

CALIOPE: SUPERCOMPUTACIÓ PER A MILLORAR LA QUALITAT DE L'AIRE

Jose L. Cánovas, Marta Terrado i Albert Soret

Barcelona Supercomputing Center - Centre Nacional de Supercomputació (BSC-CNS). services-es@bsc.es

Resum: CALIOPE és un sistema de predicció de la qualitat de l'aire desenvolupat pel Departament de Ciències de la Terra del Barcelona Supercomputing Center - Centre Nacional de Supercomputació (BSC-CNS). Gràcies al potencial quant a tractament i anàlisi de dades que proporciona la supercomputació, CALIOPE ofereix pronòstics de la qualitat de l'aire per a Catalunya, la península Ibèrica i Europa, amb informació detallada sobre els principals contaminants regulats per les autoritats europees. A més, els propers mesos el sistema inclourà la simulació de Barcelona a escala urbana (CALIOPE Urban). Aquesta informació és fàcilment accessible des d'un web dirigit tant a gestors públics com a la ciutadania.

Paraules clau: qualitat de l'aire, contaminació atmosfèrica, meteorologia, sistema de pronòstic, emissions, supercomputació.

CALIOPE: SUPERCOMPUTING FOR AIR QUALITY IMPROVEMENT

Abstract: CALIOPE is the air quality forecast system developed by the Earth Sciences Department of Barcelona Supercomputing Center - Centre Nacional de Supercomputació (BSC-CNS). Thanks to the data processing and analysis potential that supercomputing provides, CALIOPE offers air quality forecasts for Catalonia, the Iberian Peninsula and Europe at large, with detailed information on the main pollutants regulated by the European authorities. In the next few months, the system will include Barcelona's simulation on an urban scale (CALIOPE Urban). This information is easily accessible on a website so that both public administrations and citizens can consult it.

Keywords: air quality, air pollution, meteorology, forecast system, emissions, supercomputing.

1. Introducció

1.1. El problema de la contaminació de l'aire

La contaminació atmosfèrica és una greu amenaça per a la salut humana. Molts habitants de les ciutats d'Europa i de tot el món estem exposats a concentracions de determinats contaminants atmosfèrics que superen els límits establerts per l'Organització Mundial de la Salut (OMS) (WHO, 2016).

El principal impacte de la contaminació de l'aire sobre la salut es produeix per l'exposició crònica als nivells habituals de contaminació, que contribueix a fer augmentar, principalment, les malalties cardiovasculars i respiratòries, el càncer de pulmó i la mortalitat. D'altra banda, l'exposició aguda a nivells alts de contaminació pot tenir un impacte negatiu sobre la salut de persones considerades vulnerables (embarassades, nadons, infants, gent gran o persones amb malalties cardiovasculars o respiratòries cròniques), incloent-hi un augment de la mortalitat a curt termini.

Entre els contaminants més importants que es mesuren actualment, hi ha compostos del nitrogen

(monòxid de nitrogen [NO], diòxid de nitrogen [NO₂], altres òxids de nitrogen [NO_x], amoníac [NH₃]), del carboni (monòxid de carboni [CO], diòxid de carboni [CO₂], metà [CH₄], hidrocarburs totals [HCT]) i del sofre (diòxid de sofre [SO₂], àcid sulfhídric [H₂S], àcid sulfúric [H₂SO₄]), oxidants fotoquímics, com ara l'ozó (O₃), i partícules en suspensió (PM, de l'anglès *particulate matter*), que, segons la mida, es classifiquen en PM₁₀ (inferiors a 10 micres) i PM_{2,5} (inferiors a 2,5 micres). L'Agència Europea del Medi Ambient (EEA, de l'anglès European Environment Agency) calcula que a Europa hi ha anualment 417.000 morts prematures per excés de PM_{2,5} i 55.000 morts per excés de NO₂ (dades corresponents a l'any 2018; EEA, 2020).

El trànsit de vehicles és una de les principals fonts d'emissió de contaminants a la majoria de zones urbanes. Les estratègies per a disminuir les emissions causades pel trànsit plantegen l'adopció de combustibles i tecnologies menys contaminants, com ara l'electrificació de la flota (Soret *et al.*, 2014), així com reduir el volum del trànsit amb mesures que impliquin nous usos del sòl o la instauració de peatges urbans (Creutzig *et al.*, 2012; Keuken *et al.*, 2012).

En el cas de Barcelona, des de l'any 2000 es registren nivells excessius de NO₂ a l'aire de la ciutat. Tot i que les dades han anat millorant lleugerament en els darrers anys, durant el període 2018-2019 el 35% dels ciutadans van estar exposats a nivells de NO₂ superiors al valor límit anual de qualitat de l'aire, segons dades de l'agència de salut pública local (Rico *et al.*, 2020). De fet, la Unió Europea ha advertit Espanya que podria rebre possibles sancions per infringir la legislació de qualitat de l'aire comunitària, en incomplir de manera continuada els límits d'emissions contaminants a Barcelona i a l'àrea del Baix Llobregat i el Vallès, així com a Madrid.

Barcelona té una densitat de vehicles molt elevada (aproximadament, 5.500 vehicles per km²) i la majoria dels turismes són dièsel (65%) (Ajuntament de Barcelona, 2017). Reduir la dependència del cotxe i avançar cap a un model que prioritzi el transport públic i el transport actiu (caminar, bicicleta, etc.) milloraria de manera significativa la qualitat de l'aire i reduiria l'impacte negatiu de les emissions del trànsit per a la salut.

1.2. Episodis de contaminació

En determinades situacions atmosfèriques que redueixen la dispersió i la ventilació dels contaminants, com ara la persistència d'un anticicló durant diversos dies i la manca de vent i pluja, els nivells de NO₂ o de PM₁₀ s'incrementen per sobre dels límits de referència de l'OMS. Aquests contaminants provenen tant d'emissions antropogèniques, les que tenen un origen humà, com de l'aportació de partícules d'origen natural, com ara la pols mineral provinent del Sàhara.

Quan es dona una situació en la qual els elevats nivells de contaminació de l'aire es combinen amb condicions meteorològiques que no n'afavoreixen la dispersió, ens trobem davant del que es coneix com a *episodi de contaminació*. Davant d'aquesta situació, les administracions tenen previstos diversos escenaris, que comporten un protocol d'actuació determinat i que pot anar des de mesures per a reduir el trànsit de vehicles privats fins a recomanacions per a limitar l'activitat esportiva a l'aire lliure o abaixar la intensitat de la calefacció.

2. Per què és important estimar la qualitat de l'aire?

En aquestes circumstàncies, predir la qualitat de l'aire esdevé essencial per a gestionar el problema de la contaminació a les grans ciutats, cosa que fa possible la modelització. Un model de qualitat de l'aire és una representació matemàtica que aglutina i sintetitza tots els factors que intervenen en les condicions de l'aire que respirem: condicions meteorològiques (vent, pluja, temperatura, etc.), mobilitat (aranyes de trànsit, perfils de velocitat, etc.) i els principals focus emissors de contaminants (el trànsit, la indústria, etc.).

En general, un model de dispersió dels contaminants atmosfèrics està constituït per un mòdul meteorològic, un mòdul d'emissions i un mòdul fotoquímic o de transport/dispersió dels contaminants. La combinació de tots aquests elements dona com a resultat la distribució espacial i l'evolució temporal de la concentració dels contaminants.

2.1. Quines són les finalitats dels models?

Els instruments utilitzats per a monitorar la qualitat de l'aire han estat, tradicionalment, les estacions de mesurament, que proporcionen observacions sobre els nivells de concentració a l'aire dels principals contaminants atmosfèrics. Els resultats de les mesures que s'obtenen serveixen per a dur a terme les actuacions necessàries per a solucionar els problemes originats per la contaminació. No obstant això, les directives de qualitat de l'aire estableixen que la modelització és una eina complementària a les observacions de les estacions de mesurament, a banda de ser també útil per a la diagnosi, el pronòstic i la planificació de la qualitat de l'aire.

— *Modelització per a complementar les observacions.* Els models serveixen per a complementar els mesuraments *in situ* de la qualitat de l'aire, tot proporcionant una cobertura espacial més gran que la que ofereix la xarxa d'estacions de mesurament, que a Catalunya es coneix com a Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica (XVPCA). Com que es pot estimar la qualitat de l'aire en qualsevol punt, la modelització permet reduir els costos associats a la infraestructura d'estacions. Per exemple, a Catalunya els models proporcionen informació a una escala d'1 km × 1 km, cosa que equivaldria a tenir més de 32.000 estacions de mesurament distribuïdes per tot el territori. Aquestes dades, no obstant això, no tenen la mateixa fiabilitat que les mesures obtingudes per estacions reals, de manera que disposar d'estacions continua sent imprescindible per a calibrar bé els resultats dels models i, per tant, millorar la modelització. Per exemple, la combinació d'observacions i la modelització s'han aplicat per a l'avaluació integrada de la qualitat de l'aire a Santa Cruz de Tenerife, una regió particularment afectada per episodis de contaminació (Balasano *et al.*, 2014).

— *Modelització per a la diagnosi.* Gràcies a l'anàlisi de les dades del passat, es pot estimar la qualitat de l'aire sobre la base dels diferents contaminants per zones representatives del territori, anomenades *zones de qualitat de l'aire* (ZQA), i veure el comportament d'aquests contaminants a escala local, en funció de les condicions meteorològiques. Això permet estudiar episodis passats i entendre millor quines són les condicions en què es produeixen aquests episodis, així com caracteritzar les fonts d'emissió que hi contribueixen. Alguns exemples són l'estudi de les fonts que contribueixen als episodis de contaminació per ozó troposfèric durant l'estiu al sud-oest d'Europa (Pay *et al.*, 2019).

— *Modelització per al pronòstic.* La modelització permet predir la qualitat de l'aire per a les properes hores i dies, la qual cosa pot tenir diverses aplicacions des d'un punt de vista informatiu, tant per a les administracions com per als mitjans de comunicació. Per exemple, a l'hora de llançar alertes sanitàries a la població, especialment dirigides a persones vulnerables a la qualitat de l'aire, com ara infants, pacients de malalties cardiorespiratòries, esportistes, etc. Quant als mitjans, darrerament hi ha hagut un augment destacable de l'interès per oferir informació sobre la qualitat de l'aire de manera complementària a la informació meteorològica. Hi ha exemples de la modelització per al pronòstic de la qualitat de l'aire a diferents escales, des de l'escala europea o nacional fins a la modelització en l'àmbit de carrer (Baldasano *et al.*, 2011; Benavides *et al.*, 2019).

— *Modelització per a la planificació.* La modelització és una eina que ajuda a dissenyar plans i programes per garantir el compliment dels objectius de qualitat de l'aire. Per exemple, permet simular l'impacte de mesures com ara l'electrificació d'una part del parc vehicular de Barcelona, la reducció del nombre total de cotxes que circulen dins dels nuclis urbans o els canvis en la velocitat de circulació (Soret *et al.*, 2014; Benavides *et al.*, 2021). Amb aquestes dades, les administracions poden dissenyar estratègies de planificació urbanística que permetin reduir la contaminació i els seus efectes sobre la salut pública i el medi ambient, com ara la implantació de zones de baixes emissions o l'establiment de mesures de control per a indústries altament contaminants.

3. Models de qualitat de l'aire

3.1. El sistema CALIOPE

CALIOPE és el sistema de predicció de la qualitat de l'aire desenvolupat pel Barcelona Supercomputing Center - Centre Nacional de Supercomputació (BSC-CNS). Creat el 2007, és el sistema operacional de pronòstic de la qualitat de l'aire de referència que utilitzen tant la Generalitat de Catalunya com l'Autoritat del Transport Metropolità (ATM) de l'àrea de Barcelona. En l'àmbit europeu, la branca de recerca de CALIOPE, que encara no està en accés obert, és un sistema candidat a formar part del Servei de Monitoratge de l'Atmosfera del Programa Copèrnic (CAMS, de l'anglès Copernicus Atmosphere Monitoring Service), un dels serveis que formen part del programa Copèrnic d'observació de la Terra de la Unió Europea (UE). L'objectiu del CAMS¹ és produir dades numèriques i productes de mapatge que proporcionin informació sobre la qualitat de l'aire i la composició atmosfèrica a escala europea, amb l'objectiu de fer aquesta informació fàcilment accessible a tota la ciutadania.

3.1.1. Descripció del sistema

CALIOPE ofereix pronòstics de la qualitat de l'aire amb resolució temporal horària per a Europa (amb una resolució espacial de 12 km × 12 km), la península Ibèrica (4 km × 4 km) i les illes Canàries (2 km × 2 km), amb especial detall per a Catalunya (1 km × 1 km). El sistema ofereix els pronòstics de manera operacional, a 24 i a 48 hores, sobre els principals contaminants regulats per les autoritats europees (Directiva 2008/50/EC) i l'OMS, que inclouen O₃, NO₂, SO₂, CO, PM i benzè.

Actualment, el sistema està format per la interacció de diversos models numèrics que permeten simular i pronosticar el comportament dels processos físics i químics que afecten els nivells de qualitat de l'aire. Això es fa a través d'un conjunt de models que simulen paràmetres meteorològics (WRF),² emissions antropogèniques (HERMESv3)³ i biogèniques (MEGAN),⁴ de pols mineral del desert (BSC-DREAM8bv2.0)⁵ i de transport fotoquímic o de dispersió de contaminants (CMAQ).⁶

Els resultats obtinguts amb el sistema són processats per a ser explotats de manera visual mitjançant mapes animats i avaluats a través de la comparació amb dades mesurades a les estacions de qualitat de l'aire pertanyents a la Xarxa Europea d'Observacions i Informació sobre el Medi Ambient (EIONET, de l'anglès European Environment Information and Observation Network),⁷ gestionada per l'EEA. El sistema està implementat i s'executa cada dia al superordinador MareNostrum 4, gestionat pel BSC-CNS.

La visualització dels resultats i l'eina gràfica d'avaluació es duen a terme a través de la pàgina web oficial de CALIOPE (www.bsc.es/calioppe/es), mantinguda pel Departament de Ciències de la Terra del BSC-CNS (figura 1).

El sistema permet seleccionar el dia que es vol consultar i el contaminant que es vol representar (figura 2). Per defecte, l'eina de visualització mostra de manera animada els mapes de concentracions horàries per a cada pas de temps del pronòstic (per a les properes 24 i 48 hores). Alternativament, l'usuari pot escollir visualitzar els mapes de les mitjanes o màximes diàries per al primer i el segon dia de pronòstic. Les imatges dels mapes animats poden descarregar-se en format GIF.

CALIOPE també proporciona un indicador diari de la qualitat de l'aire que té en compte diversos contaminants (O₃, NO₂, SO₂, CO i PM) i que es calcula d'acord amb els nivells i els llindars de la Directiva 2008/50/CE i el Reial decret 102/2011. Les diferents categories considerades són:

1. <https://atmosphere.copernicus.eu/>.
2. Weather Research and Forecasting (<http://www.wrf-model.org>).
3. High-Elective Resolution Modelling Emission System, versió 3 (Baldasano *et al.*, 2008).
4. Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (<http://lar.wsu.edu/megan/index.html>).
5. Dust Regional Atmospheric Model (Pérez *et al.*, 2006).
6. Community Multiscale Air Quality Model (<https://www.cmascenter.org/cmaq/>).
7. European Environment Information and Observation Network (www.eionet.europa.eu/).

1. <https://atmosphere.copernicus.eu/>.

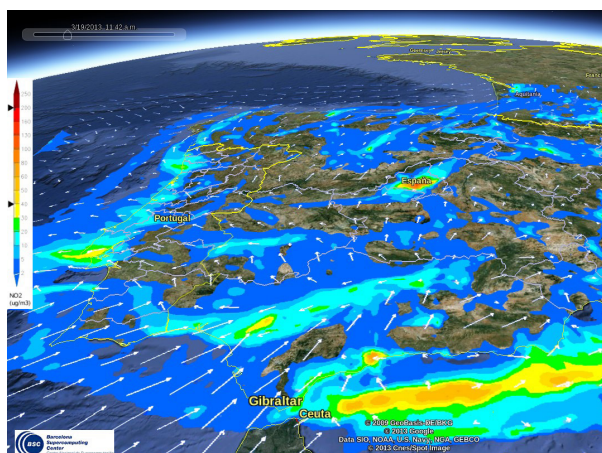


FIGURA 1. El sistema CALIOPE permet veure la distribució de contaminants en qualsevol localització del territori europeu a través del seu web.
FONT: www.bsc.es/caliope/es.

Mijana diària de diòxid de nitrogen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) per al 3 de febrer de 2021
BSC.ES/FORECAST CALIOPE - Resolució 1 km x 1 km

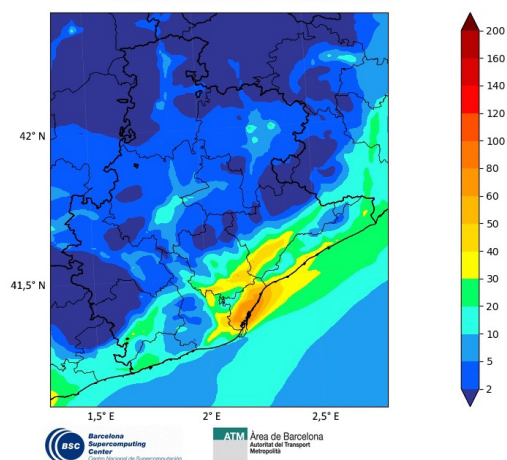


FIGURA 2. El sistema permet seleccionar el dia que es vol consultar i el contaminant que es vol representar, tant al conjunt d'Europa com a Espanya, a Catalunya i a l'àrea de Barcelona.
FONT: Adaptat de www.bsc.es/caliope/es.

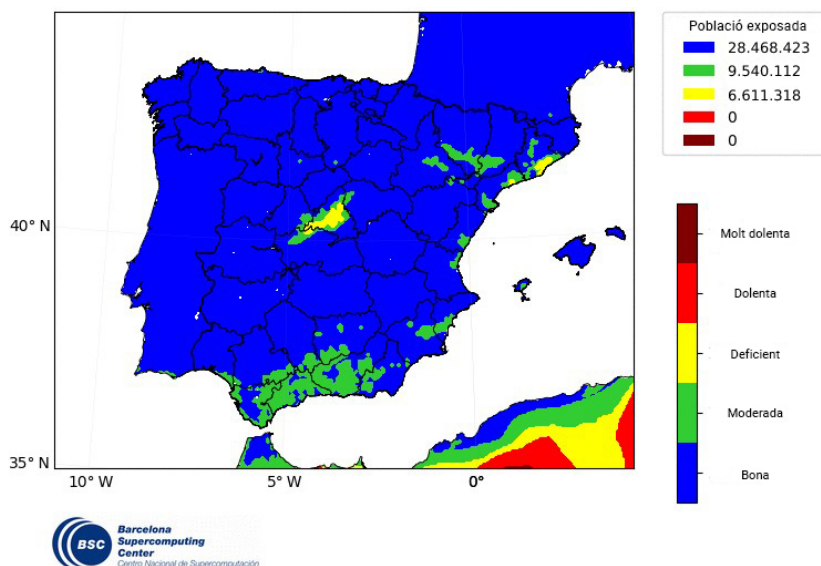


FIGURA 3. CALIOPE permet estimar la població exposada a les diferents categories de qualitat de l'aire a la península Ibèrica, a les Balears i a les Canàries.
FONT: Adaptat de www.bsc.es/caliope/es.

- 1) Bona, quan els contaminants es troben en concentracions baixes a l'aire.
- 2) Moderada, quan la qualitat de l'aire no suposa un risc per a la salut.
- 3) Deficient, quan la qualitat de l'aire està a punt de sobrepassar els nivells límit i, per tant, s'hauria de reduir l'exposició a l'aire lliure.
- 4) Dolenta, quan se supera el valor límit que estableix la legislació per a algun dels contaminants.
- 5) Molt dolenta, quan la qualitat de l'aire pot suposar un risc per a la salut de les persones més vulnerables, ja que algun dels contaminants supera els llindars d'alerta.

Des d'un punt de vista informatiu, el sistema també estima el nombre de persones que es preveu que estiguin exposades a les diferents categories de qualitat de l'aire (figura 3).

Amb l'objectiu de millorar els pronòstics de qualitat de l'aire, s'està treballant per incorporar el model NMMB-

MONARCH dins del sistema CALIOPE-CAT (Pérez *et al.*, 2011; Haustein *et al.*, 2012). Aquest model substituirà el conjunt de models WRF-ARW/CMAQ/BSC-DREAM8bv2, de manera que simplificarà la cadena d'execució del sistema actual CALIOPE-CAT, optimitzarà la consistència entre processos i, en darrera instància, millorarà els pronòstics.

L'NMMB-MONARCH ha estat desenvolupat al BSC-CNS amb el suport d'altres centres d'investigació internacionals (Centres Nacionals per a la Predicció Ambiental dels Estats Units [NCEP, de l'anglès National Centers for Environmental Prediction], NASA i Universitat de Califòrnia a Irvine). Actualment, l'NMMB-MONARCH és el model operacional del Barcelona Dust Forecast Center,⁸ que proporciona pronòstics diaris de pols mineral, operatius a 72 ho-

8. Barcelona Dust Forecast Center (<https://dust.aemet.es>).

res per a dominis globals i regionals. L'NMMB-MONARCH és un model candidat a incorporar-se al sistema de predicció de qualitat de l'aire per a Europa de la iniciativa de Producció Regional de Copèrnic (CAMS50), els pronòstics de la qual es basen en els models més avançats de qualitat de l'aire europeus.

3.1.2. CALIOPE-Urban

CALIOPE-Urban neix de la necessitat de disposar de dades més precises dels nivells de concentració dels contaminants de l'aire, amb l'objectiu de mitigar el problema de la contaminació atmosfèrica a les zones urbanes. Es tracta d'un sistema que combina la tecnologia de CALIOPE regional amb un model urbà, que té en compte la contaminació de l'aire en l'àmbit de carrer i que utilitza informació sobre les emissions del trànsit i dades meteorològiques. El sistema permet capturar la contaminació de l'aire amb resolucions molt altes de fins a deu metres, cada hora, a diferents altures i en qualsevol punt de la ciutat. Això fa possible objectius com ara senyalar els carrers menys contaminats per on caminar o reduir el trànsit al voltant de zones escolars.

El sistema CALIOPE-Urban incorpora noves metodologies adequades per a ciutats molt urbanitzades com Barcelona, on conviuen edificis i carrers amb una àmplia gamma de patrons geomètrics. CALIOPE-Urban considera la geometria urbana, el vent i l'estabilitat atmosfèrica (turbulència) per calcular les concentracions dels contaminants amb una precisió més gran (figura 4). D'aquesta manera, el sistema permet avaluar aspectes com ara l'impacte de l'excés d'emissions d'òxids de nitrogen dels vehicles dièsel en la qualitat de l'aire. Els resultats demostren que a la ciutat de Barcelona les concentracions de NO₂ disminuirien, aproximadament, un 20% si els turismes i les furgonetes dièsel complissin els límits legals que marca la Unió Europea (Benavides *et al.*, 2021).

Mitjana anual de NO₂ (2019)

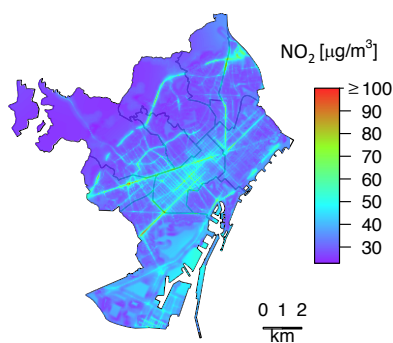


FIGURA 4. CALIOPE-Urban calcula la contaminació de l'aire en qualsevol punt de la ciutat a partir de la geometria, el vent i l'estabilitat atmosfèrica. A la imatge, es pot veure la concentració mitjana anual de NO₂ a Barcelona durant l'any 2019.

FONT: Elaboració pròpia.

4. Les dades massives (*big data*) i la qualitat de l'aire

4.1. Supercomputació

Avui en dia hi ha una gran varietat de sensors que generen dades sobre la Terra de manera contínua. A conseqüència d'això, els investigadors s'enfronten al repte de tractar enormes quantitats de dades heterogènies que creixen a un ritme gairebé exponencial i que són difícils de processar i disseminar utilitzant mètodes convencionals. Aquestes dades procedeixen de fonts molt diverses, des de plataformes satel·litàries o sensors *in situ*, fins a simulacions fetes amb models numèrics del sistema terrestre o avaluacions de les condicions del passat, que combinen totes les fonts d'informació disponibles. Tal com passa en el cas de CALIOPE i CALIOPE-Urban, les millores progressives en els models numèrics impliquen un augment de la resolució espacial per a capturar millor la influència de fenòmens que ocorren a escales més petites o a freqüències temporals més altes, la qual cosa incrementa encara més el volum de dades generades.

En matèria de contaminació de l'aire, l'anàlisi de les dades massives permet conèixer de manera precisa els nivells, la localització i el comportament dels contaminants atmosfèrics. Per proporcionar prediccions de la qualitat de l'aire es requereixen plataformes de càlcul d'altres prestacions, en les quals ordinadors formats d'elements similars als dels ordinadors personals estan connectats per una xarxa especial que permet una interconnexió d'ordres de magnitud més ràpida que la que trobem a Internet, així com infraestructures (discos, nodes de càlcul per al processament, etc.) connectades que permeten gestionar un volum ingent de dades. L'alta resolució que ofereix CALIOPE és possible gràcies a la seva implementació en el superordinador MareNostrum, allotjat al BSC-CNS (figura 5).

CALIOPE és un model operacional que proporciona una predicció cada dia. L'execució del sistema arrenca de



FIGURA 5. L'alta resolució que ofereix CALIOPE és possible gràcies a la seva implementació en el superordinador MareNostrum, allotjat al BSC-CNS.

FONT: Barcelona Supercomputing Center - Centre Nacional de Supercomputació (BSC-CNS).

manera automàtica a les 20.00 hores i la seva duració per a simular un pronòstic de 48 hores és de gairebé 6 hores. Això inclou l'execució tant dels models numèrics de simulació com dels postprocessos en els tres dominis de treball (Europa, península Ibèrica i Catalunya). Aquest tipus d'operació permet que hi hagi temps suficient per a postprocessar, emmagatzemar i disseminar les prediccions de cada dia abans d'haver de tractar les del dia següent. El factor crític rau a proporcionar als usuaris les prediccions —que consisteixen en un resum de les dades obtingudes en la simulació— al més aviat possible perquè puguin prendre les decisions rellevants abans que les prediccions perdin valor.

4.2. Postprocessament de les dades

Els fitxers originals produïts per aquests models contenen la informació modelitzada de cada paràmetre i dimensió, la qual cosa provoca que la seva mida final sigui força elevada. A manera d'exemple, els fitxers originals de sortida d'un dia de simulació (24 hores) dels models WRF-ARW i CMAQ per al domini CAT-1 km ocupen, respectivament, 8,4 Gb i 51 Gb. Seguint amb el mateix exemple, guardar un any sencer de resultats modelitzats per a aquest domini implicaria fer ús d'un emmagatzematge total de més de 21 Tb. En el marc d'un sistema de pronòstic operacional diari, resulta essencial optimitzar la mida original d'aquests fitxers per a permetre'n un emmagatzematge i una gestió correctes.

Un altre factor important és que, en el cas dels resultats de qualitat de l'aire, és útil expressar-los a través de mitjanes diàries, màxims diaris o màxims octohoraris, per tal de facilitar la comparació dels resultats modelats amb els diferents valors límit de qualitat de l'aire que es defineixen a la Directiva europea de la qualitat de l'aire 2008/50/EC. Depenent del contaminant considerat, la Directiva estableix els nivells per a diferents intervals de temps (per exemple, mitjana diària per al material particulat, màxim horari per al NO₂, etc.).

Per tal de resoldre els punts anteriors (mida i tipus de sortides), el sistema permet seleccionar només les variables meteorològiques i de qualitat de l'aire que es volen guardar, i calcular, a partir dels valors horaris originals, altres paràmetres, incloent-hi mitjanes diàries, màxims diaris o màxims octohoraris. Com a resultat d'aquest procés, l'espai total ocupat pels fitxers de sortida un cop han estat tractats és d'aproximadament 400 Mb per cada dia de simulació (24 hores).

4.3. Avaluació del pronòstic

A banda de ser una eina web de visualització per a mostrar els mapes de pronòstic que el sistema genera, la pàgina web de CALIOPE també s'utilitza per a mostrar l'avaluació del pronòstic a través de la comparació amb dades d'observacions de la xarxa EIONET (figura 6). Per a cada un

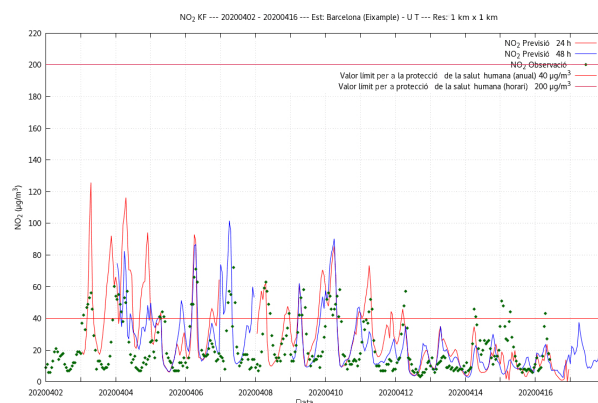


FIGURA 6. CALIOPE també s'utilitza per a mostrar l'avaluació del pronòstic a través de la comparació amb dades d'observacions de la xarxa EIONET. FONT: Adaptat de www.bsc.es/caliope/es.

dels contaminants, les sèries temporals inclouen com a referència els valors límit marcats per la Directiva europea. En el títol del gràfic temporal s'inclou el nom del contaminant, el període temporal, el nom de l'estació i la seva tipologia.

EIONET reporta, de manera diària, valors de concentració horaris de contaminants observats (NO₂, SO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}) per a cadascuna de les estacions que formen part de la seva xarxa. Aquestes dades es descarreguen quatre cops al dia, mitjançant una interfície de programació d'aplicacions (API) de descàrrega de dades. Les dades d'observacions s'utilitzen tant per a quantificar el rendiment del model mitjançant la comparació entre dades modelades i observades com per a corregir el biaix sistemàtic del sistema aplicant el filtre de Kalman. Això permet reduir la incertesa dels resultats modelats.

4.4. Reptes futurs

El camp de les dades massives i la intel·ligència artificial aplicat a la qualitat de l'aire avança ràpidament, la qual cosa presenta tot un ventall d'oportunitats per a la recerca, però també nous reptes que caldrà abordar. Actualment, ja hi ha nous satèl·lits que donen dades de la columna d'alguns contaminants i d'aquí a uns quants anys passarem a tenir informació de la qualitat de l'aire a resolucions espacials i temporals més elevades que fins ara. Aquestes noves dades observacionals obren un nou camp per a millorar els models i crear productes de més qualitat i adaptats a les necessitats de la societat. Actualment, s'estan fent els passos necessaris per a adaptar els models al nou tipus d'informació que estarà disponible procedent de la nova generació de satèl·lits geoestacionaris, cosa que facilitarà l'assimilació de les dades.

Els camps de la informació proporcionada pels satèl·lits, la informació de superfície i la modelització s'espera que acabin convergint. Cal tenir en compte que tant la informació de satèl·lit com els mesuraments *in situ* són observacions que es poden utilitzar per a corregir els errors sistemàtics

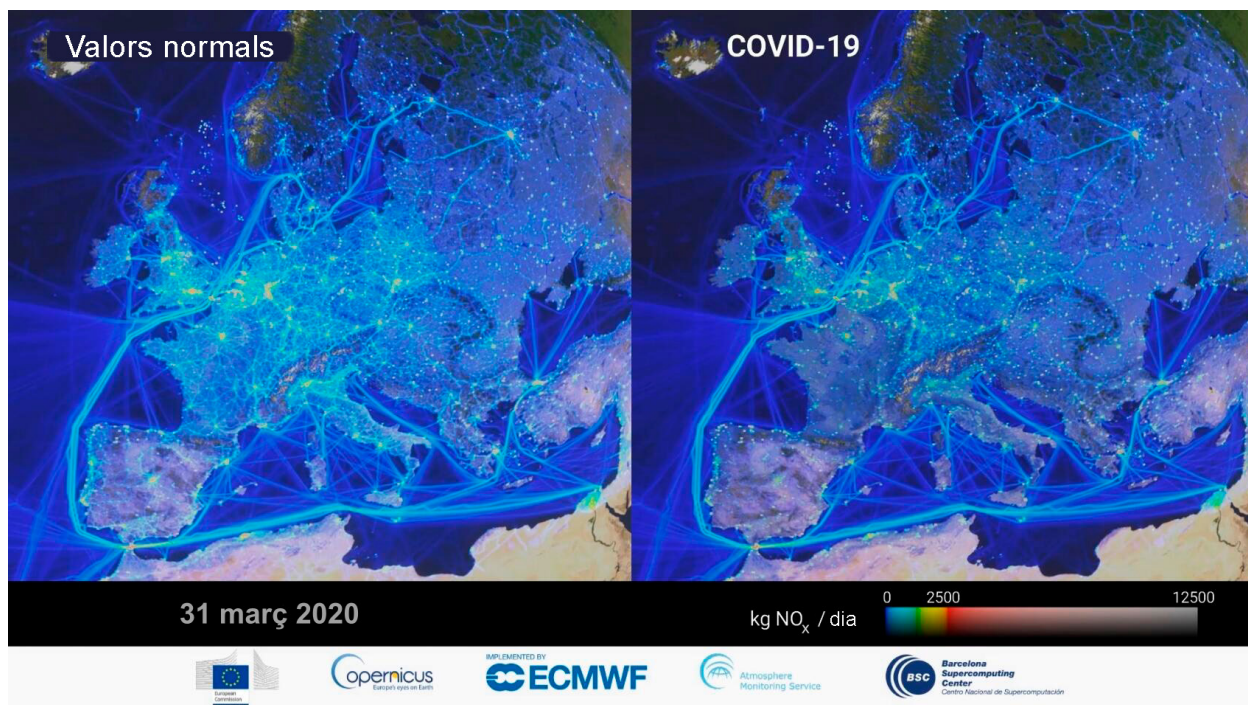


FIGURA 7. Animació que reflecteix el descens de les emissions de NO_x a Europa com a conseqüència de les restriccions causades per la COVID-19 (Guevara *et al.*, 2021).

FONT: Adaptat de Copernicus Atmosphere Monitoring Service/ECMWF/BSC.

dels models. Actualment, els algoritmes d'aprenentatge tenen una evolució molt ràpida i cada vegada hi ha més exemples de l'aplicació de la intel·ligència artificial per a resoldre els problemes de la qualitat de l'aire (figura 7).

5. Casos d'èxit de CALIOPE

La informació que proporciona CALIOPE pot tenir diverses aplicacions. A més de ser una eina de consulta per a la ciutadania a través de la seva pàgina web, també ofereix informació útil per a complementar les observacions de la qualitat de l'aire. Igualment, el sistema es pot utilitzar com a eina de diagnòstic per a estudiar un problema específic, com a eina de pronòstic per a alertar les autoritats sobre els propers pics de contaminació i com a eina de planificació de polítiques urbanístiques i mesures concretes per a fer reduir els nivells de contaminació atmosfèrica a llarg termini.

CALIOPE s'ha utilitzat per a estudiar l'impacte de l'excés d'emissions de NO_x dels vehicles dièsel en la contaminació atmosfèrica en una ciutat compacta com Barcelona (Benavides *et al.*, 2021). Els ciutadans de nombroses capitals europees estem exposats a emissions de NO_x per part dels vehicles dièsel superiors al que estableix la normativa europea, fet que s'ha conegut com l'*escàndol Dieselgate*. L'estudi demostra que aquests vehicles contribueixen a fer augmentar les concentracions de NO_2 , al voltant d'un 20% en el cas de Barcelona, fet que incrementa considerablement el nombre de persones exposades a nivells de contaminació superiors als límits establerts tant per la Unió Europea com per l'OMS. La investigació estableix un diagnòstic que

pot servir com a base per a prendre mesures efectives per a protegir la salut de la ciutadania.

El sistema CALIOPE també es pot utilitzar per a la planificació de la qualitat de l'aire per part de les administracions, ja que permet preveure l'efecte de determinades mesures de reducció de la contaminació abans d'aplicar-les, com ara les zones de baixes emissions (ZBE), o plantejar polítiques urbanístiques, com ara les superilles, en el cas de Barcelona. CALIOPE-Urban s'ha utilitzat per a avaluar l'impacte de l'aplicació de les ZBE en la contaminació atmosfèrica, mesura que restringeix la circulació dels vehicles sense distintiu ambiental al perímetre interior de les rondes de la capital catalana (Benavides *et al.*, 2020). A escala internacional, CALIOPE és un exemple de transferència de tecnologia, en què el BSC-CNS ha desenvolupat un sistema equivalent per a la Secretaria de Medi Ambient del Govern de Mèxic (Sedema) que permet predir la qualitat de l'aire a Ciutat de Mèxic i avaluar mesures per reduir els nivells de contaminació, en el que es coneix com a projecte *Aire CDMX*.⁹

Finalment, també cal destacar com a cas d'èxit que CALIOPE ha esdevingut una font de referència per als mitjans de comunicació de tot Espanya a l'hora de transmetre informació sobre la qualitat de l'aire a la ciutadania. En episodis recents d'alta contaminació, el sistema ha estat utilitzat per les principals cadenes de televisió estatals per a donar prediccions dels nivells de NO_2 i de la seva duració (figura 8).

9. Aire CDMX (<http://www.aire.cdmx.gob.mx>).

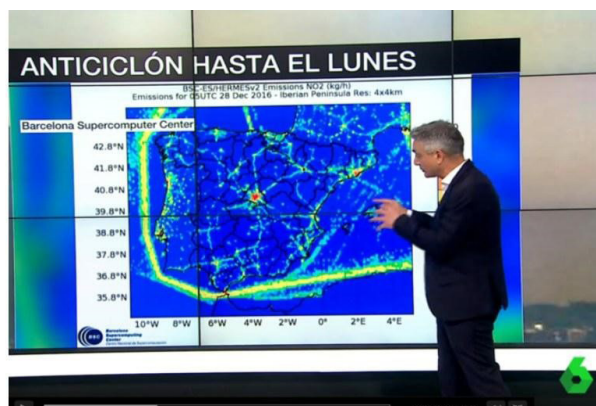
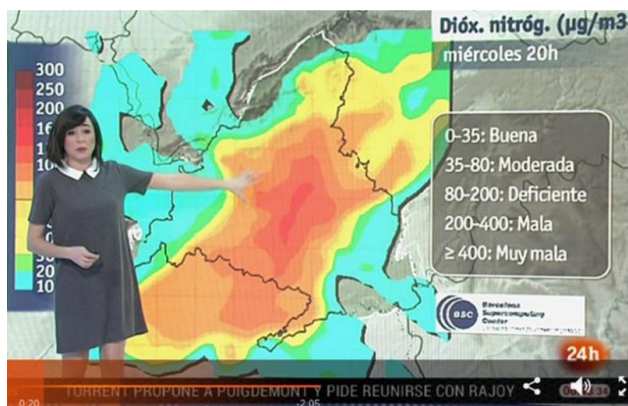


FIGURA 8. CALIOPE ha esdevingut una referència per als mitjans de comunicació a l'hora d'oferir informació sobre la qualitat de l'aire. FONT: RTVE.es (a l'esquerra) i LaSexta.com (a la dreta).

6. El futur de la qualitat de l'aire

Qualitat de l'aire significa qualitat de vida. Cada cop les persones som més conscients de les repercussions que la contaminació de l'aire que respirem té en la nostra salut, per la qual cosa és de vital rellevància que aquestes dades siguin accessibles per a tothom.

Les dades massives contribueixen a un processament massiu de les dades a baix cost, cosa que permet analitzar dades pràcticament en temps real, així com a democratitzar la informació i el coneixement posant-los a l'abast de la ciutadania perquè pugui prendre les seves pròpies decisions. En aquest context, el sistema CALIOPE s'entén com un servei de qualitat de l'aire que proporciona informació i coneixement rellevant per a la societat de manera gratuïta a través de la seva pàgina web. Això permet als ciutadans involucrar-se en temes que els afecten i prendre decisions basades en l'evidència científica i que, al final, repercuteixen en la seva salut.

Les dades massives estan, també, lligades amb el concepte *Internet de les coses* (IdC), una tecnologia a l'alça i amb projecció de futur que consisteix en una xarxa d'objectes físics que utilitzen sensors i interfícies de programació d'aplicacions per a connectar-se i intercanviar una gran varietat de dades. Des d'un punt de vista de la ciutat, la IdC repercuteix en assumptes globals com ara la sostenibilitat de les ciutats intel·ligents (*smart cities*). L'objectiu de la IdC aplicada a la ciutat és optimitzar els recursos alhora que es millora la qualitat de vida de la ciutadania i la gestió del medi ambient mitjançant diferents serveis, com ara el mapatge de la contaminació de l'aire, la gestió del trànsit o la informació sobre la disponibilitat d'aparcament en temps real.

Tot això implica un canvi de paradigma que contribueix a empoderar la ciutadania i a fer-la més responsable i conscient de la necessitat de canviar d'hàbits i de reclamar a les administracions mesures per a reduir l'exposició de la població a elevats nivells de contaminació atmosfèrica, responsables de milers de morts prematures cada any a tot Europa.

Bibliografia

- AJUNTAMENT DE BARCELONA (2017). *Caracterització dels vehicles i les seves emissions a l'àrea metropolitana de Barcelona* [en línia]. Barcelona: Ajuntament de Barcelona: Àrea Metropolitana de Barcelona: RACC. <https://www.bcnregional.com/ca/projects/medi_ambient/caracteritzacio-del-parc-de-vehicles-circulant-en-funcio-de-les-seves-emissions/>. [Consulta: 10 juliol 2021]
- BALDASANO, J. M.; GÜERECA, L. P.; LÓPEZ, E. (2008). «Development of a high-resolution (1 km × 1 km, 1 h) emission model for Spain: The High-Elective Resolution Modelling Emission System (HERMES)». *Atmos. Environ.*, 42, p. 7215-7233.
- BALDASANO, J. M.; PAY, M. T.; JORBA, O.; GASSÓ, S.; JIMÉNEZ-GUERRERO, P. (2011). «An annual assessment of air quality with the CALIOPE modeling system over Spain». *Sci. Total Environ.*, 409, p. 2163-2178.
- BALDASANO, J. M.; SORET, A.; GUEVARA, M.; MARTÍNEZ, F.; GASSÓ, S. (2014). «Integrated assessment of air pollution using observations and modelling in Santa Cruz de Tenerife (Canary Islands)». *Sci. Total Environ.*, 473-474, p. 576-588. DOI 10.1016/j.scitotenv.2013.12.062.
- BENAVIDES, J.; GUEVARA, M.; SNYDER, M.; RODRÍGUEZ-REY, D.; SORET, A.; PEREZ GARCIA-PANDO, C.; JORBA, O. (2021). «On the impact of excess diesel NO_x emissions upon NO₂ pollution in a compact city». *Environ. Res. Lett.*, 16, 024024. DOI 10.1088/1748-9326/abd5dd.
- BENAVIDES, J.; SNYDER, M.; GUEVARA, M.; SORET, A.; PÉREZ GARCÍA-PANDO, C.; AMATO, F.; QUEROL, X.; JORBA, O. (2019). «CALIOPE-Urban v1.0: coupling R-LINE with a mesoscale air quality modelling system for urban air quality forecasts over Barcelona city (Spain)». *Geosci. Model Dev.*, 12, p. 2811-2835. <<https://gmd.copernicus.org/articles/12/2811/2019/>>. DOI 10.5194/gmd-12-2811-2019.
- BENAVIDES, J.; SORET, A.; GUEVARA, M.; PÉREZ-GARCÍA PANDO, C.; SNYDER, M.; AMATO, F.; QUEROL, X.; JORBA, O. (2020). «Potential impact of a low emission zone on street-level air quality in Barcelona city using CALIOPE-urban model». A: MENSINK, C.; GONG, W.; HAKAMI, A. (ed.). *Air pollution modeling and its application xxvi*. ITM 2018. Springer, Cham.

- (Springer Proceedings in Complexity). DOI 10.1007/978-3-030-22055-6_27.
- CREUTZIG, F.; MÜHLHOFF, R.; RÖMER, J. (2012). «Decarbonizing urban transport in European cities: Four cases show possibly high co-benefits». *Environ. Res. Lett.*, 7, p. 1-9. DOI 10.1088/1748-9326/7/4/044042.
- EEA = EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2020). *Air quality in Europe - 2020 report* [en línia]. Luxemburg: Publications Office of the European Union. (EEA Report; 9/2020). <<https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>>.
- GUEVARA, M.; JORBA, O.; SORET, A.; PETETIN, H.; BOWDALO, D.; SERRADELL, K.; TENA, D.; DENIER VAN DER GON, H.; KUENEN, J.; PEUCH, V.-H.; PÉREZ GARCÍA-PANDO, C. (2021). «Time-resolved emission reductions for atmospheric chemistry modelling in Europe during the COVID-19 lockdowns». *Atmos. Chem. Phys.*, 21, p. 773-797. DOI 10.5194/acp-21-773-2021.
- HAUSTEIN, K.; PÉREZ, C.; BALDASANO, J. M.; JORBA, O.; BASART, S.; MILLER, R. L.; JANJIC, Z.; BLACK, T.; NICKOVIC, S.; TODD, M. C.; WASHINGTON, R.; MÜLLER, D.; TESCHE, M.; WEINZIERL, B.; ESSELBORN, M.; SCHLADITZ, A. (2012). «Atmospheric dust modeling from meso to global scales with the online NMMB/BSC-Dust model - Part 2: Experimental campaigns in Northern Africa». *Atmos. Chem. Phys.*, 12, p. 2933-2958. DOI 10.5194/acp-12-2933-2012.
- KEUKEN, M. P.; JONKERS, S.; ZANDVELD, P.; VOOGT, M.; ELSHOUT, S. van den (2012). «Elemental carbon as an indicator for evaluating the impact of traffic measures on air quality and health». *Atmos. Environ.*, 61, p. 1-8. DOI 10.1016/j.atmosenv.2012.07.009.
- PAY, M. T.; GANGOITI, G.; GUEVARA, M.; NAPELENOK, S.; QUEROL, X.; JORBA, O.; PÉREZ GARCÍA-PANDO, C. (2019). «Ozone source apportionment during peak summer events over southwestern Europe». *Atmos. Chem. Phys.*, 19, p. 5467-5494. DOI 10.5194/acp-19-5467-2019>.
- PÉREZ, C.; HAUSTEIN, K.; JANJIC, Z.; JORBA, O.; HUNEEUS, N.; BALDASANO, J. M.; BLACK, T.; BASART, S.; NICKOVIC, S.; MILLER, R. L.; PERLWITZ, J.; SCHULZ, M.; THOMSON, M. (2011). «An online mineral dust aerosol model for meso to global scales: Model description, annual simulations and evaluation». *Atmos. Chem. Phys.*, 11, p. 13001-13027. DOI 10.5194/acp-11-13001-2011.
- PÉREZ, C.; NICKOVIC, S.; PEJANOVIC, G.; BALDASANO, J. M.; ÖZSOY, E. (2006). «Interactive dust-radiation modeling: A step to improve weather forecasts». *J. Geophys. Res.*, 111, D16206. DOI 10.1029/2005JD006717.
- RICO, M.; FONT, L.; ARIMON, J.; MARÍ, M.; GÓMEZ, A.; REALP, E. (2020). *Avaluació de la qualitat de l'aire a la ciutat de Barcelona: 2019* [en línia]. Barcelona: Agència de Salut Pública de Barcelona. <https://www.aspb.cat/wp-content/uploads/2020/10/Informe_qualitat-aire-2019.pdf> [Consulta: 10 juliol 2021].
- SORET, A.; GUEVARA, M.; BALDASANO, J. M. (2014). «The potential impacts of electric vehicles on air quality in the urban areas of Barcelona and Madrid (Spain)». *Atmos. Environ.*, 99, p. 51-63. DOI 10.1016/j.atmosenv.2014.09.048.
- WHO = WORLD HEALTH ORGANIZATION (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease* [en línia]. WHO Library Cataloging-in-Publication Data. <<https://apps.who.int/iris/handle/10665/250141>> [Consulta: 10 juliol 2021].