



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Desenvolupament i aplicació d'un model numèric per a la previsió d'acumulació de neu a les carreteres

Treball realitzat per:

Ferran Huertas Martínez

Dirigit per:

Daniel Sempere Torres

Marc Berenguer Ferrer

Màster en:

Enginyeria de Camins Canals i Ports

Barcelona, Gener 2018

Departament d'enginyeria civil i ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Agraïments

Al meu tutor Daniel Sempere per brindar-me l'oportunitat i confiança de realitzar el treball de final de màster al Centre de Recerca Aplicada en Hidrometeorologia (CRAHI).

Al meu tutor Marc Berenguer pels seus consells i valuoses aportacions al llarg del tots els passos que m'han portat fins aquí.

Al Servei Meteorològic de Catalunya per la facilitació de les dades del radar i les estacions meteorològiques, i al Finnish Meteorological Institute per les dades del model de previsió HIRLAM, element indispensable per a la realització d'aquest treball.

A la resta de companys del CRAHI, en especial a la Shinju Park i al Carles Corral, els quals m'han iniciat en l'IDL, i que sempre han estat oberts a ajudar-me quan han sorgit problemes en els codis.

Als amics i també als companys de la universitat, que han fet de la meva estada a Barcelona una experiència entranyable

Finalment, a tota la meva família per tot el suport i afecte rebut durant aquesta experiència. Alon, no m'oblido de tu.

TAULA DE CONTINGUTS

CAPÍTOL 1 INTRODUCCIÓ	1
1.1 Afectacions viàries degudes a les condicions meteorològiques	1
1.1.1 <i>Sinistralitat</i>	1
1.1.2 <i>Capacitat i velocitat en làmina lliure</i>	3
1.2 Objectius i organització del Treball	4
CAPÍTOL 2 METODOLOGIA	6
2.1 Descripció del model físic	7
2.1.1 <i>Balanç d'energia en la superfície de la carretera</i>	7
2.1.2 <i>Transferència de Calor en el Sòl</i>	12
2.1.3 <i>Acumulació superficial d'aigua</i>	17
2.2 Variables de entrada i modes de funcionament del model	18
2.2.1 <i>Variables d'entrada</i>	18
2.2.2 <i>Modes de funcionament</i>	18
2.2.3 <i>Ajust de la temperatura ambient i pressió atmosfèrica en funció de l'altura</i>	21
2.3 Variables de Sortida	23
2.4 Implementació del Model	26
2.4.1 <i>Transmissió de Calor en una columna de sòl</i>	27
2.4.2 <i>Domini de l'estudi</i>	28
2.4.3 <i>Inicialització del model</i>	28
2.5 Exemple de funcionament del model	29
CAPÍTOL 3 RESULTATS	32
3.1 Episodi 27/02/2018 – 02/03/2018	33
3.1.1 <i>Sumari de l'episodi</i>	33
3.1.2 <i>Presentació de resultats</i>	34
3.1.3 <i>Valoració i comparació dels resultats</i>	43
3.2 Episodi 04/02/2018 – 07/03/2018	59
3.2.1 <i>Sumari de l'episodi</i>	59
3.2.2 <i>Presentació de Resultats</i>	60
3.2.3 <i>Valoració i comparació dels Resultats</i>	64
3.1 Episodi 19/03/2018 – 21/03/2018	76
3.1.1 <i>Sumari de l'episodi</i>	76
3.1.2 <i>Presentació de Resultats</i>	77
3.1.3 <i>Valoració i comparació dels Resultats</i>	82
CAPÍTOL 4 CONCLUSIONS	92
CAPÍTOL 5 REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES	95

Capítol 1

Introducció

Les afectacions de la xarxa viària per motius meteorològics són freqüents. Tot i l'existència de models numèrics de predicció meteorològica que permeten fer previsions d'aquests fenòmens i de protocols dissenyats per les diferents administracions, les condicions meteorològiques continuen sent una de les principals causes de les incidències generalitzades en la xarxa viària. Aquesta afirmació esdevé particularment certa durant l'hivern, on els episodis en què s'acumula neu a la carretera són responsables de retencions que poden arribar a paralitzar les vies durant hores, així com de nombrosos accidents. Si bé en gran part de Catalunya no és dels fenòmens meteorològics freqüents, la poca preparació dels habitants provoca que, quan es donen episodis significatius de neu, el caos s'estengui al llarg de les infraestructures viàries amb molta facilitat.

Davant d'aquesta situació és necessària la creació d'una eina capaç de facilitar avisos primerencs que permetin localitzar d'una forma precisa, tant en l'espai com en el temps, els punts de la xarxa de carreteres on es donin condicions desfavorables per al trànsit.

En aquest treball es detallarà el funcionament d'un model que sigui capaç de predir les condicions de la carretera en el domini de Catalunya, encara que és aplicable, si bé alguns valors de certs paràmetres haurien de ser revisats, a qualsevol xarxa viària.

En aquest capítol es presenta un recull de literatura sobre els efectes de la neu i altres elements en les carreteres.

1.1 Afectacions de la xarxa viària degut a les condicions meteorològiques

S'entén com a accident per causes meteorològiques aquell que es dona durant un episodi de precipitació i/o en presència del paviment en condicions lliscants. Es poden diferenciar les afectacions produïdes per la neu tant a nivell de seguretat com a nivell de capacitat i velocitat de circulació en la via.

1.1.1 Sinistralitat

Una de les principals preocupacions a nivell global en quant a la mobilitat és la seguretat. Grans inversions s'han dut a terme per reduir les incidències, marcant-se l'ambició objectiu de 0 morts en

les carreteres, tal i com queda recollit en el programa “HORIZON 2020” de la CE o dels “Retos de la Sociedad del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica de Innovación 2017-2020 (Reto 4: Transporte Sostenible, inteligente, conectado e integrado)” a Espanya.

En la publicació “Whether weather matters to traffic demand, traffic safety, and traffic flow”(Maze et al. 2005) es fa una recopilació de la literatura existent, on queda reflectit un augment de la sinistralitat en carretera quan aquesta es troba coberta per una capa de neu o gel. Un dels estudis mencionats (Khattak et al. 2000) compara la sinistralitat en les autopistes interestatals als EEUU en períodes on la precipitació en forma de neu és més gran de 0,2 polzades amb els mateixos períodes quan no neva. L'estudi conclou que en condicions normals el rati d'accidents per milió de vehicles per quilòmetre és de 0,41 mentre que en durant les tempestes augmenta a 5.86 (un augment del 1300%).

En la mateixa publicació es presenten els resultats de l'estudi realitzat pels propis autors en el que es conclou que, durant les tempestes (combinació de precipitació i fortes ratxes de vent), el rati d'accident augmenta un 2500% respecte condicions normals. Acaba relacionant els resultats obtinguts amb la sinistralitat durant les tempestes de neu en l'estat de Iowa, on el 21% dels accidents es donen durant un 5% dels dies de l'any. És interessant que en la presentació dels resultats propis, els autors donen importància al fet de que altes velocitats del vent influeixen en la sinistralitat, això sí, en gran part quan aquestes es donen al mateix temps que la precipitació. Això es creu que es deu a la reducció en la visibilitat, que consideren un factor important com la reducció del coeficient de fregament de la calçada.

En canvi, pel que fa a la severitat dels accidents existeixen diferents opinions. Part dels estudis presentats conclouen que les conseqüències dels incidents en condicions de neu i gel són menors pel que fa al nombre de víctimes mortals degut a la reducció de la velocitat dels vehicles circulant. D'altra banda, hi ha altres estudis que afirmen un increment en les lesions i víctimes mortals durant períodes de tempesta. Els resultats obtinguts pels propis autors tampoc són conclouents si bé registren una menor severitat en els accidents durant períodes de tempesta.

En “How do weather events impact roads?” (Federal Highway Administration 2017) explica com els diferents factors com el vent, precipitació i condicions de la calçada redueixen la visió i coeficient de fricció del paviment. En la Taula 1.1 es detalla per a cada factor meteorològic (pluja, neu i boira) i condició de la calçada (molla, nevada i gelada) el percentatge d'accidents que representa respecte el total d'accidents i el percentatge que representa dins la categoria de accidents degut a condicions meteorològiques.

Si bé els resultats presentats no mostren un augment significatiu del nombre d'accidents en condicions de paviment nevat o gelat respecte el paviment moll, es poden extraure algunes conclusions. Un 7% dels accidents es donen quan el paviment es troba cobert de neu o gel, mentre que només un 4% ocorren mentre neva. A nivell de severitat, s'observa una lleugera reducció en el percentatge de ferits i morts en els accidents en condicions hivernals.

Tot i això, els resultats de la Taula 1.1 fan referència al total dels accidents, sense tenir en compte el nombre d'accidents per vehicles per quilòmetre, que és un indicador més adequat per a comparar l'efecte de les condicions meteorològiques en la sinistralitat. Al ser una mitjana en el conjunt d'autopistes de tots EEUU, el número de dies de neu varia molt entre els diferents estats (en els més càlids gairebé mai hi ha presència de neu i per tant l'únic factor meteorològic capaç d'afectar aquestes vies és la pluja). D'altra banda, al tractar sobre el número total d'accidents tampoc es té en compte el fet que durant els dies on hi ha forts temporals de neu es realitzen menys desplaçaments.

Taula 1.1. Sinistralitat en les autopistes americanes. Font: Federal Highway Administration

Road Weather Conditions	Weather-Related Crash Statistics		
	#REF	10-year Percentages	
Wet Pavement	907,831 crashes	16% of vehicle crashes	73% of weather-related crashes
	352,221 persons injured	15% of crash injuries	80% of weather-related injuries
	4,488 persons killed	13% of crash fatalities	77% of weather-related fatalities
Rain	573,784 crashes	10% of vehicle crashes	46% of weather-related crashes
	228,196 persons injured	10% of crash injuries	52% of weather-related injuries
	2,732 persons killed	8% of crash fatalities	47% of weather-related fatalities
Snow/Sleet	210,341 crashes	4% of vehicle crashes	17% of weather-related crashes
	55,942 persons injured	3% of crash injuries	13% of weather-related injuries
	739 persons killed	2% of crash fatalities	13% of weather-related fatalities
Icy Pavement	151,944 crashes	3% of vehicle crashes	13% of weather-related crashes
	38,770 persons injured	2% of crash injuries	9% of weather-related injuries
	559 persons killed	2% of crash fatalities	10% of weather-related fatalities
Snow/Slushy Pavement	174,446 crashes	4% of vehicle crashes	14% of weather-related crashes
	41,597 persons injured	2% of crash injuries	10% of weather-related injuries
	538 persons killed	2% of crash fatalities	10% of weather-related fatalities
Fog	28,533 crashes	1% of vehicle crashes	3% of weather-related crashes
	10,448 persons injured	1% of crash injuries	3% of weather-related injuries
	495 persons killed	2% of crash fatalities	9% of weather-related fatalities
Weather-Related *	1,258,978 crashes	22% of vehicle crashes	
	445,303 persons injured	19% of crash injuries	
	5,897 persons killed	16% of crash fatalities	

1.1.2 Capacitat i velocitat en flux lliure

Deixant a un costat la seguretat, les condicions meteorològiques adverses tenen un efecte nociu en la mobilitat, provocant reduccions en la capacitat i velocitat de circulació en les carreteres. Aquesta reducció és responsable, si no es prenen les mesures adequades, de nombroses retencions que tenen una implicació socioeconòmica important.

El terme velocitat en flux lliure (free-flow speed en anglès) és una propietat de la via que descriu la velocitat de circulació d'un vehicle per la via quan la densitat i flux de circulació són igual a 0. Les seves unitats són les de la velocitat: Km/h.

La capacitat d'una via és la propietat de la mateixa definida com el flux màxim de circulació que pot suportar. Dit d'una altra manera, és el màxim nombre de vehicles que poden passar per un punt o secció uniforme d'un carril o carretera durant un interval de temps. Les seves unitats són vehicles/hora.

En la publicació "Effect of weather and road surface conditions on traffic speed of rural highways" (Cao et al. 2012) es fa un recull de la literatura existent on queda palès el descens en la velocitat i la capacitat de la via durant episodis de neu i gel. Aquest descens en la velocitat es situa entre un 10% i un 40% en funció de la intensitat de la precipitació, mentre que el vent només produeix un efecte negatiu si supera velocitats de 30-40 Km/h. En la publicació es conclou que els factors que més influeixen en la velocitat són la precipitació i les condicions del paviment si són comparats amb la temperatura o la velocitat del vent.

Maze et al. (2005) realitzen un estudi de l'impacte de la meteorologia en velocitat i capacitat de les carreteres però també en la demanda de trànsit. S'entén com a demanda de trànsit el nombre de

desplaçaments motoritzats realitzats en un període de temps. Una reducció del 7% fins al 56% en el nombre de viatges realitzats pot donar-se durant un episodi de neu. Aquesta reducció és proporcional al volum de neu, així com el dia de la setmana (laborable o festiu) i la hora del dia (hora punta o vall).

Pel que fa a la reducció en la velocitat i capacitat de les carreteres, en un episodi de neu server la capacitat pot caure fins a un 30% i la velocitat fins a 50 Km/h.

En la Taula 1.2 apareixen els diferents factors reductors de la capacitat de la via i en quina mesura l'afecten.

Taula 1.2. Reducció de velocitat lliure i capacitat en les autopistes americanes. Font: Highway Capacity Manual 2000

Weather Variable	Intensity	Capacity (Veh per hour)	Percent Reduction Compared to Clear	
			Speed (MPH)	Percent Reduction Compared to Clear
Rain	0	2318		66.2
	0-0.01 inch/hour	2272	2%	64.9
	0.01-0.25 inch/hour	2152	7%	63.6
	>0.25 inch/hour	1992	14%	62.2
Snow	0	2318		66.2
	<= 0.05 inch/hour	2220	4%	63.4
	0.06-0.1inch/hour	2117	9%	60.7
	0.11-0.5 inch/hour	2064	11%	59.9
	>0.5 inch/hour	1801	22%	57.2
Temperature	>10° Celsius	2293		67.7
	10° -1° Celsius	2269	1%	66.8
	0° - (-20)° Celsius	2259	1%	66.8
	<-20° Celsius	2099	8%	66.3
Wind Speed	<16 km/hr	2334		67.9
	16-32km/hr	2309	1%	67.6
	>32 km/hr	2300	1%	67.2
Visibility (fog)	>1 mile	2342		69.8
	1-0.51 mile	2115	10%	65.1
	0.5-0.25 mile	2069	12%	64.8
	< 0.25 mile	2096	11%	61.6

Donat que els recursos dels quals disposen les diferents administracions són limitats i els costos de mantenir les vies en bones condicions (sal i llevaneus, principalment) són elevats, la necessitat d'una eina capaç de preveure les incidències (tant en intensitat com en localització) és inqüestionable.

1.2 Objectius i organització del treball

Actualment no existeix cap eina especialitzada en la previsió de les afectacions en les vies per causes meteorològiques. L'objectiu del treball, per tant, és desenvolupar, aplicar i validar un model capaç de predir de forma precisa en el temps i l'espai les afectacions en les vies per motius meteorològics, en especial la neu.

El treball es segueix la estructura següent:

- Al capítol 2 es fa una descripció de les diferents components del model, primer des d'un punt de vista conceptual, on s'assenten les bases teòriques, i més endavant des d'un punt de vista més pràctic de cara a la seva implementació i modes de funcionament.

- Al capítol 3 es presenten els episodis estudiats i es mostren els resultats obtinguts, així com la seva validació en base a les incidències reportades en les vies catalanes.
- Finalment, al capítol 4 es recullen les conclusions del treball realitzat, les limitacions del model i les futures línies de treball.

Capítol 2

Metodologia

Tal i com s'ha exposat anteriorment, l'impacte dels diferents elements meteorològics tant en la seguretat com en la capacitat de la via justifica els esforços realitzats en pro d'una millor previsió de les condicions de les carreteres. Doncs, no és d'estranyar que en països on la neu és freqüent s'hi trobin models de previsió de les condicions de les carreteres. El model METRo a Canadà (Crevier and Delage 2001), RoadSurf a Finlàndia (Kangas et al. 2015), o l'HS4Cast a Àustria (Hertl and Schaffar 1998) són alguns exemples.

Existeixen diferents enfocaments a l'hora d'encarar aquest problema. Si bé un d'ells és l'exposat pels austríacs on es demostra que una aproximació estadística pot produir resultats satisfactoris, el model aplicat en aquest treball es basa en l'equació de la transmissió unidimensional (en profunditat) de la calor en el sòl i el balanç d'energia en el contacte carretera – atmosfera, mètode escollit per l'Institut Meteorològic Finlandès (FMI) i el Centre Meteorològic Canadenc (CMC).

En aquest capítol es fa una explicació de les equacions físiques que governen el model així com les simplificacions considerades. A continuació es detalla el funcionament del model, així com el mètode emprat per a la resolució de les equacions plantejades. Per acabar, es du a terme una descripció dels diferents modes de funcionament del model així com les variables d'entrada, el tractament aplicat sobre les mateixes i les fonts d'on provenen, així com els resultats produïts pel model.

En la figura 2.1 apareix un esquema del funcionament del model on s'indiquen els tres mòduls que componen el model: el balanç energètic atmosfera – carretera, que depèn de variables atmosfèriques tals com la temperatura ambient, la radiació solar, humitat relativa, velocitat del vent i pressió atmosfèrica; el flux de calor en el sòl, que depèn de la conductivitat, densitat i calor específic del sòl; i l'acumulació d'aigua en superfície, que depèn de la precipitació i evaporació de l'aigua en superfície.

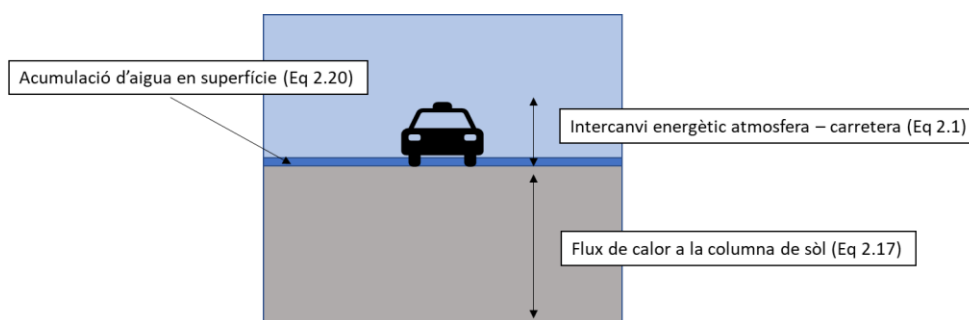


Fig. 2.1. Esquema del model

2.1 Descripció del model físic

El model, que fa servir l'equació de transmissió de calor unidimensional en una columna de sòl, es compon d'un segon mòdul on es calcula on el balanç d'energia en la superfície de l'asfalt (atmosfera-superfície), que és la condició de contorn superior de l'equació de transmissió de calor en el sòl. A més a més, inclou un segon mòdul encarregat del càlcul de l'aigua acumulada a la carretera.

2.1.1 Balanç d'energia en la superfície de la carretera

Gran part de la previsió de les condicions de la carretera recau sobre la correcta avaluació dels fluxos d'energia en la superfície de la via, regits per la següent expressió:

$$q_0 = q_{SW} + q_{LW} + q_H + q_{LE} + q_{CF} + q_{tr} \quad (2.1)$$

On:

- q_0 : flux de calor entrant/sortint de la superfície de la carretera. Si és positiu indica que la carretera rep energia de l'atmosfera, en cas contrari, la carretera en cedeix.
- q_{SW} : flux d'energia provinent de la radiació solar
- q_{LW} : flux d'energia provinent de la radiació d'ona curta
- q_H : flux turbulent de calor sensible
- q_{LE} : flux de calor latent
- q_{CF} : flux d'energia provinent del canvi de fase de l'aigua acumulada a la carretera.
- q_{tr} : flux de calor antropogènic, és a dir, el produït pels humans conseqüència del pas dels vehicles per la calçada

En la construcció d'aquest model s'ha introduït un darrer terme en el càlcul del balanç d'energia (q_{prep}). Aquest representa: impacte de la precipitació en el balanç d'energia a la superfície de la carretera. Per tant, es port reescriure l'equació 2.1:

$$q_0 = q_{SW} + q_{LW} + q_H + q_{LE} + q_{CF} + q_{tr} + q_{prep} \quad (2.2)$$

A continuació es detalla el càlcul de les diferents variables que intervenen en el càlcul del balanç d'energia entre atmosfera – carretera:

- q_{SW} : flux degut a la radiació solar d'ona curta absorbida per la carretera. Aquest depèn de la radiació solar incident (S) i de l'albedo (α) de la superfície on incideix:

$$q_{sw} = (1 - \alpha)S \quad (2.3)$$

L'albedo és un paràmetre entre zero i la unitat que mesura la capacitat d'un material a reflectir la llum solar (valor de 1 indica reflexió total). En el model aquest valor variarà linealment entre 0,1 i 0,6 en funció de la coberta superficial d'aigua en estat sòlid, assolint el valor màxim quan aquesta és de 3 mm d'equivalent en aigua líquida (Eq. 2.4). El concepte d'equivalent en aigua

líquida representa l'aigua continguda en un una espessor determinada de neu. Aquest valor depèn de la densitat de la neu, sent major si la densitat de la neu és alta; tot i això es pren de forma recurrent la equivalència de 1 mm d'aigua a 1 cm de neu fresca.

$$\alpha = 0,1 + 0,5 \left(\frac{W_s}{3} \right); \alpha \leq 3 \quad (2.4)$$

On W_s és l'acumulació de neu en superfície de la carretera.

- q_{LW} : flux degut a radiació d'ona llarga (infrarojos):

$$q_{LW} = \varepsilon_s (I - \sigma T_s^4) \quad (2.5)$$

On ε_s és l'emissivitat del sòl. L'emissivitat mesura la capacitat d'irradiar energia respecte a un cos negre. En aquest cas, es considera $\varepsilon_s = 0,935$. σ és la constant de Stefan-Boltzmann ($\sigma \approx 5.670367 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$). T_s és la temperatura superficial de la carretera en graus Kelvin. I és la radiació d'ona llarga entrant calculada segons Konzelmann (Finkenstein and Häupl 2008)

$$I = [\varepsilon_a(1 - CN^4) + 0,952 CN^4] \sigma T_a^4 \quad (2.6)$$

On T_a és la temperatura de l'aire (en graus Kelvin) i CN la cobertura nuvolosa (valor comprès entre 0 i 1). ε_a representa l'emissivitat de l'aire en condicions de cel no ennuolat obtinguda seguint l'expressió atribuïda a Brutsaert (Finkenstein and Häupl 2008):

$$\varepsilon_a = 1,24 \left(\frac{p_0}{T_0} \right)^{1/7} \quad (2.7)$$

On p_0 és la pressió de vapor d'aigua en hPa.

Si bé altres expressions poden ser emprades en la definició de ε i de I , (Finkenstein and Häupl 2008) van obtenir els millors resultats amb aquesta configuració.

- q_H : flux turbulent de calor sensible:

$$q_H = \rho_a c_p C_H V_a (T_z - T_s) \quad (2.8)$$

On:

- c_p : Calor específica de l'aire ($c_p = 1005,46 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).
- C_H : Coeficient d'arrossegament. No és constant i depèn de l'estabilitat atmosfèrica.
- ρ_a : densitat de l'aire, que és funció de la humitat present,

$$\rho_a = \rho_{a,dry} \frac{1 + H_{Ratio}}{1 + 1.609 H_{Ratio}} \quad (2.9)$$

On $\rho_{a,dry}$ és la densitat de l'aire sec i H_{Ratio} la ràtio entre la massa d'aigua present en l'aire i la massa de l'aire sec, que s'obté de l'expressió:

$$H_{Ratio} = \frac{0.622e}{p - e} \quad (2.10)$$

On p representa la pressió atmosfèrica i e la pressió d'aigua vapor calculada segons:

$$e = \frac{p_{ws} \emptyset}{100} \quad (2.11)$$

Essent p_{ws} la pressió de vapor de saturació i \emptyset la humitat relativa, que depèn de la temperatura ambient (T_a):

$$p_{ws} = e^{77,345 + 0,0057 T_a - \frac{7235}{T_a}} / T_a^{8,2} \quad (2.12)$$

Com van recollir (Meruane and Garreaud 2005), el càlcul dels fluxos q_H i q_{LE} és complex donat la dificultat en la determinació de C_H . És per això que en aquest treball el càlcul de q_H s'ha fet seguint la simplificació proposada per (Hertl and Schaffar 1998)

$$q_H = \alpha_H (T_a - T_s) \quad (2.13)$$

On

$$\begin{aligned} \alpha_H &= 7,84 \gamma V_a^{0,78}, & \text{si } V_a > 5 \text{ m/s} \\ \alpha_H &= \gamma (6,5 + 4,2 V_a), & \text{si } V_a \leq 5 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (2.14)$$

On V_a és la velocitat del vent i γ un paràmetre d'ajust del flux de calor sensible, que és menor quan la temperatura ambient és superior a la de la superfície de la carretera:

Taula 2.1. Valor de γ en funció de la velocitat del vent i temperatura de l'aire

	$V_a > 5 \text{ m/s}$	$V_a < 5 \text{ m/s}$
$T_a > T_s$	$\gamma = 0,5$	$\gamma = 0,35$
$T_a < T_s$	$\gamma = 1$	$\gamma = 1$

- q_{LE} : flux de calor latent. Representa el flux d'energia transferida de l'atmosfera a la carretera (i viceversa) degut a l'evaporació/condensació de l'aigua en la superfície de la via. Si l'aigua acumulada es troba en estat sòlid, es parla de sublimació enlloc d'evaporació:

$$q_{LE} = \rho_a L_{vs} C_{LE} V_a (q_a - q_s) \quad (2.15)$$

On L_{vs} és calor latent d'evaporació/sublimació de l'aigua, C_{LE} és un coeficient equiparable a C_H en la definició de q_H ; q_a i q_s són la humitat específica de l'aire a la temperatura ambient i a la temperatura de la superfície de la carretera, respectivament.

Anàlogament al cas anterior (C_H en l'equació 2.8), les dificultats per determinar correctament C_{LE} provoquen que es recorri novament a la simplificació proposada per (Hertl and Schaffar 1998):

$$q_H = L_{vs} \xi (q_s - q_a) \quad (2.16)$$

On ξ és un paràmetre encarregat de modelar el flux de calor latent (semblant a α_H en el flux de calor sensible, eq 2.11):

$$\xi = 25 + 19V_a \quad (2.17)$$

- q_{CF} : flux d'energia degut al canvi de fase de l'aigua acumulada en la superfície de la carretera. El signe d'aquest terme pot ser positiu o negatiu en funció de si ens trobem davant de fusió de neu/gel o de congelació de l'aigua líquida existent. Si l'aigua s'està fonent, el signe de q_{CF} serà negatiu, mentre que si es congela l'aigua líquida, q_{CF} serà positiu:

$$q_{CF} = \pm L_f \times W_{i,j} \quad (2.18)$$

On $W_{i,j}$ és la quantitat d'aigua que canvia de fase i L_f la calor latent de fusió.

- q_{tr} : flux de calor provinent de l'acció humana, ja sigui per la fricció produïda pels pneumàtics dels vehicles al circular com de la calor provinent dels motors. La literatura existent proposa diferents alternatives per tractar aquest flux. En Roadsurf (Kangas et al. 2015) no inclouen explícitament aquest terme a l'equació del balanç d'energia en superfície. En canvi, defineixen un valor mínim en la velocitat del vent, que com s'ha vist anteriorment, afecta tant el càlcul del flux de calor sensible com de calor latent. En canvi, en METRo (Crevier and Delage 2001) s'introdueix un terme en el càlcul del balanç superficial d'energia que es corregeix 1 Wm^{-2} per cada grau de diferència en la temperatura mitjana de la nit anterior, essent 15 Wm^{-2} el valor inicial del terme. A part, (Crevier and Delage 2001) també mostren resultats on s'introdueix una velocitat mínima del vent durant el dia (durant la nit no hi ha prou trànsit per ser tingut en compte), obtenint resultats on el biaix i l'error quadràtic mitjà de la temperatura superficial durant el dia es veien reduïts, posant de relleu que una correcta previsió del trànsit pot tenir un efecte significatiu en la qualitat de la previsió.
- q_{prep} : impacte de la precipitació en el balanç d'energia a la superfície de la carretera. Si bé el model només preveu la presència d'aigua líquida i sòlida simultàniament mentre es produeix el canvi de fase a 0°C , el model sí que contempla la precipitació en estat sòlid per temperatures superiors als 0°C . Per temperatures inferiors a 0°C es classifica la precipitació com a estat sòlid.

(Matsuo and Sasyo 1981) van relacionar la humitat relativa i la temperatura ambient amb la fase de la precipitació. Si la humitat relativa és menor que una humitat límit, la precipitació serà en forma de neu:

$$HR = 9.5(10.5 - T_a) \exp\left(\frac{-17.27T_a}{T_a + 238.3}\right) \quad (2.19)$$

On T_a és la temperatura ambient en graus Celsius.

Si representem l'equació anterior, veurem que descriu una corba per sota la qual la precipitació serà en forma de neu. Tot i això, podem trobar precipitació sòlida fins aproximadament dos graus per sobre aquest límit. Entre aquest i un grau més, majoritàriament es dona neu, i entre un i dos graus més, pluja. Donat això, en el nostre model considerarem

precipitació en forma sòlida com aquella que es produeix 1 grau per sobre de la corba de l'equació 2.19.

D'altra banda, s'ha considerat la hipòtesi de que l'aigua provinent de les precipitacions es troba a la temperatura de l'aire, però que un cop entra en contacte amb la superfície de la carretera la seva temperatura es modifica fins a assolir la mateixa que la superfície.

Si es dona el cas en que la temperatura de la superfície es troba per sobre dels 0°C però la precipitació és classificada com a neu, o que la temperatura superficial sigui inferior a 0°C i la precipitació en forma líquida, a part del canvi de temperatura, també es durà a terme el canvi de fase pertinent.

Aquesta adaptació de fase i temperatura de la precipitació a la de la carretera s'expressa en el model com un nou terme en l'equació del balanç d'energia:

Taula 2.2. Càlcul q_{prep}

Estat precipitació	Temperatura Superfície	q_{prep}	
Líquid	>0°C	$q_{prep} = P \times C_l \times (T_a - T_s)$	(2.20)
Líquid	<0°C	$q_{prep} = P \times (C_l \times T_a - C_s \times T_s + L_f)$	
Sòlid	>0°C	$q_{prep} = P \times (C_s \times T_a - C_l \times T_s - L_f)$	
Sòlid	<0°C	$q_{prep} = P \times C_s \times (T_a - T_s)$	

On,

- P: Precipitació (mm)
- C_l : Calor específic de l'aigua en estat líquid. $C_l = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- C_s : Calor específic de l'aigua en estat sòlid. $C_s = 2,05 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- L_f : Calor latent de fusió de l'aigua. $L_f = 334 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$
- T_a : Temperatura de l'aire.
- T_s : Temperatura de la superfície de la carretera.

A la taula 2.3 es mostra un resum dels diferents paràmetres que intervenen en el càlcul del balanç d'energia així com els seus valors i unitats.

Taula 2.3. Resum de constants i paràmetres del càlcul del balanç d'energia atmosfera – carretera.

	Valor	Unitats
Emissivitat	$\epsilon_s = 0,935$	-
Stefan-Boltzmann	$\sigma \approx 5.670367 \times 10^{-8}$	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
Albedo	$\alpha = [0, 0.6]$	-
Calor latent de fusió	$L_f = 334 \times 10^3$	$\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Calor latent d'evaporació	$L_v = 2257 \times 10^3$	$\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Calor latent de sublimació	$L_s = 2591 \times 10^3$	$\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Calor específic de l'aire	$c_p = 1005,46$	$\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

2.1.2 Transferència de Calor en el Sòl

L'expressió de la conducció de calor en una columna vertical del sòl és la coneguda com a equació de la difusió. Es tracta d'una equació diferencial en derivades parcials parabòlica, i relaciona la variació de la temperatura (T) respecte el temps amb la variació de la temperatura respecte la profunditat (z):

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \kappa_g \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} \quad (2.21)$$

On κ_g és la difusivitat tèrmica definida com:

$$\kappa_g = \frac{k_g}{\rho_g c_g} \quad (2.22)$$

On k_g , c_g i ρ_g són la conductivitat tèrmica, capacitat calorífica i densitat del sòl, respectivament. Aquestes propietats són particulars per a cada material. En el cas presentat es diferenciarà entre dos tipus: sòl granular i asfalt, les propietats dels quals es presenten a la taula 2.4:

Taula 2.4. Propietats mecàniques de l'asfalt i sòl granular

	Conductivitat k_g ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-1}$)	Calor específic c_g ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Densitat ρ_g (Kg m^{-3})
Asfalt	0,75	920	$2,11 \times 10^3$
Sòl Granular	1,4	1000	$1,6 \times 10^3$

Diferències finites

Per a resoldre l'equació 2.21 s'utilitzaran les diferències finites. Per tal de poder aplicar-les, el primer pas és dividir el sòl en diferents capes. Quan més fines siguin les capes, s'obtindrà major precisió en els càlculs. Per aquesta raó, en aquest model s'ha definit un espessor variable de les capes: quant a més profunditat es trobi la capa, major serà el seu gruix. Aquesta estratègia permet obtenir resultats precisos en les capes superficial al mateix temps que redueix el cost computacional dels càlculs.

Les diferències finites s'utilitzen per tal d'aproximar el valor de la derivada d'una funció en un punt. Com la representació gràfica de la derivada d'una funció és la tangent a una corba, les diferències finites intenten aproximar el pendent de la recta tangent següent:

$$\frac{\partial T_i}{\partial z} = \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2h} \quad (2.23)$$

On T_i representa la temperatura en els nodes; h la distància entre els nodes. Aquesta expressió és vàlida sempre que els nodes es trobin a una distància constant h , però si la distància entre els diferents nodes no és uniforme, l'expressió és la següent:

$$\frac{\partial T_i}{\partial z} = \frac{1}{2} \left(\frac{T_{i+1} - T_i}{h_i} - \frac{T_i - T_{i-1}}{h_{i+1}} \right) \quad (2.24)$$

On h_i i h_{i+1} representen la distància entre el node d'estudi i els seus adjacents.

Les diferències finites de primer ordre serveixen per resoldre equacions diferencials de primer ordre, però per resoldre equacions diferencials de segon ordre s'utilitzen les diferències finites de segon ordre:

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} = \frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{h^2} \quad (2.25)$$

Anàlogament a l'equació 2.23, l'equació 2.25 és certa quan la distancia h és constant. En cas de no ser-ho, l'expressió pren la següent forma:

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} = \left[\frac{\left(\frac{T_{i-1} - T_i}{h_i} \right) - \left(\frac{T_i - T_{i+1}}{h_{i+1}} \right)}{\left(\frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right)} \right] \quad (2.26)$$

Cal entendre la resta dels termes del numerador en l'equació 2.26 com la diferencia dels fluxos entrant i sortint de la capa d'estudi i .

En el treball presentat s'han emprat les diferències centrades de segon ordre (equació 2.26), amb les quals s'ha plantejat un sistema d'equacions amb tantes incògnites com capes del subsol s'hagin fet. Abans de plantejar-lo, però, s'han de definir les condicions de contorn sota les quals està sotmès el model.

- Condicció de contorn inferior: A mesura que ens allunyem de la superfície del sòl, les variacions de temperatura al llarg del dia (i entre les diferents estacions de l'any) són cada cop menors fins a establir-se en una temperatura que, si no és constant, pateix variacions molt petites. Per tant, com a condició de contorn inferior s'imposa arbitràriament una temperatura constant de 7°C en la capa més profunda del sòl. Si dividim el sòl en un nombre "n" de capes que es troben a un profunditat z_0, z_1, \dots, z_n respectivament, podem expressar la condició de contorn inferior com:

$$T(z_n) = 7^\circ\text{C} \quad (2.27)$$

- **Condicció de contorn superior:** el flux de calor entre la carretera i l'atmosfera és el terme q_0 . Per tant l'equació 2.23 en la capa més superficial de la carretera ($i=0$) seria la següent:

$$\frac{d^2 T_0}{dz^2} = \left[\frac{q_0 - \left(\frac{T_0 - T_1}{h_1} \right)}{\left(\frac{h_0 + h_1}{2} \right)} \right] \quad (2.28)$$

On h_0 és la distància entre el centre de la capa superficial i l'atmosfera.

En la figura 2.2 es representa un esquema de com es discretitza l'espai (el sòl) i la dimensió del temps per tal d'aplicar el mètode de les diferències finites.

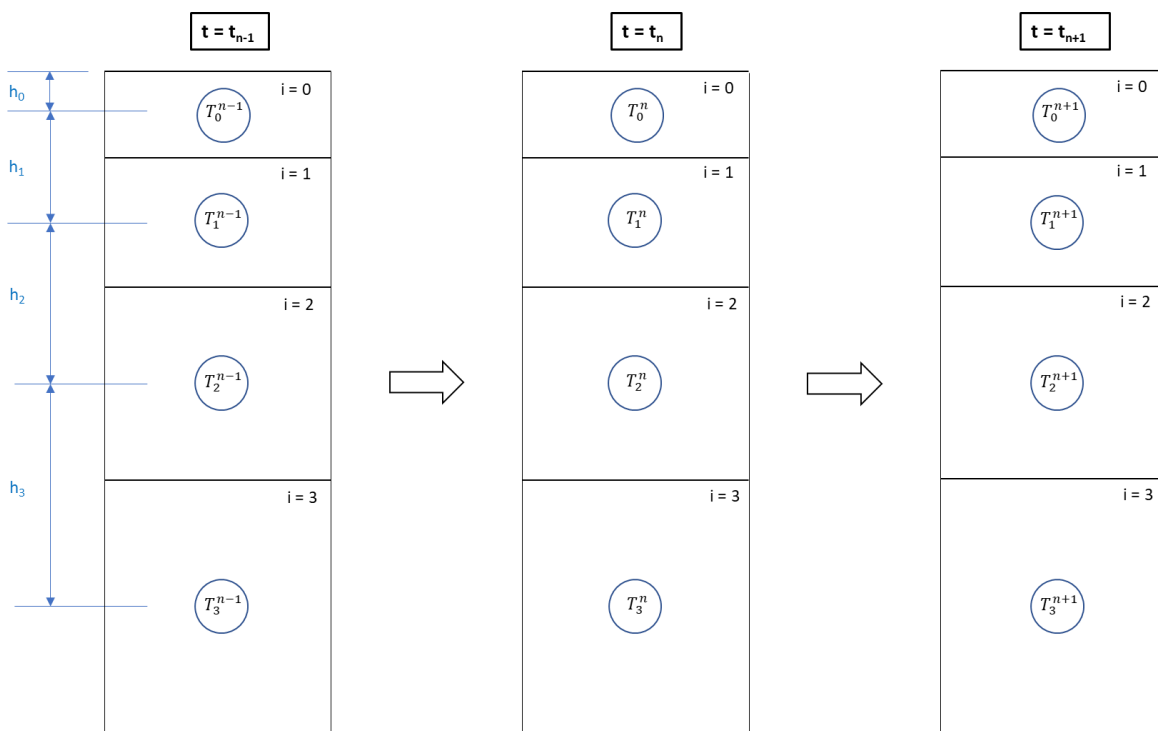


Fig. 2.2. Esquema diferències finites

Com posen de relleu en Bonals Muntada (2005), disposem de diversos mètodes per a la resolució de l'equació de la transmissió de la calor que regeix el model (Eq. 2.21):

- **Mètode explícit:** Es calcula la temperatura en els nodes en funció de les temperatures conegudes, corresponents a les temperatures del pas de temps anterior ja calculades:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = K_i \left[\frac{\left(\frac{T_{i-1}^n - T_i^n}{h_i} \right) - \left(\frac{T_i^n - T_{i+1}^n}{h_{i+1}} \right)}{\left(\frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right)} \right] \quad (2.29)$$

On el superíndex fa referència a l'interval de temps, el subíndex es refereix al node estudiat; K és la difusivitat i h és la distància entre els diferents nodes, que com s'ha mencionat anteriorment, varien en funció de la profunditat de la capa.

De l'equació 2.29 podem aïllar fàcilment la temperatura d'interès T_i^{n+1} :

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \Delta t K_i \left[\frac{\left(\frac{T_{i-1}^n - T_i^n}{h_i} \right) - \left(\frac{T_i^n - T_{i+1}^n}{h_{i+1}} \right)}{\left(\frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right)} \right] \quad (2.30)$$

Deixant a banda els avantatges d'aquest mètode com ara la relativa simplicitat dels càlculs i el seu baix cost computacional, aquest mètode no garanteix l'estabilitat per a qualsevol valor de Δt (Recktenwald 2004):

$$\Delta t < \frac{1}{2} \frac{\Delta z^2}{K} \quad (2.31)$$

On Δz representa l'espessor de la capa i K la difusivitat, que també variarà en funció de si és considerada com asfalt o sòl granular. Per tant, per a garantir l'estabilitat serà necessari que el valor de Δt sigui menor al valor obtingut per la capa més desfavorida, que en aquest cas és la més superficial:

$$\Delta t < 315 \text{ s} \quad (2.32)$$

- Mètode implícit: el càlcul de la temperatura en els nodes és funció de les temperatures desconegudes dels diferents nodes al final del pas de temps:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = K_i \left[\frac{\left(\frac{T_{i-1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{h_i} \right) - \left(\frac{T_i^{n+1} - T_{i+1}^{n+1}}{h_{i+1}} \right)}{\left(\frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right)} \right] \quad (2.33)$$

Tot i que existeixen diferents vies per a resoldre aquest tipus de problemes, mètodes iteratius com ara Gauss-Seidel ens permeten resoldre d'una manera simple el sistema d'equacions un cop aquest s'ha escrit en forma matricial:

$$\begin{pmatrix}
 \frac{-1}{h_0+h_1} & \frac{1}{h_0+h_1} & 0 & 0 \\
 \frac{1}{h_1+h_2} & \frac{-1}{h_1+h_2} - \frac{1}{h_1+h_2} & \frac{1}{h_1+h_2} & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & \frac{1}{h_{n-2}+h_{n-1}} & \frac{-1}{h_{n-2}+h_{n-1}} - \frac{1}{h_{n-2}+h_{n-1}} & \frac{1}{h_{n-2}+h_{n-1}} \\
 0 & 0 & 0 & 1
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 T_0^{n+1} \\
 T_1^{n+1} \\
 T_2^{n+1} \\
 \dots \\
 T_{n-3}^{n+1} \\
 T_{n-2}^{n+1} \\
 T_{n-1}^{n+1}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 T_0^n \\
 T_1^n \\
 T_2^n \\
 \dots \\
 T_{n-3}^n \\
 T_{n-2}^n \\
 T_{n-1}^n
 \end{pmatrix}
 \tag{2.34}$$

A diferència del mètode explícit, en l'implícit no hi ha un valor màxim de Δt que garanteixi l'estabilitat del resultats, però quan més petit sigui aquest, l'aparició de errors serà menor.

En la figura 2.3 es comparen els resultats obtinguts entre els dos modes de funcionament, en els no s'identifiquen grans diferència en la temperatura superficial de la carretera. En vista de que no existeix una diferència apreciable en la qualitat de resultats i l'elevat cost computacional del mètode implícit, els resultats presentats en aquest treball seran obtinguts aplicant el mètode explícit amb un pas de temps de 120 segons, menor al límit de 319 segons obtingut segons l'equació 2.26..

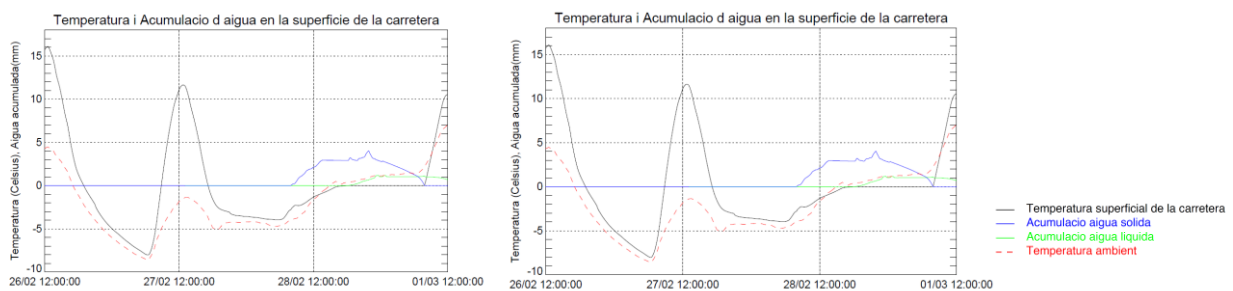


Fig. 2.3. Comparació dels mètodes de resolució de les diferències finites. Esquerra: implícit, Dreta: explícit

2.1.3 Acumulació superficial d'aigua

En el model, un sistema de dos dipòsits és utilitzat per explicar l'acumulació d'aigua a la superfície de la via: un per aigua líquida i l'altre per aigua en fase sòlida. Aquests dos dipòsits estan connectats exclusivament quan la temperatura superficial és igual a 0°C i es du a terme el canvi de fase de l'aigua acumulada en la calçada. La variació en l'acumulació d'aigua per cada un dels dipòsits respon a la següent expressió:

$$\frac{dW_i}{dt} = P_i \pm E_i \pm CF_i - r_i \quad (2.35)$$

On:

- W_i : acumulació d'aigua en l'estat i (sòlid o líquid)
- P_i : precipitació (sòlida o líquida) acumulada en el pas de temps del model.
- E_i : Evaporació/Sublimació de l'aigua (en funció del seu estat) acumulada en superfície. Aquest terme també pot ésser positiu, ja que el model permet que es produeixi la condensació de l'aigua present en l'atmosfera.
- CF_i : aigua provinent del canvi de fase. Aquest terme només adquireix valor quan la temperatura superficial de la carretera és de 0°C i pot ser positiu o negatiu. Per exemple, si estem analitzant l'aigua en estat líquid i l'aigua acumulada s'està gelant, aquest terme serà negatiu, en canvi si l'aigua en estat sòlid s'està fonent, el terme serà positiu.
- r_i : drenatge de l'aigua en estat líquid o sòlid. Aquest terme s'expressa com una relació lineal de la quantitat d'aigua acumulada en la superfície. Representa l'aigua que, degut als pendents transversals presents en les carreteres, s'escola cap als laterals de la via. En el cas de l'aigua en estat sòlid s'entén aquest terme com a la neu que, és evacuada de la carretera com a conseqüència del pas dels vehicles i llevaneus.

$$\begin{aligned} r &= c(W_i - W_c), \quad \text{si } W_i > W_c \\ r &= 0, \quad \text{si } W_i \leq W_c \end{aligned} \quad (2.36)$$

On

- W_c : llindar que un cop superat, activa el terme de drenatge. En el cas d'aigua en estat sòlid, representa la capa de neu que es manté en la carretera després del pas dels vehicles. En el cas de l'aigua en estat líquid, aquest llindar s'interpreta com un mínim d'aigua que mulla la superfície, però que no s'escola cap als laterals de la via.

Taula 2.5. Llindar de drenatge per aigua sòlida i líquida

	W_c
Aigua líquida	1 mm
Aigua en estat sòlid	3 mm

- C : paràmetre empíric proposat per METRo (Crevier and Delage 2001). Es pren $c = 0.003 \text{ s}^{-1}$, és a dir, en un segon un 0,3% de l'aigua acumulada que superi el llindar de 1mm (aigua líquida) o 3mm (aigua en fase sòlida).

Es considera que en un mateix instant podem trobar aigua només en estat líquid o sòlid. Només podem trobar aigua en els dos estats en el mateix pas de temps quan la temperatura superficial de la carretera és de 0°C i s'està duent a terme el canvi de fase de l'aigua acumulada.

2.2 Variables de entrada i modes de funcionament del model

En aquest apartat es presenten les diferents variables d'entrada del model necessàries per a realitzar els càlculs presentats en l'apartat 2.1. Tanmateix s'explica el procés d'aproximació d'aquestes dades als diferents trams de la carretera, i els diferents modes de funcionament del model en funció de la font d'on s'extrauen les dades.

2.2.1 Variables d'entrada

A continuació es fa una recapitulació de les diferents entrades amb les quals es nodreix el model:

- Propietats sòl/asfalt:
 - Conductivitat
 - Densitat
 - Capacitat calorífica
- Temperatura ambient
- Humitat Relativa
- Pressió atmosfèrica
- Vent
- Radiació Solar
- Cobertura nuvolosa
- Intensitat i fase de precipitació

Si bé podem obtenir aquestes dades tant d'estacions meteorològiques (localitzacions puntuals al llarg del territori) com de models numèrics (rasters), el repte consistirà en la correcta assignació de les diferents variables d'entrada en cada punt de la xarxa viària. Aquesta assignació serà objecte d'un processament addicional quan es tracta de la temperatura ambient i la pressió atmosfèrica ja que són variables altament dependents de l'altitud.

A continuació es presenten els diferents modes de funcionament del model, que per la naturalesa de les seves dades requereixen diferents mètodes per a la correcta interpolació de les variables d'entrada en els diferents trams de carretera.

2.2.2 Modes de funcionament

El model, que sempre necessita les mateixes variables d'entrada per a poder ser executat, permet ser executat amb dos tipus de fonts d'entrada, que ens permetrà treballar en dos modes de funcionament: simulació i previsió.

Simulació

El mode simulació, és executat amb dades provinents d'estacions meteorològiques excepte la precipitació, que s'extrau de radars. En el treball presentat, aquestes dades han sigut cedides per el Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), que disposa d'estacions de mesura distribuïdes al llarg de tot el territori català (XMET), i d'una xarxa de radars meteorològics.

Actualment, el SMC compta amb un numero de 189 estacions meteorològiques operatives distribuïdes al llarg del territori (fig. 2.4). Si bé la distribució no és uniforme, es pot considerar que es una zona amb una densitat alta d'estacions.

Donat el caràcter puntual de les dades, hem de realitzar una interpolació espacial per tal d'estimar les variables en els punts de la xarxa viària. En aquestes condicions de densitat d'estacions de mesura, i per la facilitat d'aplicació, es pot considerar que el mètode de l'invers de la distància proporciona bons resultats (Sluiter 2009).

El mètode de l'invers de les distàncies (Eq. 2.37) consisteix en calcular el valor d'una variable en un punt com a mitjana ponderada dels valors puntuals de les diferents estacions en funció de la distància al punt desitjat: quan més a prop es trobi l'estació del punt, més pes tindrà en el càlcul. D'aquesta manera, s'evita que estacions que es troben lluny de la zona d'interès tinguin influència en la determinació dels valors interpolats.

$$u(x) = \frac{\sum_{k=0}^N w_k(x)^p u_k}{\sum_{k=0}^N w_k(x)^p} \quad (2.37)$$

$$w_k(x) = \frac{1}{d(x, x_k)}$$

On:

- $u(x)$: valor de la variable a interpolar en el punt "x"
- u_k : valor de la variable (conegut) en el punt "k"
- w_k : coeficient de ponderació per a cadascun dels valors coneguts en els diferents punts.
- $d(x, x_k)$: distància entre el punt "x" i el punt "k"
- p : potència del mètode. Quant més gran sigui, els punts més pròxims a "x" tindran una major influència en el càlcul de $u(x)$. En aquest treball s'ha aplicat una potencia $p=2$.

En el cas de les precipitacions, al provenir de radar, aquesta interpolació no és necessària donat que les dades ja es troben presentades com un camp de precipitacions en forma de ràster amb resolució de 1 km (fig 2.5).

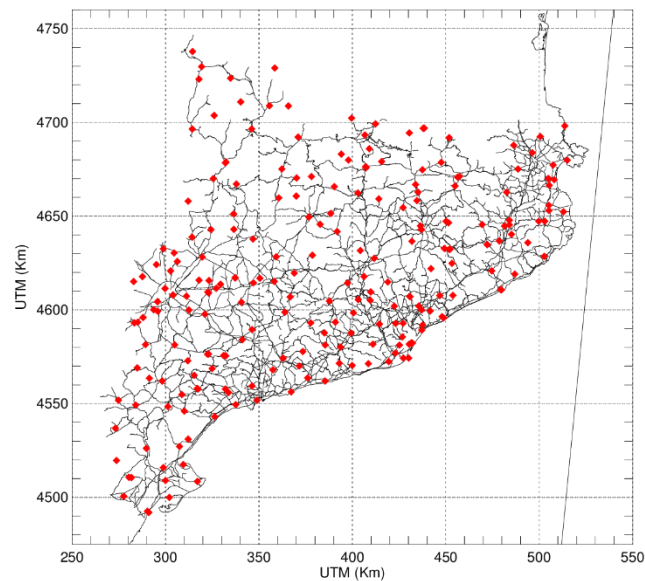


Fig. 2.4. Distribució de les estacions meteorològiques del SMC

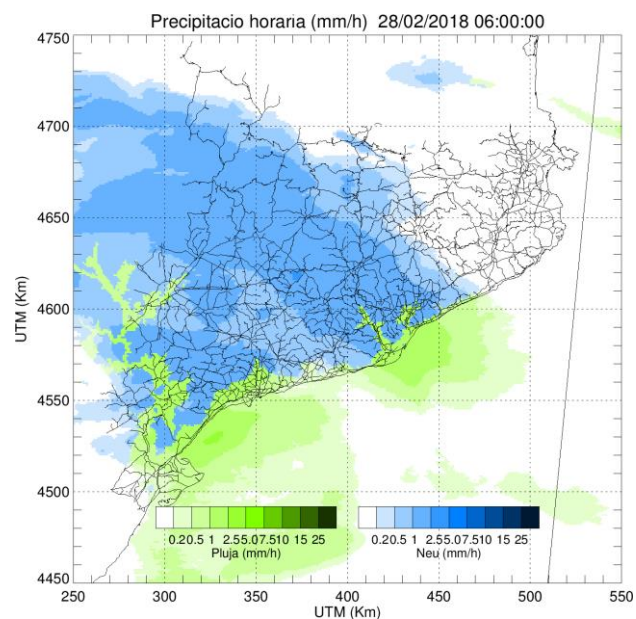


Fig. 2.5. Camp de precipitacions extret de radar. La determinació d'aigua o neu s'ha fet a partir de l'expressió de l'equació 2.17

Previsió

En el mode de previsió, s'ha emprat dades provinents de models numèrics de previsió meteorològica. En aquest estudi s'ha utilitzat el "High Resolution Limited Area Mode" (HIRLAM), que ofereix gratuïtament una previsió de fins a 54 hores en avança quatre cops per dia.

Pel que fa a les precipitacions, si bé en aquest treball s'han utilitzat els valors extrets del model numèric, també podrien ser extretes de previsions a molt curt termini (nowcasting). Aquestes previsions són obtingudes amb l'ajut del radar i tenen una major habilitat que les obtingudes amb els models numèrics. Tot i això perden aquesta capacitat ràpidament. Es pot apreciar aquest

comportament en la Fig. 2.6. En aquest treball la precipitació en mode previsió s'ha obtingut íntegrament del model numèric.

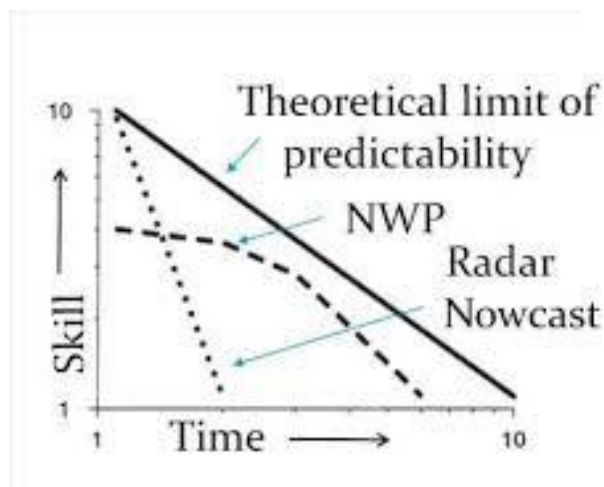


Figura. 2.6. Comparativa entre nowcasting i NWP. Font: (Foresti et al.)

Per al mode previsió, les dades són extretes del model numèric de previsió meteorològica HIRLAM. Una versió gratuïta amb una resolució espacial d'aproximadament 7,5 km x 7,5 km és proporcionada cada 6 hores: a les 00:00, 06:00, 12:00 i 18:00. La resolució temporal d'aquestes previsions és d'una hora.

Com que en aquest cas la informació ja es troba rasteritzada, no es necessari la interpolació de les variables als punts d'interès mitjançant l'invers de les distàncies, sinó que s'agafa el píxel que incorpora el punt d'interès.

En la taula xx es presenta un resum de les diferents variables d'entrada per a cada mode de funcionament, així com la seva resolució espacial i temporal.

Taula 2.6. Divisió del sòl

Mode de funcionament	Tipus de dades	Resolució espacial (km)	Resolució temporal (min)
Simulació	Punts	-	30
Simulació (precipitacions)	Raster	1 x 1	10
Previsió	Raster	7,5 x 7,5	60

2.2.3 Ajust de la temperatura ambient i pressió atmosfèrica en funció de l'altura

Si bé per la majoria de variables no és necessària cap transformació, la temperatura i la pressió atmosfèrica, al ser altament sensibles a l'altitud, sí que necessiten ser corregides. La idea general és que abans de fer-se la interpolació segons l'invers de la distància, es procedeixi a transformar el valor de les variables de les diferents estacions al corresponent al nivell del mar (cota zero). Un cop obtinguts els valors uniformitzats de temperatura i pressió atmosfèrica, es realitza la interpolació sobre la xarxa

viària. Finalment, es transformen de nou els valors obtinguts als corresponents segons l'alçada a la que es trobi la carretera.

Per a poder realitzar aquest darrer pas és necessari la utilització d'un DEM (Model Digital d'Elevació). Un DEM és un arxiu en el que apareix l'altitud del terreny en funció de les seves coordenades. En aquest treball, el DEM utilitzat té una resolució espacial de 200 metres, i les coordenades de cada tram de carretera poden extreure's del graf de carreteres present en les figures 2.3 i 2.4.

A continuació es presenten les transformacions aplicades tant a la temperatura com a la pressió atmosfèrica:

Temperatura

La relació entre la temperatura i l'altitud s'anomena gradient tèrmic. Aquest ens indica la variació de temperatura que experimenten les masses d'aire en moviment vertical, i té un valor aproximat de -6,5 °C per cada 1000 metres d'ascensió (en la troposfera) en condicions normals, però és molt sensible a la humitat ambiental. Tot i això, existeix una expressió que permet calcular de forma força precisa el gradient adiabàtic:

$$\Gamma = g \frac{R_{sd}T^2 + H_v H_{ratio} T}{c_p R_{sd}T^2 + 0.622 H_v^2 H_{ratio}} \quad (2.38)$$

On:

- Γ és el gradient tèrmic (K/Km)
- g és l'acceleració gravitacional ($9,81 \text{ m s}^{-2}$)
- R_{sd} és la constant dels gasos ($287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
- R_{sw} és la constant dels gasos pel vapor d'aigua ($461.5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
- H_v és la calor latent de vaporització de l'aigua (2501 kJ kg^{-1})
- H_{ratio} és el rati entre la massa d'aigua present en l'aire i la massa de l'aire sec (Eq. 2.18)
- c_p és el calor específic de l'aire a pressió constant ($1003,5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
- T és la temperatura ambient en el punt on es calcula el gradient tèrmic (K)

Un cop calculat el gradient tèrmic, per a calcular la temperatura a cota zero (T_0) s'utilitza la equació 2.39

$$T_0 = T + h \Gamma \quad (2.39)$$

On h és l'altitud del punt on s'ha calculat el gradient tèrmic.

Un cop transformada la temperatura a la seva equivalent a cota zero, es procedeix a assignar-li a cada punt de la carretera el valor corresponent, que com s'ha vist anteriorment, en el mode simulació

requerirà d'una interpolació mitjançant l'invers de les distàncies. En el mode simulació també es realitza una interpolació segons l'invers de la distància per a Γ , ja que només tenim un seguit de valors puntuals en les estacions meteorològiques.

Un cop es troba el valor a cota zero en cada punt de la carretera, mitjançant el DEM s'obté l'altura de cada un dels punts de la carretera, amb la qual podem transformar el valor de la temperatura a l'alçada de la carretera (Eq. 2.40)

$$T = T_0 - h \Gamma \quad (2.40)$$

Pressió atmosfèrica

Anàlogament al cas de la temperatura, abans de realitzar la interpolació de les pressions atmosfèriques aquestes es transformaran al seu equivalent a cota zero. L'expressió que permet dur a terme aquesta transformació és coneguda com l'equació baromètrica:

$$P = P_b \left[\frac{T}{T + h\Gamma} \right]^{\frac{gM}{R\Gamma}} \quad (2.41)$$

On:

- P_b és la pressió atmosfèrica a nivell de mar
- P és la pressió atmosfèrica a l'altitud h sobre el nivell del mar.
- T és la temperatura observada
- Γ és el gradient tèrmic
- h és l'alçada sobre el nivell del mar
- g és la acceleració gravitatòria: $9,8 \text{ m s}^{-2}$
- M és la massa molar de l'aire: $0.0289644 \text{ kg mol}^{-1}$
- R és la constant dels gasos ideals: $8.3144598 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

2.3 Variables de Sortida

El model produeix per a cada pas de temps valors de temperatura superficial de la carretera i l'acumulació d'aigua en varis punts per a cada tram de la xarxa viària. Amb l'objectiu de preservar la seguretat, a cada tram de carretera se li associarà la situació del pitjor dels punts de càlcul.

Temperatura i acumulació d'aigua/neu en la superfície de la carretera

Són els valors numèrics obtinguts per a cada pas de temps del model. Si bé la temperatura de la superfície i l'acumulació de neu en la carretera són bons indicadors de l'estat de la via, altres factors

com els vistos en el capítol 1 (velocitat del vent, intensitat de la precipitació, visibilitat, ...) poden tenir un efecte important tant en la capacitat com en la seguretat de la via.

Amb la intenció d'incloure aquests factors en la determinació del nivell de servei de la via, i tenint en compte que l'efectivitat d'una alerta primerenca està altament lligada al seu nivell de simplicitat, s'ha optat per a definir un índex que representi les condicions en les quals es troba la via.

Índex de circulació

Des de l'emissió d'una alerta fins a la reacció de la població aquesta passa per el cicle de resposta (Mel 2017). En un primer moment, aquesta alerta és escoltada. El següent pas és que aquesta sigui compresa. Per tal d'aconseguir-ho, l'alerta ha de ser senzilla, completa i ben localitzada. És molt important que el missatge sigui intel·ligible per a poder creure que el perill és real. Un cop assumida la veracitat de l'alerta, cada persona la interioritzarà per a poder finalment, reaccionar i així minimitzar els possibles riscos. Seguint aquest raonament, s'ha considerat que un índex qualitatiu de les condicions de la carretera és la sortida que millor recull i transmet la informació respecte l'estat de la via i la facilitat per circular-hi.

S'ha definit un índex qualitatiu per representar l'impacte dels diferents fenòmens meteorològics en la qualitat de circulació de la via (l'índex de circulació):

- Correcta: Les condicions meteorològiques i de la calçada no tenen cap efecte sobre la seguretat ni la capacitat ni velocitat de disseny de la via.
- Regular: Les condicions de la via no són òptimes, provocant una lleugera davallada en la capacitat de la via i en la seguretat. Tot i això, no es considera una situació excepcional, encara que sí que es recomani precaució a l'hora de conduir.
- Dolenta: Via en molt males condicions, tant la seguretat com la capacitat de la via es veuen considerablement reduïdes. Es recomana minimitzar desplaçaments motoritzats si no són d'urgència.
- Impracticable: Condicions molt dolentes, fins al punt de possible tancament de la via. La seguretat es veu molt compromesa així com s'aprecia una dràstica reducció de la capacitat i velocitat de la via. Es recomana evitar els desplaçaments motoritzats.

Per tal de representar-ho, s'ha escollit el codi de colors següent:

- Verd: Correcta
- Taronja: Regular
- Vermell: Dolenta
- Negre: Impracticable

En la taula 2.7 es presenten els intervals sota els quals es defineixen les quatre categories presentades:

Taula 2.7. Definició índex de trànsit

Índex de trànsit	Combinacions dels diferents elements del model
Correcte	Estat normal de la carretera
Regular	Temperatura de la superfície $< 1^{\circ}\text{C}$ + Acumulació aigua líquida $> 0,5$ mm Acumulació aigua líquida > 5 mm Intensitat precipitació líquida > 15 mm/h + Vent > 13 m/s Acumulació aigua sòlida $> 0,5$ mm Precipitació en estat sòlid > 0 mm/h + Vent > 13 m/s
Dolent	Acumulació aigua sòlida > 3 mm
Impracticable	Acumulació aigua sòlida > 5 mm

Tot i això, és necessari recordar que la definició de l'índex respon a un desig de simplificació dels resultats. Aquest índex pot ser adaptat segons el cas, per tant el que s'ha presentat no és més que una proposició. Aquesta proposta ha sigut dissenyada capturant els efectes de les inclemències en una societat com la espanyola, poc habituada a la presència de neu i gel a les carreteres si la comparem amb les nòrdiques, on la neu no és més que un altre element de la seva vida quotidiana

Condicions de la carretera

Anàlogament a l'índex de transit aquest també és qualitatiu, i serà definit en funció de les variables de sortida "base" del model. L'objectiu d'aquest índex és el d'oferir una visió ràpida de l'acumulació de l'aigua (i el seu estat) a la calçada.

Sis possibles condicions referents a la presència, estat i acumulació d'aigua en la superfície de la carretera:

- Seca: Estat normal de la carretera
- Humida: Quan trobem una acumulació d'aigua entre 0,5 mm i 1 mm.
- Molla: Acumulació d'aigua superior a 1 mm.
- Aigua/neu: Presència d'aigua en estat sòlid i líquid simultàniament.
- Lleugerament nevat: Presència d'aigua en estat sòlid fins a 3 mm.
- Nevat: Acumulació de més de 3 mm d'aigua en estat sòlid

En la figura 2.7 apareix un exemple de les diferents sortides del model per a un mateix pas de temps (el 28/02/2018 04:00 UTC).

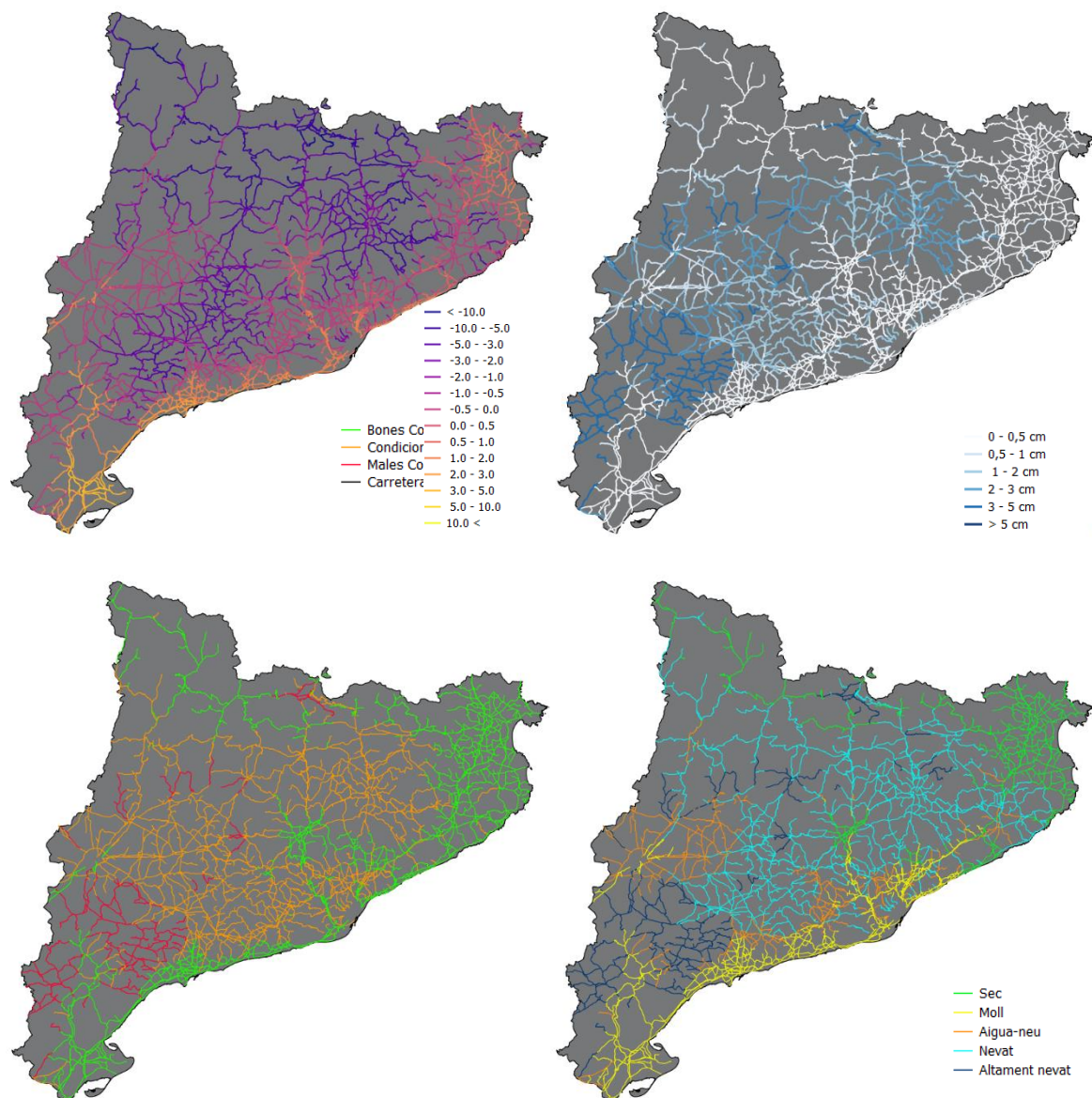


Fig. 2.7. Sortides del model en mode simulació el 28/02/2018 04:00 UTC. Superior Esquerra: Temperatura de la superfície de la carretera (°C); Superior dreta: Acumulació de neu (mm d'equivalent en aigua líquida); Inferior esquerra: índex de circulació; Inferior dreta: condicions de la carretera.

2.4 Implementació del Model

En aquest apartat s'explica el funcionament intern i com s'ha fet l'aplicació del model presentat en l'apartat 2.1. Primer es detalla com es tracta la transmissió de calor en el sòl. Més endavant es defineix el domini de l'estudi i el format amb el que es presenten els resultats, així com el procés d'inicialització del model.

2.4.1 Transmissió de Calor en una columna de sòl

Tal i com s'ha explicat en l'apartat 2.1.2, per a poder utilitzar les diferències finites centrades de segon ordre es divideix el sòl en diferents capes. El gruix i les propietats de les diferents capes del sòl no són les mateixes al llarg de la columna de sòl. Les més superficials les hem considerat com asfalt, mentre que la resta són sòl granular. Pel que fa als gruixos, les capes superficials són més fines que les més profundes. Així es busca reduir el cost de càlcul del model, tot conservant la precisió i sensibilitat en la determinació de la temperatura superficial.

Divisió del sòl

Les seccions en les que s'ha dividit el sòl són de diferents gruixos i propietats. A la taula a 2.8 es poden observar els gruixos de les diferents capes i a quina profunditat es troben, així com el tipus de material.

Taula 2.8. Divisió del sòl en les diferents capes.

Material	Gruix (cm)	Profunditat centroide (cm)	Profunditat M.Superior (cm)	Profunditat M.Inferior (cm)	Difusivitat K (m^2s^{-1})
Asfalt	1	0,5	0,00	1	$2,1 \times 10^6$
Asfalt	2	2	1	3	$2,1 \times 10^6$
Asfalt	3	4,5	3	6	$2,1 \times 10^6$
Asfalt	4	8	6	10	$2,1 \times 10^6$
Asfalt	5	12,5	10	15	$2,1 \times 10^6$
Asfalt	7	18,5	15	22	$2,1 \times 10^6$
Sòl Granular	8	26	22	30	$1,6 \times 10^6$
Sòl Granular	10	35	30	40	$1,6 \times 10^6$
Sòl Granular	15	47,5	40	55	$1,6 \times 10^6$
Sòl Granular	20	64,5	55	75	$1,6 \times 10^6$
Sòl Granular	25	87,5	75	100	$1,6 \times 10^6$
Sòl Granular	30	115	100	130	$1,6 \times 10^6$
Sòl Granular	40	150	130	170	$1,6 \times 10^6$
Sòl Granular	50	195	170	220	$1,6 \times 10^6$
Sòl Granular	60	250	220	280	$1,6 \times 10^6$

2.4.2 Domini de l'estudi

En aquest treball s'ha aplicat el model a la xarxa viària de Catalunya. Tot i això, el model pot ser aplicat en qualsevol localització, però la facilitat d'obtenció de dades i coneixement del territori han propiciat que el treball es centri exclusivament a Catalunya. És un domini extens amb molta varietat de situacions i zones climàtiques, però prou petit per poder manegar i analitzar la informació.

La informació de la xarxa viària catalana s'ha extret d'un graf de carreteres del Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya. En aquest arxiu hi trobem una representació de les diferents vies dividides en trams. Les vies urbanes no hi apareixen representades.

El format de l'arxiu és ESRI Shapefile d'entitats lineals, on cadascuna d'elles (els diferents trams de via) és definida per un conjunt de punts dels quals podem extraure les seves coordenades. Les sortides produïdes pel model (apartat 2.3.2) seran presentades en el mateix tipus d'arxiu.

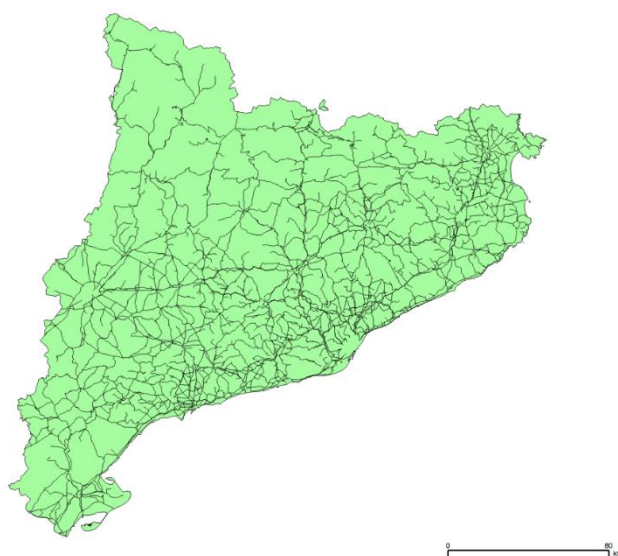


Fig. 2.8. Xarxa viària de Catalunya

En aquest graf apareixen carreteres de diferents categories, des d'autopistes a carreteres comarcals, existint diferències en els gruixos d'asfalt i sol granular entre els diferents tipus de via. Tot i això, s'ha considerat que totes les vies tenen el mateix perfil que el presentat en la taula 2.8.

2.4.3 Inicialització del model

Per a poder resoldre l'equació 2.17 aplicant les diferències finites, són necessàries, apart de les condicions de contorn presentades en l'apartat 2.1.2, les condicions inicials. Donat que no es disposa de mesures de perfils de temperatura en el sòl en els diferents punts, la solució passa per executar el model de 24 a 48 hores abans de l'inici de la previsió o simulació.

Aquesta inicialització és necessària tant en el mode simulació com previsió, i es realitza preferentment amb dades provinents d'estacions meteorològiques i radars. Tot i això, si alguna de les variables d'entrada no es troba disponible, també poden utilitzar-se dades provinents d'una execució anterior del model numèric de previsió.

En la figura 2.8 es presenta el perfil de temperatures al cap de 48 hores per a diferents perfils de temperatura inicials del model. En el primer, totes les capes menys la més profunda es troben a -1°C , en el segon, a 1°C , i en el tercer totes les capes es troben inicialment a 7°C .

Es pot observar que tot i la inicialització grollera del model, al cap de 48 hores la diferència de temperatura en la capa superficial (la d'interès) no és superior a 1°C en cap cas, demostrant que 48 hores d'inicialització són suficients.

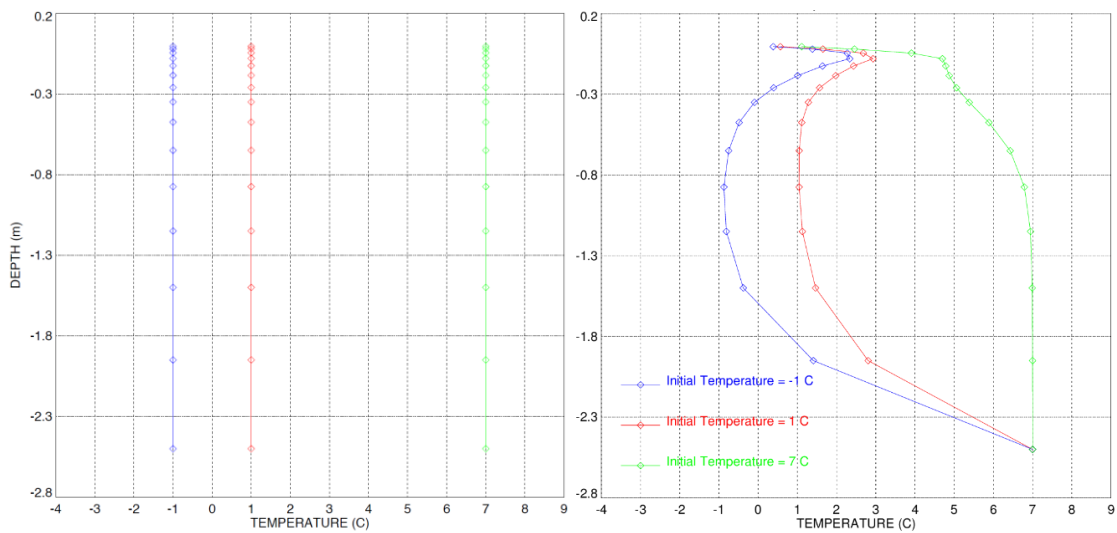


Fig. 2.9. Temperatura en les diferents capes del sòl en funció de la temperatura inicial. Esquerra: estat inicial ($t = t_0$); Dreta: estat després de la inicialització ($t = t_0 + 48$ hores)

2.5 Exemple de funcionament del model

En les figures 2.10, 2.11, 2.12, 2.13 i 2.14 es presenta un exemple del funcionament del model en un punt al llarg d'un dels episodis estudiats. Es tracta d'un punt pertanyent a un tram de carretera a la vora de Puigcerdà.

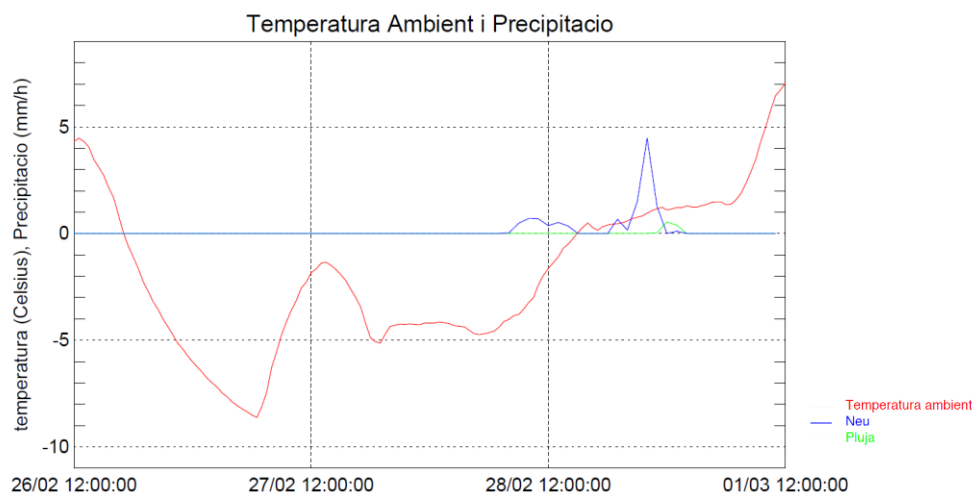


Fig. 2.10. Temperatura ambient i precipitació a Puigcerdà

En la figura 2.10 es representa la temperatura ambient i la precipitació. Si bé la imatge per si sola no és massa explicativa, sí que ho és el relacionar-la amb la figura 2.12, on es representen les diferents sortides quantitatives del model (aigua/neu acumulada i temperatura de la superfície). Com era d’esperar, s’observa una alta correlació entre les precipitacions i l’aigua acumulada en la carretera.

Es pot apreciar com es compleix la restricció que en un mateix instant de temps només pot haver-hi aigua en estat líquid o sòlid, essent l’única excepció el moment en que la temperatura de la superfície es troba a 0°C i s’està duent a terme el canvi de fase de l’aigua acumulada en la superfície, que succeeix durant la tarda del 28/02.

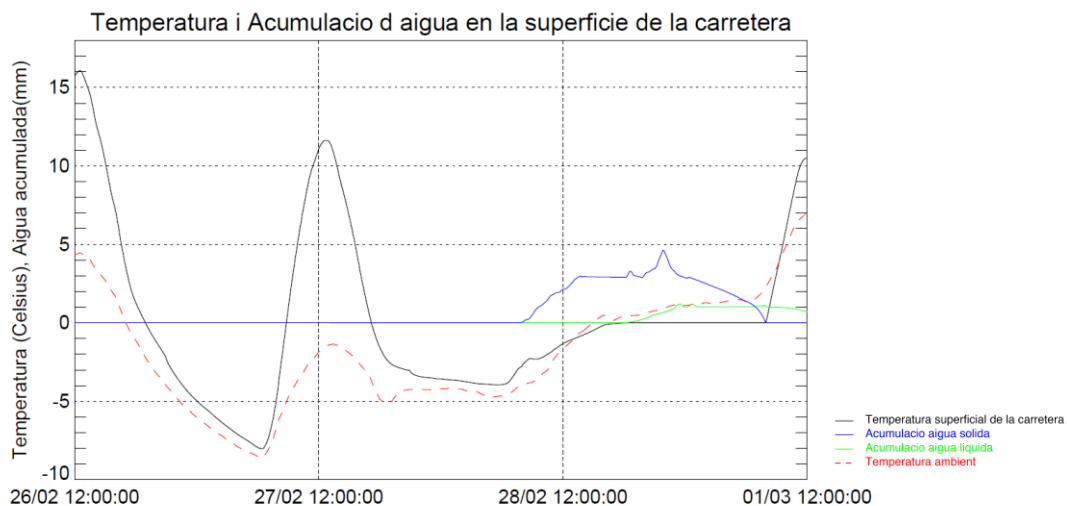


Fig. 2.11. Acumulació d’aigua/neu i temperatura superficial a Puigcerdà

En la figura 2.12 és interessant observar com el terme d’escorrentia s’activa a partir del moment en què els valors d’aigua líquida o sòlida acumulada sobrepassen els llindars establerts. És també interessant observar com a partir de finals del 28/02 la precipitació canvia de fase, passant de neu a aigua. Tot i aquest canvi en l’estat de la precipitació, com l’aigua en estat líquid només pot acumular-se si la temperatura superficial de la carretera és igual o superior a 0°C, aquesta s’acumularà com a aigua en estat sòlid a mesura que va escalfant la carretera fins arribar als 0°C.

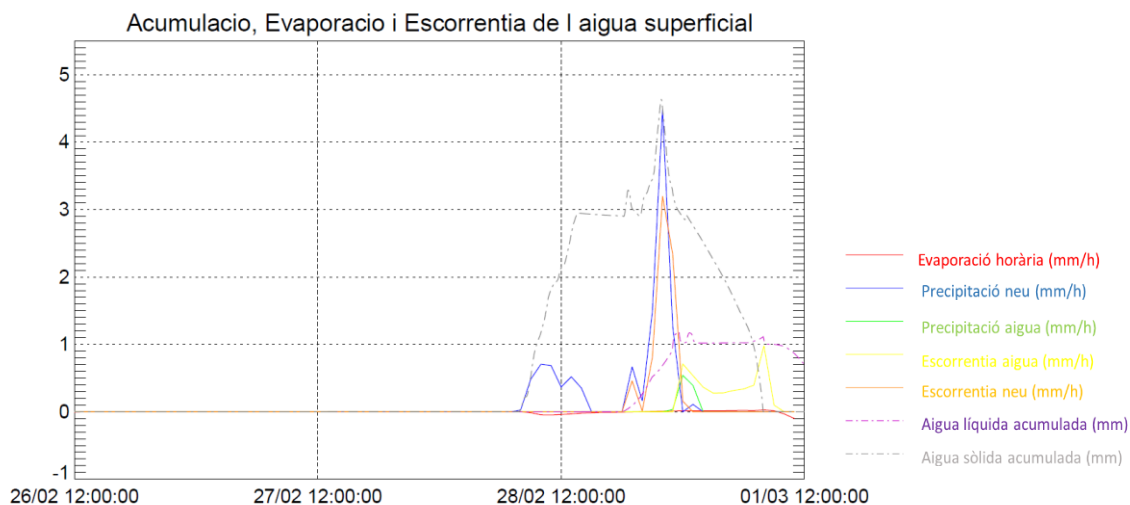


Fig. 2.12. Funcionament del mòdul d’acumulació d’aigua en superfície

Pel que fa la figura 2.13, és interessant veure quina de les components que intervenen en el càlcul del balanç d'energia superficial té un pes més important en el resultat final. La radiació d'ona curta és la font d'energia més important en el càlcul de q_0 , tot i això, durant el dia 28/02, el valor d'aquesta variable va ser dràsticament reduït degut a la presència de núvols (es va donar precipitació), però també a la presència de neu en la carretera, que reflecteix part d'aquesta energia.

També és interessant observar com l'energia aportada per les capes inferiors del sòl respon a un comportament cíclic. Donat que la capa superficial es troba en contacte amb l'atmosfera, les oscil·lacions de temperatura seran més ràpides i intenses. Durant les hores de sol i calor, la capa més superficial de la carretera és la que es troba a una temperatura superior i per tant les capes inferiors li extreuen energia. En canvi, quan és de nit, la temperatura de la superfície baixa ràpidament i és ella la que extreu energia de les capes inferiors que ha anat escalfant al llarg del dia.

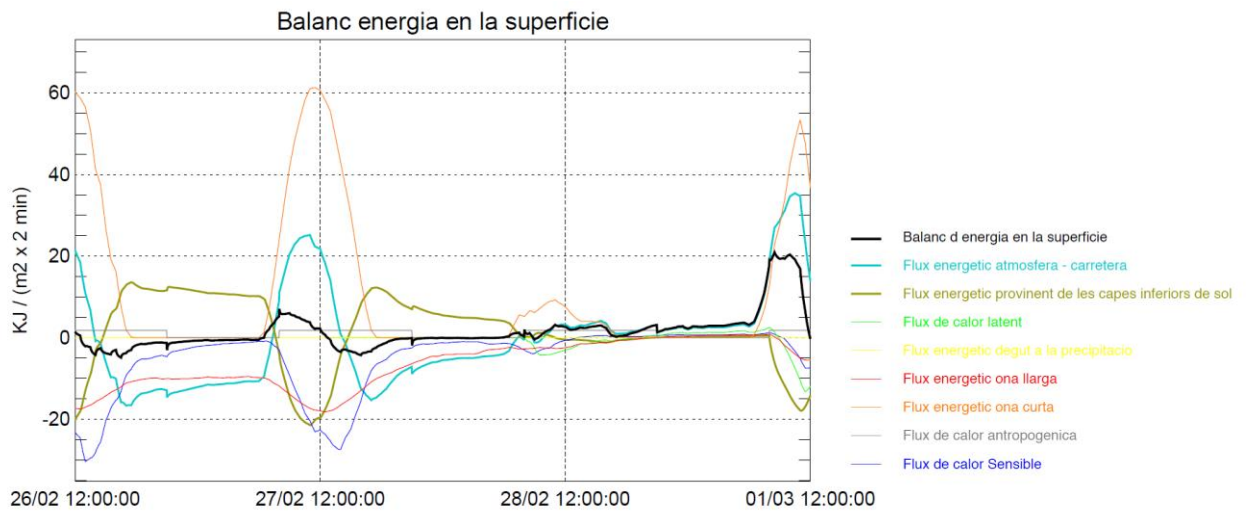


Fig. 2.13. Funcionament del mòdul del balanç d'energia a la superfície de la carretera

Aquesta diferència de temperatura en les diferents capes del sòl pot apreciar-se en la figura 2.14. S'observen variacions en la temperatura fins a una profunditat de 1,5 metres, a partir de la qual la temperatura s'estabilitza. Com era d'esperar, la temperatura a la que roman la capa més inferior és de 7°C , condició de contorn inferior.

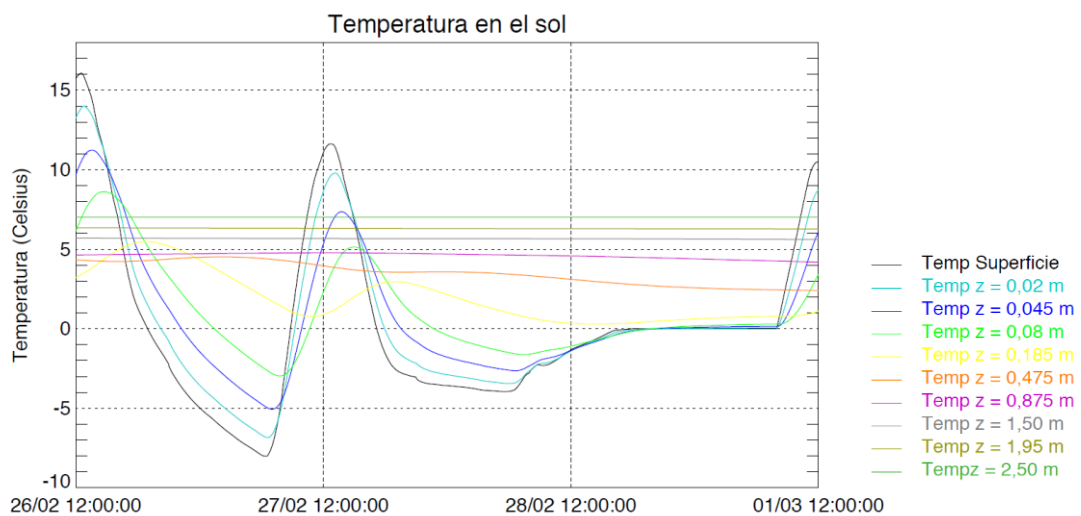


Fig. 2.14. Funcionament del mòdul d'acumulació d'aigua en superfície

Capítol 3

Resultats

En aquest capítol es presenten els resultats obtinguts per 3 episodis de neu que van afectar el domini d'estudi durant l'hivern de 2018. Es comprovarà l'eficiència del model en predir, tant en l'espai com en el temps, condicions de difícil circulació en les carreteres, i es valoraran les diferències obtingudes entre els dos modes de funcionament (simulació i previsió – veure secció 2.2.2).

Els tres episodis que es presentaran són els següents:

- Del 04/02/2018 al 07/02/2018.
- Del 26/02/2018 al 02/03/2018.
- Del 19/03/2018 al 22/03/2018.

Per a cada un dels episodis s'executa el model tres vegades. La primera execució és en mode simulació i les altres dues són en mode previsió. L'execució en mode simulació i la primera en previsió comencen en el mateix instant, mentre que la segona previsió comença un dia més endavant. Aquesta metodologia permet comparar els resultats entre els diferents modes, de la mateixa manera que és possible comparar les diferències en els resultats en mode previsió en funció del lead time. Aquestes previsions, que son emeses cada sis hores, compten amb 54 hores de previsió de les quals les primeres 6 no són preses en compte per garantir resultats fiables (spin up time dels models numèrics)

És interessant executar el model en els seus dos modes de funcionament. Per una banda, en el mode simulació podem considerar que la principal font d'errors prové de la pròpia incertesa del model i no de les variables d'entrada. D'altra banda, les previsions ens serviran per testejar la qualitat del model en situacions reals, on el que es desitja no és una valoració a posteriori de l'ocorregut durant l'episodi sinó una eina capaç de predir les futures incidències en les vies.

Els estudis de la literatura disposaven d'estacions meteorològiques de carretera les quals enregistren la temperatura de la superfície i quantitat de neu acumulada. En canvi, a l'aplicació feta a Catalunya en el marc d'aquest treball no se'n disposen. La manca d'estacions al llarg de la xarxa de carreteres provoca que no es disposi de valors amb els que comparar els resultats obtinguts. Tot i això, degut al caràcter problemàtic de les nevades, aquestes es troben documentades en nombrosos diaris i diverses agències meteorològiques, que ens servirà per valorar d'una forma qualitativa la veracitat dels resultats obtinguts

3.1 Episodi 27/02/2018 – 02/03/2018

El primer episodi en ser presentat serà l'ocorregut a finals del mes de febrer del 2018. Es tracta de l'episodi de neu més extens des del març del 2010, i va afectar pràcticament la totalitat del territori.

3.1.1 Sumari de l'episodi

Es pot separar aquest episodi en dues parts: la primera recull les precipitacions ocorregudes entre el 26/02/2018 i el matí del 27/02/2018, localitzades a la zona nord-est de Catalunya. La segona part fa referència al temporal de neu generalitzat que va donar-se a partir de la matinada del 28/02.

Durant el dilluns (26/02) i matinada de dimarts (27/02) es va combinar una massa d'aire fred d'origen siberià amb l'aproximació d'una forta depressió atlàntica. Això va provocar un fort descens de les temperatures i la cota de neu va baixar fins a nivell de mar en certes zones del Maresme, encara que no hi ha constància de que la neu quallés enlloc del litoral.

Aquesta primera part de l'episodi que es va donar al llarg de la tarda del dia 26 i fins a primeres hores de la matinada del dia 27 va anar afectant repetidament les mateixes zones, especialment la Garrotxa, Osona i Berguedà. La precipitació s'anava generant al Prepirineu (primer al Ripollès-Garrotxa, després Osona-Berguedà i finalment Solsonès-Alt Urgell) i es desplaçava de nord-oest a sud-est, però arribant molt dèbil al mar. En la figura 3.1 es pot observar la neu acumulada durant aquest període.

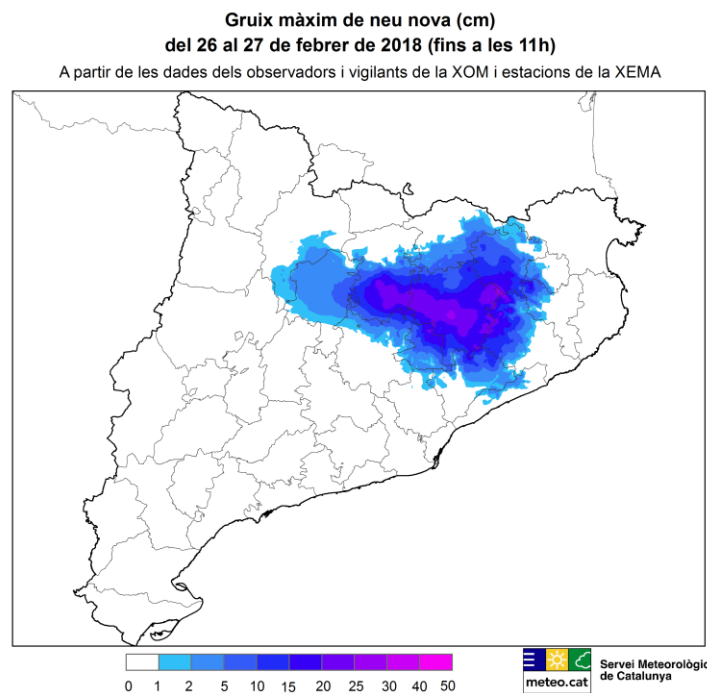


Fig. 3.1. Acumulació de neu entre el 26/02/2018 i 27/02/2018, Font: SMC

A partir del matí del dimarts 27/02, les nevades van arremetre i van donar pas a un dia de fred molt intens que va provocar gelades arreu del territori, a excepció de certes trams del litoral Central i Sud. Si bé no es van donar grans precipitacions, degut a les baixes temperatures, aquestes van ésser en forma de neu fins i tot a Barcelona, encara que no van ser capaces de emblanquir la zona.

Podem considerar el començament de la segona part de l'episodi a finals del dia 27/02/2018, encara que va ser durant la matinada del dia 28/02 quan la precipitació va ser més important. L'entrada d'una massa d'aire més càlida en relació amb una pertorbació procedent del sud de la península Ibèrica va provocar una nevada general en interaccionar amb la massa d'aire molt freda que afectava Catalunya a primeres hores del dia 28. La nevada va anar escombrant de sud-oest a nord-est el territori al llarg del matí.

A primera hora del matí nevava a qualsevol cota del centre i nord del país, mentre que a l'extrem sud la cota ja havia anat pujant durant la nit. A partir de mig matí, la massa d'aire més càlida que progressava pel sud va fer que la cota de neu comencés a pujar ràpidament. En un primer moment la neu es va anar convertint en aigües i pluja a les comarques interiors del sud del país i ja cap al migdia a la resta del prelitoral, a la Catalunya Central i a Ponent. Durant la tarda la cota de neu va anar pujant dels 1.000 m cap als 1.500 m, amb l'excepció d'algunes valls del Prepirineu i del vessant sud del Pirineu on la neu va continuar caient per sobre dels 600 o 700 m fins a la nit. Va ser el cas de la Seu d'Urgell (Alt Urgell) o Bagà (Berguedà).

En la figura 3.2 es pot veure l'acumulació de neu al llarg del territori durant aquesta segona part de l'esdeveniment.

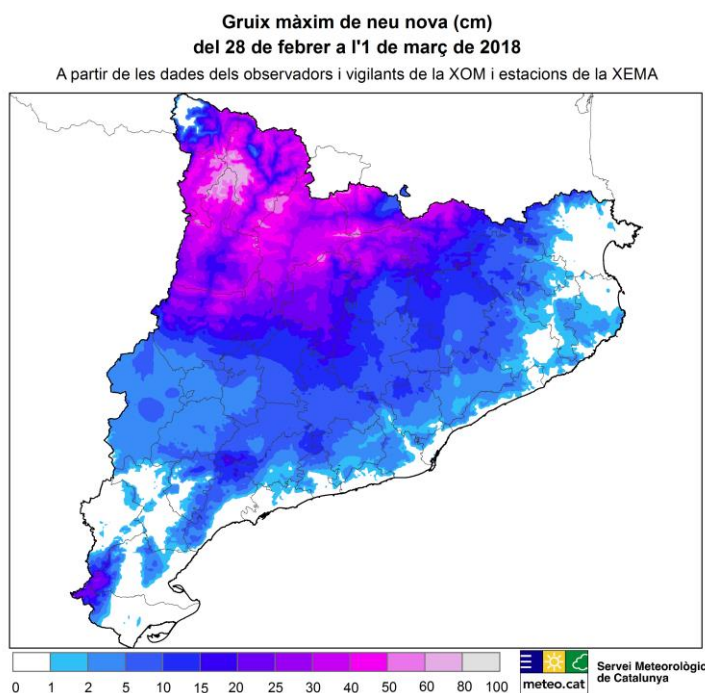


Fig. 3.2. Acumulació de neu entre el 28/02/2018 i 01/03/2018, Font: SMC

3.1.2 Presentació de resultats

Tal i com s'explica al principi del capítol, per a cada episodi s'executa el model amb tres conjunts de dades. En la taula a continuació (Taula 3.1) es pot observar quina és la data d'inici i final de cada execució. En tots tres casos el model s'inicialitza 48 hores abans amb dades extretes del SMC.

Taula 3.1. Temps d'inici i final de les diferents execucions

Mode de funcionament	Inici execució	Final execució
Simulació	26/02/2018 12:00 UTC	01/03/2018 12:00 UTC
Previsió	26/02/2018 12:00 UTC	28/02/2018 12:00 UTC
Previsió	27/02/2018 12:00 UTC	01/03/2018 12:00 UTC

A continuació es realitzarà un recull dels resultats obtinguts en mode simulació en els moments destacats de l'episodi, tot comparant-los amb els moments de més interès obtinguts en els modes de previsió.

En la figura 3.3 es presenta l'estat inicial de la xarxa viària el 26/02 a les 12:00 UTC. Les condicions arreu del graf de carreteres són bones i la temperatura de la calçada es troba per sobre dels 5°C en tots els trams (Fig 3.3).

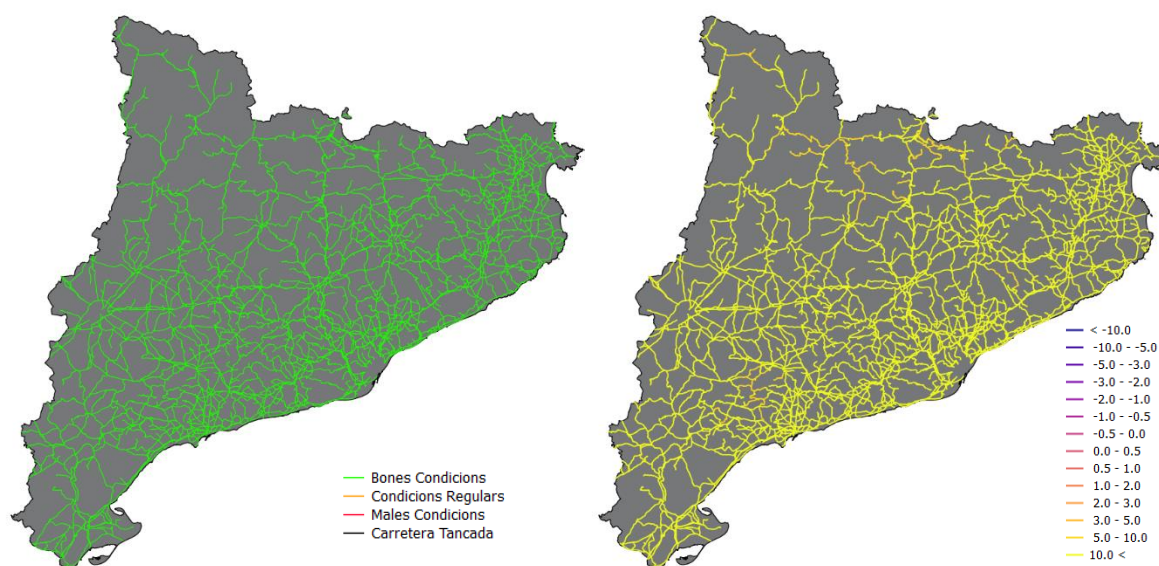


Fig. 3.3. Estat inicial mode simulació. Esquerra: índex de circulació; Dreta: Temperatura calçada (°C) 26/02/2018 12:00 UTC

Aquesta situació de tranquil·litat es veu pertorbada un cop entrada la tarda, i a partir de les 18:00 UTC ja s'observa com certs trams (N-260, per exemple) a la zona del Ripollès comencen a presentar un nivell d'alerta 3 representada pel color vermell en l'índex de circulació (Fig 3.4).

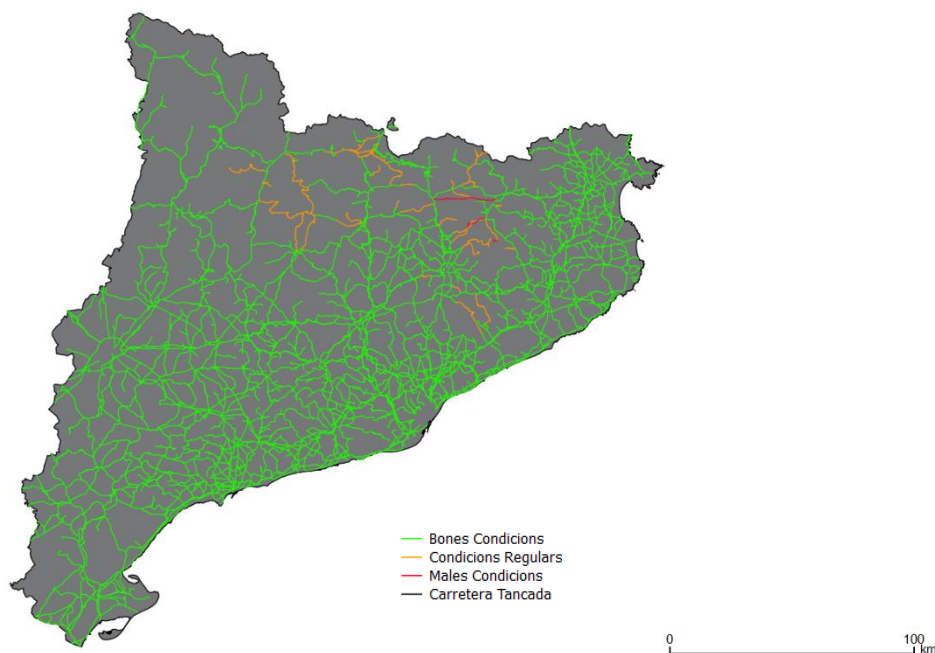


Fig. 3.4. Índex de circulació el 26/02/2018 18:00 UTC en mode simulació

Aquesta situació d'instabilitat continua estenent-se per la zona Central i Prepirineu Oriental durant la resta del dia arribant al seu punt de màxima afectació el 28/02/2018 01:00 UTC. En la figura 3.5 s'observa que la zona central de Catalunya des del Nord de Manresa fins al litoral es troba altament afectada per la neu.

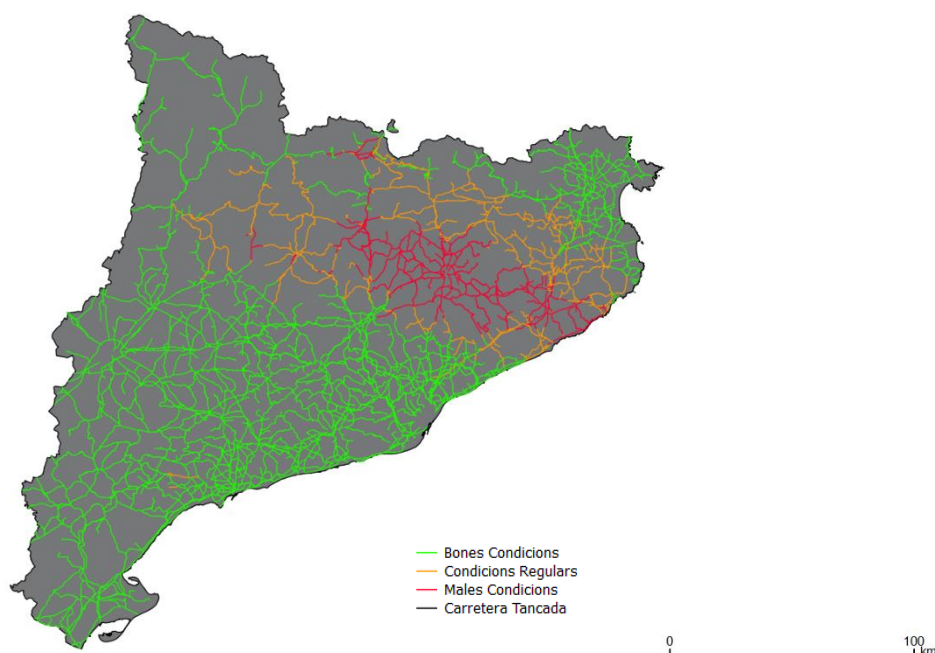


Fig. 3.5. Índex de circulació el 27/02/2018 01:00 en mode simulació

En les següents hores s'aprecia com la perturbació que ha provocat aquesta situació d'alerta es va desplaçant cap a l'Est (Fig 3.6) , millorant les condicions de les carreteres afectades fins recuperar pràcticament la normalitat en tot els trams a les 14:00, donant per finalitzada la primera part de l'episodi (fig 3.7). Tot i això, ja s'observa com en la zona de Prades (interior de Tarragona) ja hi apareixen trams amb nivell d'alerta 2 en els que hi comença a acumular-s'hi neu (Fig 3.7).

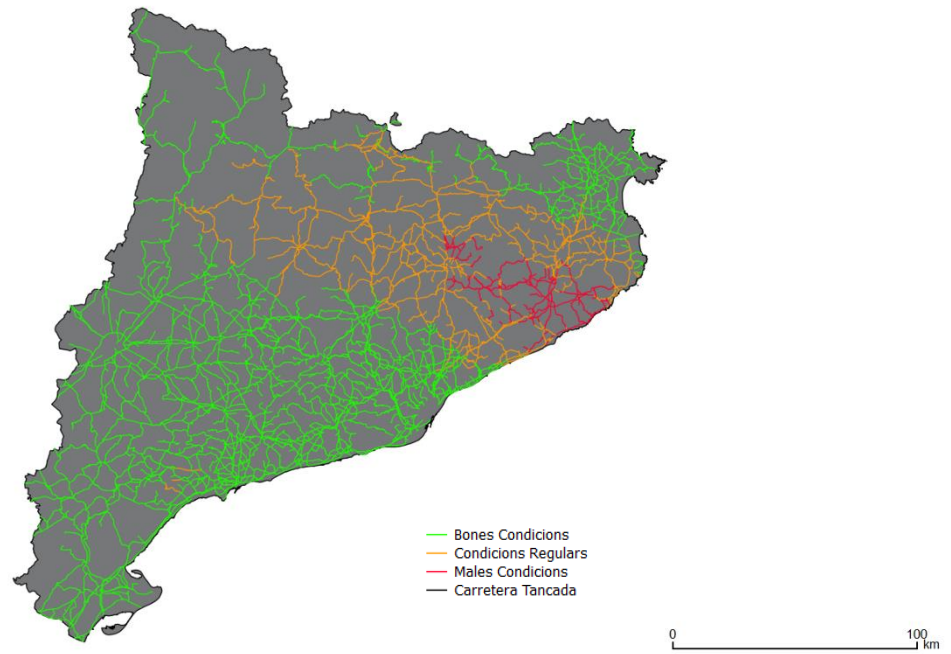


Fig. 3.6. Índex de circulació el 27/02/2018 03:00 en mode simulació

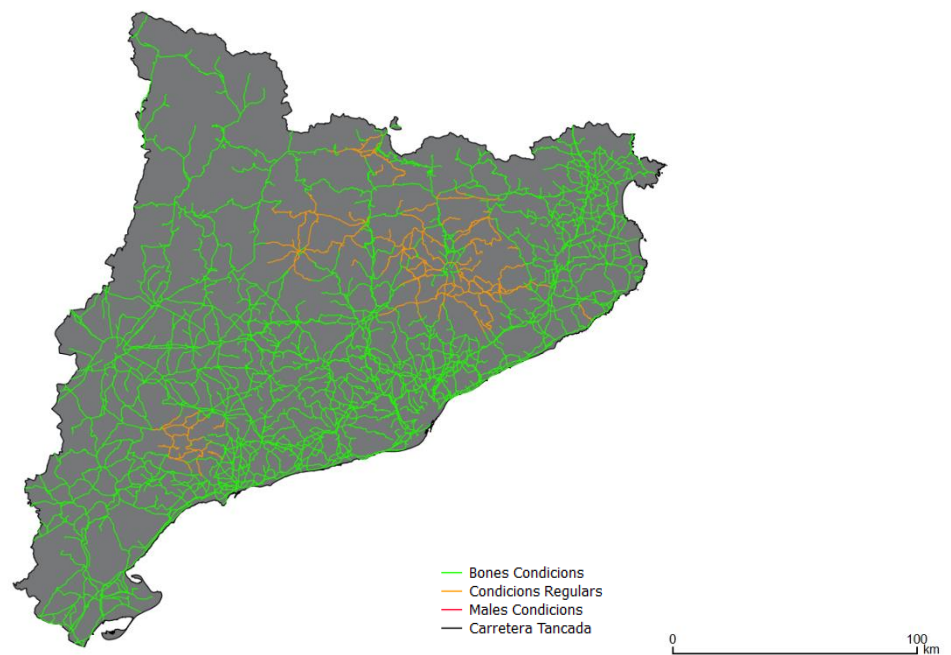


Fig. 3.7. Índex de circulació el 27/02/2018 14:00 en mode simulació

En el mode previsió (data inici 26/02/2018 12:00), s'observa el mateix comportament, coincidint l'inici i final de les afectacions en carretera. Tot i això, en el seu moment de més extensió, la intensitat de les alertes no és tant alta, si bé la zona afectada és major (Fig 3.8)

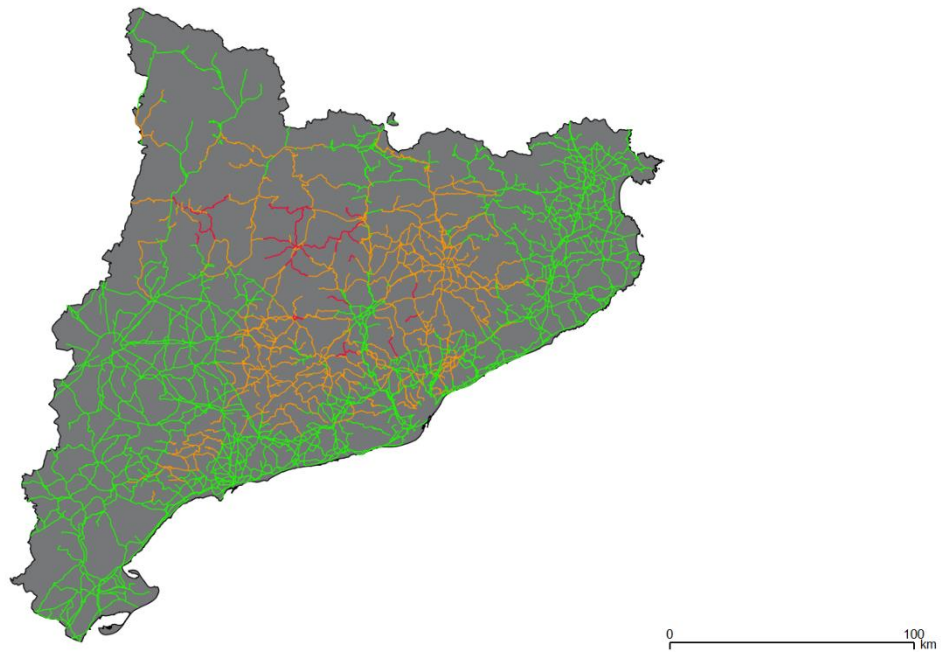


Fig. 3.8. Índex de circulació el 27/02/2018 03:00 en mode previsió. Lead time: 15 hores

Durant la resta de la tarda la situació s'estabilitza, tot i que cap al vespre l'alerta comença a estendre's cap a la zona central de Catalunya, encara que sense gran intensitat (Fig 3.9).

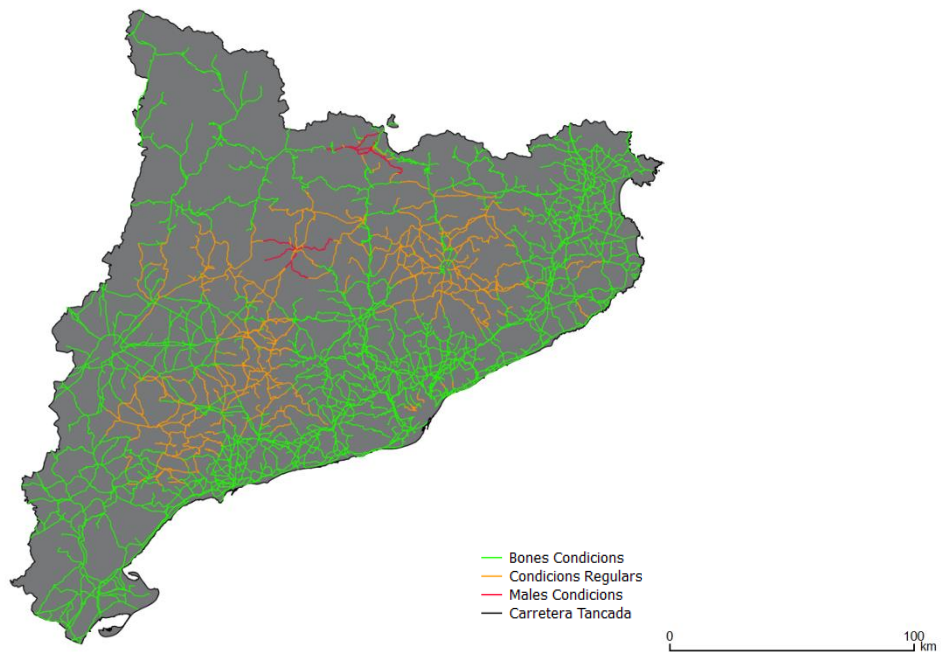


Fig. 3.9. Índex de circulació el 27/02/2018 20:00 en mode simulació

És a partir de les 03:00 UTC del 28/02 quan es comença a observar com des del Sud-Oest el nivell d'alerta comença a créixer (Fig 3.10), estenent-se al llarg de tot el territori fins arribar al seu punt més crític el 28/02/2018 08:00 UTC (Fig 3.11).

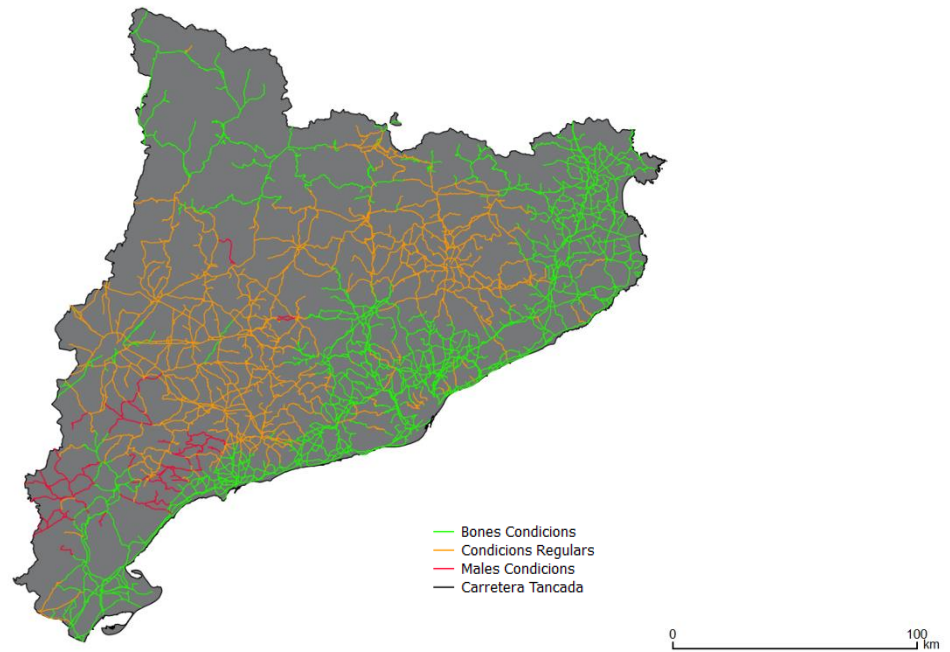


Fig. 3.10. Índex de circulació el 28/02/2018 00:03 en mode simulació

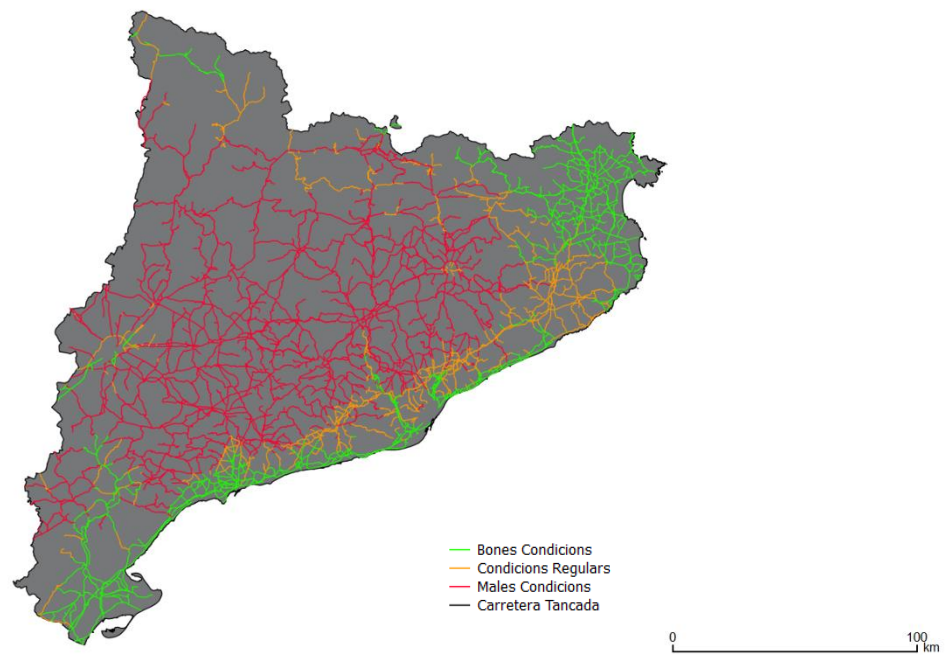


Fig. 3.11. Índex de circulació el 28/02/2018 08:00 en mode simulació

En la figura 3.11 es veu clarament com aquest episodi va tenir una repercussió generalitzada en tot el territori, exceptuant certs punts del litoral i punts més orientals del Gironès.

En els modes de previsió, s'observa un patró similar pel que fa a la localització temporal i geogràfica de les afectacions encara que aquestes són menys intenses, sobretot en la zona Sud Oest de Catalunya i zones pròximes al litoral (Fig 3.12).

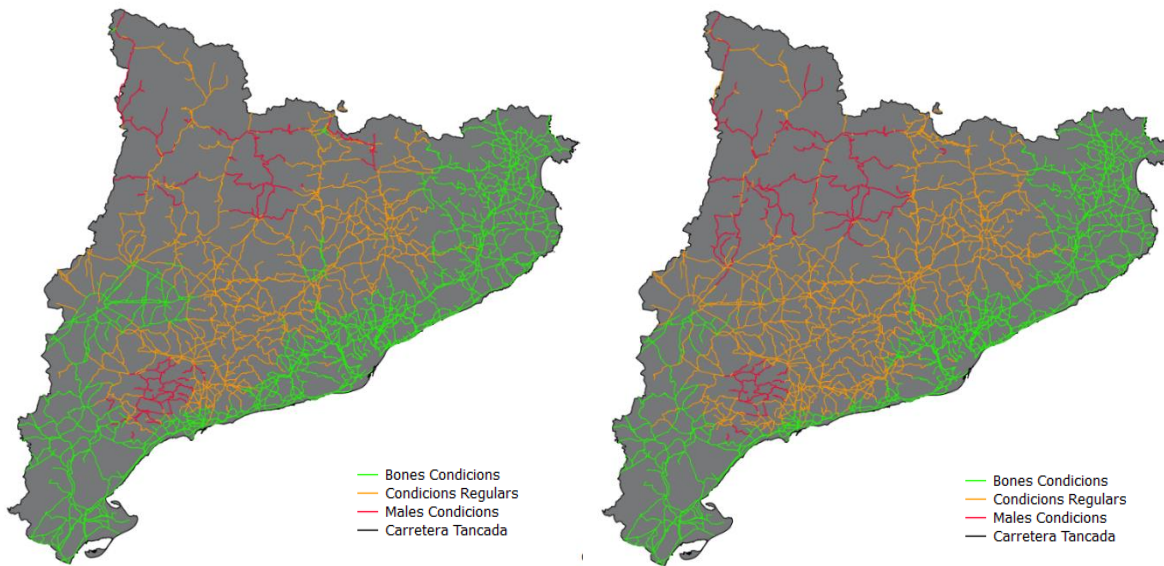
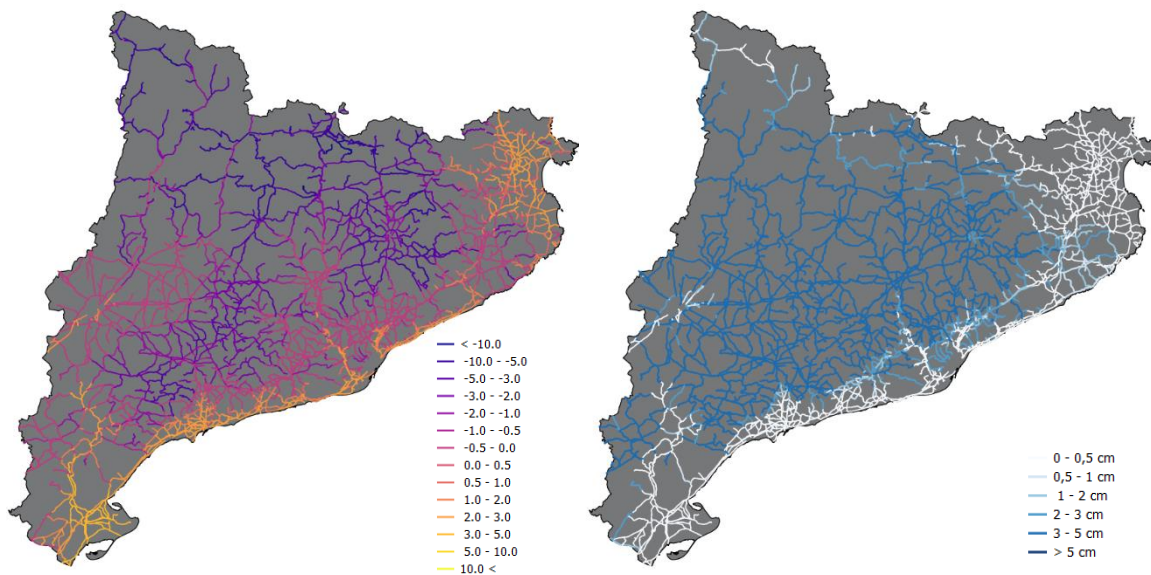


Fig. 3.12. Índex de circulació el 27/02/2018 08:00 UTC en mode previsió. Esquerra: Lead time de 44 hores; Dreta: lead time de 20 hores.

En la figura 3.13 es mostren les diferents sortides del model per al mateix pas de temps en mode simulació. Donat que la definició de l'índex de trànsit és altament depenent de la quantitat de neu acumulada, es pot observar una forta correlació entre les dues figures. També és interessant la figura 3.13b en la que es pot veure com, a excepció de la part Nord-Est de Catalunya, tot el territori ha patit precipitacions, i com s'han acumulat en forma líquida al litoral, i a mesura que es desplacen cap a l'interior, aquestes esdevenen primer aigua-neu per acabar transformant-se en aigua en estat sòlid.



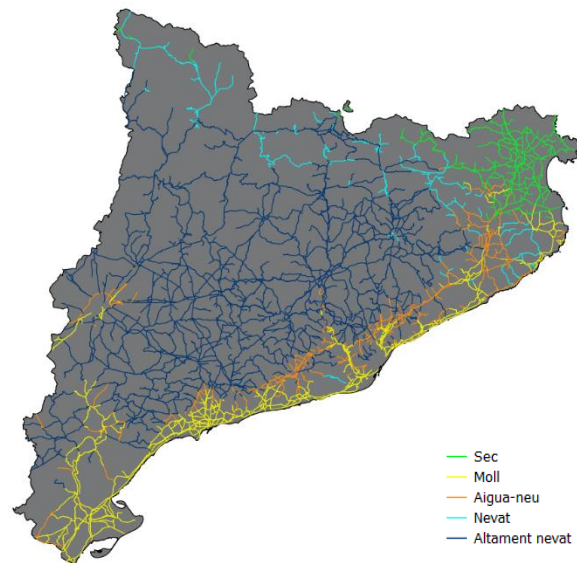


Fig. 3.13. Superior esquerra (a): Temperatura la calçada (°C); Superior dreta (b): acumulació de neu (mm d'equivalent en aigua líquida); Inferior esquerra (c): Condicions de la carretera el 28/02/2018 08:00 UTC en mode simulació

Si bé en el graf de carreteres utilitzat no apareixen les vies urbanes, és interessant veure com en la zona de Barcelona apareixen alertes de nivell 3 en el trams més alts de la carretera de l'Arrabassada i de la BP-1417, mentre que la resta de vies d'entrada a Barcelona (que es troben a una cota menor) no apareixen com a problemàtiques (Fig 3.14). Aquesta variació de les condicions de la via en un espai reduït ens indica que el model és capaç de localitzar amb precisió els punts problemàtics de la xarxa viària.

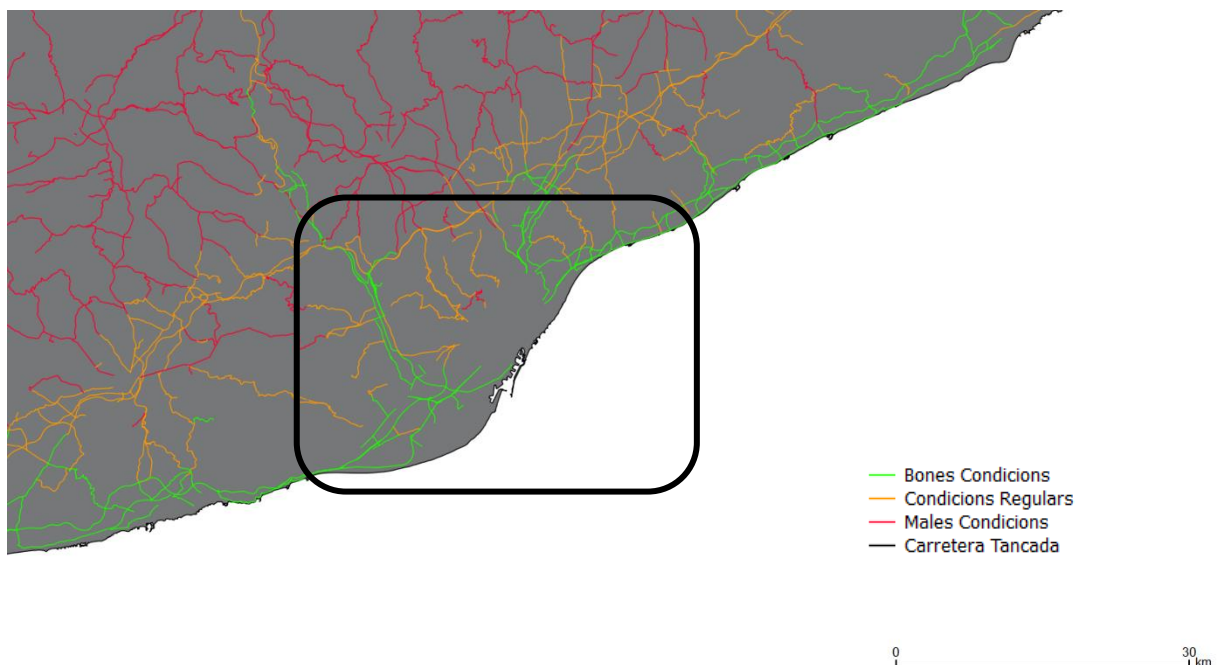


Fig. 3.14. Índex de circulació als voltants de Barcelona 28/02/2018 08:00 UTC en mode simulació

A partir d'aquest instant, tant en simulació com en previsió, la situació comença a revertir-se de Sud a Nord. A les 12:00 UTC (Fig 3.15) la normalitat s'havia recuperat en el tot el sud de Catalunya, i a les

22:00 UTC (Fig 3.16) ja només la zona Nord, muntanyes de Prades i certs punts de la Catalunya Central (altiplà de la Segarra i proximitats de Vic).

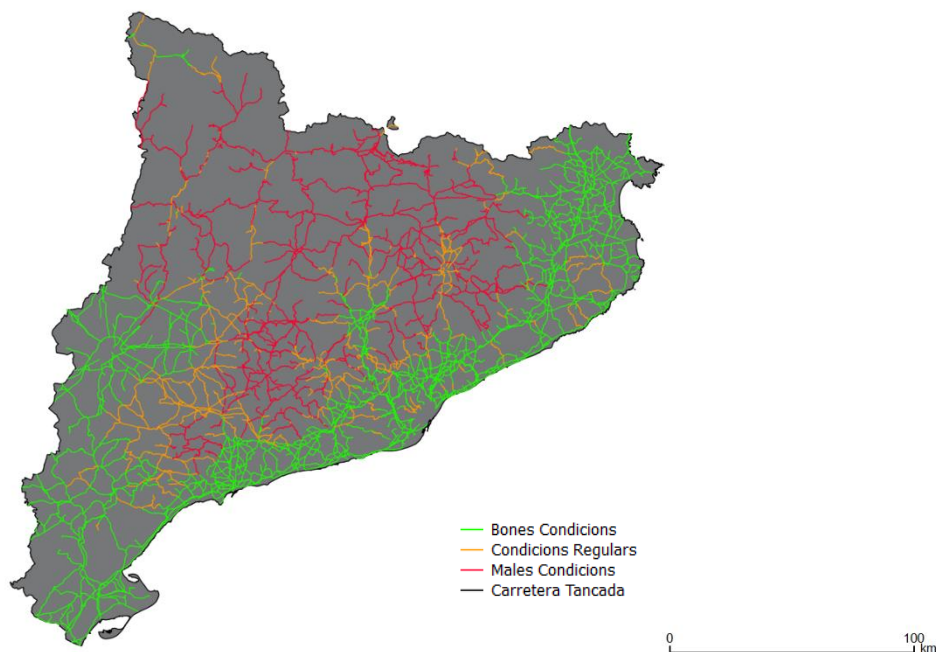


Fig. 3.15. Índex de circulació el 28/02/2018 12:00 en mode simulació

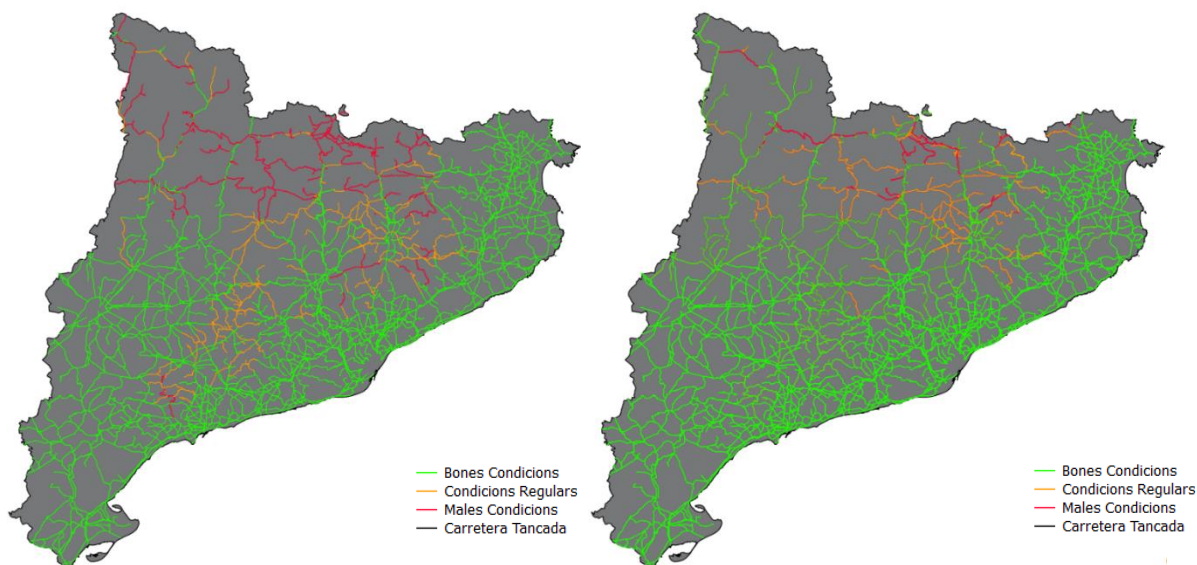


Fig. 3.16. Índex de circulació el 28/02/2018 22:00. Esquerra: mode simulació; Dreta: mode previsió Lead time de 34 hores

Si bé durant la nit es manté el nivell d'alerta al Pirineu degut a les baixes temperatures nocturnes que es donen en la zona, quan es fa de dia la situació en les carreteres millora, recuperant la normalitat en quasi la totalitat dels trams de la xarxa viària catalana (Fig 3.17). Aquesta millora, tal i com queda reflectit en l'apartat 2.5 (Fig 2.12) és degut a l'increment en les temperatures, però sobretot per la radiació solar.

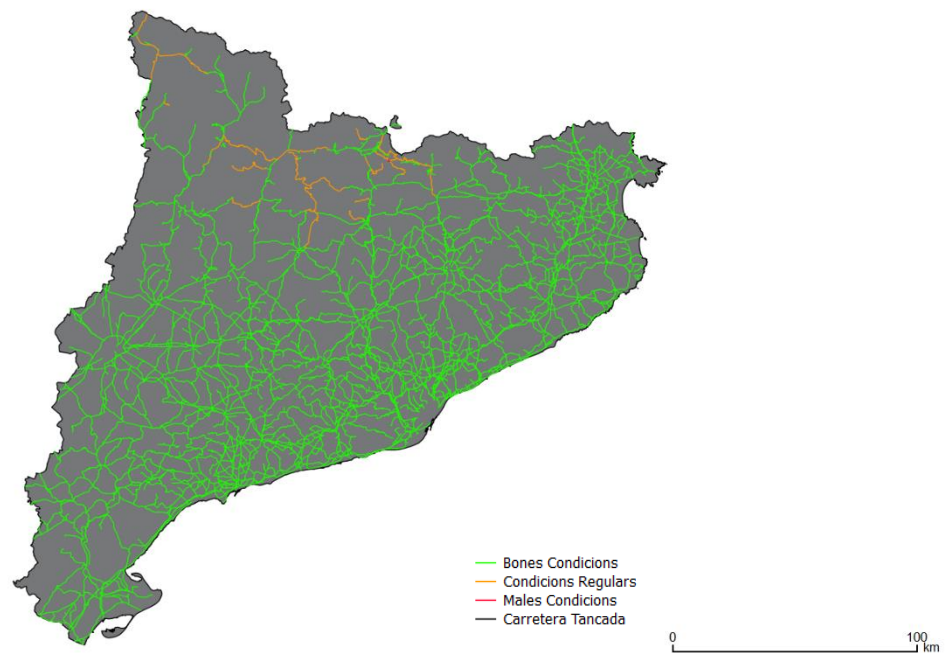


Fig. 3.17. Índex de trànsit 01/03/2018 10:00 UTC

3.1.3 Valoració i comparació dels resultats

Centrant-nos en les observacions on es pot assumir que els errors en les variables d'entrada són petits, es pot fer una valoració positiva dels resultats obtinguts. Es diferencien bé les dues parts en les que es divideix l'episodi, i en ambdues ocasions localitza correctament les afectacions en el territori tant a nivell temporal com geogràfic.

En la primera part de l'episodi el model és capaç de detectar la severitat de l'esdeveniment en zones com Vic i Solsona, així com el desplaçament de la perturbació cap a l'Est. Malgrat tot, sobreestima les afectacions en la zona del litoral (Fig. 3.5 i 3.6).

Durant la segona part de l'episodi el model és capaç de detectar com les afectacions recorren Catalunya de Sud a Nord, estenent-se per tot el territori a excepció del litoral (Fig 3.11), i com la situació es reverteix durant el matí del 28/02 en el Sud (Fig 3.15). Tot i això s'aprecia una subestimació de la precipitació en certs punts del Pirineu com ara la Vall d'Aran (Fig 3.13). Aquest error segurament es deu a la dificultat del radar en produir estimacions de la precipitació en zones muntanyoses. La presència d'obstacles físics en la direcció d'emissió de les ones del radar complica molt el tractament de les dades proporcionades pels radars.

Pel que fa a les previsions, si bé són capaces de localitzar correctament els fenòmens en l'espai i el temps (punt de màxima afectació és el mateix que en observació), s'observa una clara davallada en la intensitat de les afectacions:

Tal i com s'ha comentat anteriorment, existeixen dificultats en la validació dels resultats obtinguts degut a la inexistència d'estacions meteorològiques de carretera. Tot i això, sí que s'ha pogut realitzar un recull de les diferents afectacions en les vies catalanes publicades per entitats com Trànsit o Protecció Civil.

En la taules següents es presentaran els valors obtinguts tant en observació com en les diferents previsions en els trams afectats. El ombrejat de colors indica en quina categoria de l'índex de trànsit es troba el tram mentre que el valor numèric indica l'acumulació d'aigua en estat sòlid en mm d'equivalent en aigua líquida.

Taula 3.2. Situació carreteres 26/02/2018 20:00 UTC. Els valors numèrics indiquen mm d'equivalent en aigua líquida acumulada. El codi de colors representa el índex de conducció de cada tram.

Tram	Nivell afectació	Simulació	Previsió 26/02 12:00
C-25 (Santa Coloma de Farners - Vic)	Cadenes	3,33	1,01
C-25 (Avinyó)	Cadenes	0	0
C-17 (Malla)	Cadenes	3,25	0
C-17 (Ripoll)	Neu en Carretera	0,75	0
B-522 (Manlleu)	Cadenes	0,81	0
BV-5031 (Arenys de Munt)	Cadenes	0	0
BV-5114 (Campins)	Cadenes	3,39	1,76
C-37 (Vall d'en Bas)	Neu en Carretera	3,05	1,41
C-63 (Sant Feliu de Pallerols)	Neu en Carretera	3,04	0
GI-543 (Viladrau)	Neu en Carretera	3,32	0,97
GI-550 (Santa Coloma de Farners)	Cadenes	3,25	0,95
AP-7 (Maçanet de la Selva)	Neu en Carretera	0	0
C-58 (Viladecavalls)	Neu en Carretera	0	0
C-25 (Sant Hilari de Sacalm)	Neu en Carretera	3,33	1,02

Taula 3.3. Situació carreteres 27/02/2018 08:00 UTC. Els valors numèrics indiquen mm d'equivalent en aigua líquida acumulada. El codi de colors representa el índex de conducció de cada tram

Tram	Nivell afectació	Simulació	Previsió 26/02 12:00
BV-5305 (Taradell)	Tallada	2,78	1,05
C-25 (Santa Coloma de Farners)	Tallada	2,78	0,53
C-17 (Malla)	Cadenes	2,77	1,22
C-25 (Santa Coloma de Farners - Girona)	Cadenes	2,78	0,52
B-522 (Manlleu)	Cadenes	2,77	0,36
BV-5031 (Arenys de Munt)	Cadenes	1,25	0,03
BV-5114 (Campins)	Cadenes	2,75	0,6
GI-543 (Viladrau)	Neu en Carretera	2,78	0,5
GI-550 (Santa Coloma de Farners)	Neu en Carretera	2,74	0,26
GI-552 (Arbúcies)	Neu en Carretera	2,74	0,16
GIV-5411 (Sant Hilari de Sacalm)	Neu en Carretera	2,8	0,68
A-2 (El Bruc)	Neu en Carretera	0	1,98
C-58 (Viladecavalls)	Neu en Carretera	0	0,84
AP-2 (Banyeres del Penedès)	Neu en Carretera	0	0
N-240 (Figuerola del Camp)	Neu en Carretera	0	0,15

Taula 3.4. Situació carreteres 28/02/2018 07:00 UTC. Els valors numèrics indiquen mm d'equivalent en aigua líquida acumulada. El codi de colors representa el índex de conducció de cada tram

Tram	Nivell afectació	Simulació	Previsió 26/02 12:00	Previsió 27/02 12:00
C-462 (La Seu d'Urgell)	Tallada	3,236	3,08	3,11
GIV-5201	Tallada	2,81	0,69	0,96
N-230 (Vielha)	Cadenes	0	3,125	2,81
A-22 (Lleida)	Cadenes	3,04	0	0,56
BV-1081 (Castellfollit de Boix)	Cadenes	3,23	1,05	0,946
BV-5114 (Campins)	Cadenes	3,001	0,33	1,25
C-44 (Vandellòs)	Cadenes	3,22	0	0
C-44 (Hospitalet de l'Infant)	Cadenes	3,32	0	0
LV-4241 (Guixers)	Cadenes	2,76	0	0
C-37 (Manresa)	Cadenes	2,07	0,538	0
N-260 (Sort)	Cadenes	1,82	1,517	2
N-260 (Pont de Suert)	Cadenes	2,81	3,09	3,12
N-420 (Falset)	Cadenes	3,28	2,83	1,715
T-313 (Duesaigües)	Cadenes	3,29	2,8	1,7
T-733 (Ascó)	Cadenes	3,18	0	0
TV-7333 (Fatarella)	Cadenes	3,14	0	0,3
C-16 (Berga)	Neu en Carretera	1,63	1,54	1,56
C-17 (Ripoll)	Neu en Carretera	0,923	1,57	1,165
C-58 (Terrassa)	Neu en Carretera	3,147	0	0
C-17 (Garriga)	Neu en Carretera	1,41	0	0,08
N-240 (Borges Blanques)	Neu en Carretera	3,22	1,01	1,41
AP-2 (Banyeres - Soses)	Neu en Carretera	2,64	0,54	0,82
C-37 (Vall d'en Bas)	Neu en Carretera	2,47	0,26	0,85
BV-1221 (Matadepera)	Neu en Carretera	3,39	0,41	0,42
GI-552 (Arbúcies)	Neu en Carretera	0,734	0	0
GI-550 (Santa Coloma de Farners)	Neu en Carretera	1,96	0,33	0,673
T-704 (Prades)	Neu en Carretera	3,21	2,93	3,01
GIV-5411 (Sant Hilari de Sacalm)	Neu en Carretera	2,37	0,58	0,85
C-242 (Cornudella de Montsant)	Neu en Carretera	3,31	2,94	3,01
C-14 (Ponts)	Neu en Carretera	3,32	0,962	1,37

Taula 3.5. Situació carreteres 28/02/2018 10:00 UTC. Els valors numèrics indiquen mm d'equivalent en aigua líquida acumulada. El codi de colors representa el índex de conducció de cada tram

Tram	Nivell afectació	Simulació	Previsió 26/02 12:00	Previsió 27/02 12:00
BV-2204 (Santa Margarida de Montbui)	Tallada	3,37	1,11	1,38
BV-1415 (Cerdanyola del Vallès)	Tallada	3,04	0	0
GIV-5201 (Viladrau)	Tallada	3,22	0,81	1,11
C-37 (Port d'Armentera)	Tallada	3,49	1,61	2,46
C-37 (Manresa)	Cadenes	3,13	0,07	0
C-16 (Berga)	Cadenes	3,27	2,08	2,47
C-16 (Bagà)	Cadenes	3,21	1,4	1,46

C-38 (Coll d'Ares)	Cadenes	0,19	1,32	1,01
N-260 (Ribes de Freser)	Cadenes	3,24	3,08	2,66
C-44 (Vandellòs)	Cadenes	3,37	0	0
C-44 (Hospitalet de l'Infant)	Cadenes	3,35	0	0
C-13 (Esterrri d'Àneu)	Cadenes	0,78	0,76	2,84
C-14 (Adrall)	Cadenes	3,24	0	0,19
C-28 (Port de la Bonaigua)	Cadenes	0,19	2,07	3,16
C-55 (Solsona)	Cadenes	3,45	1,88	3,08
N-230 (Vielha)	Cadenes	2,185	3,14	3,18
N-260 (Sort)	Cadenes	3,18	2,94	3,11
N-260 (Pont de Suert)	Cadenes	3,17	3,16	3,27
A-2 (El Bruc)	Neu en Carretera	3,41	0,77	0,93
C-17 (La Garriga)	Neu en Carretera	3,15	0	0
C-25 (Rajadell)	Neu en Carretera	3,29	1,36	1,73
C-25 (Espinelves)	Neu en Carretera	3,23	0,86	1,16
C-58 (Terrassa)	Neu en Carretera	3,05	0	0
C-37 (Vall d'en Bas)	Neu en Carretera	3,21	0,63	1,21
C-25 (Santa Coloma de Farners)	Neu en Carretera	3,19	0,67	0,96
C-17 (Ripoll)	Neu en Carretera	3,13	2,19	1,7
AP-2 (Banyeres del Penedès)	Neu en Carretera	3,11	0,34	1,8
C-14 (Ponts)	Neu en Carretera	3,29	1,11	2,58
N-240 (Borges Blanques)	Neu en Carretera	3,2	1,17	1,83

Taula 3.6. Situació carreteres 28/02/2018 18:00 UTC. Els valors numèrics indiquen mm d'equivalent en aigua líquida acumulada. El codi de colors representa el índex de conducció de cada tram

Tram	Nivell afectació	Simulació	Previsió 27/02 12:00
BV-4024 (Coll de Pal)	Tallada	3,07	3,09
BV-4031 (Castellar de N'hug)	Tallada	3,06	3,16
GIV-5201 (Viladrau)	Tallada	3,08	3,01
C-26 (Navès - Borredà)	Cadenes	3,04	0,12
C-16 (Berga - Bellver de Cerdanya)	Cadenes	3,06	3,07
N-141C (Calders)	Cadenes	3,09	0,78
N-141C (Collsuspina)	Cadenes	3,08	0,37
C-38 (Coll d'Ares)	Cadenes	2,99	3,9
C-25 (Espinelves)	Cadenes	3,02	2,45
N-260 (Ribes de Freser)	Cadenes	3,02	3,26
N-420 (Marçà)	Cadenes	0	0
C-14 (Adrall)	Cadenes	0	0
C-13 (Camarasa)	Cadenes	0	0
C-13 (Sort)	Cadenes	0	0
N-260 (Pont de Suert)	Cadenes	2,41	0
N-260 (Sort)	Cadenes	3,13	3,33
C-28 (Port de la Bonaigua)	Cadenes	0,09	2,98

Els resultats obtinguts, sobretot en mode simulació, són força correctes: en la majoria de trams en el que hi han afectacions el model preveu neu. Tot i això s'observen certes situacions en les que els

resultats obtinguts no concorden amb la realitat: en les zones de poca alçada o pròximes al litoral apareixen dificultats per predir correctament la presència d'aigua en estat sòlid a la carretera, i cap al final de l'episodi (Taula 3.6) apareix el mateix problema fins i tot en zones muntanyoses (C-14 a Adrall, C-13 Camarasa; Taula 3.6).

En el mode previsió en canvi, encara que el model genera resultats força satisfactoris ja que és capaç de localitzar de forma efectiva les incidències en la xarxa viària, però no arriba a capturar l'alta intensitat de l'episodi. Una explicació és que la temperatura ambient extreta del model meteorològic HIRLAM és sensiblement superior a l'observada per les estacions meteorològiques, sobretot en el sud de Catalunya. Aquest augment de la temperatura ambient es tradueix en una major temperatura del paviment (fig 3.18,) que provoca que a la neu li costi més prendre, i per tant no se n'acumuli tanta com va passar realment, ja que la primera part de la neu que cau es fon mentre va refredant la carretera.

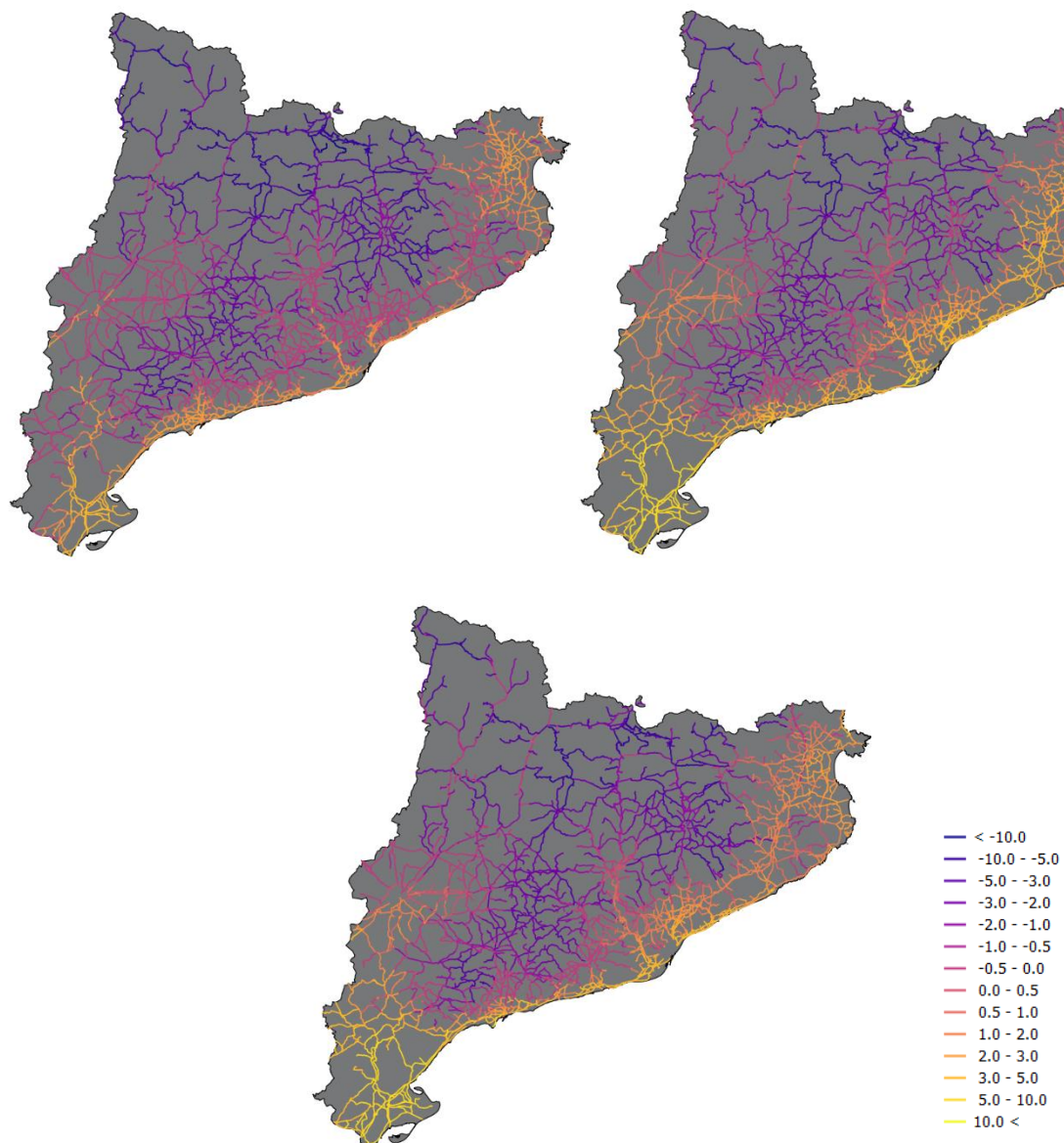


Fig. 3.18. Temperatura paviment 28/02/2018 08:00. Superior esquerra (a): simulació, Superior dreta (b): previsió 26/02/2018 12:00 UTC, Inferior (c): previsió 27/02/2018 UTC

En les figures 3.19 i 3.20 es compara l'acumulació de neu nova precipitada durant l'episodi entre el mode simulació i les dues previsions. En la figura 3.19 s'observa com en la primera previsió la intensitat

de la precipitació és lleugerament inferior que en el mode simulació, si bé són molt similars. Les úniques zones de Catalunya on s'hi observen diferències són en el Segrià i en la vall de l'Ebre. Al Segrià només en mode simulació s'hi detecta la presència de neu, mentre que a la vall de l'Ebre és al contrari.

En la Figura 3.20 també s'observa que en el mode simulació la precipitació és superior a la segona previsió en la meitat Sud de Catalunya, mentre que en la part occidental dels Pirineus (exclusivament la Vall d'Aran en territori català) i el Nord-Est de Girona és al revés.

En qualsevol cas, les diferències en la precipitació no semblen ser tant grans com per generar les diferències observades en els resultats dels dos modes de funcionament, que ens torna a portar a l'explicació de que una estimació a l'alça de la temperatura ambient en el cas de les previsions és la responsable de la pitjor qualitat dels resultats produïts amb aquests conjunts de dades.

En aquestes figures es comprova la hipòtesi feta a la Vall d'Aran, on el baix nivell d'afectacions es deu al bloqueig orogràfic sofert pel radar. És interessant recalcar que a l'hora de comparar les figures és important no allunyar-se del domini que és Catalunya. La interpolació de la temperatura lluny del conjunt de les estacions meteorològiques és probable que no respongui a la realitat, ja que el mètode de l'invers de les distàncies no és capaç de realitzar una bona estimació si no hi ha prou estacions pròximes al punt on es vulgui estimar la temperatura.

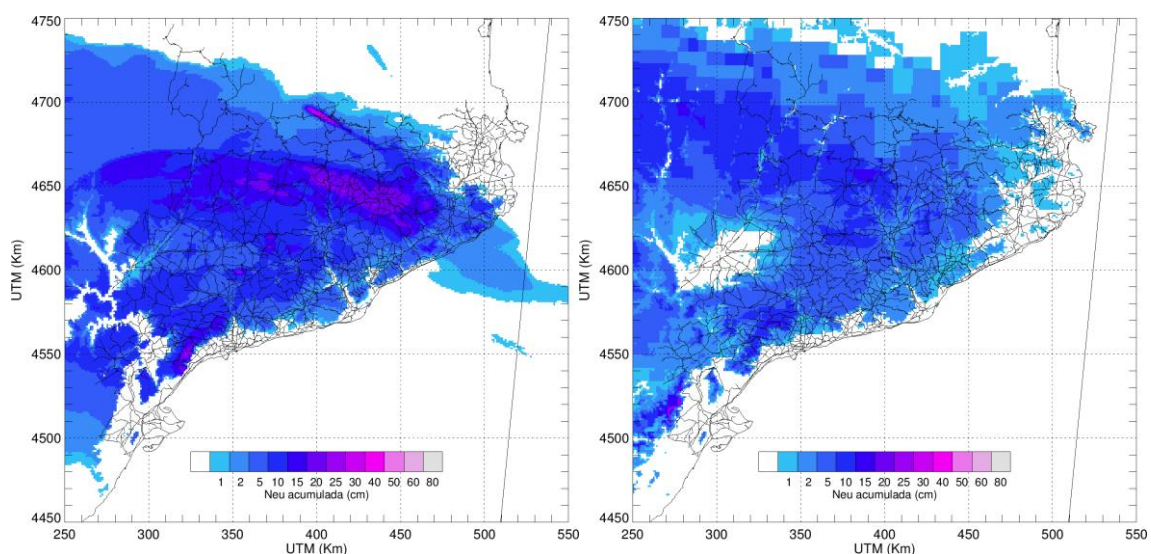


Fig. 3.19. Acumulació de neu nova entre el 26/02/2018 12:00 i el 28/02/2018. Relació 1 a 1 entre mm d'equivalent en aigua líquida i cm de neu. Esquerra: Mode simulació; Dreta: Mode Previsió

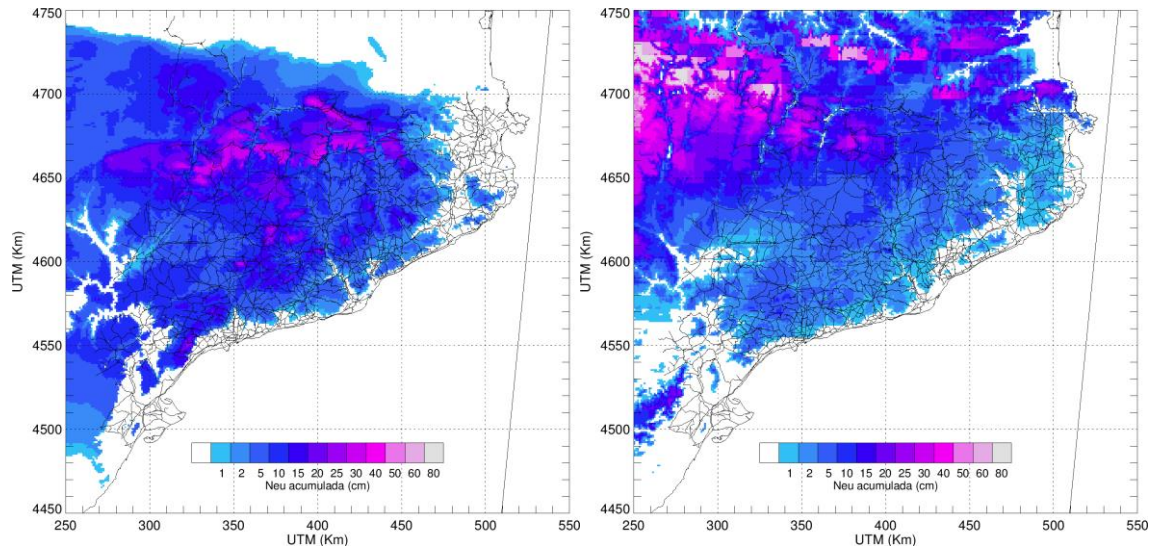


Fig. 3.20. Acumulació de neu nova entre el 26/02/2018 12:00 i el 28/02/2018. Relació 1 a 1 entre mm d'equivalent en aigua líquida i cm de neu. Esquerra: Mode simulació; Dreta: Mode Previsió

Doncs no és d'estranyar que, en mode simulació els resultats obtinguts són, de forma generalitzada, els que millor s'ajusten a la realitat. Només en el Port de la Bonaigua les previsions obtenen més neu. Aquesta diferència a la Vall d'Aran segurament és provocada per l'anomenat bloqueig orogràfic i el fet que les precipitacions durant l'hivern es troben en les capes més baixes de l'atmosfera, que impedeixen que els radars hi obtinguin resultats satisfactoris.

A continuació es presenten series temporals de varis trams afectats durant aquest episodi, especialment aquells en els que els resultats obtinguts no s'ajustin a la realitat. La majoria dels trams on existeixen diferències notables entre la simulació i les previsions es troben a la zona Sud de Catalunya o pròxims al litoral. Tot i això, en altres trams situats fora d'aquestes localitzacions també s'hi ha detectat diferències entre els resultats obtinguts i la realitat. Per tant s'han escollit trams representatius d'aquests problemes. Es presentaran les series temporals dels trams:

- C-44 a Vandellòs
- C-58 a Terrassa
- BV-5114 a Campins
- BV-5031 a Arenys de Munt
- C-28 al Port de la Bonaigua
- C-14 a Adràll

C-44: Vandellòs:

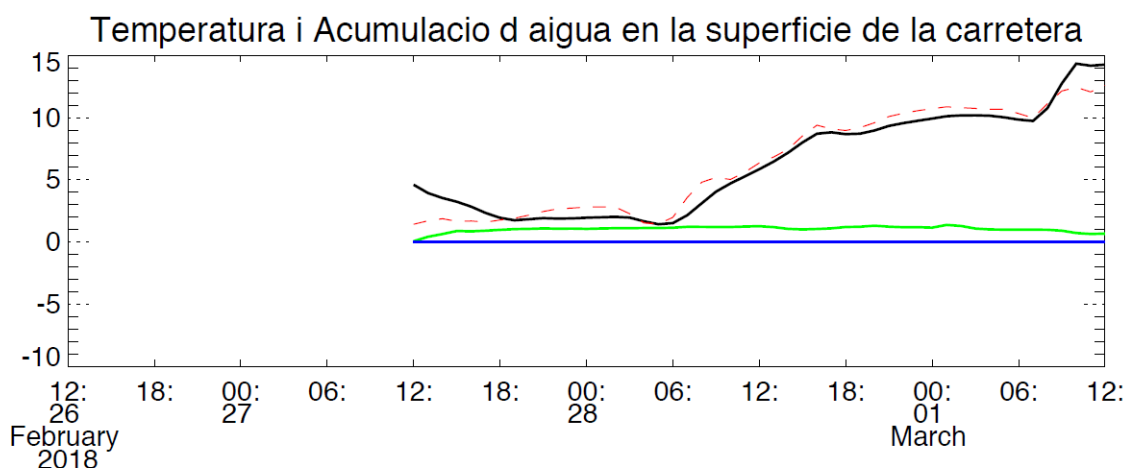
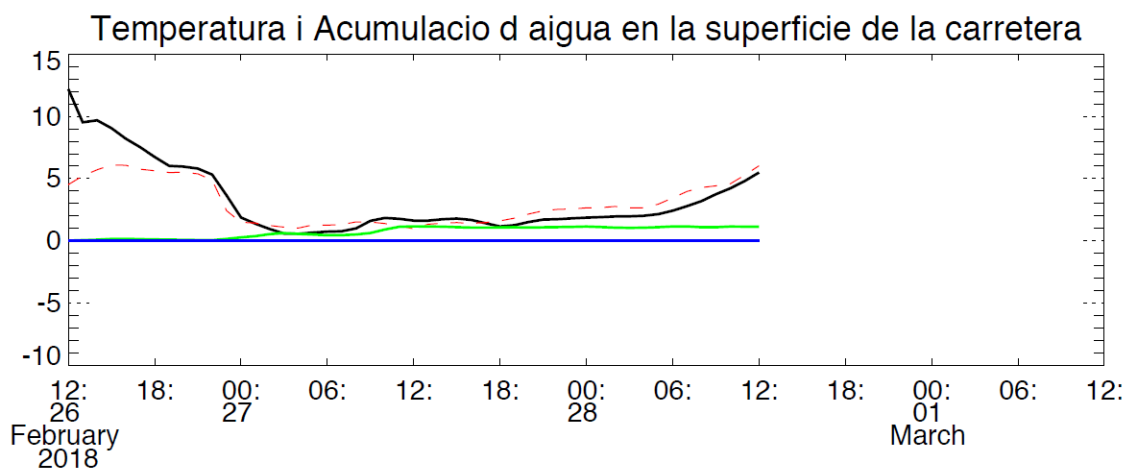
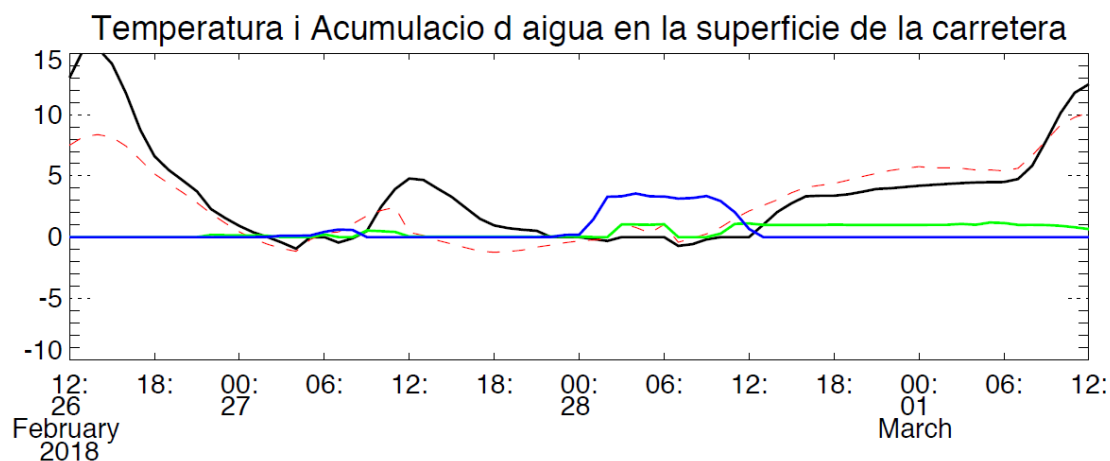
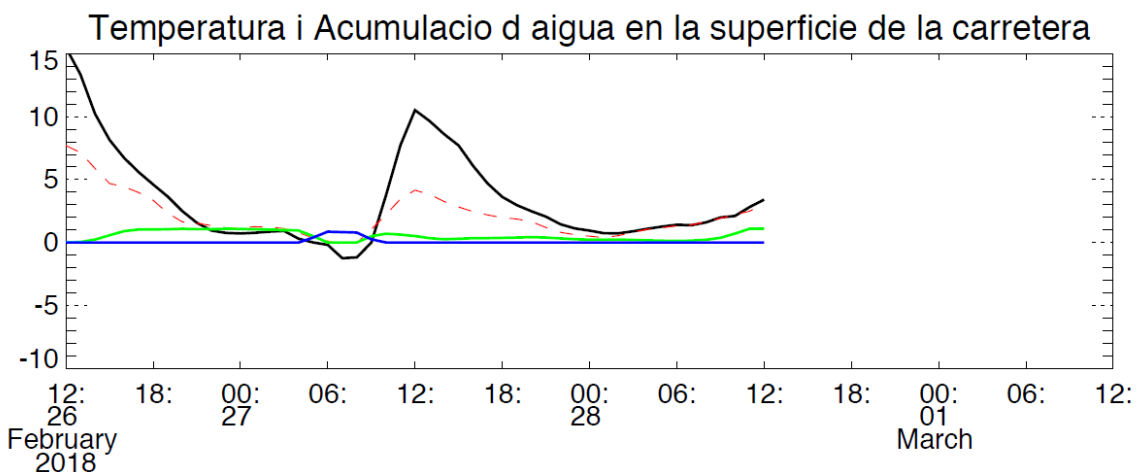
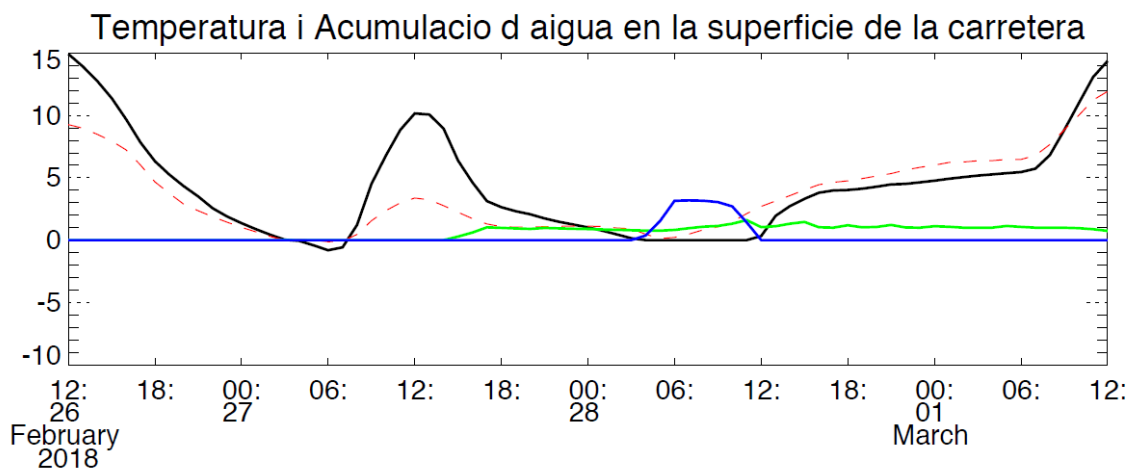


Fig. 3.21. Temperatura del paviment (línia sòlida negra, °C), Temperatura ambient (línia discontinua vermella, °C), Acumulació d'aigua en fase sòlida (línia continua blava, mm d'equivalent en aigua líquida) i acumulació d'aigua en fase líquida (línia sòlida verda, mm) a la calçada a la C-44 a Vandellòs. Superior: Mode Simulació; Mitjana: Mode Previsió 26/02/2018 12:00 UTC; Inferior: Mode Previsió 27/02/2018 12:00 UTC

En aquest tram situat al Baix Camp, encara que s'hi van donar afectacions en la primera part de l'episodi recollides en les taules 3.3 i 3.4, només van ser detectades en el mode simulació. S'observa clarament que en aquest cas, una sobreestimació de la temperatura ambient per part del model HIRLAM és la responsable d'aquest comportament, ja que la presència d'aigua líquida indica que sí que es van donar precipitacions.

En el mode simulació s'observa una coexistència d'aigua líquida i neu durant un període de temps molt llarg durant la matinada del dia 28. Això es deu a que la temperatura ambient era superior als 0°C, i tot i que el model reconegués la precipitació com a neu durant aquell període de temps, l'aigua líquida present en la calçada no canviava de fase.

C-58: Terrassa



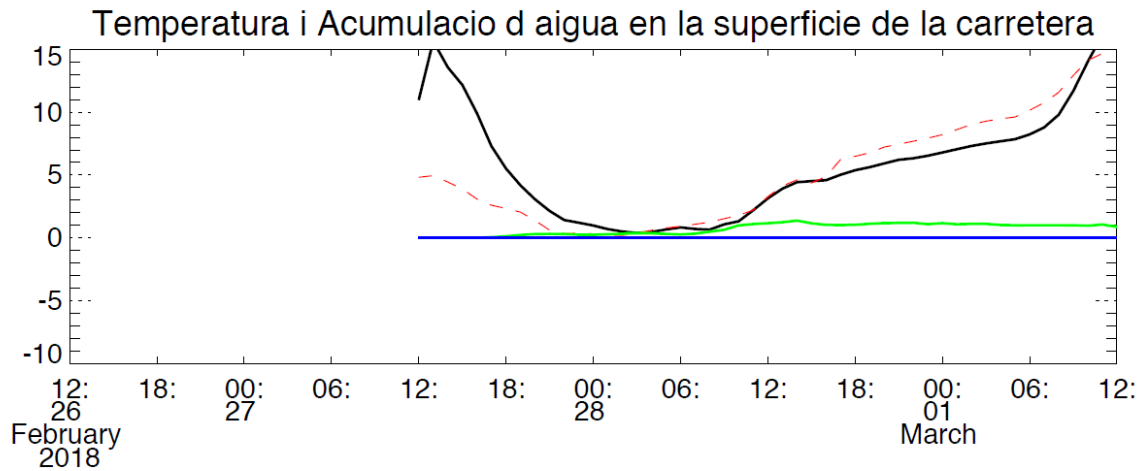
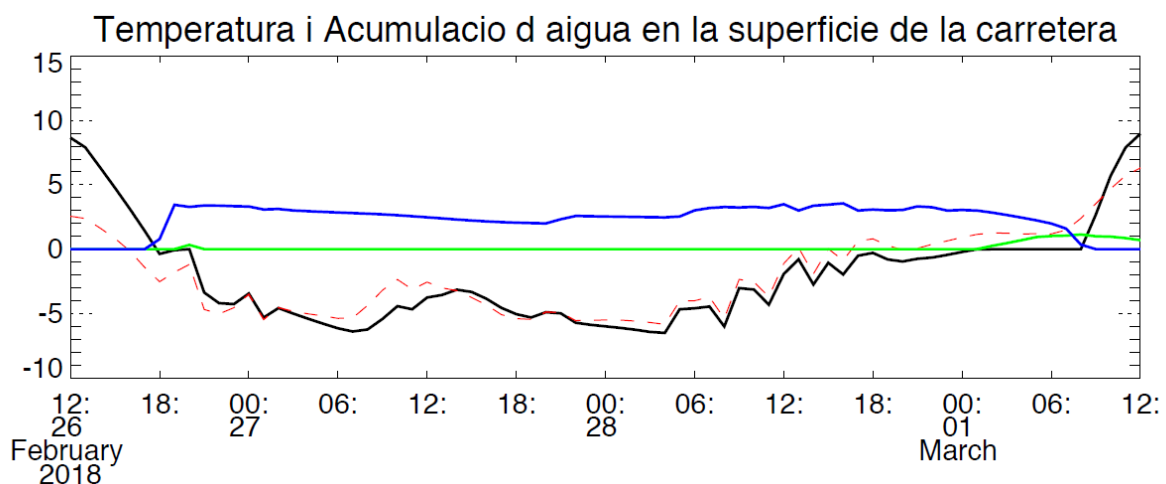


Fig. 3.22. Temperatura del paviment (línia sòlida negra, °C), Temperatura ambient (línia discontinua vermella, °C), Acumulació d'aigua en fase sòlida (línia contínua blava, mm d'equivalent en aigua líquida) i acumulació d'aigua en fase líquida (línia sòlida verda, mm) a la calçada a la C-58 a Terrassa. Superior: Mode Simulació; Mitjana: Mode Previsió 26/02/2018 12:00 UTC; Inferior: Mode Previsió 27/02/2018 12:00 UTC

En aquest tram, si bé es va reportar presència de neu a la via el 28/02/2018 10:00 (Taula 3.4), només en el mode simulació són detectades. Com en el cas anterior, una previsió alçista de la temperatura ambient provoca aquests resultats. En la previsió del 26/02/2018 12:00 sí que s'observa acumulació de neu durant la matinada del dia 27/02, encara que no es té constància de tal incidència.

BV-5114: Campins



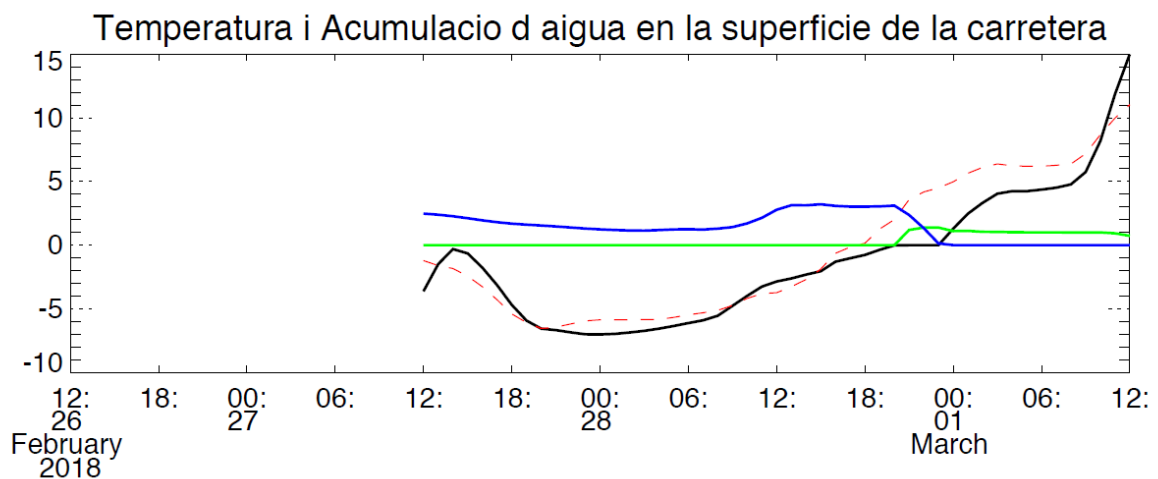
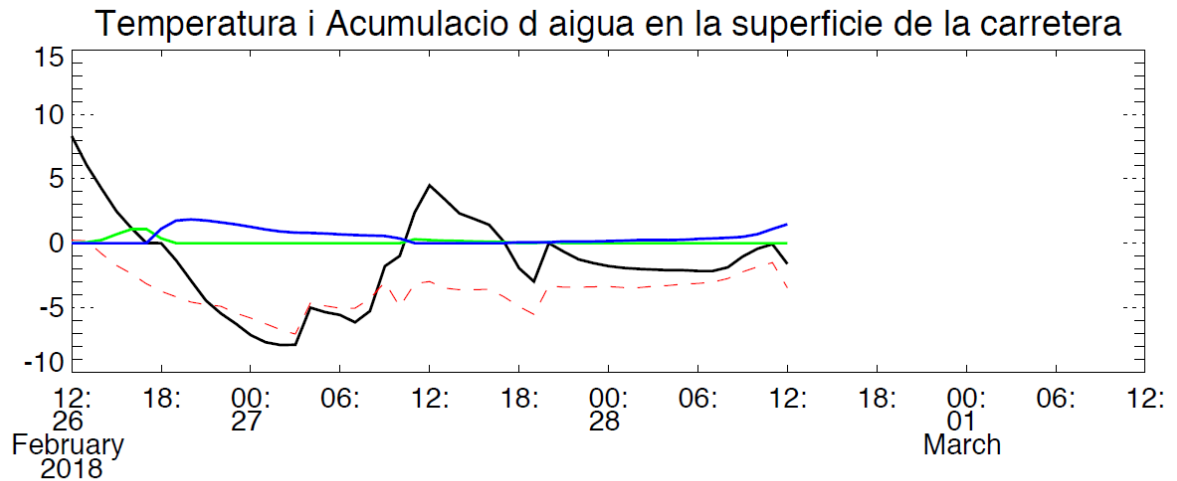


Fig. 3.23. Temperatura del paviment (línia sòlida negra, °C), Temperatura ambient (línia discontinua vermella, °C), Acumulació d'aigua en fase sòlida (línia continua blava, mm d'equivalent en aigua líquida) i acumulació d'aigua en fase líquida (línia sòlida verda, mm) a la calçada a la BV-5114 a Campins. Superior: Mode Simulació; Mitjana: Mode Previsió 26/02/2018 12:00 UTC; Inferior: Mode Previsió 27/02/2018 12:00 UTC

Aquest tram de la serralada Prelitoral va patir afectacions durant totes dues parts de l'episodi. Així ho reflecteix la seva presència en les taules 3.1, 3.2 i 3.3. En aquest tram sí que es detecten afectacions tant en mode simulació com en les dues previsions, tot i que en les previsions l'acumulació de neu és menor, sobretot en la previsió del 26/02/2018 12:00 UTC, que només és capaç de reconèixer-hi afectacions significatives durant la primera part de l'episodi. En tot cas, en aquest tram la temperatura ambient no és sobreestimada per les previsions, però les precipitacions són menys intenses que en el mode simulació.

BV-5031: Arenys de Munt

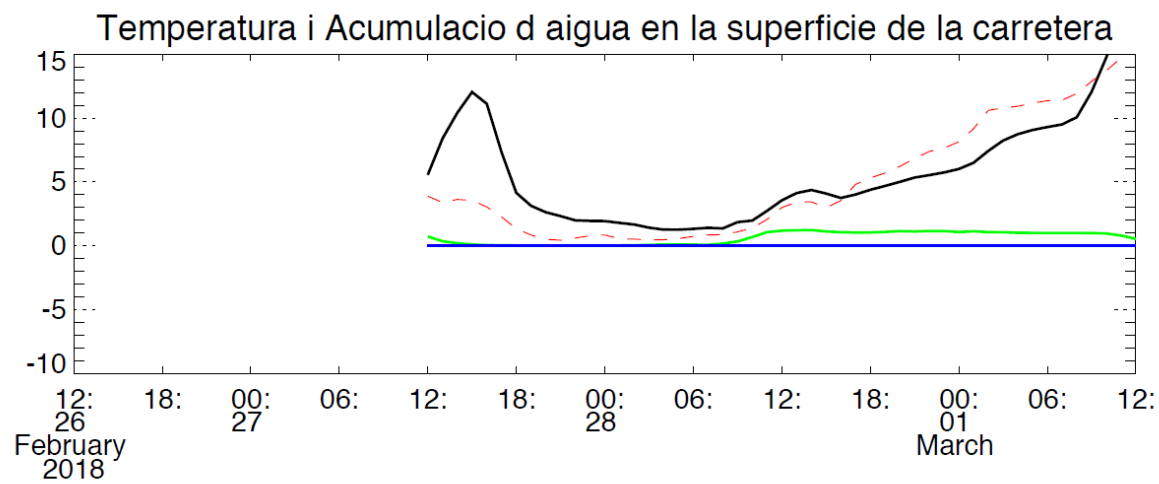
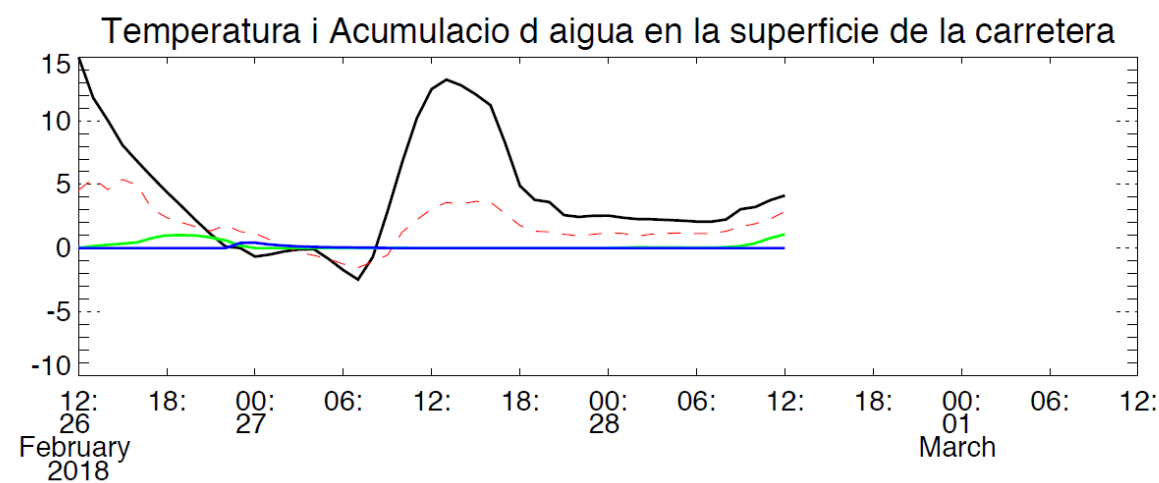
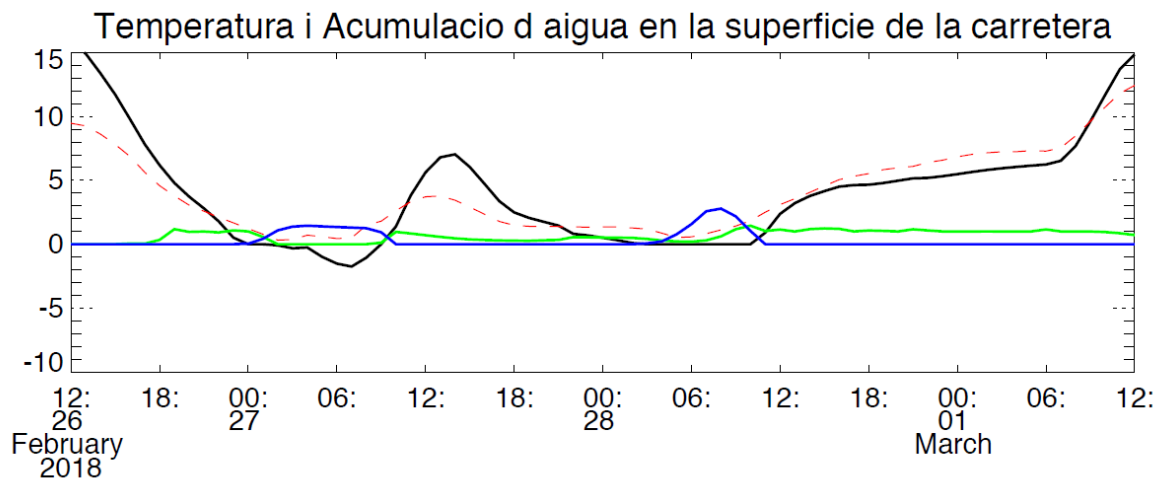
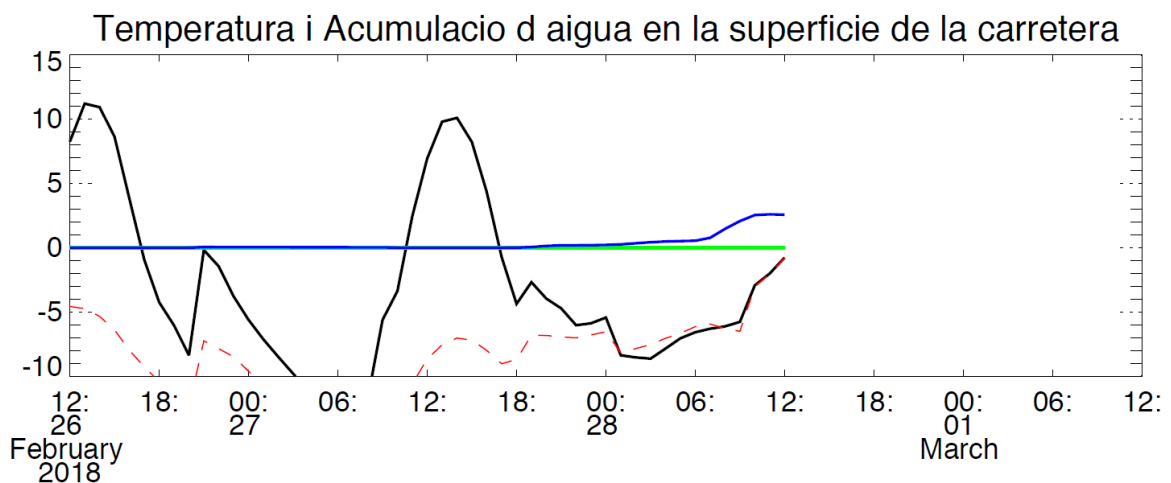
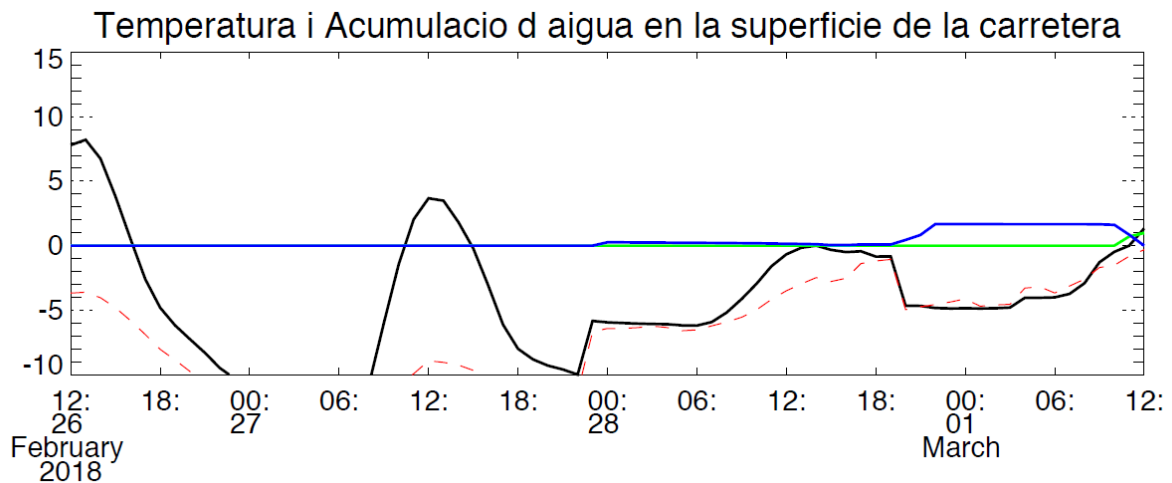


Fig. 3.24. Temperatura del paviment (línia sòlida negra, °C), Temperatura ambient (línia discontinua vermella, °C), Acumulació d'aigua en fase sòlida (línia contínua blava, mm d'equivalent en aigua líquida) i acumulació d'aigua en fase líquida (línia sòlida verda, mm) a la calçada a Arenys de Munt. Superior: Mode Simulació Mitjana; Mode Previsió 26/02/2018 12:00 UTC; Inferior: Mode Previsió 27/02/2018 12:00 UTC

Aquest tram de via apareix en la taula 3.2 i la taula 3.3 en cadenes. El 26/02/2018 20:00 UTC (Taula 3.2) no apareix acumulació de neu en cap de les dues execucions. El 27/02/2018 08:00 UTC (Taula 3.3), en canvi sí que n'apareix: 1,25 mm en simulació i 0,03 mm en la previsió. En la figura 3.24 es pot veure que en tots dos casos l'acumulació de neu arriba endarrerida respecte la realitat. La diferència d'acumulació entre les dues execucions és resultat de la poca precipitació pronosticada pel model HIRLAM, on només s'aprecia un augment en l'aigua acumulada un breu període al voltant de mitjanit.

En la segona part de l'episodi només es detecten afectacions en el mode simulació, ja que en els modes de previsió la temperatura és massa elevada per a permetre l'acumulació de neu en la carretera. Cal destacar que com en la C-58 a Terrassa, en la previsió del 26/02/2018 12:00 l'arribada de la precipitació es troba bastant endarrerida, ja que no es detecta acumulació d'aigua fins passades les 08:00 del dia 28/02.

BV-28: Port de la Bonaigua



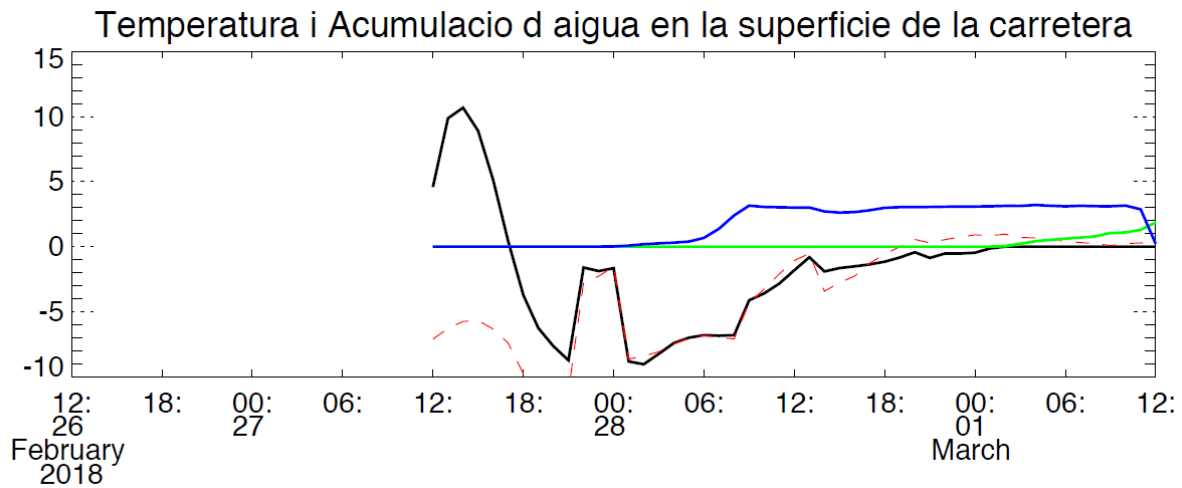
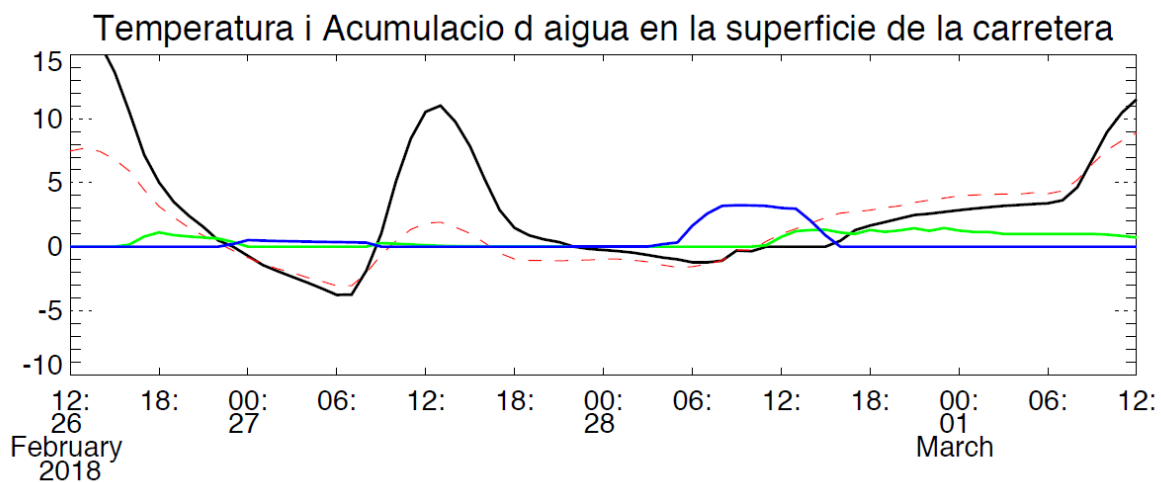


Fig. 3.25. Temperatura del paviment (línia sòlida negra, °C), Temperatura ambient (línia discontinua vermella, °C), Acumulació d'aigua en fase sòlida (línia continua blava, mm d'equivalent en aigua líquida) i acumulació d'aigua en fase líquida (línia sòlida verda, mm) a la calçada a la C-28 al Port de la Bonaigua. Superior: Mode Simulació; Mitjana: Mode Previsió 26/02/2018 12:00 UTC; Inferior: Mode Previsió 27/02/2018 12:00 UTC

En aquest tram, es dona la situació inversa que en la resta dels analitzats: el mode simulació obté resultats pitjors que els generats en els modes de previsió. L'acumulació considerable de neu en la simulació comença al vespre del dia 28/02, mentre que en les previsions succeeix durant la matinada del 28/02. La inexistència de precipitació en mode simulació en aquesta zona és la responsable de la diferència en els resultats.

C-14: Adrall



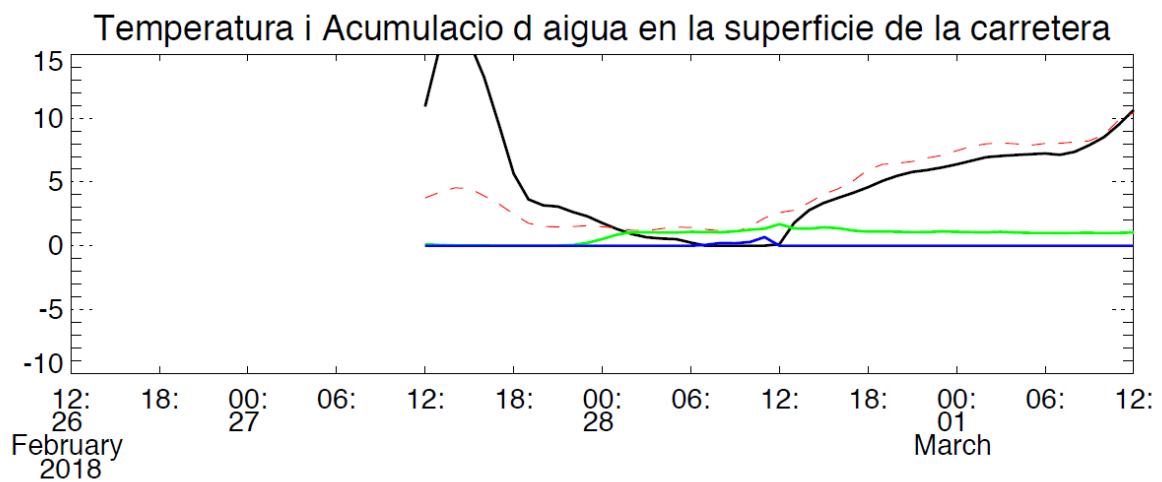
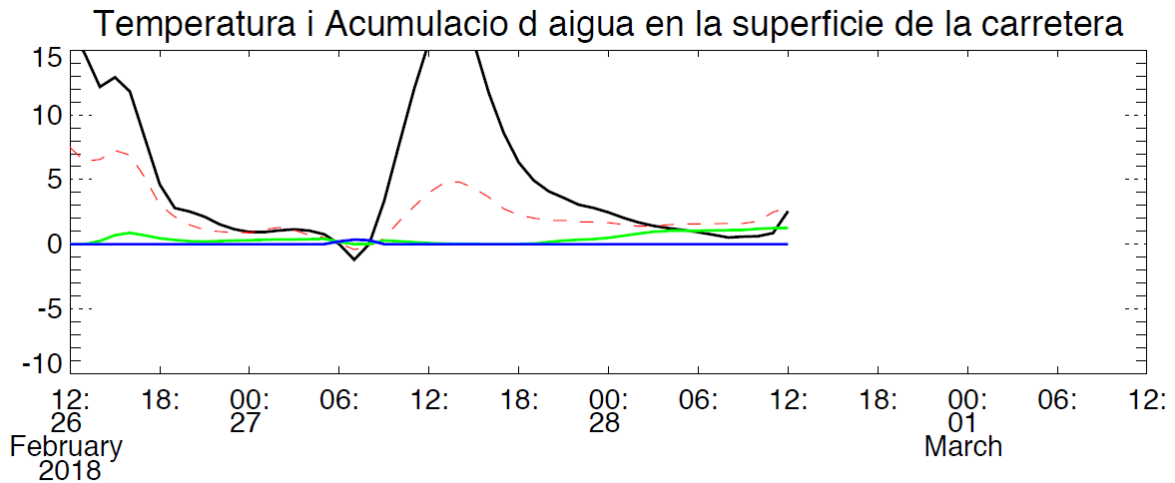


Fig. 3.26. Temperatura del paviment (línia sòlida negra, °C), Temperatura ambient (línia discontinua vermella, °C), Acumulació d'aigua en fase sòlida (línia contínua blava, mm d'equivalent en aigua líquida) i acumulació d'aigua en fase líquida (línia sòlida verda, mm) a la calçada a la C-14 a Ribera d'Urgellet. Superior: Mode Simulació; Mitjana: Mode Previsió 26/02/2018 12:00 UTC; Inferior: Mode Previsió 27/02/2018 12:00 UTC

Aquest tram de l'Alt Urgell va patir afectacions al llarg del 28/02, tal i com queda reflectit en les taules 3.5 i 3.6. Els resultats obtinguts, però, no són capaços de mostrar aquestes incidències de forma correcta. Encara que en el mode simulació sí que apareixen afectacions, aquestes no es mantenen el temps suficient, ja que en la taula 3.6 (28/02/2018 18:00 UTC) l'acumulació de neu en tots els casos és de 0 mm d'equivalent en aigua líquida. En les previsions, només la del 27/02/2018 12:00 és capaç de predir una lleu acumulació de neu. La temperatura excessivament elevada és la responsable dels errors obtinguts.

Per tant, després d'analitzar les sèries temporals i amb l'ajut de les figures 3.18, 3.19 i 3.20 podem concloure que en aquest episodi la diferència entre els nivells d'afectacions obtinguts en els diferents modes respon a diferents motius en funció de la zona estudiada:

- En el Sud de Catalunya i zones pròximes al litoral: s'observa una clara sobreestimació de la temperatura.

- En la resta del territori: no s'observa una sobreestimació de la temperatura de forma generalitzada, encara que en certs punts com ara el tram de la C-14 a Adrall sí que es dona. En canvi, si que es tendeix a subestimar la precipitació en els modes de previsió.

És interessant comentar com en alguns resultats de les taules 3.2, 3.3, 3.4 i 3.5, si bé apareixen trams tallats, no queden reflectits en els resultats. El motiu pel qual això passa és el terme d'escolament que redueix la quantitat de neu un cop l'acumulació excedeix els 3 mm d'equivalent en aigua líquida. L'aplicació d'aquest terme té varies funcions:

- Evitar la sobreacumulació d'aigua en la carretera que donaria lloc a falses alertes de carretera impracticable en molts trams.
- Simular el pas de llivaneus i demés vehicles, que no permeten que la cobertura de neu adquireixi grans gruixos, si bé la neu que s'hi acumula té una alta densitat.

En sintonia amb els punts precedents, l'aplicació d'aquest terme evita una persistència excessiva del nivell d'alerta elevat en les carreteres ja que, a l'evitar una gran acumulació de neu, permet que la situació millori relativament ràpid en els trams afectats un cop canvien les condicions meteorològiques.

Tot i això, l'aplicació d'aquest terme tal i com es troba definit en (Crevier and Delage 2001) provoca que ni en els casos més intensos l'acumulació de neu superi els 5 mm d'equivalent en aigua líquida. La solució podria passar per redefinir l'índex de trànsit, però tot i això el problema no es solucionaria, ja que finalment la decisió de tancar l'accés a una via o una altra és arbitrari. Els recursos disponibles són limitats i les administracions han d'escollir en quines vies s'hi realitzaran actuacions de forma més freqüent i en quines seran quasi inexistent.

Per aquest motiu la previsió temporal del final de les afectacions esdevé especialment complicat, motiu pel qual és millor centrar-se en la correcta detecció del principi de les incidències, que en aquest cas és bastant acurat. Per tant, podem concloure que si bé hi ha certes discrepàncies entre els resultats obtinguts i la realitat, en general podem considerar que el model s'ha comportat bé en aquest primer episodi.

3.2 Episodi 04/02/2018 – 07/02/2018

El segon cas presentat està associat a una llevantada que va afectar principalment els Pirineus gironins i la zona pròxima al Cadí. Si bé aquesta nevada no va ser generalitzada en tot el territori, en les zones afectades es van donar moltes incidències de trànsit. Talls en carreteres i l'obligació d'equipaments especials van desembocar en retencions i col·lapses en les vies que van deixar atrapats durant hores als conductors. En la Cerdanya i part del Ripollès fins i tot el servei de transport escolar es va anul·lar per la quantitat de neu.

3.2.1 Sumari de l'episodi

Tal i com s'ha fet amb l'episodi del 28/02, gràcies a les notícies publicades en diferents diaris, agències meteorològiques i del trànsit s'ha pogut fer una validació qualitativa del funcionament del model d'una forma qualitativa l'habilitat del model per a predir situacions de difícil circulació. Per tant, es procedirà a realitzar un resum de l'episodi segons les notícies aparegudes:

- Principi de les nevades: Diumenge 04/02 al Pirineu.
- Nevades molt fortes que han obligat a tallar el transport públic a la Cerdanya, Ripollès, Osona, Alt Urgell i Berguedà durant el 05/02.
- Fora del Pirineu, entre diumenge i dilluns la neu va agafar a la serralada prelitoral i als altiplans de l'interior a partir d'uns 700 m, amb gruixos superiors als 20 cm a les parts altes dels Ports, el Montseny, Guillerics i Collsacabra. En alguns moments la neu va caure fins a cotes al voltant dels 400 m, com és el cas d'Osona, Solsonès i la Garrotxa durant la nit de diumenge a dilluns, o de les comarques de l'extrem sud dimarts al matí..
- A les dues del migdia del dia 05/02 encara romanien tancades 7 carreteres, 4 amb restriccions per a camions i 46 més necessitaven cadenes.
- En el balanç de la generalitat de Catalunya es destaca la persistència de la precipitació, que s'allargà fins a 48 hores en zones del Pirineu i Prepirineu amb una cota general de 600 a 800 metres:

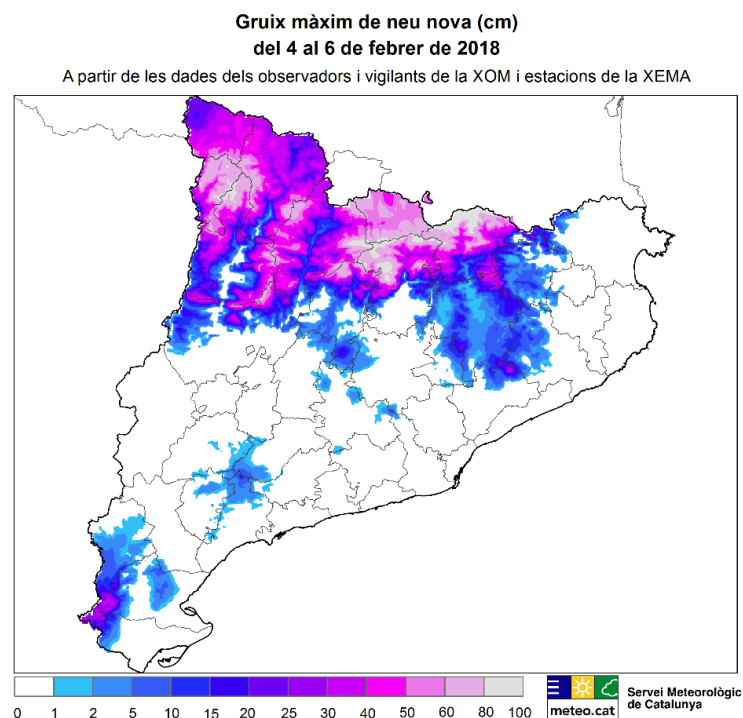


Fig. 3.27. Acumulació de neu entre el 04/02 i 06/02, Font: SMC

- Durant el matí del 06/02 encara es registren incidències en el trànsit tot i que van remetent: a les 8 del matí encara hi ha cinc vies tallades i una quarantena necessiten equipaments especials.
- Si bé no va arribar a nevar en la totalitat del territori, allà on no ho va fer les precipitacions van ser en estat líquid. Van ser molt abundants, i en certs punts com ara Vallirana, Canyelles o Sant Pere de Ribes la precipitació va arribar a superar màxims històrics de precipitació en un dia del mes de febrer.

3.2.2 Presentació de Resultats

Com en l'episodi anterior, s'executa el model amb tres conjunts de dades. En la taula a continuació (Taula 3.7) es pot observar quina és la data d'inici i final de cada execució. En tots tres casos el model s'inicialitza 48 hores abans amb dades extretes del SMC.

Taula 3.7. Temps d'inici i final de les diferents execucions

Mode de funcionament	Inici execució	Final execució
Simulació	04/02/2018 00:00 UTC	07/02/2018 00:00 UTC
Previsió	04/02/2018 00:00 UTC	06/02/2018 00:00 UTC
Previsió	05/02/2018 00:00 UTC	07/02/2018 00:00 UTC

En el mode simulació, no s'aprecien incidències fins a les 12:00 del diumenge dia 04/02 (fig. 3.28a), moment a partir del qual la situació comença a empitjorar amb l'arribada de les precipitacions, situació que continua al llarg de la tarda (fig 3.29 a).

En canvi, en mode previsió, les primeres afectacions sorgeixen a partir de les 18:00 (fig 3.29 b)

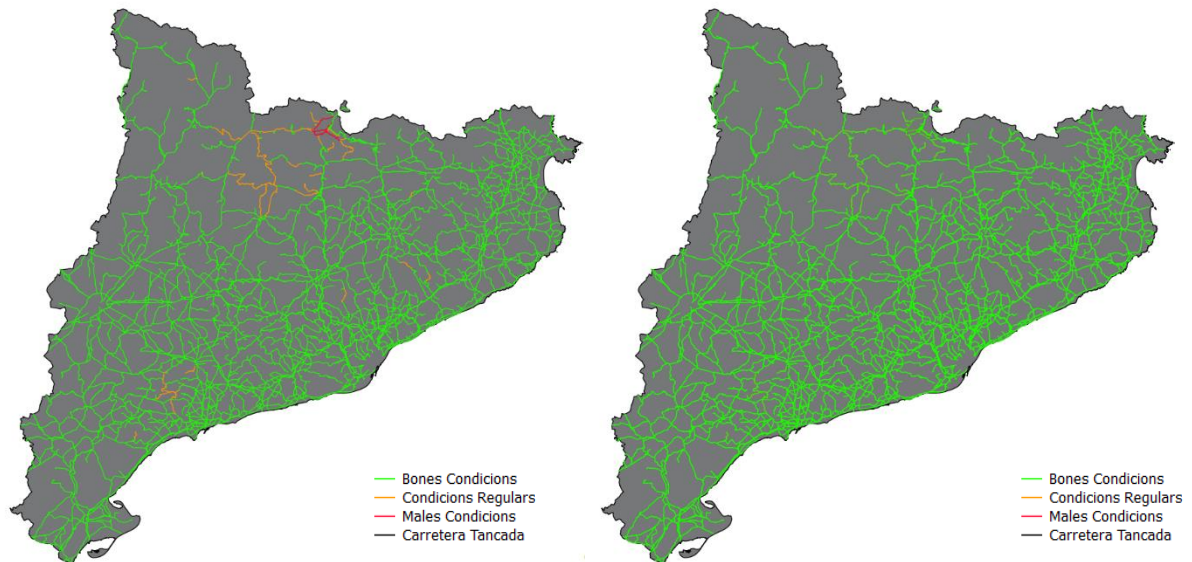


Fig. 3.28. Índex de circulació 04/02/2018 12:00. Esquerra (a): Mode simulació; Dreta (b): Mode Previsió lead time: 12 hores

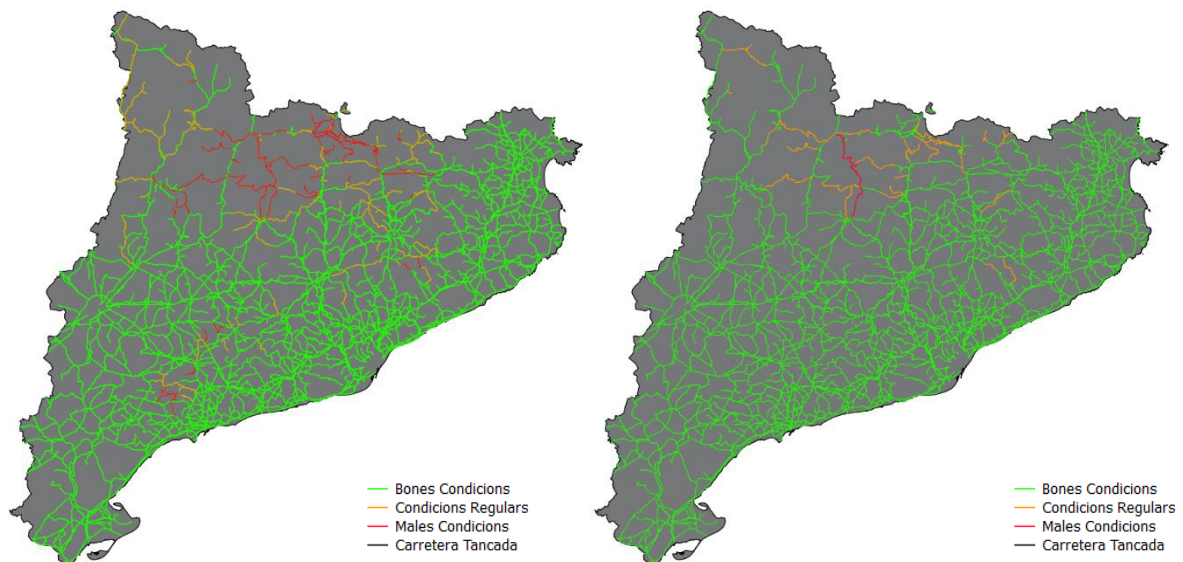


Fig. 3.29. Índex de circulació 04/02/2018 18:00. Esquerra (a): Mode simulació; Dreta (b): Mode Previsió lead time: 18 hores

A la mitjanit, moment en el que comença la segona previsió, en mode simulació s'aprecia una severa afectació en els Pirineus a la Cerdanya i en parts del Ripollès, l'Alt Urgell i el Solsonès. Fora dels Pirineus, en zones de la serralada Prelitoral als voltants de Vic, en l'altiplà de la Segarra i en les muntanyes de Prades també apareixen trams amb un fort nivell d'alerta.

En la previsió, la mateixa zona dels Pirineus es veu afectada. Si bé ho fa amb una menor intensitat, s'observa una major intensitat en la zona de la Vall d'Aran. Fora dels Pirineus només en la serralada Prelitoral s'aprecien trams en alerta.

En les hores següents la situació continua empitjorant fent créixer el nivell d'alerta en les zones afectades, si bé no n'afecta de noves. S'arriba al nivell de màxima afectació el 05/02/2018 05:00 en els modes simulació (fig 3.30 a) i la previsió del 04/02 00:00 (fig 3.30 b).

En la previsió del 04/02 00:00, aquesta situació es dona a les 02:00 (fig 3.31), si bé es manté quasi en la mateixa intensitat les següents hores. Apareixen les mateixes zones afectades que en el mode simulació, encara que en la Segarra i muntanyes de Prades la intensitat és sensiblement menor.

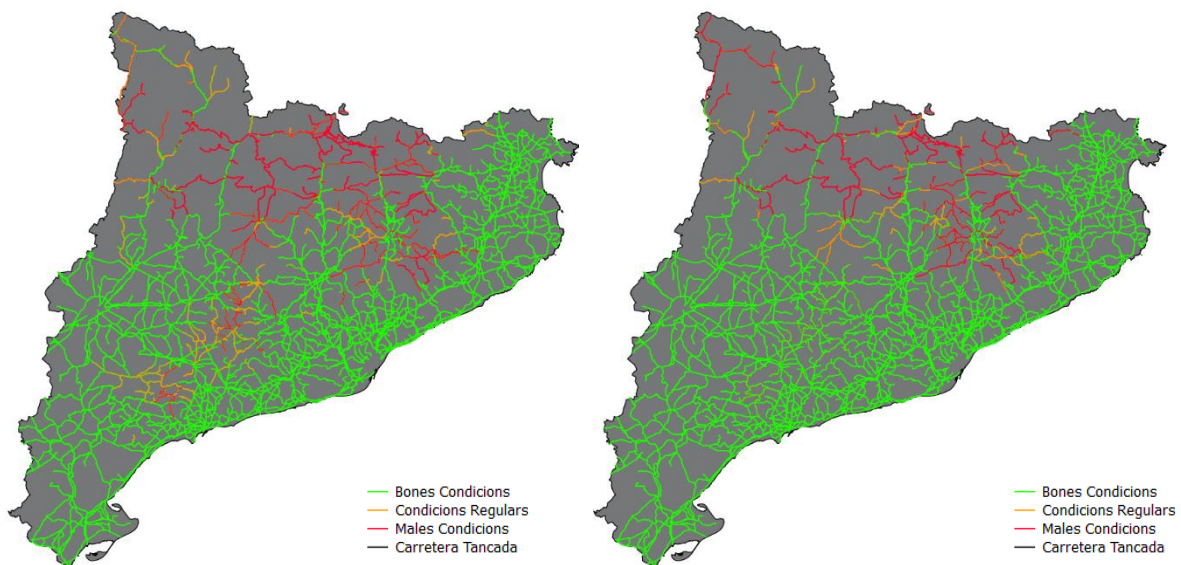


Fig. 3.30. Índex de circulació 05/02/2018 05:00. Esquerra (a): Mode simulació; Dreta (b): Mode Previsió lead time: 5 hores

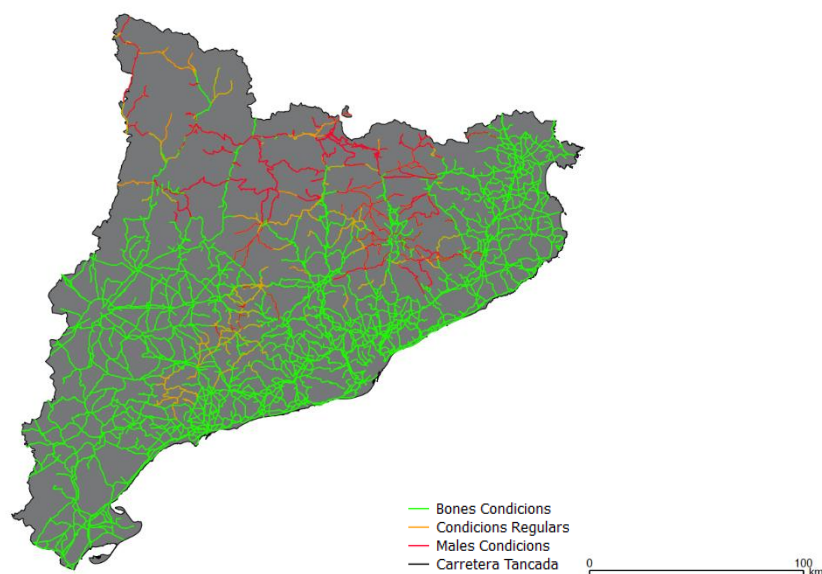


Fig. 3.31. Índex de circulació 05/02/2018 02:00 en mode Previsió lead time: 26 hores

Durant el matí les complicacions remeten. A les 14:00, en mode observació ja només s'aprecien trams afectats en els Pirineus i muntanyes de Prades (fig 3.32a). En les previsions el nivell d'alerta es dissipa més ràpidament: en la previsió del 05/02 00:00 (fig 3.32c) les afectacions es redueixen a certs trams en la Cerdanya, Alt Urgell i Vall d'Aran, i en la previsió del 04/02 00:00 (fig 3.32b) la situació ha tornat a la normalitat a excepció d'algun tram aïllat.

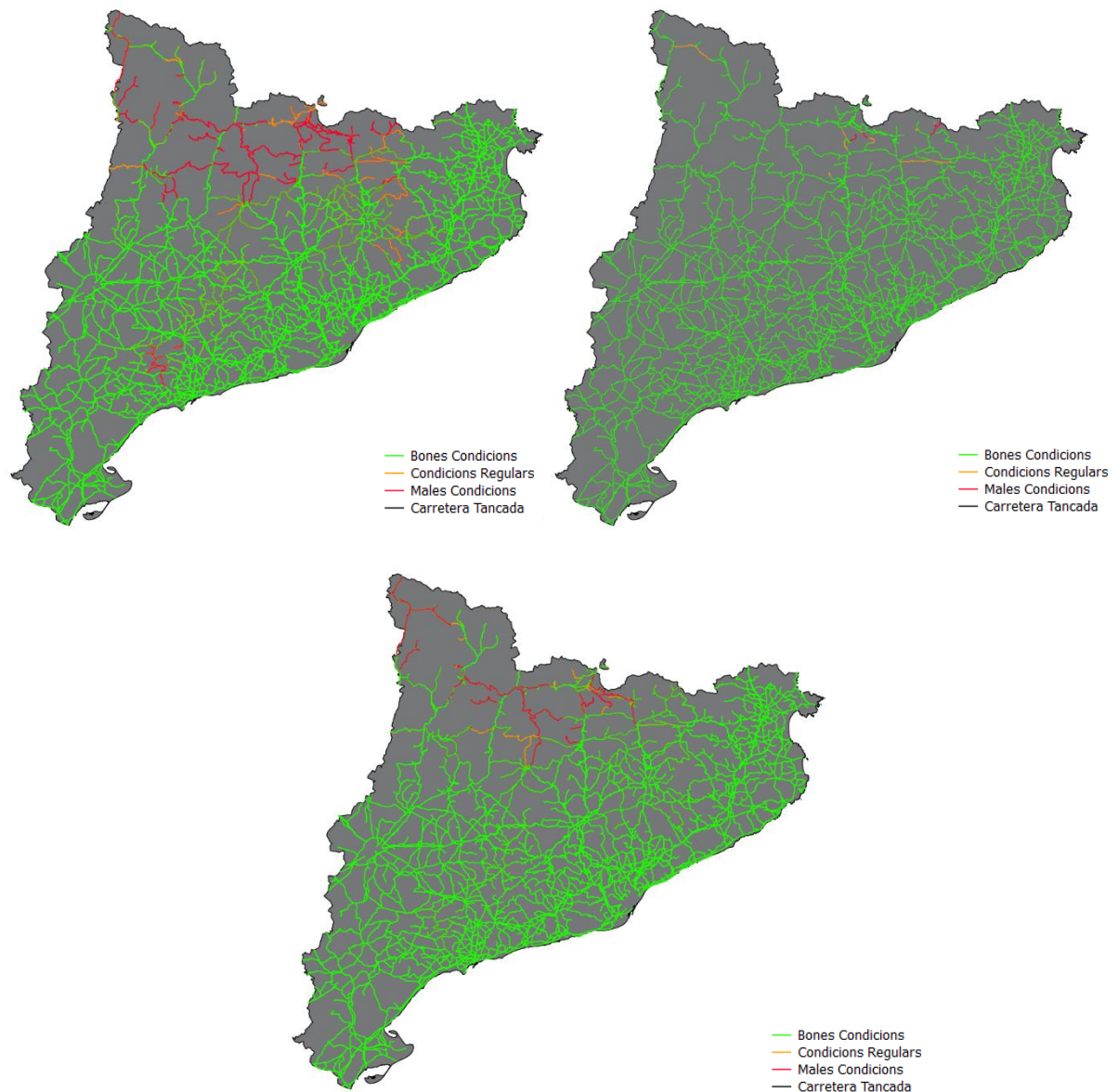


Fig. 3.32. Índex de circulació 05/02/2018 14:00. Superior esquerra (a): simulació, Superior dreta (b): previsió 04/02/2018 00:00 UTC lead time de 38 hores, Inferior (c): previsió 05/02/2018 00:00 UTC lead time de 14 hores

Durant la tarda la situació es manté si bé amb l'arribada de la nit i la baixada de temperatures alguns trams als Pirineus presenten afectacions. Durant el matí del dia 06/02 aquestes desapareixen (Fig 3.33), encara que a partir del migdia del dia 06/02 en el mode previsió apareixen trams amb incidències en la Sud de Catalunya a les muntanyes de Prades i el parc natural d'Els Ports (Fig. 3.34). En el mode simulació (fig 3.34a) no hi ha percepció d'aquest nivell d'alerta en la zona Sud de Catalunya si ve es mantenen les afectacions menors el la zona de Prades.

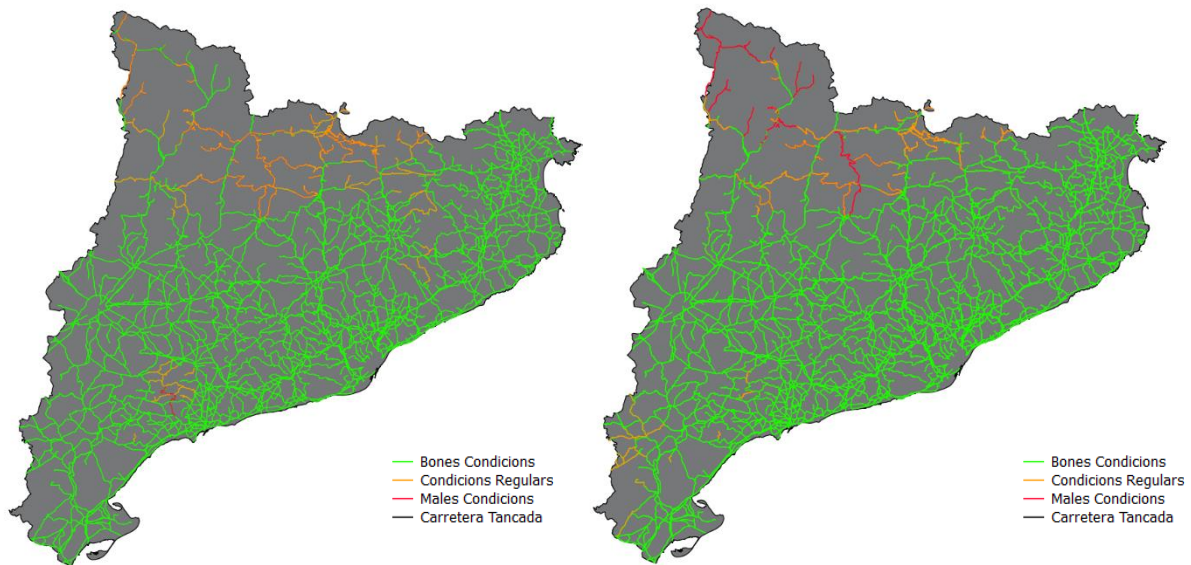


Fig. 3.33. Índex de circulació 06/02/2018 10:00. Esquerra (a): Mode simulació; Dreta (b): Mode Previsió lead time: 34 hores

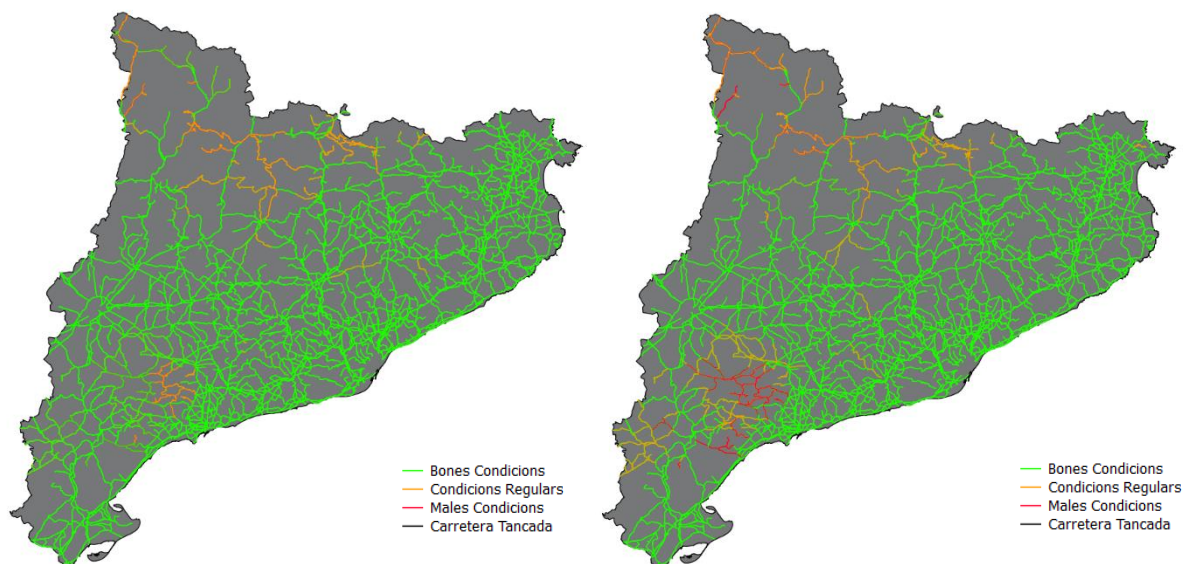


Fig. 3.34. Índex de circulació 06/02/2018 22:00. Esquerra (a): Mode simulació; Dreta (b): Mode Previsió lead time: 46 hores

3.2.3 Valoració i comparació dels Resultats

A primera vista, els resultats obtinguts no són tant bons com en l'episodi anterior. Encara que s'aprecia el caràcter localitzat de l'episodi al Pirineu i punts alts de la serralades litoral i prelitoral, no s'aprecia la intensitat que es va donar segons les informacions del servei meteorològic i la Generalitat. Aquesta afirmació esdevé menys encertada en el cas de les previsions, en les quals no s'observen afectacions importants en la zona Sud de Catalunya el dia 05/02/2018. En la segona previsió sí que apareixen si bé de forma molt moderada, i principalment degut a les condicions inicials sobre les quals s'executa el model (provinents de dades d'estacions meteorològiques). Tot i això, en la segona previsió s'aprecia un empitjorament en el Sud de Catalunya durant el dia 06/02, cosa que en l'observació no es dona i sí va passar en realitat.

Anàlogament a l'episodi anterior, ens servirem de les informacions publicades per Trànsit i Protecció Civil per a realitzar la validació dels resultats.

Taula 3.8. Situació carreteres 04/02/2018 19:00. Els valors numèrics indiquen mm d'equivalent en aigua líquida acumulada. El codi de colors representa el índex de conducció de cada tram

Tram	Nivell afectació	Simulació	Previsió 04/02 00:00
C-25 (Espinelles)	Cadenes	0	0
C-16 (Tunel del Cadí)	Cadenes	3,13	2,77

Taula 3.9. Situació carreteres 05/02/2018 09:00. Els valors numèrics indiquen mm d'equivalent en aigua líquida acumulada. El codi de colors representa el índex de conducció de cada tram

Tram	Nivell afectació	Simulació	Previsió 04/02 00:00	Previsió 05/02 00:00
GIV-4016 (Toses-Planoles)	Tallada	3,52	3,17	3,44
C-28 (Port de la Bonaigua)	Tallada	0,15	3,06	3,33
BV-4024 (Coll de Pal)	Tallada	3,38	3,07	3,37
BV-5301 (Seva-El Brull)	Tallada	3,24	2,28	1,1
BV-4114 (Campins)	Tallada	3,39	1,91	1,84
B-400 (Guardiola de Berguedà)	Tallada	3,23	2,98	3,28
B-431 (Prats de Lluçanès)	Cadenes	0	0	0
B-520 (Taradell)	Cadenes	2,51	1,48	0
BP-4654 (Alpens)	Cadenes	3,09	3,13	2,51
BV-2441 (Pontons)	Cadenes	0	0	0
BV-4021 (Guardiola de Berguedà)	Cadenes	3,36	0	0
BV-4022 (Cercs - Nou de Berguedà)	Cadenes	2,12	0	0
BV-4025 (Cercs- Fígols)	Cadenes	3,35	3,04	3,38
BV-4242 (Berga)	Cadenes	3,27	2,03	2,15

Taula 3.10. Situació carreteres 05/02/2018 19:00. Els valors numèrics indiquen mm d'equivalent en aigua líquida acumulada. El codi de colors representa el índex de conducció de cada tram

Tram	Nivell afectació	Simulació	Previsió 04/02 00:00	Previsió 05/02 00:00
B-400 (Guardiola de Berguedà - Gòsol)	Tallada	3,02	1,21	3,24
BV-5114 (Campins)	Tallada	2,95	0	0
BV-4024 (Coll de Pal)	Tallada	3,17	2,41	3,19
C-28 (Port de la Bonaigua)	Tallada	0,08	3,01	3,2
C-38 (Coll d'Ares)	Tallada	3,23	3,1	0
GIV-4016 (Toses-Planoles)	Tallada	3,26	0,06	0,17
GIV-5201 (Viladrau)	Tallada	2,99	0	0
C-563 (Tuixent - Gòsol)	Tallada	3,01	3,08	3,23

L-401 (Coll de Jou)	Tallada	3,11	0,28	2,36
C-16 (Bagà - Puigcerdà)	Cadenes	3,16	3,11	3,11
N-141C (Mallà)	Cadenes	0	0	0
B-400 (Saldes)	Cadenes	3,01	0	0
B-402 (Guardiola de Berguedà)	Cadenes	3,14	0	0
B-431 (Sant Feliu Sasserra)	Cadenes	0	0	0
BV-4021 (Guardiola de Berguedà)	Cadenes	3,05	0	0
BV-4022 (Nou de Berguedà)	Cadenes	0	0	0
BV-4031 (Castellar de n'Hug)	Cadenes	3,22	3,14	3,18
BV-4242 (Berga)	Cadenes	0	0	0
BV-4243 (Berga)	Cadenes	3	1,59	3,32
BV-4656 (Borredà)	Cadenes	2,91	0	0
LV-4241 (Guixers)	Cadenes	3,01	0,34	2,92
C-59 (Sant Quirze Safaja)	Cadenes	0	0	0

Taula 3.11. Situació carreteres 06/02/2018 13:00. Els valors numèrics indiquen mm d'equivalent en aigua líquida acumulada. El codi de colors representa el índex de conducció de cada tram

Tram	Nivell afectació	Simulació	Previsió 05/02 00:00
GIV-4016 (Toses-Planoles)	Tallada	1,89	0
GIV-5201 (Viladrau)	Tallada	0	0
C-28(Port de la Bonaigua)	Tallada	0	3,04
BV-4024 (Coll de Pal)	Tallada	2,77	2,72
T-334 (Horta de Sant Joan - Bot)	Tallada	0	0

Si bé en l'episodi anterior els resultats representaven correctament la realitat, en aquest cas només podem considerar-los igualment correctes el 05/02/2018 al voltant de les 09:00, on la majoria de trams afectats mostren acumulacions de neu significatives. Si bé en mode observació sí que es generen resultats relativament satisfactoris, hi ha trams en el Pirineu que van patir grans afectacions, i no queda reflectit, com ara certs trams al Berguedà i serralada Prelitoral. En la resta de taules, sobretot en les previsions, el model no és capaç de detectar incidències en molts dels trams afectats.. Aquests resultats insatisfactoris es deuen a la diferència de temperatura ambient, i en conseqüència a la localització de precipitacions en estat sòlid.

Observant les figures 3.35 i 3.36 es confirma la hipòtesis de la sobreestimació de la temperatura sobretot en les previsions, on es reconeixen molt fàcilment les valls en els Pirineus on no s'hi detecta l'acumulació de neu. Aquest comportament es veu especialment en la Cerdanya, al Pallars seguint la Noguera Pallaresa i la vall del Valira direcció Andorra.

Tot i això, en les previsions la intensitat de la precipitació sembla major, ja que en els punts en els que aquesta és considerada com a neu s'aprecia una majora acumulació. En la figura 3.36 s'observa que en el Sud de Catalunya l'acumulació de neu és molt major que en la simulació. Aquesta diferència explica que en la segona previsió es doni un nivell d'afectació molt superior durant el dia 06/02.

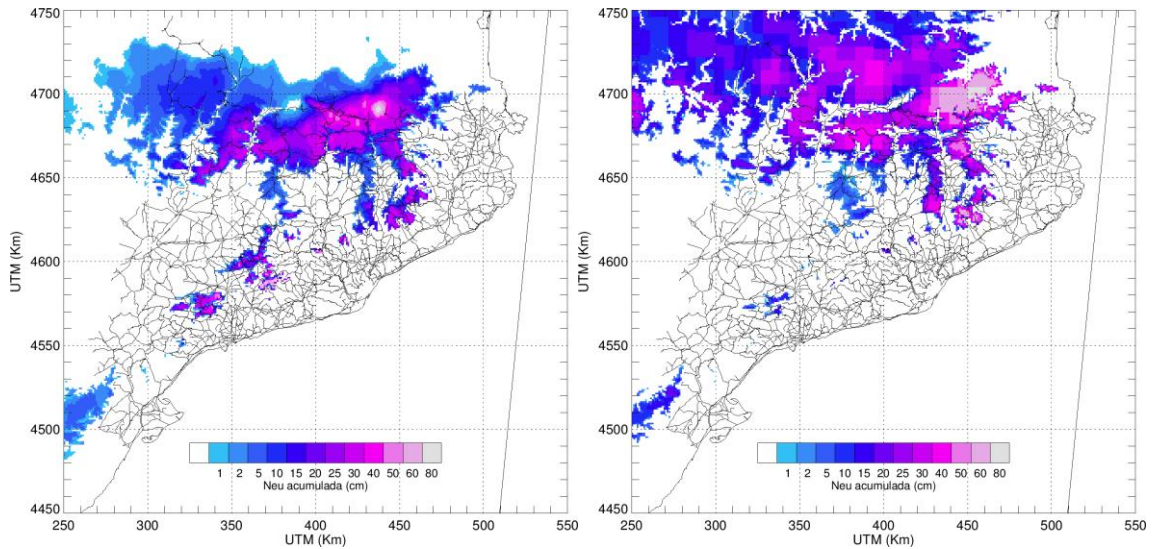


Fig. 3.35. Acumulació de neu nova entre el 04/02/2018 12:00 i el 06/02/2018. Relació 1 a 1 entre mm d'equivalent en aigua líquida i cm de neu. Esquerra: Mode simulació; Dreta: Mode Previsió

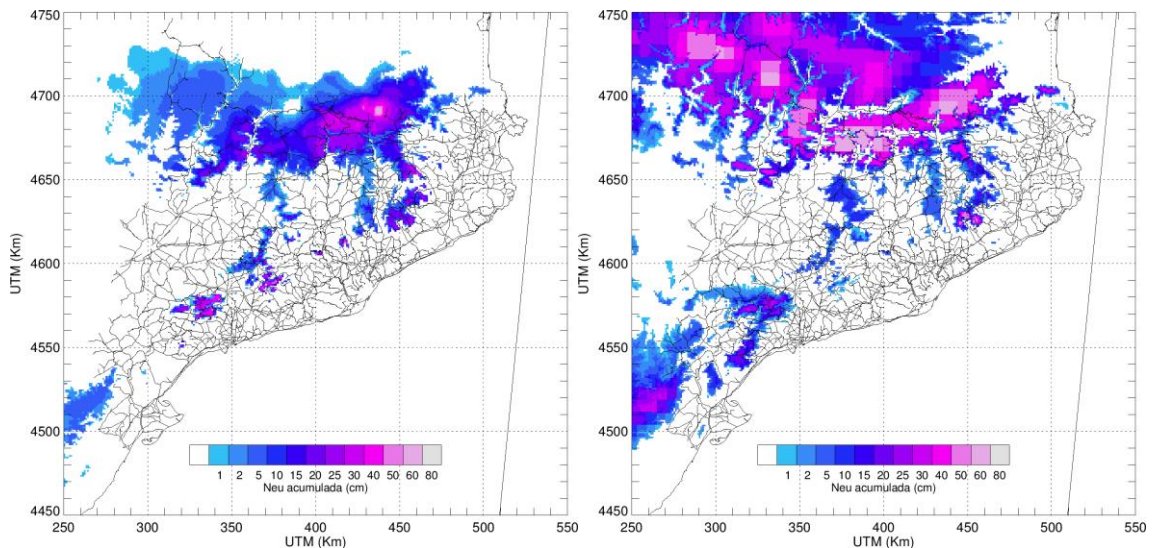


Fig. 3.36. Acumulació de neu nova entre el 26/02/2018 12:00 i el 28/02/2018. Relació 1 a 1 entre mm d'equivalent en aigua líquida i cm de neu. Esquerra: Mode simulació; Dreta: Mode Previsió

Aquesta diferència de temperatura també es veu reflectida en la temperatura de la superfície de la calçada (Fig 3.37) a excepció del dia 06/02 en la zona meridional de Catalunya.

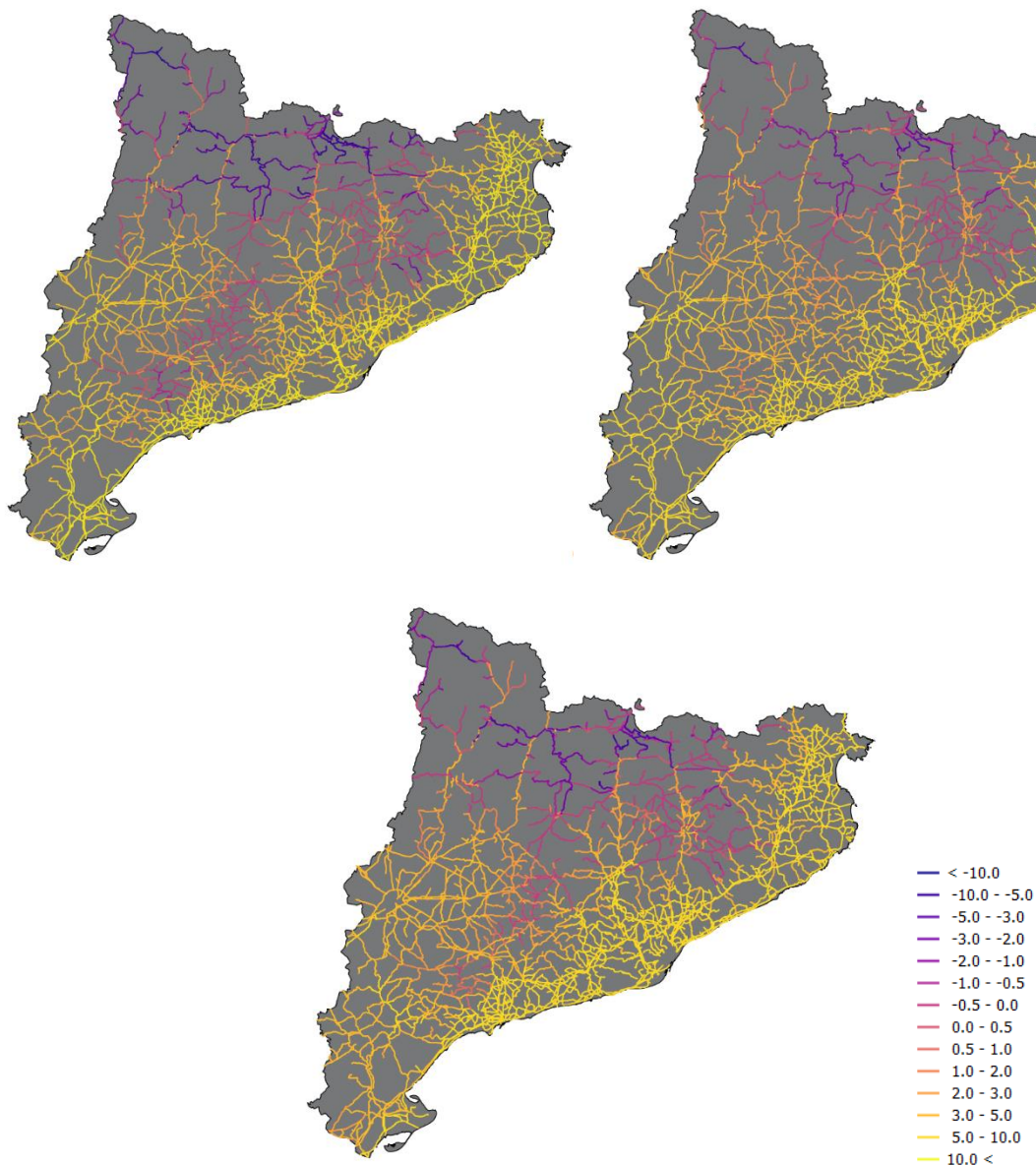


Fig. 3.37. Temperatura paviment (°C) 05/02/2018 05:00. Superior esquerra (a): simulació; Superior dreta (b): previsió 04/02/2018 00:00 UTC, lead time 29 hores; Inferior (c): previsió 04/02/2018 00:00 UTC, lead time 5 hores

Com en l'episodi anterior, en el mode observació no es detecten afectacions majors a la Vall d'Aran, mentre que en les previsions sí, confirmant de nou els problemes de la xarxa de radars per detectar-hi precipitacions.

A continuació es presenten les sèries temporals de varis trams que van ser afectats durant l'episodi:

- BV-2441 a Pontons
- GIV-5201 a Viladrau
- BV-4022 a Nou de Berguedà
- GIV-4016 entre Toses i Planoles
- T-334 a Bot

BV-2441 a Pontons

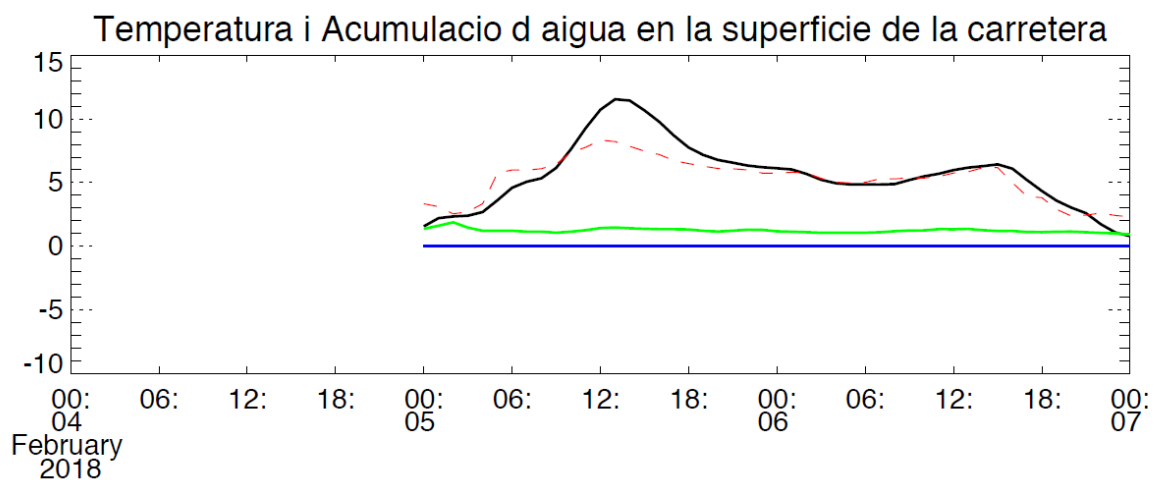
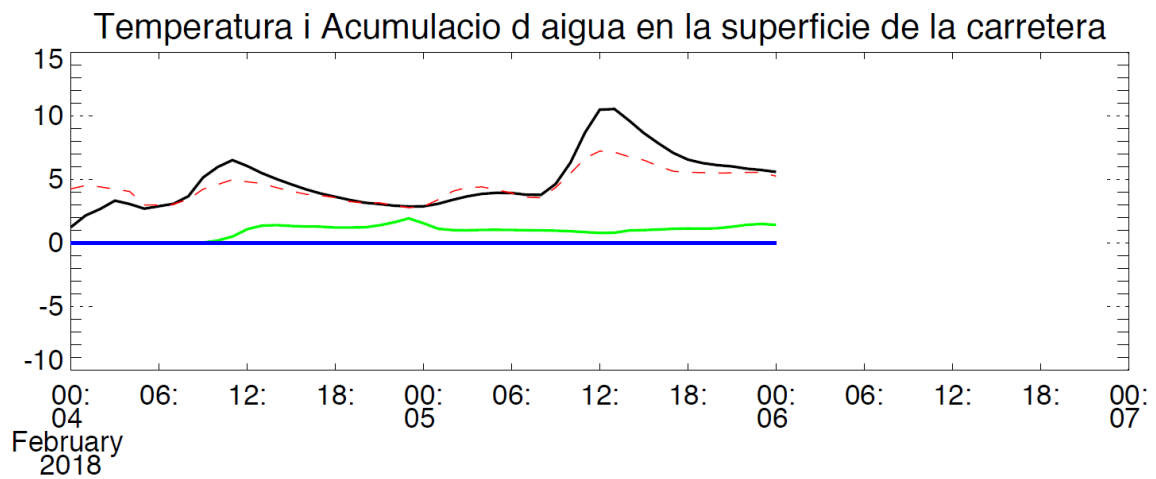
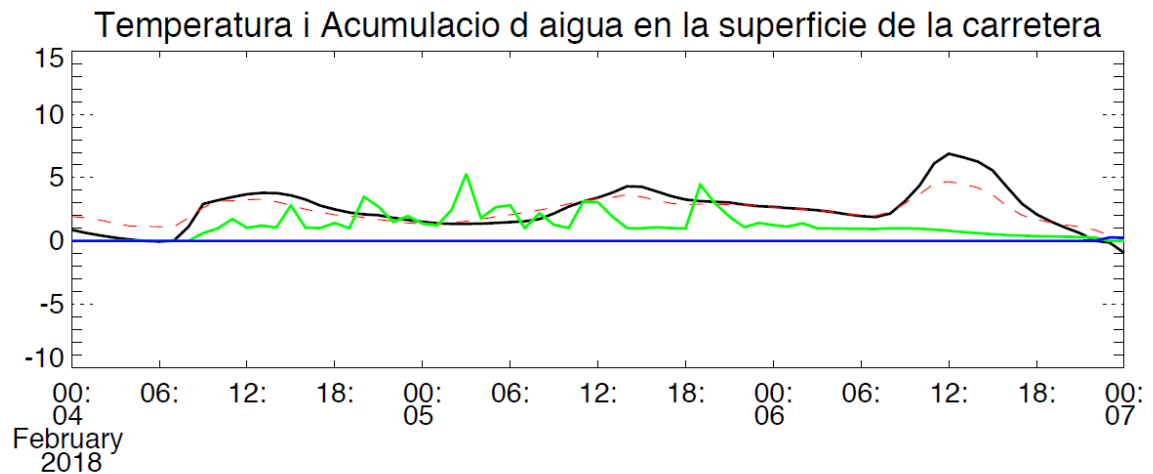
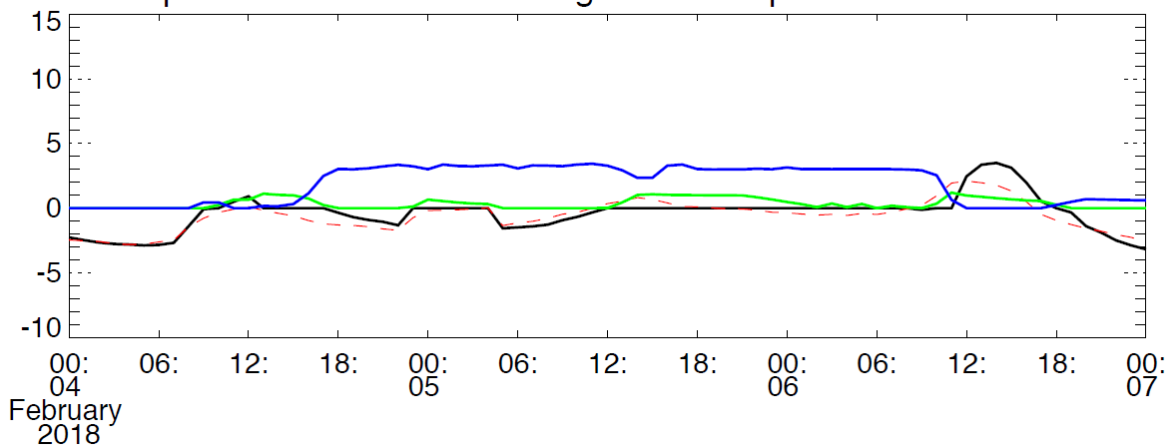


Fig. 3.38. Temperatura del paviment (línia sòlida negra, °C), Temperatura ambient (línia discontinua vermella, °C), Acumulació d'aigua en fase sòlida (línia contínua blava, mm d'equivalent en aigua líquida) i acumulació d'aigua en fase líquida (línia sòlida verda, mm) a la calçada a la BV-2441 a Pontons. Superior: Mode Simulació; Mitjana: Mode Previsió 04/02/2018 00:00 UTC; Inferior: Mode Previsió 05/02/2018 00:00 UTC

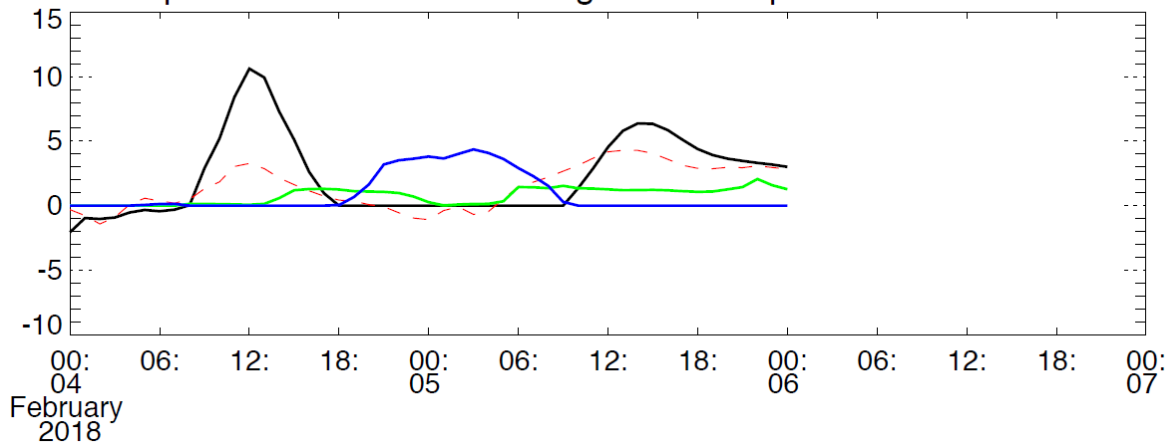
En aquest tram de l'Alt Penedès s'hi van registrar afectacions durant el matí del dia 05/02 tal i com queda reflectit en la taula 3.9 (05/02/2018 09:00). Tot i això, degut a una temperatura excessivament alta, la precipitació caiguda (que es pot assegurar que va passar per l'aigua en fase líquida acumulada), no és considerada neu.

GIV-5201 a Viladrau

Temperatura i Acumulació d'aigua en la superfície de la carretera



Temperatura i Acumulació d'aigua en la superfície de la carretera



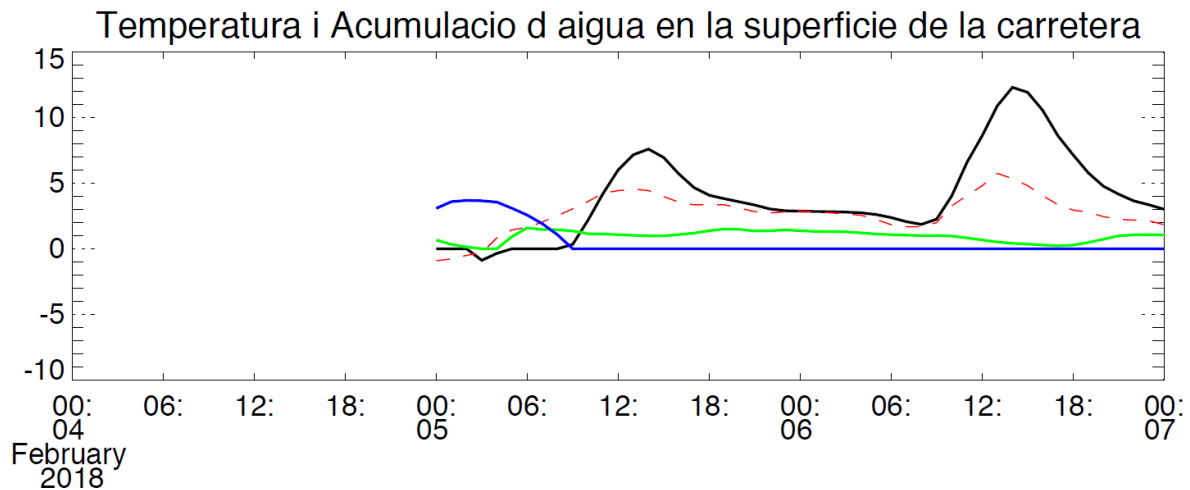
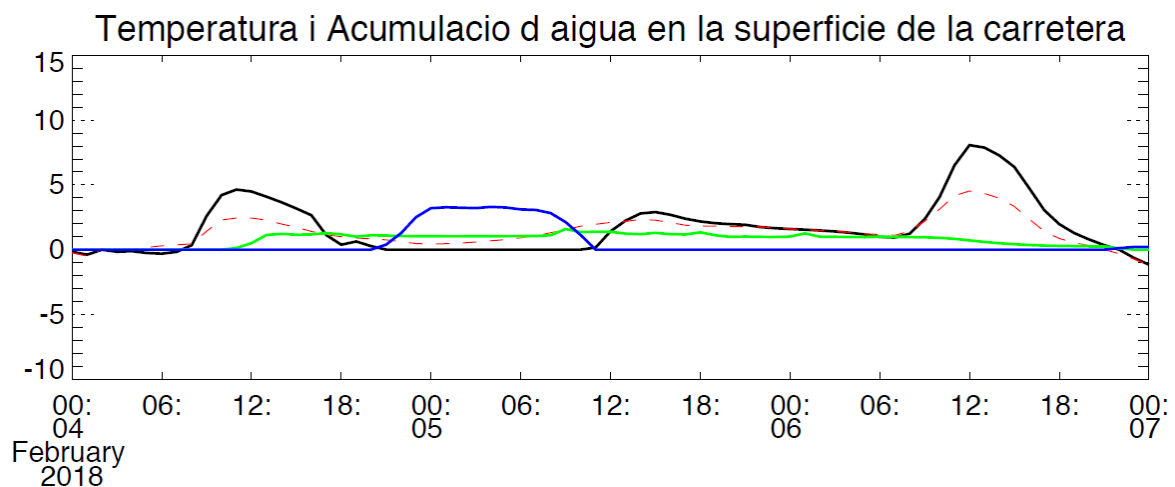


Fig. 3.39. Temperatura del paviment (línia sòlida negra, °C), Temperatura ambient (línia discontinua vermella, °C), Acumulació d'aigua en fase sòlida (línia continua blava, mm d'equivalent en aigua líquida) i acumulació d'aigua en fase líquida (línia sòlida verda, mm) a la calçada a la GIV-5201 a Viladrau. Superior: Mode Simulació; Mitjana: Mode Previsió 04/02/2018 00:00 UTC; Inferior: Mode Previsió 05/02/2018 00:00 UTC

Per aquest tram de la comarca d'Osona es té constància de afectacions en la via el 05/02 19:00 (Taula 3.11), moment en el qual la carretera es trobava tallada. Encara que no aparegui en les taules prèvies, no és agosarat creure que aquest tram es trobava afectat durant tot l'episodi. Si és així, el model és capaç de reconèixer problemes en aquesta via per a qualsevol de les seves execucions. Tot i això, només en la simulació persisteix la neu acumulada. L'increment de temperatura en els modes de previsió a partir de mig matí del dia 05/02 impedeix que la neu es mantingui com en la simulació.

BV-4022 a Nou de Berguedà



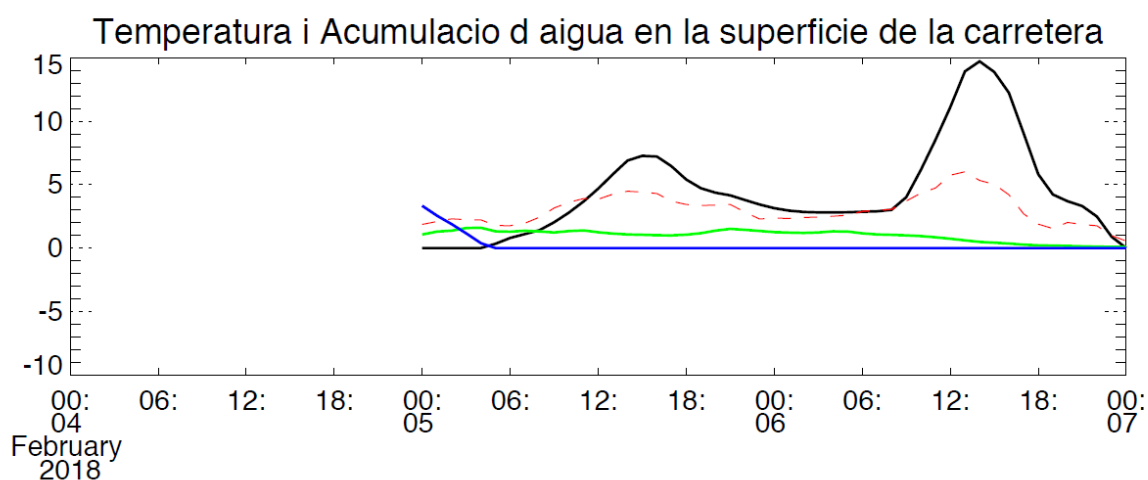
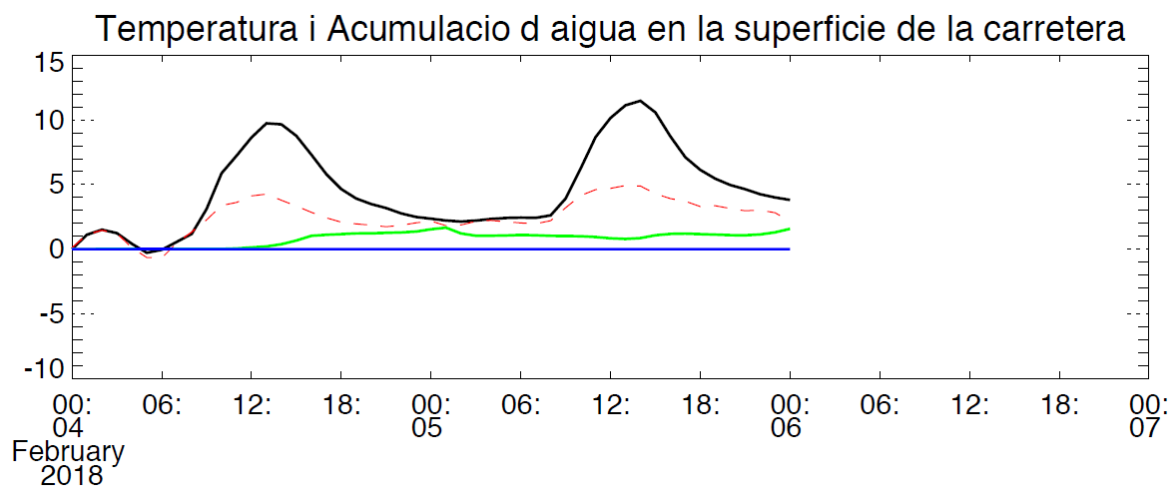


Fig. 3.40. Temperatura del paviment (línia sòlida negra, °C), Temperatura ambient (línia discontinua vermella, °C), Acumulació d'aigua en fase sòlida (línia contínua blava, mm d'equivalent en aigua líquida) i acumulació d'aigua en fase líquida (línia sòlida verda, mm) a la calçada a la BV-4022 a Nou de Berguedà. Superior: Mode Simulació; Mitjana: Mode Previsió 04/02/2018 00:00 UTC; Inferior: Mode Previsió 05/02/2018 00:00 UTC

Per aquest tram del Berguedà succeeix el mateix que en la GIV-5201 a Viladrau, però en aquest cas ni en el mode simulació la neu es manté fins al 05/02 19:00. La raó de la poca persistència dels problemes és el mateix: temperatura excessivament alta.

GIV-4016 entre Toses i Planoles

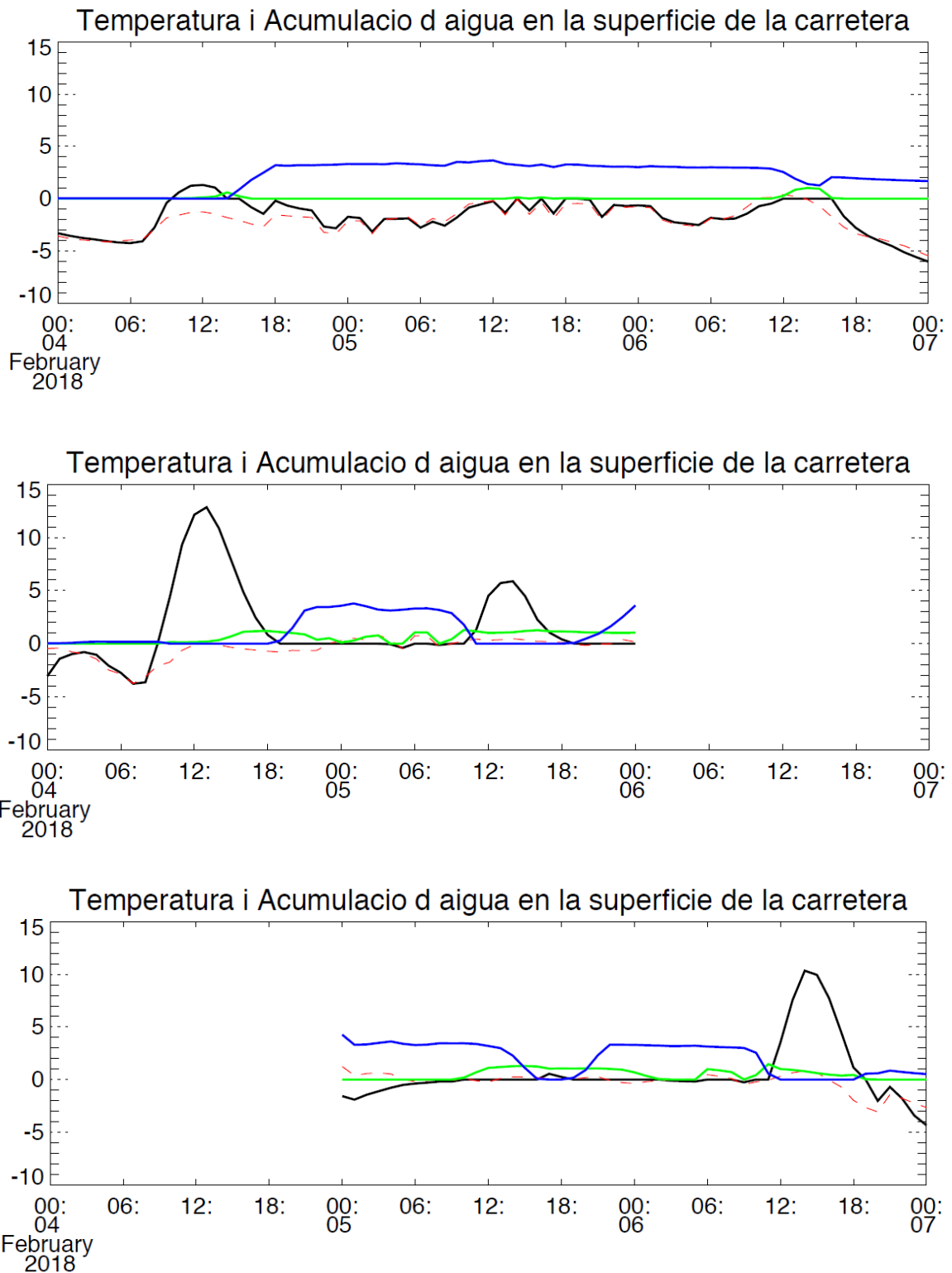


Fig. 3.41. Temperatura del paviment (línia sòlida negra, °C), Temperatura ambient (línia discontinua vermella, °C), Acumulació d'aigua en fase sòlida (línia continua blava, mm d'equivalent en aigua líquida) i acumulació d'aigua en fase líquida (línia sòlida verda, mm) a la GIV-4016 entre Toses i Planoles. Superior: Mode Simulació; Mitjana: Mode Previsió 04/02/2018 00:00 UTC; Inferior: Mode Previsió 05/02/2018 00:00 UTC

Aquest tram del Ripollès va patir fortes afectacions durant tot l'episodi, romanent tancat com a mínim fins el 06/02 a les 13:00 (Taula 3.11). En aquest cas el model es comporta bé, sent capaç de mantenir la neu acumulada al llarg de tot l'episodi. Això és possible ja que les temperatures es mantenen relativament baixes. Això succeeix perquè aquest tram es troba situat a més alçada que els precedents, i la dependència de la temperatura respecte la altura garanteix que si bé s'estimi una temperatura superior a la que realment es va donar, aquesta continua sent prou baixa com per mantenir la neu acumulada.

T-334 a Bot

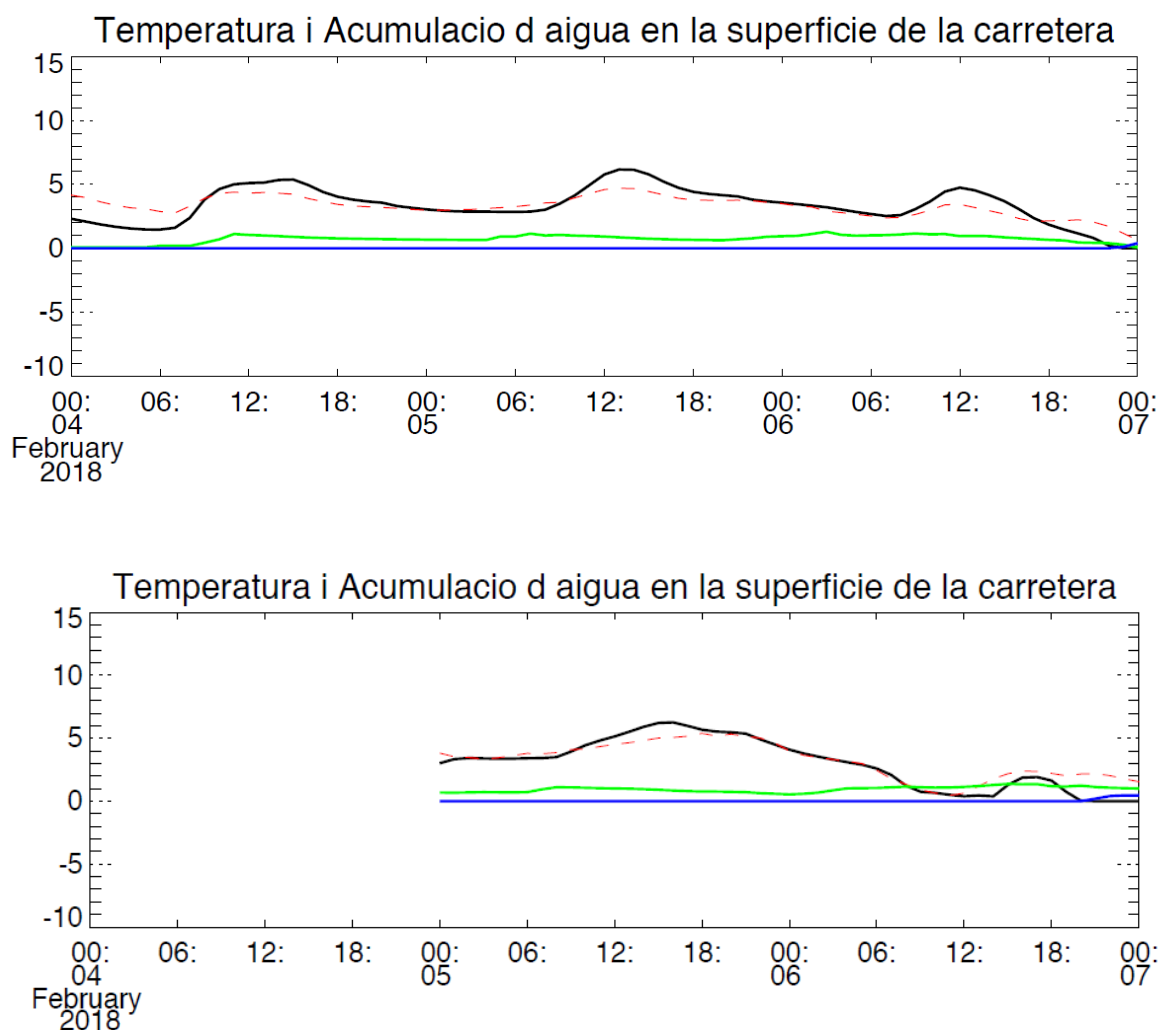


Fig. 3.42. Temperatura del paviment (línia sòlida negra, °C), Temperatura ambient (línia discontinua vermella, °C), Acumulació d'aigua en fase sòlida (línia contínua blava, mm d'equivalent en aigua líquida) i acumulació d'aigua en fase líquida (línia sòlida verda, mm) a la T-334 a Bot. Superior: Mode Simulació; Inferior: Mode Previsió 05/02/2018 00:00 UTC

L'anàlisi del que va succeir en tram de la Terra Alta és bastant interessant ja que respon a la part de l'episodi en que la segona previsió va ser capaç de reconèixer afectacions al Sud de Catalunya durant el 06/02 mentre que en el mode simulació, no (Taula 3.11). Es pot observar que la temperatura ambient del model numèric de previsió HIRLAM és sensiblement inferior que a la extremitat de les

estacions meteorològiques. Aquest fet fa que la temperatura de la superfície baixi de 1°C. En la definició de l'índex de circulació s'assigna un valor d'alerta 2 si la temperatura de la superfície baixa de 1°C i l'acumulació d'aigua és superior a 0,5 mm, amb la intenció de contemplar la possibilitat de presència d'aigua-neu (slush) per temperatures superiors a 0°C.

En canvi, en el mode simulació la temperatura no baixa prou com per considerar aquesta possibilitat.

Per tant, podem afirmar que, si bé en l'episodi anterior la raó per la qual el nivell d'afectacions obtingut pel model (sobretot en previsió) era en gran mesura una mala estimació de la precipitació, en aquest episodi és la mala estimació de la temperatura, tant en simulació com en previsió.

3.1 Episodi 19/03/2018 – 21/03/2018

Per acabar aquest capítol es presentarà l'últim dels tres casos estudiats. Va ser un fenomen poc freqüent per la època de l'any. Una nevada generalitzada, tot i que no tant important com la del 28/02, però especialment intensa en punts del litoral i prelitoral que per la seva localització va causar importants incidències com ara retencions de 16,5 km entre Terrassa i Sant Cugat del Vallès entre d'altres.

3.1.1 Sumari de l'episodi

El causant d'aquesta situació va ser l'arribada d'una petita depressió freda a nivells mitjans i alts. La baixa temperatura a nivells baixos que es va donar per tot Europa també va afectar a la Península Ibèrica (fig 3.39), amb una temperatura suficientment baixa com perquè la cota de neu voltés els 100m.

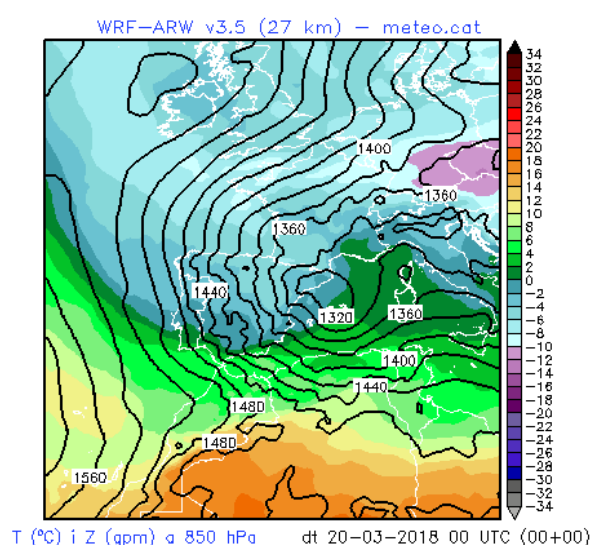


Fig. 3.43. Temperatura ambiental a 1300 metres d'altura (850 hPa). Font: SMC

Dilluns a la tarda (19/03/2018) va començar a nevar a les comarques del Pirineu i Prepirineu, amb una cota de neu que en un primer moment va voltar els 1.000 m. No va ser fins al vespre i primeres hores de la nit quan la precipitació es va fer més extensa a la meitat nord de Catalunya, amb una cota que va anar baixant fins a situar-se al voltant dels 500 m a la mitjanit. La matinada de dimarts la pluja i la neu s'ha anat concentrant a les comarques del litoral i prelitoral Central, amb una cota cada vegada més baixa, de fins a 100 o 200 m a comarques com el Barcelonès, el Baix Llobregat, el Vallès Occidental o el sud del Maresme. En la figura 3.45 es representen els gruixos de neu nova acumulada durant aquest episodi.

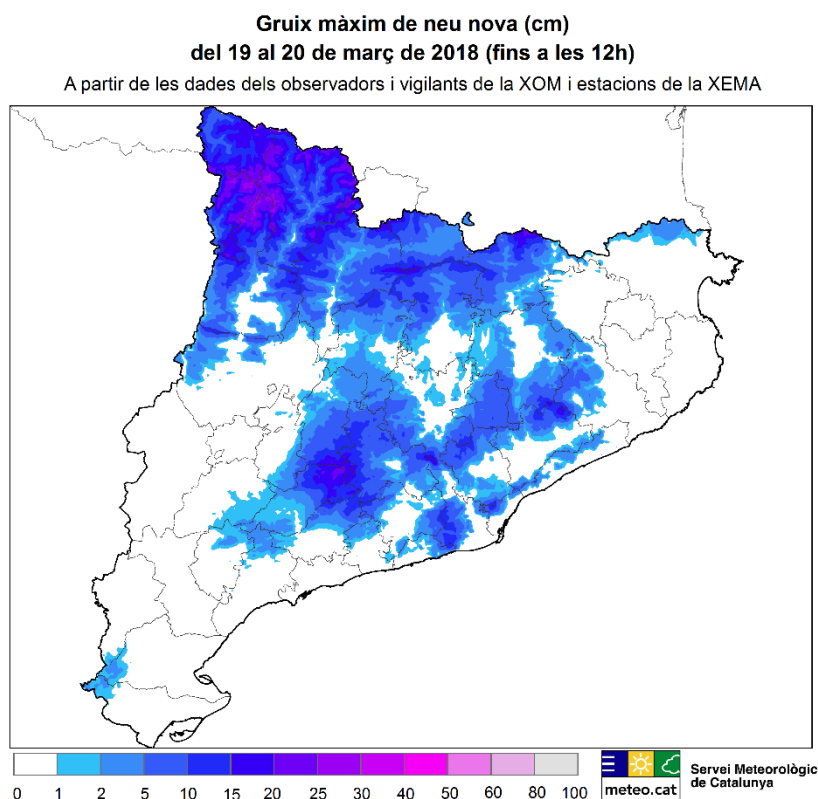


Fig. 3.44. Acumulació de neu entre el 19/03 i 20/03, Font: SMC

Si bé no és excepcional que nevi de forma extensa durant el mes de març, el fet que nevi fins a cotes tant baixes i amb gruixos destacats fa que es tracti d'un episodi realment inusual. Centres escolars de diverses comarques com ara l'Alt Camp i la Conca del Barberà a Tarragona i l'Alt Penedès i el Baix Llobregat al Barcelona. També es van cancel·lar rutes escolars a la Segarra, el Moianès i el Bages.

3.1.2 Presentació de Resultats

Com en els episodis anteriors, s'executa el model amb tres conjunts de dades. En la taula a continuació (Taula 3.12) es pot observar quina és la data d'inici i final de cada execució. En tots tres casos el model s'inicialitza 48 hores abans amb dades extretes del SMC.

Taula 3.12. Temps d'inici i final de les diferents execucions

Mode de funcionament	Inici execució	Final execució
Simulació	19/03/2018 00:00 UTC	22/03/2018 00:00 UTC
Previsió	19/03/2018 00:00 UTC	21/03/2018 00:00 UTC
Previsió	20/03/2018 00:00 UTC	22/03/2018 00:00 UTC

Si bé apareixen alguns trams aïllats amb petites afectacions, aquest desapareixen durant el matí, tant en el mode simulació (fig 3.45a) com en la previsió del 19/03/2018 00:00 (fig 3.45b)

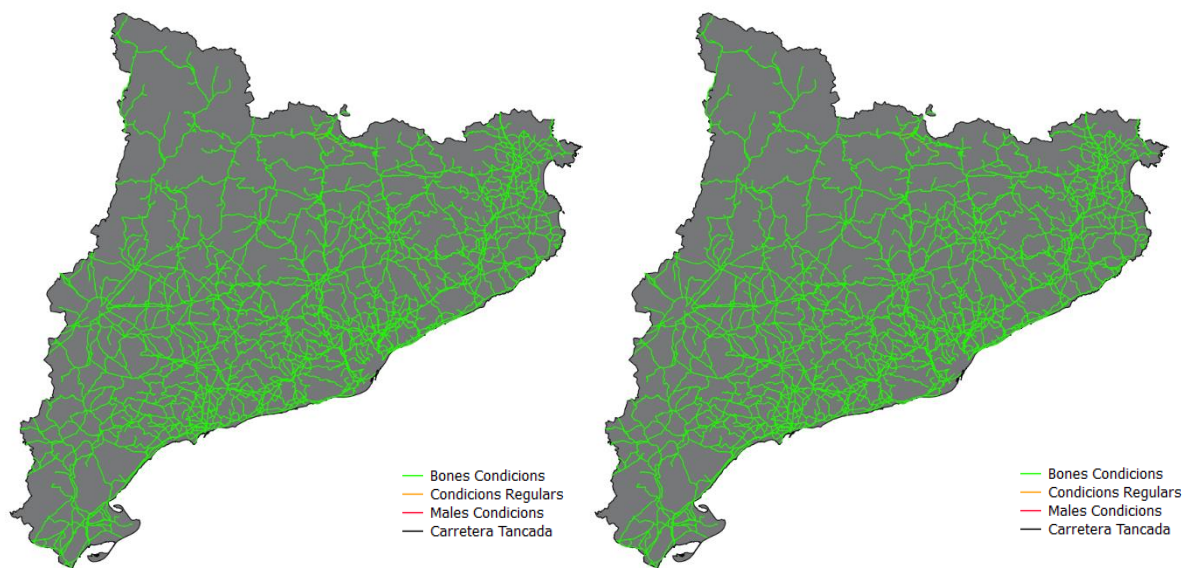


Fig. 3.45. Índex de circulació 19/03/2018 12:00. Esquerra (a): Mode simulació; Dreta (b): Mode Previsió lead time: 12 hores

Durant la tarda no es registren incidències, però a partir de les 19:00 h tant en observació com en la previsió (fig 3.46) es comencen a registrar afectacions. En ambdós casos aquesta inestabilitat progressa cap a l'Est durant el vespre, i si bé en la previsió ho fa amb un cert retràs i menor intensitat respecte l'observació, (fig 3.47)

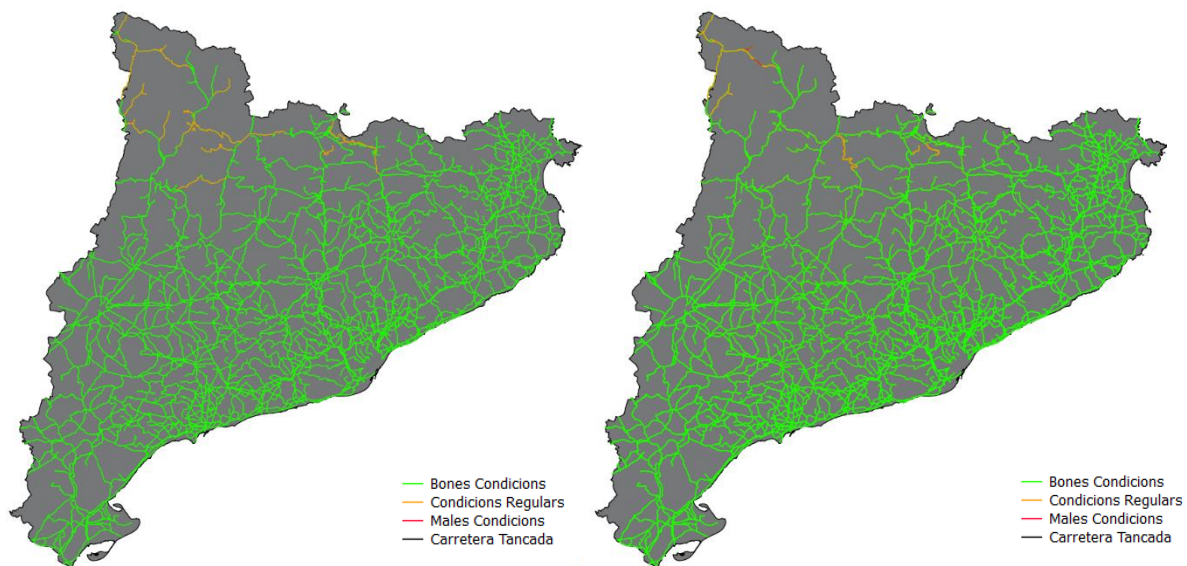


Fig. 3.46. Índex de circulació 19/03/2018 19:00. Esquerra (a): Mode simulació; Dreta (b): Mode Previsió lead time: 19 hores

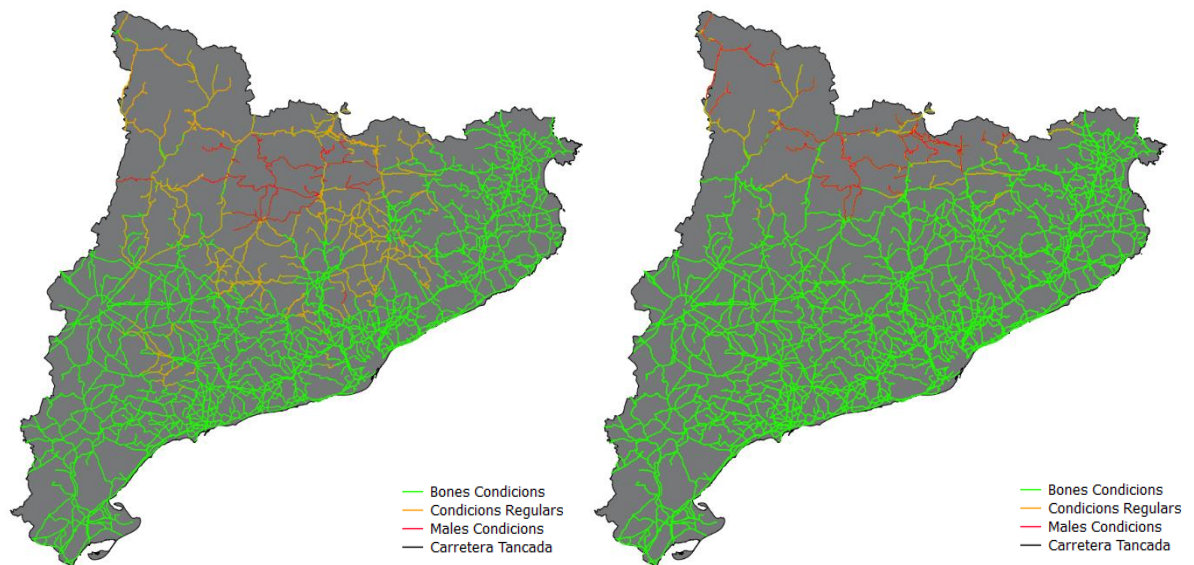
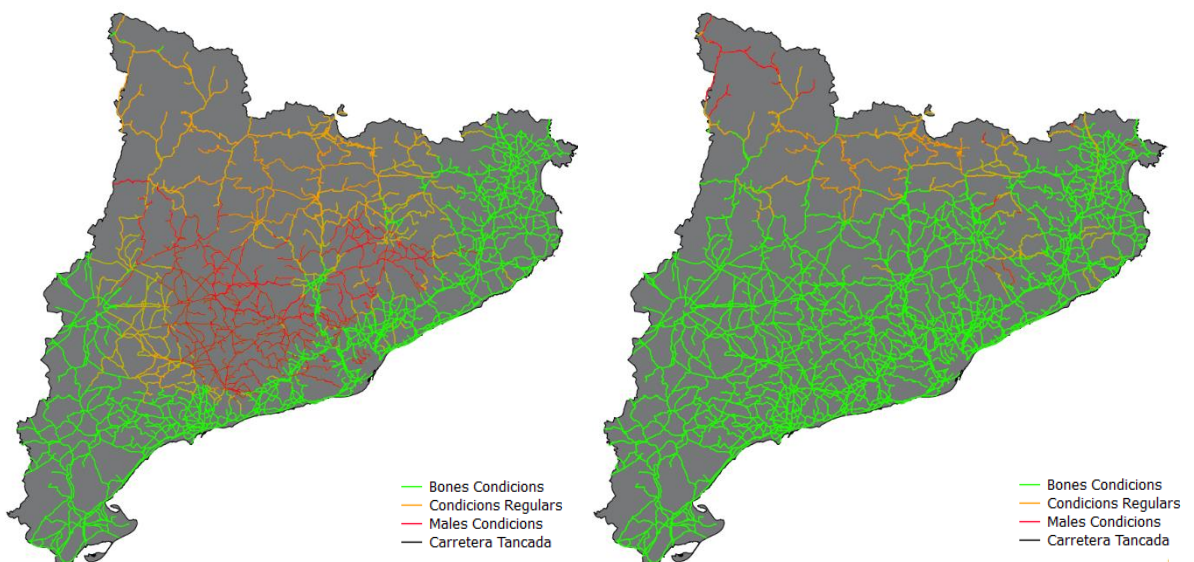


Fig. 3.47. Índex de circulació 20/03/2018 00:00. Esquerra (a): Mode simulació; Dreta (b): Mode Previsió lead time: 24 hores

Les afectacions continuen estenent-se cap al conjunt del territori durant la nit, si bé en la previsió del 19/03 00:00 (fig 3.48b) l'àrea afectada es limita als Pirineus i la serra del Montseny, en simulació (fig 3.48a) la inestabilitat s'estén al llarg de tota Catalunya Central (a excepció de Manresa), afectant també a les parts altes de Barcelona i la depressió prelitoral. En la previsió del 20/03 00:00 (fig 3.48c) s'obtenen uns resultats molt similars als del mode simulació, tot i que s'aprecia una menor intensitat en la comarca d'Osona.



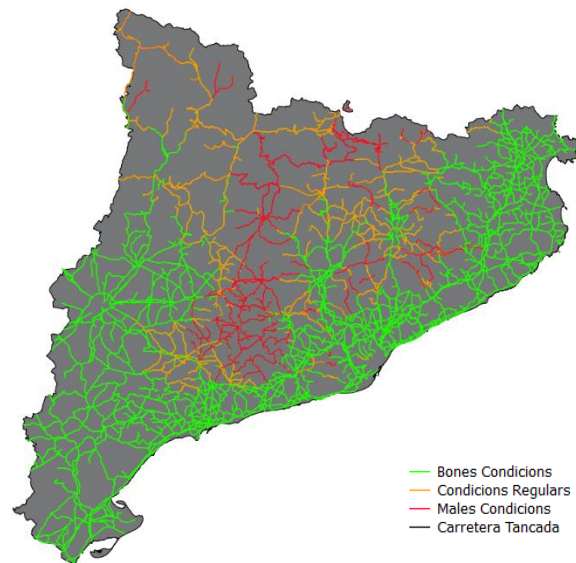
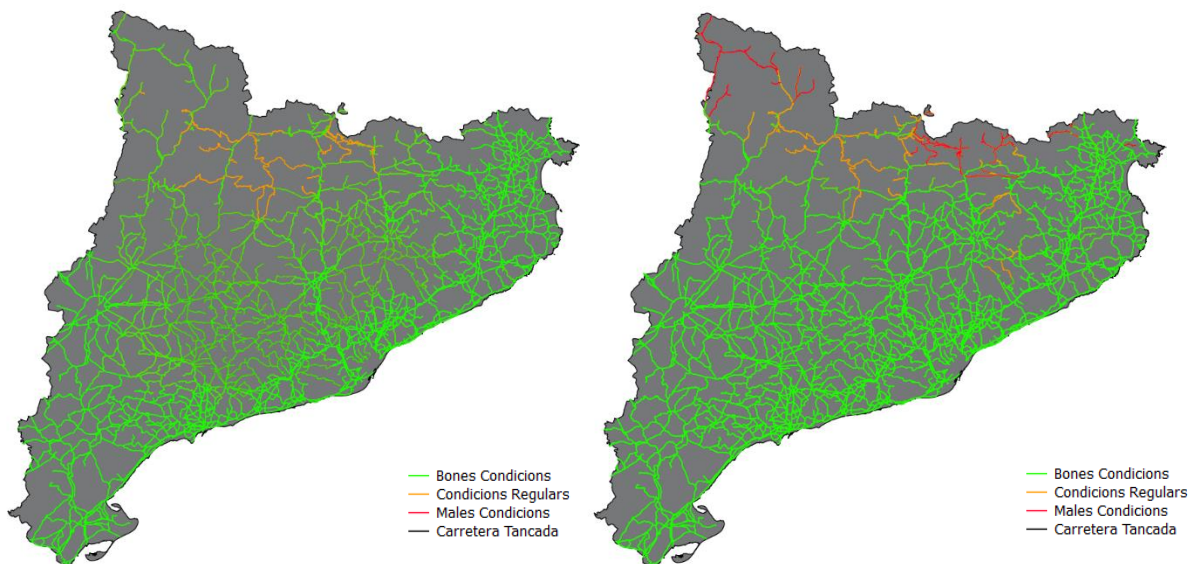


Fig. 3.48. Índex de circulació 20/03/2018 06:00. Superior esquerra (a): simulació, Superior dreta (b): previsió 19/03/2018 00:00 UTC lead time de 30 hores, Inferior (c): previsió 20/03/2018 00:00 UTC lead time de 06 hores

Des de primera hora del matí la situació comença a revertir-se, i arribat el migdia (fig 3.49) ja només certs trams en els Pirineus (sobretot a la Vall d'Aran) continuen mostrant un alt nivell d'alerta. Com en els episodis anteriors, el bloqueig orogràfic patit pel radar dificulta l'aparició d'incidències en el mode simulació.



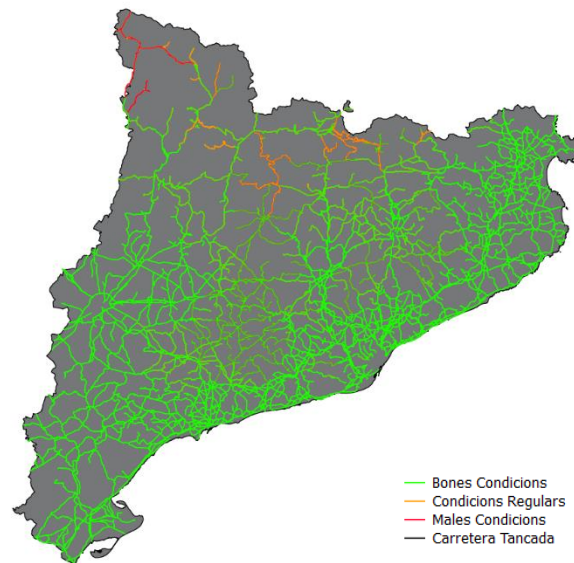
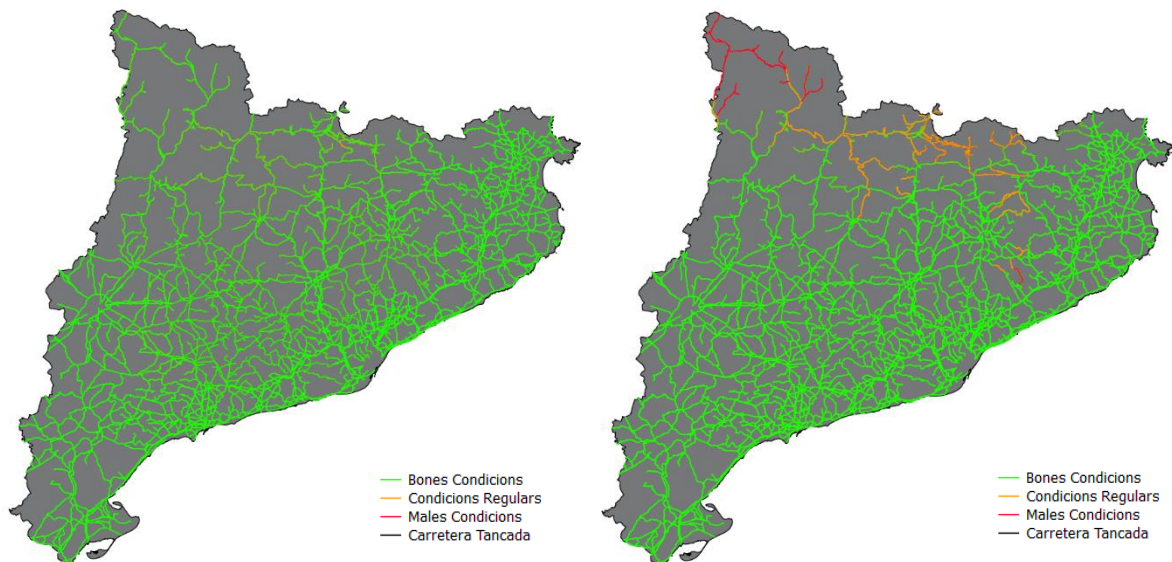


Fig. 3.49. Índex de circulació 20/03/2018 12:00. Superior esquerra (a): simulació, Superior dreta (b): previsió 19/03/2018 00:00 UTC lead time de 36 hores, Inferior (c): previsió 20/03/2018 00:00 UTC lead time de 12 hores

Durant la tarda del dia 20 les afectacions que ja només eren presents en el Pirineu continuen dissipant-se. En el mode simulació (fig 3.50a) la perturbació ha desaparegut completament, mentre que tant en la previsió del 19/03 00:00 (fig 3.50b) i previsió del 20/03 00:00 (fig 3.50c) s'observa una persistència de les incidències a la Vall d'Aran. Si bé durant la nit els trams afectats continuaran en les mateixes condicions, tornaran a la normalitat durant el dia 21/03/2018.



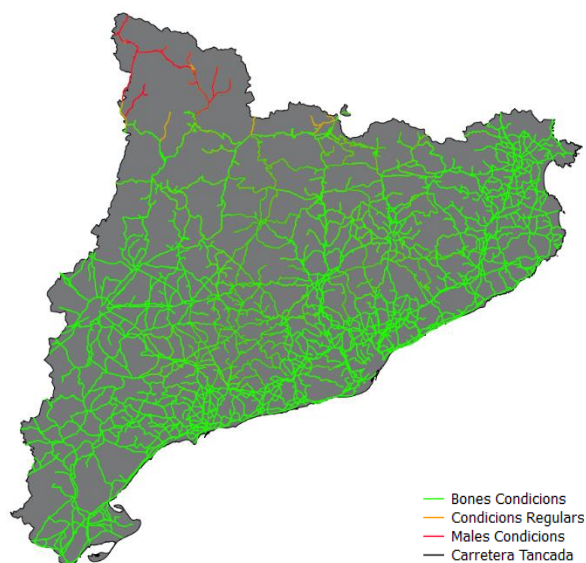


Fig. 3.50. Índex de circulació 20/03/2018 20:00. Superior esquerra (a): simulació, Superior dreta (b): previsió 19/03/2018 00:00 UTC lead time de 44 hores, Inferior (c): previsió 20/03/2018 00:00 UTC lead time de 20 hores

3.1.3 Valoració i comparació dels Resultats

La valoració general dels resultats obtinguts en aquest episodi es molt bona excepte en la previsió del 19/03/2018 00:00, en la que només es detecten afectacions en els Pirineus i zones molt localitzades de la serralada Prelitoral. En canvi, en el mode simulació i la previsió del 20/03/2018 00:00 sí que s'aprecia el caràcter generalitzat de la nevada que es produeix durant la nit i provoca afectacions en el transit durant el matí, però que degut a les temperatures relativament altes pròpies de la primavera, aquestes retrocedeixen ràpidament mantenint-se exclusivament en certes zones dels Pirineus.

Com en els episodis anteriors, s'utilitzaran les informacions i alertes emeses per diferents organismes com ara Trànsit o Protecció Civil.

Taula 3.13. Situació carreteres 20/03/2018 01:00. Els valors numèrics indiquen mm d'equivalent en aigua líquida acumulada. El codi de colors representa el índex de conducció de cada tram

Tram	Nivell afectació	Simulació	Previsió 19/03 00:00	Previsió 20/03 00:00
BV-1415 (Cerdanyola del Vallès)	Tallada	0	0	0
BV-1462 (Barcelona)	Tallada	0	0	0
BV-2425 (Castellví de Rosanes)	Tallada	3,6	0	0
GIV-4016 (Toses - Planes)	Tallada	2,8	3,2	3,05
GIV-5201 (Viladrau)	Tallada	1,6	0	1,17

Taula 3.14. Situació carreteres 20/03/2018 04:00. Els valors numèrics indiquen mm d'equivalent en aigua líquida acumulada. El codi de colors representa el índex de conducció de cada tram

Tram	Nivell afectació	Simulació	Previsió 19/03 00:00	Previsió 20/03 00:00
BV-4024 (Coll de Pal)	Tallada	2,9	2,7	2,97
BV-2425 (Castellví de Rosanes)	Tallada	3,4	0	2,37
GIV-5201 (Viladrau)	Tallada	3,2	3,1	3,27
GIV-4016 (Toses-Planoles)	Cadenes	2,9	3	3,18
BV-1415 (Cerdanyola del Vallès)	Cadenes	0,4	0	0
BV-1462 (Barcelona)	Cadenes	3,5	0	0

Taula 3.15. Situació carreteres 20/03/2018 10:00. Els valors numèrics indiquen mm d'equivalent en aigua líquida acumulada. El codi de colors representa el índex de conducció de cada tram

Tram	Nivell afectació	Observació	Previsió 19/03 00:00	Previsió 20/03 00:00
BV-4024 (Coll de Pal)	Tallada	2,5	1,7	2,45
BV-2425 (Castellví de Rosanes)	Tallada	0	0	0
GIV-5201 (Viladrau)	Tallada	2,7	0	1,3
GIV-4016 (Toses-Planoles)	Tallada	2,5	2,6	2,39
C-142b (Pla de Beret)	Cadenes	0,2	3,1	3,01
C-28 (Port de la Bonaigua)	Cadenes	0,4	3,1	3,04
BV-5114 (Fogars de Montclús)	Cadenes	2,7	0	1,53
N-260 (Port del Cantó)	Cadenes	2,53	2,02	2,69
C-37 (Pont d'Armentera)	Cadenes	1,8	0	1,35
L-500 (Boí)	Cadenes	1,1	3	3,17
L-501 (Boí)	Cadenes	2,1	3	3,17

Els resultats mostrats en aquestes taules poden ser considerats com a satisfactoris. Si bé en la taula 3.13 en cap de les execucions s'aprecien incidències en les vies BV-1415 i BV-1462. Aquestes sí que apareixen (en el mode observació) en la Taula 3.14, on queda reflectida una millora significativa en l'execució en mode simulació, que és la única capaç de detectar incidències en els trams de la serralada Litoral.

Tot i això, en la taula 3.15 els resultats obtinguts en la segona previsió són millors que en simulació degut a la incapacitat de la última en detectar afectacions majors en la Vall d'Aran.

Durant aquest episodi, donat el caràcter nocturn de la nevada i la ràpida dissipació de les afectacions en la majoria del territori, no es van emetre tants avisos com en els episodis anteriors, pel que la validació dels resultats en aquest esdeveniment és escàs. Tot i això, es poden prendre les cancel·lacions de rutes escolars i el tancament de varis centres com a indicador de que la neu ha tingut una forta presència en la zona.

Si bé en la comarca de l'Alt Camp el model no ha sigut capaç de detectar-hi grans incidències, en la resta de comarques afectades tant a Tarragona (Conca de Barberà), com Barcelona (Vallès Oriental, Bages i Moianès) i Lleida (Segarra, Alt Urgell i el Pallars, sí que ho ha aconseguit.

Un altre indicador de la situació a les carreteres és l'aixecament de la restricció per a vehicles pesants en vies principals a primera hora del matí, que és quan comencen a millorar els resultats obtinguts en els modes de simulació i la segona previsió (el punt de màxima afectació al conjunt de la xarxa viària es dona al voltant de les 06:00 del matí del dia 20). Algunes de les vies més destacades són la C-58 (Castebell i el Vilar- Terrassa), la C-25, la C-17 (La Garriga- Vic), la C-16 (Bagà - Tunel del Cadí), la A-2 (Tàrrrega - Esparraguera) i la N-340 (Vallirana - Sant Cugat Sesgarrigues). Només dues vies mantenen la restricció per a vehicles pesants, la C-14 (Belltall -Tàrrrega) i la N-260 (Port del Cantó). Aquesta última apareix en la taula 3.15, i tant la segona previsió com la observació són capaces de detectar-hi acumulació de neu abundant.

Un cop analitzat els resultats, no és d'estranyar el que s'observa en la figura 3.51: el mode previsió és incapaç de detectar acumulació de neu en la zona central de Catalunya, encara que sí ho fa amb més intensitat que la simulació en punts de la serralada Litoral i Prelitoral pels voltants de Blanes.

En canvi en la previsió 2 sí que s'observa acumulació de neu a la Catalunya Central, tot i que la zona no és tant extensa com en la simulació, sent especialment menys abundant al Nord de Manresa i voltants de Vic.

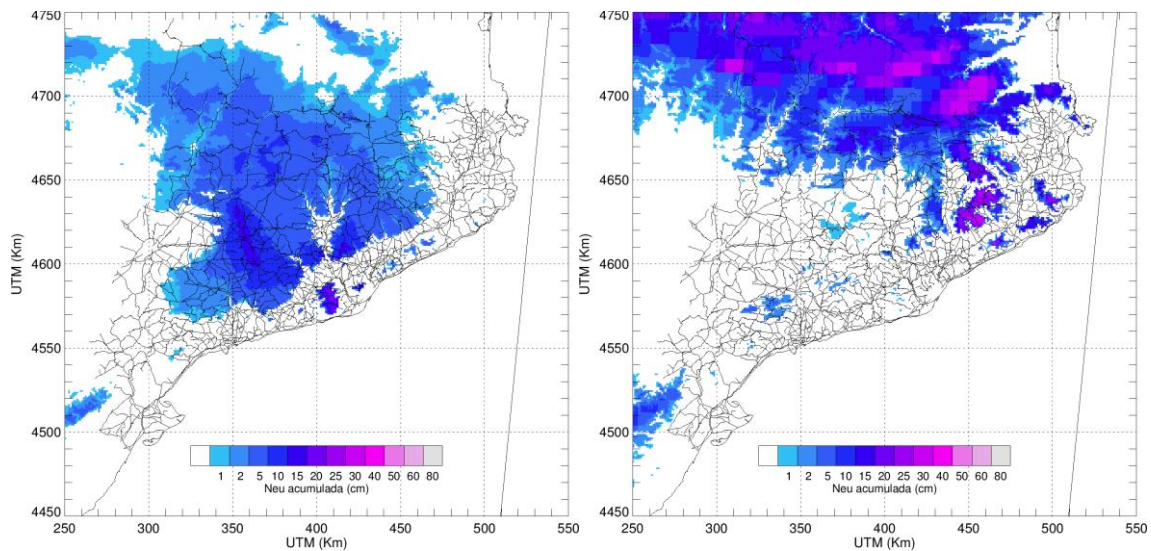


Fig. 3.51. Acumulació de neu nova entre el 26/02/2018 12:00 i el 28/02/2018. Relació 1 a 1 entre mm d'equivalent en aigua líquida i cm de neu. Esquerra: Mode simulació; Dreta: Mode Previsió

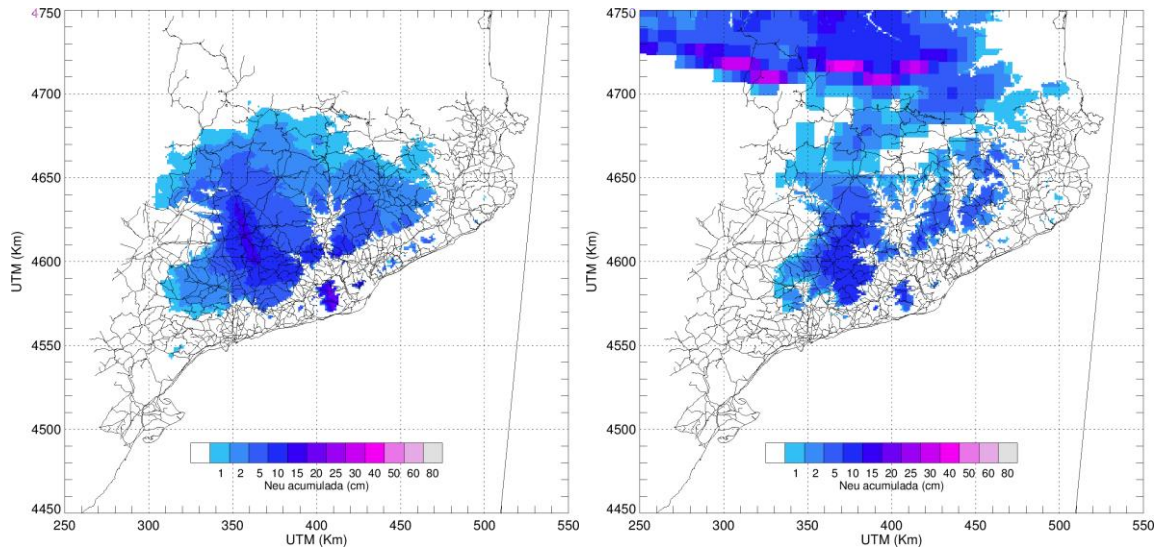
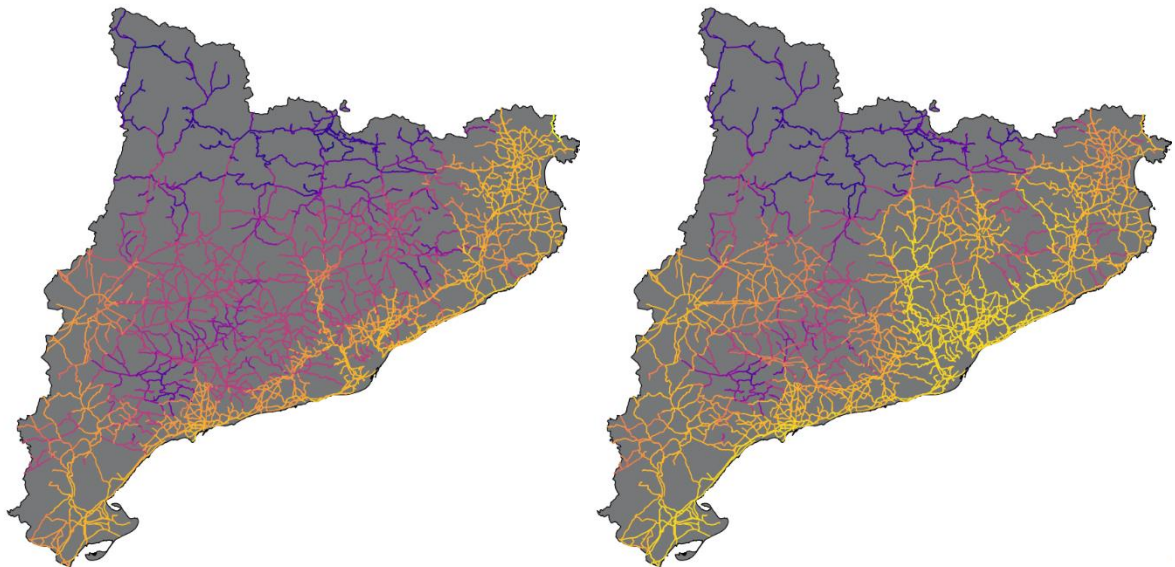


Fig. 3.52. Acumulació de neu nova entre el 26/02/2018 12:00 i el 28/02/2018. Relació 1 a 1 entre mm d'equivalent en aigua líquida i cm de neu. Esquerra: Mode simulació; Dreta: Mode Previsió

La explicació d'aquesta diferència d'acumulació de neu torna a ser una estimació a l'alça de la temperatura ambient en les previsions, que es tradueix en una major temperatura superficial de la calçada (Fig 3.53)



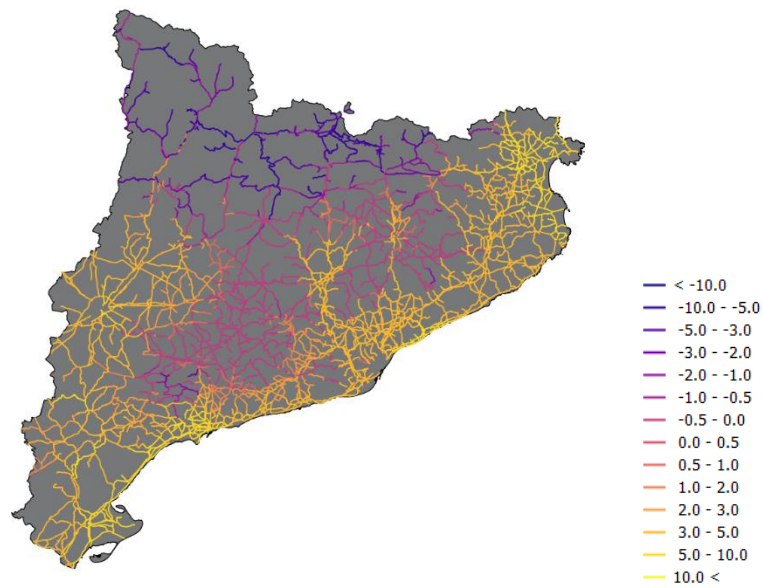
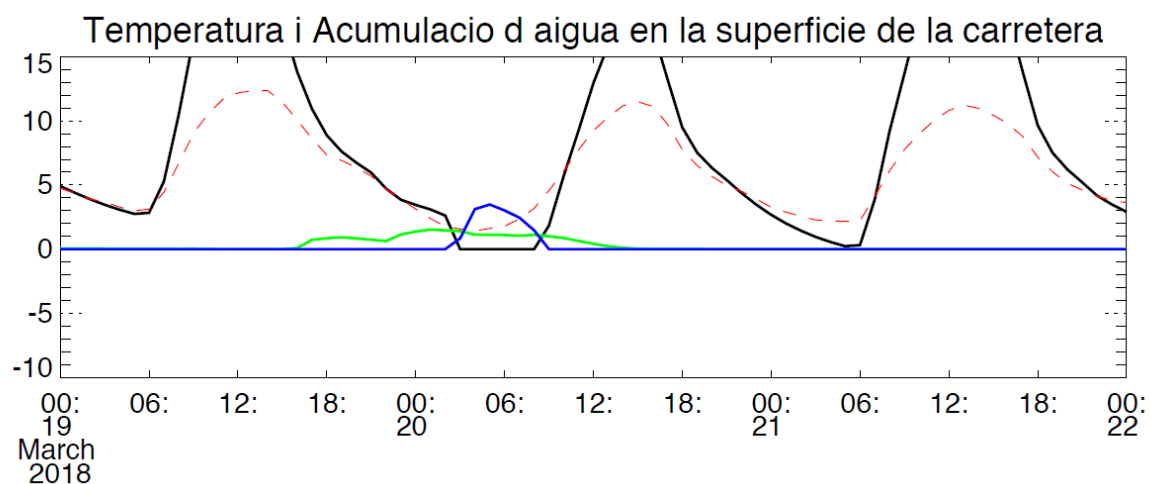


Fig. 3.53. Temperatura paviment (°C) 20/02/2018 06:00. Superior esquerra (a): simulació; Superior dreta (b): previsió 19/03/2018 00:00 UTC, lead time 30 hores; Inferior (c): previsió 20/03/2018 00:00 UTC, lead time 6 hores

A continuació es presenten les sèries temporals de varis trams que van ser afectats durant l'episodi:

- BV-1415 a Cerdanyola del Vallès
- GIV-5201 a Viladrau
- BV-2425 a Castellví de Rosanes
- GIV-4016 entre Toses i Planoles

BV-1415 a Cerdanyola



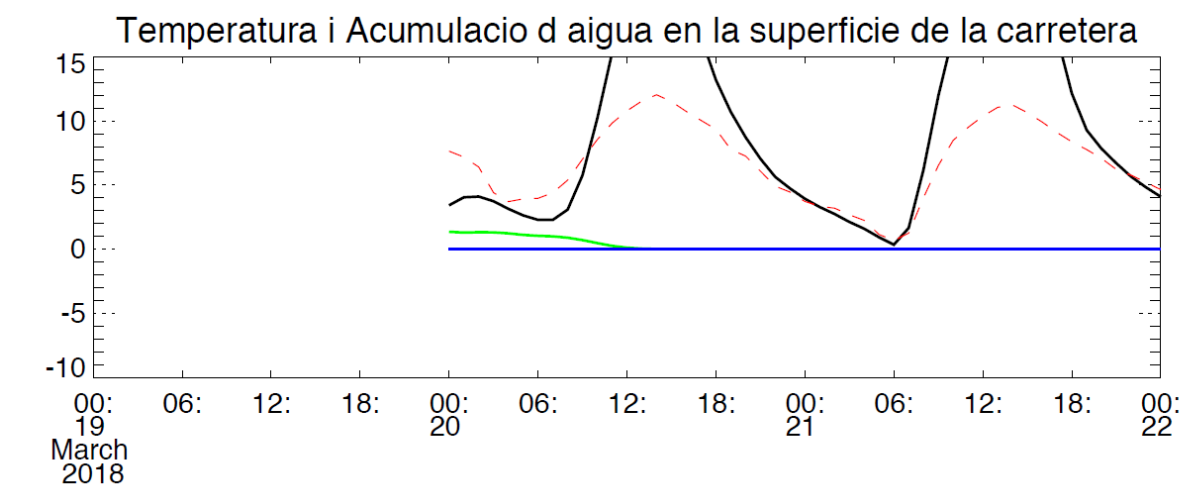
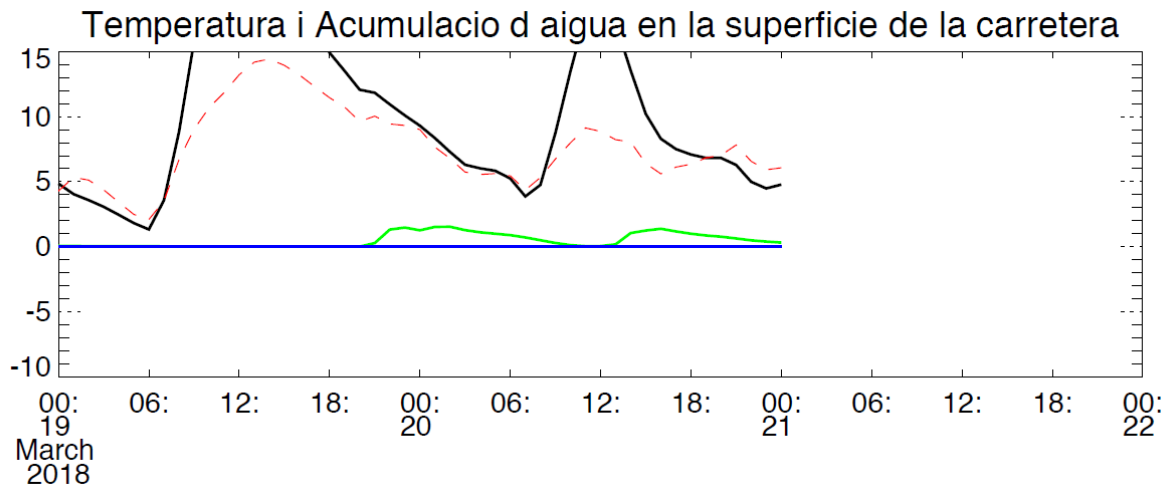


Fig. 3.54. Temperatura del paviment (línia sòlida negra, °C), Temperatura ambient (línia discontinua vermella, °C), Acumulació d'aigua en fase sòlida (línia continua blava, mm d'equivalent en aigua líquida) i acumulació d'aigua en fase líquida (línia sòlida verda, mm) a la BV-1415 a Cerdanyola del Vallès. Superior: Mode Simulació; Mitjana: Mode Previsió 19/03/2018 00:00 UTC; Inferior: Mode Previsió 20/03/2018 00:00 UTC

Aquest tram del Vallès Occidental, que va ser tallat durant la matinada del 20/03 (Taula 3.13) presenta acumulació de neu només en el mode simulació. L'excés de temperatura ambiental impedeix que la precipitació existent (hi ha presència d'aigua líquida) no arribi a considerar-se neu.

En canvi, en altres trams pròxims a aquest però que circulen a una cota major, la previsió 2 detecta nivells d'alerta per molt petits que siguin (Fig 3.45)

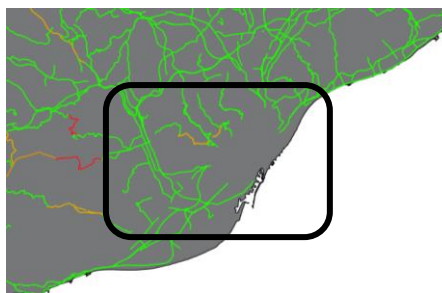


Fig. 3.55. Índex de circulació 20/03/2018 06:00 en mode previsió. Lead time: 06 hores

GIV-5201 a Viladrau

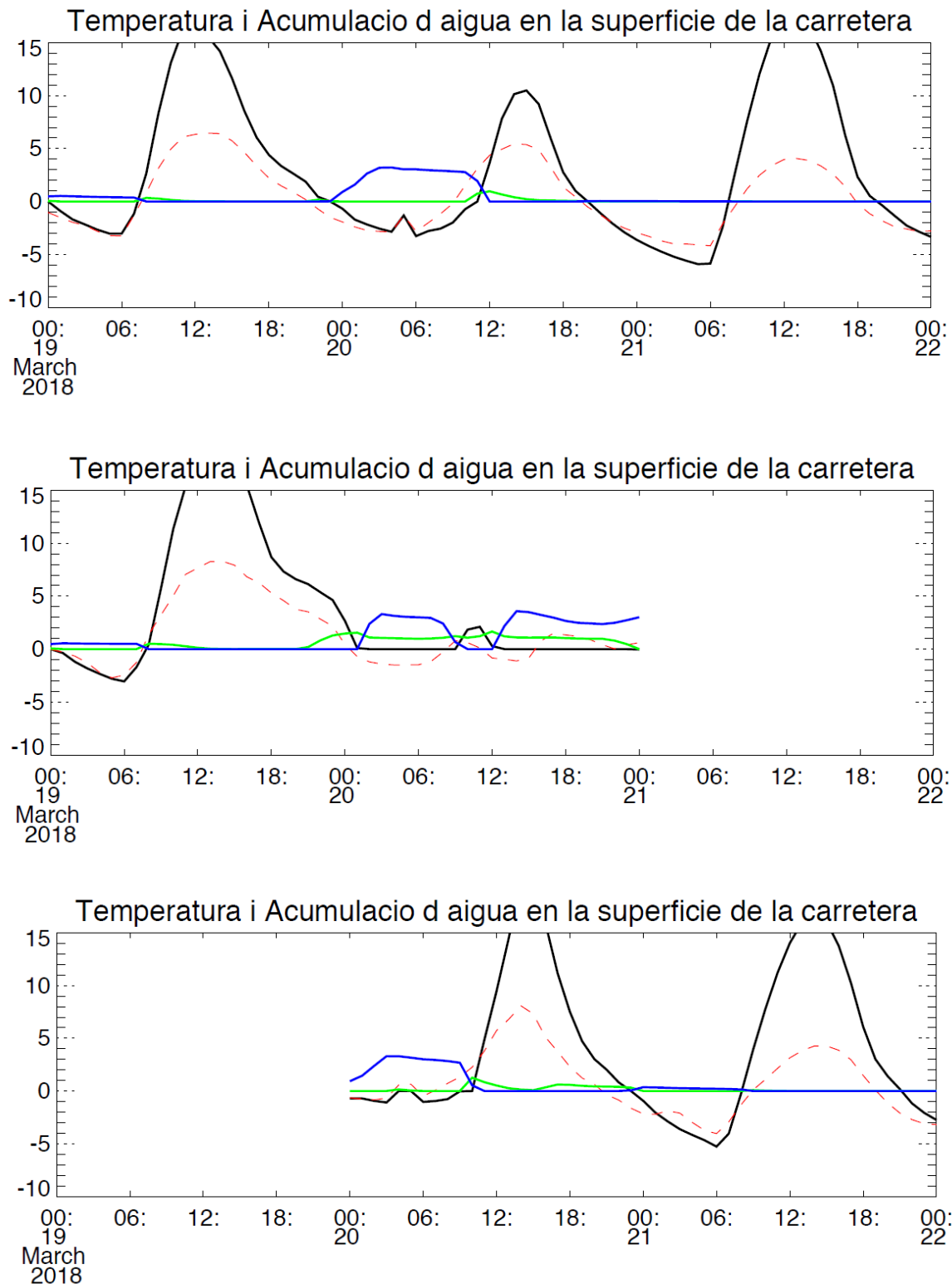
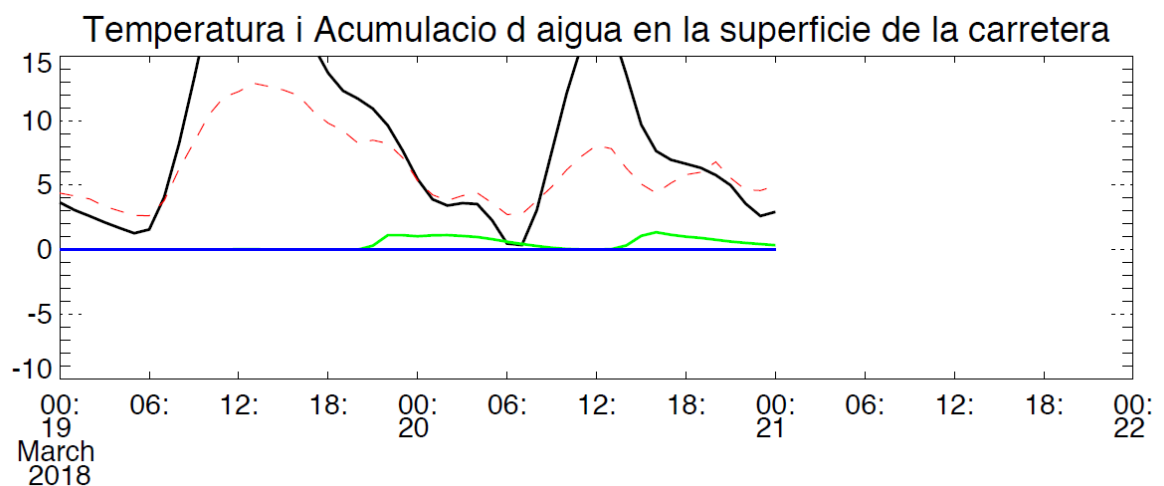
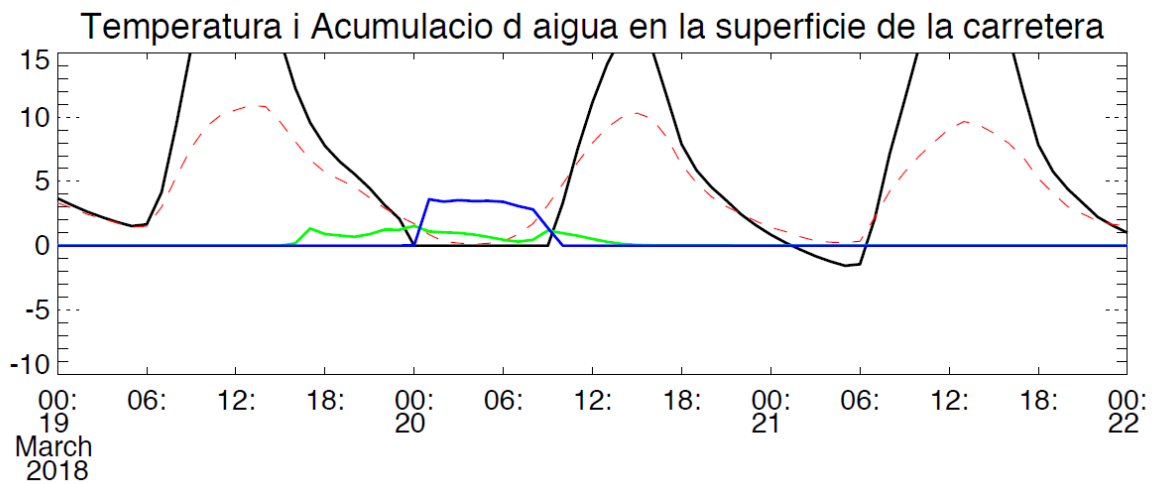


Fig. 3.56. Temperatura del paviment (línia sòlida negra, °C), Temperatura ambient (línia discontinua vermella, °C), Acumulació d'agua en fase sòlida (línia continua blava, mm d'equivalent en aigua líquida) i acumulació d'agua en fase líquida (línia sòlida verda, mm) a la GIV-5201 a Viladrau. Superior: Mode Simulació; Mitjana: Mode Previsió 19/03/2018 00:00 UTC; Inferior: Mode Previsió 20/03/2018 00:00 UTC

Aquest tram de la comarca d'Osona va ser un dels més afectats d'aquest episodi (Taula 3.10, 3.11 i 3.12). Resulta interessant veure com el model és capaç de reconèixer-hi afectacions tant en el mode simulació com en les previsions. Tot i això s'observa un comportament estrany en el la primera previsió, on la temperatura ambient es manté molt baixa durant tot el dia 20/02, a diferència de la resta d'execucions, on es preveu el final de les afectacions cap al migdia.

BV-2425 a Castellví de Rosanes



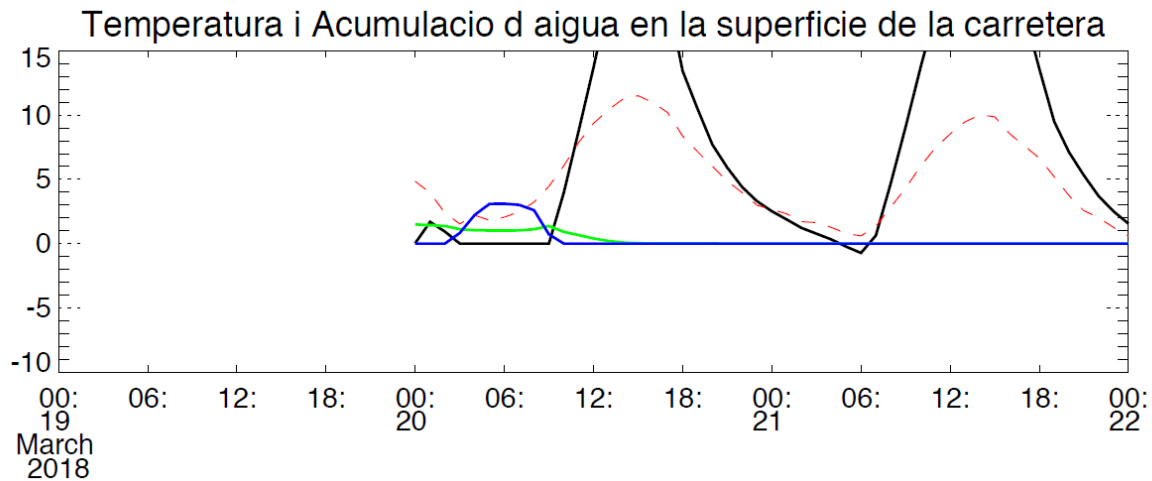
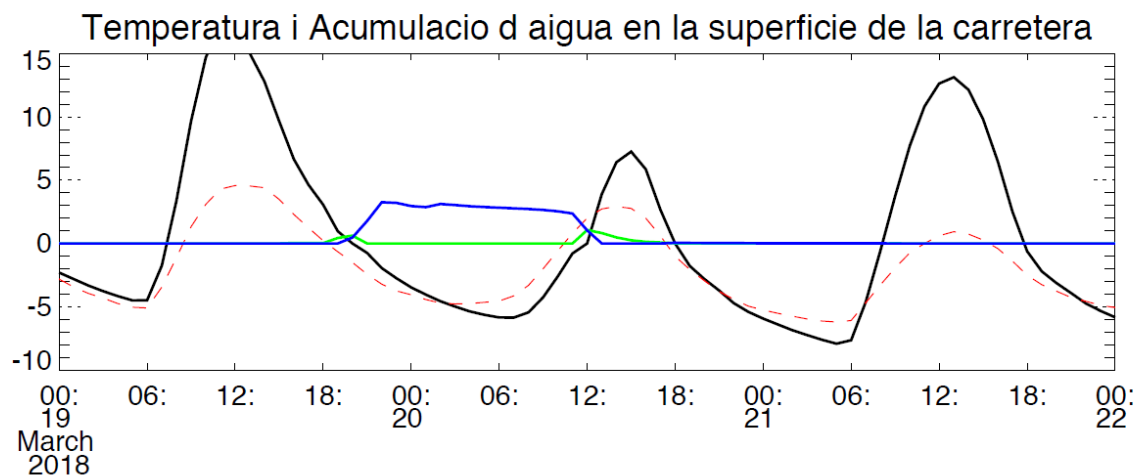


Fig. 3.57. Temperatura del paviment (línia sòlida negra, °C), Temperatura ambient (línia discontinua vermella, °C), Acumulació d'aigua en fase sòlida (línia continua blava, mm d'equivalent en aigua líquida) i acumulació d'aigua en fase líquida (línia sòlida verda, mm) a la BV-2425 a Castellví de Rosanes. Superior: Mode Simulació; Mitjana: Mode Previsió 19/03/2018 00:00 UTC; Inferior: Mode Previsió 20/03/2018 00:00 UTC

En aquest tram del Baix Llobregat, en canvi, els resultats no són tant bons: en la primera previsió les altes temperatures impedeixen l'acumulació de neu. En la resta de les execucions del model, si bé es reconeix l'acumulació de neu, aquesta comença tard i no aguanta el suficient.

GIV-4016 entre Toses i Planoles



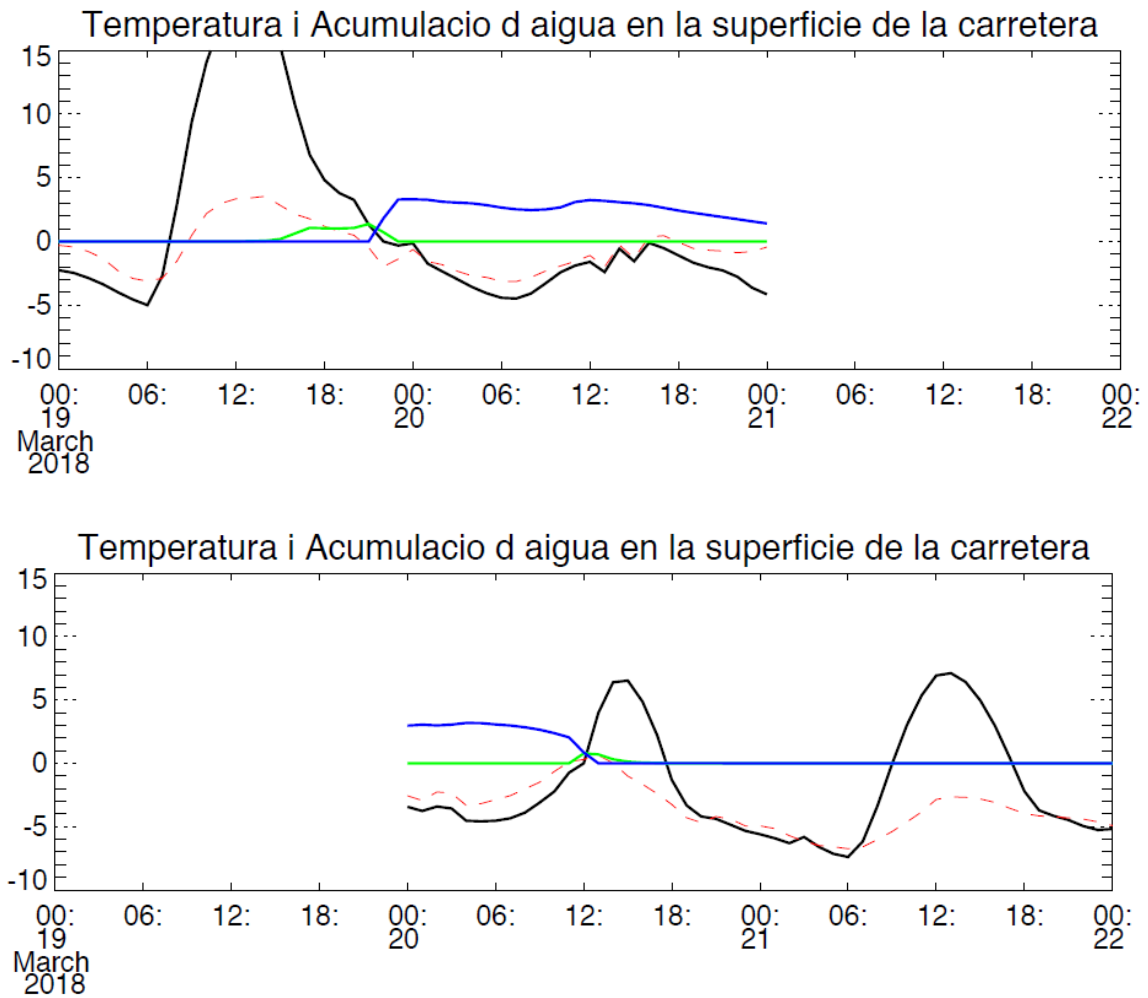


Fig. 3.58. Temperatura del paviment (línia sòlida negra, °C), Temperatura ambient (línia discontinua vermella, °C), Acumulació d'aigua en fase sòlida (línia continua blava, mm d'equivalent en aigua líquida) i acumulació d'aigua en fase líquida (línia sòlida verda, mm) a la GIV-4016 entre Toses i Planoles. Superior: Mode Simulació; Mitjana: Mode Previsió 19/03/2018 00:00 UTC; Inferior: Mode Previsió 20/03/2018 00:00 UTC

Es pot considerar que les resultats obtinguts per aquest tram del Ripollès són satisfactoris, on apareix acumulació de neu en totes tres execucions del model. Tot i això, la persistència de la neu en la primera previsió i les baixes temperatures durant el dia 20/03, juntament amb les pronosticades a la GIV-5201 a Viladrau (Fig 3.56) fan pensar que el model numèric de previsió HIRLAM produeix sobreestimacions excessives de la temperatura ambient per al nostre interès.

Capítol 4

Conclusions

L'objectiu d'aquest treball ha estat desenvolupar i implementar un sistema d'alertes primerenques capaç de predir l'empitjorament de les condicions de circulació en les carreteres degut a causes meteorològiques, en especial la neu, causant de grans incidències durant l'hivern. Això esdevé especialment important quan en el territori afectat per les nevades la presència de neu és poc habitual (com és el cas del nostre entorn), i per tant, la preparació de la població enfront aquests esdeveniments és limitada.

Així doncs, el primer pas del treball ha consistit en desenvolupar un algoritme que, seguint les lleis físiques d'intercanvi de calor entre atmosfera i carretera i la transmissió de calor en el sòl, ens permet obtenir la temperatura de la calçada i l'acumulació d'aigua i neu en la mateixa. Per a fer-ho, s'ha recorregut a diferents models existents de previsió de condicions de la carretera (RoadSurf, METRO, HS4Cast), recollint les característiques més interessants de cadascun.

Un cop desenvolupat el model, el següent pas ha sigut implementar-lo a Catalunya i analitzar el seu funcionament en diferents episodis. Amb l'ànim de veure el comportament del model en diferents situacions, van ser escollits tres de diferents: un d'ells consistia en un episodi de neu molt intens i localitzat principalment en els Pirineus gironins; mentre que els altres dos consistien en una nevada generalitzada a Catalunya. La diferència entre els darrers episodis és la intensitat de l'episodi: el segon és més intens i persistent, mentre que el tercer que succeeix a finals d'hivern, és molt més curt.

Una de les dificultats amb les que s'ha trobat aquest estudi ha sigut la validació dels resultats obtinguts. La inexistència d'estacions meteorològiques de carretera limita la possibilitat de fer una validació quantitativa dels resultats obtinguts. La solució adoptada ha consistit en fer un recull de les diferents afectacions anunciades per agències com Protecció Civil i Trànsit, així com la premsa. Un cop analitzats els resultats, es pot concloure que el model ha obtingut uns resultats més que satisfactoris en dos dels tres episodis:

- En els episodis de neu generalitzada els resultats són en general bons. El model és capaç de reconèixer incidències en les zones afectades per la nevada, si bé en certs punts pròxims al litoral té més dificultat per detectar-les. Tot i això, sí que va ser capaç de detectar els problemes en la serralada litoral als voltants de Barcelona entre d'altres.
- En l'episodi de principis de febrer, en canvi, els resultats obtinguts no són tant bons. Una sobreestimació de la temperatura ambient va evitar l'acumulació de neu en carretera en el conjunt de vies afectades, i per tant es van subestimar les incidències a la xarxa de carreteres.

Malgrat la qualitat dels resultats obtinguts, aquests presenten una diferència qualitativa entre els obtinguts en mode simulació i previsió. Generalment els resultats produïts en mode previsió són capaços de pronosticar correctament afectacions en la majoria de zones en les que va haver-hi incidències. Ara bé, quan s'utilitzen les dades produïdes pel model numèric de previsió meteorològica HIRLAM, la temperatura ambient tendeix a ser excessivament alta, la qual cosa provoca un augment en la temperatura del paviment que dificulta l'establiment de neu en la superfície, al mateix temps que el model identifica part de la precipitació com a pluja enlloc de neu. D'altra banda, en el mode simulació s'identifiquen problemes en la detecció de precipitació en certes zones dels Pirineus (sobretot a la Vall d'Aran) degut a la dificultat del radar en obtenir bons resultats en zones muntanyoses i molt allunyades del punt on es realitza la mesura.

Pel que fa a localització temporal de les afectacions, el model es comporta bé, sent capaç de pronosticar l'inici de les incidències amb bastanta precisió. En canvi, té dificultats en localitzar correctament el final de les mateixes. Això pot tenir part d'explicació a causa de l'acció de llevaneus i productes per a evitar la deposició de la neu en la calçada no es fa de forma homogènia. Aquest tipus d'accions no estan contemplades en el model (tot i que pot incloure's dins del terme assignat a l'acció del propi trànsit sobre l'estat de la neu).

Entre les principals limitacions del model destaquen les següents:

- L'alta dependència de la qualitat dels resultats obtinguts pel model amb la qualitat de les previsions meteorològiques. Si aquestes no són correctes, el model no serà capaç de predir les afectacions a les carreteres.
- En el model s'hi aplica un terme que representa l'escolament de la neu i aigua en la calçada, però resulta impossible modelar-lo per a cada tram. Si aquest terme pren un valor petit simulant les actuacions realitzades en una carretera menor, les afectacions en el conjunt de la xarxa viària són sobreestimades. En canvi si es procedeix a aplicar el terme amb un valor alt simulant les actuacions realitzades en una carretera important i de transit abundant, s'observaria una persistència menor de les afectacions en les carreteres menors que el ocorregut en realitat.
- La hipòtesi de funcionament del model en que només es permet que s'acumuli aigua en fase sòlida a la carretera quan la temperatura superficial d'aquesta és igual o menor a 0°C provoca que en certes situacions on neva de forma intensa a temperatures superiors a 0°C, el model tingui més problemes en reconèixer una acumulació significativa d'aigua en fase sòlida.
- La correcció de la temperatura i pressió atmosfèrica en funció de l'altura pot no ser la encertada en tots els casos. El càlcul del gradient tèrmic, si bé és una bona aproximació quan el perfil de temperatura en l'atmosfera és l'habitual, no és capaç de capturar fenòmens que modifiquin el perfil de temperatura com ara la inversió tèrmica. Aquest error pot tenir una gran influència en els Pirineus, on existeix una gran diferència entre la cota a la qual circulen les carreteres (fons de vall) i la de les estacions meteorològiques, que molt sovint es troben en estacions d'esquí o punts bastant elevats.
- La impossibilitat d'incorporar particularitats de cada tram de via com ara la presència de zones en ombra, la proximitat a un riu, etc. La radiació solar, que esdevé un dels principals actors en el càlcul del balanç d'energia superficial varia molt en funció de l'ombra. Les estacions meteorològiques normalment es troben situades en zones obertes, per evitar que fenòmens locals influeixin en les seves mesures. En canvi, les carreteres acostumen a passar pel fons de vall, on la incidència directa del Sol (sobretot en hivern) és menor.

Per concloure, destacar la importància dels sistemes d'alertes primerenques en la valoració i tractament dels riscos naturals. El fet que siguin econòmicament rentables i l'impacte ambiental quasi

nul fa que cada cop més les diferents administracions incorporin aquests sistemes com a elements d'ajuda en la presa de decisions. Per exemple, el CRAHI (Centre de Recerca Aplicada en Hidrometeorologia) de la UPC, participa en un projecte a escala europea (ANYWHERE Project) d'alertes primerenques per a la previsió de fenòmens tals com inundacions i incendis, i en un futur, afectacions de neu en carretera, l'embrió del qual és el model d'aquest estudi, que en el seu estat actual proporciona uns resultats força útils que el converteixen en una eina molt esperançadora. Aquesta eina es pot fer servir tant per a la gestió de l'emergència per part de les autoritats de protecció civil i trànsit com per a l'optimització dels processos d'entitats privades que es veuen afectades per les xarxes viàries tals com centres logístics i centres de distribució de grans magatzems.

El nivell de la cota de neu prevista era l'únic indicador de les possibles afectacions, que si bé el pot proporcionar a les administracions i diferents organismes informació útil de les possibles incidències, no poden localitzar-les temporalment ni de forma quantitativa. Això fa que la informació que disposen els organismes encarregats de la presa de decisions sigui bastant limitada. Tot i això, la meua opinió és que si bé el model proporciona informació útil, els recursos els quals disposen les diferents administracions són limitats, i per tant, difícilment es podran evitar afectacions en el conjunt de les vies, encara que aquest model pot ser una eina útil per a la distribució dels recursos existents al llarg del territori, per així garantir la normalitat en les zones més vulnerables.

Com a possibles línies de recerca de cara al futur, per tal de millorar el model es recomana incidir en els següents punts:

- Introducció d'informació referent a l'acció humana (llevaneus i abocament de sal) específic per a cada tram de carretera. Si es disposés d'aquesta informació, podria ser introduïda reduint de forma sistemàtica la quantitat de neu acumulada en la via, simulant el pas de les llevaneus.
- Introducció d'efectes locals com ara la obra o proximitat a un riu o un llac.
- Millora en la detecció de neu, que és complicat. En el model s'ha utilitzat una aproximació proposada per Matsuo and Sasyo (1981), però el pronòstic de neu i la seva cota són molt complexes.
- Possible modificació en el valor de certs paràmetres aleatoris tals com el llindar a partir del qual s'activa el terme d'escorrentia i els llindars per a la definició de l'índex de conducció.
- Utilitzar informació de les condicions de les vies en el càlcul de rutes. Si bé no aquest punt no respon a la millora en si mateix del model de previsió de neu, seria interessant l'aplicació dels resultats produïts en models de transports.

Capítol 5

Referències Bibliogràfiques

- Bonals Muntada, L. A., 2005: *Transferència de calor : apunts de classe*.
<http://upcommons.upc.edu/handle/2117/90176>.
- Cao, L., L. Thakali, L. Fu, and G. Donaher, 2012: Effect of Weather and Road Surface Conditions on Traffic Speed of Rural Highways.
- Crevier, L.-P., and Y. Delage, 2001: METRo: A New Model for Road-Condition Forecasting in Canada. Federal Highway Administration, 2017: How Do Weather Events Impact Roads?
- Finkenstein, C., and P. Häupl, 2008: Atmospheric longwave radiation under cloudy skies for HAM simulation programs.
- Foresti, L., M. Reyniers, L. De Cruz, A. Seed, L. Delobbe, I. Sideris, and U. Germann, STEPS-BE: an ensemble radar rainfall nowcasting system for urban hydrology in Belgium.
https://www.kuleuven.be/hydr/plurisk_files/PLURISKfinalSymp_LForesti.pdf.
- Hertl, S., and G. Schaffar, 1998: An autonomous approach to road temperature prediction.
- Kangas, M., M. Heikinheimo, and M. Hippí, 2015: RoadSurf: a modelling system for predicting road weather and road surface conditions. *Meteorol. Appl.*, **22**, 544–553, doi:10.1002/met.1486. <http://doi.wiley.com/10.1002/met.1486>.
- Matsuo, T., and Y. Sasyo, 1981: Non-Melting Phenomena of Snowflakes Observed in Subsaturated Air below Freezing Level. *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II*, doi:10.2151/jmsj1965.59.1_26.
- Maze, T., M. Agarwal, and R. Souleyrette, 2005: Wheter Weather Matters to Traffic Demand, Traffic Safety, and Traffic Flow.
- Mel, E. R., 2017: Exploring protective decision-making in the context of impact-based flood warning services.
- Meruane, C., and R. Garreaud, 2005: Flujos Turbulentos.
- Recktenwald, G. W., 2004: Finite-Difference Approximations to the Heat Equation. *Mech. Eng.*, **0**, 1–27. <http://math5022spring2010.weebly.com/uploads/3/6/3/0/3630523/fdheat.pdf>.
- Sluijter, R., 2009: Interpolation methods for climate data Literature review. *KNMI Libr.*, 28.