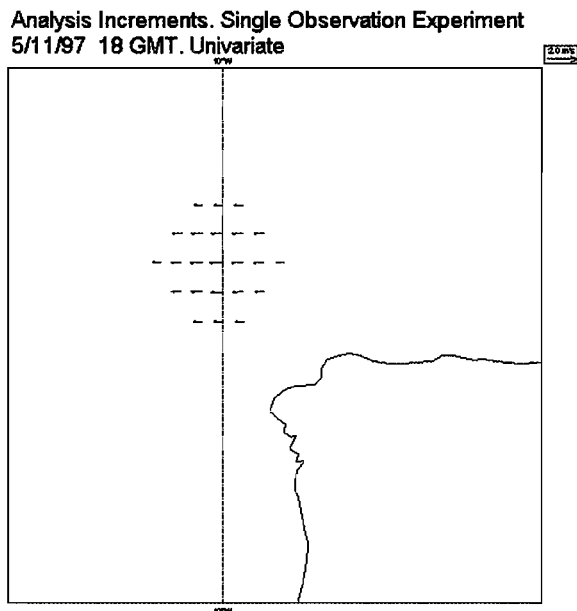


Figura 6. Incrementos del análisis para un análisis univariante del viento a 10 m con incremento unidad

La principal diferencia con los análisis multivariantes es precisamente que en este caso las covarianzas cruzadas ya no son nulas y son función de los tres parámetros antes citados

$$\langle u v \rangle = f(L_x, L_\psi, v)$$

Esto permite al análisis corregir en ambas componentes, aun cuando los incrementos de las observaciones sean nulos en una de ellas.

El siguiente paso fue verificar que el análisis de superficie multivariante del viento a 10 m calculaba adecuadamente los incrementos del análisis. Para ello se ensayó el análisis con una observación única situada al NW de las costas gallegas sobre el Atlántico (intentando evitar que la orografía influyera). Se volvieron a conectar las covarianzas cruzadas, de modo que el análisis era ya multivariante.

El dato de la observación fue tal que supusiera un incremento unidad respecto del valor interpolado en esa posición a partir del first guess.

En concreto los datos resultantes de la interpolación del first guess eran los siguientes:

Datos interpolados	
Latitud	45° N
Longitud	10° W
U interpolado	5.0951 m s ⁻¹
V interpolado	-6.4443 m s ⁻¹

Se hicieron un total de 8 pruebas, dos para cada $v = 0.0, 0.3, 0.5$ y 1.0 , con incrementos unidad en las componentes u y en v . Así los datos que se emplearon como observados fueron:

	Incremento en u		Incremento en v	
	Valor observado	Incremento de observación	Valor observado	Incremento de observación
U observado	6.0951 m s ⁻¹	1.0 m s ⁻¹	5.0951 m s ⁻¹	0.0 m s ⁻¹
V observado	-6.4443 m s ⁻¹	0.0 m s ⁻¹	-7.4443 m s ⁻¹	-1.0 m s ⁻¹

Algunos resultados, los podemos ver en las siguientes figuras:

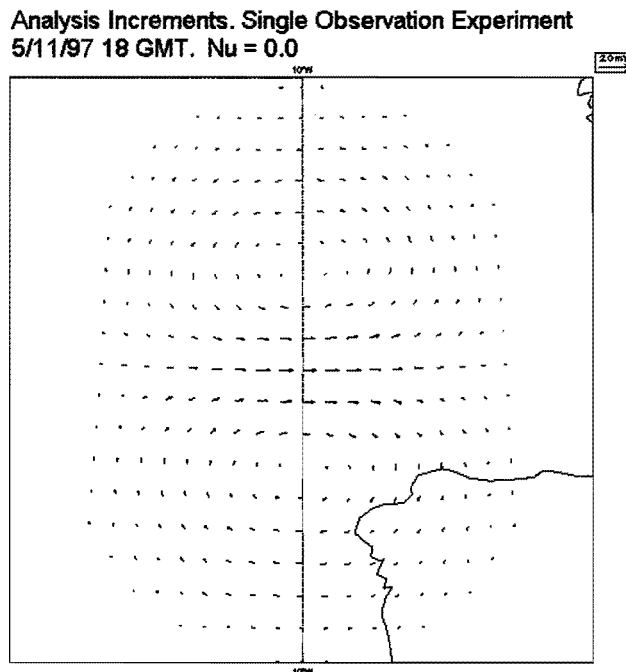


Figura 7. Incremento unidad en componente u .
Flujo totalmente rotacional

Analysis Increments. Single Observation Experiment
5/11/97 18 GMT. Nu = 1.0

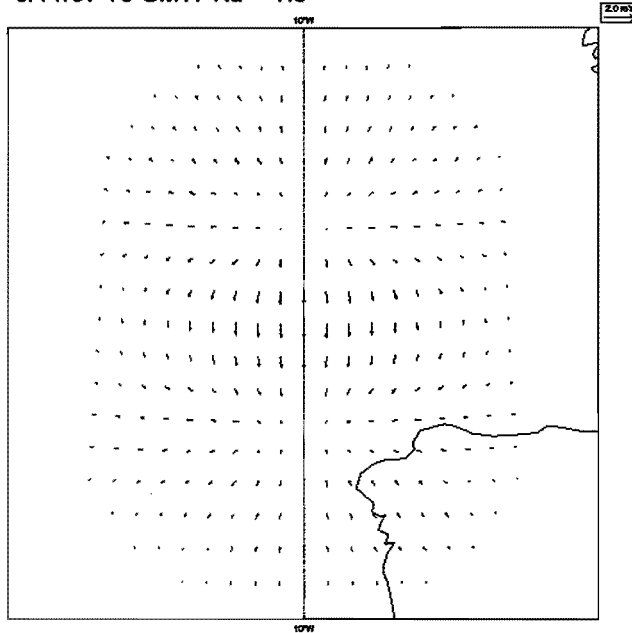


Figura 8. Incremento unidad en la componente v.
Flujo irrotacional, totalmente divergente

Analysis Increments. Single Observation Experiment
5/11/97 18 GMT. Nu = 0.3

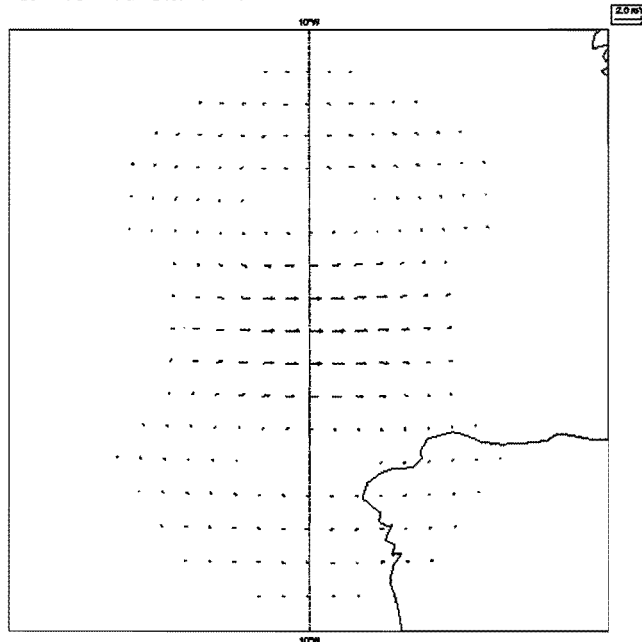


Figura 9. Incremento unidad en la componente u.
Flujo con grado de divergencia $\nu = 0.3$

Analysis Increments. Single Observation Experiment
5/11/97 18 GMT. $\nu = 0.5$

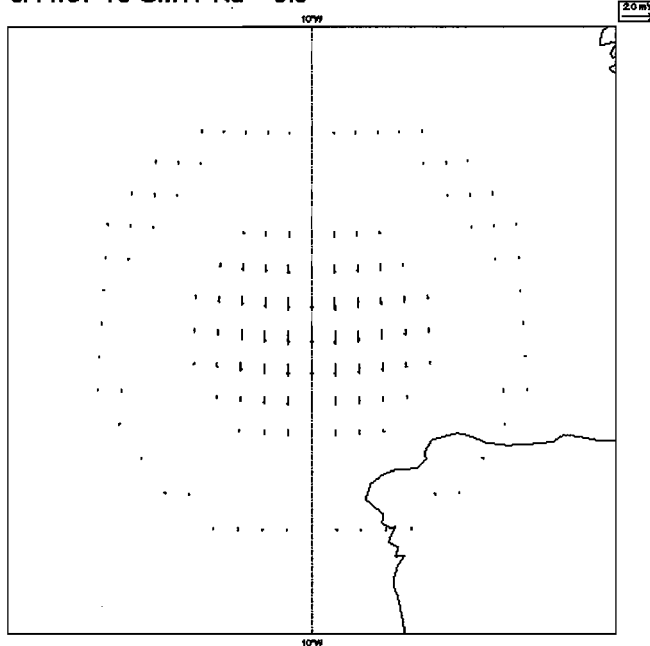


Figura 10. Incremento unidad en la componente v.
Flujo con grado de divergencia $\nu = 0.5$

Lo que observamos en este sencillo experimento es que el análisis se comporta como era de esperar al modificar el grado de divergencia ν .

Una vez comprobado el funcionamiento apropiado del análisis multivariante para una única observación se está en condiciones de probarlo con las observaciones reales del día.

5.2.2 Observaciones reales sin dependencia en la vertical y $\nu=0.3$. Experimento WND037

El siguiente experimento consistió en utilizar las observaciones reales de ese día. Se decidió escoger un grado de divergencia $\nu = 0.3$ de acuerdo con algunos artículos en los que se comprobaba que el grado de divergencia del viento aumentaba hasta hacerse mayor que 0.2 conforme nos adentrábamos en la capa límite planetaria y nos aproximábamos al suelo.

Como $L_x = L_y = 141.42$ km y $\nu = 0.3$ esto equivale a una longitud de escala equivalente para las componentes u y v del viento de 91.29 km, con lo que estaríamos aproximadamente en el entorno de otros análisis de viento que son utilizados en otros sistemas. Por ejemplo el sistema de diagnóstico de Météo-France emplea una longitud de escala de 80 km.

En cuanto a los errores, en este experimento se está utilizando un error de observación de $1/\sqrt{2}$ ms^{-1} y un error para el first guess de $\sqrt{2}$ ms^{-1} , frente a los 2 ms^{-1} y los 5 ms^{-1} respectivamente del sistema de análisis francés.

Los errores asumidos por el análisis son inferiores a las innovaciones reales en esta situación, ya que al ser la situación poco predecible, la calidad del first guess era mala. Esto va a hacer que el análisis no sea óptimo y que el error del análisis será superior al mínimo teórico (debería tender al error de las observaciones).

Sin embargo, es presumible que en una situación más standard en la que el first guess no esté tan alejado del estado real de la atmósfera, cuando el número de observaciones sea lo suficientemente elevado, el error del análisis tienda al error de las observaciones.

También se presentaron otros problemas de condicionamiento enfermo de la matriz de covarianza. Inicialmente se creyó que eran debidos a que el tamaño de las cajas de análisis resultó excesivamente grande. Inicialmente se tenían cajas de 10° y un radio de búsqueda de 2 x la diagonal. Posteriormente se bajó a 8° pero los problemas continuaron.

Sin embargo, el problema resultó encontrarse en la lectura de las observaciones de los barcos. Finalmente, se decidió asimismo continuar reduciendo el tamaño de las cajas para ahorrar tiempo de computación, ya que no afectaba a la calidad de los análisis de forma significativa. El tamaño de las cajas de análisis se redujo hasta 5° y el radio de búsqueda de las observaciones a 1.5 x la diagonal.

En cuanto a las observaciones, podemos ver en la siguiente tabla el resumen del control de las observaciones.

Experimento WND037					
Hora Día	21GMT 5/11	0 GMT 6/11	3 GMT 6/11	6 GMT 6/11	9 GMT 6/11
Observaciones activas	432	408	377	414	414
Observaciones rechazadas en el control frente al first guess	10	24	11	28	20
Observaciones rechazadas en el control frente a vecinos	48	55	55	82	74
Observaciones no activas	19	19	18	34	21

En la figura 11 podemos ver los gráficos en los que ploteamos, para cada componente, el bias y el RMS de las innovaciones y de los residuos.

En ambas componentes se consigue con este método llevar cerca de cero el bias y reducir el RMS de forma significativa al realizar el análisis.

En general se advierte que el análisis consigue acercarse más a las observaciones en la componente u (zonal) que en la v (meridiana). Esto es debido a que también el error de partida de la componente v es superior en aproximadamente un 50 % a los de la componente u, constituye una característica común a todos los análisis que vamos a hacer y, en principio, lo achacamos a la situación sinóptica.

5.2.3 Observaciones reales con dependencia en la vertical y $\nu=0.3$. Experimento WND038

El siguiente paso fue introducir en la función de estructura una dependencia en la vertical. Es una gaussiana de la forma

$$\exp\left\{-\frac{h^2}{2H^2}\right\}$$

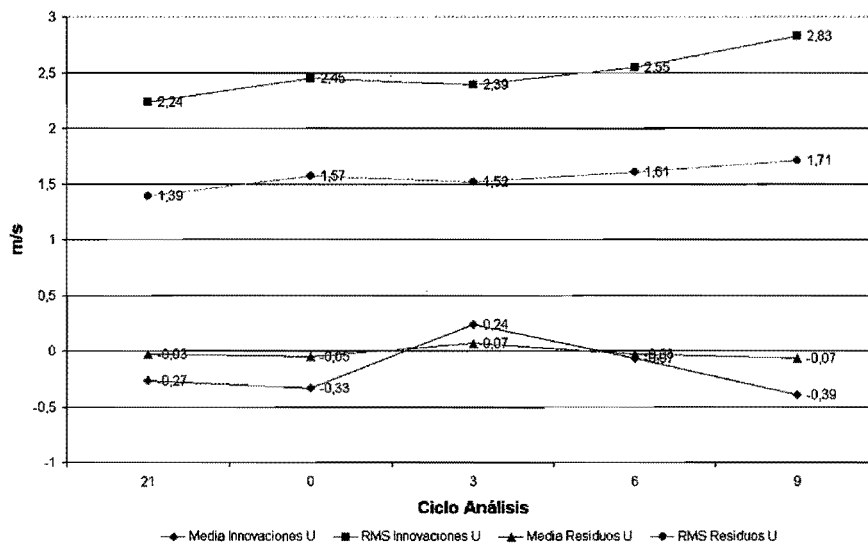
donde h es la distancia en la vertical y H una altura de escala que en nuestro caso es 400 m.

Por lo demás, todo se mantuvo exactamente igual que en el experimento anterior WND037.

El resultado del control de las observaciones de este experimento pone de manifiesto que existe un mayor número de observaciones aceptadas en el análisis y un menor número de rechazos en el control frente a vecinos.

Experimento WND038					
Hora Día	21GMT 5/11	0 GMT 6/11	3 GMT 6/11	6 GMT 6/11	9 GMT 6/11
Observaciones activas	441	418	379	431	423
Observaciones rechazadas en el control frente al first guess	10	24	11	28	20
Observaciones rechazadas en el control frente a vecinos	39	45	53	65	65
Observaciones no activas	19	19	18	34	21

COMPONENTE U VIENTO 10 m EXPERIMENTO WND037



COMPONENTE V VIENTO 10 m EXPERIMENTO WND037

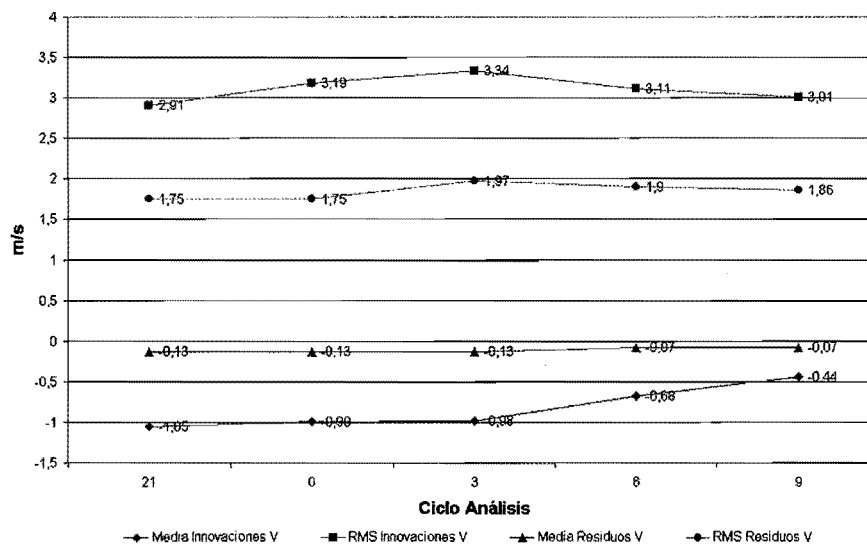


Figura 11. Bias y RMS de innovaciones y residuos para U y V en el experimento WND037

La figura 12 muestra los resultados de los bias y los RMS de las innovaciones y de los residuos para el experimento WND038.

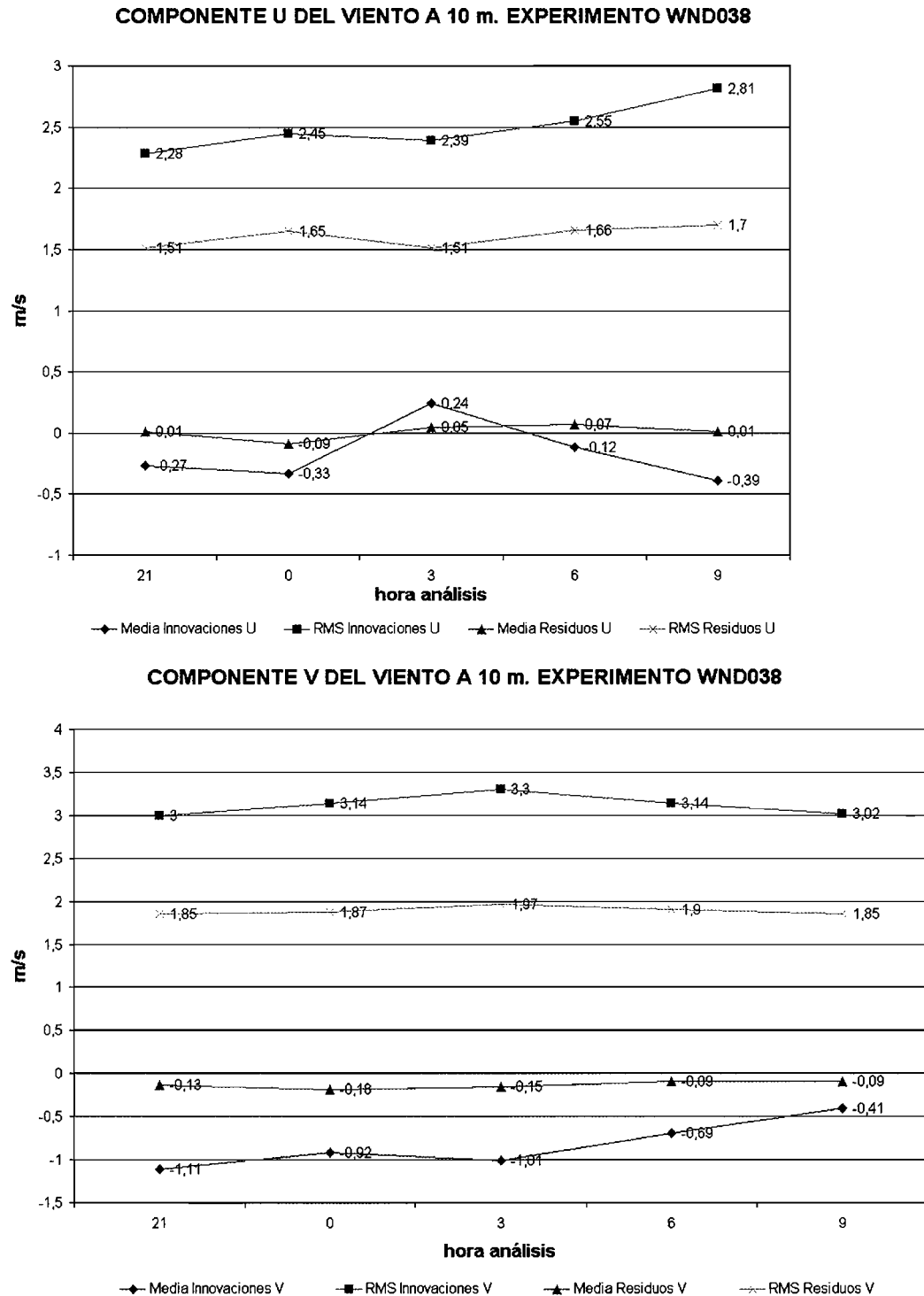


Figura 12. Bias y RMS de innovaciones y residuos para U y V en el experimento WND038

Si comparamos los experimentos WND037 y WND038 observamos primeramente que los resultados empeoran ligeramente. El RMS no consigue descender tanto y el sesgo es ligeramente mayor.

A primera vista, parece que los resultados obtenidos son peores en el caso en el que introducimos la dependencia en la vertical.

Sin embargo, es necesario tener en cuenta que las observaciones adicionales que el experimento WND038 ha asimilado son observaciones que están en el límite del rechazo, y esto puede estropear algo la estadística.

Además, lo que nosotros buscamos es un análisis que funcione lo mejor posible en situaciones extremas y para eso resulta necesario que se utilicen la mayor parte de las observaciones.

Si tenemos en cuenta estas dos consideraciones y dado que el empeoramiento en los resultados no es demasiado significativo a pesar de utilizar más observaciones, creemos que el experimento WND038 es preferible frente al WND037 puesto que utiliza un mayor número de observaciones a la hora de realizar el análisis.

Además al ver las diferencias entre los dos análisis (Figura 13) se puede comprobar como el WND038 es mejor, especialmente en las zonas donde la diferencia de altitud entre la orografía real y la del modelo es más grande (valle del Ebro, cornisa cantábrica, Pirineos) lo que refuerza aún más nuestra tesis.

5.2.4 Relajación de los controles de calidad de las observaciones. Experimento WND039

Después de llevar a cabo estos experimentos se vió que el número de observaciones rechazadas era todavía muy significativo. Había mucha información de observaciones que no eran utilizadas por tener el análisis unos controles de calidad excesivamente rígidos.

Para intentar evitar esto y que el análisis empleara la mayor cantidad de información posible se relajaron los controles de calidad, tanto del first guess como del control frente a vecinos, permitiendo que un mayor número de observaciones fueran finalmente aceptadas.

El parámetro que mide la distancia de la observación al first guess es el siguiente:

$$\frac{(ob - fg)^2}{\sigma_O^2 + \sigma_{f.g}^2} > \lim_{F.G.Check} \Rightarrow \text{RECHAZADA}$$

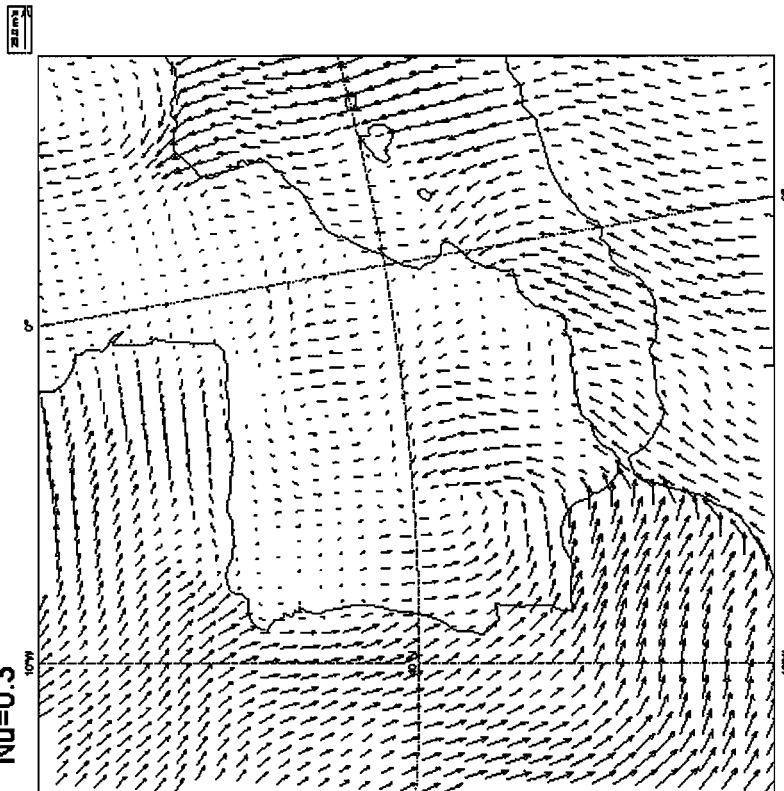
$$\frac{(ob - fg)^2}{\sigma_O^2 + \sigma_{f.g}^2} \leq \lim_{F.G.Check} \Rightarrow \text{ACEPTADA}$$

Este límite pasó de ser 25 a 225.

De esta forma se consiguió que casi no se produjeran rechazos en el control frente al first guess, dejando prácticamente todo el peso de las decisiones de calidad de las observaciones al control frente a vecinos o O.I. Check.

Es conveniente hacer esto ya que, en ocasiones, un first guess de mala calidad puede llegar a hacer que se rechacen observaciones que son correctas.

Wind 10 m. Analysis WND037 06/1 1/97 00 GMT.
Nu=0.3



Wind 10 m. Analysis WND038 06/1 1/97 00 GMT.
Nu=0.3

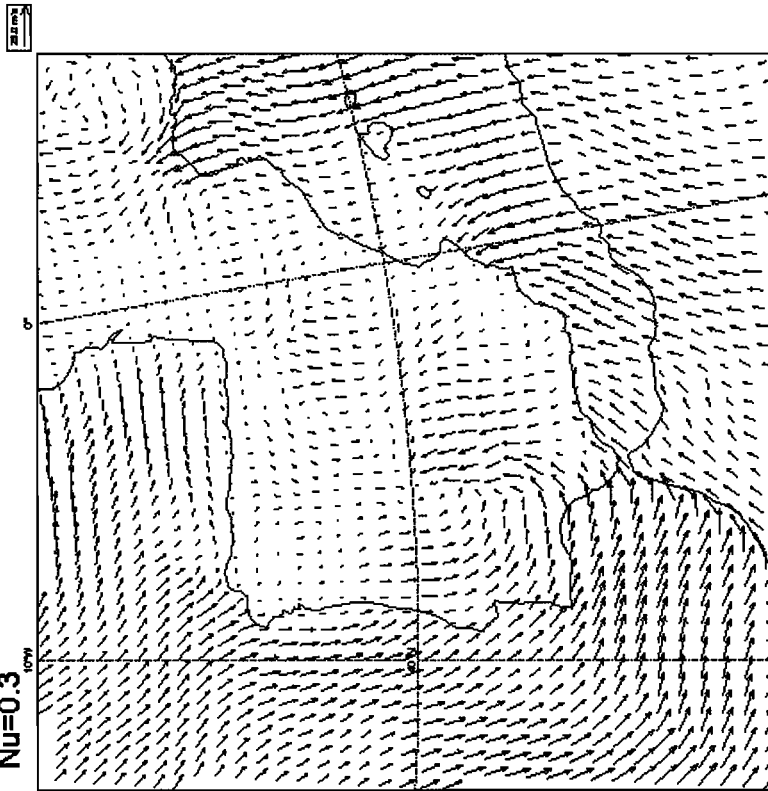


Figura 13. Comparación entre los dos análisis de los experimentos WND037 (sin dependencia en la vertical) y WND038 (con dependencia en la vertical). Se observa que en zonas de orografía complicada es donde se introducen más diferencias.

Las tolerancias del control frente a vecinos también fueron aumentadas de forma significativa. El parámetro que nos mide la distancia entre la observación y el análisis SIN utilizar la observación es el siguiente y vemos que la decisión depende de dos tolerancias.

$$\frac{(ob - an)^2}{\sigma_o^2 + \sigma_{an}^2} > tol_1 \quad \Rightarrow \quad \text{Observación sospechosa}^1$$

$$> tol_2 \quad \Rightarrow \quad \text{RECHAZADA}$$

$$\frac{(ob - an)^2}{\sigma_o^2 + \sigma_{an}^2} \leq tol_2 \quad \Rightarrow \quad \text{ACEPTADA}$$

En este caso existen dos tolerancias: Cuando el parámetro es mayor que tol_1 pero menor que tol_2 se marca la observación como sospechosa a efectos de control de calidad de las estaciones pero se sigue teniendo en cuenta en el análisis. Si es mayor que tol_2 se rechaza en este control.

Si es menor que tol_2 , la observación se acepta en el análisis.

En nuestro caso aumentamos las tolerancias de 3 y 4 inicialmente a 6 y 7 en este experimento.

El resumen de las observaciones es el siguiente

Experimento WND039					
Hora Día	21GMT 5/11	0 GMT 6/11	3 GMT 6/11	6 GMT 6/11	9 GMT 6/11
Observaciones activas	478	470	427	496	486
Observaciones rechazadas en el control frente al first guess	1	0	0	1	1
Observaciones rechazadas en el control frente a vecinos	11	17	16	27	21
Observaciones no activas	19	19	18	34	21

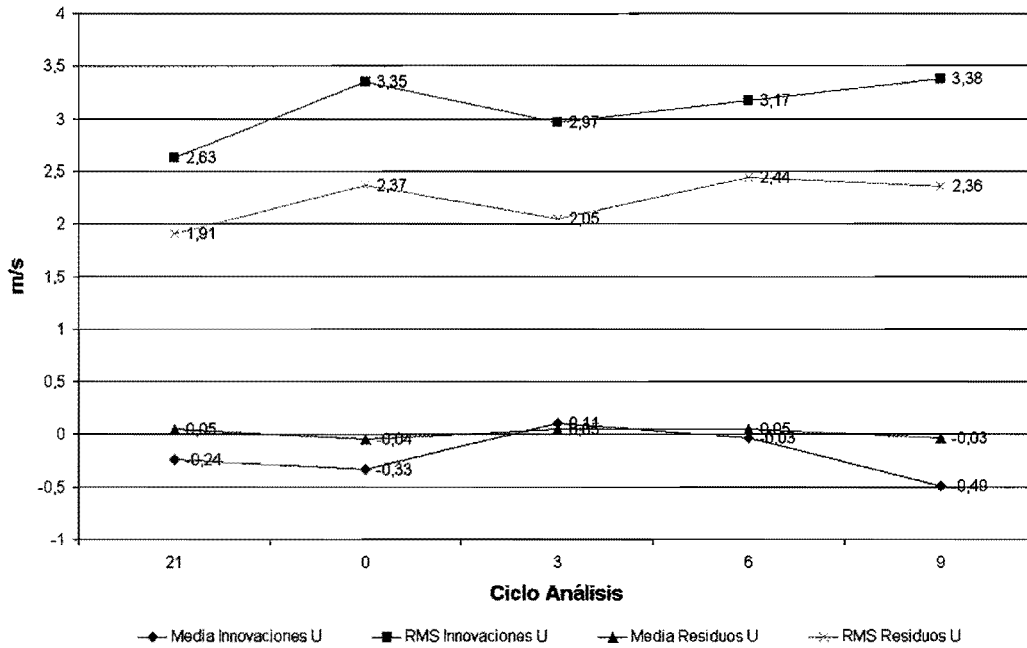
Como puede verse, con los cambios en los controles de calidad se consigue que el sistema asimile muchas más observaciones.

Los resultados de las estadísticas de las observaciones obviamente empeoran. Hemos asimilado observaciones que en general están a una distancia del first guess y del análisis mayor que en los experimentos anteriores que tenían controles más estrictos.

Los resultados se pueden ver en la figura 14 que tiene los sesgos y los RMS de las innovaciones y residuos para cada componente en el experimento WND039.

El hecho de aceptar un mayor número de observaciones que no se encuentran muy de acuerdo con el first guess podría ser peligroso en el caso de no tener el control de calidad adicional frente a vecinos. Sin embargo, con este control conseguimos eliminar aquellas observaciones que discrepan de las observaciones próximas y quedarnos con las que, aun cuando su distancia al first guess sea grande, son coherentes con las observaciones vecinas.

COMPONENTE U DEL VIENTO A 10 m. EXPERIMENTO WND039



COMPONENTE V DEL VIENTO A 10 m. EXPERIMENTO WND039

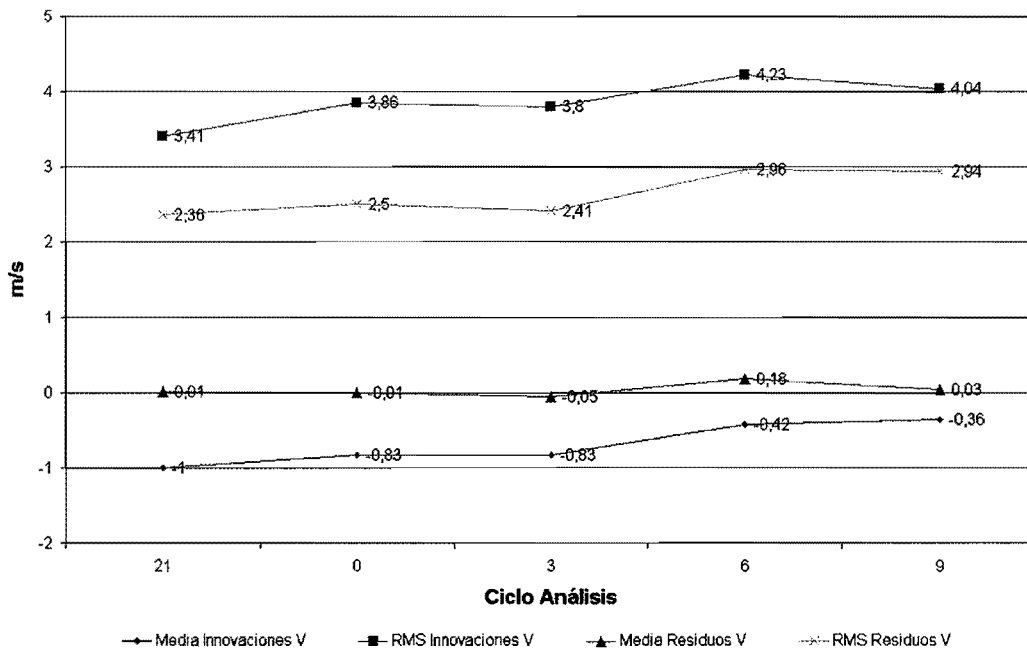


Figura 14. Bias y RMS de innovaciones y residuos para U y V en el experimento WND039

La utilización de un número mayor de estaciones lleva a que los incrementos del análisis para este experimento tengan diferencias muy significativas con los incrementos del análisis del WND038. Sin embargo la reducción en el RMS que hace el análisis en ambos experimentos es aproximadamente la misma, en torno a 1 ms^{-1} en la componente u y algo más en la componente v, lo que nos indicaría que el análisis está haciendo bien su trabajo.

La figura 15 nos muestra ambas gráficas donde podemos observar la gran diferencia que se produce en zonas como Extremadura, Andalucía occidental y el Golfo de Cádiz. En general, refuerza los vientos mucho en estas zonas como consecuencia de la aceptación de observaciones que eran rechazadas con anterioridad.

En la figura 16 podemos observar el diferente análisis producido en ambos experimentos. Recordemos que la única diferencia entre ambos experimentos se encuentra en el control de calidad de las observaciones. Ningún otro parámetro del análisis fue modificado.

5.2.5 Aumento del error de las observaciones. Experimento WND040

El experimento anterior sirvió para que nos apercebieramos de la gran importancia que podía llegar a tener el perder una simple observación a la hora de obtener un resultado que fuera una imagen precisa de lo que estaba ocurriendo realmente en la atmósfera en ese momento.

Teniendo en cuenta que la finalidad última de este paquete de análisis de variables superficiales es su uso operativo en tiempo real con las observaciones obtenidas en cada instante y que lo que buscábamos era que funcionara lo mejor posible en situaciones extremas (que son las realmente susceptibles de provocar situaciones de riesgo y en las que observaciones individuales pueden rechazarse por parecer incorrectas) y dado que en la zona de Extremadura y del Golfo de Cádiz aún continuaban rechazándose algunas observaciones, se optó por relajar aún más los controles. Esta vez lo que se hizo fue aumentar los errores de observación.

El error de observación para las observaciones de viento a 10 m se habían fijado en $1/\sqrt{2} \text{ ms}^{-1}$ en todos los experimentos anteriores.

En el WND040, los errores de las observaciones y del first guess quedaron con estos valores.

σ_o	$\sigma_{f.g.}$
1 ms^{-1}	$\sqrt{2} \text{ ms}^{-1}$

Podemos comparar estos valores con los que tienen otros paquetes de análisis de variables superficiales similares en otros servicios meteorológicos. Por ejemplo: DIAGPACK, el análisis de superficie de Météo France tiene, para el viento a 10 m, un error de observación de 2 ms^{-1} y un error del first guess de 5 ms^{-1} .

Con esta modificación se consiguió incorporar al análisis algunas observaciones que no habían entrado en el análisis del experimento anterior. En concreto, dos observaciones, una de ellas en Faro y otra en Extremadura fueron aceptadas en el análisis de las 0 GMT del 6 de noviembre. Igualmente fueron aceptadas más observaciones en otros ciclos de asimilación. Sin embargo la comparación entre el experimento WND040 y el WND039 no resultó tan espectacular como la del WND039 y WND038, donde si que se apreciaban cambios muy significativos en los incrementos del análisis, ya que estas observaciones sólo venían a apoyar otras que ya habían entrado en el análisis anterior.

A continuación y como hemos hecho en los otros experimentos, presentaremos una tabla resumen con los datos de las observaciones en los ciclos de asimilación del experimento WIND040.

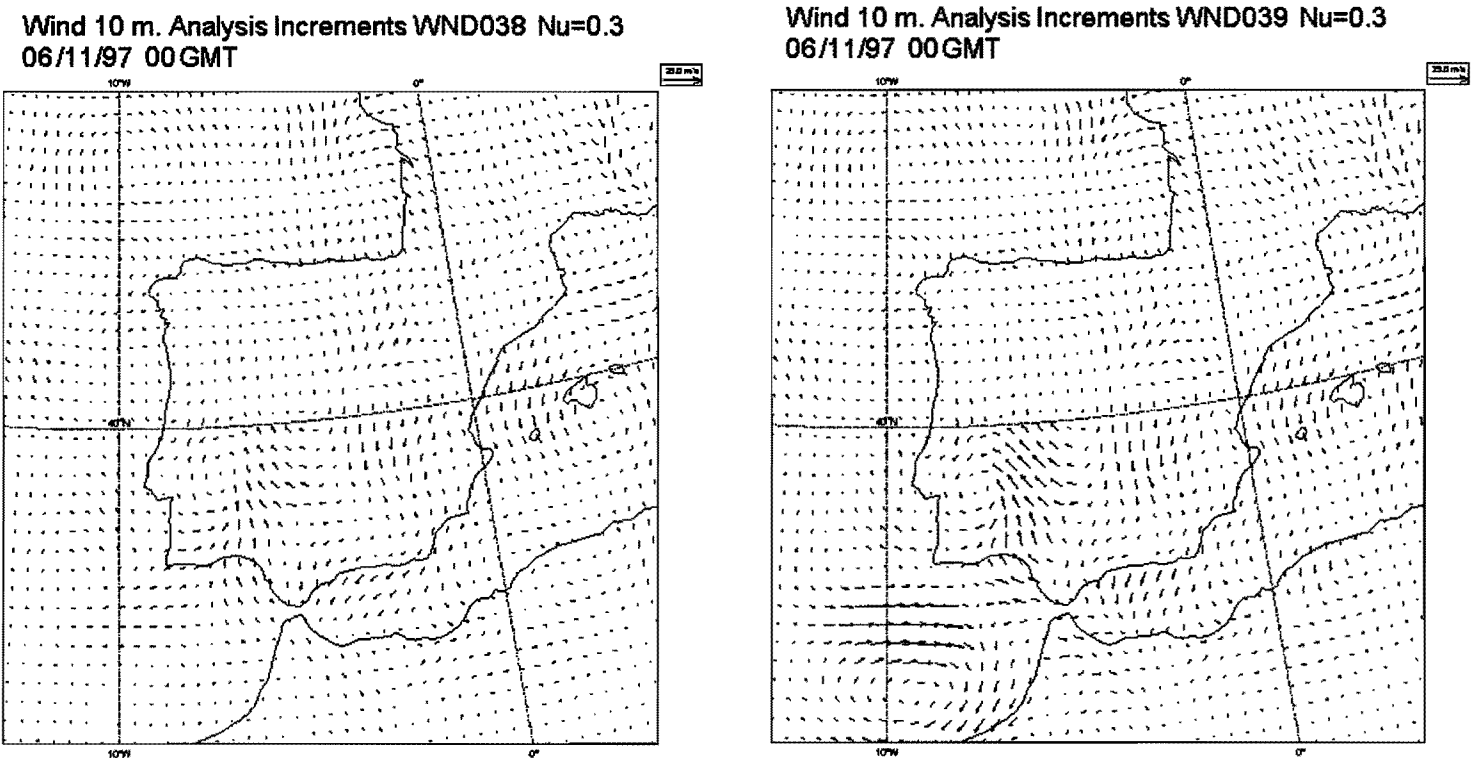
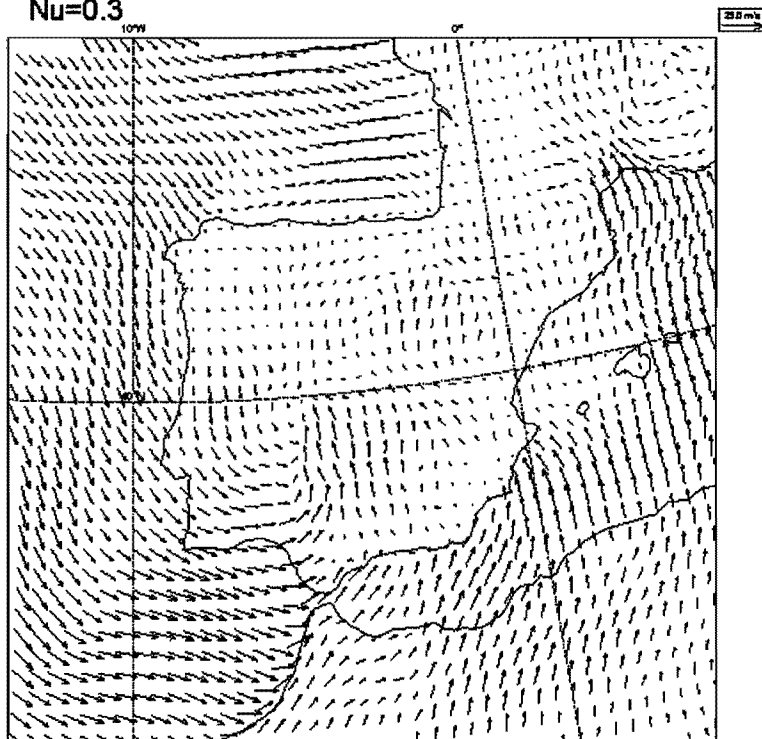


Figura 15. Comparación entre los incrementos del análisis de los experimentos WND038 y WND039. Se observa que en la zona del centro de la baja, el experimento WND039 produce unos incrementos del análisis mayores debido a que se han aceptado observaciones en esa zona que antes se rechazaban. El resultado es un reforzamiento del viento a 10 m en esa zona.

Wind 10 m. Analysis WND038 06/11/97 00GMT.
Nu=0.3



Wind 10 m. Analysis WND039 06/11/97 00GMT.
Nu=0.3

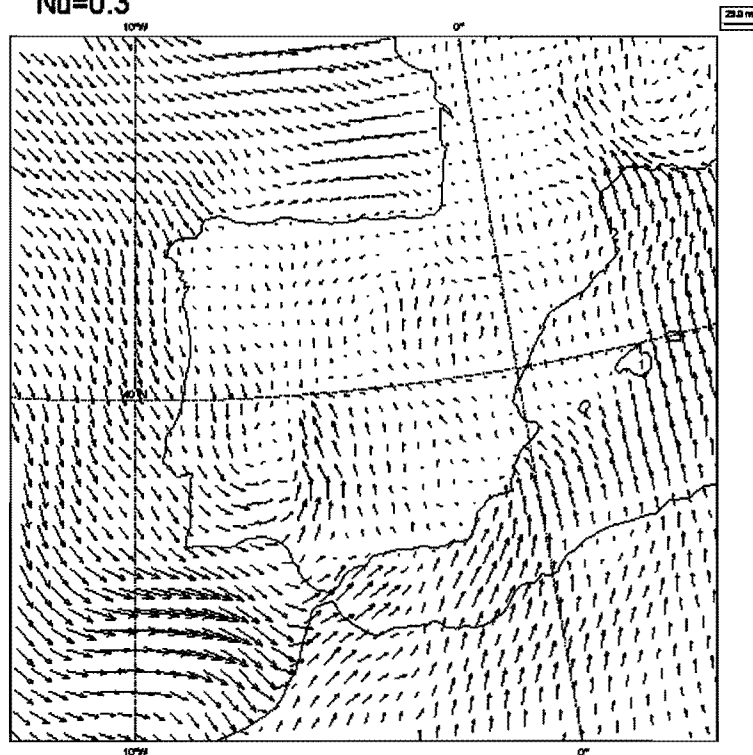


Figura 16. Podemos ver en esta figura el resultado de los análisis del campo de viento a 10 m en los experimentos WND038 y WND039. Vemos como el hecho de que se acepten más observaciones en la zona donde se produjo la ciclogénesis en el experimento WND039 redonda en un reforzamiento del viento en las zonas próximas al centro de la baja y en una disminución de su intensidad en el centro de la misma. También en las zonas de mar abierto, el hecho de aceptar una observación puede resultar crítica. Como ejemplo, podemos ver las diferencias en el análisis en la zona del Golfo de Cádiz.

Experimento WND040					
Hora	21GMT	0 GMT	3 GMT	6 GMT	9 GMT
Día	5/11	6/11	6/11	6/11	6/11
Observaciones activas	480	475	433	501	490
Observaciones rechazadas en el control frente al first guess	1	0	0	1	0
Observaciones rechazadas en el control frente a vecinos	9	12	10	22	18
Observaciones no activas	19	19	18	34	21

Como ya hemos mencionado el aumento del error de observación hace que aumente muy ligeramente el número de observaciones aceptadas para el análisis. Probablemente las observaciones que quedan sean en su mayoría incorrectas. Aunque podríamos seguir aumentando los errores de observación y del first guess, debemos llegar a un compromiso. Ahora necesitaríamos hacer cambios grandes en los errores para conseguir que muy pocas observaciones más se aceptaran. Además esto siempre tiene el riesgo de aceptar observaciones que pudieran ser incorrectas. Por eso decidimos dejar de modificar los controles de calidad.

Wind 10 m. Analysis Increments WND040 Nu=0.3 06/11/97 00 GMT

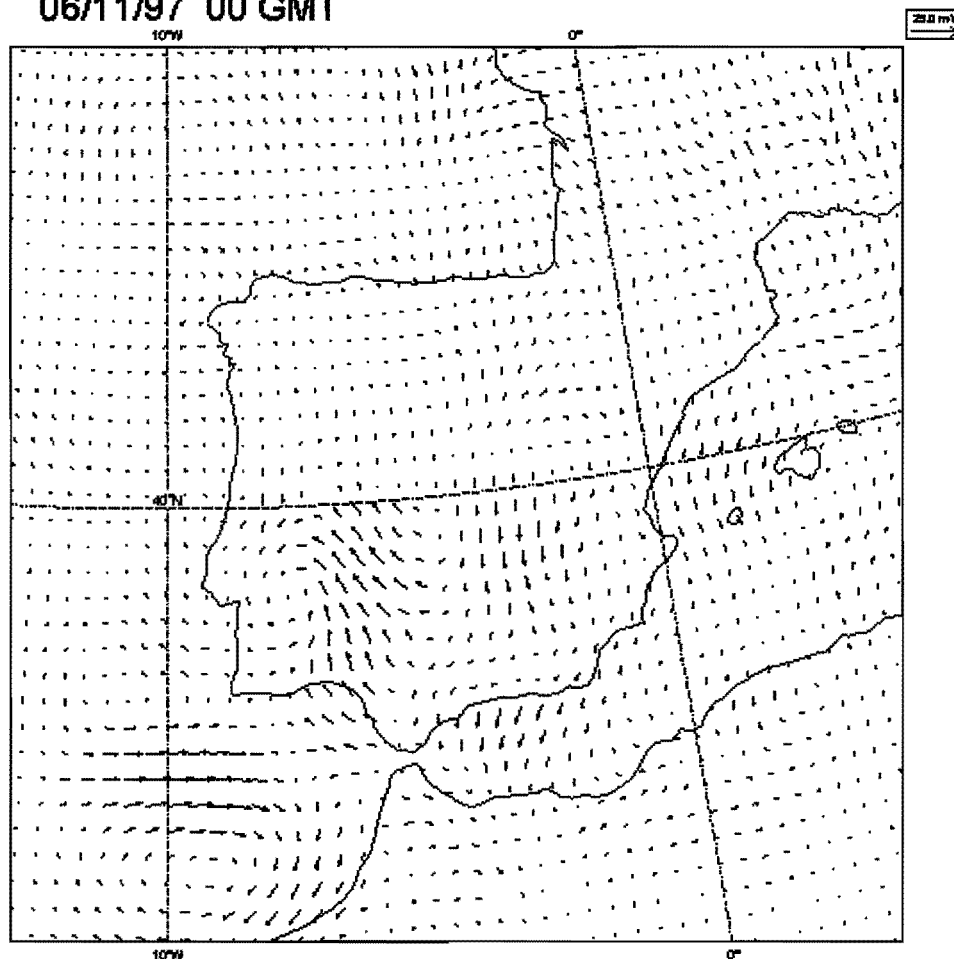


Figura 17. Incrementos del análisis obtenidos en el análisis WND040. Compárese con los incrementos del análisis del experimento WND039.

En la figura 17 podemos ver los incrementos del análisis del experimento WND040. Si realizamos una comparación con el experimento WND039 podremos ver como no existen grandes diferencias entre las dos figuras.

En el análisis (figura 18) observamos que quizás la única diferencia es la posición de la baja, ligeramente más hacia el NE en el WND040 a las 00 GMT. Los cambios en todos los ciclos de este experimento son muy ligeros respecto del anterior.

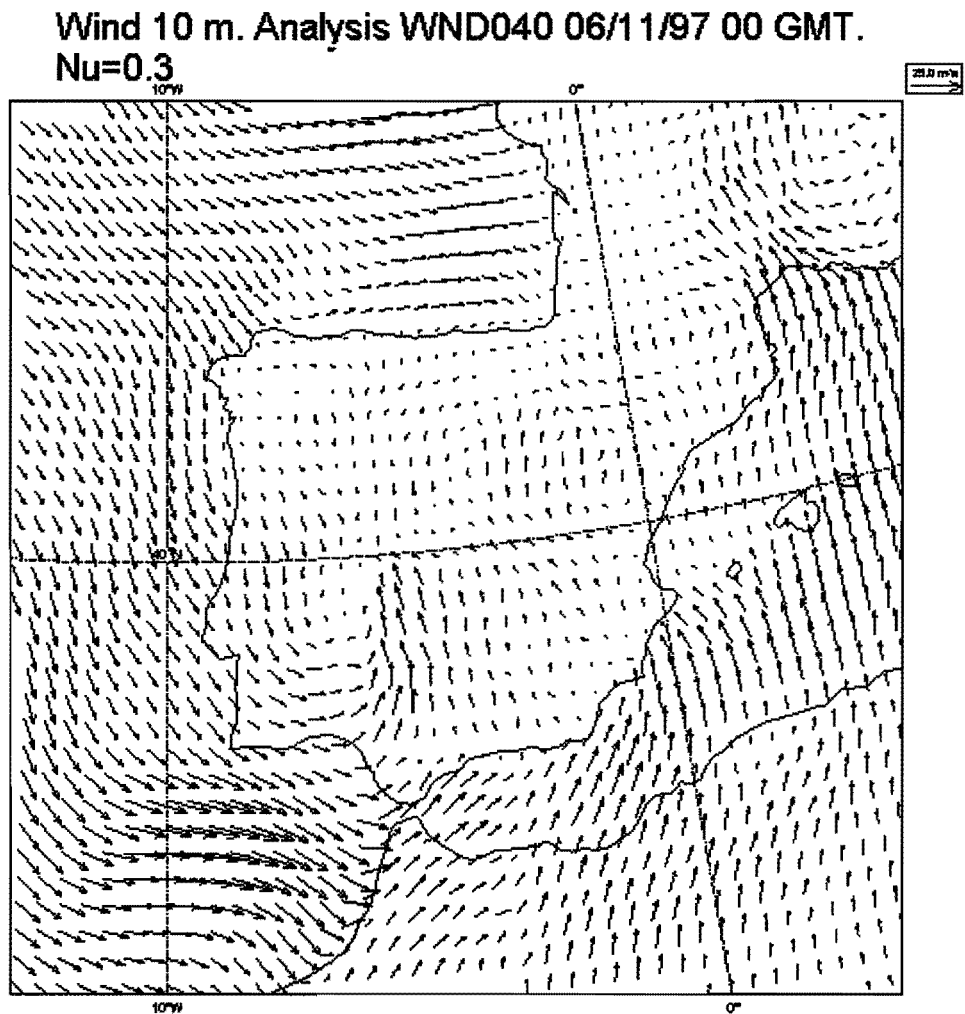
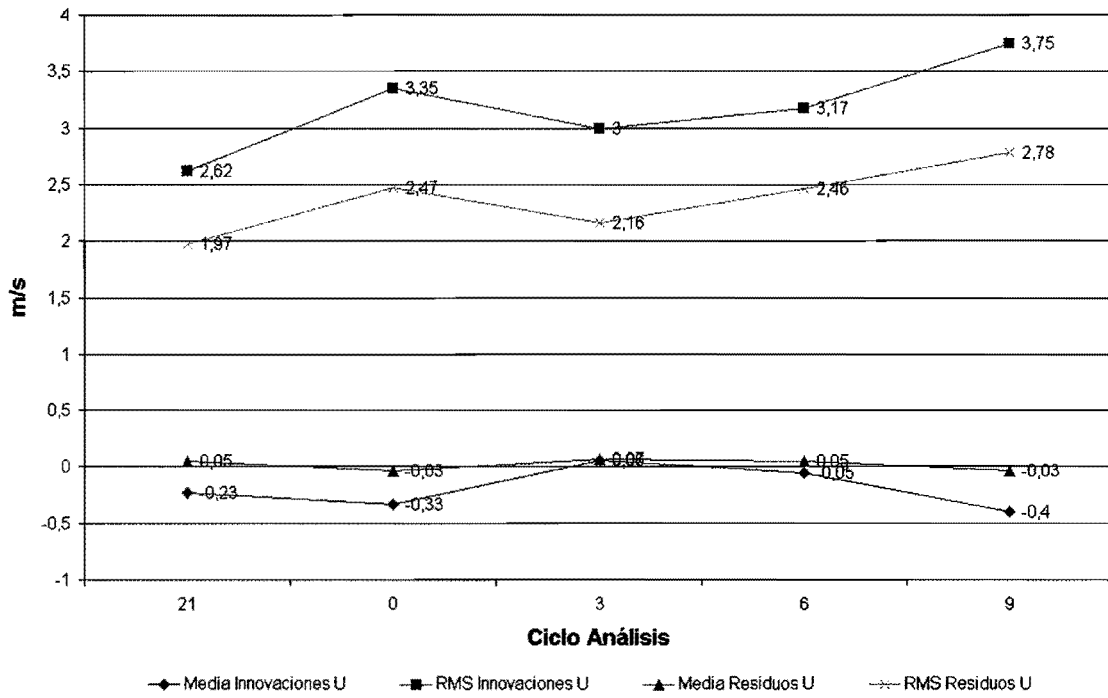


Figura 18. Análisis del 6/11/97 a las 00 GMT. Experimento WND040

En la figura 19 podemos observar como el análisis reduce de forma significativa el sesgo y el error cuadrático medio. El experimento WND040 tiene un RMS mayor que el WND039. Recordemos que sin embargo está tomando en consideración un mayor número de observaciones.

COMPONENTE U DEL VIENTO A 10 m. EXPERIMENTO WND040



COMPONENTE V DEL VIENTO A 10 m. EXPERIMENTO WND040

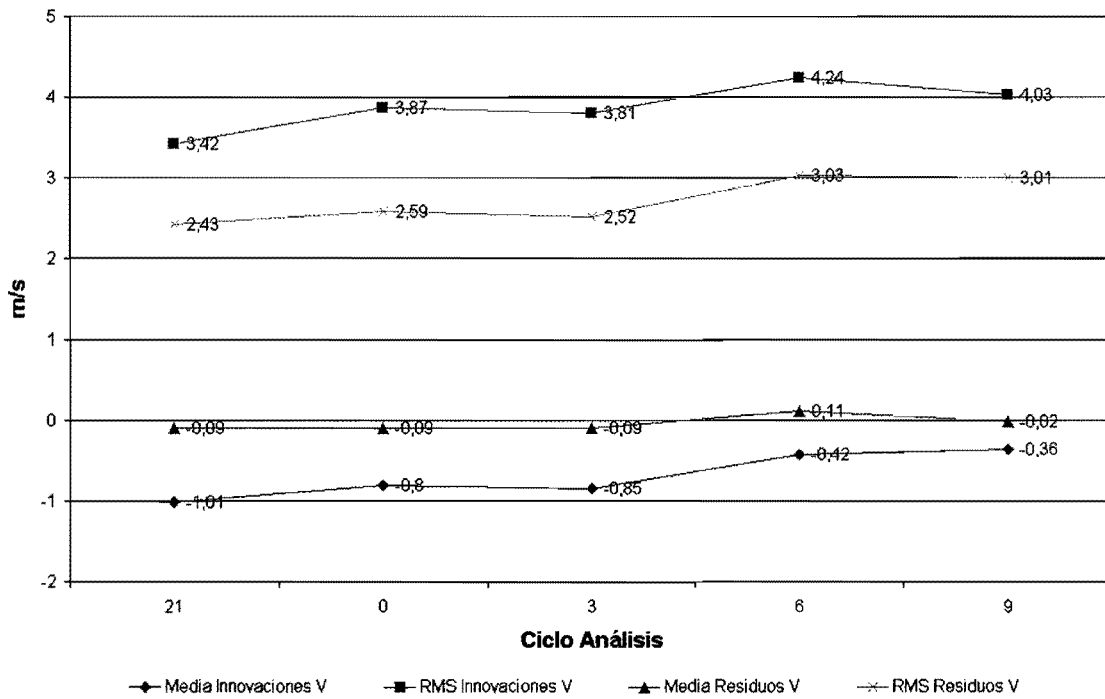


Figura 19. Error cuadrático medio y sesgo del experimento WND 040

5.2.6 Experimento totalmente divergente. $\nu = 1.0$ Experimento WND041

Finalmente se llevaron a término dos nuevos experimentos. El primero de ellos con un flujo totalmente divergente y el segundo con flujo totalmente rotacional.

Empezaremos describiendo el experimento totalmente divergente. En principio este sería el caso más alejado de la realidad puesto que en la literatura se ha comprobado como el flujo cerca de la superficie tiene una componente rotacional más importante que la divergente.

Los resultados de la estadística de las observaciones en este experimento en el que sólo hemos modificado respecto al WND040 el grado de divergencia son los siguientes:

Experimento WND041					
Hora	21 GMT	0 GMT	3 GMT	6 GMT	9 GMT
Día	5/11	6/11	6/11	6/11	6/11
Observaciones activas	476	469	431	495	490
Observaciones rechazadas en el control frente al first guess	1	0	0	1	0
Observaciones rechazadas en el control frente a vecinos	13	18	12	28	18
Observaciones no activas	19	19	18	34	21

Wind 10 m. Analysis WND041 06/11/97 00 GMT
Nu=1.0

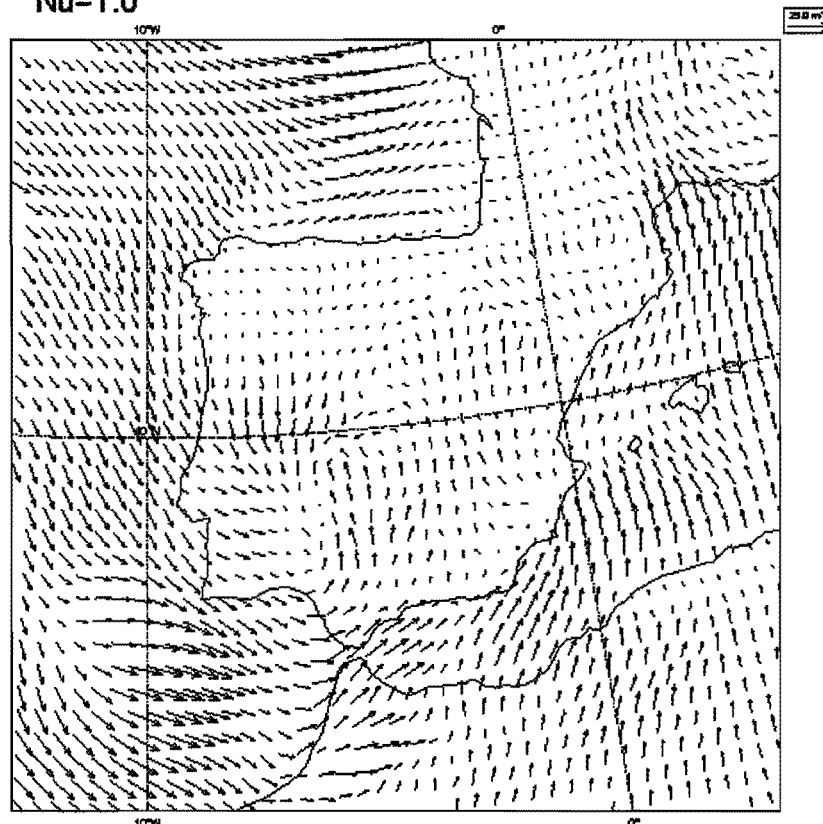


Figura 20. Análisis del viento a 10 m. Experimento WND041 totalmente divergente.

Lo que observamos es que en este experimento ha aumentado el número de rechazos frente al experimento WND040, en el que el grado de divergencia era $\nu = 0.3$. Esto nos dice que el flujo totalmente divergente es menos realista que un flujo como el del experimento WND040 y está de acuerdo con la literatura publicada al respecto que muestra un grado de divergencia algo mayor de 0.2 para flujos dentro de la capa límite y que tiende a aumentar algo conforme nos acercamos a la superficie.

La figura 20 nos muestra como es el análisis del viento a 10 m el día 6 de noviembre a las 0 GMT.

La figura 21 es la gráfica correspondiente a los valores de RMS y sesgo de innovaciones y residuos del experimento WND041 que se muestran de forma similar a los de experimentos anteriores. Si comparamos los valores de la figura 19 y de la 21, veremos claramente que el sesgo y los errores cuadráticos medios de este experimento empeoran significativamente respecto al experimento anterior.

Seguimos observando como la componente V se comporta peor que la U, como ocurría en todos los demás experimentos.

5.2.7 Experimento totalmente rotacional. $\nu = 0.0$ Experimento WND042

Para completar la visión de experimentos "extremos" realizamos un nuevo experimento pero esta vez con flujo totalmente rotacional.

Nuevamente el número de rechazos de observaciones en este caso es superior con claridad al experimento WND040 con $\nu = 0.3$. En la siguiente tabla se presenta el número de observaciones aceptadas en el análisis y rechazadas.

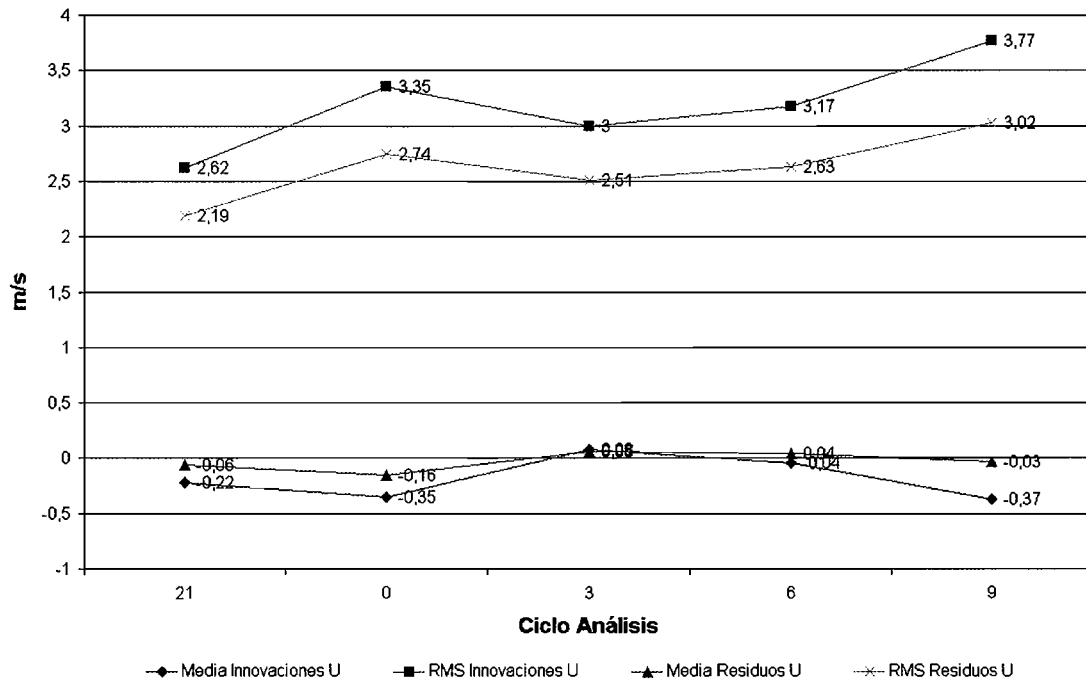
Experimento WND042					
Hora Día	21GMT 5/11	0 GMT 6/11	3 GMT 6/11	6 GMT 6/11	9 GMT 6/11
Observaciones activas	478	468	429	497	485
Observaciones rechazadas en el control frente al first guess	1	0	0	1	0
Observaciones rechazadas en el control frente a vecinos	11	19	14	26	23
Observaciones no activas	19	19	18	34	21

Estos resultados siguen dando cuenta del hecho de que el flujo totalmente rotacional no es realista, lo que conduce a un mayor número de rechazos como ocurría en el experimento WND041.

La figura 22 nos muestra el análisis obtenido con un flujo totalmente rotacional para el día 6 de noviembre a las 00 GMT.

En las figuras 23, 24 y 25 podemos ver una comparativa del número de observaciones aceptadas y rechazadas en los controles frente al first guess y frente a vecinos. Observamos que el número de observaciones aceptadas es máximo en el experimento WND040 con un grado de divergencia $\nu = 0.3$. En consecuencia este experimento utiliza la máxima información de las observaciones y minimiza los rechazos.

COMPONENTE U DEL VIENTO A 10 m. EXPERIMENTO WND041



COMPONENTE V DEL VIENTO A 10 m. EXPERIMENTO WND041

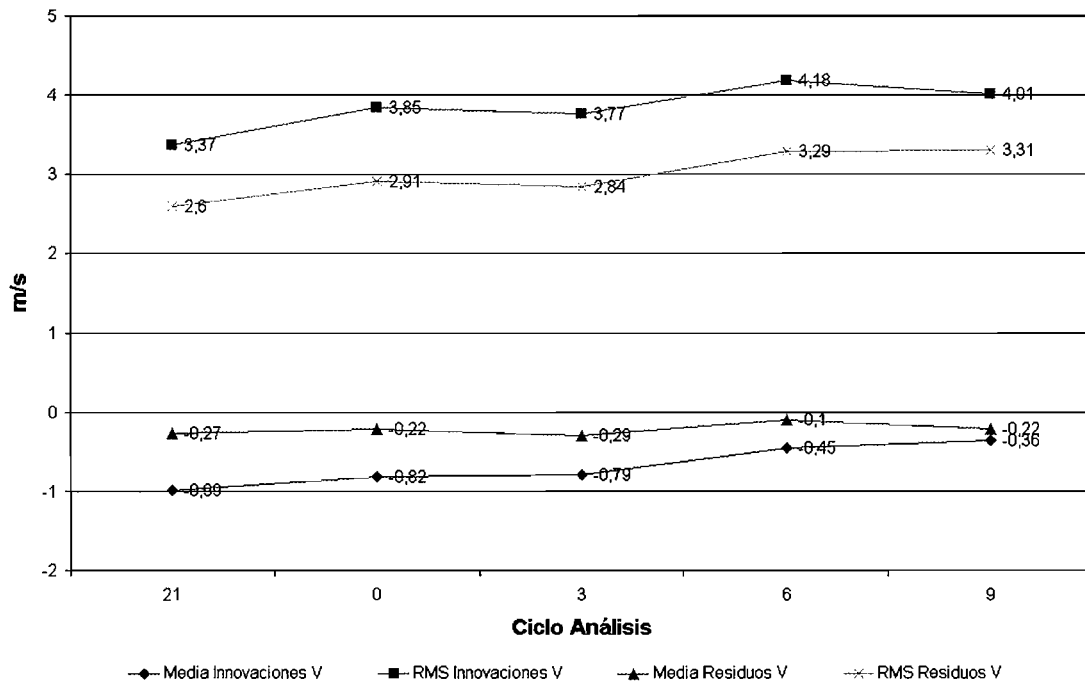


Figura 21. Error cuadrático medio y sesgo (bias) del experimento totalmente divergente WND041

Wind 10 m. Analysis WND042 06/11/97 00 GMT
Nu=0.0

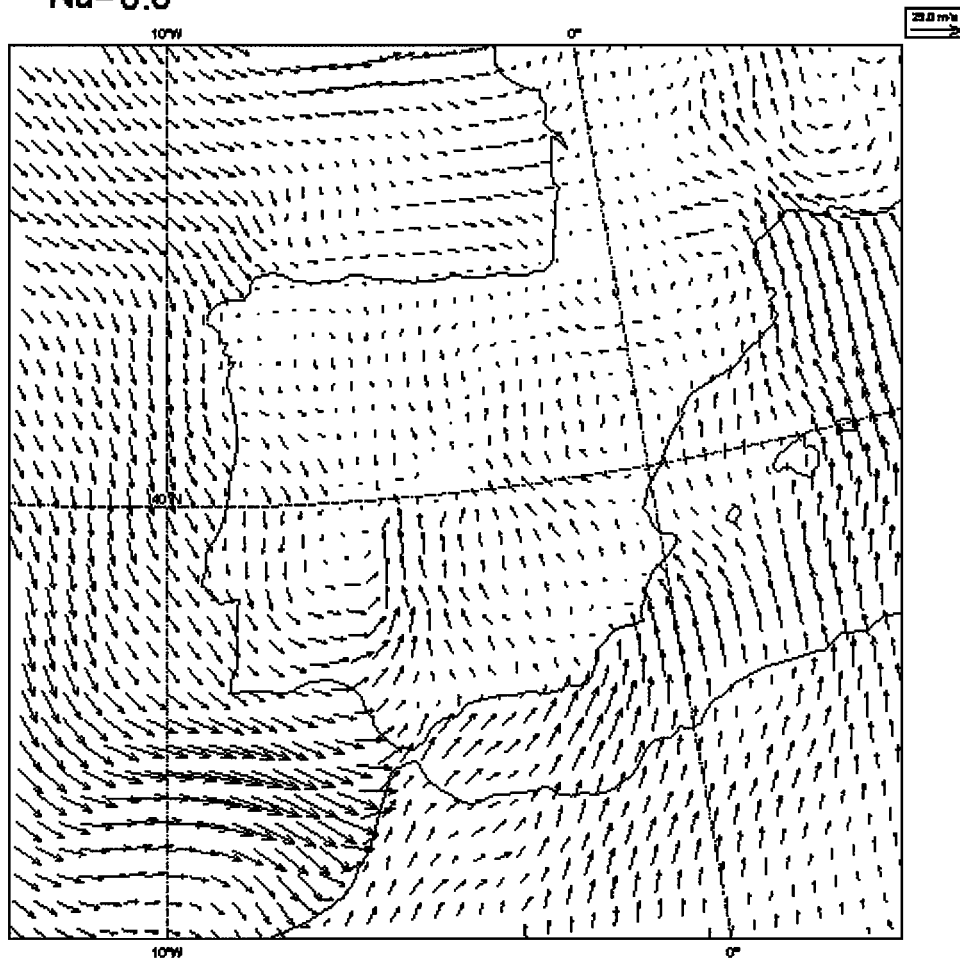


Figura 22. Análisis del viento a 10 m obtenido con un flujo totalmente rotacional.
Experimento WND042

Número de observaciones aceptadas para el análisis

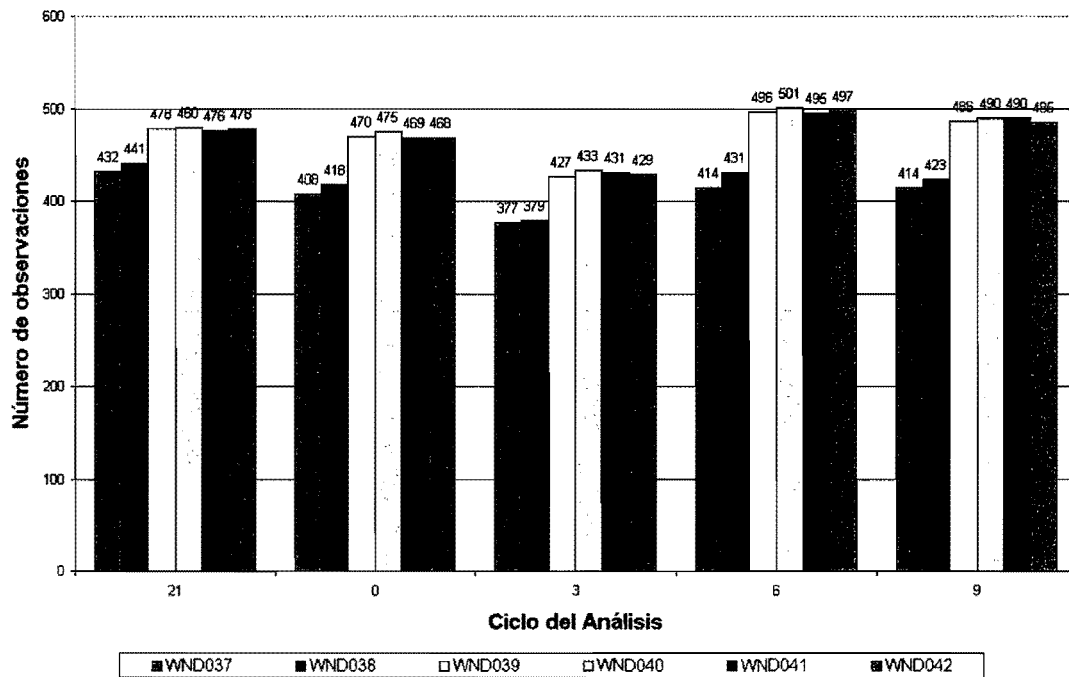


Figura 23. Observaciones aceptadas en los análisis. Máximo en WND040

Observaciones rechazadas en el control frente al First Guess

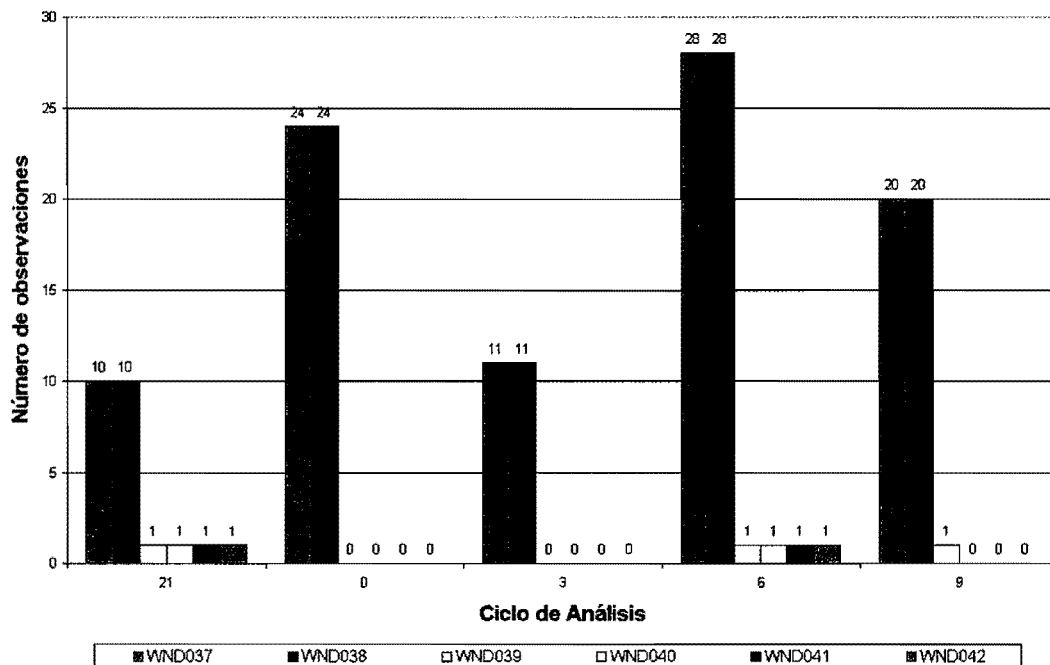


Figura 24. Observaciones rechazadas en el control frente al first guess

Observaciones rechazadas en el control frente a vecinos

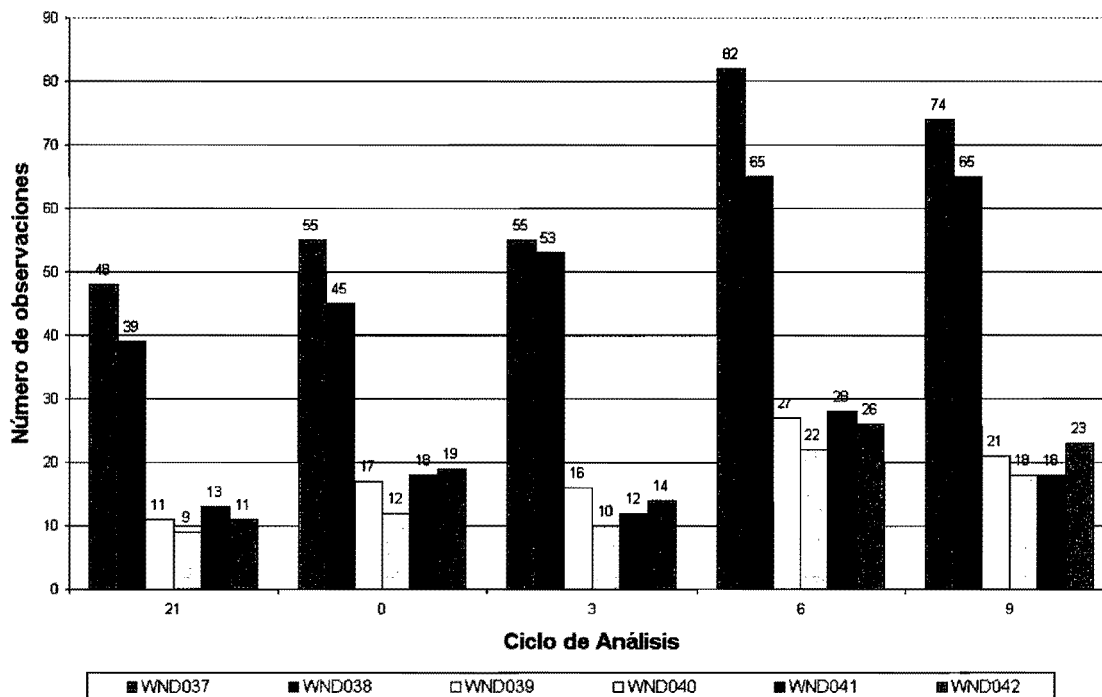


Figura 25. Número de rechazos en el control frente a vecinos.

También podemos comparar los incrementos del análisis de los experimentos totalmente divergente (WND041) y rotacional (WND042). La figura 26 nos muestra las diferencias que son especialmente visibles en zonas con pocas observaciones (sobre todo en el mar) como por ejemplo al SW del cabo de S. Vicente.

Finalmente se ofrecen los resultados de los errores cuadráticos medios y los sesgos del experimento WND042 en la figura 27.

En resumen, después de llevar a cabo estos experimentos creemos que la mejor opción es utilizar los valores del experimento WND040, que emplea un grado de divergencia de 0.3 y longitudes de escala de aproximadamente 141 km para la función de corriente y el potencial de velocidad lo que equivale a una longitud de escala de unos 91 km en las componentes u y v de viento.

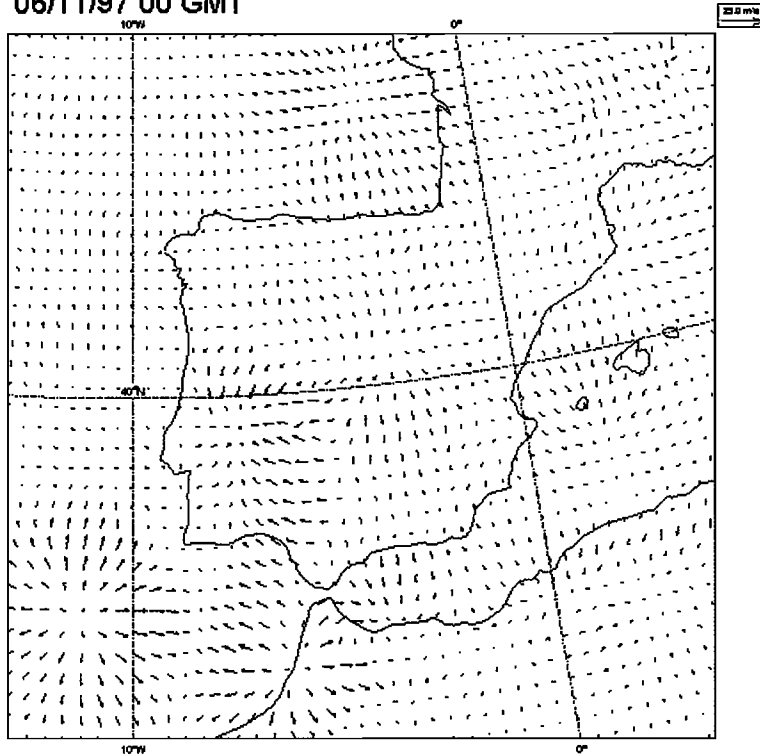
Por último, merece la pena comentar el hecho de que los valores de los errores del first guess y de las observaciones han sido escogidos en base a los resultados climatológicos de HIRLAM que para predicciones a 6 horas se encuentra en torno a 2.5 ms^{-1} . Por eso se escogieron valores de los errores de observación de $1/\sqrt{2} \text{ ms}^{-1}$ y errores del first guess de $\sqrt{2} \text{ ms}^{-1}$, en un principio e incluso en WND040 aumentamos el error de observación hasta 1 ms^{-1} . Pero los valores climatológicos no son válidos en situaciones extremas como la que hemos analizado. La solución que hemos adoptado para que el análisis tuviera en cuenta un mayor número de observaciones y no se produjeran rechazos indebidos ha sido aumentar los límites de rechazo en los controles de calidad y aumentar ligeramente los errores de observación. Esta solución no es la óptima desde el punto de vista de la calidad del producto final.

Existe una posible mejora del análisis que consistiría en volver a bajar los límites del control de calidad frente al first guess y que el error del first guess fuera dinámico y dependiera de la situación atmosférica del día en cuestión, aunque técnicamente el análisis se complicaría.

Una forma relativamente sencilla de hacerlo sería estudiar las diferencias entre dos predicciones de diferente alcance válidas en el momento del análisis. Si las diferencias son grandes estaríamos frente a una situación más "caótica", con una predecibilidad menor y por tanto posiblemente el first guess será más erróneo, por lo que el error del first guess debería aumentar. Si no existen diferencias significativas, la situación sería más "lineal", la predecibilidad aumentaría y por tanto el first guess debería ser más representativo del estado real de la atmósfera y el error del first guess podría ser menor.

En principio esto se deja como una mejora que podría implementarse en una versión futura del análisis.

Wind 10 m. Analysis Increments WND041 Nu=1.0
06/11/97 00 GMT



Wind 10 m. Analysis Increments WND042 Nu=0.0
06/11/97 00 GMT

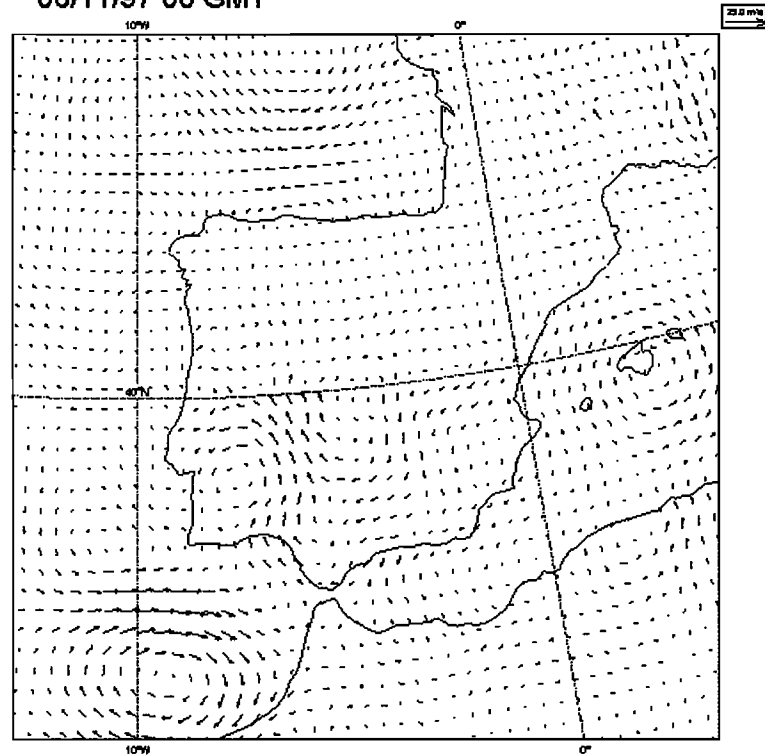
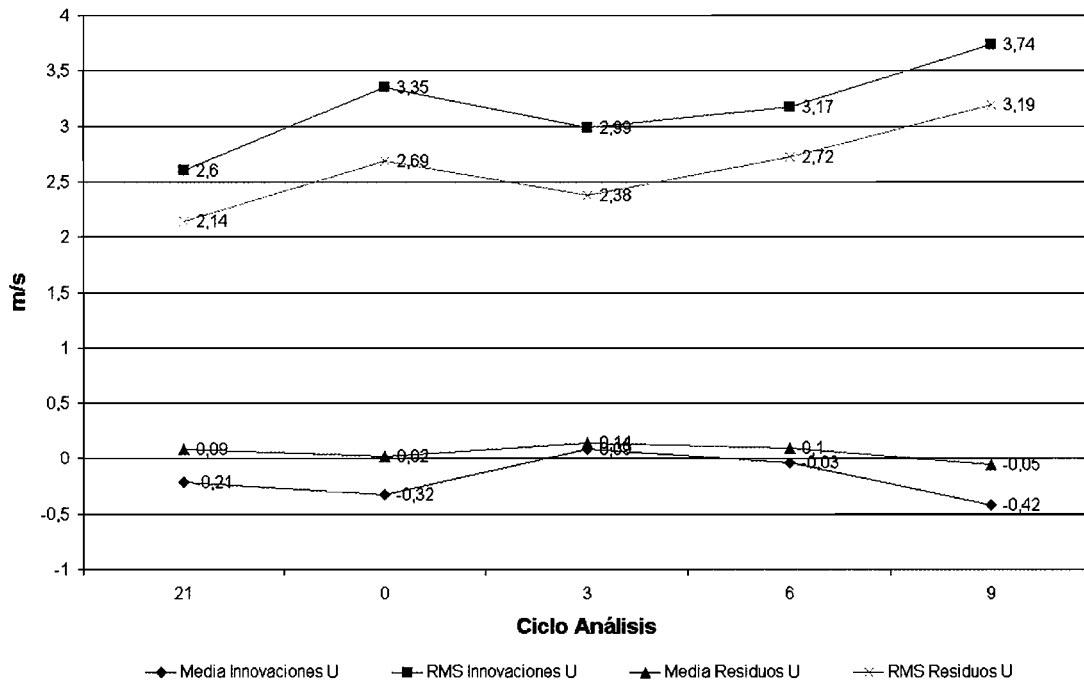


Figura 26. Comparación entre los incrementos del análisis de los experimentos WND041 (totalmente divergente) y WND042 (totalmente rotacional). No son descripciones realistas del flujo cerca de la superficie, pero vemos los efectos de cambiar el grado de divergencia de un extremo al otro.

COMPONENTE U DEL VIENTO A 10 m. EXPERIMENTO WND042



COMPONENTE V DEL VIENTO A 10 m. EXPERIMENTO WND042

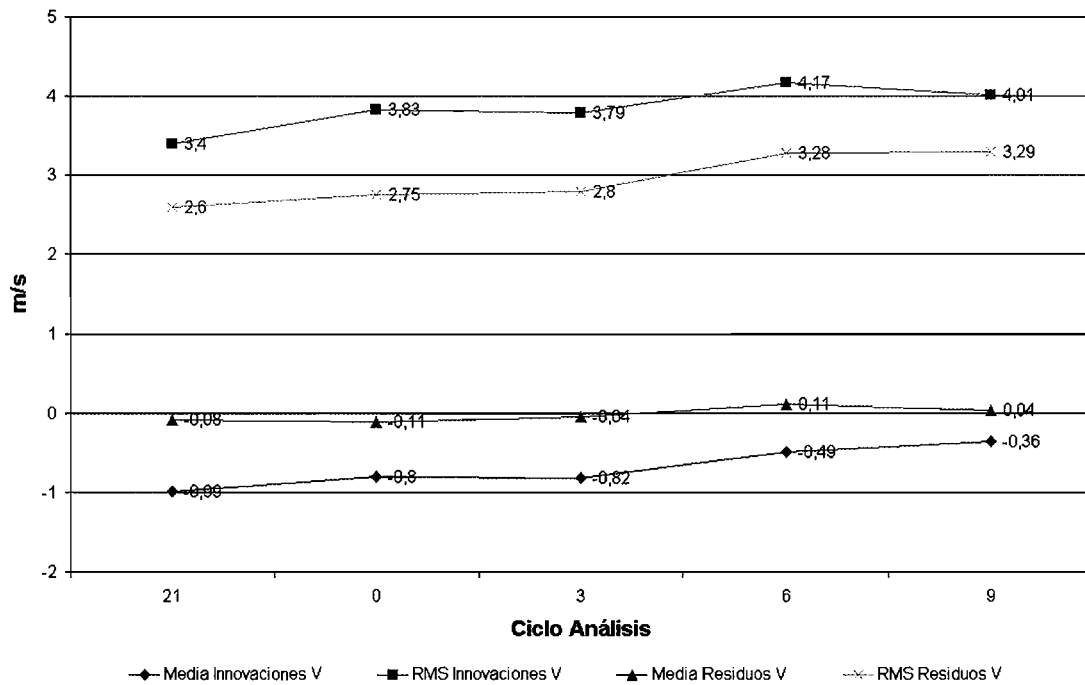


Figura 27. Error cuadrático medio y sesgo (bias). Experimento WND042

6.- Estudio de los histogramas

El estudio de los histogramas de las observaciones es un método adicional para diagnosticar el rendimiento de un sistema de análisis objetivo, de forma que no sean utilizadas únicamente las predicciones que producen dichos análisis para llevar a cabo esta tarea de diagnóstico.

Probablemente, las observaciones y todos los procesos asociados con ellas (obtención y transmisión de las mismas) son el paso más caro de un sistema de predicción numérica por lo que resulta muy conveniente asegurarse de que el análisis está aprovechandolas al máximo.

El estudio al que hacíamos referencia y que hemos llevado a cabo consiste en dibujar, para cada variable analizada, histogramas con las frecuencias relativas de innovaciones (valor observado menos first guess, OmF) y residuos (valor observado menos valor analizado, OmA) tanto para las observaciones que han sido aceptadas en el análisis como en las que han sido rechazadas en los diversos controles de calidad.

En nuestro caso se ha procedido a analizar las innovaciones y residuos de cada una de las componentes del viento (u, v) así como del módulo de la diferencia vectorial (siempre positivo) y de la diferencia de velocidades.

Las innovaciones y residuos del módulo de la diferencia vectorial se definen así:

$$\sqrt{(u_{\text{obs}} - u_{\text{f.g.}})^2 + (v_{\text{obs}} - v_{\text{f.g.}})^2}$$
$$\sqrt{(u_{\text{obs}} - u_{\text{ana}})^2 + (v_{\text{obs}} - v_{\text{ana}})^2}$$

Se toma la solución positiva. Por lo tanto en los histogramas nunca habrá, cuando analicemos esta cantidad, casos con módulo de la diferencia vectorial negativa.

Las innovaciones y residuos de la diferencia de velocidades viene definida así:

$$\sqrt{u_{\text{obs}}^2 + v_{\text{obs}}^2} - \sqrt{u_{\text{f.g.}}^2 + v_{\text{f.g.}}^2}$$
$$\sqrt{u_{\text{obs}}^2 + v_{\text{obs}}^2} - \sqrt{u_{\text{ana}}^2 + v_{\text{ana}}^2}$$

y éstas, obviamente, si que pueden tomar valores negativos.

Para que los resultados fueran realmente concluyentes, deberíamos disponer de un gran número de observaciones, obtenidas a partir de un alto número de análisis.

Nuestro estudio, en este aspecto, no va a ser muy significativo (especialmente el número de observaciones rechazadas va a ser muy bajo) y de él no vamos a obtener sino información muy cualitativa.

Lo que se observa en primer lugar en los gráficos de observaciones aceptadas es que tanto el gráfico de OmA y de OmF son gaussianos.

Se observa, además, como el proceso del análisis es capaz de estrechar la gaussiana, lo que equivale a que la "distancia" del análisis a las observaciones es menor que la del first guess a las observaciones.

Esto significa que el análisis ha sido capaz de incorporar información de las observaciones, mejorando respecto a la información previa del first guess.

Se observa que el first guess está sesgado, con un viento que es demasiado fuerte respecto al real, especialmente la componente v. El análisis también es capaz de corregir bastante el sesgo de la componente u y algo menos el de la componente v, que continúa presentando sesgo en el análisis.

Sin embargo, estos resultados no son significativos ya que el sesgo del first guess puede estar condicionado por la situación estudiada y el número bajo de observaciones consideradas (Sólo son tenidos en cuenta los ciclos de análisis del 5/11/97 a las 21 UTC y los del 6/11/97 a las 00, 03, 06 y 09 UTC).

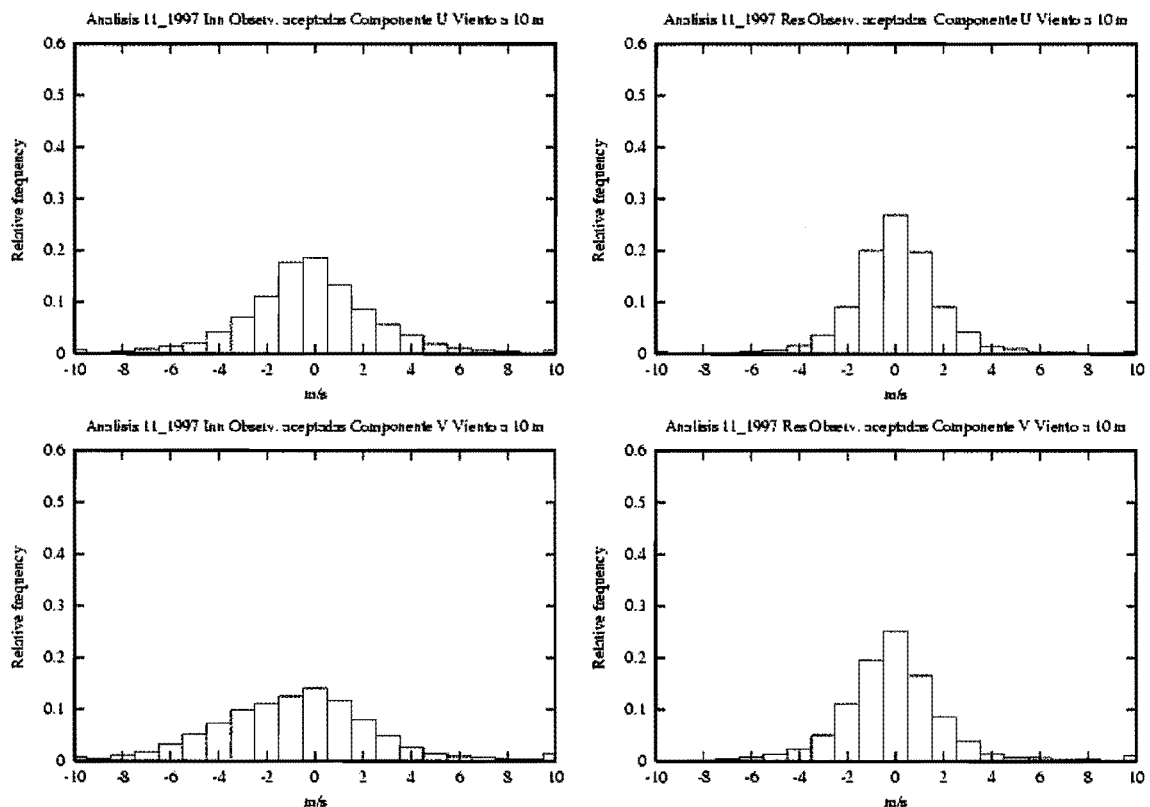


Figura 28. Histogramas de observaciones aceptadas para las componentes u (arriba) y v (abajo) del viento a 10 m. Las innovaciones (OmF) están a la izquierda y los residuos (OmA) a la derecha.

En cuanto a los histogramas de módulo de la diferencia vectorial y diferencia de velocidades, para las observaciones aceptadas se presentan en la página siguiente.

También en este caso se puede observar el mismo efecto que hemos visto en las componentes zonal y meridiana del viento a 10 m. Se observa que el first guess presenta un

sesgo significativo y que el proceso de análisis es capaz de corregir una gran parte del mismo.

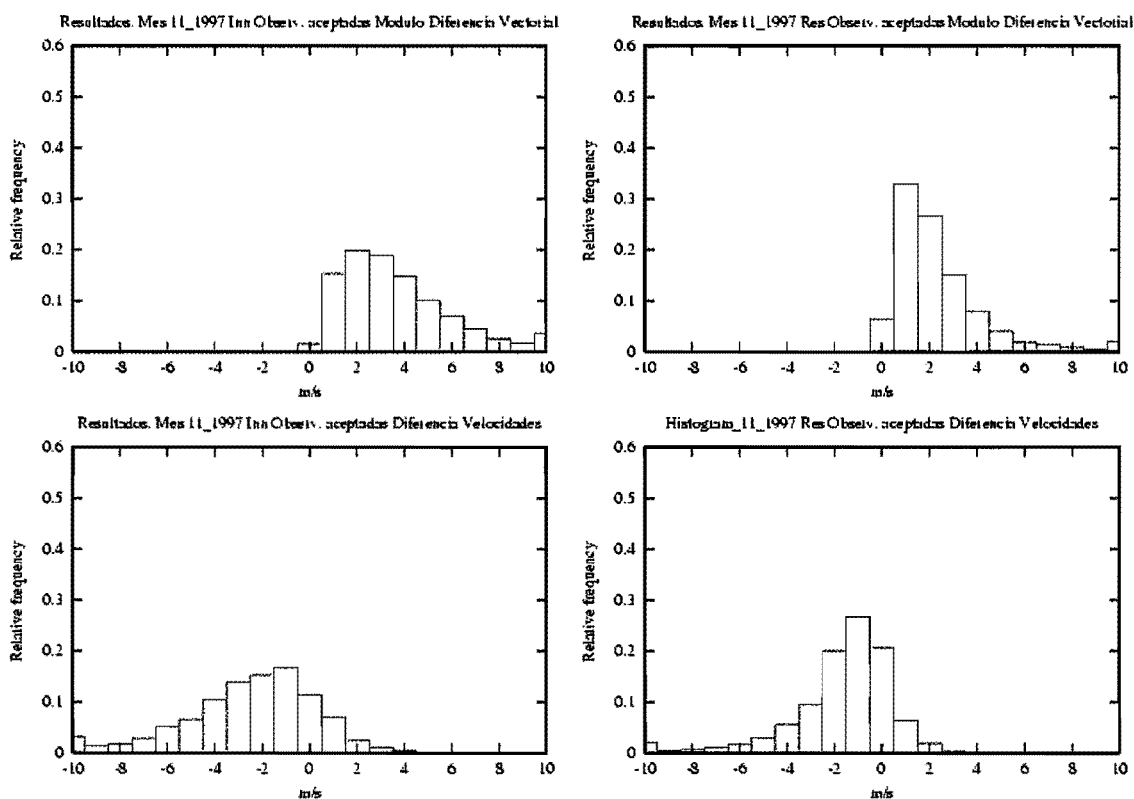


Figura 29. Histogramas de observaciones aceptadas para el módulo de la diferencia vectorial (arriba) y la diferencia de velocidades (abajo) del viento a 10 m. Las innovaciones (OmF) están a la izquierda y los residuos (OmA) a la derecha.

En cuanto a los histogramas de las observaciones rechazadas hay que decir que si el número de observaciones aceptadas en estos cinco ciclos de análisis considerados era bajo y de ellos obteníamos resultados poco significativos, con mayor razón puede extenderse dicho razonamiento al caso de observaciones rechazadas, donde hablamos de un número de observaciones un orden de magnitud menor que el de aceptadas.

En el caso de observaciones aceptadas, el comportamiento de las observaciones se aproximaba al teórico (distribución gaussiana de OmF y OmA, estrechamiento de la gaussiana en el proceso de análisis)

Los resultados del análisis de las observaciones rechazadas mediante los histogramas es sin embargo mucho peor.

De ellos lo único que vamos a decir aquí es que, teóricamente, deberíamos esperar que los valores de las innovaciones (OmF) se distribuyeran más o menos de forma uniforme, de manera que la probabilidad de obtener uno u otro valor fuera similar y que, tras el proceso de análisis, los residuos (OmA) se distribuyeran de forma que la frecuencia relativa de los

valores que se encuentran en torno a cero fuera muy baja, aumentado la frecuencia hacia los extremos creando sendas distribuciones simétricas respecto al eje de ordenadas y centradas en torno a un determinado valor distinto de cero.

Nuestros resultados son los mostrados en las dos figuras siguientes.

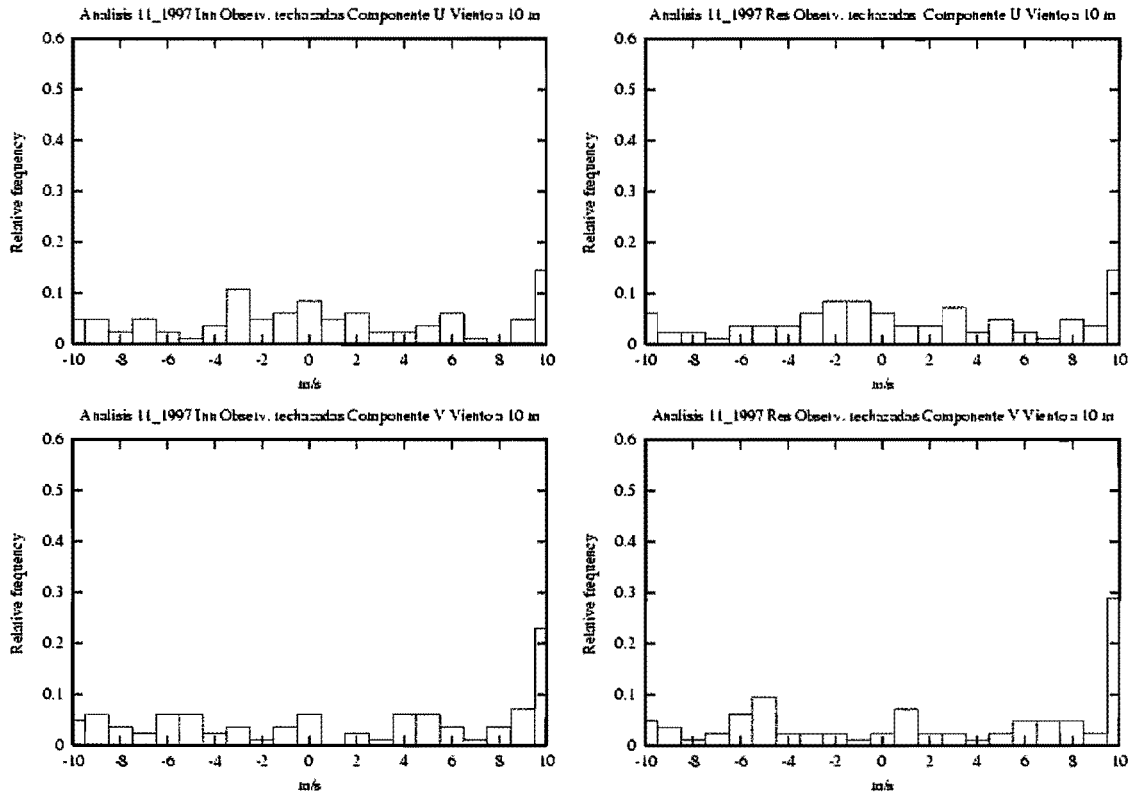


Figura 30. Histogramas de observaciones rechazadas para las componentes u (arriba) y v (abajo) del viento a 10 m. Las innovaciones (OmF) están a la izquierda y los residuos (OmA) a la derecha.

En ambas, el comportamiento puede considerarse que está lejos del teórico, pero ello es debido al pequeño número de observaciones rechazadas considerado en el periodo estudiado.

Sin embargo, ya puede observarse una tendencia del proceso de análisis a reducir la frecuencia relativa del valor cero y aumentar la frecuencia de valores adyacentes, de acuerdo con lo esperado.

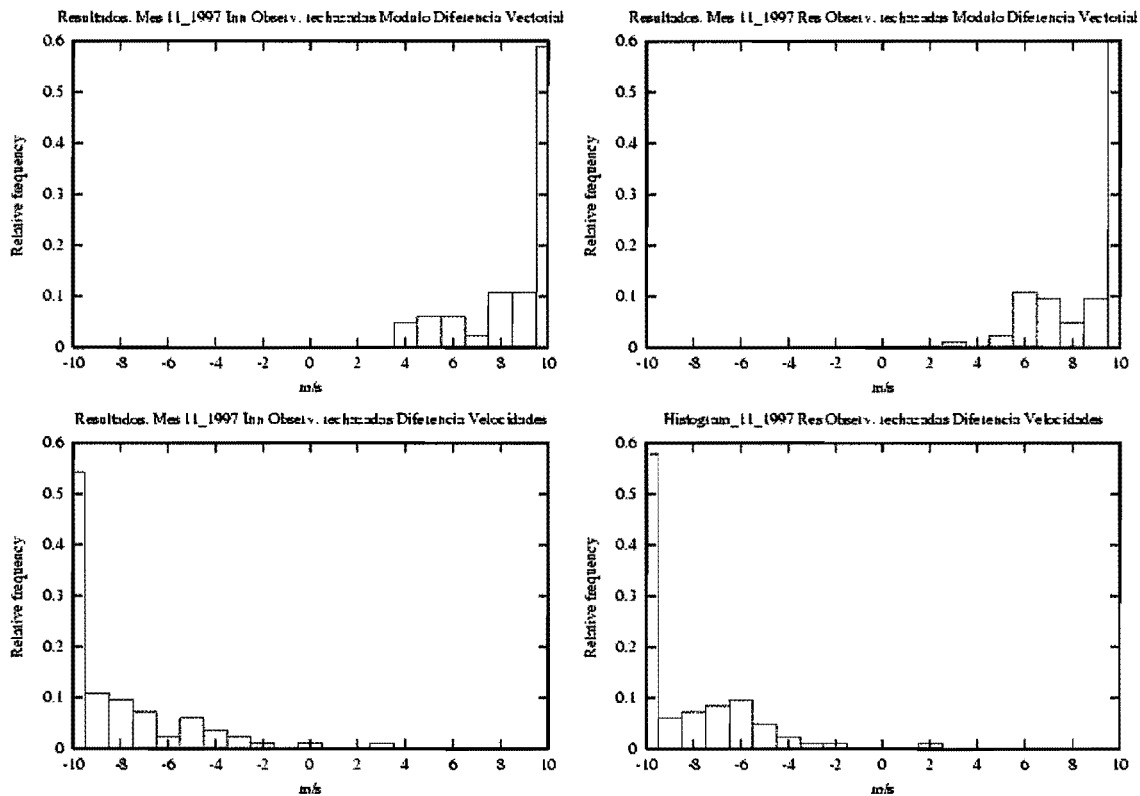


Figura 31. Histogramas de observaciones rechazadas para el módulo de la diferencia vectorial (arriba) y la diferencia de velocidades (abajo) del viento a 10 m. Las innovaciones (OmF) están a la izquierda y los residuos (OmA) a la derecha.

7. Aspectos informáticos. Modificaciones en el software del análisis.

Tras el trabajo, llevado a cabo con anterioridad, para la ampliación del análisis a la presión a nivel del mar, las rutinas del análisis ya eran capaces de funcionar de forma autónoma del modelo HIRLAM.

En el presente trabajo lo único que se ha hecho es ampliar las rutinas que ya existían para incluir la variable viento a 10 metros (2 componentes del viento: u y v) y añadir algunas rutinas nuevas, especiales para el tratamiento bivalente del viento a 10 metros, como OIAWIN.F que es llamada por ANALYS.F y que analiza de forma simultánea las componentes zonal y meridiana del viento a 10 m o DATSSH.F que chequea si existen dos observaciones muy próximas que están repetidas para eliminarlas del análisis ya que, de no hacerlo, pueden crear problemas de condicionamiento enfermo de la matriz de ganancia del análisis.

Se elaboró, igualmente, una rutina para el control de calidad de las observaciones de viento a 10 m frente al First Guess denominada FGCHWN.F.

También hubo que crear una rutina llamada SINGOB.F para los experimentos con una observación única.

Las rutinas y bloques *common* que fueron modificadas son:

COMFLD.inc	SFLDJP.F	COIPAR.inc	COMPAR.inc	SPARAN.F
COMVNM.inc	SVNUMB.F	COMLIM.inc	COMERR.inc	SETERR.inc
CSCPAR.inc	SETSCP.F	SETOIP.F	SETDIM.F	GETOBS.F
PRCSYN.F	PRCSHP.F	PRCBUO.F	BCKCOM.F	GETBCK.F
MS2OBS.F	CNVOBS.F	WRANAL.F		

Para una explicación de estas rutinas, me remito a la nota técnica nº62 del servicio de modelización numérica del tiempo, sobre la ampliación del análisis de superficie de HIRLAM a la presión del nivel del mar.

8. Conclusiones

En este trabajo, se ha continuado ampliando el análisis de superficie de HIRLAM con fines de diagnóstico con la intención de que funcione de forma autónoma del modelo y con un tiempo de corte temprano, de forma que los centros de predicción del INM puedan acceder a la información del análisis en tiempo cuasi real y sea útil en tareas de nowcasting y vigilancia atmosférica.

El análisis del viento a 10 m se lleva a cabo por el método de interpolación óptima bivariante, analizando las componente u y v del viento (zonal y meridiana) de forma simultánea y no univariante como se estaba haciendo en PAMIS (análisis de Barnes) hasta hoy.

La inclusión del viento a 10 m como variable analizada no supone un aumento de tiempo significativo en el análisis. El tiempo empleado en analizar la humedad relativa y la temperatura a 2 m, la presión a nivel del mar y el viento a 10 m se encuentra en un entorno de 2 minutos y medio, incluyendo el tiempo empleado en generar las salidas gráficas.

La máquina que se ha utilizado para realizar las pruebas es una estación de trabajo SunBlade 100, con 1024 Mb de memoria RAM. El tiempo es dependiente de la máquina. También es dependiente del número de observaciones, aunque el número de observaciones utilizadas en las pruebas es similar al de un día normal.

La utilización del método de interpolación óptima permite disponer de un control de calidad adicional para las observaciones. Se trata del control de calidad frente a vecinos. Además, la interpolación óptima tiene en cuenta la distribución espacial de las observaciones, por lo que presenta ventajas evidentes frente al análisis de Barnes, método utilizado en la herramienta de análisis disponible hasta ahora en las diferentes unidades de predicción del INM.

Los valores asignados a los parámetros que definen el proceso de filtrado e interpolación del análisis, es decir, las varianzas de los errores de las observaciones y del background, así como las longitudes características de las funciones de estructura para la función de corriente ψ y el potencial de velocidad χ y el parámetro ν que reparte la varianza total entre errores divergentes y rotacionales, han sido asignados de forma empírica de forma provisional.

En un futuro, una vez se disponga de series temporales de innovaciones se procederá a un correcto cálculo de las estadísticas de los errores del first guess y las observaciones, de la misma forma que se está procediendo en la actualidad con el análisis de la temperatura y la humedad relativa a dos metros y el espesor de nieve.

9. Agradecimientos

El autor quiere agradecer a Beatriz Navascués su ayuda inestimable en el desarrollo y la interpretación de los resultados de este trabajo, así como sus valiosas observaciones y sugerencias acerca del manuscrito de esta nota técnica.

Bibliografía

Cansado, A. 2002. Ampliando el análisis de superficie en HIRLAM. Análisis de la presión a nivel del mar.

Daley, R. 1991. Atmospheric data analysis. Cambridge University Press. ISBN 0-521-38215-7.

Del Río Ladrón de Guevara, P. 1997. Comportamiento del modelo HIRLAM/INM en la situación de precipitaciones intensas en el SW peninsular el día 6 de noviembre de 1997. Nota Técnica del SMNT nº 53.

ECMWF. 1992. Research manual 1. ECMWF data assimilation scientific documentation. 3rd Edition.

García, A., Elizaga, F. 1993. PAMIS. Procedimiento de Análisis a Mesoescala Interactivo en SAIDAS. Parte I: Formalismo Matemático. Parte II: Aplicaciones. Nota técnica del STAP nº 11.

Häggmark, L., Ivarsson, K.I., Gollvik, S., Olofsson, P.O. 2000. Mesan, an operational mesoscale analysis system. Tellus 52A, 2-20.

Hollingsworth, A., Lönnberg, P. 1986. The statistical structure of short-range forecast errors as determined from radiosonde data. Part I: The wind field. Tellus 38A, 111-136.

Hollingsworth, A., Lönnberg, P. 1986. The statistical structure of short-range forecast errors as determined from radiosonde data. Part II: The covariance of height and wind errors. Tellus 38A, 137-161.

Hollingsworth, A., Lönnberg, P. 1989. The verification of objective analyses: Diagnostics of Analysis System Performance. Meteorol. Atmos. Phys. 40, 3 – 27.

Källén, E. (Ed.). 1996. Hirlam documentation manual. System 2.5.

Kalnay, E. 2002. Atmospheric Modelling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press. ISBN 0-521-79179-0.

Lorenc, A.C. 1986. Analysis methods for numerical weather prediction. Quarterly Journal Royal Met. Society. 112, 1117-1194.

Navascués, B. 1997. Analysis of 2 meter temperature and relative humidity. HIRLAM Technical Report Nº 28. Norrköping.

Riosalido, R., Elizaga, F., Martín, F., del Pino, J., Núñez, M., Martínez, I. 1999. Estudio de la ciclogénesis atlántica del 5-6 de noviembre de 1997. Nota técnica del INM.

Unden, P. 1993. Methods of data assimilation: Optimum interpolation. Meteorological Training Course Lecture Series. ECMWF.