



DIPARTIMENTO DI ELETTRONICA
INFORMAZIONE E BIOINGEGNERIA

Napoli, 28 maggio 2026



XII Convegno sul Particolato Atmosferico



Modello di sensore virtuale per il monitoraggio del Black Carbon atmosferico



Senem Ozgen, Pietro Fiore, Cristina Colombi, Fredy Ruiz





LEAP (Laboratorio Energia Ambiente Piacenza)

LEAP è un **centro di ricerca operante nel settore energetico-ambientale**. È stato fondato ed è tuttora partecipato dal Politecnico di Milano. Obiettivi di LEAP sono la **ricerca**, l'erogazione di **consulenze** e **servizi**, l'esercizio di azioni di **trasferimento tecnologico** per industria ed enti pubblici. Svolge **attività sperimentali** e prove su impianti e sull'ambiente, organizza **corsi di formazione** ed iniziative di **divulgazione scientifica**.

La Compagine Societaria



UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore



CAMERA DI COMMERCIO
DELL'EMILIA



Soci pubblici (42,4%)

Politecnico di Milano
Comune di Piacenza
Camera di Commercio
dell'Emilia

Soci privati (57,6%)

Fondazione di Piacenza e
Vigevano
A2A SpA
IREN Ambiente SpA
Università Cattolica
GETEC Italia SpA
Bip SpA
Cementirossi SpA

Aree di ricerca



www.leap.polimi.it





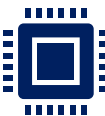
Perchè sviluppare un modello di sensore virtuale per il black carbon?



Direttiva (UE) 2024/2881: Identifica il BC come inquinante emergente prioritario da monitorare nei supersiti.



Sfida infrastrutturale: Alti costi per gli analizzatori di riferimento per una copertura spaziale elevata.



Soluzione Data-Driven: Stima del BC tramite modelli basati su variabili correlati ampiamente monitorate





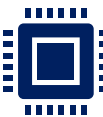
Perchè sviluppare un modello di sensore virtuale per il black carbon?



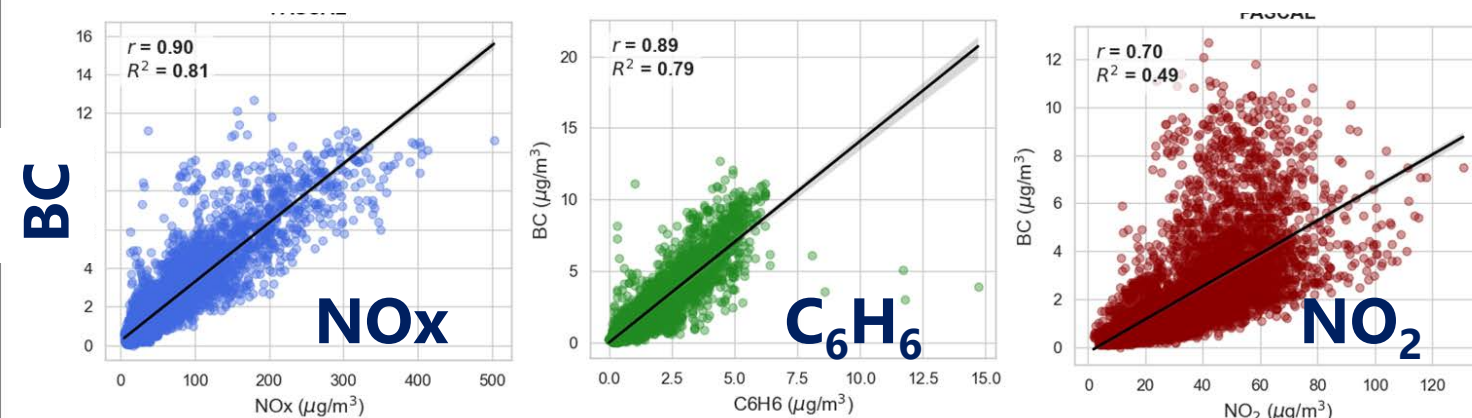
Direttiva (UE) 2024/2881: Identifica il BC come inquinante emergente prioritario da monitorare nei supersiti.



Sfida infrastrutturale: Alti costi per gli analizzatori di riferimento per una copertura spaziale elevata.



Soluzione Data-Driven: Stima del BC tramite modelli basati su variabili correlate ampiamente monitorate



$$\widehat{BC}(t) = f(C_6H_6(t), NO_2(t), NO_x(t), \dots)$$





Criticità modelli data-driven



Qualità del dato

I sensori economici possono produrre dati rumorosi o incompleti. Senza un dataset "pulito" e numeroso, l'addestramento del modello potrebbe perdere di robustezza.



Concept Drift

Il contesto modellato cambia nel tempo: variazioni stagionali, meteo o nuove politiche urbane alterano costantemente le relazioni tra gli inquinanti.



Limiti di generalizzazione e trasferibilità

Il modello è vincolato alle condizioni locali di addestramento (e.g., fattori meteorologici, caratteristiche topografiche e specifiche dinamiche emissive) e potrebbe non essere applicabile a contesti differenti.



Validazione periodica

Necessità di ricalibrazioni periodiche rispetto alla strumentazione di riferimento per prevenire il decadimento delle prestazioni della stima virtuale.





Obiettivi del lavoro



Dalla misura locale alla stima diffusa

Modelli agnostici e trasferibili. Superamento dei modelli sito-specifici in favore di architetture trasferibili in contesti ambientali eterogenei.



Approccio parsimonioso

Massimizzazione delle performance con un set minimo di variabili e dataset di addestramento ridotti (minore dipendenza da lunghe campagne di monitoraggio), riducendo la complessità computazionale, e i costi di acquisizione dati.



Rilevamento eventi critici

Architettura ibrida dedicata alla rappresentazione dei picchi di inquinamento, essenziale per la tutela della salute.





Approccio metodologico

Modello ibrido

progettato per gestire in modo distinto i dati "normali" e i "picchi" di BC.

Classificatore

Impara a distinguere se un dato appartiene alla fascia "normale" o ai "picchi" di concentrazione di BC.

Regressori

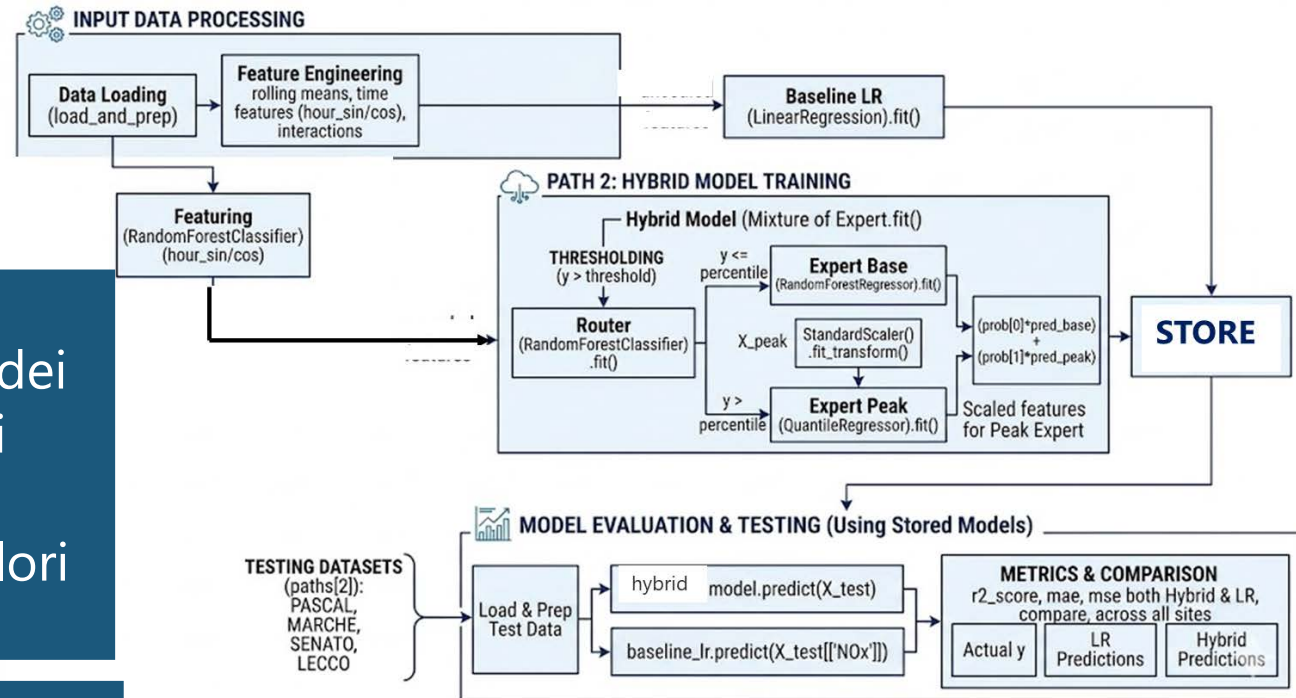
Expert Base (RandomForestRegressor): Si occupa dei dati "normali". È addestrato a catturare le relazioni standard tra NOx e BC.

Expert Peak (QuantileRegressor): Si occupa dei valori elevati ("picchi").

Integrazione (Stima finale BC)

La stima finale è una media ponderata. Il modello ottiene dal classificatore le probabilità che un dato appartenga alla classe "normale" o "picco".

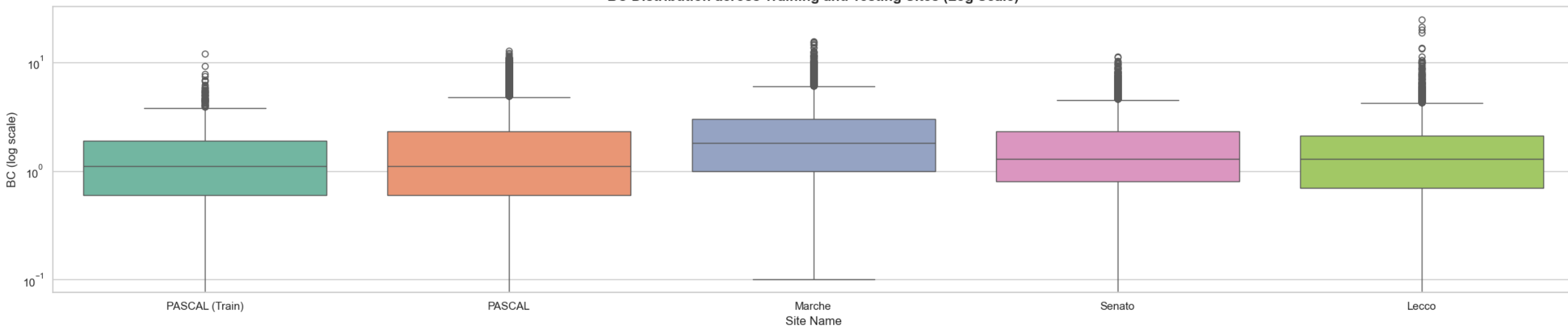
- Input: Usa le feature ingegnerizzate (NOx, NOx_rolling, NOx_x_hour).
- Target: BC



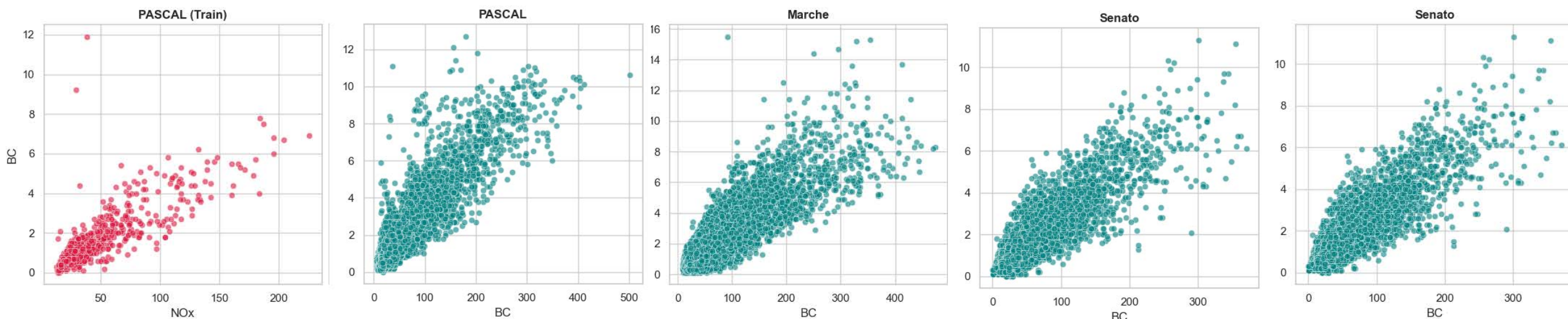


Dataset

BC Distribution across Training and Testing Sites (Log Scale)

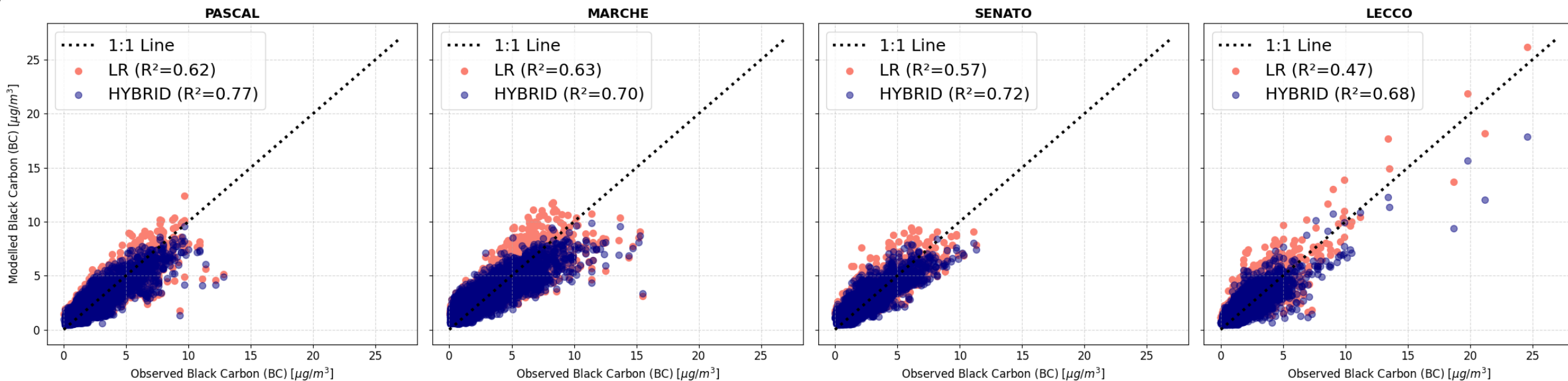


NOx vs BC Scatter Plots Across All Sites





Prestazione dei modelli



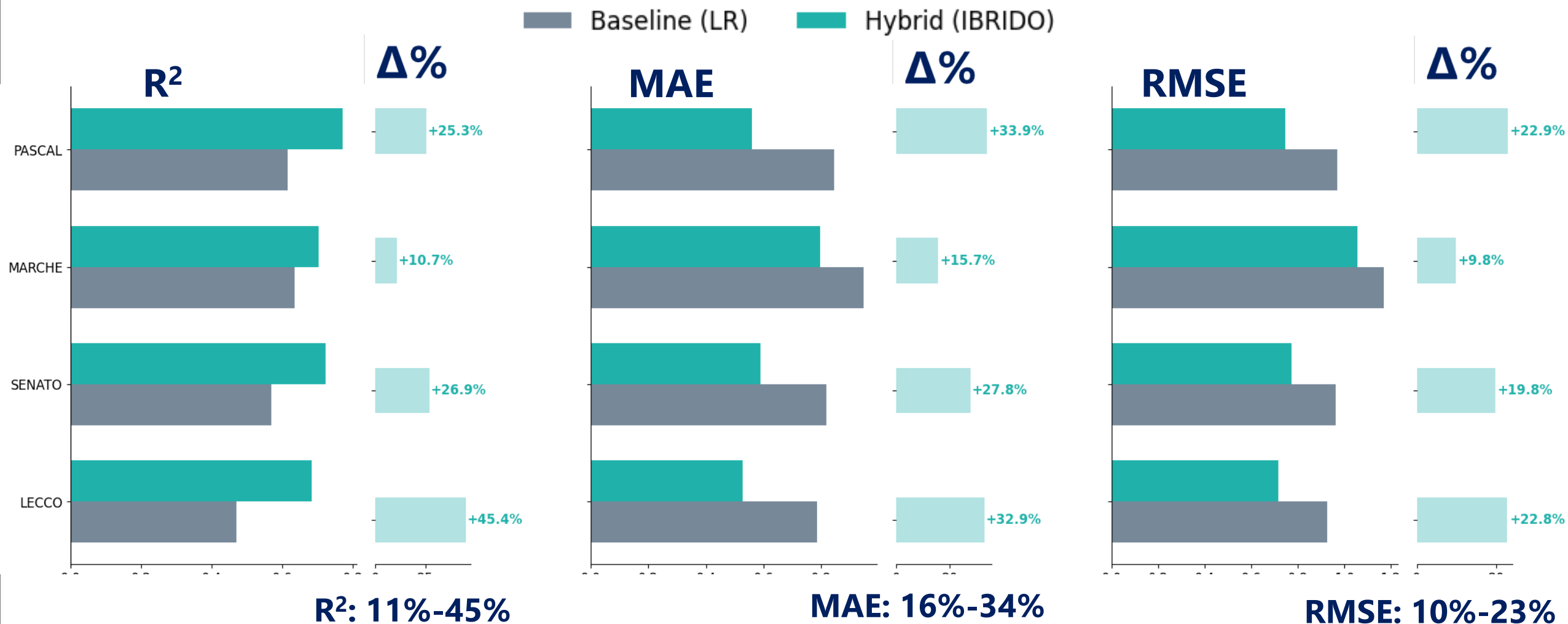
Modello ibrido mostra:

- prestazioni migliori (R^2 : 0.68 – 0.77) rispetto al modello lineare semplice (R^2 : 0.47 – 0.63)
- Maggiore trasferibilità tra i siti





Prestazione dei modelli – miglioramento di KPI rispetto a LR

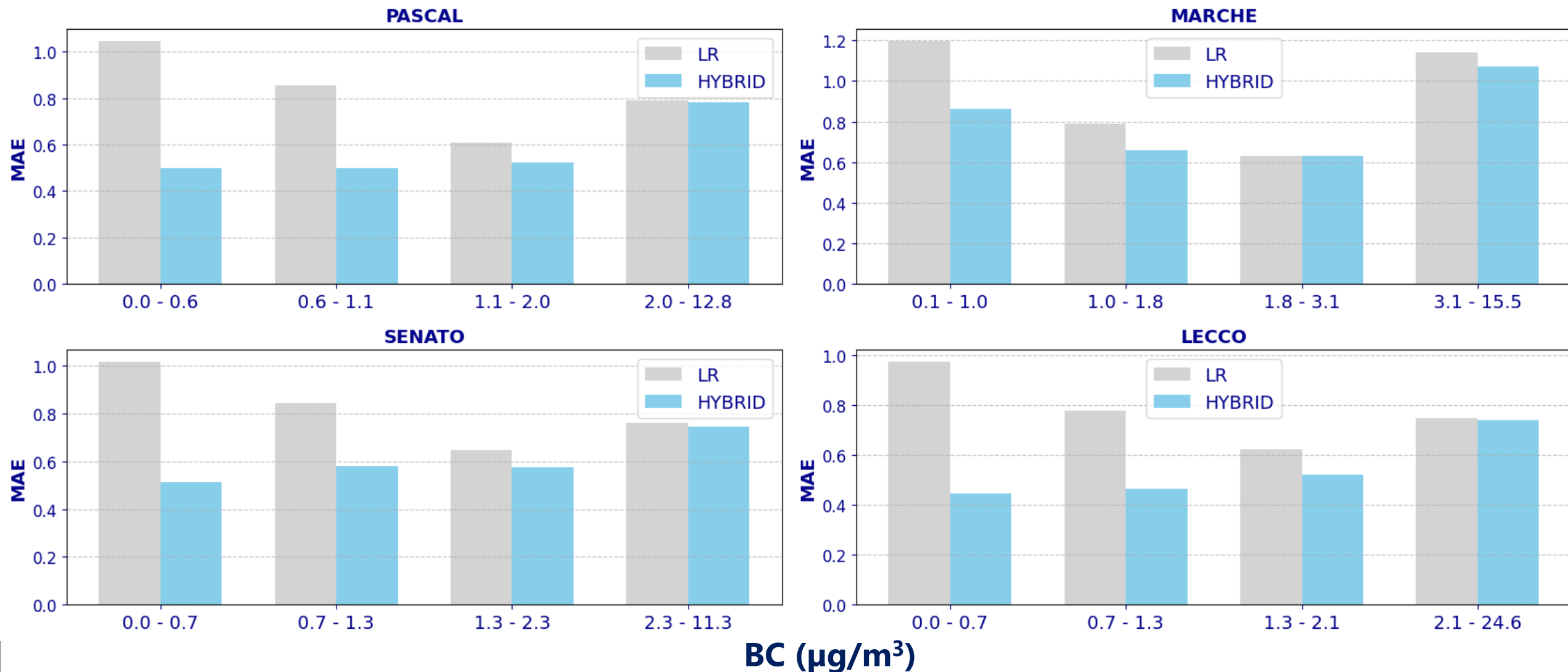


R²: Coefficiente di determinazione
MAE: Mean Absolute Error
RMSE: Root Mean Square Error





Prestazione dei modelli suddivisa per i quantili di BC





Conclusioni

- Il NOx rappresenta una variabile promettente per la stima indiretta del Black Carbon (BC).
- È stato possibile sviluppare modelli di sensore virtuale scalabili, trasferibili e parsimoniosi, riducendo la dipendenza da lunghi dataset storici.
- L'utilizzo di modelli di sensore virtuale consente di estendere il monitoraggio dei sensori economici al BC, senza ricorrere a configurazioni strumentali complesse e costose.
- Questo approccio è coerente con la Direttiva europea 2024/2881, che promuove l'integrazione di misure indicative, modellizzazione e strumenti di informazione pubblica per una valutazione della qualità dell'aria ad elevata copertura spaziale.



Si ringrazia «ARPA Lombardia, Direzione Generale, UO Aria», in particolare Dott.ssa Colombi per il supporto e i dati sul Black Carbon.

Grazie per l'attenzione

Per ulteriori informazioni contattare:
senem.ozgen@polimi.it

