

Análisis Observacional y Modelización Numérica de las Condiciones de Propagación Atmosféricas de los Ecos de Radar Meteorológico – Resumen Extendido en Español¹

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

Esta memoria trata de uno de los factores que afecta la calidad de las observaciones de radar meteorológico: el grado de refracción del haz radar. Como en cualquier otro sistema de radiocomunicaciones basado en la transmisión y recepción de microondas, las condiciones meteorológicas controlan la forma en que la energía electromagnética se propaga a través de la atmósfera. La variabilidad de las condiciones de propagación, sus efectos en las estimaciones cuantitativas de precipitación por radar o la viabilidad de predecir las condiciones de propagación operativamente son algunos de los aspectos examinados en esta memoria.

1.2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo pueden resumirse en los cinco puntos siguientes:

1). Adquisición de los fundamentos teóricos y metodologías de trabajo relacionadas con el estudio de las condiciones de propagación de radar meteorológico. Se propuso una búsqueda bibliográfica cubriendo aspectos fundamentales como la propagación atmosférica de microondas, radio meteorología y observaciones radar en la atmósfera.

2). Desarrollo y implementación de herramientas de análisis destinadas a estudiar las condiciones de propagación de radar meteorológico. Este punto se desglosaba en la elaboración y adaptación de programas de cálculo así como paquetes de visualización y análisis estadístico.

¹ La versión original completa del trabajo está en catalán y se acompaña de resúmenes extendidos en castellano e inglés.

3). Caracterización de las condiciones de propagación que afectan un radar meteorológico operativo. Para tratar este aspecto se seleccionó el radar de Vallirana, situado cerca de Barcelona -instalado por la Universitat de Barcelona y operado actualmente por el Servei Meteorològic de Catalunya como primera unidad de su red de radares-. La zona del Mediterráneo se ha considerado tradicionalmente propicia a la super refracción (Bean and Dutton, 1968; Battan, 1973; Pittman, 1999). Para caracterizar las condiciones de propagación se propuso utilizar el radiosondeo de Barcelona y estimar las condiciones medias y extremas existentes, el grado de propagación anómala o desviación respecto las condiciones consideradas normales, etc.. y, además, hacer una comparación con estaciones de radiosondeo próximas. Este análisis permitiría obtener resultados prácticos como el valor local del radio terrestre equivalente utilizado habitualmente en cálculos de radiopropagación, tal como sugería el informe final de la acción europea COST-73, dedicada a las redes de radares meteorológicos.

4). Análisis de efectos asociados a la propagación sobre las estimaciones cuantitativas de precipitación con radar. Entre los efectos de la propagación anómala estudiados en proyectos financiados por la Unión Europea en los que hemos participado, como DARTH (ENV4-CT96-0261) o CARPE DIEM (EVG1-2001-00031), se encuentra el análisis del bloqueo topográfico. La topografía compleja existente en Catalunya provoca importantes situaciones de bloqueo, o apantallamiento orográfico, que obligan a utilizar técnicas de corrección en las estimaciones cuantitativas de precipitación. En este apartado se pretende estudiar el efecto de la variabilidad en las condiciones de propagación sobre las condiciones de bloqueo. Para ello se ha seleccionado la corrección de bloqueo utilizada en la red de radares NEXRAD de Estados Unidos para aplicarla a diversos blancos cercanos al radar de Vallirana, simular el bloqueo y evaluar su variabilidad.

5). Estudio de viabilidad del pronóstico operativo de las condiciones de propagación de radar meteorológico. En el marco de la acción europea concertada COST-717 (Rossa, 2000), dedicada al uso de las observaciones de radar meteorológico en modelos de predicción numérica del tiempo y en modelos hidrológicos, se plantea con gran interés el desarrollo de técnicas de control de calidad de las observaciones radar. Concretamente, este punto se contempla en la actividad relacionada con la caracterización del dato radar de la acción COST 717 (Frühwald, 2000) en que participamos. En este caso se propone utilizar herramientas operativas, tales como observaciones de radiosondeo y predicciones de modelo numérico de

mesoescala, para evaluar un posible control de calidad destinado a las observaciones de radar meteorológico.

2. CONDICIONES DE PROPAGACIÓN DE RADAR METEOROLÓGICO

2.1. Refractividad del aire

La variación de la refractividad del aire juega un papel crucial en la caracterización de las condiciones de propagación del haz radar. En particular, los perfiles verticales de temperatura, presión y humedad determinan la forma en que se propagará en la atmósfera la energía transmitida y recibida por el radar. Asumiendo perfiles medios de esas variables se consideran unas ciertas condiciones de propagación normales o estándar. No obstante, debido a la inherente variabilidad propia de la atmósfera es bien conocido que las condiciones de propagación varían, a veces muy significativamente, respecto a las consideradas estándar, produciéndose propagación anómala (PA) (también denominada *anaprop* o AP, en la literatura anglosajona). La super refracción del haz radar incrementa su curvatura respecto a las condiciones normales y, por tanto, aumentan y se intensifican los ecos de suelo espurios. Esta situación es especialmente negativa en procedimientos automáticos de estimación cuantitativa de precipitación (ECP) tales como los requeridos en la vigilancia meteorológica de lluvias intensas y alertas hidrológicas. Los controles de calidad de las ECP tradicionalmente han considerado la propagación anómala y, en general, los ecos de suelo (ver, por ejemplo, Kitchen et al., 1994; Joss and Lee, 1995; Anderson et al., 1997; da Silveira and Holt, 1997; Fulton et al., 1998; Archibald, 2000; Sánchez-Diezma et al., 2001, o Steiner and Smith, 2002, entre otros).

No obstante, el hecho que los ecos de PA puedan detectarse y limpiarse con técnicas como las mencionadas, no impide que las observaciones radar queden afectadas por un error asociado a la estimación de la altura del eco. Por ello, si el error de la altura es suficientemente significativo, cualquier aplicación que requiera un conocimiento preciso de esta variable puede verse potencialmente afectada por la PA. Por ejemplo, si los datos radar (tanto intensidad de ecos como viento Doppler) van a ser asimilados en modelos de predicción numérica del tiempo (PNT), o si a la intensidad del eco va a corregirse el bloqueo topográfico (Bech et al., 2003), el efecto de la propagación anómala puede ser relevante.

Como la PA es causada por variaciones relativamente pequeñas del índice de refracción del aire, n , la magnitud conocida como refractividad N , definida como una millonésima de n -

1, se utiliza habitualmente en estudios de PA. Bean and Dutton (1968) mostraron que N puede escribirse como:

$$N = (n - 1)10^6 = \frac{77.6}{T} \left(p + \frac{4810 \cdot e}{T} \right), \quad (1)$$

donde T es la temperatura del aire (K), p la presión atmosférica (hPa) y e la presión de vapor de agua (hPa). A veces N se describe como la suma de dos términos de (1): la refractividad seca N_d , que depende únicamente de p y T , y la refractividad húmeda, N_w , la cual es función de e y T . Una magnitud relacionada es la refractividad modificada M , que se define como:

$$M = N + \frac{z}{10^{-6} r}, \quad (2)$$

donde z es la altitud y r es el radio de la Tierra en m. M resulta muy útil para caracterizar las condiciones de propagación ya que para M constante la curvatura del rayo es la misma que la de la superficie terrestre. Por ello, las derivadas verticales negativas de M indican que el haz radar se desvía hacia la superficie terrestre y que las ondas electromagnéticas pueden quedar capturadas como en una guía de ondas (fenómeno conocido como conducción o *ducting*).

Al caracterizar las condiciones de radio propagación es habitual considerar el gradiente vertical del aire en el primer kilómetro de altura sobre el suelo para evaluar la existencia de fenómenos tales como el ducting, o las reflexiones en el suelo. No obstante, el efecto sobre la refracción del haz radar, no depende únicamente del gradiente vertical de refractividad, sino también del ángulo de incidencia entre el haz y la capa de aire considerada, así como de la frecuencia de la onda electromagnética transmitida.

En el caso de un radar meteorológico, si el gradiente vertical del primer kilómetro (VRG) es aproximadamente $-1/4a$ (i.e. -39 unidades N/km o 118 unidades M/km, siendo a el radio terrestre) habrá propagación estándar para cualquier ángulo de incidencia (Doviak and Zrnic, 1992). Un incremento en VRG respecto las condiciones normales (subrefracción) reducirá el horizonte radioeléctrico. En relación a los ecos de tierra, la subrefracción supone una disminución de su frecuencia e intensidad. Por otra parte, una disminución del VRG respecto las condiciones normales (super refracción) genera el efecto contrario, disminuyendo el radio de cobertura del haz respecto las condiciones normales para el intervalo de -78.7 km^{-1} a -157 km^{-1} . La captura o conducción, el caso extremo de super refracción, ocurre para VRG inferiores a -157 km^{-1} , pudiendo en esta situación viajar la energía del radar cerca de la superficie terrestre grandes distancias antes de interceptar blancos de tierra y producir ecos de

propagación anómala. De hecho, el estudio detallado de la fluctuación de la señal de reflectividad de los ecos de tierra podría utilizarse para monitorizar las condiciones de propagación (Fabry et al., 1997). La super refracción, y el ducting en particular, habitualmente están asociados a inversiones térmicas y a gradientes abruptos de humedad. En noches con cielo despejado, las inversiones de radiación favorecen la formación de conductos que desaparecen a medida que el sol calienta el suelo, erosionando la inversión térmica desde su base. En ocasiones este proceso puede apreciarse en la evolución diurna de los ecos de suelo (Moszkowicz et al., 1994).

2.2. Radiosondeos

Como los radiosondeos han sido tradicionalmente la única fuente de información de niveles medios y altos de la troposfera disponible de forma rutinaria, durante años se han utilizado para calcular las condiciones medias de propagación electromagnética –ver, por ejemplo los trabajos de Gossard (1977) o Low and Huddak (1997)–. Desde 1997, se vienen realizando radiosondeos en Barcelona financiados por la Subdirección General de Calidad del Aire y Meteorología de la Generalitat de Catalunya. Las observaciones se realizaron con sondas Vaisala RS-80 (lanzadas desde 41.38°N, 2.12°E y 98 m snm) tomando muestras cada 10 s lo cual proporcionaba mucha mayor resolución vertical que la disponible en los radiosondeos operativos habituales. Esto permitía mejor caracterización de la variabilidad del índice de refractividad del aire y la detección de capas super refractivas que podían pasar desapercibidas en observaciones convencionales pero que potencialmente pueden tener efectos significativos en la propagación del haz radar. Los datos usados se obtuvieron entre 1997 y 2002, a las 00 y 12 UTC. De los 2485 radiosondeos disponibles originalmente, el 86% superaron el control de calidad (comprobando tanto el formato como los valores físicos de las observaciones, según procedimiento adaptado de Météo-France, 1997).

2.3. Refractividad superficial

La refractividad superficial N_s es una magnitud importante en radiometeorología; aparece en el modelo exponencial de propagación y es uno de los términos usados en el cálculo de VRG (ITU, 1997). La Tabla 2-1 muestra un resumen estadístico de N_s en Barcelona.

Tabla 2-1. Estadística de N_s (en unidades N) en Barcelona a las 00Z y 12Z.

00Z							
MONTH	Mean	St_dev	Min	P25	P50	P75	Max
J	315	8	291	310	315	320	335
F	317	10	293	309	318	325	334
M	316	10	296	310	319	323	334
A	320	10	292	314	322	329	335
M	329	13	294	319	332	339	351
J	341	13	297	334	343	350	366
J	347	15	302	336	351	357	372
A	354	15	303	346	355	364	382
S	344	13	309	338	345	354	371
O	336	14	305	326	335	347	367
N	316	13	286	309	314	321	367
D	313	11	284	305	312	318	339
Total 00Z	330	19	284	315	328	346	382
12Z							
MONTH	Mean	St_dev	Min	P25	P50	P75	Max
J	312	10	286	305	311	317	340
F	309	11	284	302	310	317	331
M	316	12	292	306	316	324	342
A	313	13	268	306	315	324	336
M	326	13	300	316	328	336	352
J	335	13	285	326	338	344	367
J	341	16	265	332	341	352	388
A	344	16	298	331	345	356	369
S	337	17	300	322	340	350	368
O	328	15	299	316	327	340	359
N	312	12	283	305	311	319	348
D	311	11	278	303	310	318	338
Total 12Z	325	18	265	312	324	339	388
Total							
00Z & 12Z	327	19	265	313	325	341	388

Puede apreciarse que los valores nocturnos de N_s son menores que los de mediodía (unas 5 unidades N en las medias mensuales) y también la existencia de un marcado patrón estacional con un pico en agosto y un mínimo en diciembre. Este ciclo anual puede explicarse examinando el comportamiento de las variables que intervienen en el cálculo de N , sus dos componentes por separado, los términos húmedo y seco de la refractividad (Fig. 2-1).

Las variaciones mensuales de estas magnitudes muestran diferentes comportamientos. Mientras la temperatura siguió un claro ciclo estacional (con máximos en verano y mínimos en invierno como cabe esperar), en la presión el patrón es menos definido (aproximadamente, máximos en invierno y mínimos en verano). La humedad cambia constantemente a lo largo del año y, aparentemente, no sigue ninguna pauta definida. Estos comportamientos se reflejan en la evolución de N_d y N_w . La primera, proporcional a pT^{-1} , es casi constante con máximo estival y mínimo hivernal; la segunda, proporcional a eT^{-2} , es mucho más variable (a causa de e) y con un ciclo también anual desfasado 6 meses respecto N_d (a causa de T^{-2}). Por tanto, N_w , que representa un 30% de N , contribuye decisivamente a su variabilidad: a corto

plazo, añadiendo variabilidad, y también a escala mensual, modulando el ciclo anual con máximo estival que queda ligeramente compensado por el ciclo contrario de N_d .

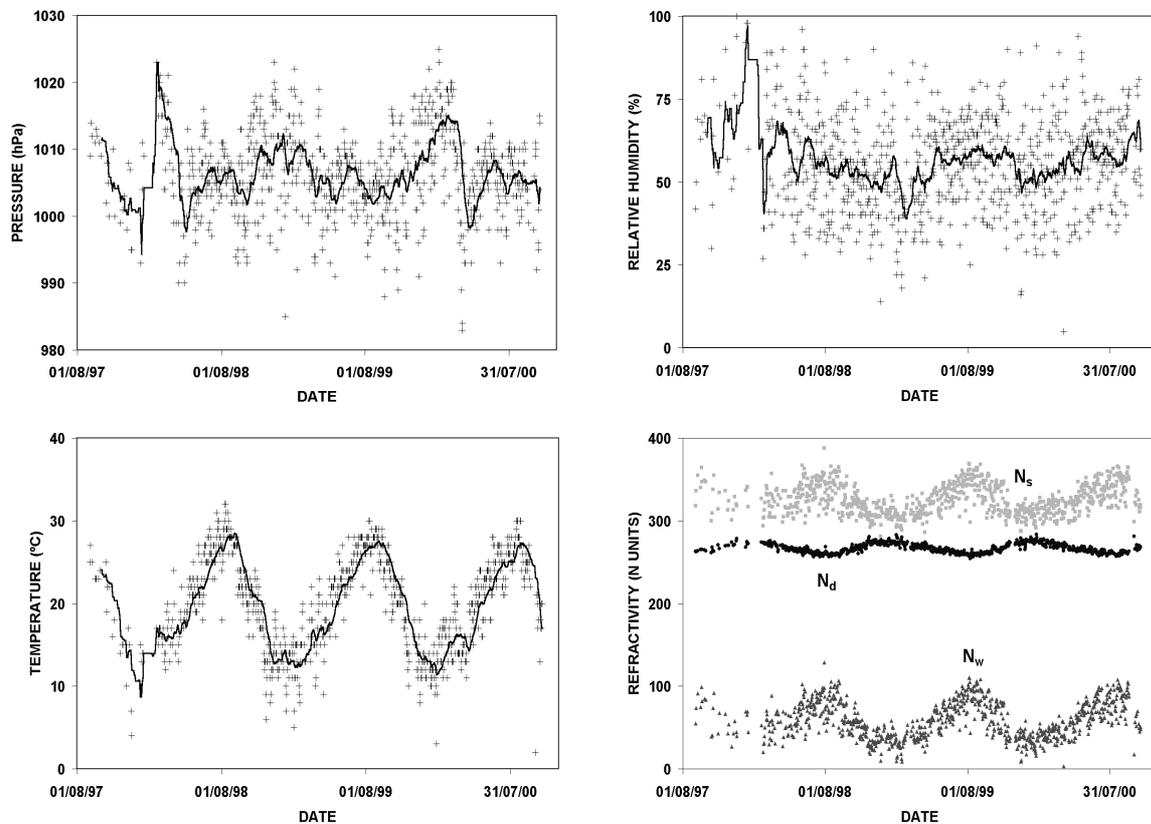


Fig. 2-1. Series temporales de presión, humedad relativa y temperatura superficial a las 12Z (con promedios temporales de 30 días) y los términos húmedo, N_w , y seco, N_d , de la refractividad superficial

2.4. Gradiente vertical de refractividad

El gradiente vertical de refractividad en los primeros 1000 m (VRG) muestra, como para N_s , valores nocturnos menores a los diurnos y también un ciclo estacional, tanto en datos de las 00 Z y 12 Z (Fig. 2.2). Este diagrama de cajas (*box whisker plot*) muestra que no sólo hay una mediana mínima en verano (agosto) sino que, además, el rango intercuartilar (IQR) aumenta respecto a los meses más fríos. Otra característica significativa es que los valores atípicos (*outliers*) están mayoritariamente asociados a casos de super refracción (raramente son causadas por situaciones subrefractivas), y además, se dan prácticamente en cualquier mes, en particular los de las 12 Z. Estos hechos también se aprecian en las series temporales de los años 2000 y 2001 (Fig. 2-3).

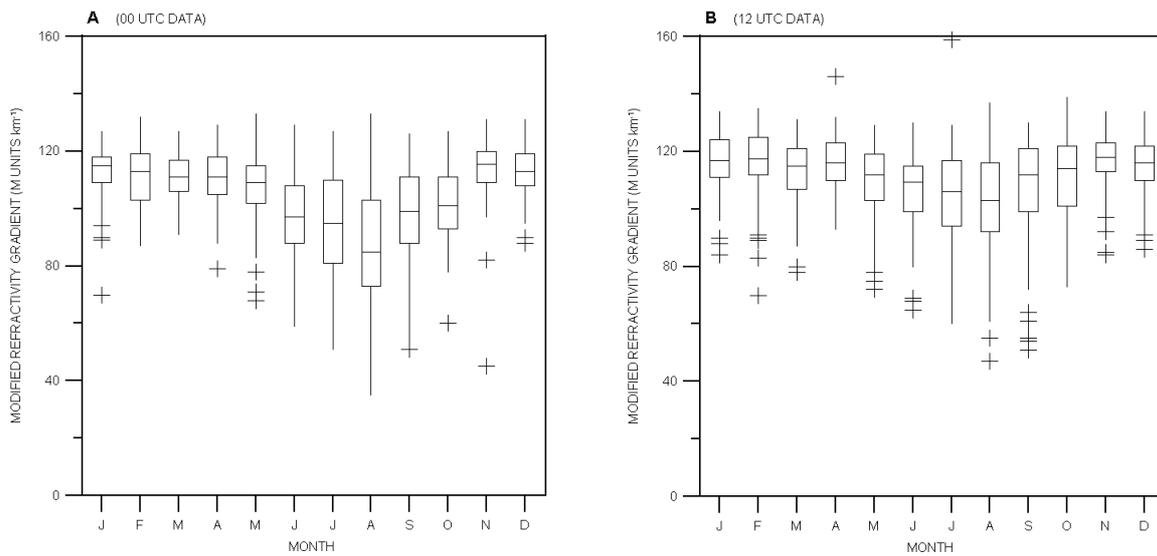


Fig. 2-2. Box-whisker plots de VRG en Barcelona a las 00 Z y 12 Z.

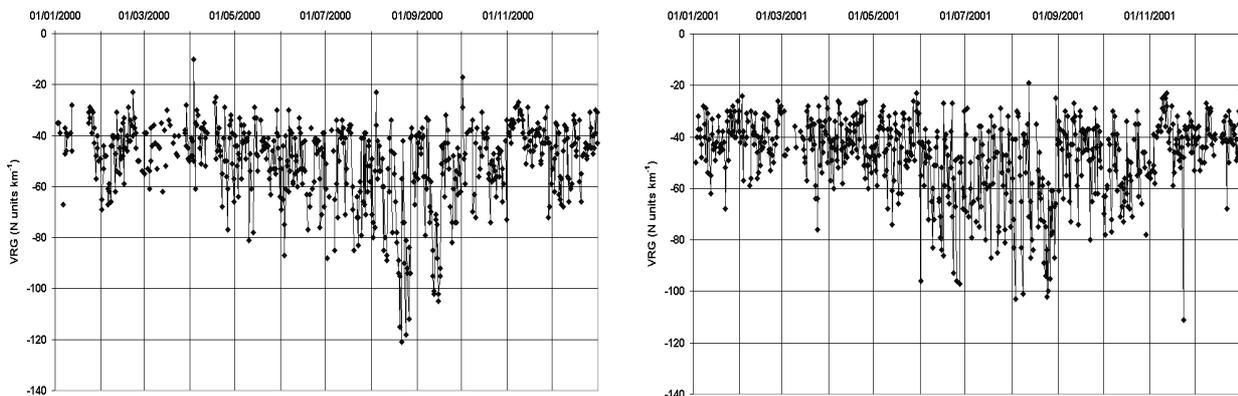


Fig. 2-3. VRG time series in Barcelona during 2000 and 2001.

El patrón estacional encontrado, con un máximo estival, coincide con el mostrado en los mapas mundiales de VRG elaborados por la Unión Internacional de Comunicaciones (ITU, 1997). En particular, en agosto, un área superrefractiva afecta el Mediterráneo Occidental, comparable en intensidad con la que se extiende por la costa pacífica sudoeste de América del Norte, y algo más débil que la situada sobre la Península Arábiga –donde se produce el mínimo mundial ese mes–. Utilizando la Historical Electromagnetic Propagation Condition Data Base del US Naval Systems Ocean Center (Patterson, 1987) se ha realizado una comparación con diez estaciones de radiosondeo de la zona. Los valores de medianas mensuales de diversas magnitudes (VRG, Ns,..) indicaron generalmente patrones similares de comportamiento estacional.

Las distribuciones de frecuencia y probabilidad acumulada para el VRG de Barcelona se muestran en la Fig 2-4. Ambas presentan un patrón unimodal con mayores pendientes para valores crecientes de VRG (por tanto hay más casos de super que de sub refracción), tanto para datos de las 00 como de las 12 Z. No obstante las modas se encuentran muy cercanas al valor nominal de propagación estándar de -40 unidades N/km (-49 unidades N/km a medianoche y -42 unidades N/km a mediodía).

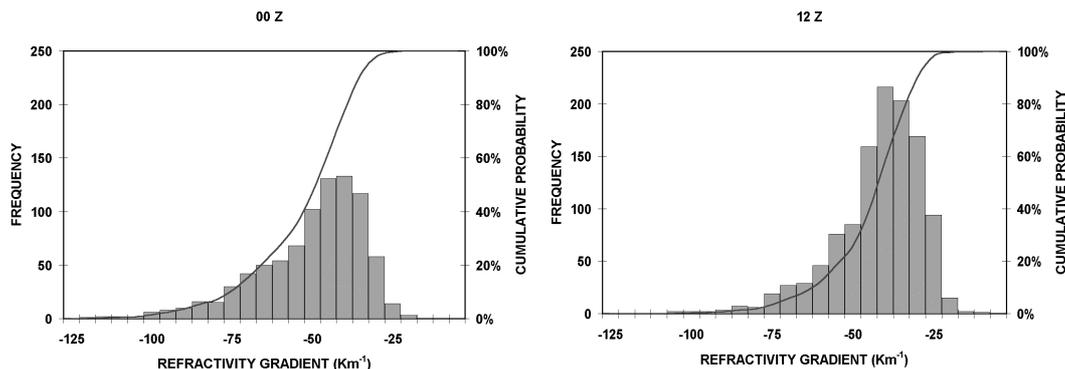


Fig. 2-4. Distribuciones de frecuencia y probabilidad acumulada de VRG en Barcelona.

La relación entre N_s y VRG se estudió anteriormente durante la década de los sesenta con observaciones recogidas tanto en el Reino Unido (Lane, 1961) y en los EUA (Bean and Dutton, 1968). En los dos casos se obtuvo una elevada correlación lineal entre los promedios mensuales de ambas magnitudes. Para el caso de Barcelona, se ha obtenido una correlación de 0.9745.

2.5. Casos de propagación anómala

Con la finalidad de ilustrar los efectos de intensos VRG super refractivos sobre las observaciones de radar meteorológico se han examinado siete semanas de datos radar y de radiosondeos, entre junio y julio de 2003. A principios de junio, los radares del SMC fueron modernizados con nuevos procesadores digitales de señal RVP-8 y también controladores de antena RCP-8 fabricados por Sigmet, Inc.. Estos cambios supusieron una mejora sustancial por lo que respecta a la exactitud en la alineación de la antena y también en la eliminación y sustitución de ecos de tierra. De hecho, con la nueva configuración, muchos de los ecos habituales que aparecían anteriormente eran correctamente eliminados. Además, unas interferencias frecuentes, causadas por un transmisor cercano operando en banda-C, desaparecían gracias al sistema de cambio de fase aleatorio entre pulso y pulso emitido. Un

ejemplo se muestra en la Fig. 2-5, donde aparecen simultáneamente ecos de lluvia real, ecos espurios de suelo y de mar y también interferencias del transmisor cercano.

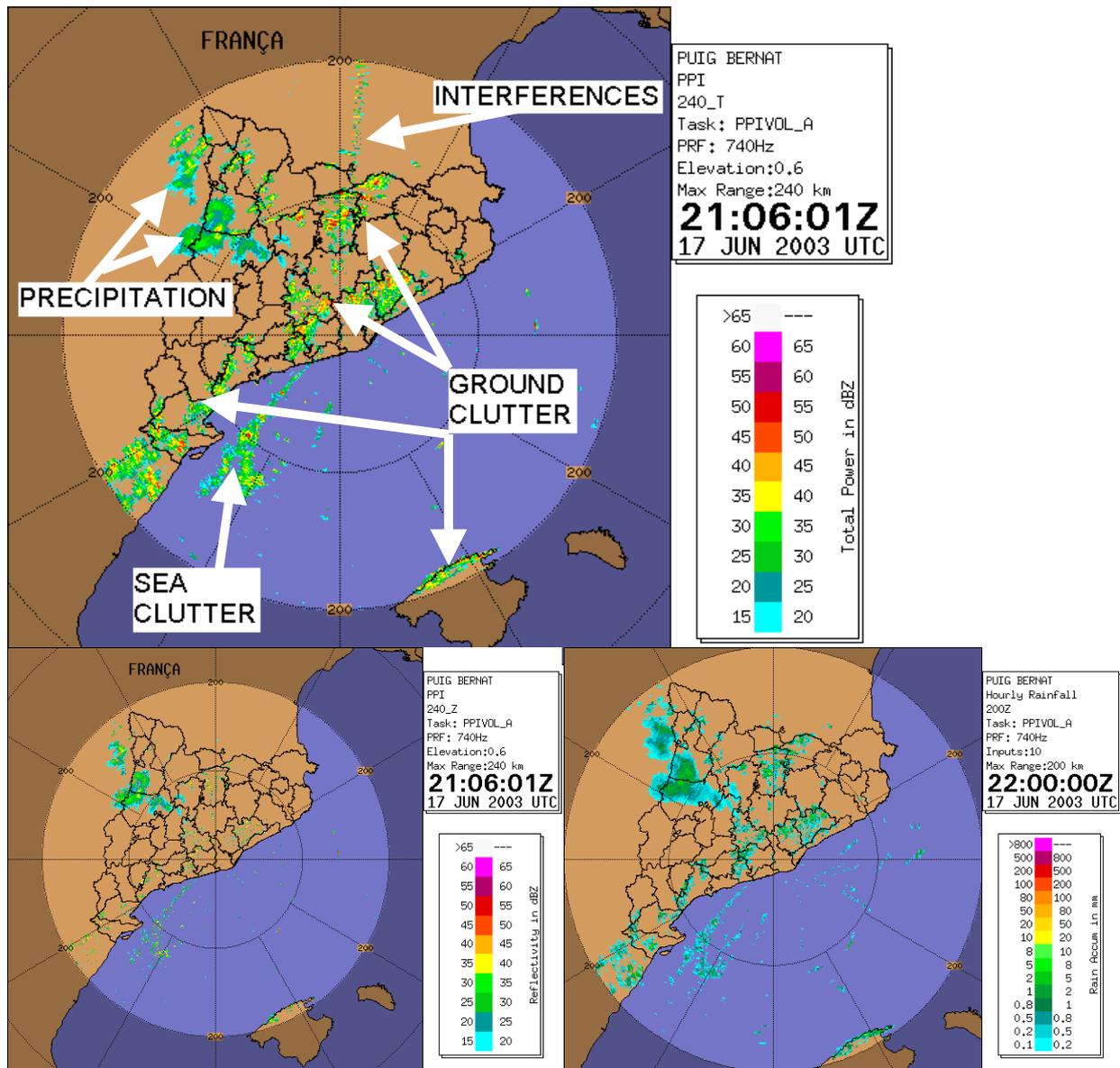


Fig. 2-5. Imagen PPI observada a las 21:06Z del 17 de junio de 2003: reflectividad sin corregir (superior), reflectividad corregida (inferior izquierda) y acumulación horaria de 21 a 22 (inferior derecha).

En el ejemplo se aprecia que muchos ecos de suelo, presentes en la imagen de reflectividad total, desaparecen en la imagen corregida por el procesador, excepto en el caso de los ecos sobre el mar ya que el oleaje limita la efectividad de las correcciones. No obstante, el efecto de los ecos espurios, aunque inferior que sin corregirse, aún persiste en las acumulaciones horarias de precipitación, tanto en tierra como en mar. El VRG observado 3 h más tarde era de -97 unidades N/km. Otros 15 episodios similares, con VRG entre -80 y -114 unidades N/km, fueron examinados encontrando mayoritariamente patrones similares de ecos espurios.

3. SENSIBILIDAD DE LAS CORRECCIONES DE BLOQUEO A LAS CONDICIONES DE PROPAGACIÓN

3.1. Bloqueo del haz radar

Los radares meteorológicos operando en zonas con topografía compleja, habitualmente experimentan bloqueo parcial o total del haz causado por las montañas circundantes. Este efecto de apantallamiento puede restringir seriamente el uso de los ángulos menores de elevación de antena, que son justamente los más útiles para estimar la intensidad de precipitación tal como exponen Joss and Waldvogel (1990), Sauvageot (1994), Collier (1996), o Smith (1998). Por tanto, en zonas montañosas resulta de interés aplicar correcciones de bloqueo a las observaciones radar, especialmente si se pretenden obtener estimaciones cuantitativas de precipitación (ECP). Tales correcciones se incluyen habitualmente en los procedimientos operativos de ECP radar como describen Harrold et al. (1974), Kitchen et al. (1994), Joss and Lee (1995), Fulton et al. (1998), o Seltmann and Reidl (1999) y pueden combinarse con técnicas específicas de eliminación de ecos espurios basadas en análisis bi y tridimensional de la estructura de los ecos (Krajewski and Vignal 2001, o Steiner and Smith 2002). La idea de que presuponer condiciones de propagación normales puede no ser la mejor opción –aunque a priori sea la más aproximada– ha sido planteada anteriormente. El uso de aplicar información local climatológica del índice de refracción para un radar en particular se sugirió por ejemplo, en la acción COST 73 (Newsome, 1992) y, en un contexto diferente, evaluado por Pittman (1999) para mejorar las observaciones de altura por radar. En esta sección se examina el efecto que tiene la variabilidad en las condiciones de propagación sobre una corrección de bloqueo basada en observaciones radar de polarización simple. El estudio se realiza mediante una función simplificada de intercepción, entre el haz radar y la topografía, propuesta para simular resultados concretos en el caso del radar meteorológico de Vallirana. Éste se encuentra a unos 650 m sobre el nivel del mar cerca de Barcelona en una zona costera de topografía compleja.

3.2. Simulación del bloqueo

Para calcular con todo detalle la interacción de la energía radar con la topografía circundante se requiere una descripción precisa del esquema de radiación de la antena, que puede ser bastante compleja. La aproximación habitual considera únicamente la energía existente en el lóbulo principal del patrón de radiación (Skolnik, 1980) y la propaga considerando el trazado de rayos según la óptica geométrica. Entonces, cuando el radar intercepta una montaña existen dos posibilidades: 1) sólo una parte de la sección transversal

del haz ilumina la topografía interceptada (bloqueo parcial) o 2). Todo el haz radar queda interceptado (bloqueo total). El porcentaje de haz radar bloqueado puede expresarse como una función del radio de la sección transversal, a , y la diferencia entre la altura media del terreno y el centro del haz del radar, y (ver Figura 3-1).

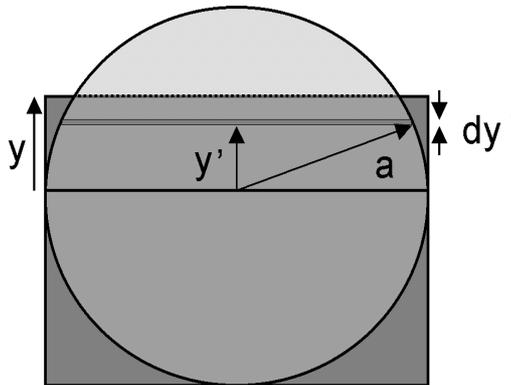


Fig. 3-1. Elementos considerados en la función de bloqueo del haz radar: a , radio de la sección transversal del haz, y , diferencia entre el centro del haz radar y la topografía, dy' diferencial de sección bloqueada y y' distancia del centro a dy'

Según la posición relativa de la altura del haz respecto a la topografía, y puede ser tanto negativa como positiva. De acuerdo con estas definiciones, el bloqueo parcial ocurre cuando $-a < y < a$, el bloqueo total significa que $y \geq a$ y, finalmente, $y \leq -a$ implica que no existe ningún bloqueo. Usando la notación introducida anteriormente, el bloqueo parcial del haz, PBB, puede escribirse como:

$$PBB = \frac{y\sqrt{a^2 - y^2} + a^2 \arcsin \frac{y}{a} + \frac{p}{2} \frac{a^2}{a^2}}{p a^2} \quad (3)$$

Por otro lado, la altura del centro del haz radar, h , viene dada a la distancia r por la expresión (ver, por ejemplo, Doviak and Zrnic, 1993):

donde R es el radio terrestre, k_e el cociente entre R y el radio terrestre equivalente, q el ángulo

$$h = \sqrt{r^2 + (k_e R)^2 + 2 r k_e R \sin q} - k_e R + H_0, \quad (4)$$

de elevación de antena y H_0 la altitud de la antena.

La información sobre las condiciones atmosféricas de propagación está contenida en k_e , que puede escribirse en términos del gradiente vertical de refractividad como:

$$k_e = \frac{1}{1 + R \left(\frac{dN}{dh} \right)} \quad (5)$$

El valor habitual de k_e en el primer kilómetro de la troposfera, asumiendo el valor normal de VRG e -40 km^{-1} , es aproximadamente de 4/3. Substituyendo (5) y (4) en (3), se obtiene una expresión del bloqueo del haz en términos de las condiciones de propagación (Bech et al., 2003).

Tres blancos u obstáculos orográficos (MNT, LML y MNY), que presentan bloqueo parcial en condiciones de propagación normal, fueron elegidos para este análisis. El radar de Vallirana (situado en $41^\circ 22' 28'' \text{ N}$, $1^\circ 52' 52'' \text{ E}$) es un radar Doppler de banda C con una anchura de haz de 1.3° a 3 dB. Los obstáculos se utilizan habitualmente para comprobar la alineación de la antena de forma rutinaria y están situados en la zona de interés de ECP del radar. Los blancos estaban localizados a diferentes distancias del radar, tenían diferente altitud y mostraban diversos grados de bloqueo, con la finalidad de ser representativos de la topografía circundante del radar. Concretamente están localizados en la llamada Sierra Pre-Litoral y comparten unas condiciones de radiopropagación similares a las indicadas por el radiosondeo de Barcelona. Por ejemplo esta zona está habitualmente influida por una marcada circulación de brisa costera, al igual que la ciudad de Barcelona (Redaño et al., 1991).

3.3. Corrección de bloqueo del haz

Para evaluar los efectos de la propagación anómala, se ha escogido el esquema de corrección de bloqueo usado por el Precipitation Processing System de la red de radares meteorológicos de EUA (NEXRAD). Este esquema (Fulton et. al, 1998), se aplica a haces radar bloqueados parcialmente. En particular, la corrección se efectúa sobre los píxeles radar cuyo apantallamiento está entre 10% y 60% y consiste en añadir a las medidas de factor de reflectividad equivalente radar de 1 a 4 dB según el grado de ocultación. La corrección también se continúa aplicando a todos los píxeles del haz a partir del primer píxel bloqueado y no considera efectos de difracción; depende sólo del porcentaje de área de la sección transversal del haz bloqueada y no se especifica qué parte de la sección queda bloqueada. Esta aproximación permite considerar una función de intercepción simple, como la propuesta anteriormente, asumiendo que los factores correctores aditivos ya contienen consideraciones

sobre los detalles de la interceptación tales como la distribución de potencia en el haz. Este procedimiento de corrección de bloqueo se usa con otras correcciones como una prueba de la continuidad vertical de los ecos y un barrido híbrido sectorizado (Shedd et al., 1991). Se han examinado otras correcciones de bloqueo con diversos grados de sofisticación (Delrieu et al. 1995, Gabella and Perona 1998, Michelson et al. 2000). Todas ellas tienen en común la suposición de condiciones de propagación estándar.

3.4. Gradiente de refractividad vs bloqueo del haz

El bloqueo del haz radar bajo cierto VRG puede simularse considerando las condiciones de propagación y la función de interceptación descritas anteriormente. Para ello se asume homogeneidad horizontal para el VRG y se calcula el bloqueo del haz para cada blanco seleccionado partiendo de un cierto ángulo inicial de antena. La Figura 3-2 muestra un conjunto de histogramas de bloqueo de haz vs VRG para diversos ángulos de elevación de antena.

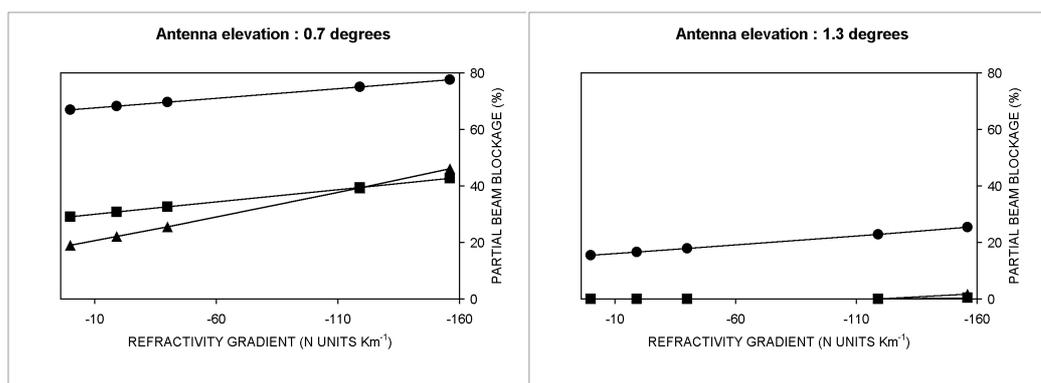


Fig. 3-2. Bloqueo simulado de haz vs VRG para los blancos MNT, (círculo), LML (cuadrado) y MNY (triángulo) a diferentes ángulos de antena.

El rango de VRG considerado contiene los valores extremos observados (-119 km^{-1} and -15 km^{-1}) e incluye también subrefracción pura (0 km^{-1}) y condiciones cercanas al ducting (-156 km^{-1}). Estos casos extremos permiten ilustrar el efecto de la presencia de capas estrechas con elevados gradientes en otras mayores con VRG poco representativos, teniendo en cuenta que la curvatura total del haz es el resultado de un proceso aditivo a lo largo de todas las capas atravesadas. Tal como era de esperar, al aumentar el ángulo de antena, el bloqueo se reduce. Por ejemplo, para la elevación de 0.7° hay un bloqueo considerable en una antena de 1.3° de anchura de haz, en este caso entre 30% y 80% aproximadamente. Por otro lado, para 1.3° de elevación la mayor parte de bloqueo queda debajo del 20% e incluso, para blancos lejanos, es

nulo salvo en casos de extrema super refracción. En la Figura 3-3, los blancos más cercanos MNT y LML, muestran bloqueo moderado (un 40%) a bajo (10%), respectivamente. MNY, más alejado, intercepta el haz radar entre el 8% y el 14%. El rango de variaciones en los bloqueos simulados oscila entre 8% (LML) y 10% (MNT) a 18% (MNY). A partir de las distribuciones de probabilidad acumulada se aprecia que tanto MNT como LML muestran clases únicas que representan más del 50%, mientras que MNY presenta mayor variedad de casos posibles. Si la corrección de bloqueo presentara mayor número de valores posibles (y no sólo los 4 considerados en el esquema de NEXRAD) probablemente aparecería mayor dispersión en los histogramas de correcciones asociados a las distribuciones de bloqueo simulado. No obstante, la dispersión en el bloqueo no implica necesariamente dispersión en las correcciones. Esto sucede en el caso MNY, donde un rango de bloqueo (10% to 16%) produce únicamente dos valores posibles de corrección, igual que los otros blancos con menor dispersión en el bloqueo.

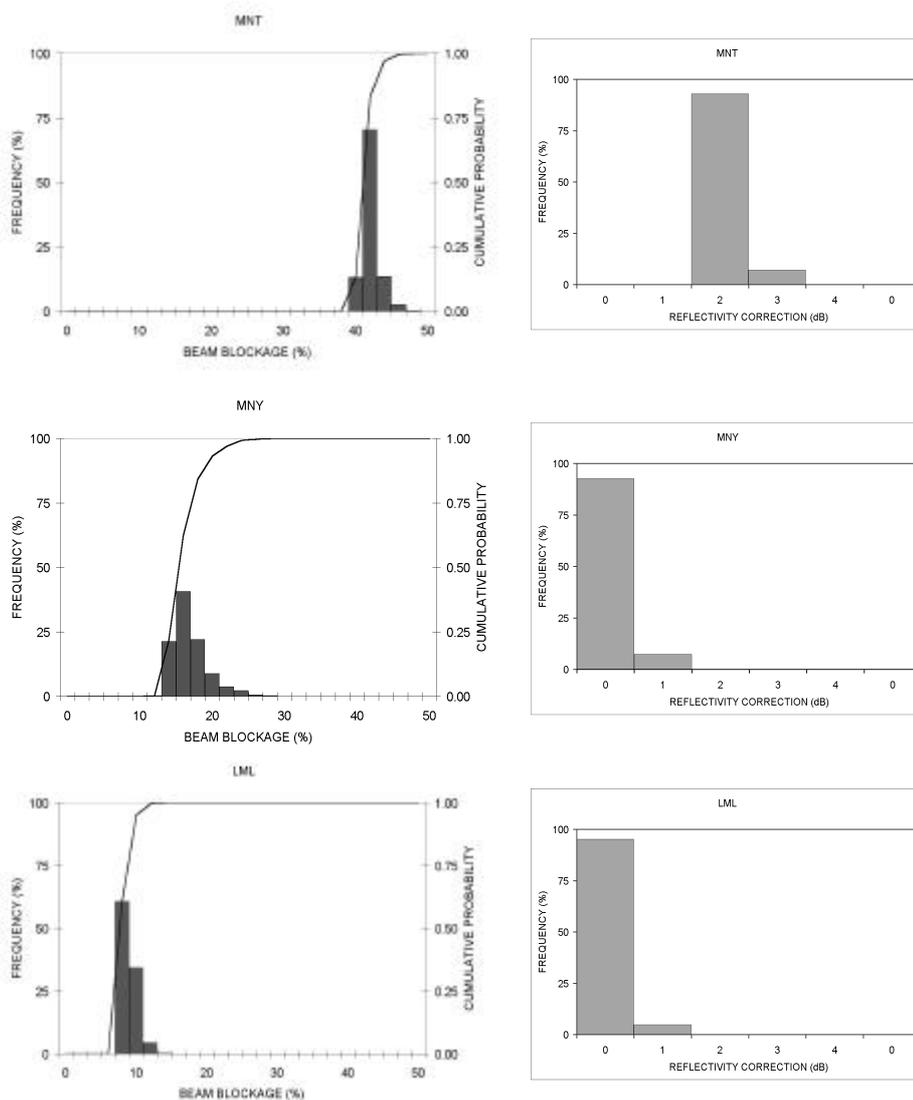


Fig. 3-3. Frecuencia de bloqueo simulado y distribución acumulada de probabilidad (izquierda) y histogramas de correcciones asociados (derecha) para 1° de elevación.

Cabe añadir que el cambio de un factor correctivo a otro se produce siempre bajo super refracción por lo que, según el análisis de este estudio, la subrefracción observada no es suficientemente relevante para causar cambios en las correcciones de bloqueo. Para los tres blancos considerados, la clase de bloqueo más habitual se produce el 85% del tiempo por lo que el procedimiento correctivo considerado parece razonablemente robusto. No obstante, la existencia de conductos (ducts) intensos, como los revelados por el análisis de radiosondeos, indica que los bloqueos pueden ser mayores que los simulados a partir del VRG (gradiente promedio del primer kilómetro) y, por tanto, debería considerarse el posible efecto sobre las correcciones en casos extremos de superrefracción. Desde el punto de vista del bloqueo del haz radar, el rango diario de variación del VRG implica un efecto limitado, tal como muestra la Figura 3-4. En ella se muestra la simulación del bloqueo del haz para una antena a 1° de elevación y también se consideran dos posibles rangos diarios (7 y 18 unidades $N\ km^{-1}$). Las diferencias en el bloqueo son del 1% al 2% por lo que, en general, no tienen efectos significativos sobre las correcciones. El rango total observado se debe más a la variación estacional, donde sí pueden haber diferencias significativas, que al causado en el ciclo diario. Otra fuente de variabilidad en las correcciones por ocultación es la precisión y el error en la alineación de la antena. Se muestra una simulación de bloqueo a 1° y el efecto de la variabilidad del VRG con errores en la elevación de 0.10° y 0.05°. Los errores de 0.10° son muy relevantes y producen efectos significativos, comparables o mayores que los causados por la variabilidad de VRG (variaciones de un 10% del bloqueo). Los errores de 0.05° inducen variaciones del apantallamiento del 5%, superiores a las causadas por el rango diario de VRG.

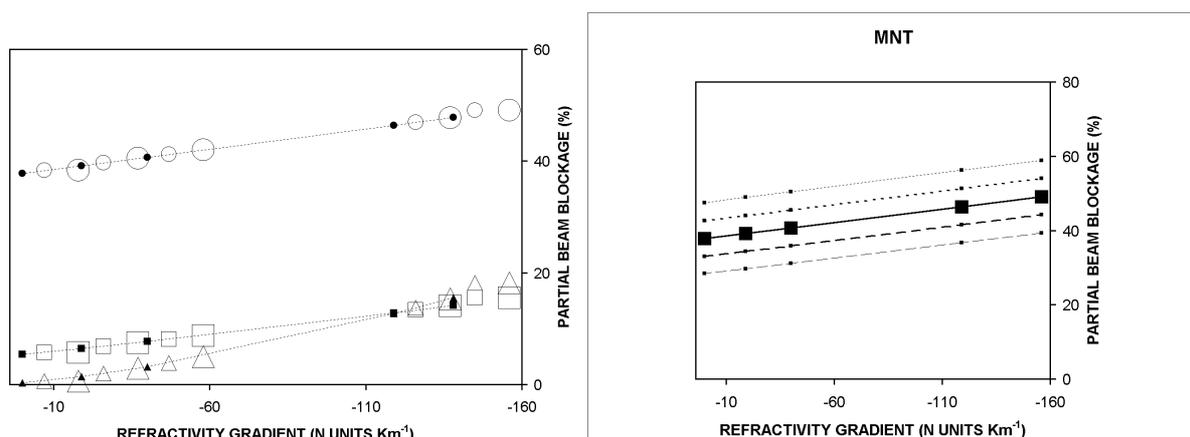


Fig. 3-4. Izquierda: efecto del rango diario de VRG: promedio a las 12 Z, diferencia con rango medio diario y con rango medio estival (símbolos sólido, transparente medio y grande, respectivamente). Derecha: bloqueo simulado para antena a 1° de elevación con errores de 0.10° y 0.05° evaluado en el blanco MNT.

4. PREDICCIÓN DE LAS CONDICIONES DE PROPAGACIÓN

4.1. Monitoreo de las condiciones de propagación con datos de PNT

El uso cuantitativo de observaciones de radar meteorológico, tales como la asimilación en PNT, requieren un exhaustivo control de calidad (Alberoni et al., 2003). Variaciones en las condiciones de propagación electromagnéticas de la troposfera pueden causar la propagación anómala del haz radar, por lo que este factor puede afectar la calidad de las observaciones. En esta sección, datos de PNT de mesoescala se utilizan para predecir las condiciones de propagación la zona de Barcelona. Cuatro meses de pronósticos se han comparado con las observaciones correspondientes de radiosondeo. Se han considerado dos magnitudes: el gradiente vertical de refractividad del primer kilómetro (VRG) y un índice de conducción (ducting index, I_D). Este índice, adimensional, mide el grado de super refracción a partir de un umbral preestablecido desde la superficie a 3 km de altura, considerando tanto conductos superficiales como de base superficial, seleccionando el mayor I_D encontrado. Valores de I_D positivos indican super refracción. Johnson et al. (1999) encontraron una elevada correlación entre I_D y los ecos radar causados por propagación anómala.

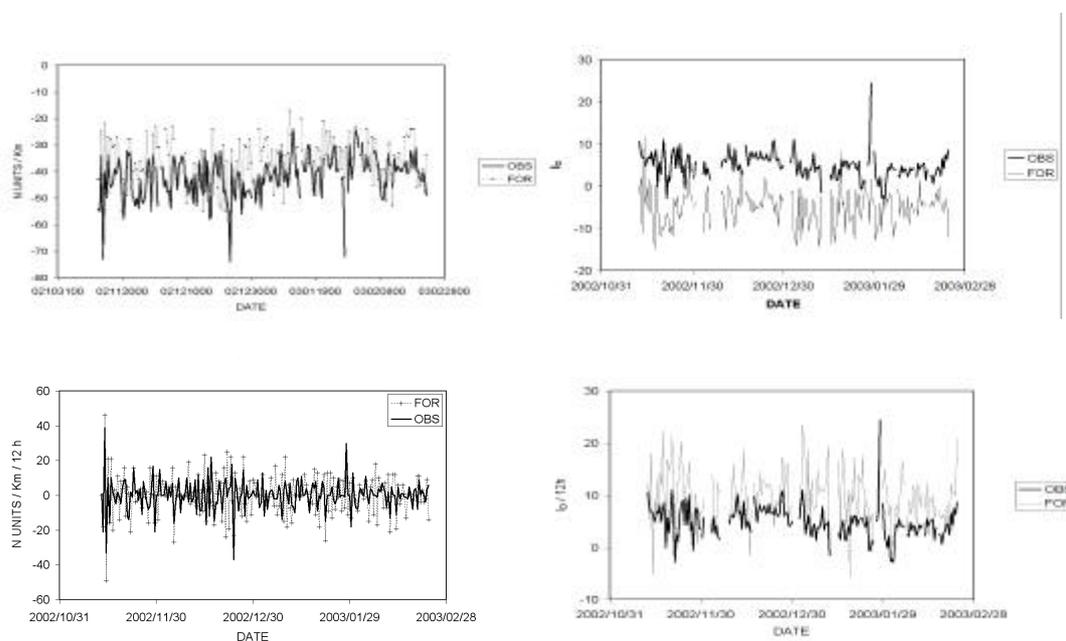


Fig. 4.1. Series temporales de pronósticos (FOR) y observaciones (OBS) (superior) y tendencias a 12 h (inferior) de VRG (izquierda) y I_D (derecha).

4.2. Predicciones y observaciones de radiosondeo

El modelo MASS (Koch et al., 1985; Codina et al. 1997) se ha utilizado para obtener perfiles verticales de refractividad previstos a 12 y 24 h. La versión del modelo era hidrostática, con una resolución de malla de 15 km y 30 niveles verticales. El período temporal considerado es de noviembre de 2002 a febrero de 2003, obteniéndose un total de 183 parejas de pronósticos y observaciones para Barcelona (Figure 4.1). Puede apreciarse que el modelo tiende a subestimar la refracción observada; tanto VRG como I_D presentan un sesgo en este sentido (5 unidades N/km y 10 unidades I_D , respectivamente). El error absoluto medio era de 8 unidades/km y 10 unidades I_D . La tendencia a 12 h de VRG generalmente concordaba con las observaciones, particularmente su signo, mientras que la tendencia de I_D era sistemáticamente mayor a la observada. Se han comparado promedios temporales con ventanas móviles de 2, 7 y 15 días que indican que tanto las condiciones medias como las tendencias se simulan razonablemente bien para VRG, y en menor grado, para I_D que muestra mayor disparidad de resultados. También se han comparado estos resultados con la persistencia de las observaciones, su función de autocorrelación, error medio (ME), error absoluto medio (MAE) y error cuadrático medio (RMSE) hasta 10 días (Figura 4.2). Por ejemplo, el menor MAE para la persistencia de las observaciones de VRG se obtiene a 12 h (6,77 unidades N/km) y el ME a 24 h (0,09 unidades N/km); para I_D aparecen resultados similares: 12h (-0.02 unidades I_D) y 36 h (2.31 unidades I_D) para MAE y ME respectivamente. Estos valores son mejores que los obtenidos con la salida del modelo descrita anteriormente. Por lo que, teniendo en cuenta estos resultados, se consideró elaborar nuevos pronósticos modificados a partir de los antiguos y las observaciones precedentes.

4.3. Pronósticos modificados

Los pronósticos modificados, P'_i , se construyeron considerando un valor inicial P'_{i0} y un cierto incremento $\Delta P'_i$:

$$P'_i = P'_{i0} + \Delta P'_i.$$

Los P'_i eran una combinación lineal de observaciones precedentes (O_{i-1} , O_{i-2} , ... de las últimas 12, 24 h, etc) para el valor inicial P'_{i0} y pronósticos (P_i , P_{i-1} , ...) en el incremento $\Delta P'_i$, con tal de introducir los valores promedio y la tendencia (Tabla 4.1; el pronóstico a es la salida directa del modelo). Se consiguieron ME de 0.01 unidades N/km para VRG, a pesar de que el MAE no mejoró significativamente respecto al pronóstico inicial de VRG. Para I_D se obtienen mejoras similares.

Tabla 4.1. ME y MAE de los pronósticos modificados: VRG (superior) y I_D (inferior).

NAME	P'_{i0}	DP'_i	Cases	ME (N units/km)	MAE (N units/km)
a	P_{i-1}	$P_i - P_{i-1}$	180	-5,09	8,03
b	O_{i-1}	$P_i - P_{i-1}$	164	-0,26	8,60
c	O_{i-1}	$P_i - (P_{i-1} + P_{i-2}) / 2$	159	-0,42	7,64
d	$(O_{i-1} + O_{i-2}) / 2$	$P_i - P_{i-1}$	155	0,09	9,29
e	$(O_{i-1} + O_{i-2}) / 2$	$P_i - (P_{i-1} + P_{i-2}) / 2$	151	-0,23	7,36
f	O_{i-2}	$P_i - P_{i-2}$	162	0,01	8,19
g	O_{i-2}	$P_i - (P_{i-1} + P_{i-2}) / 2$	159	0,23	8,63
h	$(O_{i-1} + O_{i-2} + O_{i-3}) / 3$	$P_i - (P_{i-1} + P_{i-2} + P_{i-3}) / 3$	139	-0,16	7,37
i	$(O_{i-1} + O_{i-2}) / 2$	$P_i - P_{i-2}$	151	-0,41	7,75
j	O_{i-2}	$P_i - P_{i-1}$	159	0,43	11,15

NAME	P'_{i0}	DP'_i	Cases	ME	MAE
a	P_{i-1}	$P_i - P_{i-1}$	180	9,92	10,00
b	O_{i-1}	$P_i - P_{i-1}$	164	0,03	4,98
c	$(O_{i-1} + O_{i-2}) / 2$	$P_i - (P_{i-1} + P_{i-2}) / 2$	151	0,01	4,44
d	O_{i-2}	$P_i - P_{i-2}$	162	0,07	5,14
e	$(O_{i-1} + O_{i-2}) / 2$	$P_i - P_{i-1}$	155	-0,02	4,83
f	O_{i-1}	$P_i - (P_{i-1} + P_{i-2}) / 2$	159	0,04	4,63
g	$(O_{i-1} + O_{i-2} + O_{i-3}) / 3$	$P_i - (P_{i-1} + P_{i-2} + P_{i-3}) / 3$	139	-0,20	4,13
h	$(O_{i-1} + O_{i-2} + O_{i-3} + O_{i-4}) / 4$	$P_i - (P_{i-1} + P_{i-2} + P_{i-3} + P_{i-4}) / 4$	128	-0,21	3,87
i	$(O_{i-1} + O_{i-2} + O_{i-3} + O_{i-4} + O_{i-5}) / 5$	$P_i - (P_{i-1} + P_{i-2} + P_{i-3} + P_{i-4} + P_{i-5}) / 5$	127	-0,29	3,96

Por otro lado diversos índices de verificación fueron considerados para evaluar la capacidad de predecir un valor positivo de I_D , (i.e., detección de super refracción). Los índices (Tabla 4.2) se calcularon tras contar los valores positivos de I_D correctamente predichos (A), predicciones de I_D positivas no observadas (B), observaciones de I_D positivas no predichas (C) y valores negativos correctamente predichos (D; además $N=A+B+C+D$).

Table 4.2. Índices de verificación (parcialmente adaptado de Wilson, 2001)

VERIFICATION SCORE	FORMULATION	RANGE	PERFECT
Probability of Detection	$POD=A/(A+C)$	[0,1]	1
Probability of False Detection	$POFD=B/(B+D)$	[0,1]	0
Frequency of Misses	$FOM=C/(A+C)$	[0,1]	0
Probability of a Null Event	$PON=D/(B+D)$	[0,1]	1
Success Ratio	$SR=A/(A+B)$	[0,1]	1
False Alarm	$FAR=B/(A+B)$	[0,1]	0
Percentage Correct	$PC=100(A+D)/N$	[0,100]	100
Frequency BIAS	$FBI=(A+B)/(A+C)$	[0,inf]	1
Critical Success Index	$CSI=A/(A+B+C)$	[0,1]	1
True Skill Statistic	$TSE=(AD-BC)/((A+C)(B+D))$	[-1,1]	1
Equitable Threat Score(*)	$ETS=(AD-BC)/((B+C)N+(AD-BC))$	[-1/3,1]	1
Heidke Skill Score(*)	$HSS=(AD-BC)/((A+B)(B+D)+(A+C)(C+D))$	[-inf,1]	1

*: A different formulation considering climatology is also available.

Los índices se calcularon para la persistencia a 12 y 24 h de las observaciones así como para todos los nuevos pronósticos. La Tabla 4.3 lista el resultado para la salida directa del modelo (PMASS), PMASS sin sesgo (PMASS-ME), y la persistencia de las observaciones a 12 y 24 h. La Tabla 4.4 muestra los resultados para los nuevos pronósticos. Comparándolas se aprecia que los nuevos pronósticos mejoran significativamente la salida directa del modelo (por ejemplo un POD de 0.90 frente a 0.84 para PMASS-ME). No obstante, las mejores puntuaciones se obtienen usando la persistencia a 12 h (POD: 0.96; FAR: 0.04; etc).

Tabla 4.3. Índices de verificación para la salida directa del modelo (PMASS), PMASS sin sesgo (PMASS-ME) y persistencia a 12 y 24 h.

ÍNDIX	PMASS	PMASS-ME	P12H	P24H
POD	0,064	0,843	<u>0,962</u>	0,955
POFD	<u>0,000</u>	0,900	0,700	0,800
FOM	0,936	0,157	<u>0,038</u>	0,045
PON	<u>1,000</u>	0,100	0,300	0,200
SR	<u>1,000</u>	0,942	0,956	0,949
FAR	<u>0,000</u>	0,058	0,044	0,051
PC	11,5	80,2	<u>92,2</u>	91,0
FBI	0,064	0,895	<u>1,006</u>	<u>1,006</u>
CSI	0,064	0,801	<u>0,921</u>	0,909
TSS	0,064	-0,057	<u>0,262</u>	0,155
ETS	0,004	-0,015	<u>0,159</u>	0,089
HSS	0,007	-0,031	<u>0,275</u>	0,163

Tabla 4.4. Índices de verificación para los nuevos pronósticos de I_D .

VARIABLE	b	c	d	e	f	g	h	i
POD	0,796	0,821	0,769	0,800	0,800	0,851	0,880	<u>0,896</u>
POFD	0,800	0,800	0,900	<u>0,700</u>	<u>0,700</u>	<u>0,700</u>	0,889	0,889
FOM	0,204	0,179	0,231	0,200	0,200	0,149	0,120	<u>0,104</u>
PON	0,200	0,200	0,100	<u>0,300</u>	<u>0,300</u>	<u>0,300</u>	0,111	0,111
SR	0,940	0,937	0,930	<u>0,943</u>	<u>0,943</u>	0,942	0,932	0,928
FAR	0,060	0,063	0,070	<u>0,057</u>	<u>0,057</u>	0,058	0,068	0,072
PC	76,0	78,1	72,9	76,8	76,8	81,3	82,8	<u>83,9</u>
FBI	0,847	0,876	0,827	0,848	0,848	0,903	0,944	<u>0,965</u>
CSI	0,758	0,778	0,727	0,763	0,763	0,809	0,827	<u>0,837</u>
TSS	-0,004	0,021	-0,131	0,100	0,100	<u>0,151</u>	-0,009	0,007
ETS	-0,001	0,006	-0,028	0,025	0,025	<u>0,049</u>	-0,003	0,003
HSS	-0,002	0,011	-0,058	0,049	0,049	<u>0,094</u>	-0,007	0,006

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1. Revisión

A continuación se expone una revisión punto a punto de los objetivos planteados inicialmente en la tesis.

1). Adquisición de los fundamentos teóricos y metodologías de trabajo relacionadas con el estudio de las condiciones de propagación de radar meteorológico. *Se realizó una búsqueda bibliográfica para obtener una base teórica y actualizada de los conceptos, técnicas y aplicaciones relacionadas con el tema de esta investigación. Los resultados se recogen en el Capítulo 2, que describe aspectos fundamentales de radio meteorología; en el Apéndice 1 ("Conceptos básicos generales de meteorología radar", conceptos que aparecen en las discusiones sobre medidas radar); y también quedan reflejados en el Apéndice 3 ("Bibliografía extensa").*

2). Desarrollo y implementación de herramientas de análisis destinadas a estudiar las condiciones de propagación de radar meteorológico. *Diversos programas (la mayoría escritos en C y awk, además, de un buen número de scripts Unix) han sido elaborados para procesar los datos de esta tesis (control de calidad y proceso de cinco años de datos de radiosondeo, análisis de la base de datos HEPCD, simulación del bloqueo del haz radar, extracción de perfiles verticales de refractividad a partir de la salida del modelo numérico de mesoescala, cómputo de índices de verificación, etc..). Además, también se han utilizado diversos paquetes de visualización y análisis estadístico como herramientas de postproceso.*

3). Caracterización de las condiciones de propagación que afectan un radar meteorológico operativo. *A partir de cinco años de datos de radiosondeos de Barcelona, se ha realizado un estudio estadístico de las condiciones de propagación de microondas. Se aprecia que el gradiente vertical de refractividad medio corresponde aproximadamente a las condiciones estándar (-40 unidades N/km en el primer kilómetro de la troposfera). No obstante aparece una clara tendencia a la super refracción en la distribución de frecuencias y un marcado ciclo estacional con máximo super refractivo estival, de acuerdo con otras fuentes como la base de datos Historical Electromagnetic Propagation Condition Data Base de la US Navy.*

Parte de estos resultados se exponen en Bech et al. (1998), Bech et al. (2000) © Elsevier Science, y Bech et al. (2002a) © Copernicus Gmbh.

4). Análisis de efectos asociados a la propagación sobre las estimaciones cuantitativas de precipitación con radar. *El análisis se ha concentrado en los efectos de la variabilidad de la propagación sobre las correcciones de bloqueo topográfico. Se ha utilizado la corrección de bloqueo empleada en la red de radares meteorológicos de EUA (NEXRAD) con diferentes blancos cercanos al radar meteorológico de Vallirana. La variabilidad de la corrección encontrada ha sido generalmente pequeña (superior a 1 dB respecto la correspondiente a condiciones normales). No obstante, casos extremos de super refracción pueden aumentar las diferencias a 2, o incluso 3 dB, teniendo ya un efecto significativo sobre la estimación de precipitación si se mantienen por varias horas y coinciden con un episodio de precipitación. Estos errores pueden ser mayores que los errores instrumentales del radar.*

Parte de estos resultados están expuestos en Bech et al. (2002b) y Bech et al. (2003a) © American Meteorological Society.

5). Estudio de viabilidad del pronóstico operativo de las condiciones de propagación de radar meteorológico. *Se ha utilizado la salida del modelo numérico de mesoescala MASS para elaborar perfiles verticales de refractividad previstos y estimar las condiciones de propagación del área de Barcelona. En particular, se ha calculado el perfil vertical de refractividad del primer kilómetro de altura (VRG) y un índice de ducting. Se han verificado cuatro meses de pronósticos con el diagnóstico derivado de radiosondeos. A partir de esta primera verificación, y tras examinar la persistencia de las observaciones, se han propuesto nuevos pronósticos modificados, contruidos a partir de combinaciones lineales de observaciones previas y los pronósticos originales disponibles. De esta forma se han obtenido mejoras significativas con los nuevos pronósticos, particularmente para VRG. No obstante, para el índice de ducting la persistencia de las observaciones a 12 h produjo mejores resultados en los índices de verificación que los obtenidos con el modelo, a pesar de conseguir mejorar considerablemente los pronósticos originales. Parte de los resultados están publicados en Bech et al. (2003b) y Bech et al. (2003c).*

5.2. Trabajo futuro

1). Expandir el análisis estadístico de las condiciones de propagación, profundizando en la posible relación entre éstas y variables meteorológicas, y considerar el uso de técnicas inferenciales a medida que haya más datos disponibles.

2). Realizar casos de estudio detallados desde el punto de vista meteorológico (marco sinóptico, reanálisis mesoescalares,..). Los datos de modelos numéricos de mesoescala resultarían de gran interés para este propósito.

3). Realizar casos de estudio desde el punto de vista de la propagación radar. Esto requeriría el uso de un modelo avanzado de propagación, tal como se ha hecho previamente en algunos proyectos del SMC, que resuelva la ecuación parabólica que describe la distribución de potencia radar y considera el campo bi o tridimensional de la refractividad.

4). Comparar en más detalle las condiciones de propagación y los ecos de radar meteorológico. Para ello resultaría ideal disponer de series temporales de observaciones de alta calidad, cubriendo todas las épocas del año, y con un estricto control de calidad que aseguren la estabilidad de las medidas (potencia, alienación de antena,..) para poder realizar la comparación de forma consistente.

5). Estudiar la respuesta de procedimientos de identificación y sustitución de ecos de suelo o mar en situaciones de propagación anómala, especialmente en casos con precipitación, donde aparecen mezclados con ecos de lluvia, ya que son los casos de mayor interés hidrometeorológico.

6. AGRADECIMIENTOS

He de expresar mi gratitud a muchas personas que, de una forma u otra, han contribuido a completar este trabajo. A menudo me he sentido afortunado por el apoyo ofrecido por profesores y colegas que me han ayudado a avanzar. Los logros obtenidos son principalmente el resultado de la interacción constructiva con otras personas; por otro lado, asumo bajo mi única responsabilidad los posibles errores u omisiones de esta memoria.

Jeroni Lorente y Bernat Codina, del Departament d'Astronomia i Meteorologia de la Universitat de Barcelona (DAM), han dirigido esta tesis doctoral. Siempre me ofrecieron incondicionalmente su apoyo científico y académico. Su experiencia y paciencia fueron cruciales para dar forma y llenar de contenido este volumen.

También debo mi agradecimiento a otros profesores del DAM: A. Redaño por su apoyo entusiasta, tanto en la universidad como trabajando en el Servei Meteorològic de Catalunya (SMC); M. C. Llasat y M. R. Soler por comentarios sobre el control de calidad de radiosondeos y la capa fronteriza, respectivamente. Igualmente agradezco otros profesores de cursos de doctorado como J. M. Baldasano y L. Cremades, donde también participaron J. Calbó y C. Soriano; años más tarde proporcionaron valiosa documentación que utilicé en este trabajo.

Querría agradecer todos los compañeros que tuve en el DAM durante el período 1994-1997: C. Cerro y F. Pastor – compartimos proyectos relacionados con pluviometría y disdrometría que aportaron una experiencia de gran utilidad–; igualmente mi más sincero agradecimiento a A. Sairouni, T. Aniento, J. Vidal y J. Aymamí. A ellos y a todos los estudiantes que participaron en el lanzamiento de radiosondeos en la Facultad de Física debemos agradecer su trabajo anónimo.

El verano de 1996 disfruté de una beca del Comissionat d'Investigació d'Universitats de la Generalitat de Catalunya para una fructífera estancia en el grupo de I+D de meteorología radar del UK Met. Office en Bracknell. Gracias a la experiencia y amabilidad de P. Hardaker, E. Archibald y C. Pierce inicié mi trabajo con datos radar y empecé a aprender los problemas potenciales que pueden afectarlos. Ese mismo otoño se instalaba el radar meteorológico de Vallirana y pude constatar el valor de las lecciones aprendidas en Bracknell. Poco después empezaba el proyecto europeo DARTH, donde planificamos y iniciamos esta tesis. Debo agradecer especialmente al coordinador, A. Holt, y D. Bebbington (Essex University), C. G. Collier (Salford University), M. Chandra (DLR y Chemnitz Universität), P. P. Alberoni y S. Nanni (SMR d'Emilia-Romagna), M. Monai (ARPAV Veneto) y T. Andersson y D. Michelson (Swedish Meteorological and Hydrological Service). Todos ellos ofrecieron su experiencia y aportaron valiosas ideas, documentación o ejemplos de propagación anómala que resultaron de gran interés, especialmente al inicio de este trabajo. La continuación del proyecto DARTH, CARPE-DIEM, ambos financiados por la Unión Europea, fue de vital importancia para completar esta tesis.

A finales de 1997 ingresé en el SMC. Profesionalmente supuso un cambio importante; continuaba trabajando con el radar de Vallirana pero ahora el objetivo era realmente operativo más que académico. Debo agradecer sinceramente aquellos que me cedieron su confianza, O. Puig, E. Vilaclara y S. Paricio. Sus comentarios me ayudaron a enfocar algunos aspectos de esta tesis de una forma más práctica que en un primer momento; considero que esta reorientación resultó muy beneficiosa.

Igualmente quiero agradecer a otros compañeros del SMC, mayoritariamente procedentes del DAM, que ofrecieron valiosas sugerencias sobre diferentes partes de este trabajo: J. Moré, J. Toda, J. R. Miró, N. Pineda, R. Veciana, M. Aran y T. Rigo.

En el SMC he tenido ocasión de tratar, en ocasiones participando estrechamente, en diversos proyectos que, en mayor o menor grado, estaban relacionados con el tema de la tesis y finalmente han revertido beneficiosamente sobre ésta. Estoy particularmente agradecido por sus comentarios y documentación aportada a A. Broquetes y X. Fàbregas (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC) en relación al cálculo de cobertura radar; E. Vilar and C. Catalán (Portsmouth University, Institut d'Estudis Espacials de Catalunya) sobre la implementación de un modelo de propagación avanzado que ya consideraba variaciones en las condiciones atmosféricas y a D. Sempere y R. Sánchez-Diezma (Grup de Recerca Aplicada en Hidrometeorologia, UPC) por discusiones sobre estimaciones cuantitativas de precipitación con radar. También a A. Rius y L. Cucurull (Institut d'Estudis Espacials de Catalunya y posteriormente en NCAR y NCEP) por comentarios sobre meteorología GPS y sus aplicaciones.

Desde el punto de vista instrumental, debo agradecer la experiencia práctica vivida con J. López (MCV, S.A) – compartiendo y sufriendo muchas horas los radares del SMC– y al equipo de Sigmet Inc., fabricantes de muchos subsistemas clave de nuestros radares (R. Passarelli, E. Saltikova y, particularmente, F. O'Hara), por útiles discusiones durante el curso de formación realizado en Boston (EUA) en junio del 2002. Vaya también mi agradecimiento por la amabilidad y hospitalidad ofrecida por A. Bellon y I. Zawadki en una breve pero intensa visita al Marshall Radar Observatory en Montreal (Canadá).

Querría hacer una mención especial a la acción europea COST-717, dedicada al uso de observaciones de radar meteorológico en modelos de predicción numérica y modelos hidrológicos. Agradezco a todos aquellos que me han permitido y facilitado participar en ella, en particular al coordinador general A. Rossa (MeteoSwiss) y también al del grupo de trabajo en el que participo, D. Frühwald (Deutscher Wetterdienst).

Igualmente querría expresar mi gratitud por datos, documentación diversa, y sugerencias de C. Ramis (Universitat Illes Balears) y J. L. Camacho, R. Pascual, J. Cuixart, A. Jansà y J. Arús (Instituto Nacional de Meteorología). Con este último, junto a A. Mestres, he disfrutado la tarea llevada a cabo en la Associació Catalana de Meteorologia, que me ha permitido acercarme a la extensa obra de E. Fontserè y el antiguo SMC.

Finalmente, pero no por ello menos importante, debo dar las gracias por los ánimos y apoyo moral de familiares y amigos, en particular de mis padres, y muy, muy especialmente de aquellos con quien comparto la vida diaria: (en orden inverso de aparición) Laia, Oriol, Martí y Encarnació. A ellos dedico esta tesis.

7. REFERENCIAS

- Alberoni, P. P., V. Ducrocq, G. Gregoric, G. Haase, I. Holleman, M. Lindskog, B. Macpherson, M. Nuret, and A. Rossa, 2003: Quality and Assimilation of Radar Data for NWP — A Review. COST 717 document. ISBN 92-894-4842-3, 38 pp.
- Anderson, T., Alberoni, P. P., Mezzalsama, P., Michelson, D., Nanni, S., Anomalous propagation identification from terrain and sea waves using vertical reflectivity profile analysis, *28th Internat. Conf. On Radar Meteor.*, Amer. Meteor. Soc., Austin, Texas, 93-94, 1997.
- Archibald, E., Enhanced clutter processing for the UK weather radar network, *Phys. and Chem. of the Earth. Part B-Hydrology, Oceans and Atmosphere*, **25**, 823-828, 2000.
- Battan, L. J. 1973: Radar Observation of the atmosphere. University of Chicago Press, Chicago, 324 pp.
- Bean, B. R., and E. J. Dutton, 1968: *Radio meteorology*. Dover Publications, 435 pp.
- Bech, J. (1998), D. Bebbington, B. Codina, A. Sairouni, J. Lorente, "Evaluation of atmospheric anomalous propagation conditions: an application for weather radars" EUROPTO Conference on Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology .Barcelona, SPAIN. September 1998, SPIE Vol. 3499, pp. 111-115

- Bech, J. (2000), A. Sairouni, B. Codina, J. Lorente, D. Bebbington, "Weather radar anaprop conditions at a Mediterranean coastal site", *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, Vol. 25, No. 10-12, pp- 829-832, 2000, ISSN 1464-1909
- Bech, J. (2002), B. Codina, J. Lorente, and D. Bebbington, "Monthly and daily variations of radar anomalous propagation conditions: How "normal" is normal propagation?". *Proceedings 2nd European Conference on Radar Meteorology*: 35–39. Copernicus GmbH © 2002.
- Bech, J. (2002), Codina B., Lorente J., Bebbington D., "On the effect of anomalous propagation on weather radar beam blockage corrections", *EU COST 717 Working Document, WG2*. 9 p.
- Bech, J. (2003a), Codina B., Lorente J., Bebbington D., "The sensitivity of single polarization weather radar beam blockage correction to variability in the vertical refractivity gradient". *J. Atmos. and Oceanic Technol.*, 20, 845-855.
- Bech, J. (2003b), Codina B., Lorente J., "A quality control for weather radar data using NWP mesoscale output", *EU COST 717 Working Document, WG2*. 7 p.
- Bech, J. (2003c), Codina B., Lorente J., "Forecasting weather radar propagation conditions using NWP mesoscale model data", 5 p., submitted to the 25th EWGLAM - 10th SRNWP meeting, October 2003, Lisbon.
- Bech, J., A. Sairouni, B. Codina, J. Lorente, and D. Bebbington, 2000: Weather radar anaprop conditions at a Mediterranean coastal site. *Phys. Chem. of the Earth (B)*, **25**, 829-832.
- Bech, J., Codina B., Lorente J., Bebbington D., 2003: The sensitivity of single polarization weather radar beam blockage correction to variability in the vertical refractivity gradient. *J. Atmos. and Oceanic Technol.*, **20**, 845-855.
- Codina, B., A. Sairouni, J. Bech, A. Redaño, 1997: Operational application of a nested mesoscale numerical model in Catalonia (Meteo'96 Project). *INM/WMO International Symposium of Cyclones and Hazardous Weather in the Mediterranean*, ISBN 84-7632-329-8, 657-667.
- Collier, C.G., 1996: *Applications of weather radar systems*. John Wiley & Sons, 390 pp.
- da Silveira, R. B., and Holt, A. R., A neural network application to discriminate between clutter and precipitation using polarisation information as feature space. *28th Internat. Conf. on Radar Meteor., Amer. Meteor. Soc.*, Austin, Texas, 57-58, 1997.
- Doviak, R. J., and Zrníc, D. S., Doppler radar and weather observations, *Academic Press*, 1992.
- Fabry, F., C. Frush, I. Zawadki, and A. Kilambi, 1997: On the extraction of near-surface index of refraction using radar phase measurements from ground targets. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **14**, 978-897.
- Frühwald, D., 2000: Using radar observations for parametrisations and validation of atmospheric models-strategy of COST 717 Working Group 2. *Phys. Chem. Earth (B)*, **25**, 1251–1253.
- Fulton, R.A., Breidenbach, J.P., Seo, D., Miller, D., and O'Bannon, T., The WSR-88D Rainfall Algorithm. *Wea. Forecasting*, **13**, 377-395, 1998.
- Gabella, M., and G. Perona, 1998: Simulation of the orographic influence on weather radar using a geometric-optics approach, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 1486-1495.
- Gossard, E.E., 1977: Refractive index variance and its height distribution in different air masses. *Rad. Sci.* **12** (1), 89-105.
- Harrold, T., E. English, and C. Nicholass, 1974: The accuracy of radar-derived rainfall measurements in hilly terrain. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **100**, 201–208. 837–845.
- ITU, ITU-R P.453-6 Recommendation, The Radio Refractive Index: Its Formula and Refractivity data, ITU Radiocommunication Assembly, *ITU-R P-Series*, 1997.
- Johnson, C., D. Harrison, B. Golding, 1999: Use of atmospheric profile information in the identification of anaprop in weather radar images. *Observation Based Products Technical Report No. 17*, Forecasting Systems, UK Meteorological Office, 30 pp. [Available from the National Meteorological Library, London Road, Bracknell, RG12, 2SZ, UK]
- Joss, J., and A. Waldvogel, 1990: Precipitation measurement and hydrology, a review. *Radar in Meteorology*, D. Atlas, Ed., American Meteorol. Soc., Boston, ed. D. Atlas, Chapter 29a, pp. 577-606.

- Joss, J., and R. Lee, 1995: The application of radar-gauge comparisons to operational precipitation profile corrections, *J. Appl. Meteor.*, **34**, 2612-2630.
- Kitchen, M., R. Brown, A.G. Davies, 1994: Real-time correction of weather radar data for the effects of bright band, range and orographic growth in widespread precipitation, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **120**, 1231-1254.
- Koch, S. E., W. C. Skillman, P. J. Kocin, P. J. Wetzel, K. F. Brill, D. A. Keyser, M. C. McCumber, 1985: Synoptic scale forecast skill and systematic errors in the MASS 2.0 model. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 1714-1737.
- Krajewski, W. F., and B. Vignal, 2001: Evaluation of anomalous propagation echo detection in WSR-88D Data: a large sample case study. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **18**, 807-814.
- Lane, J.A, The radio refractive index gradient over the British Isles, *J. Atmosph. and Terrest. Phys.*, **21**, 157-166, 1961.
- Low, T. B., and D. R. Hudak, 1997: Development of Air Mass Climatology Analysis for the Determination of Characteristic Marine Atmospheres. Part I: North Atlantic, *Theor. Appl. Climatol.*, **57**, 135-153.
- Météo-France, 1997: Quality control on GTS data at Météo-France. Météo-France, Service Centrale d'Exploitation de la Météorologie. 42, Av. Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 1, France
- Michelson, D. B., T. Andersson, J. Koistinen, C. G. Collier, J. Riedl, J. Szturc, U. Gjertsen, A. Nielsen, S. Overgaard, 2000: *BALTEX radar data centre products and their methodologies*. RMK **90**. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköpping, Sweden.
- Moszkowicz, S., Ciach G. J., Krajewski W. F., Statistical detection of anomalous propagation in radar reflectivity patterns, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **11**, 1026-1034, 1994.
- Newsome, D.H., 1992: *Weather Radar Networking COST Project 73 Final Report*, Kluwer Academic Publishers, 254 pp.
- Patterson, W. L., 1987: Historical Electromagnetic Propagation Condition Database Description. Technical Document 1149, ADA-A189 157, NOSC 1149, US NAVY, 71 pp.
- Pittman, T.S., 1999: *A climatology-based model for long-term prediction of radar beam refraction*. Master's Thesis, US Air Force Institute of Technology, 184 pp.
- Redaño, A., J. Cruz and J.Lorente, 1991: Main features of sea breeze in Barcelona, *Meteorol. Atmos. Phys.*, **46**, 175-179
- Rossa, A. M.: 2000, The COST 717 action: use of radar observations in hydrological and NWP models. *Phys. Chem. Earth (B)*, **25**, 1221-1224.
- Sánchez-Diezma, R., Sempere-Torres, D., Delrieu, G., and Zawadki, I., An improved methodology for ground clutter substitution based on a pre-classification of precipitation types. *30th Internat. Conf. on Radar Meteor.*, München, Germany, Amer. Meteor. Soc., 271-273, 2001.
- Sauvageot, H., 1994: Rainfall measurement by radar: a review. *Atmos. Res.*, **35**, 27-54.
- Shedd, R., J. Smith, and M. Walton, 1991: Sectorized hybrid scan strategy of the NEXRAD precipitation-processing system. *Hydrological Applications of Weather Radar*, I. Cluckie and C. Collier, Eds. Ellis Horwood Limited, 151-159.
- Skolnik, M., 1980: *Introduction to radar systems*. New York, McGraw-Hill, 581 pp.
- Smith, P. L., Jr., 1998: On the minimum useful elevation angle for weather surveillance radar scans. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 841-843.
- Steiner, M., and Smith, J. A., Use of three-dimensional reflectivity structure for automated detection and removal of non-precipitating echoes in radar data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 673-686, 2002.
- Wilson C., 2001: Review of current methods and tools for verification of numerical forecasts of precipitation. COST 717 Working Document WDF_02_200109_1, Met. Office, UK, 14 pp.

ANÁLISIS OBSERVACIONAL Y MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE LAS CONDICIONES DE PROPAGACIÓN ATMOSFÉRICAS DE LOS ECOS DE RADAR METEOROLÓGICO – RESUMEN EXTENDIDO EN ESPAÑOL 1

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS 1

 1.1. *Introducción*..... 1

 1.2. *Objetivos*..... 1

2. CONDICIONES DE PROPAGACIÓN DE RADAR METEOROLÓGICO..... 3

 2.1. *Refractividad del aire* 3

 2.2. *Radiosondeos*..... 5

 2.3. *Refractividad superficial* 5

 2.4. *Gradiente vertical de refractividad* 7

 2.5. *Casos de propagación anómala* 9

3. SENSIBILIDAD DE LAS CORRECCIONES DE BLOQUEO A LAS CONDICIONES DE PROPAGACIÓN..... 11

 3.1. *Bloqueo del haz radar* 11

 3.2. *Simulación del bloqueo*..... 11

 3.3. *Corrección de bloqueo del haz*..... 13

 3.4. *Gradiente de refractividad vs bloqueo del haz*..... 14

4. PREDICCIÓN DE LAS CONDICIONES DE PROPAGACIÓN 17

 4.1. *Monitoreo de las condiciones de propagación con datos de PNT*..... 17

 4.2. *Predicciones y observaciones de radiosondeo* 18

 4.3. *Pronósticos modificados*..... 18

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO 21

 5.1. *Revisión* 21

 5.2. *Trabajo futuro*..... 23

6. AGRADECIMIENTOS 23

7. REFERENCIAS 24