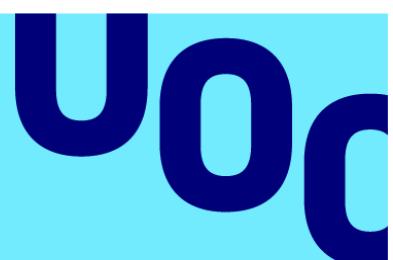


Anàlisi i visualització de la qualitat de l'aire a Barcelona



Universitat Oberta
de Catalunya

Soulaiman el Hamri

Màster en Ciències de Dades
Àrea 5

Tutora de TF

Anna Muñoz Bollas

**Professora responsable de
l'assignatura**

Susana Acedo

25 de maig de 2025

Aquesta obra està subjecta a una llicència de Reconeixement - NoComercial - SenseObraDerivada

[Creative commons](#)



FITXA DEL TREBALL FINAL

Títol del treball:	Anàlisi i visualització de la qualitat de l'aire a Barcelona
Nom de l'autor:	Soulaiman el Hamri
Nom del consultor/a:	Anna Muñoz Bollas
Nom de la PRA	Susana Acedo
Data de lliurament (mm/aaaa)	06/2025
Titulació o programa:	Màster Universitari en Ciència de Dades
Àrea del Treball Final:	Àrea 5
Idioma del treball:	Català
Paraules clau:	Qualitat de l'aire, contaminació, Barcelona i dades ambientals.

Resum

Aquest treball analitza la **qualitat de l'aire a Barcelona** a partir de l'explotació de **dades ambientals obertes**, amb l'objectiu de caracteritzar els **patrons espaciotemporals de la contaminació** i la seva relació amb factors meteorològics i de mobilitat. L'estudi està centrat en contaminants clau com per exemple el **NO₂**, **PM10**, **PM2,5** i **O₃**, avaluant-ne l'evolució temporal, la distribució geogràfica i les zones més afectades.

Mitjançant l'**anàlisi de dades en R**, es realitzarà un estudi estadístic detallat per identificar tendències, correlacions i patrons de variabilitat. Els resultats es presentaran a través de **visualitzacions geoespcionals interactives**, utilitzant **ArcGIS Online**, per facilitar la interpretació i comunicació dels resultats observats.

Aquest projecte busca contribuir a la monitorització i millora de la qualitat de l'aire urbà, proporcionant una eina per avaluar les mesures de mitigació i facilitar la presa de decisions basades en dades en el context de les polítiques ambientals i urbanístiques.

Abstract

This project analyzes **air quality in Barcelona** based on the exploitation of **open environmental data**, with the aim of characterizing the **spatiotemporal patterns of pollution** and its relationship with meteorological and mobility factors. The study focuses on key pollutants such as **NO₂, PM10, PM2.5, and O₃**, assessing their temporal evolution, geographic distribution, and the most affected areas.

Using **data analysis in R**, a detailed statistical study will be carried out to identify trends, correlations, and variability patterns. The results will be presented through **interactive geospatial visualizations** using **ArcGIS Online** to facilitate the interpretation and communication of the observed outcomes.

This project aims to contribute to the **monitoring and improvement of urban air quality** by providing a tool to evaluate mitigation measures and support data-driven decision-making in the context of environmental and urban policies.

Índex general

Resum	4
Abstract	5
Índex general	6
Llista de Figures	7
Llista de Taules	8
1. Introducció	9
1. Context i motivació	10
1.1. Context	10
1.2. Motivació	10
2. Objectius	11
2.1. Objectiu principal	11
2.2. Objectius parcials	11
2.2.1. Objectius generals	11
2.2.2. Objectius específics	12
3. Sostenibilitat, diversitat i desafiaments ètics/socials	12
4. Metodologia	13
5. Planificació	15
5.1. Descripció dels recursos	15
5.2. Fases del projecte	16
5.3. Diagrama de Gantt	18
6. Resum dels productes del projecte	20
7. Breu descripció dels altres capítols de la memòria	21
2. Estat de l'art	22
1. Factors ambientals i urbans que influeixen en la qualitat de l'aire	22
2. Projectes de visualització ambiental	29
3. Decisions tecnològiques	30
3. Disseny i implementació	31
Entorn, obtenció i preprocessament de dades	31
Anàlisi exploratori de dades	35
Preparació geoespatial	47
Desenvolupament del visor interactiu	51
4. Conclusions	62
5. Glossari	64
6. Bibliografia	66

Llista de Figures

- Figura 1. Diagrama de Gantt de les fases 1 i 2 del projecte
- Figura 2. Diagrama de Gantt de la fase 3 del projecte
- Figura 3. Diagrama de Gantt de les fases 4, 5 i 6 del projecte
- Figura 4. Correlació entre el trànsit motoritzat i les concentracions de NO₂
- Figura 5. Temperatures mínimes durant episodis d'inversió tèrmica a Barcelona
- Figura 6. Imatge aèria de l'Eixample de Barcelona.
- Figura 7. Comprovació dels valors NA al dataframe de dades meteorològiques
- Figura 8. Distribució horària dels nivells de contaminants atmosfèrics
- Figura 9. Evolució temporal per dècades dels contaminants NO₂, O₃, PM₁₀ i PM_{2,5}
- Figura 10. Comparació de les concentracions de contaminants segons el tipus d'estació
- Figura 11. Matriu de correlació entre variables meteorològiques i contaminants atmosfèrics
- Figura 12: Mitjana mensual de les concentracions dels principals contaminants
- Figura 13. Mitjana de les concentracions de contaminants per estació de l'any
- Figura 14. Concentració de NO₂ real vs. predit
- Figura 15. Correlació entre observacions reals de NO₂ i prediccions
- Figura 16. Càrrega a ArcGIS Online de les metadades de les estacions meteorològiques de Barcelona
- Figura 17. Configuració al Map Viewer de les capes de les estacions de mesura XEMA i XVPCA de Barcelona
- Figura 18. Dades carregades a ArcGIS Online que seran consumides pel visor interactiu
- Figura 19. Visor interactiu de la qualitat de l'aire a Barcelona
- Figura 20. Codificació en Arcade de la mitjana diària dels contaminants
- Figura 21. Captura dels filtres i indicadors de contaminació
- Figura 22. Captura dels indicadors laterals meteorològics
- Figura 23. Exemple de gràfic de la distribució de la contaminació per estació
- Figura 24. Exemple de gràfic de l'evolució temporal de la concentració de contaminants
- Figura 25. Exemple de gràfic de la comparativa de la mitjana diària de contaminants
- Figura 26. Exemple de gràfic de l'evolució temporal de la temperatura mitjana per estació

Llista de Taules

Taula 1. Llista de les variables meteorològiques més rellevants utilitzades en l'anàlisi.....	34
Taula 2. Estadístiques bàsiques dels principals contaminants atmosfèrics analitzats.....	36
Taula 3. Mètriques de validació del model de predicció.....	44
Taula 4. Resum de les capes de dades utilitzades en el projecte.....	50
Taula 5. Blocs funcionals principals del visor interactiu per a l'exploració de dades ambientals.....	46

Capítol 1

1. Introducció

La qualitat de l'aire en entorns urbans s'ha convertit en un tema de gran rellevància per **l'impacte directe en la salut pública i el medi ambient**. A les ciutats denses com **Barcelona**, les emissions derivades del trànsit o la indústria generen concentracions elevades de contaminants atmosfèrics com **el diòxid de nitrogen (NO₂)**, **les partícules en suspensió (PM10 i PM2,5)** i **l'ozó troposfèric (O₃)**. Diversos estudis alerten sobre les conseqüències d'aquesta contaminació: es calcula que **fins a 1300 morts prematures a l'any a Barcelona** estan relacionades amb la mala qualitat de l'aire, afectant especialment infants i persones grans [6]. Fins i tot si es compleixen els límits legals europeus, l'exposició prolongada a l'aire contaminat pot reduir l'esperança de vida. De fet, segons l'Organització Mundial de la Salut (OMS), si Barcelona reduís els nivells de contaminació als valors recomanats, es podrien evitar fins a 659 morts anuals [1].

Més enllà dels efectes en la salut, **la Unió Europea ha establert un marc normatiu cada vegada més exigent**. La Directiva 2008/50/CE fixa uns valors límit de qualitat de l'aire per protegir la població, com ara 40 µg/m³ de NO₂ com a mitjana anual [2]. No obstant això, Barcelona va incomplir aquests límits durant gairebé una dècada (2010-2018), cosa que va provocar sancions i va obligar a implementar mesures com la Zona de Baixes Emissions (ZBE) [5]. Tot i que aquestes accions han reduït les concentracions de NO₂ en un 30% a les zones amb més trànsit entre 2015 i 2022, els nivells de contaminació **encara superen puntualment les recomanacions de l'OMS** [1]. Això evidencia la necessitat de **continuar monitorant i analitzant la qualitat de l'aire per avaluar l'eficàcia de les polítiques ambientals** i detectar àrees crítiques que requereixin mesures addicionals.

1. Context i motivació

1.1. Context

Aquest **TFM** té com a objectiu analitzar **l'evolució espaciotemporal de la qualitat de l'aire a Barcelona** a partir de dades obertes, utilitzant **eines avançades d'anàlisi i visualització geoespatial**. Mitjançant tècniques d'anàlisi de dades, es vol identificar **patrons de contaminació**, correlacions amb factors meteorològics i potencials millores en la gestió de la qualitat de l'aire. Amb aquest estudi es pretén que pugui servir com a eina de suport per a la presa de decisions en polítiques públiques i per sensibilitzar la ciutadania sobre els nivells de contaminació i la seva distribució a la ciutat.

1.2. Motivació

El meu interès per l'anàlisi de la qualitat de l'aire neix de la meva experiència en **el desenvolupament d'aplicacions web i la visualització de dades**. Al llarg de la meva trajectòria professional, he treballat en projectes de **dades geoespcionals, smart cities i sostenibilitat**, fet que m'ha permès entendre la importància d'aplicar tècniques avançades per a la interpretació i comunicació de dades ambientals. A més a més, durant el màster, em va agradar molt cursar l'assignatura d'anàlisi de dades georeferenciades, la qual em va inspirar a continuar aprofundint en el camp dels Sistemes d'Informació Geogràfica.

Barcelona és una ciutat on **la contaminació atmosfèrica és un problema creixent** i, com a resident i professional del sector tecnològic, m'interessa contribuir amb solucions que ajudin a millorar la comprensió i la gestió d'aquest fenomen. La disponibilitat de **dades obertes proporcionades per la Generalitat i l'Ajuntament de Barcelona** ofereix una oportunitat única per aplicar **tecnologies de visualització interactiva** i models predictius que facilitin l'anàlisi i la presa de decisions.

Aquest TFM em permetrà aprofundir en l'ús de **R i ArcGIS Online** per a la creació de **mapes i dashboards interactius** que ajudin a identificar patrons i tendències en la contaminació atmosfèrica. A més, em motiva especialment la possibilitat de desenvolupar una eina que pugui tenir un impacte positiu, tant en **la recerca acadèmica com en la difusió i conscienciació ciutadana** sobre la qualitat de l'aire.

2. Objectius

En aquest treball s'analitzarà i es visualitzarà la qualitat de l'aire a Barcelona, utilitzant dades obertes de fonts oficials i tècniques avançades de geovisualització. L'objectiu és identificar patrons espacials i temporals de contaminació, explorar la influència de factors meteorològics i de trànsit, i oferir eines visuals interactives per facilitar la interpretació i consulta de les dades.

Per assolir aquests objectius, es duran a terme diverses anàlisis descriptives i estadístiques mitjançant R, i es desenvoluparan representacions geoespaciales a través de ArcGIS Online. Això permetrà no només entendre millor la distribució de la contaminació a la ciutat, sinó també contribuir a la presa de decisions per a la millora de la qualitat de l'aire.

2.1. Objectiu principal

L'objectiu principal d'aquest TFM és analitzar l'evolució espaciotemporal de la qualitat de l'aire a la ciutat de Barcelona a partir de dades obertes, mitjançant l'aplicació d'eines avançades d'anàlisi i visualització geoespacial. A través de tècniques d'anàlisi de dades i modelat predictiu, es pretén identificar patrons de contaminació, establir correlacions amb factors meteorològics, i aportar coneixement per millorar la gestió i les polítiques ambientals relacionades amb la qualitat de l'aire urbà.

2.2. Objectius parciais

Per assolir l'objectiu general, es plantegen una sèrie d'objectius parciais que es divideixen en dos blocs:

2.2.1. Objectius generals

1. Investigar estudis previs i iniciatives similars per definir l'estat de l'art.
2. Executar el projecte seguint un enfocament iteratiu per millorar progressivament l'anàlisi i la visualització.
3. Documentar el procés de treball, incloent els passos de tractament i anàlisi de dades.
4. Sintetitzar els resultats en una presentació clara i visual.
5. Defensar el projecte en l'àmbit acadèmic.
6. Publicar les dades i les eines desenvolupades en un repositori de Github.

2.2.2. Objectius específics

1. Recopilar i processar les dades de qualitat de l'aire de fonts obertes oficials (Open Data BCN, Meteocat, etc.).
2. Analitzar estadísticament amb R la distribució i evolució dels contaminants NO₂, PM10, PM2,5 i O₃.
3. Examinar la influència de les variables meteorològiques i de trànsit en els nivells de contaminació.
4. Construir conjunts de dades geoespcionals que permetin representar la qualitat de l'aire en diferents zones de la ciutat.
5. Realitzar una anàlisi geoespacial i generar mapes amb ArcGIS Online.
6. Desenvolupar visualitzacions interactives amb ArcGIS Online per explorar la informació de manera dinàmica.
7. Permetre als usuaris interactuar amb l'aplicació per analitzar la qualitat de l'aire i extreure coneixement.

3. Sostenibilitat, diversitat i desafiaments ètics/socials

Aquest TFM aborda les tres grans dimensions:

(I) Sostenibilitat: Analitza exhaustivament la qualitat de l'aire a Barcelona per promoure decisions sostenibles en la gestió ambiental i urbana. S'identifiquen patrons de contaminació i zones prioritàries per actuar-hi, facilitant mesures concretes que reduixin la contaminació, protegeixin la salut pública i preservin el medi ambient.

(II) Comportament ètic i responsabilitat social (RS): El treball utilitza exclusivament fonts de dades obertes proporcionades per institucions públiques reconegudes com l'Ajuntament de Barcelona i el Servei Meteorològic de Catalunya. A més, es documenta detalladament tot el procés d'anàlisi per assegurar la responsabilitat social i acadèmica.

(III) Diversitat i drets humans: Té en compte que una millora en la qualitat ambiental urbana contribueix a reduir les desigualtats socials, ja que els efectes negatius de la contaminació atmosfèrica tendeixen a afectar més intensament grups vulnerables com infants, gent gran o persones amb condicions de salut preexistents. Així, aquest treball promou el dret fonamental a viure en un entorn saludable, independentment del context socioeconòmic dels ciutadans.

Els Objectius de Desenvolupament Sostenible específicament abordats són:

- **ODS 3 (Salut i benestar):** Reducció de l'impacte negatiu de la contaminació atmosfèrica sobre la salut pública.
- **ODS 11 (Ciutats i comunitats sostenibles):** Promoció d'una gestió urbana més saludable i sostenible.
- **ODS 13 (Acció climàtica):** Identificació d'accions específiques per mitigar emissions contaminants i lluitar contra el canvi climàtic.

4. Metodologia

Per assolir els objectius establerts, el treball seguirà una metodologia basada en l'anàlisi de dades obertes, la visualització geoespatial i la interpretació de patrons espacials i temporals de la qualitat de l'aire. El procés metodològic es divideix en quatre etapes principals: obtenció i preparació de dades, anàlisi exploratori, visualització i interpretació dels resultats.

Obtenció i preparació de les dades

En primer lloc, es recopilaran i es processaran les dades necessàries per a l'anàlisi. Es treballarà amb fonts oficials de dades obertes que proporcionen informació detallada i actualitzada sobre la qualitat de l'aire i les condicions meteorològiques a Barcelona.

- **Dades de qualitat de l'aire:**
 - Xarxa de vigilància ambiental de l'Ajuntament de Barcelona (Open Data BCN) [3], incloent mesures històriques de NO₂, PM10, PM2,5 i O₃.
 - Dades en temps real i registres horaris per analitzar tendències a curt i llarg termini.
 - Hi ha distinció d'estacions en funció si son de trànsit o urbanes.
- **Dades meteorològiques:**
 - Servei Meteorològic de Catalunya (Meteocat), amb variables com temperatura, humitat relativa, velocitat i direcció del vent, i precipitació [4].
 - Permetrà estudiar com les condicions meteorològiques afecten la dispersió i concentració dels contaminants.
- **Preprocessament de dades:**
 - Unificació de formats i estructuració de les dades per l'seu anàlisi amb R.
 - Tractament de valors mancants i eliminació d'outliers que puguin distorsionar els resultats.

Anàlisi exploratori de dades

Un cop processades les dades, es durà a terme un anàlisi exploratori per identificar tendències, correlacions i patrons de contaminació a la ciutat.

- **Estudi espaciotemporal de la contaminació:**
 - Càcul d'estadístics descriptius per a cada contaminant.
 - Anàlisi de variacions diàries, setmanals i estacionals dels nivells de contaminació.
 - Comparació entre dies feiners/festius i rangs horaris diürns/nocturns per detectar diferències en l'impacte de la mobilitat
- **Anàlisi de correlacions:**
 - Identificació de la relació entre la qualitat de l'aire i les variables meteorològiques mitjançant tècniques estadístiques en R.
 - Estudi de la influència del trànsit en les concentracions de contaminants a diferents punts de la ciutat.
- **Model predictiu:**
 - Desenvolupament d'un model per predir les concentracions de NO₂ a partir de variables de contaminants i meteorològiques.

Visualització i interpretació de resultats

La fase final del treball se centra en la presentació clara i accessible dels resultats mitjançant tècniques de visualització interactiva.

- **Creació de mapes i interactius:**
 - Utilització d' ArcGIS Online per representar la distribució espacial de les estacions XEMA i XVPCA a Barcelona.
 - Incorporació de capes de dades per permetre la consulta detallada de diferents contaminants i factors meteorològics.

- **Desenvolupament d'un dashboard interactiu amb ArcGIS Dashboard:**
 - Implementació d'una aplicació web que permeti als usuaris explorar l'evolució temporal i espacial de la qualitat de l'aire.
 - Creació d'indicadors i gràfiques per representar les dades de contaminants i meteorològiques.
 - Integració de selector d'exploració com filtres per data, contaminant i condicions meteorològiques.
- **Comparació amb límits normatius:**
 - Contrast dels resultats obtinguts amb els límits establerts per la Unió Europea i les recomanacions de l'OMS.

5. Planificació

Per a la realització d'aquest treball, es requereix la disponibilitat de determinats recursos software i hardware i una planificació estructurada en diferents fases, cadascuna amb tasques específiques en funció de les diferents entregues al llarg del semestre.

5.1. Descripció dels recursos

Software:

- **RStudio:** Anàlisi estadística i manipulació de dades.
- **Llibreries d'R:** Tractament de dades geoespcionals i estadística avançada.
- **ArcGIS Online:** Implementació i publicació de mapes interactius, dades i visor al núvol.
- **Excel, Word i PowerPoint:** Redacció i presentació de la memòria.
- **GitHub:** Control de versions i documentació del codi.

Hardware:

- Portàtil amb processador Intel i7 i 16 GB de RAM.

5.2. Fases del projecte

El treball s'organitza en **sis fases**, cadascuna amb els següents objectius i tasques definides:

Fase 1: Definició i planificació del treball final

Objectiu: Definir l'abast del projecte, la metodologia i la planificació del treball

Tasques a realitzar:

- Investigació preliminar sobre la temàtica de la qualitat de l'aire i tècniques de visualització de dades.
- Elecció del títol del treball i definició de les paraules clau.
- Elaboració del resum de la proposta i justificació del treball.
- Definició de la motivació personal i objectius.
- Planificació temporal del treball amb una estructura clara de tasques i fases.

Fase 2: Estat de l'art i selecció de fonts de dades

Objectiu: Analitzar estudis previs, definir la metodologia i validar fonts de dades.

Tasques a realitzar:

- Cerca bibliogràfica sobre qualitat de l'aire i tècniques de visualització geoespacial.
- Identificació de treballs acadèmics i aplicacions existents amb enfocaments similars.
- Selecció i validació de les fonts de dades obertes a utilitzar (Open Data BCN, Meteocat, etc.).
- Refinament de la metodologia segons els resultats de la revisió.

Fase 3: Disseny i implementació de l'anàlisi

Objectiu: Processar i analitzar les dades per obtenir resultats quantitatius i espacials.

Tasques a realitzar:

Sprint 1: Configuració de l'entorn i obtenció de dades

- Instal·lació i configuració de les eines de treball (R Studio i ArcGIS Online).
- Descàrrega i estructuració de les dades de qualitat de l'aire d'Open Data BCN.
- Obtenció de dades de contaminants i meteorològiques.
- Processament inicial de les dades (tractament de valors mancants i neteja de dades).

Sprint 2: Anàlisi exploratori de dades

- Càcul d'estadístics descriptius per als contaminants atmosfèrics.
- Estudi de tendències temporals i variabilitat estacional de la qualitat de l'aire.
- Anàlisi de correlacions entre factors meteorològics, trànsit i contaminació.
- Generació de gràfics exploratoris amb R.
- Modelització predictiva del NO₂ mitjançant l'algoritme Random Forest.

Sprint 3: Geovisualització de dades

- Creació de capes geoespcionals de les estacions XEMA i XVPCA en ArcGIS Online.
- Creació de capes de dades preprocessades a ArcGIS Online de la qualitat de l'aire i meteorològiques.

Sprint 4: Desenvolupament del dashboard interactiu

- Creació d'un visor interactiu amb ArcGIS Dashboard per explorar la contaminació en temps i espai.
- Implementació de filtres per contaminant, ubicació i data.
- Integració de gràfics i mapes dinàmics en la plataforma.

Fase 4: Interpretació i validació dels resultats

Objectiu: Analitzar resultats i comparar-los amb les directrius de qualitat de l'aire.

Tasques a realitzar:

- Interpretació de patrons espaciotemporals detectats.
- Comparació amb els límits normatius establerts per la UE i l'OMS.
- Validació de la visualització interactiva per garantir la fiabilitat.
- Elaboració de conclusions i identificació d'àrees de millora.

Fase 5: Redacció de la documentació del TFM

Objectiu: Documentar tot el procés metodològic i els resultats obtinguts.

Tasques a realitzar:

- Revisió i redacció de la memòria (entrega preliminar).
- Revisió i redacció de la memòria (entrega final).
- Preparació i presentació audiovisual del treball.

Fase 6: Presentació i defensa del treball

Objectiu: Preparar la presentació i exposició.

Tasques a realitzar:

- Assaig de la presentació i resolució de possibles preguntes del tribunal.
- Defensa pública del treball davant el tribunal.

5.3. Diagrama de Gantt

A continuació es mostren les captures de pantalla del diagrama de Gantt, on es mostra la planificació de les diferents fases del projecte. També podeu accedir al full de càlcul original al repositori de GitHub: <https://github.com/SulaimanUOC/TFM-qualitat-aire-barcelona>

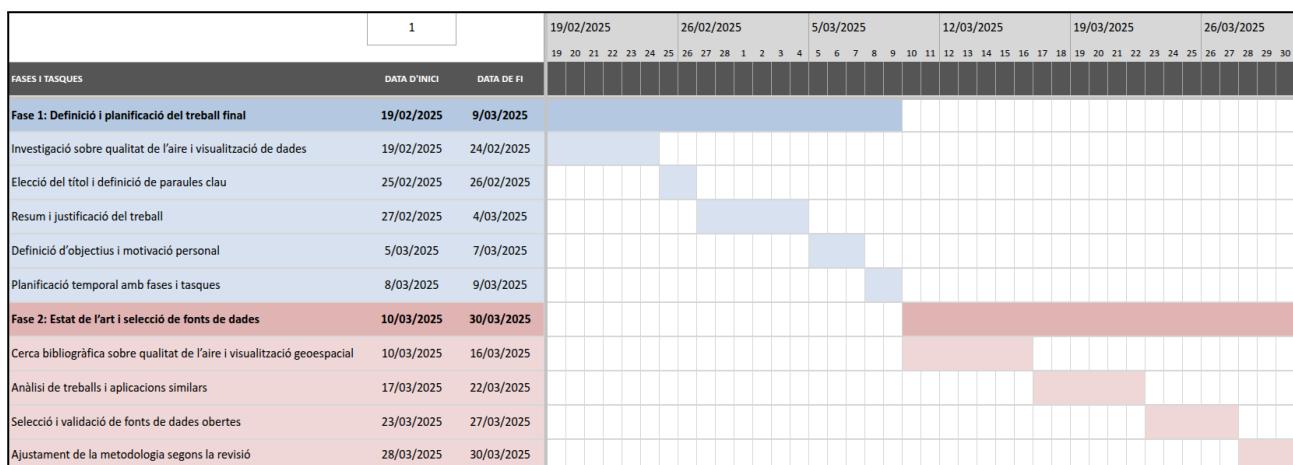


Figura 1: Diagrama de Gantt de les fases 1 i 2 del projecte

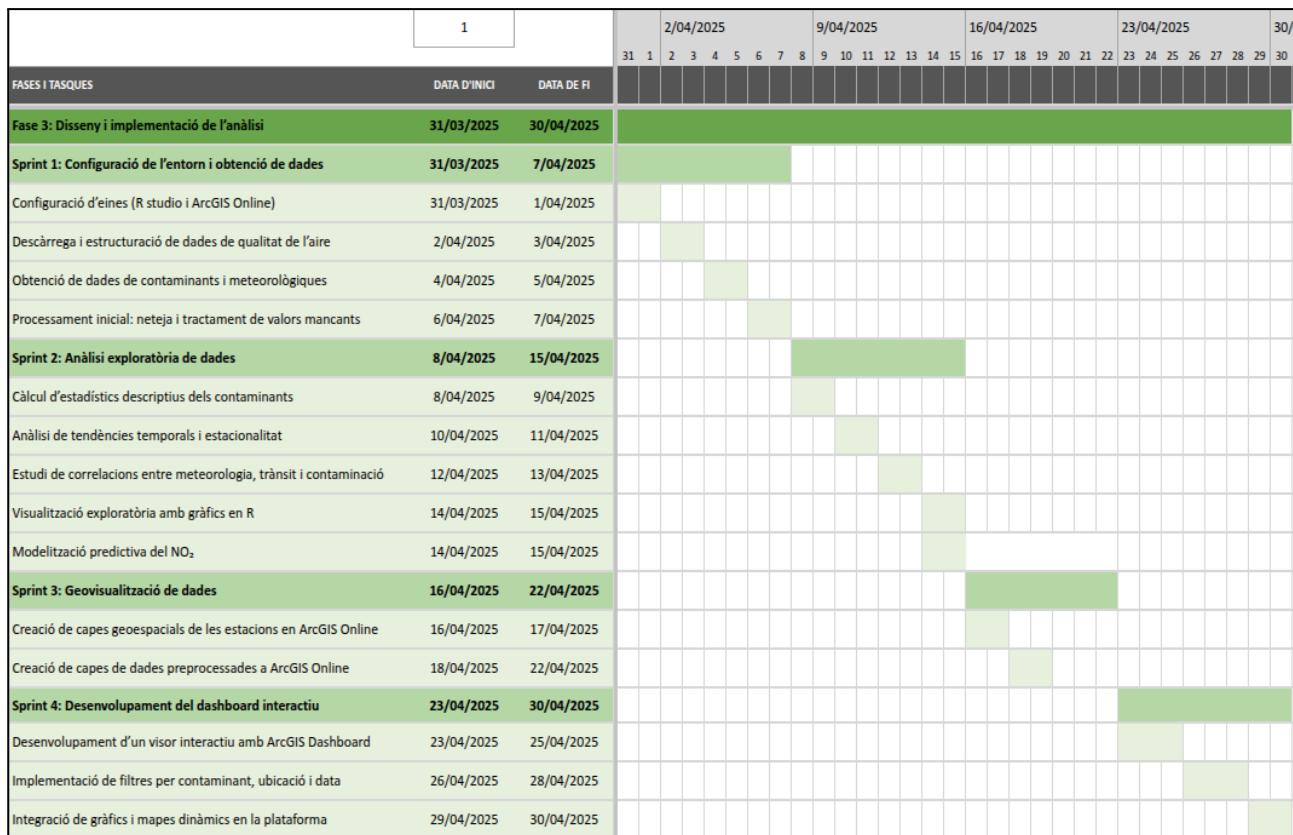


Figura 2: Diagrama de Gantt de la fase 3 del projecte

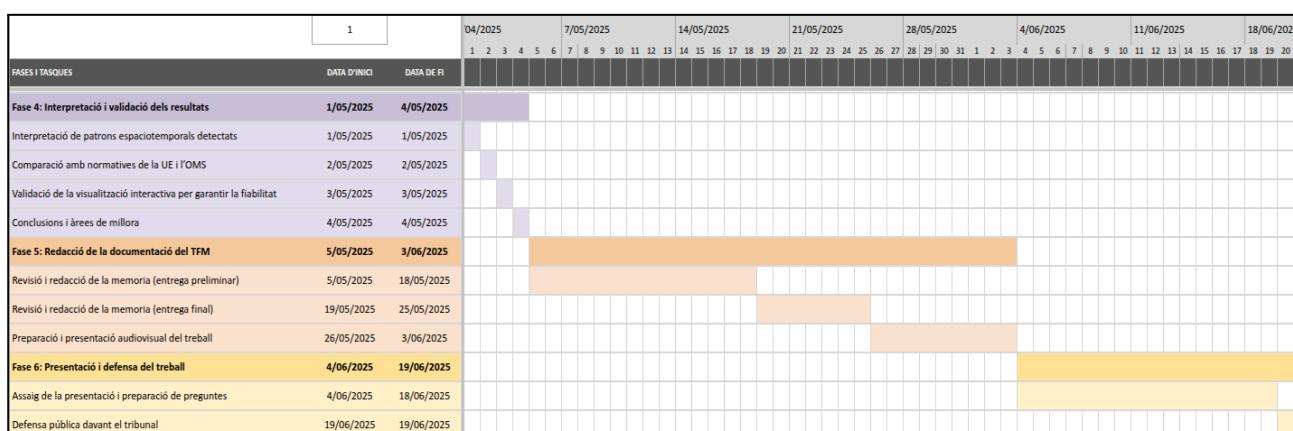


Figura 3: Diagrama de Gantt de les fases 4, 5 i 6 del projecte

6. Resum dels productes del projecte

Com a resultat del desenvolupament d'aquest projecte, s'han generat un conjunt de productes digitals i recursos que permeten tant la reproducció del procés com la consulta interactiva dels resultats:

1. Dades d'origen

Les dades utilitzades provenen de fonts oficials: Open Data BCN i el Servei Meteorològic de Catalunya (Meteocat). Es treballa amb els fitxers següents:

- *contaminants_bcn.csv*: dades horàries de concentració de NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} i O₃.
- *meteo_xema_diari.csv*: valors diaris de temperatura, humitat, vent i precipitació.
- *estacions_xvpca.csv* i *estacions_xema.csv*: metadades de les estacions de mesura.

2. Repositori de codi al GitHub

S'han desenvolupat scripts en R per al processament, transformació, agregació i anàlisi de les dades. També s'hi troben els datasets resultants.

<https://github.com/SulaimanUOC/TFM-qualitat-aire-barcelona>

3. Visor web interactiu amb ArcGIS Dashboards

El dashboard permet visualitzar de forma intuitiva la qualitat de l'aire i les condicions meteorològiques a Barcelona.

[Enllaç al visor](#)

7. Breu descripció dels altres capítols de la memòria

La memòria comença amb una introducció general al problema de la contaminació atmosfèrica urbana i el seu impacte en la salut pública, tot contextualitzant el cas de Barcelona. També es presenta el marc conceptual, incloent-hi els contaminants analitzats (NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ i O_3) i les variables meteorològiques considerades.

El capítol de **disseny i implementació** descriu detalladament el procés de tractament de dades: des de la descàrrega dels datasets bruts, la neteja i transformació amb scripts en R, fins a l'agregació horària i diària per preparar les dades per a la visualització. També s'explica com es van generar les capes geoespcionals amb metadades i valors resumits per a cada estació.

Posteriorment, el capítol dedicat a la **geovisualització** documenta el procés de pujada de capes a ArcGIS Online i la configuració del visor interactiu amb Dashboards. Es descriu l'estructura modular del visor: filtres dinàmics, indicadors, gràfiques i mapa temàtic, així com les opcions d'interacció per part de l'usuari.

El capítol de **resultats** analitza les visualitzacions obtingudes i com aquestes permeten detectar patrons espaciotemporals de contaminació i la seva relació amb la meteorologia.

Finalment, les **conclusions** ofereixen una valoració crítica del treball realitzat, destacant les aportacions al projecte.

Capítol 2

2. Estat de l'art

1. Factors ambientals i urbans que influeixen en la qualitat de l'aire

L'objectiu d'aquest estudi és analitzar i visualitzar la qualitat de l'aire a la ciutat de Barcelona, utilitzant dades obertes i eines de geovisualització per identificar patrons espacials i temporals de contaminació. Aquesta anàlisi té per finalitat comprendre com factors ambientals i humans, **com les condicions meteorològiques, el trànsit o la configuració urbana**, influeixen en els nivells dels principals contaminants: diòxid de nitrogen (**NO₂**), partícules en suspensió (**PM₁₀ i PM_{2.5}**) i ozó troposfèric (**O₃**).

Per assolir aquest objectiu, és necessari identificar quins són els indicadors més rellevants i significatius. Això permet orientar la recopilació i el tractament de dades cap a fonts que aportin valor tant des del punt de vista analític com comunicatiu.

Els contaminants seleccionats són àmpliament reconeguts per la seva afectació a la salut pública. Segons l'Agència de Salut Pública de Barcelona (ASPB), una part significativa de la població barcelonina està exposada a nivells de NO₂ i PM_{2.5} superiors als límits recomanats per l'Organització Mundial de la Salut (OMS) [13]. De fet, és calcula que anualment la contaminació de l'aire causa fins a 1.300 morts prematures a la ciutat.

A més dels valors absoluts dels contaminants, cal entendre els **factors que condicionen la seva presència i distribució**. A continuació es detallen els principals factors que hem de tenir en compte a l'hora de fer l'anàlisis i visualització del projecte:

Trànsit rodat

Aquest és la font principal d'emissions de NO₂ i una de les majors de PM₁₀ a Barcelona. Segons dades de l'Ajuntament [8], els vehicles dièsel, tot i representar una proporció decreixent del parc mòbil, continuen sent els responsables de més del 70% de les emissions de NO₂. Les zones amb més intensitat de trànsit, com l'Eixample, la Gran Via o les Rondes, presenten contínuament els nivells més elevats de contaminació, especialment durant les hores punta del matí (8:00–10:00h) i de la tarda (18:00–20:00h).

Per visualitzar la correlació entre el trànsit i la contaminació, es pot consultar el mapa interactiu desenvolupat per l'empresa Lobelia [9]. Tal com es mostra a la **Figura 4**, es pot veure la concentració de NO₂ a nivell de carrer a Barcelona, basant-se en dades oficials de sensors i informació meteorològica. Gràcies a aquesta eina, els usuaris poden identificar les zones amb més contaminació i planificar rutes que les evitin.

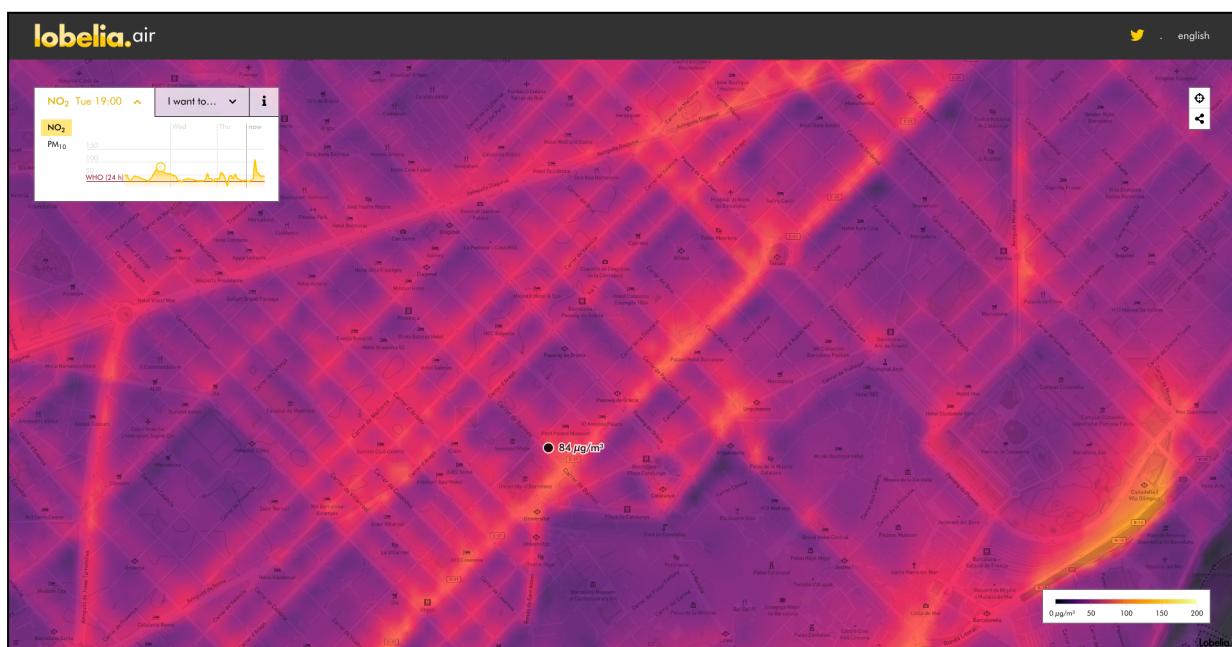


Figura 4: Correlació entre el trànsit motoritzat i les concentracions de NO₂

La **visualització pròpia** del TFM incorporarà gràfics temporals per analitzar l'evolució dels principals contaminants com NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ i O_3 al llarg del dia, en relació amb la intensitat del trànsit rodat. Aquest enfocament permetrà identificar patrons recurrents i entendre millor l'impacte del trànsit en la qualitat de l'aire.

Condicions meteorològiques

Les condicions meteorològiques tenen una influència determinant en la dispersió, concentració i permanència dels contaminants atmosfèrics. Variables com la velocitat i direcció del vent, la temperatura, la humitat relativa i la pressió atmosfèrica condicionen directament la capacitat de dispersió i dilució dels contaminants.

Són molt rellevants els episodis d'**inversió tèrmica** [10][11], habitualment associats a situacions anticiclòniques, en què una capa d'aire càlid situada a major altitud impedeix la dispersió vertical dels contaminants, que acaben acumulant-se a les capes inferiors de l'atmosfera.

Aquests episodis provoquen concentracions elevades de contaminants com NO_2 i partícules en suspensió (PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$), generant puntualment situacions crítiques de qualitat de l'aire a la ciutat.

Tal com es mostra a la **Figura 5**, les temperatures mínimes registrades a Barcelona durant aquests episodis d'inversió són significativament més altes del que seria habitual per a l'època de l'any, indicatiu de la falta de refredament nocturn i de la capa d'aire estable que atrapa els contaminants.

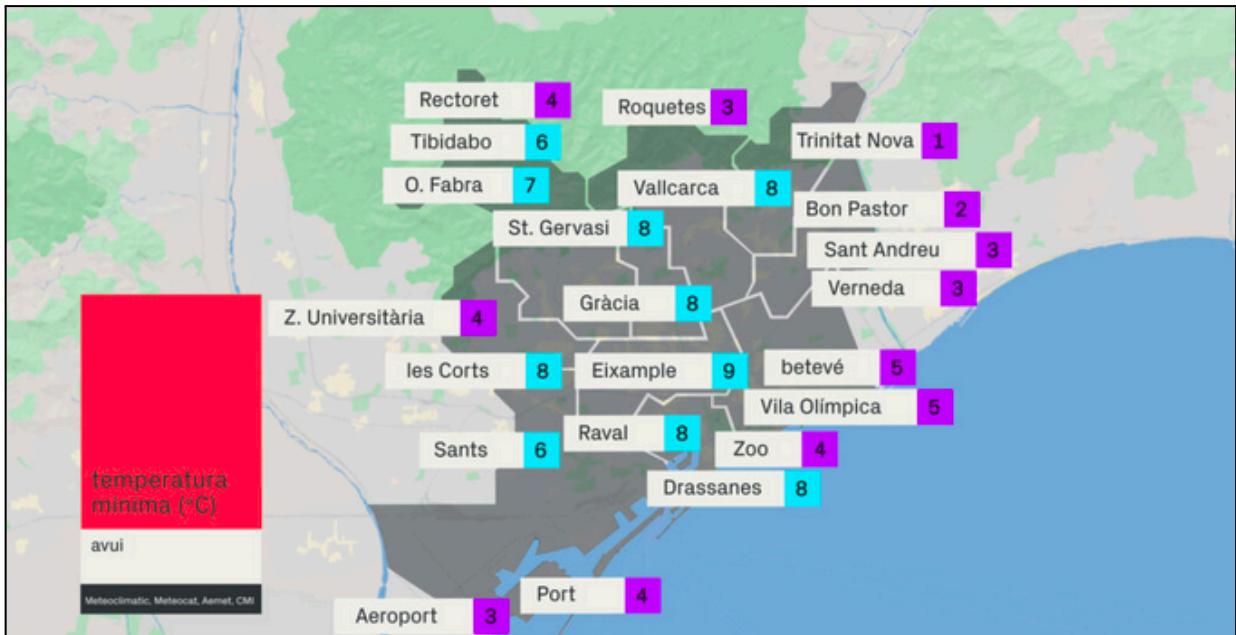


Figura 5: Temperatures mínimes durant episodis d'inversió tèrmica a Barcelona

Per contra, condicions meteorològiques adverses, com ara episodis de vent intens o precipitacions abundants, poden disminuir temporalment les concentracions de contaminants, ja que faciliten la dispersió i el rentat atmosfèric. Segons dades proporcionades pel Servei Meteorològic de Catalunya [12], a Barcelona els mesos amb major freqüència de situacions d'estabilitat atmosfèrica i inversió tèrmica són **novembre, desembre i febrer**, coincidint amb els períodes en què es registren els pics anuals més alts de contaminació atmosfèrica.

Aquesta correlació entre determinades condicions meteorològiques i els pics de contaminació posa en evidència la importància d'integrar variables climàtiques en els models d'anàlisi i en les visualitzacions del projecte. Per això, en la **visualització pròpia** del TFM s'incorporaran capes de dades meteorològiques que permetin contextualitzar l'evolució dels contaminants en funció del temps i reforçar la interpretació espacial i temporal dels episodis de contaminació.

Morfología urbana

La morfologia urbana de Barcelona, especialment en zones com l'Eixample, juga un paper clau en la dispersió dels contaminants atmosfèrics. Carrers estrets i envoltats d'edificis alts poden provocar l'anomenat **efecte canyon urbà**, que dificulta la ventilació natural i afavoreix

l'acumulació de diòxid de nitrogen (NO_2) i partícules en suspensió (PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$).

Segons l'**Informe de Qualitat de l'Aire** elaborat per l'Agència de Salut Pública de Barcelona (ASPB) l'any 2023 [13], els nivells de NO_2 són especialment elevats al centre de la ciutat, destacant el districte de l'Eixample, on es va registrar una mitjana anual de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Aquesta tendència es veu reforçada per l'estudi *Un model micro-escala de distribució de NO_2 per a àrea urbana* (2022), el qual conclou que la configuració geomètrica dels carrers influeix significativament en la concentració de contaminants. En particular, carrers amb una elevada relació alçada/amplada presenten nivells més alts de NO_2 , degut a la dificultat de dispersió vertical [12].

Tal com es pot observar a la **Figura 6**, l'estructura en quadrícula i els carrers estrets de l'Eixample generen aquest efecte canyon urbà, combinat amb l'elevada densitat de trànsit, explicant els nivells especialment alts de contaminació enregistrats en aquest districte.

Per tal d'analitzar aquest fenomen dins el marc del TFM, es crearà una visualització que integri imatges aèries i dades morfològiques, combinades amb concentracions de contaminants. Aquesta representació geoespatial permetrà evidenciar com la disposició urbana condiciona la qualitat de l'aire, posant especial atenció als efectes del *canyon urbà* en districtes densament urbanitzats com l'Eixample.



Figura 6. Imatge aèria de l'Eixample de Barcelona

Vegetació i espais verds

La vegetació urbana exerceix un paper fonamental en la millora de la qualitat de l'aire a les ciutats. Els arbres i altres elements vegetals poden capturar partícules en suspensió a les seves fulles i escorça, reduint-ne la concentració a l'ambient. A més, la presència de parcs i jardins afavoreix la circulació de l'aire i contribueix a mitigar l'efecte d'illa de calor, que pot intensificar l'acumulació de contaminants.

Tot i els seus beneficis, la distribució de la infraestructura verda a Barcelona no és uniforme, fet que genera desigualtats ambientals entre barris. Segons l'**Indicador d'Espai Verd per Càpita (IEVC)** de l'Ajuntament de Barcelona [13], districtes com **Sarrià – Sant Gervasi** disposen de fins a **17 m² de verd per habitant**, mentre que barris com **el Raval o Sants-Badal** no superen els **2 m² per habitant**. Aquesta desigualtat pot implicar una major exposició a la contaminació atmosfèrica per part de la població que viu en zones amb menys cobertura vegetal, fet que accentua les **inequitats ambientals i socials**.

Per a la visualització pròpia del TFM, es generarà un mapa coroplètic de cobertura vegetal per barri, combinat amb dades de concentració de contaminants atmosfèrics (NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ i O_3). Aquesta representació permetrà analitzar la relació entre verd urbà i qualitat de l'aire, així com identificar les zones més vulnerables des d'un punt de vista ambiental i social.

Activitat humana i patrons temporals

Els nivells de contaminació atmosfèrica estan estretament vinculats a les dinàmiques urbanes, especialment a les pautes de mobilitat i a l'activitat socioeconòmica. En aquest sentit, s'observa una diferència significativa entre els dies laborables i els caps de setmana, amb concentracions més elevades de contaminants com el NO_2 durant les jornades laborals. Aquesta variació es deu principalment a la intensitat del trànsit associada als desplaçaments quotidians, especialment durant les franges horàries d'entrada i sortida laboral.

A més, es detecten diferències segons les característiques i usos predominants de cada zona urbana. Àrees properes a centres escolars, eixos comercials, zones industrials o districtes amb una alta densitat de restauració presenten patrons de contaminació diferenciats al llarg del dia.

Per exemple, segons dades de l'**Agència de Salut Pública de Barcelona** [7], els nivells de NO_2 a l'entorn de l'avinguda Meridiana poden augmentar fins a un 40 % respecte a la mitjana diària durant les hores d'entrada i sortida dels centres escolars, a causa de l'increment puntual del trànsit motoritzat.

Aquest conjunt de factors evidencia la necessitat d'adoptar una visió multifactorial i sistèmica de la contaminació atmosfèrica. No n'hi ha prou amb mesurar els valors absoluts dels contaminants: cal comprendre **com**, **quan** i **per què** es generen, es distribueixen i fluctuen en el temps. Aquesta comprensió és essencial per dissenyar polítiques públiques eficaces i eines visuals que permetin comunicar amb claredat la complexitat d'aquest fenomen ambiental.

Per a la visualització pròpia del TFM, s'elaboraran gràfics temporals i mapes dinàmics que representin l'evolució horària i setmanal dels principals contaminants (NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ i O_3), diferenciant entre dies laborables i festius, i entre tipologies de zones urbanes. Això permetrà identificar patrons de concentració associats a l'activitat humana i analitzar com la mobilitat i l'ús del sòl condicionen la qualitat de l'aire a diferents moments del dia i de la setmana.

2. Projectes de visualització ambiental

Diversos projectes i estudis desenvolupats a Barcelona han demostrat el potencial d'integrar dades ambientals, de trànsit i meteorològiques per detectar patrons temporals, desigualtats territorials i correlacions espacials entre múltiples factors urbans.

Plataformes com la Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica (XVPCA) ofereixen dades obertes i històriques sobre concentracions de contaminants a escala local. Aquestes dades, disponibles a través del portal **Open Data BCN**, s'han utilitzat en iniciatives de ciutat intel·ligent que creuen informació ambiental, de mobilitat i condicions climàtiques en visualitzacions orientades a la gestió municipal i la presa de decisions urbanes.

Una altra iniciativa destacada és **Lobelia Air Barcelona** [9], un projecte tecnològic que ofereix un mapa interactiu amb estimacions de concentració de NO₂ a escala de carrer, basat en dades oficials i models de dispersió atmosfèrica. Aquesta eina mostra de manera accessible la contaminació per barris i vies, i ha estat utilitzada tant en entorns educatius com per part de mitjans de comunicació i entitats de recerca.

En l'àmbit científic, projectes com **BREATHE** i **HELIX** [14][15], liderats per l'**Institut de Salut Global de Barcelona (ISGlobal)**, han utilitzat visualitzacions avançades per estudiar els efectes de la contaminació atmosfèrica sobre la salut infantil a la ciutat. Aquests projectes han aplicat gràfics radials, mapes coroplètics i animacions temporals per comparar indicadors ambientals entre barris i analitzar l'exposició segons variables socioeconòmiques i territorials.

També és rellevant l'estudi de **Viana** [16], que va evidenciar la reducció dels nivells de NO₂ durant els confinaments per COVID-19 a Barcelona, mitjançant visualitzacions temporals detallades que correlacionaven mobilitat urbana i qualitat de l'aire.

A diferència d'altres iniciatives que visualitzen dades puntuals, l'objectiu d'aquest treball és desenvolupar una prova de concepte interactiva que combini mapes temàtics, gràfics temporals i capes contextuales per analitzar patrons ambientals, identificar desigualtats territorials i comprendre la contaminació atmosfèrica urbana. Amb aquest enfoc el que es busca és proporcionar una eina útil per a la sensibilització ciutadana i la presa de decisions informades.

3. Decisions tecnològiques

S'ha optat per una arquitectura modular i escalable, pensada per facilitar la integració i visualització de dades ambientals, de trànsit i meteorològiques. Aquesta tria respon tant als requeriments del projecte com a les habilitats adquirides al llarg del màster.

El flux de treball es divideix en tres grans etapes: **anàlisi de dades, preparació geoespacial i publicació web**.

Per al tractament i **anàlisi de dades** s'ha treballat amb R i l'entorn RStudio. En primer lloc, s'ha configurat l'espai de treball, s'han descarregat les dades de qualitat de l'aire i meteorologia, i s'ha fet una primera neteja i estructuració. Posteriorment, s'han calculat estadístics descriptius i s'han analitzat patrons temporals i correlacions amb les variables ambientals. Les visualitzacions exploratòries generades amb ggplot2 han ajudat a identificar tendències significatives. Tot el procés ha estat documentat amb R Markdown. Com a pas final, s'ha desenvolupat un model predictiu del NO₂ utilitzant l'algoritme Random Forest.

En paral·lel, es realitza la **preparació geoespacial** amb Map Viwer (AGOL), que facilita la preparació de capes base i l'aplicació de simbologia personalitzada.

Per a la **publicació web** dels resultats, es fa servir la plataforma ArcGIS Dashboard (AGOL), que facilita la creació de visors interactius amb mapes, gràfics i filtres integrats.

Capítol 3

3. Disseny i implementació

Entorn, obtenció i preprocessament de dades

Aquesta etapa ha tingut com a objectiu establir una base sòlida per al desenvolupament del projecte, mitjançant la preparació de l'entorn tècnic i el preprocessament de les dades ambientals i meteorològiques. A continuació, es detallen les tasques realitzades en aquesta etapa inicial, seguint una estructura pròpia del cicle de vida de la ciència de dades.

Instal·lació i configuració d'eines

S'han configurat els entorns i les eines necessàries per a l'anàlisi i la visualització de dades, prioritant solucions obertes, escalables i reproductibles:

- **R i RStudio:** entorn de desenvolupament per al tractament, anàlisi estadístic, generació de datasets i model predictiu.
- **Llibreries R:** tidyverse, dplyr, ggplot2, caret, pROC i lubridate.
- **ArcGIS Online (Map Viewer i Dashboard):** per a la creació de les capes i visualitzacions interactives del visor.
- **GitHub:** com a repositori de codi, notebooks d'R i documentació.

Obtenció i estructuració de dades

S'han descarregat i organitzat les dades provinents de fonts oficials obertes. Les rutes d'accés a cada font són les següents:

- **Dades meteorològiques (1995–2025):**
 - Descarregades del portal del Servei Meteorològic de Catalunya (Meteocat):
<https://www.meteo.cat/opendata>
 - Inclouen registres diaris de temperatura, precipitació, humitat, vent, etc.
 - Inclou metadades (acrònims, unitats i descripcions) i informació geogràfica de les estacions.
- **Dades de qualitat de l'aire (1991–2025):**
 - Descarregades d'Open Data BCN, el conjunt de dades esta dividit per estacions:
<https://opendata-ajuntament.barcelona.cat>
 - Registres horaris per contaminant (NO2, PM10, PM2.5, O3) i estació.

Les dades s'han organitzat i emmagatzemat al repositori de GitHub seguint una estructura jeràrquica clara. Concretament, les dades originals no tractades s'han ubicat a la carpeta *data/raw/*, mentre que les dades ja processades i preparades per a l'anàlisi es troben a *data/processed/*.

Preprocessament inicial

S'ha realitzat un preprocessament acurat de les dades meteorològiques i de qualitat de l'aire, garantint-ne la qualitat i preparació per a l'anàlisi posterior.

Dades meteorològiques:

- Integració dels conjunts de dades de les estacions de Barcelona en una única taula homogènia.
- Enriquiment amb metadades descriptives per facilitar la comprensió i ús de les variables.
- Conversió de dates al format temporal adequat.

Dades de qualitat de l'aire:

- Filtratge pel camp de municipi per aïllar les dades corresponents a Barcelona

ciutat.

- Selecció dels contaminants rellevants per a l'estudi (NO₂, PM10, PM2.5, O₃).
- Eliminació de columnes innecessàries i ordenació cronològica de les observacions.

Aquestes transformacions han permès passar de dades "raw" a dades "processed".

Codi en R:

Preprocessament de les dades ambientals

La fase de preprocessament ha estat clau per garantir la qualitat, coherència i reutilitzabilitat de les dades de qualitat de l'aire i meteorològiques abans de ser analitzades i visualitzades. Tot el procés s'ha desenvolupat en R i es troba documentat al notebook 01_preprocessament_dades_qualitat_aire_Barcelona.Rmd, disponible al repositori: <https://github.com/SulaimanUOC/TFM-qualitat-aire-barcelona>

Preparació de l'entorn de treball

En primer lloc, s'han carregat totes les llibreries necessàries i s'han definit constants per estructurar els directoris de treball segons la jerarquia data/raw/, data/processed/ i subcarpetes per temàtica (meteocat/ i contaminants/).

També s'han establert formats de dates i rutes d'exportació compatibles amb ArcGIS Online, assegurant l'estandardització temporal i la interoperabilitat de les dades.

Lectura i integració de dades meteorològiques

Per a les dades meteorològiques (XEMA), es van descarregar quatre fitxers CSV corresponents a quatre estacions de la ciutat de Barcelona (codis D5, X2, X4 i X8). Cada fitxer es va llegir forçant el tipus de columna com a text per evitar inconsistències. Aquests fitxers contenen valors diaris de múltiples variables meteorològiques, a continuació es mostra una taula amb les variables rellevants:

ACRÒNIM	NOM VARIABLE	UNITAT
TM	Temperatura mitjana diària	°C
HRM	Humitat relativa mitjana	%
PPT	Precipitació acumulada	mm
PM	Pressió atmosfèrica mitjana	hPa
VVM10	Velocitat mitjana del vent a 10 m	m/s

Taula 1. Llista de les variables meteorològiques més rellevants utilitzades en l'anàlisi

Posteriorment, es van unificar en un únic conjunt mitjançant *bind_rows()* i es va estandarditzar la data de mesura al format *ISO 8601* (YYYY-MM-DDTHH:MM:SSZ), necessari per la càrrega a ArcGIS Online.

Enriquiment amb metadades i transformació a format llarg

Un cop integrades les dades, es va afegir informació descriptiva sobre cada variable mitjançant un fitxer de metadades (*MeteoCat_Metadades.csv*) que conté l'acrònim, el nom complet, la unitat de mesura i un codi numèric per variable.

Per facilitar l'anàlisi posterior i les visualitzacions, es va convertir la taula ampla (amb una columna per variable) a un format llarg, mitjançant una iteració per cada acrònim. En aquest procés es va tenir en compte si la variable disposava de columna de “*data extrem*”, que es va incloure si existia. Aquesta dada només és present per a variables com la temperatura màxima o el vent màxim, de manera que la majoria de registres no la contenen, i per això apareixen molts valors *NA* en aquesta columna (*DATA_EXTREM*).

## DATA_LECTURA	DATA_EXTREM	CODI_ESTACIO	ACRÒNIM	VALOR
## 0	190773	0	0	0
## CODI_VARIABLE	NOM_VARIABLE	UNITAT		
## 0	0	0		

Figura 7. Comprovació dels valors NA al dataframe de dades meteorològiques

Finalment, es van netejar les observacions, transformar els valors a numeric, i es va guardar el conjunt processat al fitxer *meteocat_1995_2025_bcn_processed.csv*.

Preprocessament de dades de qualitat de l'aire

Les dades de contaminants atmosfèrics s'han obtingut del portal Open Data BCN i contenen mesures horàries des de 1991 fins a 2025. El conjunt original es va filtrar per seleccionar només les observacions del municipi de Barcelona i dels contaminants d'interès: NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} i O₃. També es va eliminar informació complementària no necessària (com el municipi, comarca, geocodificació...), i es va ordenar cronològicament el dataset per contaminant i estació. El resultat es va exportar com a *contaminants_bcn_filtrat.csv*.

Resultat final

Com a resultat, es disposa de dos conjunts de dades en format net, estandarditzat i optimitzat per a l'anàlisi posterior i la seva càrrega en capes d'ArcGIS Online:

- Dades meteorològiques diàries (*meteocat_1995_2025_bcn_processed.csv*)
- Dades de qualitat de l'aire horàries (*contaminants_bcn_filtrat.csv*)

Aquest preprocessament ha permès garantir la qualitat del pipeline de dades, facilitar la fusió entre fonts i preparar la informació per a la visualització interactiva amb mapes i dashboards.

Anàlisi exploratori de dades

Aquesta segona etapa ha tingut com a objectiu principal la realització d'un anàlisi exploratori de dades (EDA) centrada en l'estudi dels nivells de contaminació atmosfèrica a la ciutat de Barcelona, mitjançant la integració de dades històriques provinents de les estacions de mesura de qualitat de l'aire (XVPCA) i les estacions meteorològiques del servei Meteocat. Aquesta fase és important per comprendre la naturalesa de les dades, detectar patrons, tendències, anomalies i establir les bases per a una posterior modelització i visualització interactiva.

Tot el procés s'ha desenvolupat en R i es troba documentat al notebook 02_analisis_exploratiu.Rmd, disponible al repositori:

<https://github.com/SulaimanUOC/TFM-qualitat-aire-barcelona>

Estadístiques descriptives

La primera etapa de l'anàlisi ha consistit en la generació d'estadístiques descriptives bàsiques per a cadascun dels contaminants seleccionats: NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} i O₃. En total s'han analitzat **més de 150.000 registres horaris** corresponents a dades des del 1991 fins al 2025, provinents de **11 estacions de Barcelona**, tant de trànsit com urbanes.

A partir d'aquesta base, s'han calculat indicadors com:

- **Mitjana i mediana**, per observar el nivell central de concentració.
- **Desviació estàndard i quartils (Q1, Q3)**, per entendre la dispersió i la forma de les distribucions.
- **Valors mínims i màxims**, que permeten detectar episodis crítics (ex. màxim de PM₁₀ de 1608 µg/m³).

contaminant	n	mínim	q1	mediana	mitjana	q3	màxim	NA
NO2	1538632	0	18	36	41.37	59	483	0
O3	1205738	0	16	41	42.44	64	271	0
PM10	680474	0	15	23	28.30	35	1608	0
PM2.5	55076	1	6	9	11.08	14	180	0

Taula 2. Estadístiques bàsiques dels principals contaminants atmosfèrics analitzats

Els resultats mostren diferències importants entre contaminants:

- **NO₂**: mitjana de 41,4 µg/m³, amb episodis puntuals que superen els 400 µg/m³. Més de 1,5 milions de registres.
- **O₃**: mitjana propera als 42 µg/m³, amb distribució més simètrica. Més d'1,2 milions de registres.
- **PM₁₀**: mitjana de 28,3 µg/m³, però amb valors màxims de fins a 1608 µg/m³.
- **PM_{2.5}**: mitjana de 11 µg/m³ i màxims de 180 µg/m³, amb menys cobertura temporal (unes 55.000 observacions).

Aquestes dades confirmen que, tot i que els nivells mitjans poden ser moderats, existeixen episodis crítics d'exposició elevada.

A continuació analitzem la distribució de les concentracions:

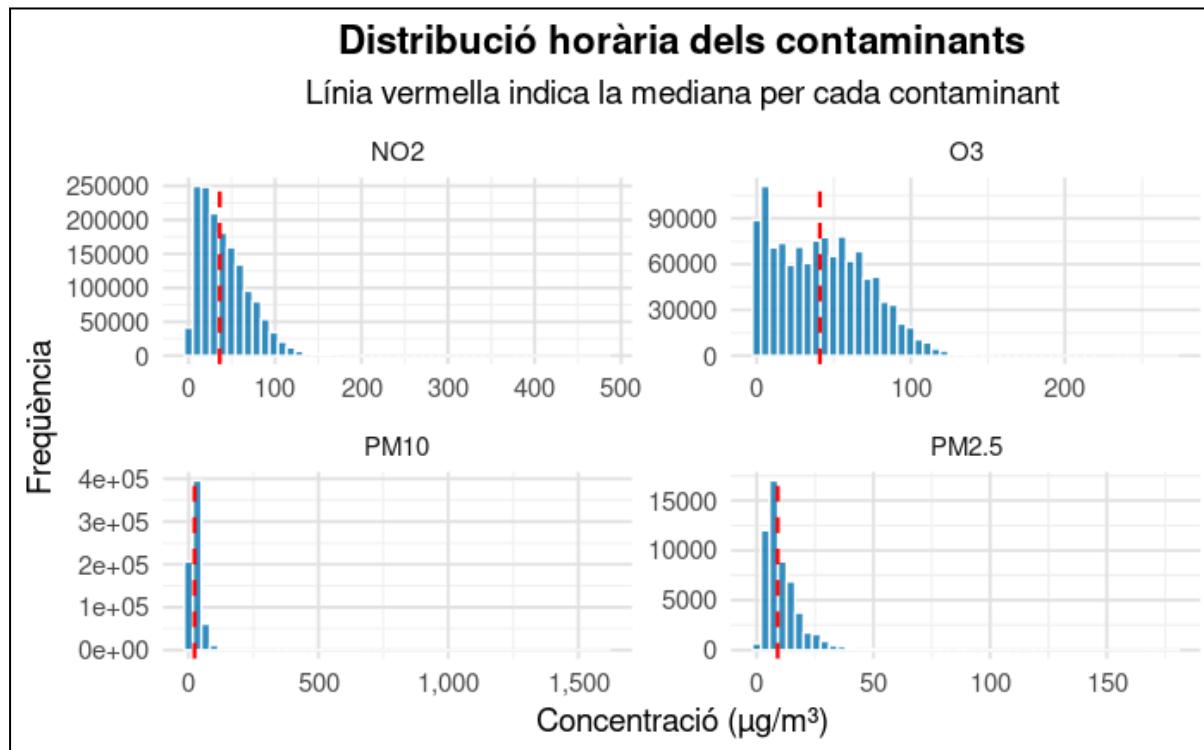


Figura 8. Distribució horària dels nivells de contaminants atmosfèrics

La gràfica mostra que cada contaminant té la seva pròpia dinàmica i rang de variabilitat. La mediana (línia vermella) ajuda a veure on es localitza la major part de les observacions, i la cua a la dreta en NO2, PM10 i PM2.5 ens indica que, tot i que la majoria de registres no són excessivament alts, hi ha episodis concrets on les concentracions pugen substancialment, fet important per avaluar riscos de salut i planificar mesures de mitigació.

Anàlisi temporal

S'ha dut a terme una anàlisi temporal multiescala per observar la dinàmica diària, mensual, estacional i anual dels contaminants. Les sèries temporals s'han suavitzat mitjançant una mitjana mòbil de 30 dies i desglossades per dècades (anys 1990, 2000, 2010 i 2020).

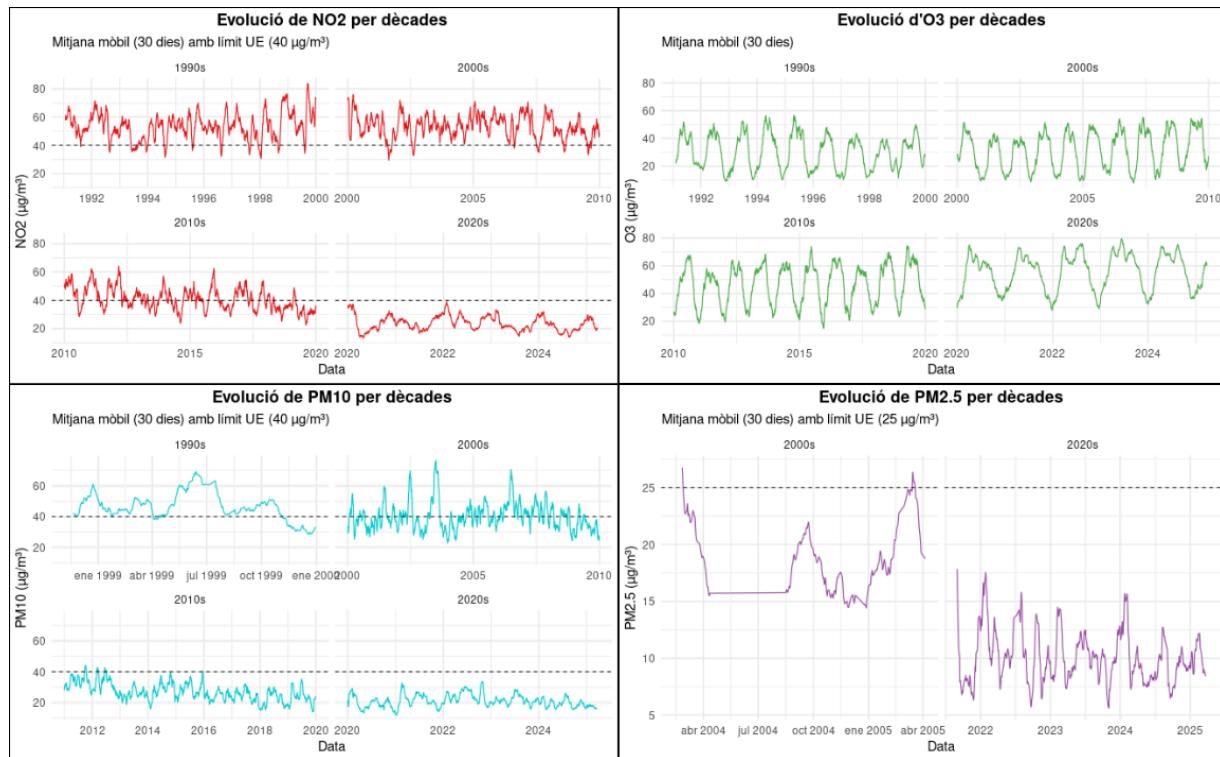


Figura 9. Evolució temporal per dècades dels contaminants NO₂, O₃, PM₁₀ i PM_{2.5}

- Per al NO₂, el límit legal europeu de concentració mitjana anual és de 40 µg/m³ des de l'any 2010 [2]. Des de 2005 s'observa una clara tendència a la baixa, especialment a les estacions de trànsit, en part gràcies a les normatives ambientals i renovació de cotxes nous.
- O₃ mostra un patró **estacional molt marcat**, amb màxims a l'estiu (juny-agost) i mínims a l'hivern, relacionat amb la irradiació solar i les reaccions fotoquímiques.
- **PM₁₀** (límit legal UE 40 µg/m³) i **PM_{2.5}** (límit legal UE 25 µg/m³) evidencien una reducció progressiva, probablement deguda a polítiques de millora de la qualitat de l'aire, però encara amb episodis crítics.

Comparativa per tipus d'estació

S'ha realitzat una comparativa entre **estacions de trànsit** (situades prop de vies amb gran densitat de vehicles) i **estacions urbanes**:

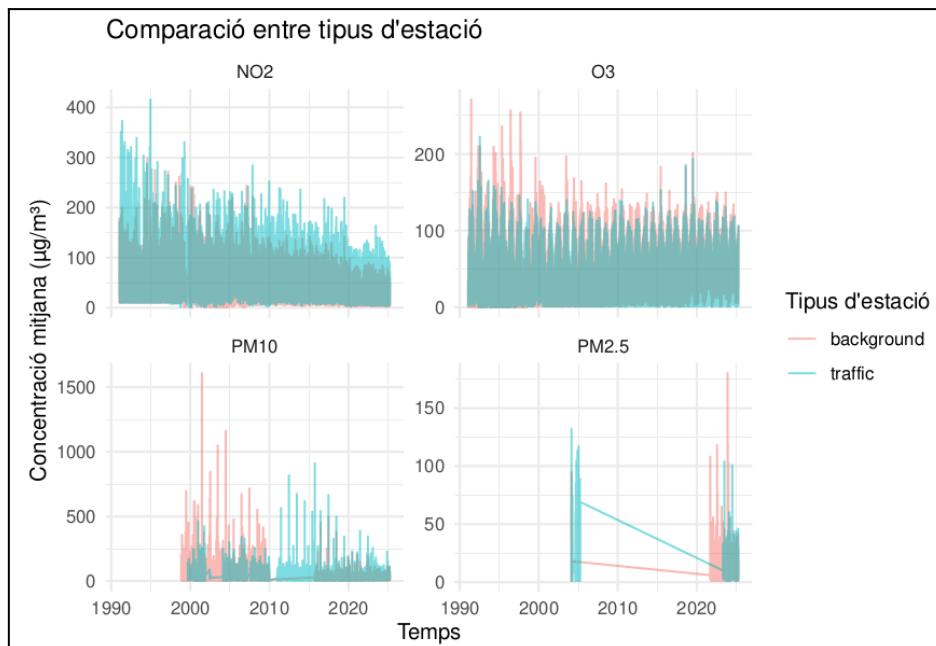


Figura 10. Comparació de les concentracions de contaminants segons el tipus d'estació

La comparació mostra que les estacions situades en zones de trànsit registren concentracions molt més altes de contaminants primaris (NO₂ i partícules), com a resultat de les emissions directes dels vehicles. En canvi, les estacions urbanes acostumen a mostrar nivells més moderats d'aquests contaminants, però poden experimentar pics elevats d'ozó (O₃) a causa dels processos fotoquímics i de la neutralització de l'O₃ pel NO en àrees d'intens trànsit.

Correlacions amb variables meteorològiques

A partir de la integració de dades meteorològiques del Meteocat (variables com TX, TN, HRM, PPT, VVM10, etc.), s'ha elaborat una **matriu de correlació** entre contaminants i condicions ambientals:

Matriu de correlació: variables meteorològiques vs contaminants

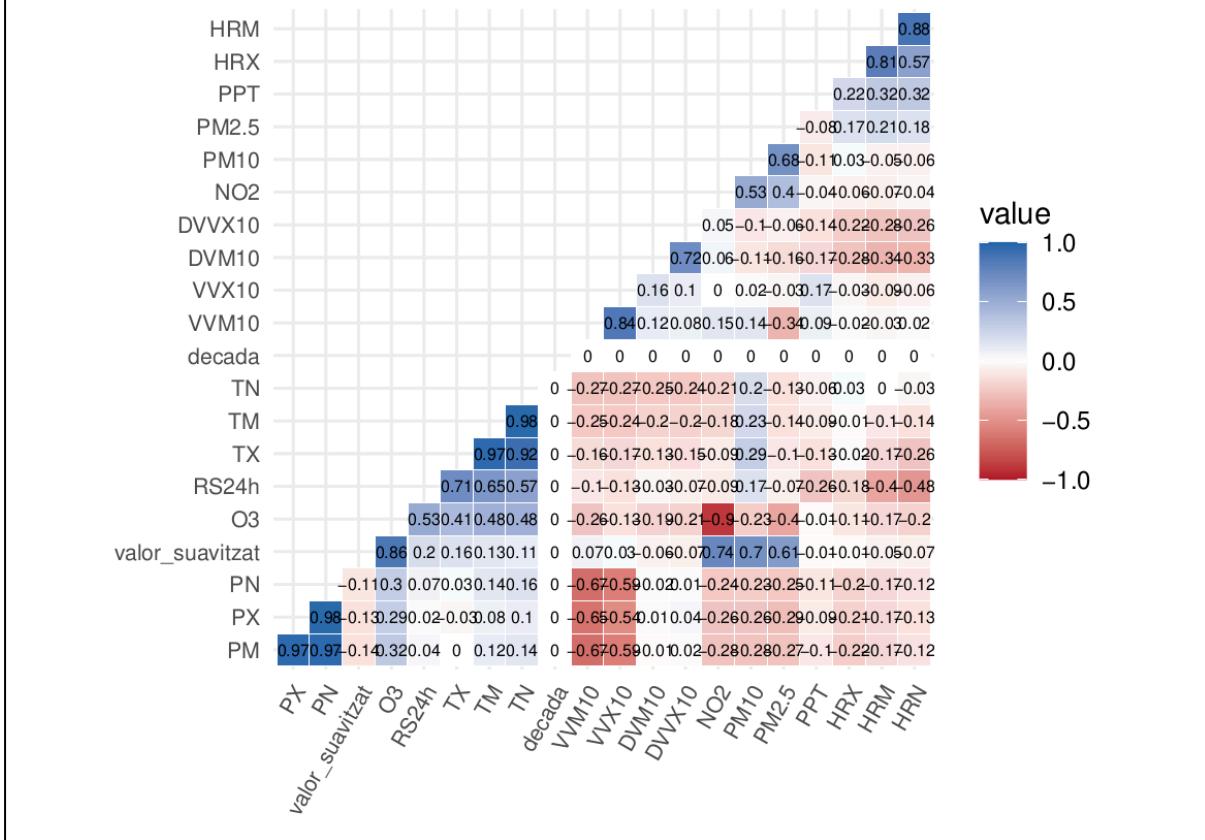


Figura 11. Matriu de correlació entre variables meteorològiques i contaminants atmosfèrics

La matriu de correlacions mostra de manera sintètica les relacions entre variables meteorològiques (com la temperatura màxima **TX**, la temperatura mínima **TN**, el vent a 10 m **VVM10** i **VVX10**, la humitat **HRN** i **HRX**, la precipitació **PPT**, etc.) i diversos contaminants atmosfèrics (**NO2**, **O3**, **PM10**, **PM2.5**, etc.). A continuació es destaquen els aspectes més rellevants:

- **O3** augmenta quan hi ha més temperatura i radiació, però decreix a prop de fonts de **NO2**.
- **PM10** i **PM2.5** s'acompanyen mútuament i també correlacionen amb **NO2** per la font comuna del trànsit.
- **La pluja i el vent** afavoreixen la dispersió i la reducció de concentracions de contaminants.

Aquests patrons són els habituals en àrees urbanes, i reforcen la idea que les condicions

meteorològiques influeixen de manera significativa en la qualitat de l'aire, a més de les característiques d'emissió pròpies de cada contaminant.

Anàlisi estacional

S'ha calculat la mitjana mensual per contaminant:

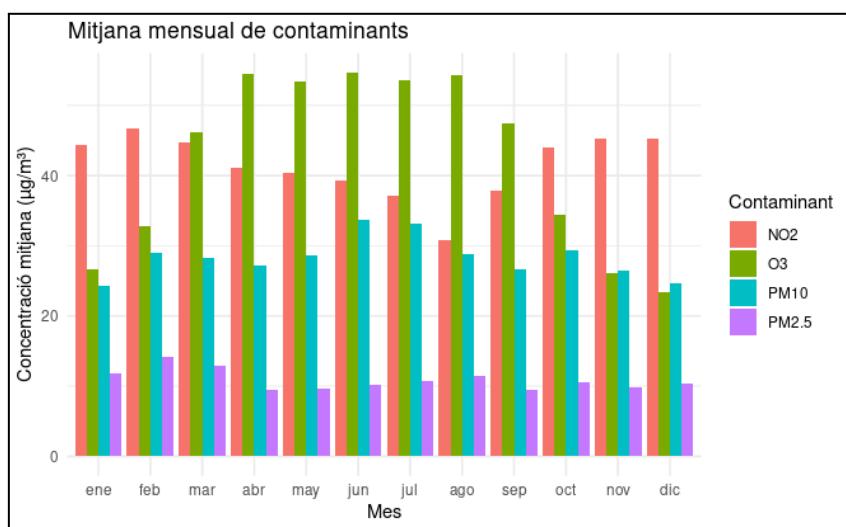


Figura 12. Mitjana mensual de les concentracions dels principals contaminants

La gràfica mostra una clara estacionalitat en la concentració mitjana mensual de NO₂, O₃, PM₁₀ i PM_{2.5}: els valors pugen a la primavera-estiu (maig–setembre) i baixen a la tardor-hivern. L'ozó destaca per un increment marcat amb més irradiació solar i temperatures altes, però també NO₂ i partícules mantenen nivells elevats en períodes antíclònics, amb més trànsit i menys neteja per pluja. A l'hivern, pluges i vents milloren la dispersió i la deposició, reduint les concentracions. Aquest patró subratlla com factors meteorològics i activitats humanes modulen la contaminació urbana al llarg de l'any.

Variabilitat entre estacions

A continuació es representen les concentracions mitjanes dels 4 principals contaminants atmosfèrics per les diverses estacions de mesurament a Barcelona.

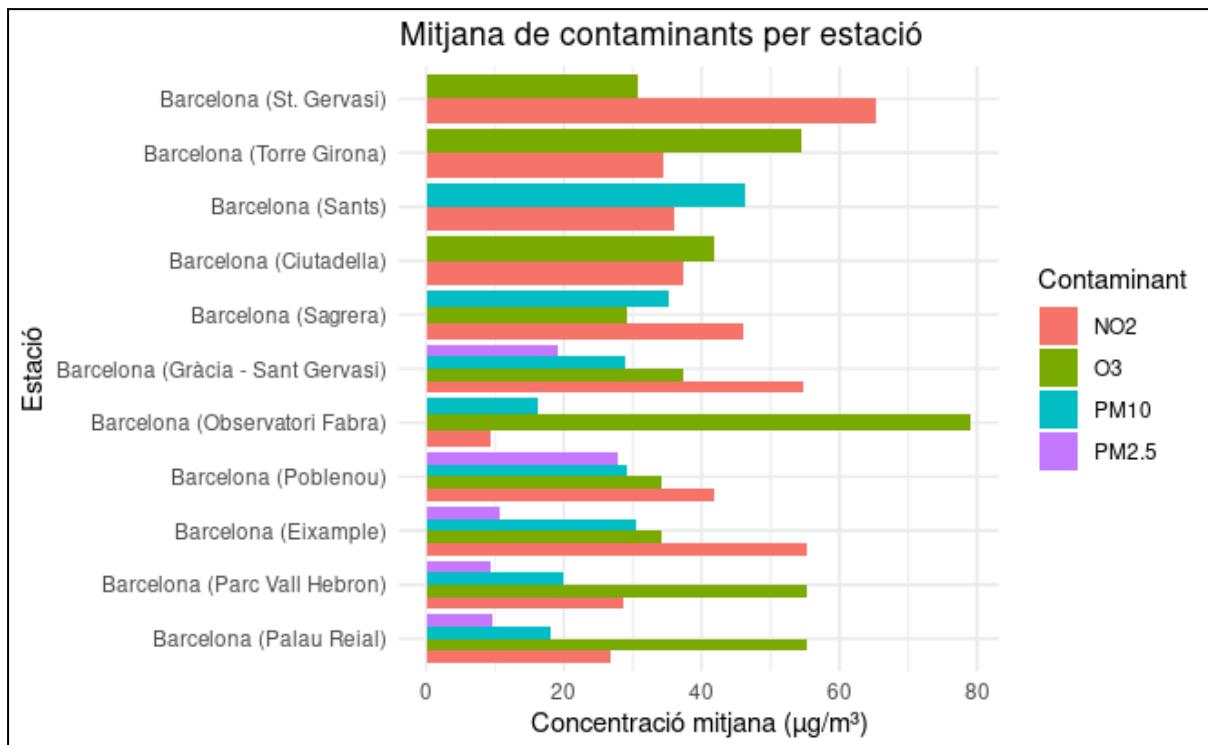


Figura 13. Mitjana de les concentracions de contaminants per estació de l'any

La gràfica presenta les concentracions mitjanes de **NO₂**, **O₃**, **PM₁₀** i **PM_{2.5}** registrades en diferents estacions de mesurament de Barcelona, observant com la **proximitat al trànsit** i **l'altitud** influeixen en els nivells de contaminació.

Les estacions situades en **zones de trànsit intens** mostren **valors de NO₂ significativament més elevats**, mentre que punts com **l'Observatori Fabra** (allunyats del nucli urbà i a major altitud) acumulen **menys NO₂** i registren **concentracions d'ozó (O₃) més altes**, atès que hi ha menys eliminació de l'ozó per part dels òxids de nitrogen.

Pel que fa a les partícules, en gairebé totes les estacions la **mitjana de PM₁₀ supera la de PM_{2.5}**, fet que reflecteix fonts diverses per a les partícules grosses i origen de combustió o reaccions químiques per a les més fines.

Finalment, la comparativa entre barris revela que els districtes més densos i amb més trànsit acumulen **pics de NO₂ i PM₁₀**, mentre que les àrees més residencials o elevades mostren un **perfil més mixt** amb **nivells moderats de NO₂ i un augment relatiu d'O₃**.

Resultat final

En aquesta segona etapa d'anàlisi exploratori hem integrat més de 150 000 registres de qualitat de l'aire (NO_2 , O_3 , PM_{10} i $\text{PM}_{2,5}$) i variables meteorològiques de Barcelona per:

- Descriure el comportament central i la dispersió de cada contaminant, posant de manifest episodis puntuals molt superiors als valors mitjans.
- Explorar la dinàmica temporal: tendència descendent de NO_2 des de 2005, patró estacional marcat d' O_3 i reducció progressiva de PM_{10} i $\text{PM}_{2,5}$, tot i la persistència d'episodis crítics.
- Comparar tipus d'estació: nivells molt alts de NO_2 i partícules en zones de trànsit vs. major presència d'ozó i valors més moderats als punts d'altitud o de fons urbà.
- Correlacionar contaminants i meteorologia, confirmant que temperatura, radiació, vent i pluja modulen significativament les concentracions.

En conjunt, l'EDA avala que la qualitat de l'aire a Barcelona està modelada tant per les fonts d'emissió (especialment el trànsit) com pels factors meteorològics, i estableix una base sòlida per a la seva modelització i visualització interactiva.

Modelització predictiva del contaminant NO_2

Aquesta secció s'ha centrat en el desenvolupament d'un model predictiu per estimar les concentracions diàries de diòxid de nitrogen (NO_2) a la ciutat de Barcelona, utilitzant dades meteorològiques i ambientals. El model serveix per analitzar fins a quin punt la variabilitat de NO_2 pot ser explicada a partir de variables com la temperatura, la humitat o la pressió atmosfèrica, així com per identificar patrons estacionals i temporals rellevants.

Tot el procés ha estat desenvolupat en R i es troba documentat al notebook 03_model_predictiu_contaminant_NO2.Rmd, disponible al repositori:

<https://github.com/SulaimanUOC/TFM-qualitat-aire-barcelona>

Lectura i preparació de dades

S'han integrat dos conjunts principals de dades:

- NO_2 : concentracions diàries per estació a partir del 2020.

- **Meteorologia:** dades de temperatura mitjana (Temp), humitat relativa (Hum), precipitació (Prec), pressió atmosfèrica (Press) i velocitat del vent (Wind).

A més, s'han afegit variables temporals (mes i dia de la setmana) i variables de retard (lag1_NO2 i lag7_NO2) per capturar cicles curts i persistència del contaminant. La fusió de les dades s'ha realitzat associant cada estació de contaminació amb la seva estació meteorològica més propera, mitjançant càlculs de distància geogràfica.

Algorisme i entrenament del model

Per la modelització s'ha utilitzat Random Forest, implementat amb el paquet ranger, que és robust davant dades amb multicolinealitat i relacions no lineals. El model s'ha entrenat amb el 80% inicial del conjunt de dates (2020–2024) i validat amb el 20% final (2024–2025), seguint un enfoc cronològic per evitar fugues d'informació.

Es fa servir validació creuada amb 3 particions (trainControl(method = "cv", number = 3)) i es calcula la importància de les variables per interpretar els resultats.

Resultats i mètriques de rendiment

El model ofereix els següents resultats sobre el conjunt de prova:

Mètrica	Valor
RMSE	6,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
R ²	0,713
MAE	4,75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Taula 3. Mètriques de validació del model de predicció

Aquests valors indiquen una **bona capacitat predictiva**, amb un error absolut mitjà de menys de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i més del 70% de la variabilitat explicada.

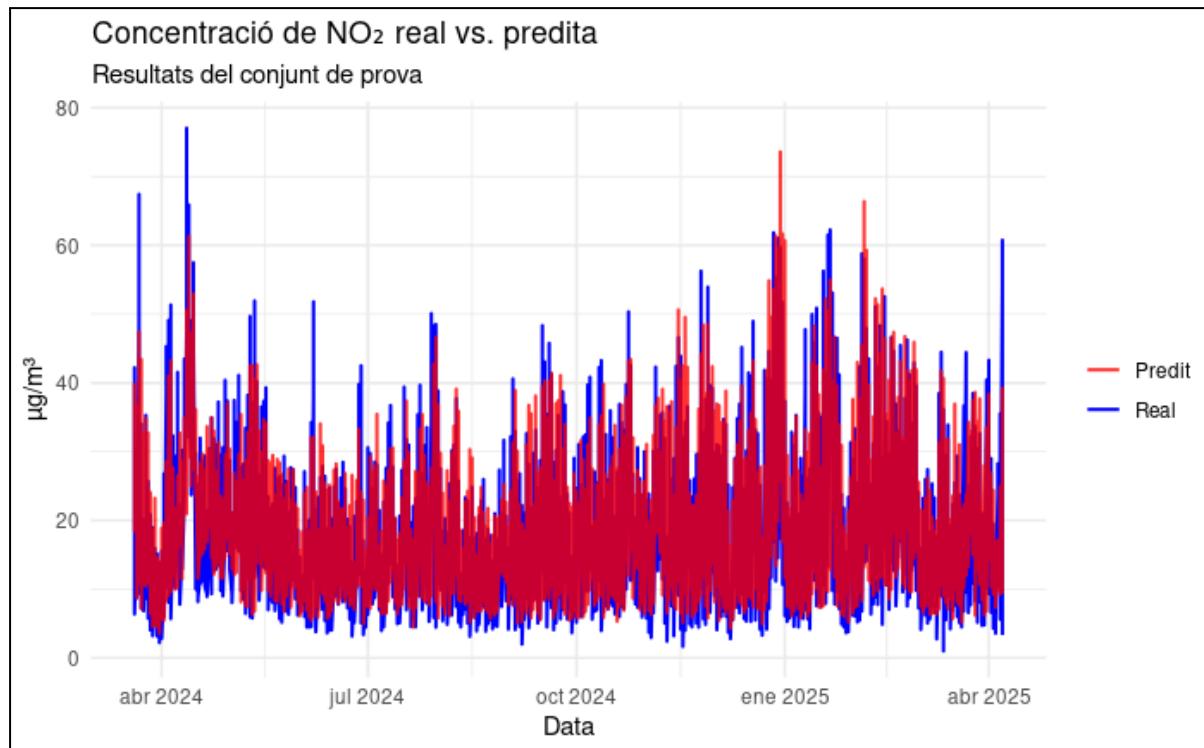


Figura 14. Concentració de NO₂ real vs. predict

Aquesta gràfica mostra l'evolució temporal de les concentracions reals de NO₂ (línia blava) i les prediccions generades pel model Random Forest (línia vermella) durant el període de prova (20% final del dataset). Es pot observar una bona correspondència general entre ambdues sèries, especialment en la capacitat del model per captar les tendències i fluctuacions estacionals.

Tot i això, en alguns pics puntuals de concentracions altes o baixes, el model té certa dificultat per capturar valors extrems.

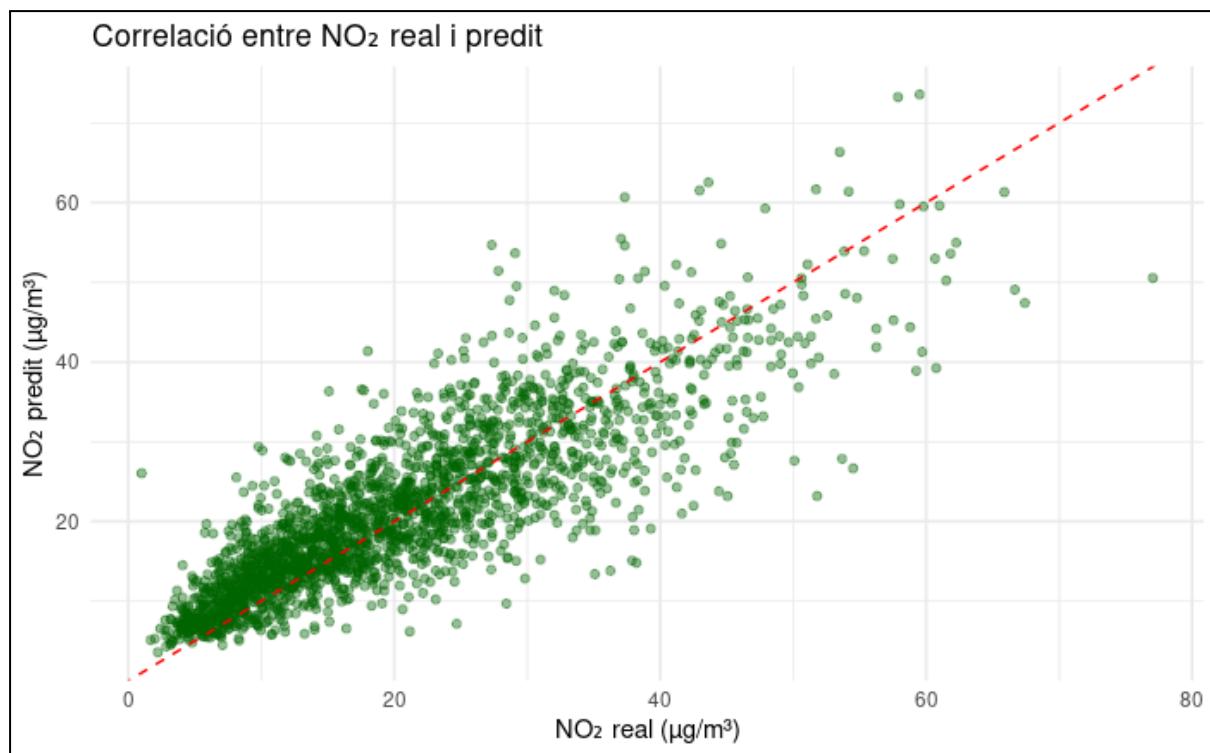


Figura 15. Correlació entre observacions reals de NO₂ i prediccions

El gràfic representa la correlació entre els valors reals de NO₂ (eix X) i els valors predicts pel model (eix Y). Cada punt correspon a una observació diària del conjunt de prova. La línia discontinua vermella representa la recta d'identitat ($y = x$), és a dir, el cas ideal on el valor predit coincideix exactament amb el valor real.

Es pot veure també que la majoria de punts es concentren al voltant de la línia, fet que indica una bona capacitat predictiva. Tanmateix, en concentracions molt altes (superiors als 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), els punts tendeixen a situar-se per sota de la recta, cosa que suggerereix que el model infraestima lleugerament els valors extrems.

Conclusions i perspectives

Els resultats obtinguts mostren que el model desenvolupat constitueix una base sòlida i fiable per a l'anàlisi i prediccó de la contaminació per NO₂ a Barcelona. La seva aplicació permet:

- Identificar i comprendre els principals factors ambientals i temporals que influeixen en les concentracions de NO₂, especialment les condicions meteorològiques i l'estacionalitat.
- Estimar de forma consistent els nivells diaris de contaminació.
- Integrar-se en plataformes de visualització o sistemes d'alerta, facilitant una monitorització més accessible i interactiva.

Preparació geoespacial

Aquesta tercera etapa s'ha centrat en la construcció de les capes geoespcionals i en la configuració inicial del visor web mitjançant **ArcGIS Online**, com a pas previ i indispensable per poder representar i analitzar visualment els nivells de contaminació atmosfèrica a Barcelona i les condicions meteorològiques associades. L'objectiu principal és garantir una base sòlida de dades espacials, coherent i navegable, que pugui ser consumida posteriorment pel **dashboard interactiu** desenvolupat en la següent etapa.

Creació de capes temàtiques d'estacions

A partir de les metadades processades a la fase anterior, s'han generat dues capes de punts georeferenciats:

- **XVPCA** (Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica).
- **XEMA** (Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques)

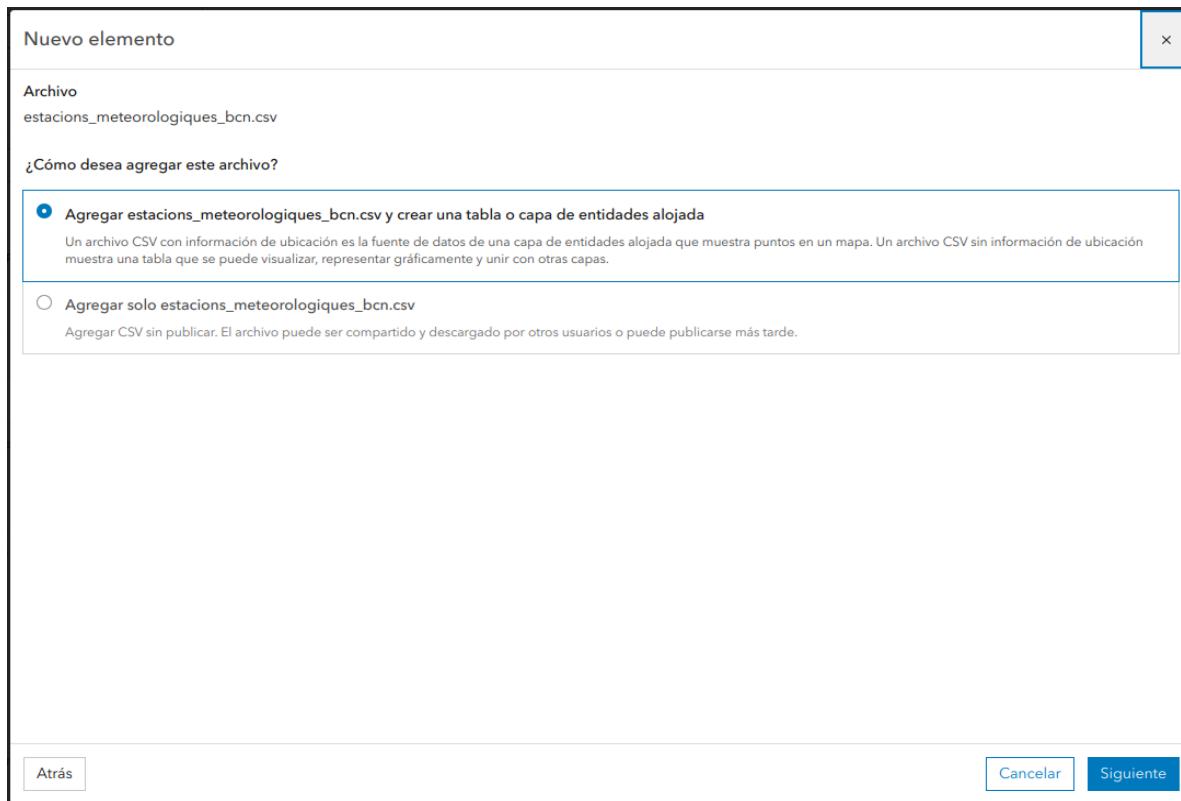


Figura 16. Càrrega a ArcGIS Online de les metadades de les estacions meteorològiques de Barcelona

Aquestes capes han estat carregades i configurades al **Map Viewer d'ArcGIS Online**, on se'ls ha aplicat una **simbologia temàtica diferenciada** per facilitar la lectura visual:

- Les estacions de contaminació mostren símbols diferenciats segons el **tipus d'estació** (trànsit i urbanes).
- Les estacions meteorològiques es representen amb punts uniformes, identificats pel seu **codi i ubicació geogràfica**.

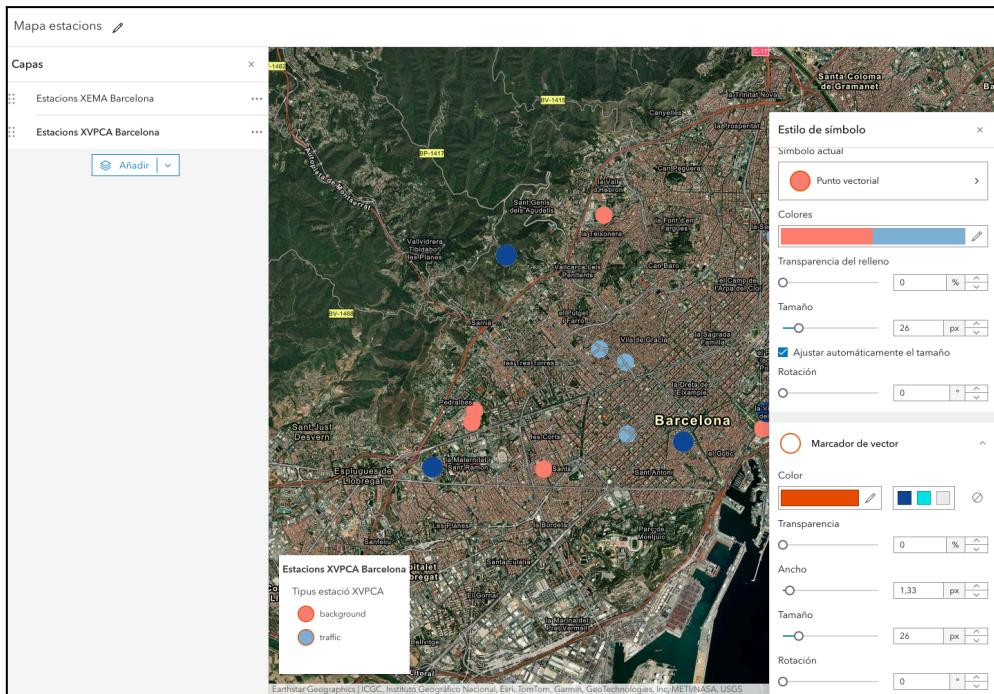


Figura 17. Configuració al Map Viewer de les capes de les estacions de mesura XEMA i XVPCA de Barcelona

Preparació i càrrega de les dades per al visor

Un cop les estacions són visibles sobre el mapa, el següent pas ha estat preparar les dades que s'associen a cada estació i que seran consultades pels diferents components del dashboard.

Les dades es carreguen en forma de capes addicionals, amb format tabular (CSV) i s'allotgen a ArcGIS Online, des d'on poden ser consumides pel visor.

<input type="checkbox"/> 1-8, total: 8	Título	Modificado	<input type="checkbox"/> Tabla	<input type="checkbox"/> Fecha de modificación
<input type="checkbox"/> estacions_contaminants_bcn_filtrat	Feature layer (alojado)	23 abr 2025		Previsualización ...
<input type="checkbox"/> estacions_contaminants_bcn_filtrat	CSV	23 abr 2025		Previsualización ...
<input type="checkbox"/> meteocat_1995_2025_bcn_processed	Table (alojado)	23 abr 2025		Previsualización ...
<input type="checkbox"/> meteocat_1995_2025_bcn_processed	CSV	23 abr 2025		Previsualización ...
<input type="checkbox"/> estacions_meteorologiques_bcn	Feature layer (alojado)	23 abr 2025		Previsualización ...
<input type="checkbox"/> estacions_meteorologiques_bcn	CSV	23 abr 2025		Previsualización ...
<input type="checkbox"/> contaminants_bcn_resum_diari	Table (alojado)	23 abr 2025		Previsualización ...
<input type="checkbox"/> contaminants_bcn_resum_diari	CSV	23 abr 2025		Previsualización ...

Figura 18. Dades carregades a ArcGIS Online que seran consumides pel visor interactiu

A continuació es mostra una taula amb el resum de cada font de dada publicada:

Capa de dades	Contingut principal
estacions_contaminants_bcn_filtrat	Estacions de qualitat de l'aire
estacions_meteorologiques_bcn	Estacions meteorològiques automàtiques
contaminants_bcn_resum_diari	Valors diaris de NO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} i O ₃ (mitjana, màxim, mínim), per estació i data
meteocat_1995_2025_bcn_processed	Dades meteorològiques (temperatura, humitat, vent, precipitació) per estació i dia

Taula 4. Resum de les capes de dades utilitzades en el projecte

Amb aquestes capes carregades correctament, s'aconsegueix:

- **Separar correctament les fonts de dades** (contaminació i meteorologia) mantenint una estructura modular.
- **Preparar el mapa de base** amb les estacions i punts de referència, que actuarà com a context visual dins del dashboard.
- **Fer disponibles les dades històriques** des de 1991 (contaminants) i 1995 (meteorologia) fins a l'any 2025.

Amb això, el mapa i les capes ja queden completament configurades per ser reutilitzats i connectades al visor que es descriu en el següent apartat, on s'incorporaran filtres, gràfiques i indicadors interactius.

Desenvolupament del visor interactiu

Aquesta última etapa té com a objectiu el disseny, implementació i documentació d'un visor interactiu per a l'anàlisi de la qualitat de l'aire a Barcelona, a través de la plataforma AGOL (Dashboards). L'objectiu principal és facilitar la comprensió i exploració dels contaminants atmosfèrics i les variables meteorològiques.

S'ha pensat en un disseny modular que garanteixi l'ampliació i adaptació del visor a nous contaminants, estacions o períodes temporals.

Arquitectura i disseny del visor

A continuació es representa una captura de pantalla del visor:

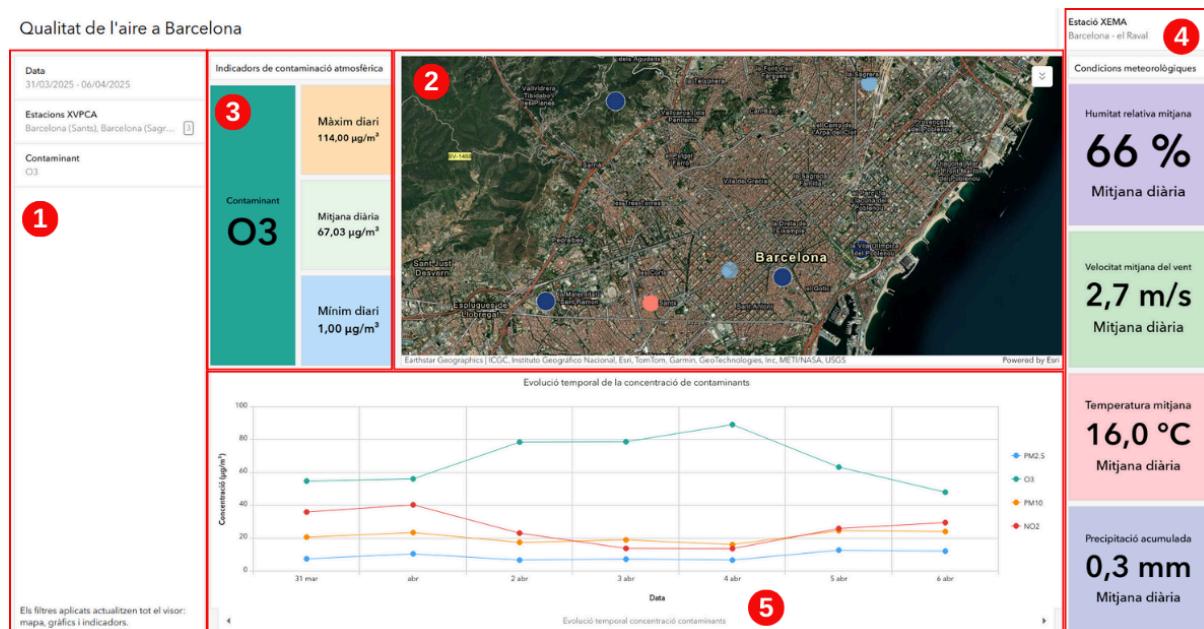


Figura 19. Visor interactiu de la qualitat de l'aire a Barcelona

El visor es divideix en diversos blocs funcionals, que són els que es descriuen a continuació:

ID	Bloc principal	Funcionalitat
1	Panell de filtres	Permet seleccionar dates, contaminants i estacions per personalitzar la visualització.
2	Mapa central	Mostra la ubicació geogràfica de les estacions XPCA i XEMA amb simbologia temàtica.
3	Indicadors de contaminació	Destaquen valors agregats per contaminant: mitjana, màxim i mínim
4	Indicadors laterals meteorològics	Mostren les condicions meteorològiques mitjanes per dia i estació de la XEMA.
5	Gràfiques inferiors	Permeten un anàlisi visual més detallat (temporal, comparativa i percentual).

Taula 5. Blocs funcionals principals del visor interactiu per a l'exploració de dades ambientals

Amb aquesta distribució de funcionalitats, el que s'espera és que l'usuari començï explorant la situació general al mapa, establir filtres, revisar valors agregats als indicadors de contaminants i meteorològics i, finalment, analitzar detalladament través de les gràfiques l'evolució i distribució de les variables.

1. Panell de filtres

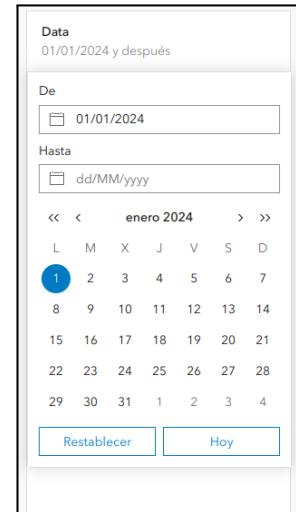
Permet adaptar dinàmicament totes les visualitzacions i indicadors segons la selecció de l'usuari, facilitant així anàlisis enfocats a necessitats concretes (per exemple, comparar dues estacions específiques, o estudiar un episodi puntual de contaminació).

A continuació, es detallen les funcionalitats específiques i la manera com els filtres interactuen amb el conjunt del visor:

Filtre d'interval temporal

Aquest selector temporal permet acotar l'interval de dates sobre el qual es vol analitzar la informació.

- **Aplicació:** tant als indicadors de contaminants, mapa central, indicadors laterals meteorològics i gràfiques inferiors.
- **Utilitat:** permet detectar tendències estacionals, analitzar períodes concrets com episodis de contaminació, setmanes de restriccions o onades de calor.
- **Format:** s'ha configurat com un selector de rang de dates, amb calendaris integrats i suport per a escollir amb precisió qualsevol subinterval del dataset.



Filtre d'estacions (XVPCA i XEMA)

El dashboard distingeix entre dues xarxes d'estacions:

- **XVPCA (qualitat de l'aire):** estacions que registren nivells de contaminants atmosfèrics.
- **XEMA (meteorologia):** estacions que mesuren variables com la temperatura, la humitat, el vent o la precipitació.

Aquest filtre permet:

- **Selecció múltiple:** es poden seleccionar una o diverses estacions simultàniament.
- **Anàlisi espacial comparativa:** permet veure com varien els valors entre diferents zones urbanes o de trànsit.
- **Aplicació:** els indicadors, gràfics i el mapa només mostren dades corresponents a les estacions seleccionades.

Filtre de contaminant

Aquest selector permet escollir el contaminant actiu que es vol visualitzar entre els disponibles (NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ i O_3). La seva aplicació és transversal i afecta:

- **Mapa principal:** s'actualitza la simbologia i la informació de les finestres emergents.
- **Indicadors superiors:** es mostren els valors estadístics del contaminant seleccionat.

3. Indicadors de contaminació

Els indicadors de contaminació tenen un paper central dins del visor, ja que resumeixen la informació clau sobre els nivells de contaminació atmosfèrica d'una manera, visual i fàcilment interpretable. Aquests indicadors estan pensats per funcionar com a elements reactius, que s'adapten dinàmicament als filtres que aplica l'usuari (data, estació, contaminant).

Cada targeta visual es construeix amb expressions *Arcade* personalitzades, que permeten adaptar els textos, colors i valors en funció del context i de les dades disponibles.

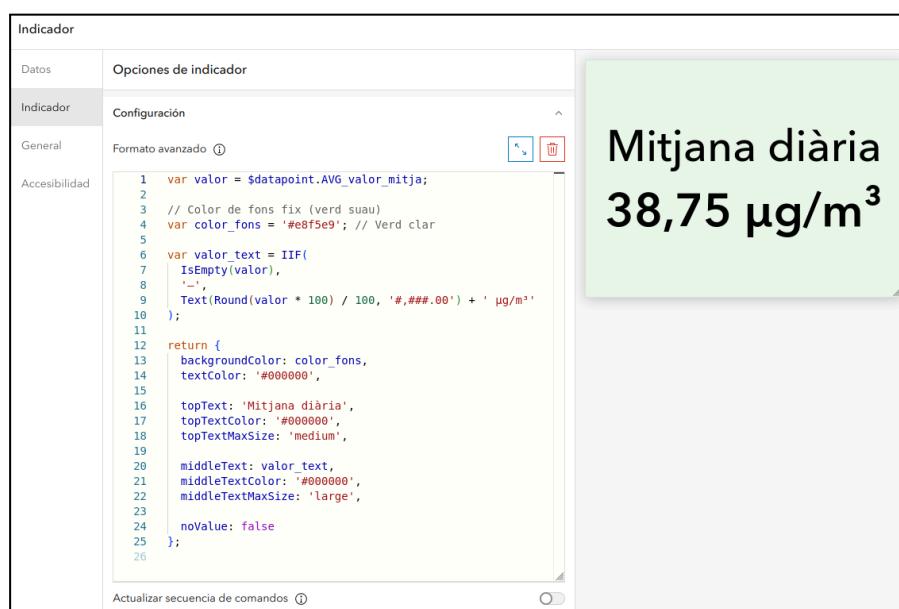


Figura 20. Codificació en Arcade de la mitjana diària dels contaminants

Elements principals dels indicadors

- Contaminant actiu:** Es mostra en una targeta destacada (normalment en la part superior), amb el nom del contaminant seleccionat actualment (NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ o O_3). Aquesta targeta serveix per recordar quina és la selecció actual del visor i garantir una correcta lectura dels valors.
- Mitjana diària:** Aquesta targeta mostra la mitjana dels valors diaris del contaminant seleccionat per al conjunt d'estacions visibles i dins del període filtrat. El valor es presenta amb dues xifres decimals i amb la unitat corresponent ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Valor màxim i mínim diari:** Mostren els valors extrems registrats dins del període seleccionat. Aquestes targetes ajuden a identificar pics puntuals de contaminació o dies especialment baixos.



Figura 21. Captura dels filtres i indicadors de contaminació

4. Indicadors laterals meteorològics

Permeten analitzar i interpretar els nivells de contaminació atmosfèrica en relació amb les condicions ambientals que poden influir en la seva dispersió, acumulació o variabilitat. Aquests indicadors s'han implementat com a targetes visuals interactives que responen a les seleccions fets pels usuaris en el panell de filtres (data, estació o zona). Cada targeta mostra una variable agregada diàriament per estació meteorològica (XEMA), oferint així una visió clara i accessible de l'evolució de les condicions atmosfèriques.

S'han inclòs quatre variables meteorològiques considerades clau per a l'anàlisi de contaminants:

1. Humitat relativa mitjana (%)

Indica la quantitat d'humitat a l'aire respecte a la màxima que pot contenir a una determinada temperatura. Una humitat elevada pot estar associada a condicions de boira o pluja, que poden afavorir la deposició de partícules. També pot tenir un efecte indirecte en la formació de contaminants secundaris.

2. Velocitat mitjana del vent (m/s)

És una de les variables més influents en la dispersió de contaminants. Una velocitat baixa del vent sovint s'associa a condicions de baixa dispersió, que poden provocar nivells alts de contaminació localitzada, especialment a zones urbanes denses o amb alta emissió de trànsit.

3. Temperatura mitjana diària (°C)

Reflecteix la mitjana de la temperatura registrada durant les 24 hores del dia. Aquesta variable és rellevant perquè les inversions tèrmiques o l'estancament de l'aire en dies freds poden provocar una acumulació de contaminants a les capes baixes de l'atmosfera.



Figura 22. Captura dels indicadors laterals meteorològics

4. Precipitació acumulada (mm)

Representa el total de pluja caiguda durant el dia. La pluja pot actuar com un mecanisme de “neteja atmosfèrica”, arrossejant partícules en suspensió i reduint les concentracions de determinats contaminants com el PM₁₀ o PM_{2.5}. Per això, aquesta variable ajuda a identificar dies amb reducció puntual de contaminació.

Cada indicador es presenta de forma sintètica mitjançant una targeta Arcade, que mostra el valor mitjà diari per a l'estació i el rang temporal seleccionat.

Aquest conjunt d'indicadors meteorològics són útil quan es visualitzen conjuntament amb els indicadors de qualitat de l'aire, ja que permet detectar patrons, correlacions i situacions com per exemple:

- Dies amb poca velocitat del vent i alta concentració de NO₂ podrien indicar acumulació per trànsit.
- Dies amb altes temperatures i concentració elevada d'ozó podrien reflectir episodis de contaminació fotoquímica.
- Precipitacions intenses podrien coincidir amb reduccions de PM en suspensió.

5. Gràfiques inferiors

Aquest conjunt de gràfiques dinàmiques s'ha incorporat al visor amb l'objectiu de facilitar una exploració analítica més aprofundida de les dades de contaminació atmosfèrica i meteorologia.

Gràfic de sectors: proporció de contaminants predominants

Aquest gràfic representa la distribució percentual de la mitjana diària dels diferents contaminants (NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} i O₃) dins del conjunt de dades seleccionades (per estació o període).

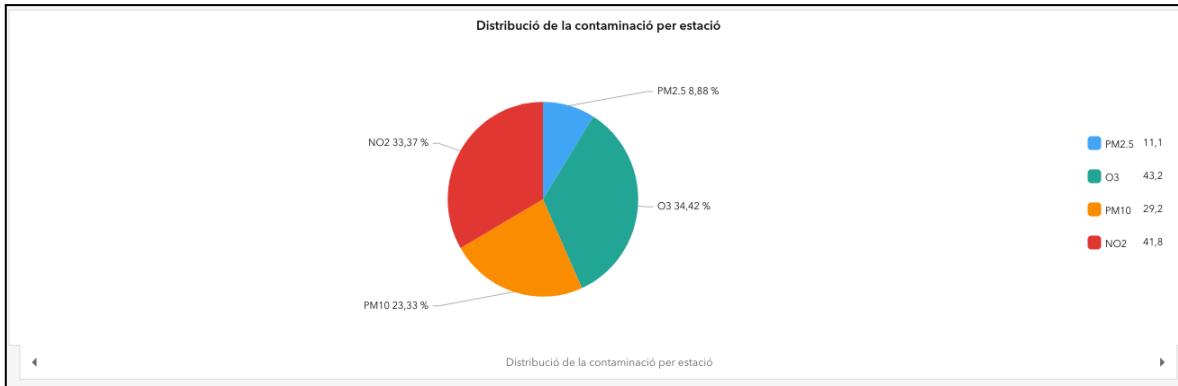


Figura 23. Exemple de gràfic de la distribució de la contaminació per estació

Permet identificar de manera immediata quin contaminant té una presència relativa més elevada. Això pot ser útil per:

- Determinar si hi ha un contaminant predominant en una estació concreta o durant un interval temporal específic.
- Comparar la càrrega contaminant entre diferents períodes, per exemple abans i després d'una actuació ambiental.

Gràfic de línies: evolució temporal de la concentració

Aquest gràfic permet representar l'evolució temporal de la concentració mitjana diària dels contaminants seleccionats.

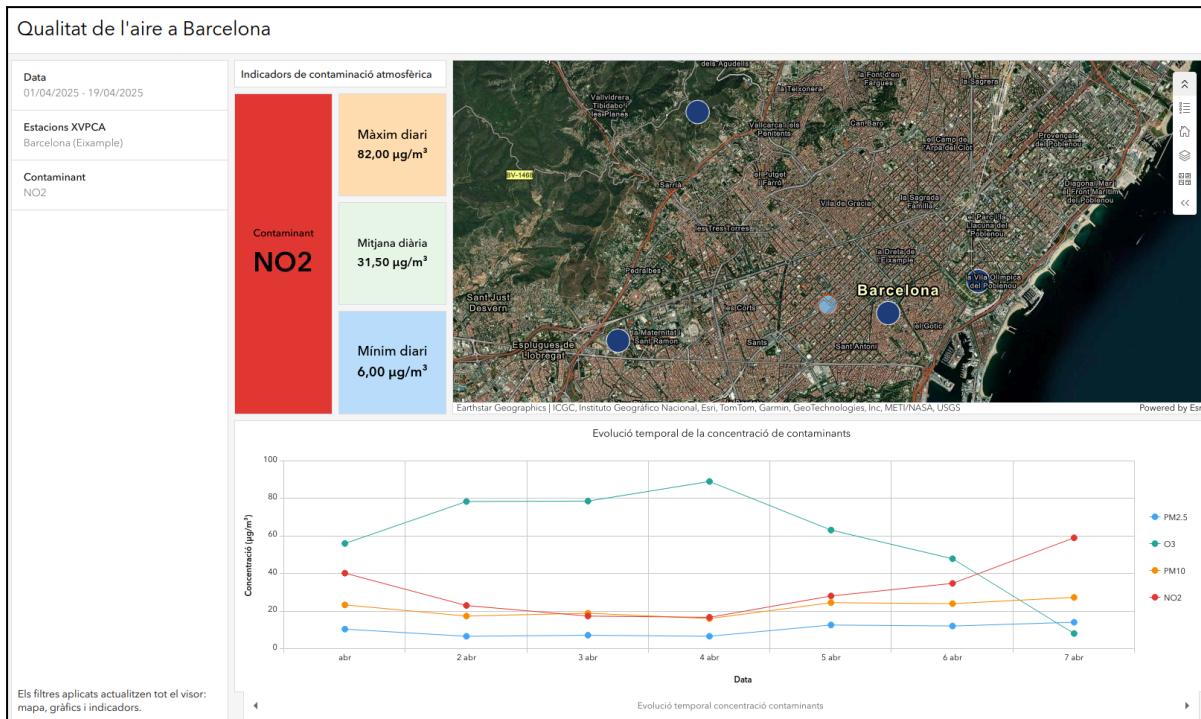


Figura 24. Exemple de gràfic de la evolució temporal de la concentració de contaminants

La seva principal aportació analítica és la detecció de patrons temporals i la identificació de tendències o anomalies. Ens permet:

- Observar oscil·lacions estacionals o setmanals en la qualitat de l'aire.
- Identificar dies amb valors anormalment alts o baixos.
- Avaluar l'impacte de condicions meteorològiques, restriccions de mobilitat o altres esdeveniments sobre els nivells de contaminació.

Gràfic de barres: mitjana per estació

Aquest gràfic compara els valors mitjans dels contaminants entre les diferents estacions de la xarxa XPCA.

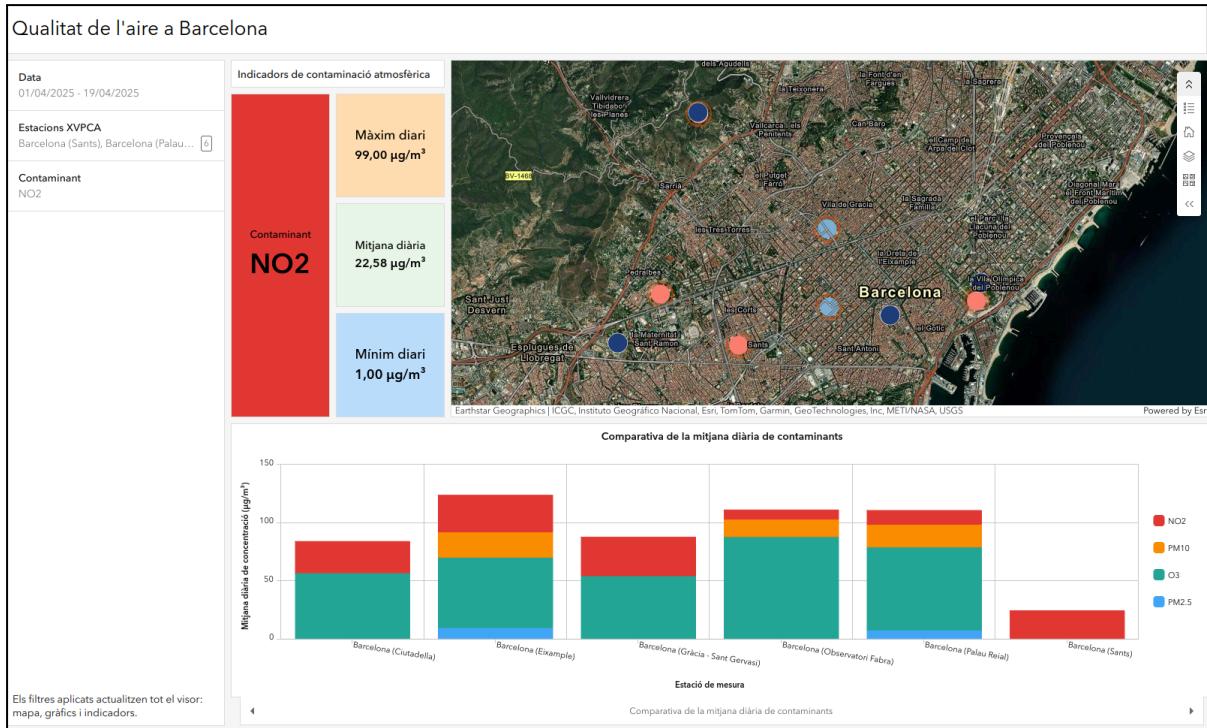


Figura 25. Exemple de gràfic de la comparativa de la mitjana diària de contaminants

Proporciona una visió clara de la variabilitat espacial de la contaminació dins de l'àmbit d'estudi, i ens permet:

- Comparar estacions de tipus urbà i de trànsit.
- Identificar les zones amb nivells mitjans més elevats i, per tant, amb potencial major risc d'exposició.

Aquesta visualització ajuda a detectar desigualtats territorials en l'exposició a contaminants.

Gràfic de línies: evolució de la temperatura per estació meteorològica

Aquest gràfic representa la temperatura mitjana diària per estació de la xarxa XEMA, de manera desagregada.

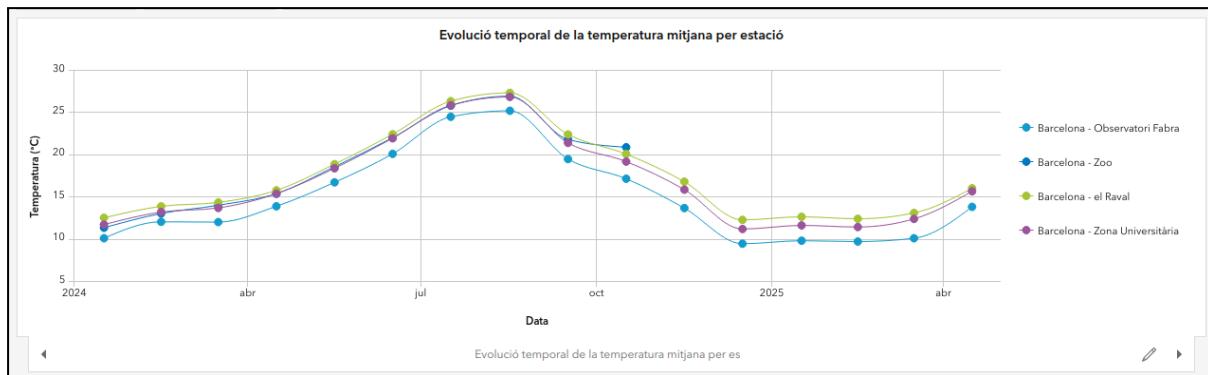


Figura 26. Exemple de gràfic de l'evolució temporal de la temperatura mitjana per estació

La seva funció principal és aportar el context meteorològic necessari per interpretar correctament els nivells de contaminació observats. Ens permet:

- Identificar dies amb inversions tèrmiques o episodis de calor que poden agreujar la contaminació.
- Ofereix una lectura paral·lela a les dades de concentració de contaminants per a l'anàlisi de correlacions.

4. Conclusions

El visor interactiu permet **monitoritzar i entendre amb precisió l'estat de la qualitat de l'aire a Barcelona**, integrant informació procedent de diverses fonts oficials (XVPCA i XEMA). L'eina ofereix un anàlisis complet de dades de contaminació atmosfèrica i meteorològiques, cosa que afavoreix la comprensió dels factors que influeixen en l'acumulació o dispersió dels contaminants.

Principals aportacions:

- **Anàlisi espaciotemporal**

La integració de capes georeferenciades amb gràfiques temporals permet observar l'evolució dels nivells de contaminants per estació i al llarg del temps. Aquesta doble dimensió (espacial i temporal) facilita l'anàlisi de situacions crítiques, com episodis de contaminació, o de patrons recurrents com les diferències entre dies laborables i festius.

- **Correlació amb factors meteorològics**

L'ús de gràfiques combinades i indicadors meteorològics permet relacionar l'aparició de valors elevats de contaminació amb condicions meteorològiques específiques, com ara la baixa velocitat del vent, les inversions tèrmiques o períodes d'absència de precipitacions.

- **Suport a la presa de decisions**

L'eina pot ser utilitzada com a instrument d'ajuda a la decisió, ja sigui per implantar mesures de restricció del trànsit, establir protocols d'actuació davant episodis d'alta contaminació o informar la ciutadania de forma transparent i actualitzada.

- **Divulgació per a la ciutadania**

És una eina útil per a la comunicació ambiental. Permet traduir dades tècniques complexes a visualitzacions comprensibles, la qual cosa pot afavorir la sensibilització ambiental i la implicació ciutadana.

- **Escalabilitat i adaptabilitat**

Aquesta flexibilitat assegura que el visor pugui evolucionar paral·lelament amb les necessitats analítiques o de comunicació del projecte, i que pugui ser adaptat a altres àmbits geogràfics o temporals sense reestructurar el sistema base.

En definitiva, des del punt de vista acadèmic, el visor no només serveix com a producte de visualització final, sinó que reflecteix **tot el procés de tractament, neteja, transformació i anàlisi de les dades** realitzat durant el projecte.

5. Glossari

Termes:

Anàlisi exploratòria de dades (EDA). Fase inicial d'un projecte de dades que permet comprendre la naturalesa dels conjunts de dades mitjançant estadístiques descriptives, gràfics i tècniques de resum.

ArcGIS Dashboards. Eina d'ESRI que permet construir panells interactius amb mapes, gràfics i indicadors vinculats a dades geoespitals per a la seva consulta i anàlisi visual.

ArcGIS Online. Plataforma SIG basada en el núvol que permet crear, compartir i analitzar mapes i capes geoespitals de manera interactiva.

Contaminant atmosfèric. Substància present a l'aire que pot tenir efectes negatius sobre la salut humana i el medi ambient, com el NO₂, el PM₁₀ o l'O₃.

Dades obertes. Informació publicada per institucions públiques o privades amb accés lliure, reutilitzable i sense restriccions legals.

Efecte "canyon urbà". Fenomen que es produeix en carrers estrets envoltats d'edificis alts, dificultant la dispersió dels contaminants i afavorint-ne l'acumulació.

Inversió tèrmica. Situació atmosfèrica en què l'aire calent es disposa per sobre de l'aire fred, impedint la dispersió vertical dels contaminants.

Mitjana mòbil. Tècnica estadística que suavitza sèries temporals per facilitar la detecció de tendències a mitjà o llarg termini.

Qualitat de l'aire. Mesura de la concentració de contaminants atmosfèrics en una zona determinada, amb indicadors que permeten avaluar-ne el risc per a la salut.

Sistema d'Informació Geogràfica (SIG). Sistema informàtic que permet recollir, analitzar, visualitzar i gestionar dades amb component espacial.

Visor interactiu. Aplicació basada en mapes que permet consultar de forma dinàmica dades espacials, amb filtres i gràfics personalitzables.

Xarxa de vigilància ambiental. Conjunt d'estacions que registren dades ambientals (com contaminació o meteorologia) de forma sistemàtica i en temps real.

Acrònims:

AGOL: ArcGIS Online

AMB: Àrea Metropolitana de Barcelona

ASPB: Agència de Salut Pública de Barcelona

CSV: Comma Separated Values (format de fitxer de dades tabulars)

EDA: Exploratory Data Analysis (Anàlisi exploratòria de dades)

GIS: Geographic Information System (Sistema d'Informació Geogràfica)

ICQA: Índex Català de Qualitat de l'Aire

NO₂: Diòxid de nitrogen

O₃: Ozó troposfèric

OMS: Organització Mundial de la Salut

PM₁₀: Partícules en suspensió amb diàmetre inferior a 10 µm

PM_{2,5}: Partícules en suspensió amb diàmetre inferior a 2,5 µm

SF: Simple Features (model estàndard per representar geometries en SIG)

SIG: Sistema d'Informació Geogràfica

TFM: Treball Final de Màster

UE: Unió Europea

VL: Valor Límit

XEMA: Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques

XVPCA: Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica

6. Bibliografia

1. Agència de Salut Pública de Barcelona (ASPB). (s.d.). *Informe de qualitat de l'aire i salut a Barcelona*. Recuperat de <https://www.aspb.cat/documents/qualitat-aire>
2. Ajuntament de Barcelona. (2021). *Qualitat de l'aire de la ciutat de Barcelona*. Open Data BCN. Recuperat de <https://opendata-ajuntament.barcelona.cat/data/ca/dataset/qualitat-aire-estacions-bcn>
3. Ajuntament de Barcelona. (s.d.). *Plans de Millora de la Qualitat de l'Aire de Barcelona i documents de desplegament de la Zona de Baixes Emissions (ZBE)*. Recuperat de <https://elpais.com/espana/catalunya/2025-01-09/barcelona-aprueba-en-calidad-del-aire-por-segundo-ano-pero-la-contaminacion-supera-el-limite-que-marcara-la-ue-en-2030.html>
4. Organització Mundial de la Salut (OMS). (2021). *Guies globals de qualitat de l'aire 2021*. Recuperat de <https://governobert.gencat.cat/web/shared/Transparencia/normativa-en-tramit/ACC/en-tramit/decrets/pla-aire/informacio-publica/1.-Pla-de-Qualitat-de-l'Aire-horitzo-2027.pdf>
5. Parlament Europeu i Consell de la Unió Europea. (2008). *Directiva 2008/50/CE relativa a la qualitat de l'aire ambient i a una atmosfera més neta a Europa*. Recuperat de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/ALL/?uri=CELEX%253A2008L0050>
6. Servei Meteorològic de Catalunya (Meteocat). (s.d.). *Portal de Dades Obertes*. Recuperat de <https://www.meteo.cat/observacions/xema/dades>
7. Agència de Salut Pública de Barcelona (ASPB). (2023). Avaluació de la qualitat de l'aire a la ciutat de Barcelona: ASPB. Recuperat de: https://www.aspb.cat/wp-content/uploads/2024/08/Informe_qualitat-aire-2023_240802.pdf
8. Ajuntament de Barcelona. (2023). Dades de trànsit i emissions associades. Open Data BCN. Recuperat de: <https://opendata-ajuntament.barcelona.cat/>
9. Lobelia Earth. (2024). Air Barcelona – Mapes d'estimació de NO₂. Recuperat de: <https://aire-barcelona.lobelia.earth>
10. Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB). (2024). La inversió tèrmica: què és i quin efecte té sobre la qualitat de l'aire? Recuperat de: <https://blogs.amb.cat/educacioambiental/2024/02/01/la-inversio-termica-que-es-i-quien-efecte-te-sobre-la-qualitat-de-la-aire>
11. beteve. (2023). Inversió tèrmica: més fred a Nou Barris, Sant Andreu, Montseny i Pirineus. Recuperat de: <https://beteve.cat/medi-ambient/inversio-termica-mes-fred-nou-barris-sant-andreu-montseny-pirineus-desembre-2023>
12. Piksel Scipedia. (2022). Un model micro-escala de distribució de NO₂ per a àrea urbana.

Recuperat de:

https://static.piksel.scipedia.com.s3.amazonaws.com/1/1e/Draft_de-Pouplana_785181065-2348-document.pdf

13. Ajuntament de Barcelona. (2022). Indicador d'Espai Verd per Càpita (IEVC). Open Data BCN.

Recuperat de:

https://opendata-ajuntament.barcelona.cat/data/ca/dataset?q=verd&sort=fecha_publicacion+desc

14. Institut de Salut Global de Barcelona (ISGlobal). (2019). Projecte BREATHE: Contaminació atmosfèrica i salut infantil. Recuperat de:

https://www.isglobal.org/project/-/asset_publisher/yZxXfJI5lszl/content/breathe

15. Sunyer, J., Dadvand, P., et al. (2015). HELIX Project – Health effects of air pollution on children.

ISGlobal. Recuperat de:

<https://www.isglobal.org/en/-/helix-the-human-early-life-exposome-novel-tools-for-integrating-early-life-environmental-exposures-and-child-health-across-europe>

16. Viana, M., Rivas, I., Querol, X., Alastuey, A., & Sunyer, J. (2021). Impact of COVID-19 lockdown on air quality in Spanish cities. *Science of the Total Environment*, 765, 148578.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972037861X>