

Implementació d'un filtre basat en lògica difusa per a la supressió de línies d'interferència en radars MRR

Autor: Enric Armengol Roig *

Supervisors: Joan Bech Rustullet, joan.bech@ub.edu ¹, Andreu Salcedo, andreu.salcedo@upc.edu ²

¹ Facultat de Física, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès 1, 08028 Barcelona, Spain.

² ETSETB, Universitat Politècnica de Catalunya, Campus Diagonal Nord, Edifici B3,
C. Jordi Girona, 1-3 08034 Barcelona, Spain.

Resum: El MRR (Micro Rain Radar) és un radar Doppler apuntat al zenit capaç de determinar l'alçada i la velocitat de caiguda dels hidrometeors mitjançant l'emissió d'ona contínua modulada en freqüència (FM-CW). Un dels primers models de MRR, que porta ja tres dècades de dades observades i encara es troba força estès i operatiu és el MRR-2, desenvolupat per *Metek Meteorologische Messtechnik GmbH* (Metek). Tot i estar actualment superat per models més avançats, aquest radar segueix proporcionant dades valuoses que justifiquen la recerca i millora en el post-processament de la informació que ofereix. Aquest instrument sovint presenta una sortida alterada amb patrons espuris (línies interferents) d'origen desconegut consistents en nivells de senyal elevats i persistents en el temps que es mostren a certes alçades. La comunitat científica ha dedicat esforços en la supressió d'aquestes línies interferents, atesa l'alteració que comporten en la correcta estimació de les observacions del radar. En aquest *Treball Fi de Màster* (TFM) s'implementa un filtre proposat recentment, de cancel·lació de línies interferents mitjançant lògica difusa, integrant-lo al software de post-processament RaPROM per a MRR-2 desenvolupat per la Universitat de Barcelona (UB). S'avalua el funcionament d'aquest filtre amb dades de dos radars MRR-2 ubicats a Das i a Puigcerdà, aplicant la configuració original dels autors del filtre, implementada per a radars ubicats a Corea del Sud, i se'n proposen algunes adaptacions.

I. INTRODUCCIÓ

L'interès pel radar en l'àmbit meteorològic ([Friend 1939, 1940](#)) va sorgir de la mà del seu desenvolupament, gairebé simultani a molts països ([Süsskind 1985](#)) a la dècada dels anys 30 com a instrument amb finalitats essencialment militars. Poc després aquest enginy era objecte de recerca com a instrument per al sonatge troposfèric ([Friend 1949](#)). La retrodispersió d'ones electromagnètiques per part d'hidrometeors ràpidament va captar l'interès de la comunitat científica dedicada a l'estudi de l'atmosfera durant les dues dècades següents, caracteritzant-ne la interacció amb els senyals radar, i motivant l'apuntament zenital de l'instrument per a obtenir informació del perfil vertical ([Saxton et al 1964, Fehlhaber & Grosskopf 1965](#)). Un radar d'apuntament vertical té l'avantatge de no patir bloqueig per orografia i permet obtenir informació per sota del nivell més baix que podria obtenir un radar convencional monoestàtic d'escombrat, de l'ordre d'alguns milers de metres.

Tot i que els primers radars van ser concebuts emetent en senyal d'ona contínua (CW), els requeriments de potència i abast van generalitzar l'ús del radar de senyal polsant. En sistemes de curt abast el senyal d'ona contínua modulada en freqüència (FM-CW) emès per un radar permet associar distància a la diferència de freqüència entre el senyal en emissió i el senyal de l'eco rebut, simplificant el disseny del receptor. Si bé el primer aparell d'altimetria basat en ona contínua modulada en freqüència va ser desenvolupat el 1938 per Western Electric Company, no va ser fins el 1969 que es va implementar el primer radar sondejador en FM-CW ([Richter 1969](#)) que permetia distingir diferents estrats atmosfèrics en funció del seu perfil de reflectivitat. L'ús del senyal FM-CW esdevé clau per a desenvolupar instruments amb baixa potència d'emissió i un abast relativament curt (pocs milers de metres). En aquest sentit, [Strauch \(1976\)](#) va demostrar que un radar amb una potència d'emissió de només 0,5 W era suficient per a observar flocs de neu. La baixa potència de senyal requerida en un sistema FM-CW permet

tenir el sistema d'emissió i recepció funcionant en una mateixa antena sense necessitat de sistema de commutació, reduint significativament el cost, la complexitat i les dimensions de l'instrument, i alhora fent-lo portàtil i manejable.

L'apuntament vertical del radar permet obtenir fàcilment, per espectre de freqüència Doppler, la velocitat de caiguda dels hidrometeors, a més de la seva localització en alçada. Durant els anys 70 i 80 es van centrar esforços en estudiar les distribucions de diàmetre de les gotes de pluja i la seva velocitat de caiguda, per tal d'estimar la intensitat de precipitació a partir d'observacions fetes per radars polsants apuntats verticalment operant en longituds d'ona superiors a 3 cm ([Wilson & Brandes 1979, Unruh & Wolf 1989, Joss et al 1990, Duvernoy et al 1991](#)). Els inconvenients d'aquests radars, voluminosos, costosos i d'elevada potència de transmissió, van motivar el desenvolupament, a principis dels anys 90, de radars FM-CW operant a longituds d'ona menors.

El Micro Rain Radar ([Klugmann et al 1996](#)), conegut com a MRR-2 i desenvolupat per Metek, va ser presentat el 1996 com un radar Doppler FM-CW perfilador de pluja funcionant en banda K a 24,23 GHz. El fet de ser econòmic i portàtil n'ha estès molt el seu ús en els seus gairebé 30 anys de comercialització, proporcionant perfils verticals de diferents paràmetres de precipitació en nombroses campanyes i oferint avui dia encara multitud de sèries d'observacions en les que es basen estudis recents ([González et al 2021, Wiener et al 2024, ...](#)). Tot i que l'any 2017 Metek va presentar el nou model MRR-PRO amb millors prestacions, l'àmplia xarxa encara operativa de models MRR-2, més econòmics, i les observacions ja enregistrades en justifiquen la continuïtat, el suport i la millora en els algorismes de post-processament.

Una de les propostes recents per a la millora de la sortida del MRR-2 consisteix en la detecció i la supressió d'uns senyals interferents (línies d'interferència) que embruten les observacions ([Kim & Lee 2024](#)). Aquestes línies d'interferència apareixen a nivells d'alçada arbitraris i de

* Adreça electrònica: earmengol@ieee.org

manera relativament sostinguda en el temps. Aquesta nova proposta aborda el filtratge de les línies d'interferència mitjançant un esquema basat en lògica difusa («fuzzy logic») a partir de vuit variables derivades del post-processament de la sortida del radar. Les línies d'interferència són d'origen desconegut i no van associades a ecos meteorològics. La seva presència comporta un augment en la proporció de falsos blancs (taxa de falsa alarma) i altera els productes derivats de la sortida del radar.

L'objectiu d'aquest treball és implementar l'algorisme de lògica difusa esmentat integrant-lo a l'esquema de post-processament RaProM (Garcia-Benadí et al 2020), capaç d'oferir resultats força satisfactoris mitjançant una classificació eficaç dels tipus d'hidrometeors interceptats pel feix del radar. Posteriorment avaluar-ne l'eficàcia en la supressió de les línies interferents aplicant-lo a dades obtingudes dels MRR-2 ubicats a la Cerdanya.

La Secció II descriu el radar MRR i els post-processaments. Es caracteritza i es detalla la supressió de les línies d'interferència i es centra el focus en la proposta de filtratge basat en lògica difusa.

La Secció III ofereix una descripció del desenvolupament que s'ha seguit, orientat a l'assoliment dels objectius plantejats: en primer lloc l'adaptació de la sortida de l'algorisme RaProM per tal de disposar de les variables que l'algorisme de lògica difusa requereix; a continuació la implementació de l'algorisme integrant-lo al post-processament de RaProM; una posterior validació d'aquesta implementació a partir de les dades en les quals es basa l'estudi original, observades per MRR-2 ubicats a Corea; finalment una avaluació del filtre de lògica difusa amb dades de casos d'estudi seleccionats procedents de radars MRR-2 de la UB, ubicats a Das i a Puigcerdà.

II. INSTRUMENTACIÓ I DADES

A. Descripció del MRR

El MRR és un perfilador vertical que, a partir del senyal retrodispersat pels hidrometeors que intercepta el volum del seu feix, obté per a diferents nivells d'alçada un espectre Doppler que permet calcular força paràmetres de precipitació, entre els quals, distribucions de diàmetres (DSD), intensitat de precipitació (RR), contingut d'aigua (LWC), reflectivitat equivalent (Z_e), velocitat de caiguda (W) i tipus d'hidrometeor. Tant l'alçada com la velocitat de caiguda estan discretitzades en un nombre determinat de valors, variable en funció del model de radar. L'instrument opera amb apuntament zenital emetent de manera contínua una ona electromagnètica d'amplitud constant i modulada en freqüència amb una moduladora amb perfil de dent de serra decreixent, és a dir l'ona emesa és un senyal periòdic consistent en una seqüència contínua de senyals «xirp» de freqüència minvant. El radar es compon d'una antena parabòlica d'uns 60 cm, amb reflector opcionalment calefactat (per a la fusió de gel o neu acumulada), transductor de microones i un dispositiu de control i processament connectat a una unitat de transmissió de dades connectada a un ordinador (PC). S'alimenta de la xarxa elèctrica de baixa tensió (230 VAC).

Característiques

La baixa potència emesa en FM-CW possibilita un sistema d'emissió-recepció força simplificat comparat amb el

d'un radar polsant, eliminant els subsistemes de sincronisme de temps i commutació, així com implementant el mesclador de manera senzilla. El fet de tenir un apuntament fixe evita els inconvenients associats a les parts mecàniques mòbils. Tot plegat redunda en un disseny econòmic, lleuger (menys de 20 kg), de poc volum (inferior a 1 m³) i amb requeriments baixos de potència. Aquestes característiques fan del MRR un instrument fàcil de transportar i d'instal·lar en pràcticament qualsevol ubicació, amb un manteniment mínim i operant de forma remota i segura per a la salut de les persones.

La freqüència d'emissió, en banda K (rang de freqüències de 18 a 27 GHz), ofereix un bon compromís entre atenuació i retrodispersió suficient per a la detecció de blancs meteorològics amb grandària i constant dielèctrica típiques dels hidrometeors. Els dos models existents, fabricats per Metek, emeten a una freqüència de 24,23 GHz amb una potència de 50 mW. L'amplada de feix a -3 dB de l'antena és de 1,5°, amb un guany de 40,1 dB. La Taula I mostra les característiques dels dos models MRR de Metek.

Taula I: Característiques dels MRR de Metek.

Paràmetres de disseny	Nom	MRR-2	MRR-PRO
Longitud d'ona (cm)	λ	1,238	1,238
Freqüència de mostreig (kHz)	f_s	125	500
Excursió de freqüència (MHz)	B	0,5 – 15	0,3 – 15
Nombre de nivells d'alçada	N	32	16 – 256
Nombre de valors de velocitat de caiguda	M	64	16 – 128
Paràmetres derivats			
Abast màxim (km)	h_{max}	0,32 – 9,6	0,16 – (>>10)
Resolució en abast (m)	Δh	10 – 300	10 – 500
Resolució en velocitat (m/s)	Δv	0,188	0,047 – 6,016
Velocitat màx. no ambigua (m/s)	v	12,3	6,15 – 96,3
Temps d'adquisició d'un conjunt d'espectres (ms)	τ	32,8	2,048 – 131,1

Usos i aplicacions

El MRR és d'utilitat en una àmplia varietat d'aplicacions d'interès científic i d'observació:

- Estimació de la distribució de mida de gotes (DSD).
- Calibració de radars meteorològics convencionals.
- Validació de sensors de precipitació in-situ i calibració de models numèrics.
- Estudis de microfísica de núvols.
- Monitoratge de neu i precipitació sòlida.
- Observació de la banda brillant, la capa de fusió i la cota de neu.
- «Nowcasting» o predicció immediata de precipitació i tipus de precipitació.
- Classificació de tipus de pluja: estratiforme i convectiva.
- Vigilància i monitoratge de fenòmens volcànics relacionats amb la precipitació (apuntament amb elevació no zenital).

Principis de funcionament

El radar emet contínuament un senyal d'amplitud constant amb una modulació periòdica de freqüència en forma de dent de serra (Figura 1). Simultàniament rep la fracció del senyal retrodispersat pel blanc meteorològic interceptat.



Figura 1: Senyal FM-CW modulat amb dent de serra.

Per a un blanc situat a una alçada h , aquest eco és rebut amb un retard temporal t_h degut a la propagació a la velocitat de la llum, c , en el recorregut d'anada i tornada (1):

$$t_h = \frac{2 \cdot h}{c} \quad (1)$$

Aquest retard comporta una diferència de freqüència, f_b (o freqüència de batut) entre el senyal en emissió i el senyal en recepció. En un blanc estàtic f_b i t_h són proporcionals segons l'expressió (2), on B és l'excursió de freqüència i T és el període de modulació, ambdós paràmetres característics del senyal modulador en dent de serra:

$$f_b \cdot T = B \cdot t_h \quad (2)$$

D'aquesta manera, la freqüència de batut permet determinar la distància del blanc al radar. Aquesta freqüència s'obté en el procés de mesclat en recepció, on essencialment es realitza el producte entre el senyal emès i el senyal rebut, i s'extrau el senyal $m(t)$ (senyal de batut) amb la freqüència diferència. La Figura 2 mostra el senyal modulador, el senyal de batut i il·lustra la relació de proporcionalitat (2).

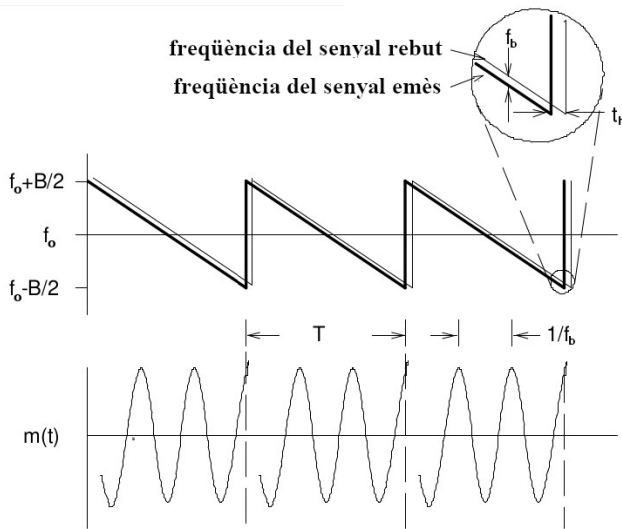


Figura 2: Senyal modulador i batut (adaptat de Metek).

La velocitat del blanc, si és suficientment baixa, es pot determinar a partir de la diferència de fase del senyal $m(t)$ entre passades consecutives (períodes de modulació successius). Igualant la velocitat de fase a la velocitat de fase Doppler (3), s'arriba a l'expressió de la velocitat (4) on λ és la longitud d'ona del senyal emès i $\Delta\phi$ és la diferència de fase entre passades consecutives:

$$\frac{\Delta\phi}{T} = 2\pi f_D = 2\pi \frac{2 \cdot v}{\lambda} \quad (3)$$

$$v = \frac{\lambda \cdot \Delta\phi}{4\pi \cdot T} \quad (4)$$

Així, de manera anàloga a com mesura la velocitat un radar polsant Doppler convencional, el MRR ofereix prestacions semblants (Strauch 1976).

Processament del senyal rebut

El processador mostreja el senyal a una freqüència f_s , obtenint n mostres en un període de modulació T . Per tal de tenir la descomposició de freqüències de batut que permetin associar-hi alçades es fa una transformada ràpida de Fourier (FFT). Substituint (1) en (2) i tenint en compte que $T = n/f_s$ es

troba l'expressió (5) que associa alçades a les freqüències de batut que s'obtenen en la FFT:

$$h = \frac{f_b \cdot n \cdot c}{f_s \cdot 2 \cdot B} \quad (5)$$

Atenent al teorema de mostreig de Nyquist, la freqüència de mostreig ha de ser almenys el doble que la màxima freqüència del senyal a mostrejar ($f_s > 2 \cdot f_b$). Tenint en compte aquest fet i (5), s'arriba a l'expressió (6) que determina l'abast màxim del radar:

$$h < \frac{n \cdot c}{4 \cdot B} = h_{max} \quad (6)$$

Una FFT de n mostres (el nombre de mostres en una FFT sempre és una potència de 2) permet resoldre $n/2$ mostres de freqüència (és a dir $n/2 = N$ nivells d'alçada), de manera que la resolució vertical del radar es:

$$\Delta h = \frac{h_{max}}{n/2} = \frac{c}{2 \cdot B} \quad (7)$$

Pel que fa a la detecció de la velocitat, s'avaluen les diferències de fase per a cadascun dels N nivells d'alçada, entre períodes de modulació consecutius. A tal efecte es fa una segona FFT (per a cadascun dels N nivells) prenent M períodes de modulació consecutius. D'aquesta manera s'obté un espectre de M freqüències Doppler associat a cada nivell. La velocitat de caiguda i la freqüència Doppler estan relacionades per l'expressió (8):

$$v = \frac{\lambda \cdot f_D}{2} \quad (8)$$

La Figura 3 il·lustra l'obtenció de l'espectre Doppler:

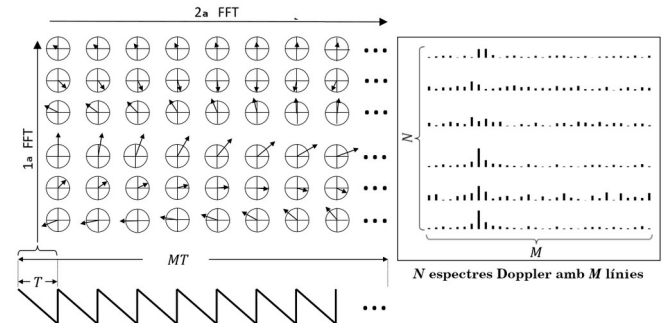


Figura 3: Obtenció de l'espectre Doppler per diferències de fase entre passades consecutives (adaptat de Metek).

El fabricant del MRR treballa amb la hipòtesi que les velocitats no poden ser d'ascens (negatives), de manera que les freqüències Doppler negatives s'associen a la seva rèplica espectral positiva. Sota aquesta hipòtesi, i atenent a la relació (9), la velocitat màxima que es pot mesurar (10) correspon a la variació de fase Doppler d'un cicle en un període de modulació:

$$T = \frac{n}{f_s} = \frac{2 \cdot N}{f_s} \quad (9)$$

$$v < \frac{\lambda \cdot f_{Dmax}}{2} = \frac{\lambda \cdot \frac{1}{T}}{2} = \frac{\lambda \cdot f_s}{4 \cdot N} = v_{max} \quad (10)$$

La resolució en velocitat aleshores ve donada per (11):

$$\Delta v = \frac{v_{max}}{M} = \frac{\lambda \cdot f_s}{4 \cdot N \cdot M} \quad (11)$$

El temps d'adquisició d'un espectre correspon a M períodes de modulació (12):

$$\tau = M \cdot T = \frac{2 \cdot N \cdot M}{f_s} \quad (12)$$

La Taula I mostra els paràmetres λ , N , M i f_s de disseny dels MRR de Metek. L'excursió de freqüència B és un paràmetre configurable per l'usuari que possibilita variar la resolució vertical i l'abast de l'instrument. En base a les anteriors expressions, es poden derivar la resta de paràmetres que mostra la taula.

Els fitxers de sortida (fitxers RAW) que ofereix el processador del MRR-2 són fitxers ASCII que contenen les densitats espectrals Doppler en cada un dels 32 nivells d'alçada i per als 64 valors de velocitat. Cada 10 segons s'hi registren valors integrats durant 6 segons amitjant 150 densitats espectrals. En aquests fitxers també s'hi desen algunes metadades, entre les quals, informació específica de l'instrument, configuració, ubicació, data, constant de calibració i la funció de transferència.

Limitacions i ambigüitats

Les limitacions d'abast i velocitat màxima, així com les respectives resolucions han estat detalladament descrites anteriorment. Cal notar que tot el que s'ha exposat funciona correctament si no s'excedeixen aquests límits i sempre i quan la hipòtesi que les velocitats són de caiguda es compleixi. En certes condicions els flocs de neu, degut a la seva lleugeresa, poden ser arrossegats per fluxos ascendents, d'origen mecànic o turbulent, i en corrents ascendents convectius. En aquestes situacions es produirà «aliasing» i les mesures de velocitat detectades seran elevades i interpretades en sentit descendent. Com més lenta sigui la velocitat d'ascens, més alta serà la velocitat de caiguda que el MRR descodificarà. Aquest inconvenient, entre altres, va motivar la millora dels algorismes de post-processament per als radars MRR.

Post-processament

El fabricant proveeix un software de post-processament ([Metek 2009](#)) per a MRR-2 que ofereix altres productes derivats, com ara reflectivitat equivalent (Ze), la velocitat de caiguda (W) i intensitat de pluja (RR). Una baixa sensibilitat i la manca de moments Doppler per part d'aquest software van motivar ([Maahn & Kollias 2012](#)) el desenvolupament d'un nou post-processament (MK12), aportant un guany de sensibilitat entre 11 i 17 dB gràcies a una reducció de soroll basada en la detecció del pic més significatiu de la densitat espectral. Addicionalment es va millorar la qualitat de les observacions, implementant un algorisme de «dealiasing» que desambigua correctament les velocitats d'ascens per a precipitació en forma de neu. El post-processament MK12 proporciona moments Doppler addicionals («skewness» i «kurtosis»), altres productes com ara la relació senyal a soroll (SNR) i variables de descripció del pic espectral (amplada, interval de localització i pendent dels flancs).

El post-processament RaProM ([Garcia-Benadi et al 2020](#)) proposa una classificació automàtica de la precipitació en

cinc categories d'hidrometeors: plugim, pluja, neu, mixt i calamarsa. A més, redueix més encara el nivell de soroll amb un processament més acurat dels pics espectrals i la consegüent millora de sensibilitat. Per a precipitació líquida s'assumeix retrodispersió de Mie, obtenint addicionalment la reflectivitat absoluta (Z), el contingut d'aigua líquida (LWC) i la intensitat de pluja (RR). La classificació de la precipitació que facilita RaProM amplia les aplicacions meteorològiques del MRR ([Ghada et al 2022](#)).

Tant MK12 com RaProM es troben disponibles a GitHub ([IMProToo](#), [RaProM](#)) com software de codi obert sota llicència general pública GNU.

Finalment, pel que fa al model de radar MRR-PRO, també es troben disponibles post-processaments anàlegs: RaProM ([Garcia-Benadi et al 2021](#)) i ERUO ([Ferrone et al 2022](#)).

B. Detecció i supressió de patrons interferents

Els post-processaments mostren en ocasions unes línies temporals de falsos blancs que no corresponen a ecos meteorològics. No s'ha aclarit encara l'origen d'aquestes interferències i alguns autors apunten a que podrien estar causades per senyals interns ([Ferrone et al 2022](#)) o senyals entrants per lòbuls laterals de l'antena. Aquests senyals artificials es donen a nivells d'alçada arbitraris, de manera sostinguda i contínua en el temps, amb intensitat variable. Les línies interferents afecten totes les variables que s'obtenen en el post-procesament, causant alteracions en l'estimació de la precipitació. La detecció i supressió d'aquests patrons d'interferència aporta una millora en la qualitat de les observacions.

Descripció dels patrons d'interferència

A partir de les observacions de MRR-2 s'identifiquen les característiques d'aquests patrons d'interferència:

- L'extensió en alçada sol anar d'un a tres nivells consecutius.
- Temporalment tenen una durada que pot ser d'hores fins a algun dia.
- En ocasions apareixen múltiples línies interferents a diferents nivells, no necessàriament amb la mateixa extensió temporal ni intensitat.
- Solen aparèixer a nivells concrets, mantenint condicions d'entorn i de configuració. Variant aquestes condicions (p.e ubicació, resolució vertical,...) canvien els nivells en què apareixen.
- La intensitat amb què les línies interferents afecten a les variables varia amb el temps dins d'una mateixa línia i també varia entre línies diferents, no seguint un patró uniforme.
- Solen ser més freqüents, més intenses i més contínues en zona urbana que rural.

Tècniques existents

La supressió de línies interferents s'aborda per primer cop per a radars MRR-PRO, amb una nova proposta de post-processament, ERUO ([Ferrone et al 2022](#)) que en la seva primera etapa reconstrueix l'espectre Doppler eliminant-ne els pics espuris. No es té constància que aquesta solució, que és òptima en el sentit d'eliminar la interferència abans de qualsevol altre post-processament, hagi estat implementada a dia d'avui per a radars MRR-2.

Recentment s'ha publicat un algorisme (Kim & Lee 2024) per a MRR-2 que aporta una solució, aplicable a la sortida del post-processament MK12, que filtra les línies interferents mitjançant lògica difusa «Fuzzy Logic Interference Line Removal» (FL-IRL en endavant). L'adaptació a RaProM d'aquest algorisme FL-ILR és objecte d'aquest treball final de màster.

Filtratge amb lògica difusa

La lògica difusa o «fuzzy logic» (FL) és una tècnica que permet prendre decisions o actuar a partir d'un conjunt de variables membre (MV), cadascuna de les quals contribueix amb una funció de versemblança, o funció membre (MF), a un valor agregat de sortida (per exemple la probabilitat de la decisió a prendre). La seva sortida, la funció agregada (AGG), és doncs un valor continu, per comptes d'un valor booleà, aportant major informació i control en l'actuació i fent viable també decisions booleanes en base a la superació d'un llindar. Des de la concepció inicial de la lògica difusa (Zadeh 1965) han estat nombroses les seves aplicacions, incloent el filtratge de senyals. En el context actual, la lògica difusa es pot interpretar com un cas particular de xarxa neuronal d'una sola neurona.

Per al filtratge de línies interferents amb lògica difusa, cal prendre una decisió booleana sobre el caràcter interferent del senyal en un nivell d'alçada determinat, és a dir, si aquell senyal és atribuïble a una línia interferent o a un eco meteorològic. El valor AGG representa, doncs, una probabilitat de falsa alarma que permet la supressió del senyal en base a la superació d'un llindar. Les MV es seleccionen o es deriven essent aquelles que major rellevància tenen per a la decisió, és a dir, aquelles que hi tenen una correlació més elevada. Per a cada MV, es calcula una MF mitjançant la següent funció sigmoide (13):

$$MF(x) = \frac{1}{1 + e^{a(x-b)}} \quad (13)$$

on x representa el valor de la variable membre, i els paràmetres a i b (posició i pendent de la sigmoide) es calculen per regressió logística amb una sèrie de dades prou llarga, minimitzant una funció de cost.

La funció agregada AGG (14) és la suma ponderada dels valors $MF_i(x_i)$ per a totes les variables membre x_i :

$$AGG = \frac{\sum_i w_i \cdot MF_i(x_i)}{\sum_i w_i} \quad (14)$$

on els pesos w_i es calculen en base a la correlació creuada entre $MF(x)$ i l'atribució real de línia interferent.

El conjunt de paràmetres a , b i w_i de les diferents MV constitueix l'entrenament de la lògica difusa, ajustat de manera òptima a la sèrie de dades utilitzada. Per al bon funcionament del filtre cal que la seqüència d'entrenament es faci amb una sèrie prou llarga que permeti caracteritzar de manera completa la casuística de les línies interferents que es produeixen.

L'algorisme FL-ILR proposat per Kim i Lee (2024) es basa en vuit variables membre que s'extrauen del post-processament MK12, i ha estat entrenat amb dades de dos radars MRR-2 ubicats a Corea del Sud. La Taula II mostra aquestes variables i els paràmetres resultants de l'entrenament. El software que proporcionen els autors permet configurar els valors dels paràmetres per a fer córrer

l'algorisme amb diferents entrenaments. El llindar de AGG també és un valor configurable, establert a 0,5 per defecte.

Taula II: Variables membre i paràmetres d'entrenament de FL-ILR.

Nom	Variable membre	a	b	w
Ze	Reflectivitat equivalent	0,145	8,732	0,518
Vr	Velocitat Doppler	-0,7	6,083	0,475
PL	Velocitat inicial del pic en l'espectre Doppler (Peak Left)	-1,444	4,646	0,835
PW	Amplada espectral del pic	1,042	2,148	0,679
PS	Pendent mitjà de la pujada i baixada del pic espectral	-0,277	10,648	0,699
PSs	Suavitat temporal de PS	-0,297	9,421	0,614
CS	Continuïtat espacial de l'espectre Doppler	10,701	0,736	0,784
CSs	Suavitat temporal de CS	9,073	0,648	0,731

L'algorisme FL-ILR addicionalment implementa un mecanisme d'actualització dinàmica de la MF de Ze per a millorar la detecció en situacions amb línies interferents en múltiples nivells. Finalment, com a opció, incorpora un procés de «despeckle» o filtratge de punts aïllats.

III. METODOLOGIA

Aquest treball desenvolupa un nou sistema que permet l'execució de l'algorisme FL-ILR a la sortida de RaProM en radars MRR-2. El nou sistema RaProM/FL-ILR ha estat implementat mantenint la independència dels dos processos com a dos blocs d'execució separada. D'aquesta manera es té modularitat i es conserva la concepció de cada algorisme, amb el seu mètode propi de configuració (paràmetres en l'ordre d'execució, en cas de RaProM, o fitxer en format [YAML](#) per a FL-ILR). Cal adaptar el script RaProM perquè la seva sortida incorpori tota la informació necessària per a alimentar l'algorisme FL-ILR, essent alhora necessari adaptar el script d'aquest últim algorisme per a obtenir la informació de RaProM i emascarar-ne les variables del conjunt de dades de sortida, desant-les en un nou fitxer NetCDF. Prèviament a l'avaluació del funcionament del sistema RaProM/FL-ILR es realitza una verificació del funcionament conjunt MK12 amb FL-ILR, amb dades MRR-2 originals dels desenvolupadors de l'algorisme de lògica difusa.

A. Adaptació de la sortida de RaProM

La Figura 4 mostra el flux de dades entre MK12 i FL-ILR per a l'obtenció de les vuit variables membre que permeten el càlcul de la funció agregada. D'aquestes vuit variables, tres (Ze, Vr i PL) són sortida directa del post-processament MK12 (Ze_noDA, W_noDA i peakVelLeftBorder_noDA); les altres cinc (PW, PS, PSs, CS i CSs) es calculen a partir de les sortides (leftSlope_noDA, rightSlope_noDA, W_noDA, peakVelLeftBorder_noDA, peakVelRightBorder_noDA). Així doncs, les vuit variables membre es deriven a partir de sis sortides de l'algorisme MK12.

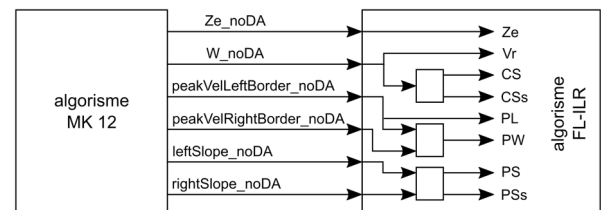


Figura 4: Flux de dades entre MK12 i FL-ILR.

L'última versió disponible de RaProM ([García-Benadi 2025, RaProM 3-11.py](#)) només proporciona dues d'aquestes sis variables (Ze i W). S'ha treballat a partir d'una nova versió de RaProM, encara no disponible a GitHub, que amplia en tres les variables de sortida d'aquest post-processament, proporcionant directament PL, PW i PS i fent viable l'obtenció de les vuit variables membre necessàries per a alimentar l'algorisme FL-ILR.

En totes les execucions d'aquest treball, s'ha fixat el període d'integració de RaProM al valor habitual de 60 s, coincidint amb el valor amb què típicament es fa la integració temporal amb l'algorisme MK12.

B. Adaptació de l'algorisme FL-ILR a RaProM

L'adaptació de l'algorisme FL-ILR ha de permetre tractar les dades de sortida del post-processament RaProM (desades en un fitxer NetCDF) i oferir-les emmascarades com a resultat de la supressió de línies interferents.

El flux de dades per a obtenir les vuit variables membre, a partir de la sortida de RaProM amb l'adaptació descrita anteriorment, és el que mostra la Figura 5:

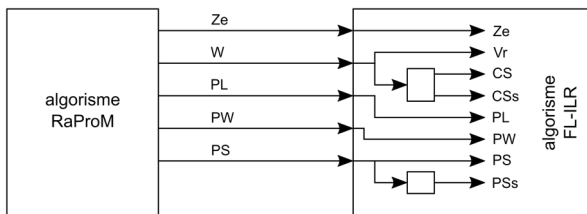


Figura 5: Flux de dades entre RaProM i FL-ILR (adaptats).

L'adaptació de l'algorisme FL-ILR ha consistit en la implementació del nou flux de dades i les modificacions pertinents en cinc funcions del codi original ([Kim, GitHub 2024](#)) per a referenciar correctament les variables que proporciona RaProM. L'algorisme adaptat modifica les variables Ze i W de RaProM emmascarant-les en funció de la superació d'un llindar configurable per a la funció agregada, i desant-les en un nou fitxer NetCDF amb el sufix '_RaProM_IR.nc'.

El nou script desenvolupat, que adapta l'algorisme FL-ILR, ha estat codificat mantenint la traçabilitat en les modificacions del script original i respectant els termes de la llicència pública general de GNU ([GPLv3](#)) amb què el software original va ser publicat.

C. Verificació amb les dades originals

Es disposa de les dades (fitxers RAW) de MRR-2 amb les que es va realitzar l'entrenament de l'algorisme FL-ILR. Aquesta sèrie de dades està constituïda per observacions durant els mesos de juny a setembre dels anys 2021 a 2023 en tres ubicacions de Corea del Sud: Incheon (ICN: 37.4777° N, 126.6249° E), Suwon (SWN: 37.2575° N, 126.9830° E), i Seoul (SEL: 37.5714° N, 126.9658° E). Els autors de l'estudi han tingut l'amabilitat de proporcionar aquestes dades per a facilitar la reproducció dels resultats mitjançant l'execució seqüencial dels algorismes MK12 i FL-ILR. Un cop instal·lat el software d'aquests dos algorismes es procedeix a la verificació del «set-up», executant quatre casos d'estudi presentats als resultats de la publicació (Fig. 5 de [Kim & Lee 2024](#)). La Figura A1, inclosa a l'Apèndix, recull els resultats de l'execució. Els gràfics mostren l'evolució temporal de la

reflectivitat equivalent a cada nivell d'alçada sobre l'antena del radar (s'hi anota com alçada «above ground level» AGL, o sobre el nivell del terreny). La primera columna mostra les sortides de MK12 i a la segona el resultat havent-hi aplicat FL-ILR. Es comprova que aquests resultats reproduïen fidelment els resultats publicats i per tant es verifica que el software instal·lat amb els dos algorismes constitueix una referència vàlida amb la qual comparar la precisió del sistema RaProM/FL-ILR.

D. Avaluació amb dades de MRR-2 de la Cerdanya

L'avaluació de l'eficàcia en la supressió de línies interferents es valora a partir dels gràfics temps-alçada resultants de l'execució de RaProM/FL-ILR. S'executa també el sistema MK12/FL-ILR per tal de disposar de referència de comparació. La Figura 6 mostra l'esquema de post-processament per a cadascun dels 44 fitxers RAW executats.

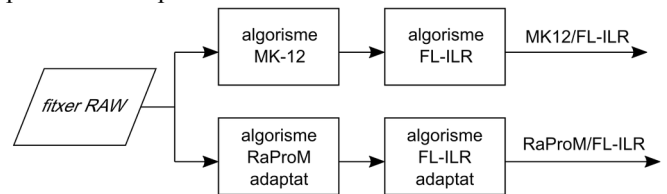


Figura 6: Post-processament dels fitxers RAW.

Les dades disponibles procedeixen de dos radars MRR-2 ubicats a la Cerdanya. La UB té operatiu un radar a Das (DAS: 42,38605°N; 1,86640°E; 1097 m ASL) des de 2016, participant inicialment en el projecte ATMOUNT ([González et al 2021](#)) i actualment en el projecte ARTEMIS. En el context d'aquest últim projecte, Météo-France va facilitar l'ús d'un altre radar ubicat a Puigcerdà (PGC: 42,44013°N; 1,93482°E; 1213 m ASL). S'ha tingut accés al registre de dades del radar DAS des de gener de 2018. Pel que fa al radar PGC se'n tenen dades des de novembre de 2023.

El radar DAS, ubicat en un entorn més rural, disposa de pocs dies d'observació contenint línies d'interferència, mentre que el radar PGC, pel fet de trobar-se en un entorn urbà prou gran, presenta més dies d'observació amb línies interferents. El conjunt de dades disponibles contenint episodis de precipitació i línies interferents alhora és encara prou escàs per a plantejar l'entrenament i la validació d'un sistema de lògica difusa adaptat a RaProM amb a les característiques particulars interferents d'aquests dos radars. Aquest treball es limita a l'avaluació de resultats amb els paràmetres proporcionats en el software publicat pels desenvolupadors ([Kim, GitHub 2024](#)), havent entrenat el sistema amb les dades dels MRR de Incheon i Suwon. Els desenvolupadors del sistema de supressió de línies interferents amb lògica difusa suggereixen ([Kim & Lee 2024](#)) que l'entrenament fet amb els radars coreans és aplicable a altres muntatges en MRR-2 amb diferents configuracions, en diferents ubicacions i independentment del clima.

Per a avaluar el sistema, els casos d'estudi es classifiquen en cinc tipologies:

- (A) Línia interferent estenent-se entre episodis de precipitació.
- (B) Línia interferent de llarga durada amb episodis de precipitació.
- (C) Línies interferents a diferents alçades.
- (D) Línies interferents sense precipitació.
- (E) Episodis de precipitació sense línies interferents.

S'avaluarà el sistema RaProM/FL-ILR en diferents observacions de les cinc tipologies i es compararà amb els resultats del sistema MK12/FL-ILR.

Finalment s'avaluaran en RaProM/FL-ILR els quatre casos d'estudi mostrats a la Figura A1, amb dades de ICN i SWN. D'aquesta manera es tindran també resultats desvinculats de la influència de les possibles característiques interferents pròpies dels MRR-2 a Das i Puigcerdà.

IV. RESULTATS

Els resultats s'ofereixen per a cinc casos d'estudi, corresponents a cadascuna de les cinc tipologies plantejades. Aquests casos han estat seleccionats com a representatius de la seva tipologia, entre les 44 observacions processades amb dades dels MRR-2 ubicats a la Cerdanya (28 de DAS i 16 de PGC).

A. Casos d'estudi

La Figura 7 mostra els resultats obtinguts en la reflectivitat equivalent per a observacions representatives dels casos d'estudi de les cinc tipologies considerades. La primera columna visualitza la sortida de RaProM i la segona mostra la sortida del filtratge de línies interferents amb lògica difusa.

En el cas A es mostra una observació de Puigcerdà el 15/3/2024, on una línia interferent que abasta diferents episodis de precipitació és filtrada de manera eficaç. El cas B s'il·lustra amb un exemple de 20/9/2023 a Das, on el sistema suprimeix una llarga i persistent línia d'interferència amb episodis de precipitacions de característiques diverses.

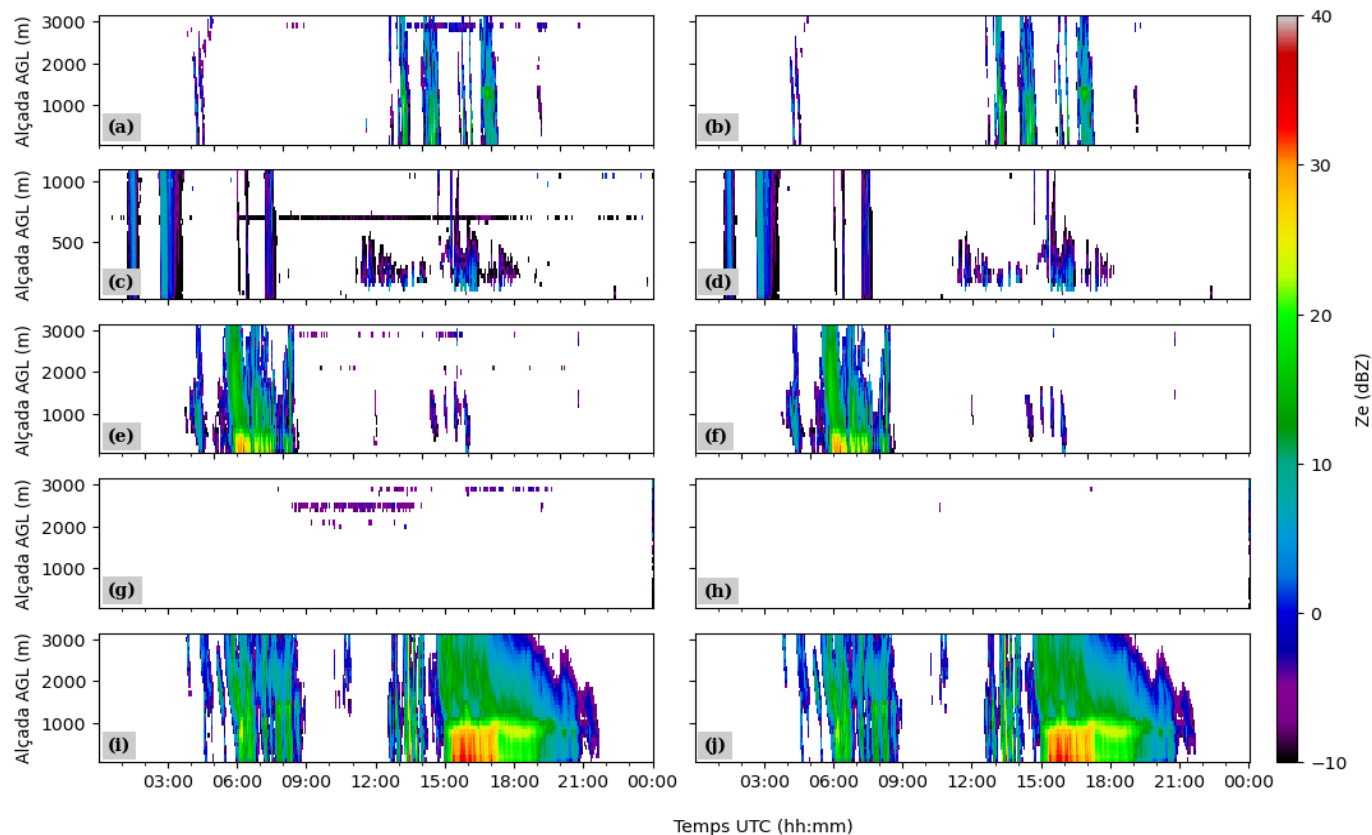


Figura 7: Reflectivitat. Supressió de línies interferents en RaProM. Casos d'estudi. Cas A: PGC 15/3/2024 gràfics (a) i (b) ; Cas B: DAS 20/9/2023 gràfics (c) i (d); Cas C: PGC 8/3/2024 gràfics (e) i (f); Cas D: PGC 31/12/2023 gràfics (g) i (h); Cas E: DAS 26/4/2021 gràfics (i) i (j).

L'algorisme també mostra eficàcia en el cas C (gràfics (e) i (f), Puigcerdà 8/3/2024) eliminant els patrons interferents simultanis a diferents alçades. El correcte filtratge en absència de precipitació, també es pot observar en el cas D (Puigcerdà 31/12/2023). Finalment el cas E, exemplificat amb una observació de Das el 26/4/2021, permet comprovar que els ecos meteorològics són ben preservats també en situació d'absència d'interferència amb precipitacions abundants.

La Figura 8 mostra el resultat de l'algorisme FL-ILR aplicat al post-processament MK12 en els cinc casos descrits. S'observa un funcionament altament eficient amb la supressió total de les línies d'interferència. No queda rastre de cap patró d'interferència. La detecció i supressió de línies d'interferència ha estat exitosa en els 44 casos processats, demostrant que l'entrenament de l'algorisme amb els dos radars coreans també funciona amb els radars de la Cerdanya.

L'algorisme de lògica difusa proporciona una màscara de supressió de senyal que es pot aplicar a les variables de post-processament desitjades (reflectivitat, velocitat, tipus d'hidrometeor...). Tot i que en els gràfics de reflectivitat equivalent mostrats ja es pot apreciar bé el comportament del filtre, en la Figura 9 es mostra l'actuació de RaProM/FL-ILR en la variable velocitat per als cinc casos d'estudi seleccionats.

B. Generalització dels resultats i particularitats

Els casos d'estudi presentats són una mostra representativa del comportament de RaProM/FL-ILR en tots els casos processats. La implementació de l'algorisme de supressió de línies sobre la sortida de RaProM mostra una

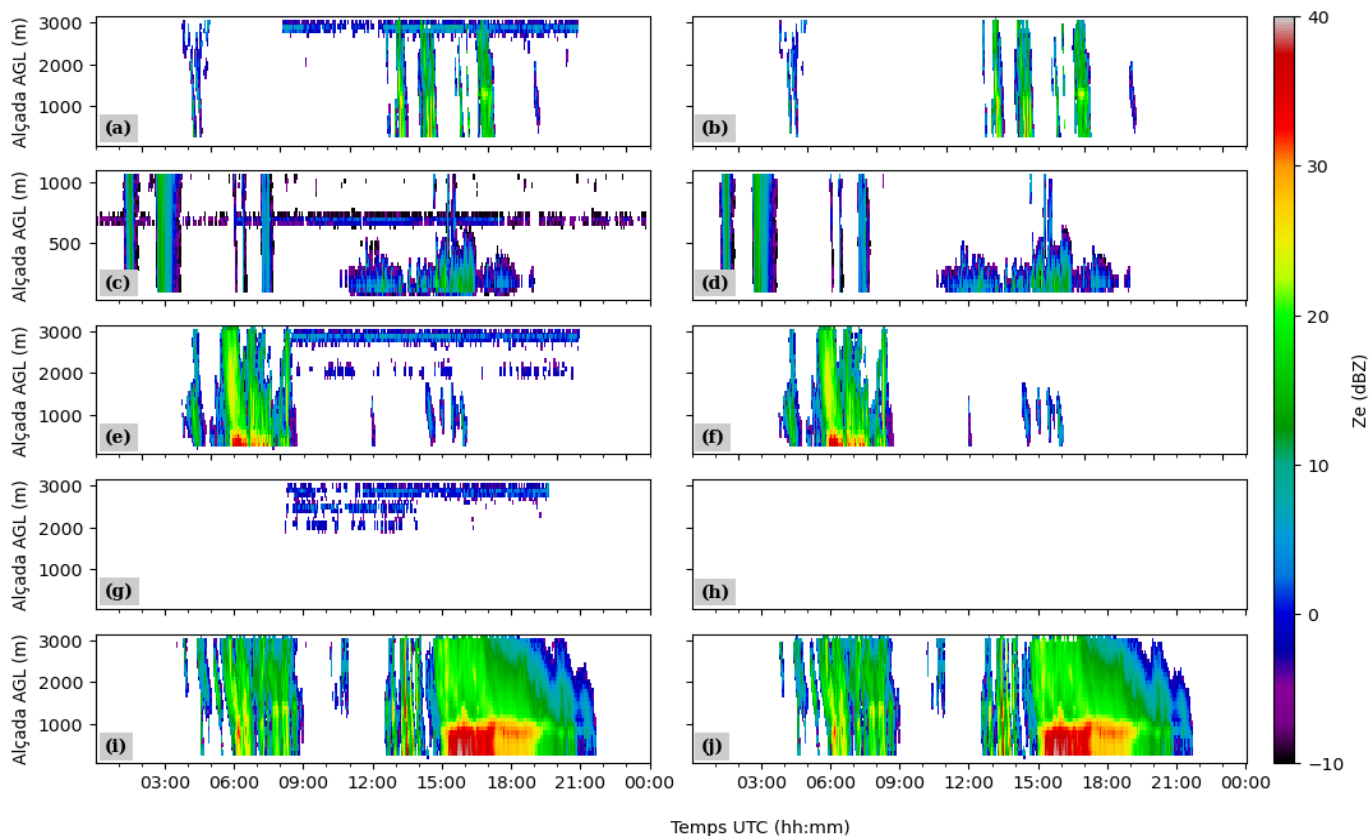


Figura 8: Reflectivitat. Supressió de línies interferents en MK12. Casos d'estudi. Cas A: PGC 15/3/2024 gràfics (a) i (b) ; Cas B: DAS 20/9/2023 gràfics (c) i (d); Cas C: PGC 8/3/2024 gràfics (e) i (f); Cas D: PGC 31/12/2023 gràfics (g) i (h); Cas E: DAS 26/4/2021 gràfics (i) i (j).

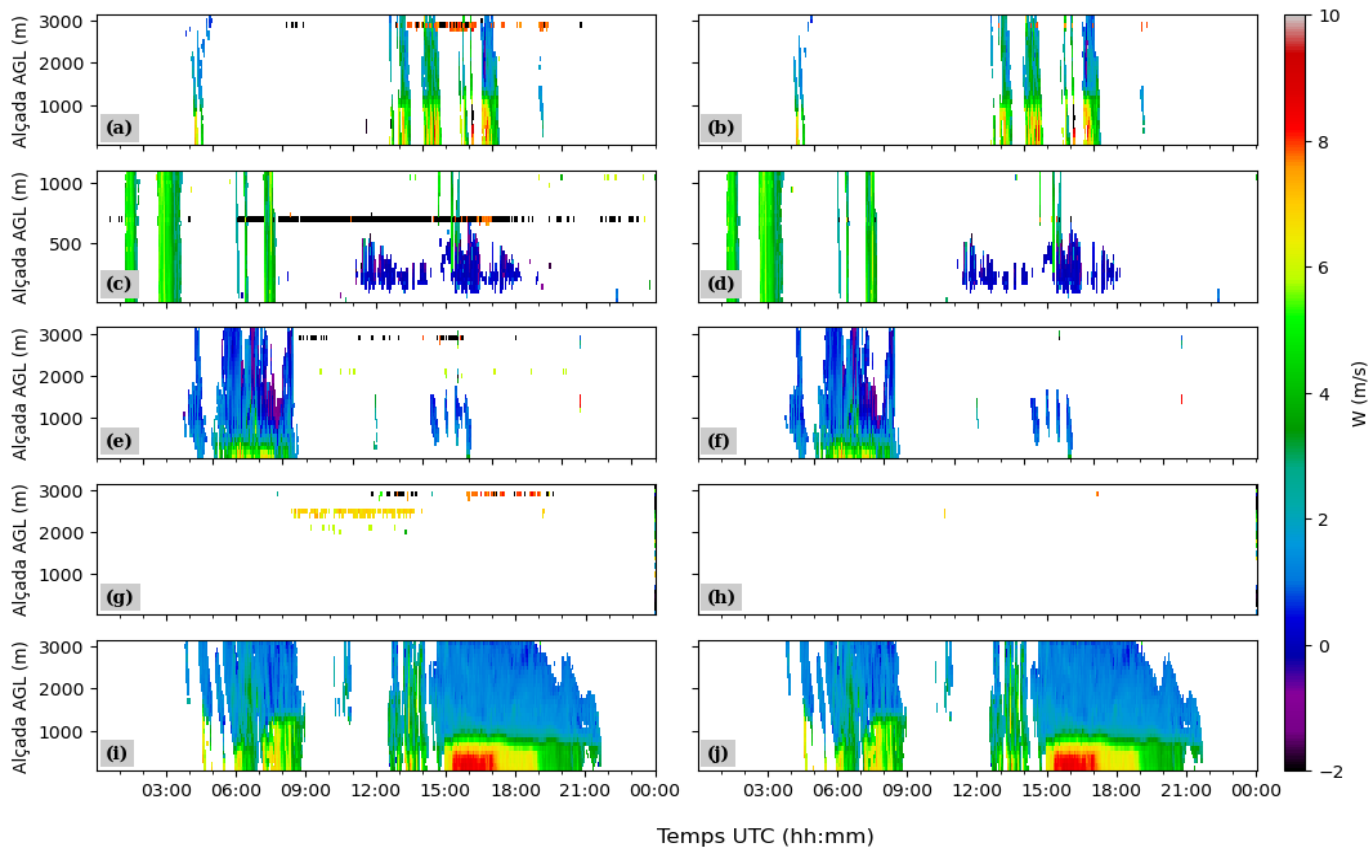


Figura 9: Velocitat. Supressió de línies interferents en RaProM. Casos d'estudi. Cas A: PGC 15/3/2024 gràfics (a) i (b) ; Cas B: DAS 20/9/2023 gràfics (c) i (d); Cas C: PGC 8/3/2024 gràfics (e) i (f); Cas D: PGC 31/12/2023 gràfics (g) i (h); Cas E: DAS 26/4/2021 gràfics (i) i (j).

eficàcia molt elevada en situacions força variades d'interferència i precipitació.

Convé fer constar algunes diferències que s'aprecien entre l'aplicació de l'algorisme a la sortida de RaProM i l'aplicació a la sortida de MK12:

En primer lloc, l'algorisme FL-ILR aplicat a RaProM deixa algunes petites restes espúries de senyal interferent, fet que no s'observa aplicant el filtratge a MK12.

Això es pot observar en la Figura 7, en la Figura 9 i en la Figura A2 de l'Apèndix. En aquesta última figura es mostra el funcionament de RaProM/FL-ILR amb dades dels radars ICN i SWN, gràfics que poden comparar-se amb la sortida de MK12/FL-ILR mostrada a la Figura A1. Aquesta major perícia de l'algorisme sobre MK12 molt probablement tingui la seva explicació en el fet que l'algorisme de lògica difusa ha estat entrenat amb sortides de MK12 i no s'adapta de manera òptima a la sortida de RaProM.

També s'observa que els senyals interferents a la sortida de RaProM segueixen uns patrons més esmoreïts (en intensitat i en extensió) i fins i tot en alguns casos arriben a desaparèixer. En altres casos, poc freqüents, RaProM mostra una línia interferent a nivells inferiors que en la sortida de MK12 no apareix. L'algorisme FL-ILR no ha aconseguit suprimir aquestes línies interferents en cap cas. La Figura 10 en mostra un exemple on s'hi observen simultàniament aquestes dues particularitats.

V. CONCLUSIONS

Aquest treball ha implementat i avaluat un algorisme de supressió de línies interferents per lògica difusa a la sortida del post-processament RaProM amb dades procedents de dos radars MRR-2 ubicats a La Cerdanya. Els resultats s'han contrastat amb els obtinguts aplicant l'algorisme a la sortida del post-processament MK12. L'avaluació s'ha dut a terme en situacions amb diferents característiques d'interferència i sota diverses condicions de precipitació. És destacable que:

- La supressió de línies interferents ha estat força eficaç aplicant la configuració originalment desenvolupada i entrenada per al post-processament MK12 en radars MRR-2 de Corea del Sud.
- Tal i com els desenvolupadors de l'algorisme assenyalaven en el seu estudi, l'algorisme aplicat a la sortida de MK12 ha demostrat funcionar de manera altament eficaç sense veure's significativament influenciat per diferències climàtiques, d'ubicació o de configuració de l'instrument.

- La comparació dels resultats de RaProM/FL-ILR amb els de MK12/FL-ILR mostra que en alguns casos el primer sistema no acaba d'eliminar completament algunes línies d'interferència, mostrant petites restes que MK12/FL-ILR aconsegueix suprimir totalment. És d'esperar que els resultats millorin encara més entrenant la lògica difusa de l'algorisme de supressió de línies interferents amb dades de RaProM. Aquest entrenament es podrà implementar i avaluar quan es disposi d'una sèrie prou llarga d'observacions de precipitació amb línies interferents en radars MRR-2 de la UB.

- L'aplicació de l'algorisme FL-ILR a RaProM suposa una millora en la qualitat de les dades observades en perfils verticals de precipitació, i permetrà contribuir a la disponibilitat de dades més acurades per a la recerca i les aplicacions vinculades a les observacions de MRR-2.

VI. AGRAÏMENTS

Voldria expressar el meu sincer agraïment a les persones que han contribuït d'alguna manera a la materialització d'aquest treball, especialment a:

- Kwonil Kim i GyuWon Lee per compartir dades d'observacions usades en el desenvolupament de l'algorisme de supressió de línies interferents per lògica difusa.
- Albert Garcia-Benadí pels aclariments sobre el codi de RaProM i facilitar-ne l'adaptació.
- Mireia Udina per proporcionar l'accés a les dades d'observació dels radars MRR-2 de la UB.
- Andreu Salcedo per la disposició i l'atenció prestada en la supervisió del treball.
- Joan Bech per la proposta, el guiatge, la supervisió i la coordinació de tot allò que ha estat convenient.

VII. REFERÈNCIES

- Duvernoy J, Gaumet JL, Gilet M (1991): Measurement of hydrometeor size distributions with a vertically pointing CW radar. *Proc. 25th Conf. on Radar Meteorology*, Paris, France, American Meteorological Society, pp. 797–800
- Fehlhaber L, Grosskopf J (1965): An Investigation of the Structure of the Troposphere by Means of a Vertically Pointed Radar. *NTZ-Communications Journal*, vol. 4, no. 4, pp.185-190

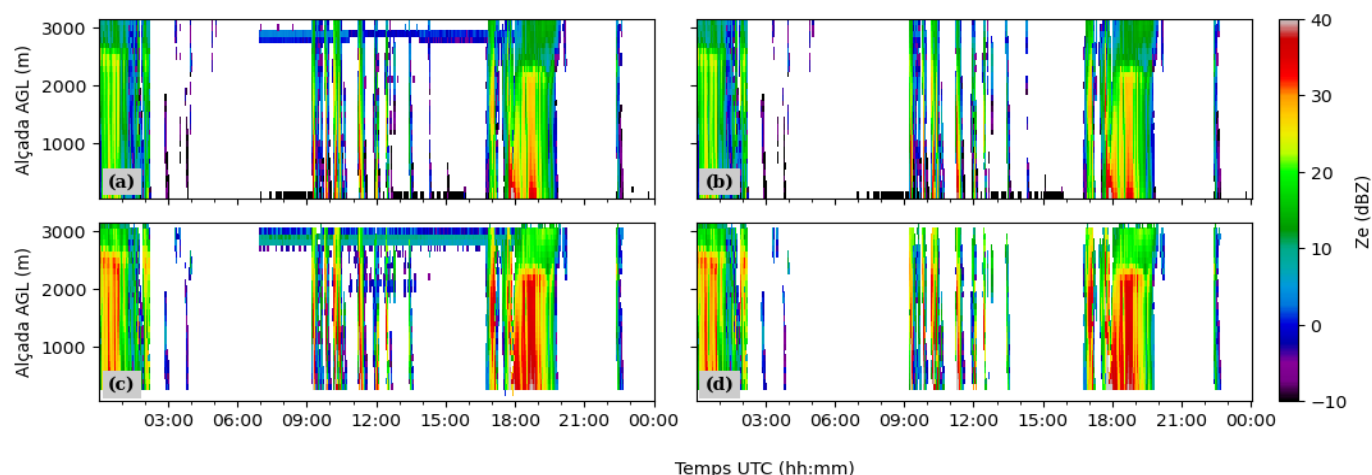


Figura 10: Diferències en senyals interferents. Sortida de RaProM (a) i supressió de línies interferents (b); Sortida de MK12 (c) i supressió de línies interferents (d). Dades: PGC 6/7/2024.

- Ferrone A, Billault-Roux AC, Berne A (2022): ERUO: A Spectral Processing Routine for the Micro Rain Radar PRO (MRR-PRO). *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 15, no. 11, pp. 3569–3592. <https://doi.org/10.5194/amt-15-3569-2022>
- Friend AW (1939): Continuous Determination of Air-Mass Boundaries by Radio. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 20, no. 5, pp. 202-205, <https://www.jstor.org/stable/26255710>
- Friend AW (1940): Developments in Meteorological Sounding by Radio Waves. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 7:8, 347-350, <https://doi.org/10.2514/8.1149>
- Friend AW (1949): Theory and Practice of Tropospheric Sounding by Radar. *Proceedings of the IRE*, vol. 37, no. 2, pp. 116-138, <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1949.230936>
- Garcia-Benadí A, Bech J, Gonzalez S, Udina M, Codina B, Georgis JF (2020): Precipitation type classification of micro rain radar data using an improved doppler spectral processing methodology. *Remote Sensing*, 12(24), 4113, <https://doi.org/10.3390/rs12244113>
- Garcia-Benadí A, Bech J, Gonzalez S, Udina M, Codina B (2021): A new methodology to characterise the radar bright band using doppler spectral moments from vertically pointing radar observations. *Remote Sensing*, vol. 13, no. 21, 4323, <https://doi.org/10.3390/rs13214323>
- Garcia-Benadí A: ImproveProcessRawMRR - RaProM_3-11.py, *GitHub*, Accedit per últim cop a juny de 2025, Disponible a: <https://github.com/AlbertGBena/RaProM>
- Ghada W, Casellas E, Herbing J, Garcia-Benadí A, Bothmann L, Estrella N, Bech J, Menzel A (2022): Stratiform and convective rain classification using machine learning models and micro rain radar. *Remote Sensing*, 14(18), 4563, <https://doi.org/10.3390/rs14184563>
- González S, Bech J, Garcia-Benadí A, Udina M, Codina B, Traperó L, Paci A, Georgis JF (2021): Vertical structure and microphysical observations of winter precipitation in an inner valley during the Cerdanya-2017 field campaign. *Atmospheric Research*, vol. 264, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105826>
- Joss J, Waldvogel A, Collier CG (1990): Precipitation Measurement and Hydrology. *Radar in Meteorology*, Atlas D, Ed., American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 577–606, https://doi-org.sire.ub.edu/10.1007/978-1-935704-15-7_39
- Klugmann D, Heinsohn K, Kirtzel HJ (1996): A low cost 24 GHz FM-CW Doppler radar rain profiler. *Contributions to atmospheric physics*, vol. 69, pp. 247-253, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:130281635>
- Kim K, Lee G (2024): A Fuzzy-Logic-Based Approach for Eliminating Interference Lines in Micro Rain Radar (MRR-2). *Remote Sensing*. 16, no. 21, 3965. <https://doi.org/10.3390/rs16213965>
- Kim K: MRR2 Interference Line Removal, *GitHub*, Accedit per últim cop a juny de 2025, Disponible a: https://github.com/Kwonil-Kim/MRR2_interference_line_removal
- Maahn M, Kollias P (2012): Improved Micro Rain Radar snow measurements using Doppler spectra post-processing. *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 5, no.11, 2661–2673, <https://doi.org/10.5194/amt-5-2661-2012>
- Maahn M: IMProToo - Improved MRR Processing Tool, *GitHub*, Accedit per últim cop a juny de 2025, Disponible a: <https://github.com/maahn/IMProToo>
- Metek (2009): MRR Physical Basics, version 5.2.0.1. *Meteorologische Messtechnik GmbH Tech. Rep.*, Accedit per últim cop a juny de 2025, Disponible a: <https://www.insec.utah.edu/~u0546592/CFOG/ED/MRR/mrr-physicalbasics.pdf>
- Richter JH (1969): High resolution tropospheric radar sounding. *Radio Science*, vol. 4, no. 12, pp. 1261-1268, <https://doi.org/10.1029/RS004i012p01261>
- Saxton JA, Lane JA, Meadows RW, Matthews PA (1964): Layer structure of the troposphere. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 111, no. 2, pp. 275-283. IEE, <https://doi.org/10.1049/piee.1964.0042>
- Strauch RG (1976): Theory and Application of the FM-CW Doppler Radar. Ph. D Thesis, University of Colorado
- Süsskind C (1985): Who invented radar?. *Endeavour*, 9, 92–96, [https://doi.org/10.1016/0160-9327\(85\)90043-2](https://doi.org/10.1016/0160-9327(85)90043-2)
- Unruh WP, Wolf MA (1989): A portable CW/FM-CW Doppler radar for local investigation of severe storms. *Proc. 24th Conf. on Radar Meteorology*, Tallahassee, FL, Amer. Meteor. Soc., pp. 634–636.
- Wiener V, Roussel ML, Genthon C, Vignon E, Grazioli J, Berne A (2024): A 7-year record of vertical profiles of radar measurements and precipitation estimates at Dumont d'Urville, Adélie Land, East Antarctica. *Earth System Science Data Discussions*, vol. 16, no. 2, pp. 821-836, <https://doi.org/10.5194/essd-16-821-2024>
- Wilson JW, Brandes EA (1979): Radar Measurement of Rainfall: A Summary. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60, 1048-1058, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1979\)060<1048:RMORS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1979)060<1048:RMORS>2.0.CO;2)
- YAML: YAML Ain't Markup Language. *Viquipèdia*. Accedit per últim cop a juny de 2025, Disponible a: <https://ca.wikipedia.org/wiki/YAML>
- Zadeh LA (1965): Fuzzy Sets. *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

APÈNDIX: Gràfics de post-processaments amb dades de MRR-2 ubicats a Corea:

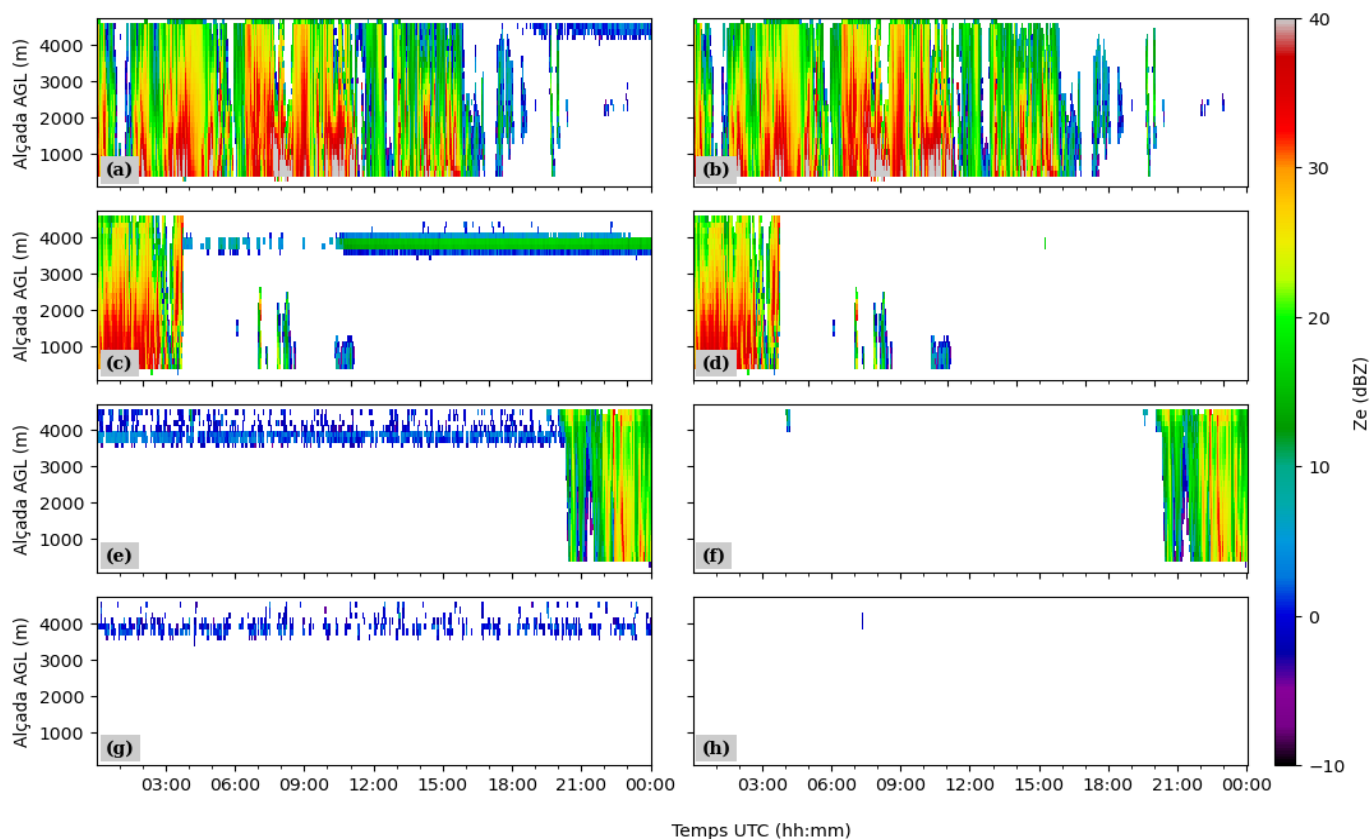


Figura A1: Verificació amb dades originals MRR-2 de Corea del Sud. Processament MK12: (a) ICN 9/8/2022, (c) SWN 21/8/2021, (e) ICN 20/8/2021, (g): ICN 14/7/2021. Processament MK12 amb FL-ILR: (b), (d), (f), (h).

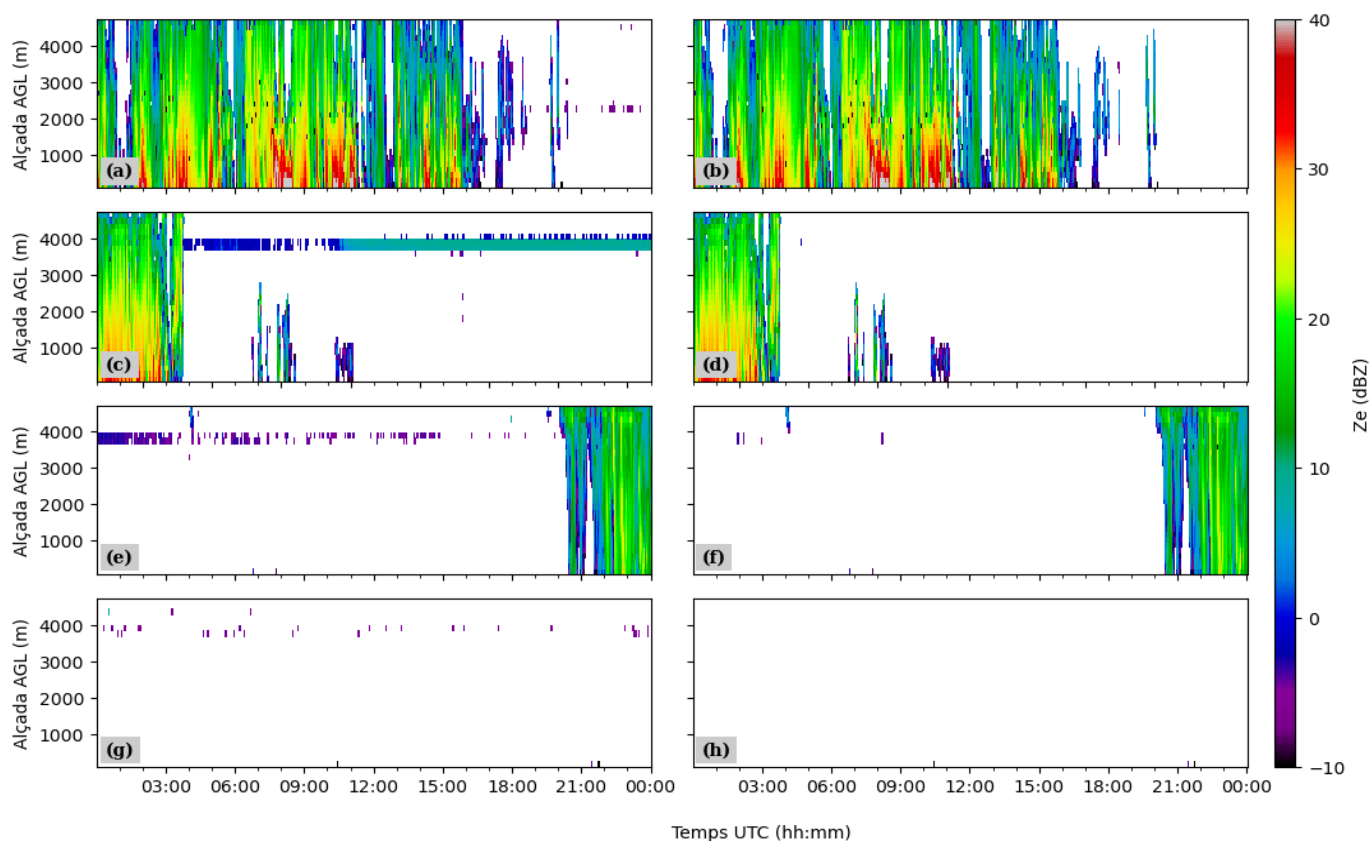


Figura A2: Processament RaProM amb dades originals MRR-2 de Corea del Sud. Casos de la Figura A1: (a) ICN 9/8/2022, (c) SWN 21/8/2021, (e) ICN 20/8/2021, (g): ICN 14/7/2021. Processament RaProM amb FL-ILR: (b), (d), (f), (h).