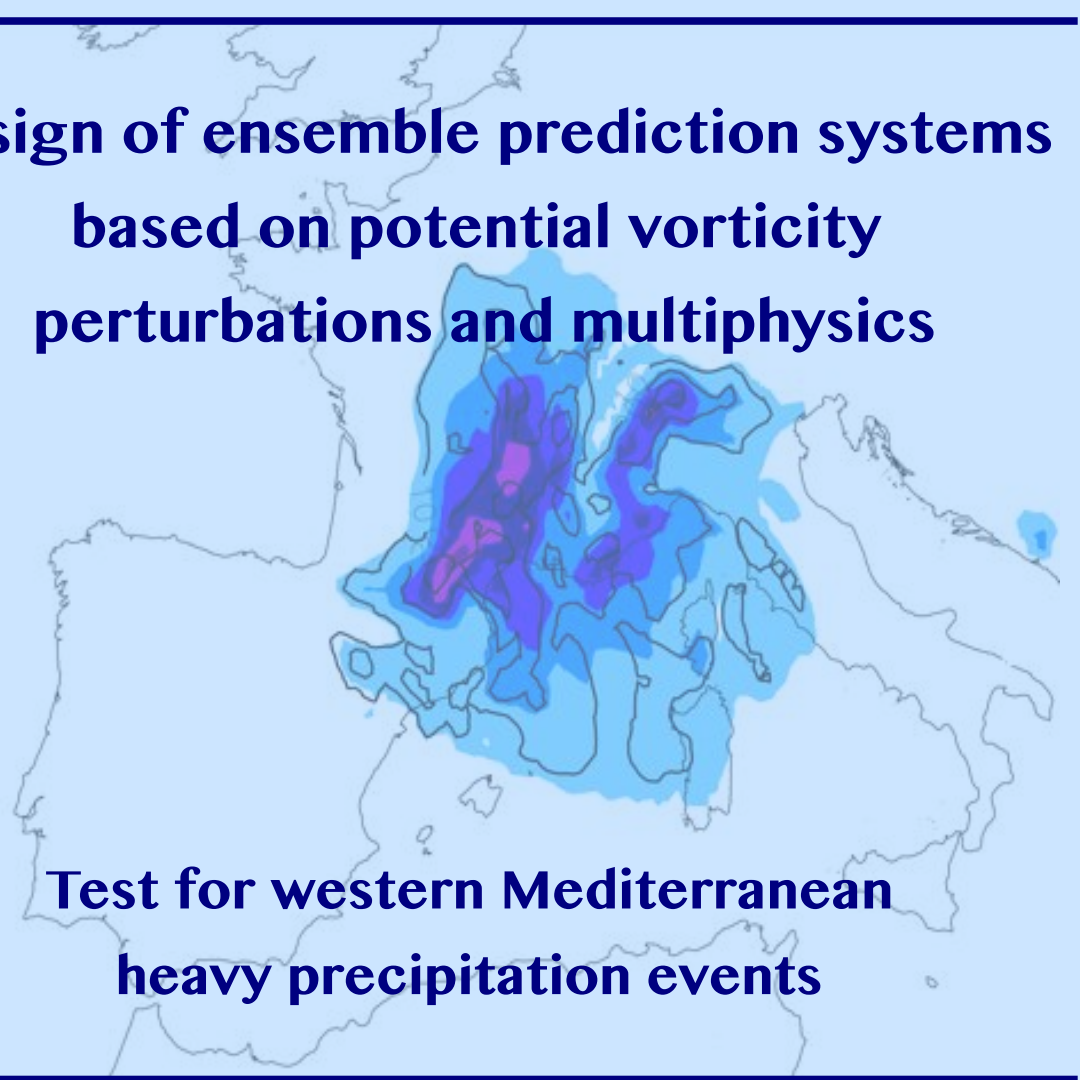




UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS
DEPARTAMENT DE FÍSICA

Design of ensemble prediction systems based on potential vorticity perturbations and multiphysics



Test for western Mediterranean heavy precipitation events

Maria del Mar Vich Ramis

Grau de Doctora en Física
Programa Oficial de Postgrau en Física

Resum

La regió de la Mediterrània occidental es veu sovint afectada per esdeveniments de pluja intensa. Aquests esdeveniments acostumen a tenir un gran impacte en la societat a causa de les pèrdues econòmiques, les lesions personals i les morts que causen. S'ha establert una relació entre alguns d'aquests esdeveniments de pluja intensa i la presència d'un cicló sobre la regió. La Mediterrània occidental és una àrea molt ciclogènica a causa, principalment, de la topografia complexa que envolta un mar quasi tancat. Per tant, qualsevol millora de la nostra capacitat de predir aquests esdeveniments potencialment perillosos suposaria importants beneficis per a les societats afectades. Els serveis de protecció civil podrien aprofitar aquestes previsions millorades per implementar mesures de prevenció més eficients i advertir la població amb més antelació. Una resposta més ràpida podria marcar la diferència entre danys major i menors, o fins i tot entre la vida i la mort.

L'objectiu principal d'aquesta tesi és millorar l'actual capacitat de predicció d'aquests fenòmens meteorològics potencialment perillosos. Desenvolupam aquesta tasca mitjançant un sistema de predicció per conjunts (SPC) -*ensemble*, en anglès. Més concretament, desenvolupam i verifiquem tres sistemes de predicció per conjunts, tots centrats en els fenòmens meteorològics de gran impacte en la Mediterrània occidental. Entre els tres conjunts es tenen en compte tant les incerteses presents en els models numèrics de predicció meteorològica com les presents en les condicions inicials. Consideram les deficiències del model en el conjunt de multifísica. Els membres del conjunt de multifísica es generen variant els esquemes de parametrització física. A més del conjunt de multifísica, utilitzam dos SPC que generam pertorbant les condicions inicials i les condicions de contorn del model, que tenen en compte l'impacte de les incerteses presents en aquestes condicions. Aquestes pertorbacions s'apliquen sobre el camp de vorticitat potencial (VP; *potential vorticity*, PV, en anglès) mitjançant una tècnica d'inversió, aprofitant la connexió entre les estructures de VP i els ciclons. Per això anomenam *PV-perturbed* aquests dos conjunts. Treballar amb el camp de VP té l'avantatge de poder definir les pertorbacions sobre una sola variable, VP, i, juntament amb la tècnica d'inversió de VP, ens assegurem que la resta de camps meteorològics siguin pertorbats sense comprometre el balanç atmosfèric que hi ha entre els camps de vent i de temperatura. Per evitar pertorbacions no realistes, desenvolupam una climatologia d'error de VP. Aquesta climatologia proporciona un marge d'error de VP consis-

tent en el rang d'incertesa propi del camp de VP. Malgrat que els dos conjunts de *PV-perturbed* es basen en pertorbar el camp de VP, el criteri que segueixen per decidir on aplicar les pertorbacions és diferent. Breument, en un conjunt les pertorbacions s'apliquen sobre les zones del camp de VP amb valors més intensos i major gradient (*PV-gradient*), mentre que en l'altre les pertorbacions s'apliquen a les zones de sensibilitat calculades pel model adjunt MM5 (*PV-adjoint*).

Avaluam l'actuació dels tres conjunts mitjançant una col·lecció de denou ciclons d'alt impacte associats a precipitació i a vents forts (tots el ciclons provenen de la base de dades del projecte MEDEX). La verificació se centra en la precipitació a causa de l'impacte social, tot i que som conscients que les seves característiques, és a dir, forts gradients en l'espai i variacions ràpides en el temps, dificulten el procés de verificació. En altres paraules, és difícil obtenir bons resultats a la verificació quan avaluam el camp de precipitació. Per altra banda, la verificació també es veu afectada per la naturalesa extrema i poc freqüent dels episodis d'interès. Els valors extrems de precipitació no sempre són ben capturats pel model, i la base de dades d'observacions de fenòmens extrems i rars no sempre és prou àmplia (mida de la mostra insuficient).

Els nostres resultats, tal com esperàvem, mostren que el sistema de predicció per conjunts proporciona una predicció més hàbil que una predicció determinista. A més, quan els comparam, el conjunt *PV-gradient* es mostra més hàbil que el conjunt de multifísica. Entre els conjunts *PV-perturbed*, l'SPC *PV-gradient* també supera en habilitat el conjunt *PV-adjoint*. Això implica que el cost computacional addicional d'utilitzar el model adjunt MM5 en el conjunt *PV-adjoint* no és compensat en habilitat de predicció. Per tant, el conjunt *PV-gradient* ha resultat ser una estratègia rendible, tant per la simplicitat com per l'habilitat que demostra.

Posteriorment, els tres conjunts s'apliquen a tres situacions diferents per tornar a posar a prova el potencial i la utilitat que tenen. L'èxit d'aquestes aplicacions ha estat divers. La primera aplicació consisteix a construir un *superensemble* basat en el nostre conjunt de multifísica. Els resultats mostren que el cost addicional de construir un *superensemble* en comptes d'una mitjana amb el biaix corregit no es veu compensat en habilitat, ja que les dues prediccions obtenen puntuacions similars en la verificació. La segona aplicació utilitza el conjunt *PV-gradient* per calcular el camp de precipitació necessari per a les simulacions hidrometeorològiques d'escolament. En aquest cas, els resultats mostren que l'ús d'una estratègia basada en la predicció per conjunts dins un sistema hidrometeorològic de

predicció d'escolament millora la dita predicció. Per tant, en aquesta aplicació l'ús de tècniques basades en predicció per conjunts es mostra com un bon mètode per millorar el resultat de les simulacions d'escolament. La tercera aplicació mostra el potencial d'altres mètodes basats en la pertorbació del camp de VP. En aquesta aplicació modifiquem el camp de VP en base a la informació que ens proporciona el canal de vapor d'aigua del satèl·lit METEOSAT-7. Les modificacions es fan aprofitant la relació teòrica entre el camp de VP a nivells alts i el camp de temperatura de brillantor de vapor d'aigua. Els resultats mostren que quan aplicam una tècnica de pertorbació obtenim una millor predicció que quan no l'aplicam. A més, quan comparem el resultat d'aquesta tècnica de pertorbació amb els resultats dels membres de la predicció per conjunts *PV-gradient* i *PV-adjoint*, veim que es manté dins els rangs dels dos conjunts i és estadísticament indistingible.

Els resultats d'aquesta tesi mostren la utilitat i la idoneïtat dels mètodes de predicció basats en la pertorbació dels tàlvegs de nivells alts, precursors de les situacions ciclòniques. Els resultats i les estratègies presentades pretenen ser un punt de partida per a futurs estudis que facin ús d'aquests mètodes.

Summary

The western Mediterranean region is often affected by heavy rain events. These events generally have quite an impact on society due to the economic losses, personal injuries and fatalities they cause. The connection between some of these heavy rain events and the presence of a cyclone over the region has been established. The western Mediterranean is recognized as a very cyclogenetic area as a consequence of the complex topography surrounding a quasi-closed sea. As one would expect, any improvement of our capability to predict these potentially dangerous events would represent an important gain for the affected societies. Civil protection services could take advantages of these improved forecasts, so that issuing better preventive measures and earlier warnings would be possible. These quicker reactions could make the difference between major and minor damages or even between life and death.

The main goal of this Thesis is to improve the current prediction skill of these potentially hazardous weather events. We tackle this task by using an ensemble forecasting system approach. We develop and test three different ensemble prediction systems (EPSs) that target western Mediterranean high-impact weather events. By means of these three ensembles we account for uncertainties present in the numerical weather models and in the initial conditions. We deal with the model deficiencies by building a multiphysics ensemble. The members of the multiphysics ensemble are generated by varying the physical parameterization schemes. In addition to the multiphysics ensemble, we use two EPSs built by perturbing the initial conditions and the boundary conditions of the model, so that the impact of the uncertainties of these conditions are accounted for. These perturbations are applied over the potential vorticity (PV) field by means of an inversion technique, exploiting the connection between PV structures and cyclones. So, we call these two ensembles the PV-perturbed ensembles. Working with the PV field has the advantage of defining the perturbations on a single variable, PV, while the PV inversion technique ensures that the rest of meteorological fields are consistently perturbed without compromising the mass-wind balance of the atmosphere. To avoid unrealistic perturbations, we develop a PV error climatology. This climatology provides a PV error range consistent with the PV field uncertainty range. Although the two PV-perturbed ensembles are based on perturbing the PV field, the decision on where to apply the perturbations is different. Briefly, in one en-

semble the perturbations are applied over the most intense values and gradients PV zones (PV-gradient) while in the other the perturbations are applied along the MM5 adjoint model calculated sensitivity zones (PV-adjoint).

We evaluate the performance of the three ensembles on a collection of 19 high-impact cyclones associated with heavy precipitation and strong winds (all cyclones come from the MEDEX database). The verification procedure focuses on the precipitation field due to its direct impact on society, even though we are aware that its features, i.e., strong gradients in space and rapid variations in time, make the verification process difficult. In other words, it is hard to obtain good verification scores when dealing with precipitation. The verification procedure is also affected by the extreme and rare nature of the targeted events. Extreme precipitation values are not always well captured by the model, and the observational database of extreme and rare events is not always as extensive as desired, leading to the well known sampling problem.

Our results show the expected improvement in forecast skill when using an ensemble prediction system instead of a determinist forecast. Moreover, when compared, the PV-gradient ensemble outperforms the multiphysics ensemble. Between the PV-perturbed ensembles, the PV-gradient EPS also outperforms the PV-adjoint ensemble. This means that the extra computational cost derived from running the MM5 adjoint model in the PV-adjoint ensemble is not compensated later in forecast skill. Therefore the PV-gradient ensemble reveals itself as a profitable strategy, owing to both its low computational cost and its competitive skill.

Later, the three ensembles are applied on three different situations to further test their potential and usefulness. These applications result in varying degrees of success. In the first application, we build a superensemble fed by our multiphysics ensemble. The results show that the extra cost of building a superensemble instead of a cheaper bias corrected ensemble mean is not returned in skill since both forecasts obtain similar scores in the verification results. In the second application, we use the PV-gradient ensemble to produce the precipitation fields needed to drive hydrometeorological runoff simulations. Here, the results show that applying an ensemble strategy into a hydrometeorological forecasting chain leads to more skillful runoff simulations. Therefore, in this particular application the use of ensemble-based techniques is a successful method that improves the performance of the runoff simulations. The third application exposes the potentiality of further extending the PV perturbing approach. In this application, we modify the PV

field using the information provided by the METEOSAT-7 satellite water vapor (WV) channel for guidance. This guide comes from the existing relationship between upper-level PV features and WV brightness temperature. The results show that the perturbed run performs better than a non-perturbed run. Besides, when confronted with PV-gradient and PV-adjoint ensembles members, the tested perturbing technique remains within the range of both ensembles members scores and is statistically indistinguishable.

The results of this Thesis show the utility and suitability of forecasting methods based on perturbing the upper-level precursor trough present in cyclonic situations. The results and strategies here discussed aim to be a basis for future studies making use of these methods.