

Observacions amb radar meteorològic en condicions de bloqueig topogràfic

Joan Bech*, Bernat Codina † i Jerónimo Lorente‡

Bloqueig topogràfic

Els radars meteorològics ubicats en zones muntanyoses experimenten el que es coneix com a *bloqueig topogràfic*. El bloqueig consisteix en el fet que una part de l'energia emesa pel radar és interceptada per les muntanyes que l'envolten (figura 1). Aquest efecte pot restringir seriosament l'ús dels escombratges del radar amb menor angle d'elevació sobre l'horitzó. Justament són els escombratges amb elevacions inferiors els que proporcionen informació més útil per a l'estimació de la intensitat de precipitació a nivell del terra (on tenen major interès hidrometeorològic).

A causa del bloqueig topogràfic, en zones muntanyoses sovint s'apliquen correccions sobre l'energia rebuda pel radar amb la finalitat de minimitzar els efectes de la topografia sobre les observacions, especialment si es vol obtenir estimacions quantitatives de precipitació (o EQP).

El desenvolupament de radars amb capacitat de dur a terme mesures polarimètriques va conduir fa uns anys a noves aproximacions al problema del bloqueig topogràfic (Ryzhkov i Zrníc, 1998). No obstant això, la majoria de radars meteorològics operatius són encara sistemes que funcionen amb polarització simple. Per tant, les correccions de bloqueig topogràfic efectuades amb aquests radars són encara un procediment necessari per a l'obtenció d'EQP en zones muntanyoses.

A les zones de topografia complexa, en general, hi ha una menor densitat de pluviògrafs i de les xarxes de radar que en zones més planes. Igualment s'observa una major variabilitat del camp de precipitació, sovint a causa de circulacions induïdes per la mateixa orografia. Per tot això, l'obtenció d'EQP en regions muntanyoses

té un interès especial.

La idea que assumir condicions de propagació normals en les observacions amb radar pot no ser sempre una bona opció no és nova (tot i que en la majoria d'ocasions sovint sí que és la millor primera aproximació). Així, l'ús d'observacions locals climatològiques de la refractivitat de l'aire per a un radar concret va ser suggerit a l'informe final de l'acció integrada COST-73 (Newsome, 1992) i també, en un context diferent, avaluat per Pittman (1999) per tal de millorar les altures mesurades per radars militars a diferents indrets del món.

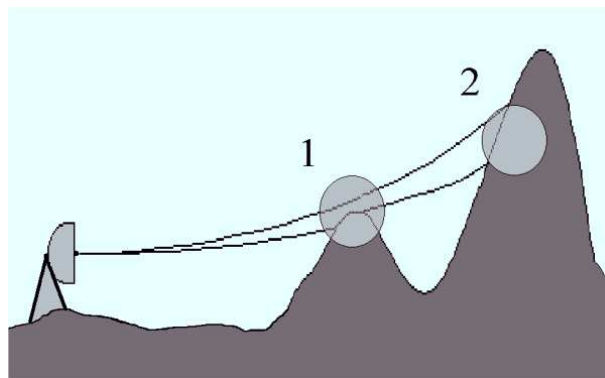


Figura 1: Dibuix esquemàtic de bloqueig topogràfic parcial (1) i total (2) d'un feix de radar

Correccions de bloqueig topogràfic

Per tal d'avaluar els efectes de la propagació anòmala sobre les correccions de bloqueig topogràfic s'ha seleccionat un esquema particular de correcció. En concret es tracta de l'esquema operatiu de la xarxa de radars nord-americana NEXRAD (*next generation weather radar*), implementada la darrera dècada del segle XX als Estats Units.

Aquest procediment forma part del complex algorisme de correccions de les observacions amb radar, conegut com a NEXRAD PPS (*precipitation processing system*), destinat a obtenir una estimació quantitativa de la precipitació (EQP). Aquest algorisme es descriu detalla-

*Joan Bech (Barcelona, 1970) és doctor europeu en Física per la Universitat de Barcelona i tècnic del Servei Meteorològic de Catalunya.

†Bernat Codina (Sant Hipòlit de Voltregà, 1964) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona i professor titular de Física de la Terra de la Universitat de Barcelona.

‡Jerónimo Lorente (Navarrés, València, 1946) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona i catedràtic d'universitat. Àrea de coneixement de Física de la Terra de la Universitat de Barcelona.

dament a Fulton et al. (1998). L'esquema de correcció s'aplica als feixos del radar que estan parcialment bloquejats, o apantallats, per l'orografia. En particular, es consideren apantallaments d'entre el 10 % i el 60 % , que es corregeixen afegint valors d'entre 1 i 4 dB. En cas que el bloqueig sigui inferior, el feix no és corregit, mentre que, si és superior, el feix es desestima i s'utilitza l'elevació immediatament superior per fer l'EQP. Aquest procediment s'aplica a les quatre primeres elevacions d'escombratsges del radar.

En la taula 1 es detallen les correccions a cada tipus d'ocultació. Aquesta correcció s'aplica a tots els píxels del feix del radar a partir del primer píxel interceptat per l'orografia i es negligeixen els efectes de difracció. Pot veure's que la correcció únicament depèn del percentatge de secció transversal del feix del radar que ha quedat ocultada. El procediment original assumeix una distribució de potència del feix constant (en contra de la pràctica habitual de suposar una distribució gaussiana amb simetria radial al voltant de l'eix del feix).

Ocultació [%]	Correcció [dB]
0-10, > 60	0
11-29	+1
30-43	+2
44-55	+3
56-60	+4

Taula 1: Correccions d'ocultació parcial NEXRAD

Tot això ens permet considerar una funció d'intercepció simplificada, assumint que els factors de correcció additius ja tenen present consideracions sobre els detalls de la geometria d'intercepció com ara els mencionats en relació amb la distribució de potència. Aquest procediment de correcció de bloqueig del feix s'utilitza conjuntament amb d'altres del NEXRAD PPS.

Condicions de propagació

Per tal d'avaluar els efectes de la variació de les condicions de propagació sobre el bloqueig del radar s'han utilitzat observacions del radiosondatge de Barcelona. Concretament, s'han fet servir mesures de les 12 Z obtingudes amb sondes Vaisala model RS-80 llançades entre 1997 i 2000.

Radiosondatges i refractivitat

Les sondes mostrejaven cada 10 s i proporcionaven una resolució vertical major que l'habitual de les mesures operatives d'aquest tipus. Això permet caracteritzar millor la variabilitat de l'índex de refracció de l'aire i, alhora, detectar capes superrefractives més primes que haurien passat desapercebudes per observacions de radiosondatge estàndard però que poden tenir efectes significatius en la propagació del feix del radar.

Després d'aplicar un control de qualitat sobre les da-

des, es van seleccionar 862 radiosondatges que representaven totes les estacions de l'any; l'anàlisi se centrava en els primers 1000 m sobre el nivell del terra. Aquest conjunt pot considerar-se una bona representació de la climatologia local i proporciona una àmplia variació de les condicions de propagació per tal d'avaluar els efectes de la variabilitat d'aquestes sobre les correccions del feix del radar per bloqueig topogràfic.

A partir de les dades van calcular-se tres magnituds: ocurrencia de capes de guiatge o conductes (*ducts*) en els primers 1000 m d'altura, gradients verticals de refractivitat (GVR) individuals de cada capa i gradients de refractivitat de l'estrat sencer de 1000 m de gruix.

Aquest darrer gradient de tot l'estrat necessàriament proporciona una visió suavitzada (pot ocultar gradients de capes fines molt superiors comparats amb el gradient mitjà de tot l'estrat), però s'ha calculat d'aquesta manera seguint les recomanacions de la Unió Internacional de Telecomunicacions (ITU, 1997).

Distribució de freqüències del GVR

Per tal d'obtenir una distribució de freqüències de GVR van agrupar-se les mesures en 11 classes equiespaiades en intervals de 10 km^{-1} , que s'estenen de -115 km^{-1} a -15 km^{-1} . La distribució de freqüència i l'histograma del GVR per la capa dels primers 1000 m sobre el nivell del mar a Barcelona es mostra en la figura 2. La moda del GVR fou de -40 km^{-1} (propagació estàndard) i el valor màxim i mínim foren de -119 km^{-1} i -15 km^{-1} , respectivament. Cal destacar que el 2 % de la mostra presentava un GVR inferior a -90 km^{-1} .

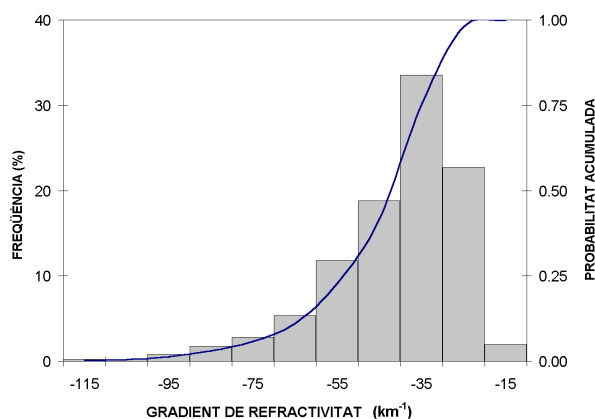


Figura 2: Histograma de freqüències i probabilitat acumulada del GVR de les 12 Z a Barcelona

Sobre les capes de gruix inferior contingudes a l'estrat dels primers 1000 m, va observar-se que presentaven condicions de guiatge (o *ducting*) en un 37 % dels casos analitzats. A més un 60 % del total tenien GVR inferiors a 300 km^{-1} (caràcter superrefractiu molt marcat).

Variació diària del GVR

L'anàlisi d'un major conjunt de dades de radiosondatge que contenia observacions de les 00 Z confirma que el subconjunt considerat per aquest estudi, basat en dades de les 12 Z, té un caràcter menys superrefractiu del que resulta en considerar dades diürnes i nocturnes. Això és degut a l'efecte dominant del refredament radiatiu nocturn que provoca inversions de temperatura a nivells baixos.

Aquest conjunt major estava format per 2140 radiosondatges (864 de les 12 Z i 1276 de les 00 Z). A partir de l'anàlisi de les diferències entre les mitjanes de GVR de les 00 i les 12 va estimar-se l'oscil·lació diària d'aquest valor. De mitjana, va trobar-se una diferència de 7 unitats km^{-1} entre les mitjanes del GVR del migdia i la mitjanit. No obstant això, aquest rang varia considerablement al llarg de l'any: als mesos d'estiu pot doblar-se (18 km^{-1} a l'agost) i a l'hivern es redueix fins a assolir valors de 1 o 2 km^{-1} .

Simulació de bloqueig del radar de Vallirana

El radar de Vallirana està ubicat al cim del puig Bernat ($41^\circ 22' 28'' \text{ N}$, $1^\circ 52' 52'' \text{ E}$). Fou instal·lat l'any 1996 per la Universitat de Barcelona i des del 1997 se'n fa càrrec el Servei Meteorològic de Catalunya. L'antena del radar proporciona una amplada del lòbul principal del feix d' $1,3^\circ$ a 3 dB de potència. Per tal d'avaluar la sensibilitat de les correccions de bloqueig a la propagació anòmala s'han considerat diversos blancs (ecos de terra) al voltant del radar de Vallirana. Concretament, es tracta de tres blancs que en condicions de propagació normal presenten bloqueig parcial en ser observats pel radar meteorològic de Vallirana (figura 3).

Blancs considerats

Catalunya, situada al NE de la península Ibèrica, presenta una topografia complexa, formada per diverses serralades distribuïdes en diferents orientacions. Els Pirineus dominen el sector nord amb altituds superiors als 3000 m mentre que, més o menys paral·leles a la costa, les serralades Litoral i Prelitoral s'alcen aproximadament fins als 1700 m (Montseny), 1200 (Montserrat) o 1100 (Sant Llorenç del Munt).

Massís/Cim	Codi	Distància [km]	Altitud [m]
Montserrat	MNT	26	1100
La Mola	LML	32	1000
Montseny	MNY	65	1400

Taula 2: Característiques dels blancs considerats

Els blancs escollits s'utilitzen rutinàriament per a la comprovació de l'alineació de l'eix principal de l'antena del radar. La taula 2 llista, per a cada blanc, el nom del massís o muntanya on es troba el blanc, el codi de tres lletres amb el qual s'identifica, la distància al radar i la

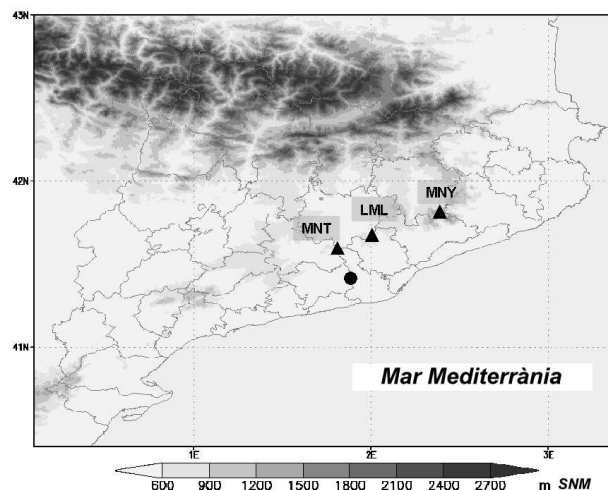


Figura 3: Mapa topogràfic de Catalunya on es mostra la posició dels blancs seleccionats (triangles) i del radar de Vallirana (cercle)

seva altitud aproximada, obtinguda a partir d'un model digital d'elevacions.

Aquests tres blancs presenten diferents graus d'ocultació parcial del feix en condicions de propagació normal, estan a diferents distàncies del radar i tenen diferent altitud, per la qual cosa poden considerar-se representatius dels obstacles topogràfics que envolten el radar de puig Bernat.

A més, els blancs estan situats en la zona d'interès per a l'EQP del radar de Vallirana i tots tres són a la serralada Prelitoral, compartint unes condicions de propagació comparables a les donades pel radiosondatge de Barcelona. Per exemple, l'àrea considerada està habitualment influïda per la circulació de la marinada, tal com passa a la ciutat de Barcelona (Redaño et al., 1991).

Proposta de funció de bloqueig

Assumint l'aproximació habitual de l'òptica geomètrica i considerant tan sols el lòbul principal del diagrama d'antena del radar (Skolnik, 1980), quan el feix del radar intercepta un obstacle, com ara una muntanya, hi ha dues situacions possibles (vegeu la figura 1): 1) tan sols una part de la secció transversal del feix il·lumina el blanc interceptat (situació coneguda com a *bloqueig parcial*) o bé, 2) el feix del radar queda completament bloquejat (*bloqueig total*).

El percentatge d'àrea de la secció transversal del feix del radar que queda bloquejada per la topografia pot expressar-se com una funció del radi de la secció transversal del radar, a , i la diferència de l'altura mitjana del terreny i el centre del feix del radar, y (vegeu la figura 4). Depenent de la posició relativa del feix respecte de l'obstacle orogràfic, la magnitud y pot prendre valors

positius o negatius.

D'acord amb aquestes definicions, hi ha bloqueig parcial quan $-a < y < a$, bloqueig total si es compleix que $y \geq a$ i, finalment, no es produeix bloqueig si es verifica que $y \leq -a$.

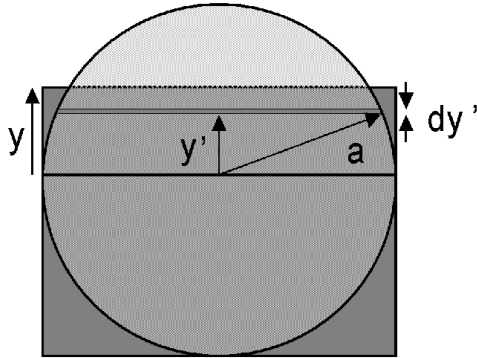


Figura 4: Elements considerats en la funció d'intercepció (vegeu detalls en el text)

Utilitzant la notació introduïda anteriorment, el bloqueig parcial del feix o PBB (abreviació de l'expressió anglesa *partial beam blockage*) pot escriure's (segons es detalla a l'apèndix) com:

$$PBB = \frac{y\sqrt{a^2 - y^2} + a^2 \arcsin(y/a) + \pi a^2/2}{\pi a^2} \quad (1)$$

D'altra banda, l'altura del centre del feix del radar, h , a una distància r , ve donada per l'expressió (vegeu, per exemple, Doviak i Zrníc, 1993):

$$h = \sqrt{r^2 + (k_e R)^2 + 2rk_e R \sin \theta} - k_e R + H_0 \quad (2)$$

on R és el radi de la Terra, k_e és el quocient entre R i el radi de la Terra equivalent, θ és l'angle d'elevació de l'antena i H_0 l'altitud de l'antena. La informació sobre les condicions de propagació està continguda en k_e , magnitud que pot escriure's en termes del gradient de refractivitat com:

$$k_e = \frac{1}{1 + R(dN/dh)} \quad (3)$$

Com a referència, recordem que el valor habitual de k_e en el primer quilòmetre de la troposfera, assumint el valor normal del GVR de -40 km^{-1} , és aproximadament de $4/3$. Substituint les equacions (3) i (2) en (1), s'obté una expressió del bloqueig del feix del radar en termes

de les condicions de propagació i la geometria de la intercepció amb un obstacle orogràfic (poden consultar-se els detalls a l'apèndix):

$$PBB = \frac{1}{\pi} \left\{ \left[\frac{4(z + k_e R - H_a)}{(r\beta)^2} - \frac{4\sqrt{r^2 + (k_e R)^2 + 2rk_e R \sin \theta}}{(r\beta)^2} \right] \times \left[\frac{(r\beta)^2}{4} - \left(z + k_e R - H_0 - \sqrt{r^2 + (k_e R)^2 + 2rk_e R \sin \theta} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \arcsin \left[2(r\beta)^{-1} \left(z + k_e R - H_0 - \sqrt{r^2 + (k_e R)^2 + 2rk_e R \sin \theta} \right) \right] + \frac{\pi}{2} \right\} \quad (4)$$

Resultat i discussió de la simulació

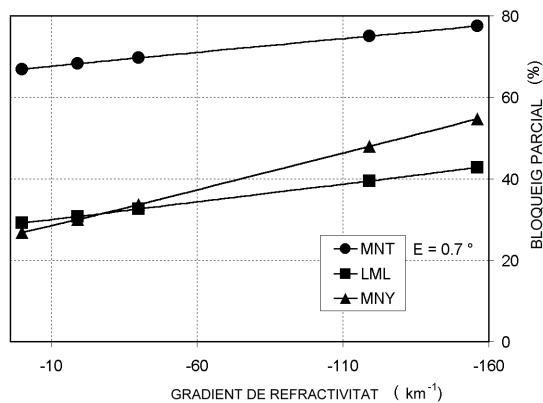
El bloqueig topogràfic del feix del radar pot simular-se considerant els dos elements descrits anteriorment: d'una banda, la informació empírica de les condicions de propagació (continguda en la distribució de freqüències del GVR) i, de l'altra, la funció d'intercepció del feix amb la topografia. Per efectuar la simulació cal assumir un GVR homogeni per a la totalitat del feix del radar i en tota la zona de cobertura on hi ha els blancs analitzats i, posteriorment, calcular el bloqueig associat a cada obstacle topogràfic considerat (taula 3).

	Gradient vertical de refractivitat [km^{-1}]				
	0	-19	-40	-119	-156
Blanc	Correcció de reflectivitat [dB]				
MNT	2	2	2	3	3
LML	0	0	0	1	1
MNY	0	1	1	1	1

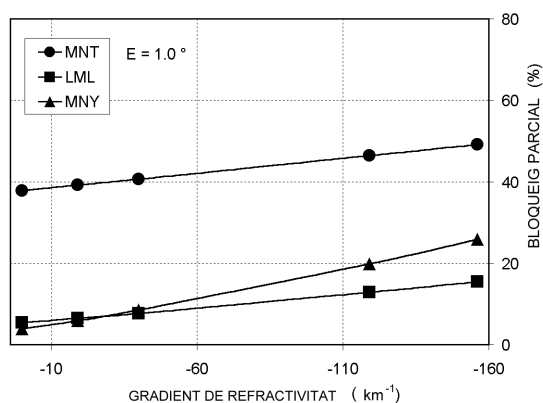
Taula 3: Correccions per ocultació en diferents condicions

Gradient de refractivitat vs. bloqueig del feix

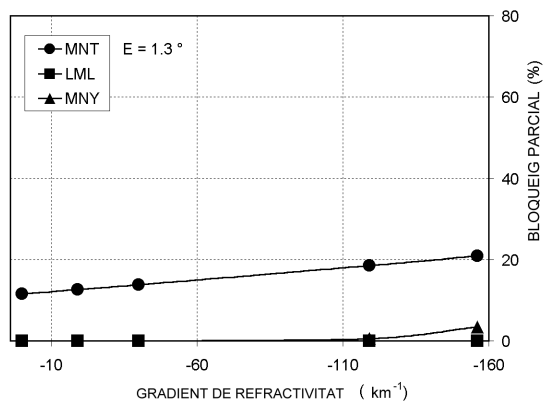
La figura 5 mostra un conjunt de gràfiques on, per a un cert rang de GVR, es calcula el bloqueig associat per diferents angles d'elevació de l'antena del radar. Els valors del gradient de refractivitat considerats contenen els extrems observats (-119 km^{-1} i -15 km^{-1}) i també s'estenen per tal d'incloure la subrefracció pura (0 km^{-1}) i condicions de superrefracció molt intensa – gairebé de capa de guiatge o ducting – (-156 km^{-1})



a) Elevació $E = 0.7^\circ$



b) Elevació $E = 1.0^\circ$



c) Elevació $E = 1.3^\circ$

Figura 5: Simulació de bloqueig parcial vs. GVR pels blancs (MNT, cercle; LML, quadrat; i MNY, triangle) per a diversos angles d'elevació de l'antena del radar

per tal d'il·lustrar els efectes en el bloqueig en aquestes situacions límit. Aquests casos extrems semblen plausibles considerant la presència d'estrats de relativament petit gruix mencionats anteriorment (comparats amb els primers 1000 m de la troposfera considerats), però que tenen GVR elevats encara que l'estrat global que els conté presenti un gradient inferior. Això s'explica perquè el corbament del feix del radar és el resultat d'un procés additiu de tota la capa d'aire travessada (la curvatura final integra totes les curvatures experimentades al llarg de tot el camí òptic recorregut pel feix del radar).

Tal com era previsible, en augmentar l'angle vertical de l'antena, el bloqueig es redueix. Per exemple, per a un angle d'elevació d'antena de $0,7^\circ$ cal esperar un bloqueig del feix relativament petit (nul sense obstacles topogràfics) ja que el límit inferior del lòbul principal de l'antena (amb un feix d' $1,3^\circ$ com el del radar de Vallirana) parteix paral·lel a la superfície de la terra (estrictament, amb una elevació d'antena de $0,65^\circ$, la meitat d' $1,3^\circ$). No obstant això, en els blancs considerats, que lògicament presenten un cert obstacle al feix del radar, es produeixen ocultacions d'entre el 30 % i el 80 %. D'altra banda, les ocultacions produïdes amb un angle d'elevació d'antena d' $1,3^\circ$ són quasi sempre inferiors al 20 % i, fins i tot, per a alguns dels blancs, són sempre nul·les tret de produir-se una situació de superrefracció extrema. La simulació amb 1° d'elevació d'antena presenta una situació intermèdia entre les dues anteriors.

Depenent de la particular geometria de la intercepció de cada blanc considerat, la variació del bloqueig amb el GVR varia de forma diferent. Per exemple, dels casos mostrats, MNY – el blanc més llunyà – presenta un bloqueig per a situacions refractives molt intenses major que el del blanc LML. En canvi, en la resta de condicions (normals i subrefractives) es dona la situació inversa.

Variabilitat del bloqueig del feix

Considerant la distribució de freqüències del GVR obtinguda anteriorment, pot estimar-se la variabilitat del bloqueig del feix per a un obstacle topogràfic donat. En aquest cas, l'estimació la farem sense estendre el rang del GVR com s'ha fet abans (incloent valors de GVR extrems), i s'utilitzarà únicament la distribució real del GVR obtinguda empíricament. En principi, això ha de produir un resultat més conservador, o suavitzat, del que es pot esperar en la realitat ja que, a la pràctica, es produeix més superrefracció que la reflectida a l'histograma de distribució de freqüències del GVR.

La figura 6 mostra les distribucions de freqüència de bloqueig i la corresponent probabilitat acumulada per diversos blancs interceptats amb un feix obtingut amb un angle d'elevació inicial d' 1° . Aquests histogrames s'han construït considerant classes del 2 % del bloqueig del feix. Els blancs més propers, MNT i LML, mostren un grau de bloqueig relativament moderat (40 %) o baix (10 %), respectivament. El blanc més distant, MNY,

intercepta el feix del radar entre un 8 % i un 24 %. El rang de variacions en el feix del radar observat en els blancs anteriors oscil·la entre el 8 % (LML) i el 10 % (MNT) fins al 18 % (MNY).

A partir de les distribucions acumulades de freqüència pot veure's que tant MNT com LML mostren classes individuals que representen més del 50 % del total dels casos, mentre que MNY presenta una distribució més suavitzada on els casos queden més repartits. Considerant la correcció de bloqueig aplicada a la xarxa NEXRAD, descrita anteriorment, pot construir-se un histograma que avaluï amb quina freqüència s'aplicaria cada nivell de correcció a un blanc topogràfic particular. Això es mostra en la figura 7, on apareix l'histograma de correccions en el valor del factor de reflectivitat equivalent del radar per als diferents blancs donats en la taula 2 tenint present la distribució de bloqueig de la figura anterior. La simulació s'ha fet assumint una elevació inicial d'antena d'1°.

En el cas que la correcció de bloqueig topogràfic del feix del radar considerada, en lloc de ser una funció esglaonada amb tan sols uns quants valors possibles com la de NEXRAD, hagués estat una funció contínua (o, estrictament, amb molts més valors possibles), és possible que la dispersió dels histogrames del bloqueig de cada blanc hagués quedat més reflectida en la dispersió de l'histograma de correccions. No obstant això, aquest clarament no és el cas del tipus particular de correcció escollida ja que tan sols quatre únics valors correctors són possibles en funció del grau de bloqueig.

Per tant, en general pot afirmar-se que la dispersió del bloqueig (condicionada per la dispersió de les condicions de propagació) no necessàriament implica la mateixa dispersió en la distribució de freqüències de les correccions de bloqueig topogràfic.

Aquest efecte queda il·lustrat pel blanc més distant, MNY. En aquest cas una variabilitat relativament elevada en el bloqueig (del 10 % al 16 %) produeix en realitat dos únics valors possibles de correccions, exactament com passa amb els altres dos blancs que tenen una variabilitat de bloqueig inferior. El canvi d'un factor de correcció a l'altre es produeix sempre en condicions de superrefracció, per la qual cosa, en aquest cas, la subrefracció no és prou significativa per produir canvis rellevants en l'histograma de bloqueig topogràfic. De fet, això podia anticipar-se a partir de la distribució de freqüències del GVR, la qual presenta una cua molt més reduïda en la zona subrefractiva que en la superrefractiva.

Malgrat la variabilitat mostrada en la correcció de bloqueig cal destacar que, en els tres blancs considerats, la correcció de bloqueig més habitual es produeix més del 85 % del temps. Per tant, en principi, pot concloure's que la correcció de bloqueig NEXRAD és prou estable i robusta amb les condicions de propagació considerades

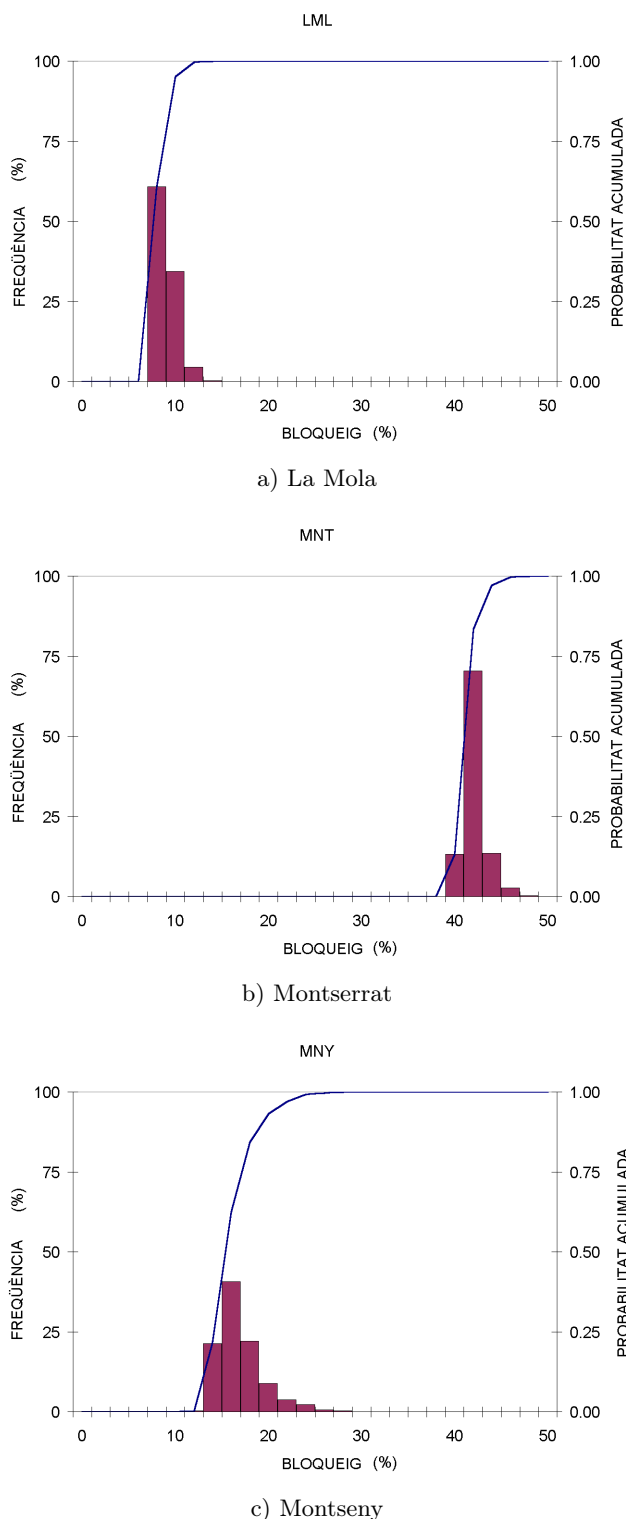
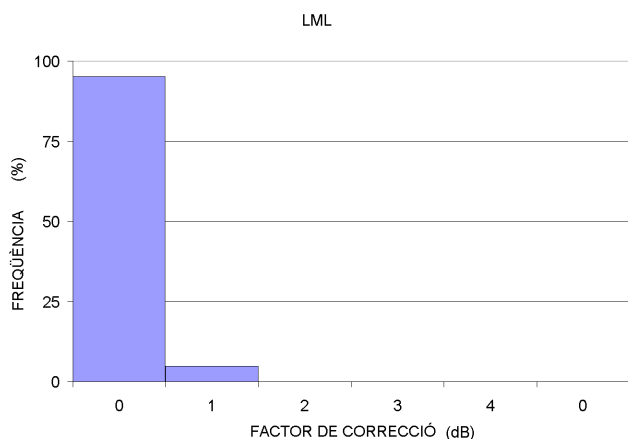
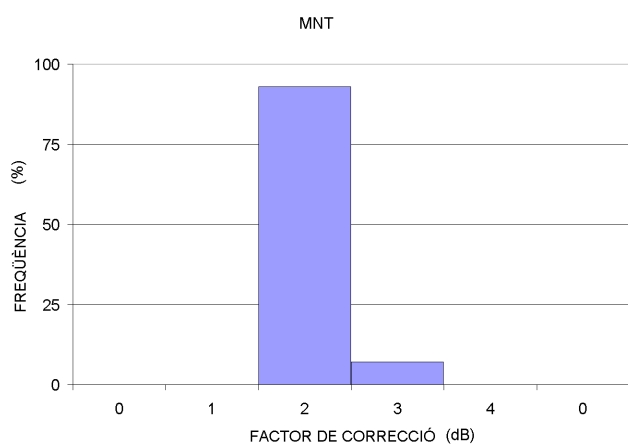


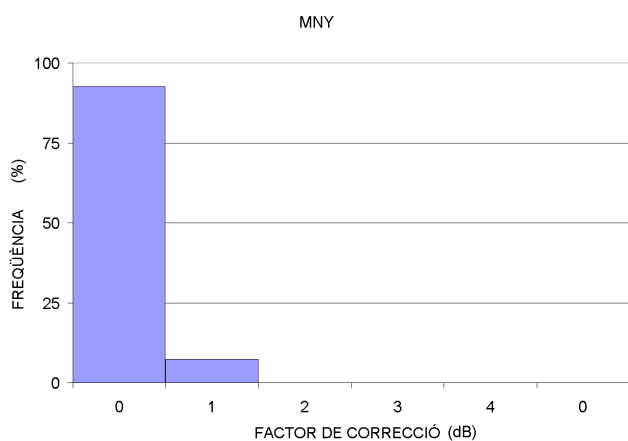
Figura 6: Histogrames de freqüència i probabilitat acumulada de bloqueig de feix del radar considerant intercepcions a un angle d'elevació d'antena d'1° per als diferents blancs



a) La Mola



b) Montserrat



c) Montseny

Figura 7: Histogrames de freqüència de correccions de bloqueig de feix del radar considerant intercepcions a un angle d'elevació d'1° per als diferents blancs

de la zona de Barcelona.

Això no obstant, sembla que l'existència de capes de guiatge intenses (o *ducts*, en la terminologia anglesa habitual) revelades per l'anàlisi dels radiosondatges indica que, a la pràctica, els valors de les correccions simulades que es donen en la taula 3 podrien arribar a superar-se. Tot i que és difícil quantificar de forma precisa els efectes de les capes amb superrefracció intensa sobre el feix (caldría considerar una funció d'intercepció molt més sofisticada, fora de l'abast dels mitjans operatius actuals per ser aplicada en temps real), la possibilitat d'efectes més importants sobre el bloqueig sembla que hauria de considerar-se d'acord amb les condicions de propagació avaluades en un indret particular.

Rang diürn del GVR

L'amplitud o rang diürn mitjà anual del GVR s'ha estimat en uns 7 km^{-1} , amb importants variacions estacionals que fan que, per exemple, a l'estiu aquest valor s'estengui a 18 km^{-1} . A partir d'aquesta informació pot plantejar-se la qüestió de quina variació diària pot experimentar el bloqueig del feix i, per tant, quina variació en els factors de correcció associats es produeix dins d'un període diari.

Per respondre aquesta pregunta s'han dut a terme simulacions del bloqueig del feix del radar amb una elevació inicial d'antena d'1° avaluades als tres blancs seleccionats considerant les dues possibles amplituds: d'una banda, la simulació estàndard de les 00 Z i, per cada GVR considerat, l'estimada corresponent a les 12 Z per a un rang anual mitjà i estival (figura 8). Pot apreciar-se que les diferències en el bloqueig provocades pels rangs considerats són relativament petites (entre 1 % i 2 % de bloqueig). Per tant, es pot concloure que l'efecte de la variació diària és molt limitat sobre el bloqueig i, en general, nul sobre les correccions de bloqueig (tret dels casos particulars que l'ocultació estigui al límit de dues classes de correcció com ara el 10 %, 29 %, 43 % o el 55 % de bloqueig).

Un altre comentari sobre l'efecte de la variació del rang diürn del GVR és que, atès que l'efecte que té és relativament petit a escala diària, no ho és tant en períodes temporals més extensos. Així doncs, sí que és possible que sigui significatiu a escala mensual i estacional.

Precisió de l'alineament de l'antena

Una altra font de variabilitat en les correccions d'ocultació és la precisió de l'alineació de l'eix principal de l'antena amb l'horitzó del radar. Com succeeix en qualsevol equip de mesura, l'angle d'elevació de l'antena d'un radar té un cert error associat. Per a antenes de radars meteorològics operatius estàndards (amb amplada del lòbul principal del feix d'1°) sol haver-hi un error de calibratge al voltant de $0,1^\circ$. Aquest error és degut a la diferència entre l'angle real del sistema de control de l'antena respecte a l'horitzó del radar (els sistemes

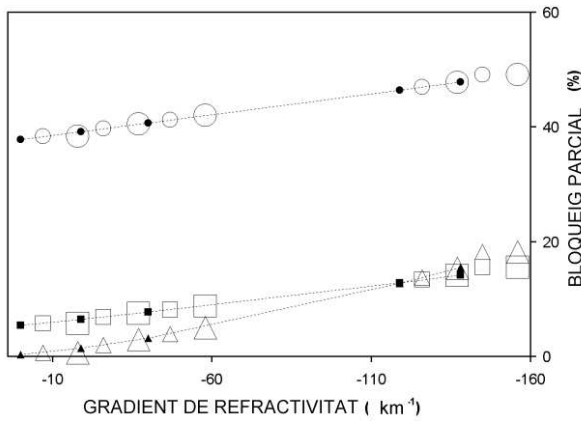


Figura 8: Simulació del bloqueig causat per l'oscil·lació diària del GVR: els símbols sòlids petits corresponen a les 12 Z i els mitjans i grans a les 00 Z per a una oscil·lació tipus anual i estival, respectivament. Els tres blancs considerats són: MNT (cercle), LML (quadrat) i MNY (triangle)

mecànics de control d'antena proporcionen precisions al voltant de $0,01^\circ$). Igualment hi ha un error associat a l'azimut de l'antena que sovint té un valor similar a l'anterior, o lleugerament superior, pel fet de no ser tan crític. En aquest cas s'avalua l'efecte de l'error en l'angle vertical de l'antena.

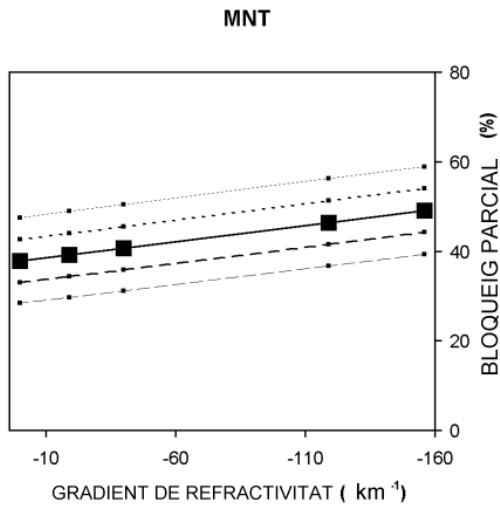


Figura 9: Comparació del diferent bloqueig d'un feix amb elevació d' 1° amb el corresponent a errors estàndard de $0,10^\circ$ i $0,05^\circ$ en la precisió de l'antena

De fet, en radars de recerca l'error d'alineació vertical de l'antena pot ser sensiblement inferior si bé la metodologia per aconseguir-los és relativament costosa i, per aquest motiu, els radars operatius solen tenir l'error esmentat. En general, però, si un radar meteorològic

vol utilitzar-se amb finalitats quantitatives (per exemple per fer EQP) cal que l'error associat a l'alineació de l'antena sigui inferior a $0,1^\circ$.

La figura 9 mostra la simulació del bloqueig del feix del radar al blanc MNT (Montserrat) per a un angle inicial d'antena d' 1° d'elevació comparant l'efecte d'error d'alineació d'antena. D'una banda, se suposa que no hi ha error (el feix es comporta segons l'angle nominal d' 1°) i també es representa en la figura el bloqueig assumint errors mitjans estàndard de $0,10^\circ$ i $0,05^\circ$ (quatre simulacions més amb l'angle nominal $+0,10^\circ$, $+0,05^\circ$, $-0,05^\circ$ i $-0,10^\circ$, respectivament).

Pot veure's que els errors causats per errors de $0,1^\circ$ són molt rellevants i tenen efectes significatius, comparables o fins i tot molt superiors als causats per les variacions màximes possibles en el GVR (al voltant del 10 % del bloqueig). Els errors de $0,05^\circ$ induïxen variacions d'un 5 % en el bloqueig topogràfic del feix. Per tenir una referència, aquest valor és més del doble del que es produeix a causa de l'amplitud diürna estival del GVR.

Per tant, la importància d'un bon calibratge de l'antena (amb errors inferiors a $0,1^\circ$ i si fos possible de l'ordre de $0,05^\circ$) queda clara per tal de poder efectuar EQP i dur a terme de manera consistent les correccions necessàries en cas de bloqueig topogràfic.

Apèndix: Una funció d'intercepció simplificada

En aquest apèndix es descriu com s'ha calculat la funció d'intercepció entre la secció transversal del radar i la topografia per al càlcul del bloqueig del feix del radar meteorològic. La funció es designa per *BB* (*beam blockage*).

Segons la figura 1, donada una circumferència de radi *a* que representa la secció transversal del radar i una diferència entre l'altura del centre del feix del radar respecte a la topografia designada per *y*, llavors el diferencial de l'àrea de la secció transversal bloquejada, *dBB*, ve donada per:

$$dBB = 2\sqrt{a^2 - y'^2} dy' \quad (5)$$

on *y'* és l'altura des del centre de la circumferència i *dy'* és el gruix de la zona ombrejada. Integrant l'expressió anterior des de la base de la secció transversal a l'altura donada per *y'*, llavors el bloqueig del feix (*BB*) és:

$$BB = \int_y^{-a} 2\sqrt{a^2 - y'^2} dy' \\ = y\sqrt{a^2 - y^2} + a^2 \arcsin\left(\frac{y}{a}\right) + \frac{\pi a^2}{2} \quad (6)$$

El bloqueig parcial del feix (*PBB*) pot definir-se com el quocient entre el bloqueig del feix (*BB*) i tota l'àrea de la secció transversal (és a dir, el cercle de radi *a*). Llavors, a partir de l'equació anterior, el bloqueig parcial

del feix simplement pot escriure's com:

$$PBB = \frac{BB}{\pi a^2} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{y}{a^2} \sqrt{a^2 - y^2} + \arcsin \left(\frac{y}{a} \right) + \frac{\pi}{2} \right] \quad (7)$$

Considerant que l'amplada del lòbul principal de l'antena ve donada per l'angle β a una distància donada per r , llavors el radi de la secció transversal del feix és, simplement:

$$a = \frac{r\beta}{2}. \quad (8)$$

Ara considerem l'equació de l'altura del feix del radar (Doviak i Zrníc, 1993):

$$h = \sqrt{r^2 + (k_e R)^2 + 2rk_e R \sin \theta} - k_e R + H_0 \quad (9)$$

on R és el radi de la Terra, k_e és el quocient entre R i el radi de la Terra equivalent, θ és l'angle d'elevació de l'antena i H_0 l'altitud de l'antena i, d'altra banda, l'expressió que permet escriure k_e , en funció del gradient vertical de refractivitat de l'aire:

$$k_e = \frac{1}{1 + R(dN/dh)}. \quad (10)$$

Llavors es poden substituir les tres equacions anteriors a l'expressió donada per PBB , per tal que apareguin explícitament les condicions de propagació:

$$PBB = \frac{1}{\pi} \left\{ \left[\frac{4(z + k_e R - H_0)}{(r\beta)^2} - \frac{4\sqrt{r^2 + (k_e R)^2 + 2rk_e R \sin \theta}}{(r\beta)^2} \right] \times \left[\frac{(r\beta)^2}{4} - \left(z + k_e R - H_0 - \sqrt{r^2 + (k_e R)^2 + 2rk_e R \sin \theta} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \arcsin \left[2(r\beta)^{-1} \left(z + k_e R - H_0 - \sqrt{r^2 + (k_e R)^2 + 2rk_e R \sin \theta} \right) \right] + \frac{\pi}{2} \right\}. \quad (11)$$

Els efectes precisos del bloqueig del feix dependran en general de la forma que presenti el diagrama de distribució de potència de l'antena. Un perfil idealitzat com el considerat aquí permet identificar fàcilment els casos pràctics de bloqueig total i bloqueig nul amb criteris simples. Resulta lleugerament menys idealitzat, però més realista, considerar el cas d'un feix amb distribució gaussiana de l'energia. Bech et al. (2003) va fer una comparació entre dos feixos de característiques equivalents, però un amb distribució homogènia de l'energia i l'altre amb distribució gaussiana. Les diferències entre els dos apareixien únicament als extrems, i en una escala logarítmica esdevenen significatives on la pèrdua deguda al bloqueig és de diversos dB, la qual cosa queda fora del límit d'aplicació de les correccions de bloqueig considerades.

Bibliografia

- BECH J., CODINA B., LORENTE J. I BEBBINGTON D., The sensitivity of single polarization weather radar beam blockage correction to variability in the vertical refractivity gradient, *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, **20**, 845–855 (2003).
- DOVIK R.J. I ZRNIC D.S., *Doppler radar and weather observations*, Academic Press, (1993).
- FULTON R.A. BREIDENBACH J. P., SEO D., MILLER D. I O'BANNON T., The WSR-88D Rainfall Algorithm, *Weather and Forecasting*, **13**, 377–395 (1998).
- ITU, The Radio Refractive Index: Its Formula and Refractivity data. ITU-R P.453-6 Recommendation. ITU Radiocommunication Assembly, ITU-R P-Series (1997).
- NEWSOME, D.H., *Weather Radar Networking COST Project 73 Final Report*, Kluwer Academic Publishers, (1992).
- PITTMAN, T.S., *A climatology-based model for long-term prediction of radar beam refraction*, Master's Thesis, US Air Force Institute of Technology, (1999).
- REDAÑO A., CRUZ J. I LORENTE J., Main features of sea breeze in Barcelona, *Meteorology and Atmospheric Physics*, **46**, 175–179 (1991).
- RYHZKOV, A. I ZRNIC D.S., Polarimetric rainfall estimation in the presence of anomalous propagation, *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, **15**, 1320–1330 (1998).
- SKOLNIK, M., *Introduction to radar systems*, McGraw-Hill, New York, (1980).