

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Matematica



Tesi di Laurea Magistrale

## Andamento meteorologico su Torino e sua influenza sulla qualità dell'aria

Supervisor

Prof.ssa Sofia Fellini

Prof. Luca Ridolfi

Prof. Pietro Salizzoni (École Centrale de Lyon)

Candidato

Michele Villani

Ottobre 2024

## Sommario

La qualità dell'aria all'interno del contesto urbano è un tema che nel corso dei decenni è sempre stato di vitale importanza, in quanto strettamente legato alla salute pubblica. Sono molteplici i fattori che influenzano la qualità dell'aria, tra cui le condizioni meteorologiche e le attività umane che risultano preponderanti all'interno delle città più industrializzate come Torino. Il presente elaborato si concentra sull'analisi dell'andamento meteorologico sulla città di Torino negli ultimi vent'anni e la sua influenza sulla qualità dell'aria. Per la prima parte dello studio inerente l'influenza dei parametri meteorologici sulla salubrità dell'aria, si utilizza il modello SIRANE sviluppato dall'École Centrale de Lyon, il quale è in grado di simulare la dispersione degli inquinanti all'interno di un reticolo stradale specificando una serie di parametri meteorologici. Lo studio, che si concentra sul quartiere di San Salvario della città di Torino, analizza l'effetto dei dati meteo facilmente misurabili, tra cui la velocità del vento e la temperatura, sui parametri meteorologici più complessi stimati attraverso il modello e ne valuta l'impatto sulla concentrazione di inquinanti attraverso un'analisi di sensitività differenziale. Dall'analisi dei risultati si evince che le condizioni meteorologiche giocano un ruolo chiave nella dispersione degli inquinanti, con particolare rilevanza la velocità del vento e la lunghezza di Monin-Obukhov. In seguito, si esegue un'analisi degli andamenti temporali dei principali parametri meteorologici che intervengono nel fenomeno fisico e si investiga la presenza di possibili trend. Dal sito di ARPA Piemonte sono raccolti i dati necessari che vengono controllati al fine di determinare eventuali mancanze da colmare dove possibile. I risultati ottenuti mostrano un incremento della temperatura e una riduzione del numero di ore in cui la radiazione solare assume valori elevati. Infine, nel presente elaborato si cerca di rispondere alla domanda su come le evoluzioni temporali dei parametri considerati possano aver influito negli ultimi vent'anni sulle concentrazioni degli inquinanti, con particolare attenzione verso gli ossidi di azoto. Lo studio mette in evidenza che il trend decrescente delle ore particolarmente luminose in alcune stagioni, ha influito sulla lunghezza di Monin-Obukhov in modo tale da aumentare la concentrazione degli ossidi di azoto.



# Indice

<b>Introduzione</b>	2
<b>1 Descrizione del modello SIRANE</b>	3
1.1 Approccio Modellistico . . . . .	3
1.2 Dati di Input . . . . .	6
1.3 Parametri della Simulazione . . . . .	9
1.4 Risultati . . . . .	11
1.4.1 Risultati Meteo . . . . .	11
1.4.2 Risultati sulla Griglia e Statistiche sulla Griglia . . . . .	17
1.4.3 Ricettori e Statistiche sui Ricettori . . . . .	18
<b>2 Analisi di Sensitività</b>	21
2.1 Caso di Lione . . . . .	21
2.1.1 Analisi di sensitività nel caso di Lione . . . . .	22
2.2 Analisi su Torino . . . . .	28
2.2.1 Parametri di concentrazione . . . . .	29
2.2.2 Parametri di concentrazione per strada . . . . .	32
2.2.3 Orientazione Relativa e ColorMap . . . . .	33
2.2.4 Analisi di sensitività sui parametri meteo di output . . . . .	35
2.2.5 Analisi di Sensitività Differenziale . . . . .	48
<b>3 Serie Temporalì</b>	52
3.1 Ottenimento dei Dati . . . . .	52
3.2 Analisi sui parametri . . . . .	54
3.2.1 Determinazione di eventuali trend . . . . .	54
3.2.2 Calcolo dei Percentili . . . . .	60
3.2.3 Superamento dei percentili per anno e stagione . . . . .	65
3.2.4 Ulteriori Analisi sulla velocità del vento . . . . .	77
3.2.5 Direzione del vento . . . . .	81
<b>Conclusionè</b>	89



# Introduzione

La qualità dell'aria rappresenta una delle principali sfide ambientali contemporanee. L'esposizione ad una cattiva qualità dell'aria impone dei rischi molto alti sulla salute delle persone: si stima che questa causi milioni di morti e la perdita di anni di vita in salute ogni anno. L'impatto delle patologie attribuibili ad un'esposizione prolungata ad aria poco salubre è ora stimato equivalente a quello di altri importanti rischi per la salute globale come l'alimentazione scorretta e il tabagismo [1]. Di conseguenza, i governi di tutto il mondo stanno cercando di migliorare la qualità dell'aria così da ridurre il suo impatto sulla salute pubblica. Questo tema risulta quasi fondamentale all'interno delle città più industrializzate in quanto le concentrazioni degli inquinanti nell'aria sono più elevate a seguito dell'attività umana, come il traffico veicolare, le emissioni industriali e la produzione energetica. Tra gli inquinanti più preoccupanti in ambito urbano ci sono gli ossidi di azoto ( $NO_x$ ), che contribuiscono alla formazione di ozono troposferico e particolato fine, oltre ad essere responsabili di effetti nocivi sulla salute umana. In questo contesto, diventa essenziale capire le dinamiche che regolano la dispersione degli inquinanti in ambiente urbano, poiché la loro distribuzione spaziale e temporale risulta fortemente influenzata da una complessa interazione tra fattori ambientali e antropici. Ripercorrendo ciò che è stato fatto all'interno di [2] e [3] si cerca di utilizzare il modello di dispersione SIRANE creato dall'École Centrale de Lyon per studiare la distribuzione degli inquinanti all'interno del quartiere di San Salvario nella città di Torino. All'interno del modello un ruolo essenziale viene ricoperto dai parametri meteorologici che incidono sul fenomeno di dispersione. Ad esempio venti molto forti tendono a facilitare il ricambio d'aria portando ad una diminuzione delle concentrazioni di inquinanti, al contrario, condizioni di vento debole portano ad un ristagno dell'inquinante all'interno dell'aria circostante. Nello studio e quindi nel modello altro fattore importante è sicuramente la geometria. Qui questa è considerata attraverso un reticolo stradale costituito da tanti segmenti quante sono le strade che ne fanno parte, le quali vengono considerate dal modello come delle scatole nelle quali gli inquinanti possono entrare e uscire. Dopo aver appurato i costituenti fondamentali del modello è utile studiare tutte le relazioni che intercorrono tra i parametri meteorologici e le concentrazioni degli inquinanti. Si osserva, ad

esempio, che una diminuzione delle ore a luminosità elevata tende a portare, di giorno, la lunghezza di Monin-Obukhov verso valori che tendono ad incrementare le concentrazioni di  $NO_X$  nell'aria. Una volta determinate tali relazioni, l'analisi degli andamenti dei parametri meteorologici più importanti negli ultimi venti anni può permettere una maggiore comprensione dell'evoluzione del fenomeno. Ad esempio la scoperta di un aumento della velocità del vento in questo periodo può permettere di capire il perché la concentrazione degli inquinanti si è ridotta. Al fine di ottenere i dati necessari uno strumento particolarmente utile è il sito dell'ARPA Piemonte [4], dove i valori per i parametri meteo vengono forniti a cadenza oraria. Una volta ottenuti i dati bisogna eseguire il loro maneggiamento così da riempire, se possibile, eventuali mancanze orarie. Dai dati si può determinare la presenza di trend e si osserva, come ci si aspetta, un trend crescente per la temperatura; mentre si determina la presenza di un trend decrescente, soprattutto in primavera, per il numero di ore in cui la radiazione solare risulta essere particolarmente forte. L'investigazione dei trend appena citati viene eseguita attraverso l'ausilio del test statistico di Mann-Kendall il quale è usato molto nell'ambito delle serie temporali meteorologiche e determina la presenza di trend monotoni senza fare alcuna assunzione sulla distribuzione di partenza dei dati.

Data la natura periodica del parametro di direzione del vento, un'analisi differente viene eseguita per questo, alla fine della quale la direzione nord sembra essere la direzione preferenziale. Al termine delle analisi si cerca di collegare la parte relativa all'analisi statistica e quella relativa all'analisi di sensitività ottenendo il risultato che la diminuzione delle ore in cui la radiazione solare è particolarmente elevata durante il giorno provoca una variazione della lunghezza di Monin-Obukhov che la porta ad avere dei valori che provocano un aumento della concentrazione di  $NO_X$  nell'aria peggiorando la qualità dell'aria.

# Capitolo 1

## Descrizione del modello SIRANE

Fin dall'alba dei tempi, l'uomo attraverso la sua attività ha impattato l'ambiente in cui si è insediato. Inizialmente, l'effetto della sua presenza risultava marginale, ad esempio, mediante l'utilizzo del fuoco si disperdeva all'interno dell'atmosfera del fumo contenente monossido e biossido di carbonio. Negli ultimi anni invece l'impatto che l'uomo ha sull'ambiente risulta essere molto importante, soprattutto all'interno degli ambienti urbani e nelle zone dense di fabbriche. Risulta quindi importante studiare come e quanto questa attività risulti impattante sia per una questione di vivibilità (l'uomo infatti tenderà a vivere meglio se ciò avviene all'interno di un luogo poco contaminato) sia per una questione legata al preservare i luoghi per le generazioni future. All'interno di questa tesi di laurea magistrale si considererà un approccio utilizzato per studiare l'effetto che l'uomo ha sulla qualità dell'aria all'interno di un contesto urbano e specificatamente all'interno della città di Torino. Al fine di affrontare tale tematica verrà utilizzato un software chiamato SIRANE. Tale software è stato sviluppato dall'École Centrale de Lyon e si occupa della modellazione della dispersione di inquinanti all'interno di un ambiente urbano. SIRANE, inoltre, è stato testato e validato per oltre 20 anni sia tramite galleria del vento sia attraverso casi studio reali [3]. Prima di entrare nel merito dei risultati ottenuti all'interno della presente tesi si prosegue soffermandosi su come il software esegue le simulazioni.

### 1.1 Approccio Modellistico

Nel modello SIRANE le strade vengono considerate come delle scatole aperte sia alle estremità che nella parte superiore, così da poter comunicare con gli altri box stradali e con l'atmosfera. La concentrazione dei vari inquinanti, infatti, dipende

dalla strada stessa, dall'atmosfera che la sovrasta e dalle strade alle quali essa è collegata. Per tali motivi nel calcolo delle concentrazioni SIRANE adopererà un sistema di equazioni lineari aventi come incognite le concentrazioni medie nello spazio per ogni strada. Per ogni box stradale è possibile scrivere un'equazione di bilancio di massa considerando gli spostamenti di concentrazione degli inquinanti come mostrato in figura 1.1. Assumendo condizioni di equilibrio stazionario, SIRANE usa la seguente equazione [2]:

$$Q_S + Q_I + Q_{part,H} = Q_{H,turb} + HWU_{street}C_{street} + Q_{part,gr} + Q_{wash} \quad (1.1)$$

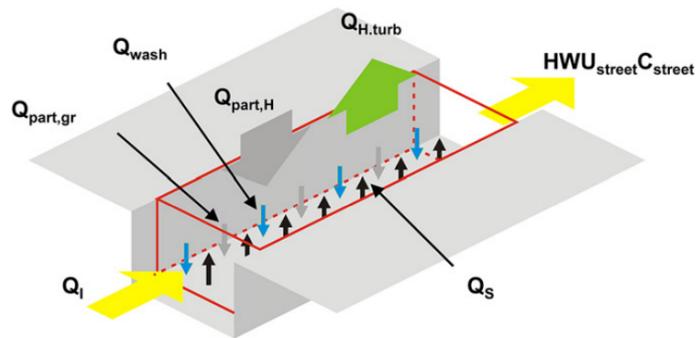
dove:

- $Q_S$ , rappresenta il tasso di inquinante emesso all'interno della strada;
- $Q_I$ , rappresenta il flusso di inquinante trasportato dal flusso medio lungo l'asse della strada ed entrante nell'intersezione controvento;
- $Q_{part,H}$ , rappresenta il flusso di sedimentazione delle particelle solide che entrano attraverso l'interfaccia strada-atmosfera;
- $HWU_{street}C_{street}$  è il flusso di inquinante trasportato dal flusso medio lungo l'asse stradale ed uscente a valle;
- $Q_{H,turb}$  è il flusso di inquinante scambiato tramite diffusione turbolenta tra strada e atmosfera;
- $Q_{part,gr}$ , rappresenta il flusso di deposito solido sul terreno;
- $Q_{wash}$  è la quantità di inquinante eliminata per unità di tempo dal deposito umido.

All'interno dell'equazione (1.1) si può notare che le quantità alla sinistra rappresentano i flussi entranti all'interno del box stradale, mentre quelli alla destra sono i flussi uscenti.

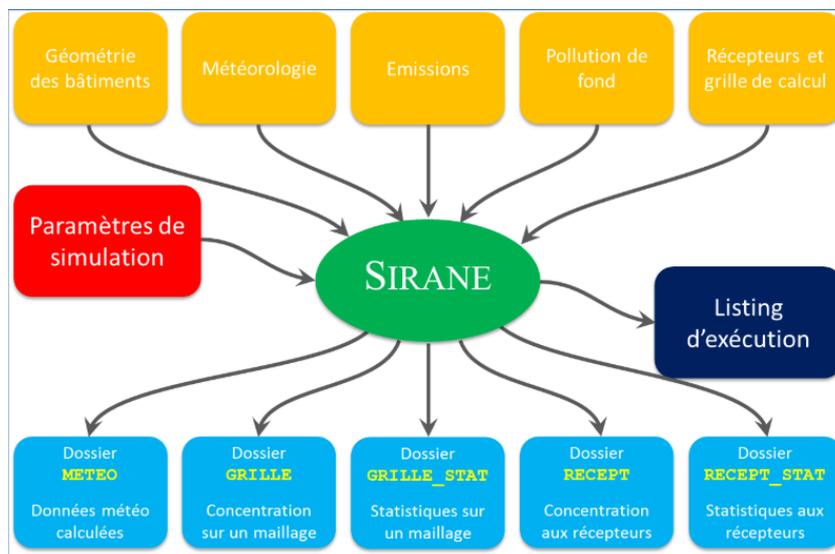
Altra cosa da notare che risulta particolarmente importante è rappresentata da  $U_{street}$  che indica la velocità del vento lungo l'asse stradale e mediata nello spazio. Questa è ottenuta all'interno del software attraverso un bilancio tra il trascinamento turbolento a livello dei tetti e la resistenza data dai muri degli edifici, andando a trascurare sia i gradienti di pressione sia gli effetti di trascinamento dovuti ai veicoli lungo le strade.

La figura 1.2 illustra le informazioni su cui si basano le simulazioni svolte con SIRANE. Tali informazioni si possono suddividere in tre insiemi. Il primo è costituito dai dati che SIRANE necessita come input per il calcolo delle quantità risultanti dalle simulazioni, questi sono dati relativi alla geometria, alla meteorologia,



**Figura 1.1:** Schematizzazione dell'equazione di Bilancio per un singolo Box Stradale

alle emissioni etc. Il secondo insieme comprende i parametri che servono per la personalizzazione delle simulazioni. Questi sono riportati all'interno di un file di testo e comprendono informazioni relative alla data di inizio e di fine della simulazione, comandi relativi alla tipologia di dati che si vogliono ottenere in uscita, al loro formato e ulteriori comandi che si riporteranno in seguito. Infine, l'ultimo insieme da tenere in considerazione è formato dai dati di output che comprendono informazioni relative al meteo, alle concentrazioni dei vari inquinanti etc.



**Figura 1.2:** Schema di funzionamento di SIRANE

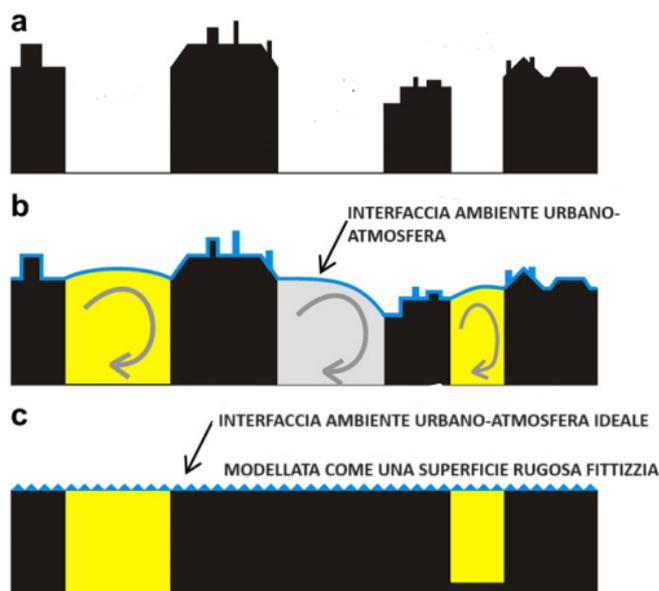
## 1.2 Dati di Input

La prima parte dello schema del software considerata è quella relativa ai dati di input. Questi forniscono informazioni su:

- geometria;
- meteorologia;
- emissioni;
- inquinamento di fondo;
- ricettori.

Si parte dalla prima tipologia. Quando si affronta il tema della dispersione di inquinanti all'interno di un contesto urbano un ruolo cruciale è rivestito dalla geometria della città, che comprende aspetti come la disposizione degli edifici e l'orientamento delle strade. Prima di entrare nel vivo della trattazione di tale parametro bisogna considerare le scale di lunghezza che entrano in gioco all'interno del fenomeno che si sta studiando. La prima è detta "scala topografica" ( $L > 100$  m), la quale interviene nel fenomeno di dispersione nella parte di atmosfera esterna; la seconda è la "scala degli edifici" ( $L$  circa 10 m), la quale viene tenuta in considerazione da SIRANE attraverso un reticolo di segmenti del quale si scriverà a breve e la terza è la "scala dei dettagli architettonici degli edifici" ( $L < 10$  m), la quale però per essere considerata da SIRANE richiederebbe troppe informazioni e risulterebbe molto oneroso computazionalmente. Il modello, quindi, invece che considerare tutti i dettagli architettonici inserisce quello che è un coefficiente di rugosità aerodinamica al di sopra degli edifici, come mostrato in figura 1.3.

Di queste tre scale quella topografica viene completamente ignorata da SIRANE, mentre quella dei dettagli viene semplificata attraverso il coefficiente precedentemente introdotto. L'unica che viene considerata realmente è la scala intermedia. A questo punto risulta utile discutere di come SIRANE divide l'ambiente di calcolo. Questo, infatti, viene spezzato in due sotto-domini, il primo consiste nell'atmosfera esterna e il secondo nell'ambiente urbano. Mentre per il primo il flusso atmosferico viene considerato come il flusso del Boundary layer su una superficie rugosa (rugosità degli edifici), nel secondo va ad inserirsi il reticolo stradale che all'interno di SIRANE viene modellato attraverso un'insieme di segmenti collegati tra di loro. Questi tengono in considerazione quella che è la scala degli edifici sopra detta. Di fatto anche qui va fatta una piccola semplificazione, in quanto sarebbe impossibile considerare i volumi veri per ogni singola strada, infatti, queste sono trattate come dei parallelepipedi nei quali i vari inquinanti vengono trattenuti. Bisogna però considerare che in base al volume del box stradale gli inquinanti possono essere



**Figura 1.3:** Nell'immagine si mostra come SIRANE tratta la scala dovuta ai dettagli architettonici: in (a) si mostra la geometria reale, in (b) si evidenzia quella che è l'interfaccia tra ambiente urbano ed atmosfera e in (c) si fa vedere come questa viene sostituita da un'interfaccia fittizia.

trattenuti o meno. Il volume stradale, infatti, se risulta essere troppo grande in larghezza rispetto che in altezza, come nel caso delle piazze, viene trattato come parte del sotto-dominio di atmosfera esterna. Per tenere in considerazione questo SIRANE considera un valore limite per la quantità  $W/H$ , dove con  $W$  si intende la larghezza del box stradale mentre con  $H$  la sua altezza. Se questa è infatti superiore al valore 3 verrà considerato come se fosse uno spazio aperto; al contrario se risulta essere inferiore o uguale a 3 allora sarà considerato come un box stradale.

Finita la trattazione della geometria, si passa a quelli che sono i dati di input legati alla meteorologia. SIRANE prende come input diversi tipi di dati meteorologici, tutto dipende dal valore che si darà al parametro "Donnees meteorologiques fournies = [0/1/2]" all'interno del file di input, come riportato in Tabella 1.1. All'interno del presente lavoro verrà impostato il parametro pari ad 1 e quindi si forniranno: velocità del vento, direzione del vento, temperatura, onde corte incidenti e precipitazioni. Queste grandezze vanno fornite al software per ogni ora durante il periodo che si vuole simulare. Attraverso i dati meteorologici di input, vengono calcolati gli altri parametri meteo come la lunghezza di Monin-Obukhov che saranno poi importanti per la determinazione del fenomeno di diffusione.

**Tabella 1.1:** Nella tabella sono riportati i dati meteo che sono forniti a SIRANE e i corrispettivi parametri da impostare. Il parametro, che può assumere valori 0, 1 o 2 va ad indicare i dati meteo che vanno forniti in input al software. Nella figura per ogni parametro imponibile sono segnati con un V i parametri meteo che devono essere forniti con quel parametro e con X quelli che non devono essere dati.

DATO METEOROLOGICO	PAR 0	PAR 1	PAR 2
Velocità del Vento (U)	✓	✓	x
Direzione del Vento (Dir)	✓	✓	✓
Temperatura	✓	✓	✓
Precipitazioni	✓/x	✓/x	✓/x
Radiazione Solare (SolRad)	x	✓	x
Lunghezza di Monin-Obukhov inversa	x	x	✓
Cloud Cover (Cld)	✓	x	x
Velocità di frizione(u.)	x	x	✓

Si procede considerando le sorgenti che immettono l'inquinante all'interno dell'ambiente urbano e quindi si passa a trattare i dati relativi alle emissioni. Queste possono provenire da diverse fonti, dalle auto lungo le strade alle fabbriche, dalle case con i riscaldamenti ai treni. SIRANE considera tre grandi gruppi di sorgenti:

- SORGENTI PUNTUALI, come le fabbriche;
- SORGENTI SUPERFICIALI, come il riscaldamento all'interno delle abitazioni;
- SORGENTI LINEARI, come le auto lungo le strade.

Per quanto riguarda le emissioni puntuali queste vanno fornite a SIRANE attraverso un file di testo per ognuna di esse in cui si specifica per ogni ora durante la simulazione qual è il contributo apportato nell'atmosfera.

Per le emissioni superficiali, sono presenti tanti file di testo quante sono le ore della simulazione e all'interno di ognuno di questi sono presenti le coordinate dal quale proviene il contributo con l'entità per ogni singolo inquinante.

Per quanto riguarda le sorgenti lineari, queste sono considerate da SIRANE attraverso un unico file di testo dove è presente l'*id* della strada e un singolo contributo per ogni inquinante che verrà poi modulato nel tempo attraverso alcuni coefficienti di modulazione (uno per ogni slot orario).

Il penultimo tipo di dato da fornire come input al software è relativo all'inquinamento di fondo, che consiste in quel tipo di inquinamento che non è affetto dalle fonti di inquinamento ma è presente in maniera naturale. Questo viene reso disponibile

a SIRANE attraverso un file di testo in cui per ogni slot orario della simulazione vengono riportati i valori per ogni inquinante.

Per concludere, l'ultima tipologia di dato che viene fornito in input è formata dai Ricettori e dalla griglia di calcolo. I ricettori sono alcuni punti specifici all'interno della mappa e per ognuno dei quali vengono riportate le concentrazioni di fondo per ogni slot orario; mentre per la griglia di calcolo, questa viene definita attraverso le coordinate estreme in x e y, il numero di punti in cui viene divisa la mappa nelle due direzioni, alcuni file .SHP etc.

### 1.3 Parametri della Simulazione

Molto importanti sono i parametri che definiscono una simulazione. Definiti all'interno di un file di testo, questi sono costituiti da alcuni valori interi e in base ai valori che essi assumono si definiscono alcune parti della simulazione come il tipo di risultati che devono ritornare o il periodo di questa. Tutti i parametri e i valori che questi possono assumere sono riportati in tabella 1.2 e tabella 1.3.

Prima di tutto attraverso il valore dei parametri è possibile impostare la data di inizio e di fine della simulazione.

Successivamente, all'interno del file dei parametri si possono definire gli inquinanti protagonisti del fenomeno, se attivo o no il modello chimico di Chapman ed inoltre se le concentrazioni di  $NO$  e  $NO_2$  sono conosciute o se devono essere determinate conoscendo  $NO_X$ .

In seguito nel file viene trattata la parte legata alle emissioni, in questa sezione infatti vengono riportati i nomi dei file di testo dove è possibile reperire le informazioni circa le fonti puntuali e superficiali così come le informazioni relative alle concentrazioni di fondo.

Subito dopo, si definiscono le caratteristiche dell'ambiente urbano, quindi si indica quale genere di file si fornisce al software per identificare la rete stradale, si riportano quali sono i file con il reticolo di strade e quelli con i dati geometrici del sito e infine si definisce l'altezza di rugosità e l'altezza di riflessione.

Si procede definendo la parte di meteorologia, in questa sezione vengono innanzitutto indicati il tipo di file meteo che vengono forniti a SIRANE, poi vengono forniti i nomi dei file ed infine vengono riportati la velocità minima del vento e valori minimi per gli scarti quadratici relativi al vento.

Si passa poi a definire la parte relativa alla griglia, qui si indicano i nomi dei file che contengono informazioni relative alla griglia di output, quella delle condizioni meteo e quella relativa alle emissioni superficiali, queste informazioni consistono nei valori estremi per le coordinate così come il numero di parti in cui si divide la griglia. Nella stessa sezione si danno informazioni relative ad un eventuale maschera che serve ad eliminare eventuali elementi all'interno delle griglie.

Tabella 1.2: tabella dei parametri parte 1

SEZIONE	PARAMETRI PRESENTI
<b>Input</b>	Al suo interno viene identificata la cartella all'interno della quale verranno posti i file da fornire in input a SIRANE
<b>Periodo della simulazione</b>	Qui vengono definiti la data di inizio e quella di fine con anche le ore corrispondenti nel formato: «00:00:00»
<b>Inquinanti</b>	-File delle specie di inquinanti = specie.dat -File delle categorie di sorgente = nome_gruppi_sorgente.dat -Attivazione del modello chimico di Chapman = [0/1] -Emissioni di NO equivalenti a NO2 = [0/1]
<b>Emissioni</b>	-File delle sorgenti puntuali = sorgenti_puntuali.dat -File di evoluzione delle emissioni lineari e di superficie = file_evolutivo.dat -Numero di modulazioni lineari = 7 -File dell'inquinamento di fondo = inquinamento_fondo.dat
<b>Condizioni Meteorologiche</b>	-Condizioni Meteorologiche = [0/1/2/3] -Dati meteorologici forniti = [0/1/2] -File meteo = meteo.dat -File delle misure meteo del sito= Site_Meteo.dat -Velocità del vento minima[m/s] = float -Deviazione standard della velocità $\sigma_v$ minima [m/s] = float -Deviazione standard della velocità $\sigma_w$ minima [m/s] = float
<b>Griglia</b>	-File di descrizione della griglia meteo=Griglia_meteo.dat -File di descrizione della griglia dei risultati = Griglia_ridultati.dat -File di descrizione della griglia di emissioni = Grille_Emis_Surf.dat -File della maschera della griglia in uscita = Maschera.dat -Filtraggio dei punti di maschera = [0/1]

Tabella 1.3: tabella dei parametri parte 2

SEZIONE	PARAMETRI PRESENTI
<b>Uscita dei risultati</b>	-Numero massimo di threads utilizzati = intero -Livello di visualizzazione = [0/1/2] -Calcolo delle statistiche [0/1] = 0 -File delle posizioni dei ricevitori puntuali = Ricevitori.dat -Calcolo delle concentrazioni giornaliere = [0/1] -Calcolo sulla griglia = [0/1/2] -Scrittura dei risultati sulle strade = [0/1] -Formato dei file di strada = [0/1] -Formato dei file dei campi di concentrazione = [0/1/2/3/4] -Scrittura dei campi di concentrazione in formato immagine = [0/1/2] -File della mappa dei colori per le specie= Colormaps_especies.dat -File della mappa dei colori dei superamenti = Colormap.dat -Cartella di scrittura dei risultati = RESULTS
<b>Statistiche dei parametri</b>	-File dei percentili = Percentili_def.dat -File delle soglie di superamento = Soglie_def.dat

La penultima sezione, invece, si occupa della definizione dei modi in cui i risultati devono essere restituiti, se quindi eseguire determinati calcoli come quelli statistici o delle concentrazioni giornaliere.

Per terminare, l'ultima parte del file comprende la definizione delle quantità statistiche da calcolare.

## 1.4 Risultati

La terza e ultima parte da considerare è composta dai risultati della nostra simulazione.

### 1.4.1 Risultati Meteo

I primi output che si considereranno sono i risultati meteo. I dati meteo, che sono calcolati per ogni slot orario all'interno della simulazione, sono: velocità del vento ( $U$ ), direzione del vento ( $Dir$ ), temperatura ( $T$ ), altezza del boundary layer ( $HCl_a$ ), velocità d'attrito ( $u_*$ ), fluttuazione della direzione del vento ( $\sigma_\theta$ ), copertura delle nuvole ( $Cld$ ), flusso di calore sensibile ( $H_0$ ) e lunghezza di Monin-Obukhov ( $L_{MO}$ ). Per quanto riguarda la temperatura e la velocità e la direzione del vento, queste sono le stesse che vengono fornite in ingresso. Si argomentano invece separatamente gli altri parametri meteo in uscita.

#### Altezza del Boundary Layer

L'altezza del Boundary layer ( $HCl_a$ ) rappresenta l'altezza entro la quale la presenza degli edifici, o comunque della rugosità della superficie, influenza la turbolenza e tutti gli altri fenomeni di mescolamento dell'atmosfera. Questa è determinata diversamente in base a se l'atmosfera risulta stabile o meno. Le formule utilizzate dal software e riportate in [5] e [6] sono:

$$\left\{ \begin{array}{ll} HCl_a = \frac{L_{MO}}{3.8} \left( -1 + \sqrt{1 + 2.28 \frac{u_*}{f L_{MO}}} \right) & \text{se } L_{MO} > 0 \text{ (atmosfera stabile)} \\ HCl_a = 0.3 \frac{u_*}{f} & \text{se } L_{MO} = 0 \text{ (atmosfera neutra)} \\ \frac{dHCl_a}{dt} = \frac{T(1.4w_*^3 + 5u_*^3)}{g\gamma_\theta^{ext} HCl_a^2} & \text{se } L_{MO} < 0 \text{ (atmosfera instabile)} \end{array} \right. \quad (1.2)$$

dove si indica con:

- $f$  il parametro di Coriolis ( $f = 4\pi \sin(2\pi\phi/360)/86.400$ );
- $w_* = u_* \left( \frac{HCl_a}{kL_{MO}} \right)^{1/3}$  la scala delle velocità convettive;
- $\gamma_\theta^{ext} = \frac{\partial\theta}{\partial z}$  il gradiente in direzione verticale della temperatura potenziale.

Si definisce inoltre quella che è la stabilità dell'atmosfera. L'atmosfera si dice stabile se tende a sopprimere qualsiasi moto verticale che si genera al suo interno. Questo dipende dal gradiente termico verticale. Di giorno, essendo il terreno riscaldato dalle onde corte incidenti, il flusso di calore tenderà a smuovere verticalmente l'aria

e si verificherà instabilità atmosferica.

Nel caso di atmosfera instabile in (3.5) si ha un'equazione differenziale per  $HCl_a$ . Assumendo tutti i parametri indipendenti dal tempo, si può trovare una soluzione analitica implicita

$$t_2 - t_1 = \frac{\chi^2}{2a_1} \left[ \left( \frac{HCl_a(t_2)}{\chi} - 1 \right)^2 - \left( \frac{HCl_a(t_1)}{\chi} - 1 \right)^2 + 2 \ln \left( \frac{HCl_a(t_2) + \chi}{HCl_a(t_1) + \chi} \right) \right] \quad (1.3)$$

con

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1.4H_0}{\rho_a C_p \gamma_\theta^{e_{xt}}} \\ a_2 = \frac{5u_* T}{g \gamma_\theta^{e_{xt}}} \\ \chi = \frac{a_2}{a_1} \end{cases}$$

Il calcolo di  $HCl_a$  è effettuato per ogni step orario grazie a (1.3). Per quanto riguarda l'inizializzazione questa viene fatta all'alba nel momento in cui le onde corte incidenti smettono di essere nulle e l'atmosfera passa da essere stabile a instabile, con il valore trovato nell'ultimo slot orario notturno.

### Velocità di attrito

Altro parametro che viene restituito dal software è la velocità di attrito, la quale rappresenta la scala della velocità nei pressi della parete. Questa viene determinata invertendo la seguente formula riportata in [7]:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z - d_{district} + z_{0,district}}{z_{0,district}} \right) - \left( \psi_m \left( \frac{z - d_{district} + z_{0,district}}{L_{MO}} \right) - \psi_m \left( \frac{z_{0,district}}{L_{MO}} \right) \right) \right], \quad (1.4)$$

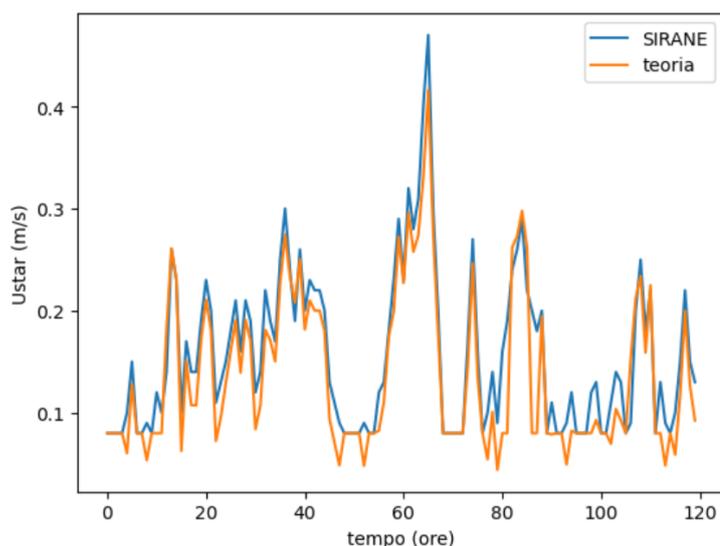
con:

- $k$  costante di von-Karman;
- $d_{district}$  altezza di spostamento;
- $z_{0,district}$  rugosità aerodinamica del sito;
- la funzione  $\psi_m(\zeta)$  è definita come segue:

$$\begin{cases} \psi_m(\zeta) = 2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2 \arctan(x) + \pi/2 & \text{se } -500 < L_{MO} < 0 \\ \psi_m(\zeta) = 0 & \text{se } |L_{MO}| \geq 500 \\ \psi_m(\zeta) = -5\zeta & \text{se } 0 < L_{MO} < 500 \end{cases}$$

dove  $x = (1 - 16\zeta)^{1/4}$ .

Confrontando i valori di  $u_*$  ottenuti tramite l'inversione dell'equazione (1.4) con quelli ottenuti da una simulazione tramite SIRANE si osserva che i valori differiscono di poco, questa differenza si vede in figura 1.4.



**Figura 1.4:** Confronto tra i valori di  $u_*$  teorici e quelli ottenuti tramite simulazione effettuata nel periodo che va dal 3 al 7 Febbraio 2014 nella città di Torino utilizzando i dati reali. Sull'asse delle ascisse sono riportate le ore della simulazione, mentre sulle ordinate i valori del parametro  $u_*$ .

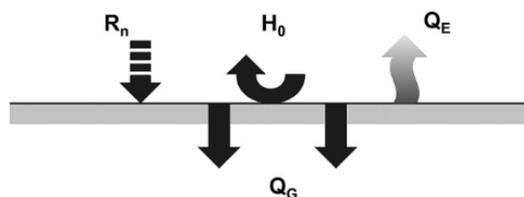
### Flusso di Calore Sensibile

Si considera adesso il flusso di calore sensibile ( $H_0$ ), il quale se positivo rappresenta il passaggio di calore dal terreno all'atmosfera, mentre se negativo rappresenta il passaggio opposto [8]. Un esempio di come si presenta il fenomeno si vede in figura 1.5. Per il suo calcolo SIRANE utilizzerà la formula riportata in [2]:

$$R_N = H_0 + Q_E + Q_G \quad (1.5)$$

dove

- $R_N$  rappresenta la radiazione netta solare;
- $Q_G$  rappresenta il flusso di calore diffusivo verso il terreno;
- $Q_E$  rappresenta il flusso di calore latente.



**Figura 1.5:** Bilancio di Energia al livello del suolo in condizioni di stazionarietà

A questo punto SIRANE dopo aver invertito l'equazione (1.5) determina prima  $R_N$  attraverso il contributo delle onde corte incidenti, infatti, queste vengono date come input al software. Da qui SIRANE procede con il calcolo grazie alla seguente formula:

$$R_N = \frac{(1 - a)K_{\downarrow} + (0.94 \cdot 10^{-5}T^2 - \varepsilon) \sigma T^4 + 60(Cld/8)}{1.12} \quad (1.6)$$

in cui abbiamo:

- $a$  che rappresenta l'albedo del sito;
- $\varepsilon$  che rappresenta il coefficiente di Stull, il quale è considerato 0.88;
- $\sigma$  che rappresenta la costante di Boltzmann;
- $Cld$  la copertura nuvolosa.

Da qui, indicando con  $\alpha$  il coefficiente di Priestley-Taylor e con  $c_G$  la costante di proporzionalità tra  $R_N$  e  $Q_G$  si può riscrivere il seguente sistema le cui formule seguono [9], [10] e [11]:

$$\begin{cases} Q_E = \frac{\alpha}{1 + \exp(-0.055(T-279))} (R_N - Q_G) + 20\alpha \\ Q_G = c_G R_N. \end{cases}$$

A questo punto sostituendo il tutto si trova la forma finale per il flusso di calore sensibile:

$$H_0 = (1 - c_G)R_N - \frac{\alpha}{1 + \exp(-0.055(T - 279))} (1 - c_G)R_N - 20\alpha. \quad (1.7)$$

### Lunghezza di Monin-Obukhov

Uno dei parametri che risulterà essere molto presente all'interno del lavoro è la lunghezza di Monin-Obukhov. Questa veste un ruolo particolarmente importante perché rappresenta il rapporto tra l'energia turbolenta prodotta da fattori meccanici e quella prodotta da moti convettivi. SIRANE calcola tale parametro attraverso la seguente formula:

$$L_{MO} = -\frac{\rho C_p \theta}{kg H_0} \cdot u_*^3 \quad (1.8)$$

con:

- $\rho$  densità dell'aria;
- $C_p$  coefficiente di calore specifico a pressione costante ( $C_p = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );
- $k$  costante di von-Karman;
- $\theta$  temperatura potenziale.

### Cloud Cover

La copertura nuvolosa entra in gioco all'interno del calcolo della radiazione netta e perciò riveste un ruolo molto importante all'interno della dinamica del fenomeno. Essa viene misurata in Okta e perciò assume valori che vanno da un minimo pari a 0 ad un massimo pari al valore 8. Per il calcolo di questa quantità il software inverte la seguente formula riportata in [12]:

$$K_{down} = \begin{cases} (990 \sin(\psi) - 30) \left(1 - 0.75 \left(\frac{Cl_d}{8}\right)^{3.4}\right) & \text{di giorno} \\ 0 & \text{di notte} \end{cases}$$

con

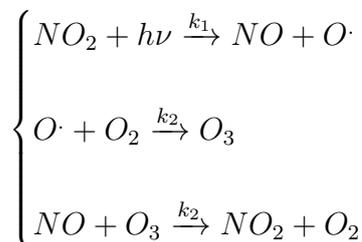
$$\begin{cases} \sin(\psi) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos\left(\left[\frac{2\pi}{24}(t_{HTU} - 12)\right]\right) \\ \delta = 23.45 \sin\left(\left[\frac{2\pi}{365}(j + 284)\right]\right) \end{cases}$$

dove :

- $j$  è il giorno dell'anno;
- $t_{HTU}$  è l'ora del giorno;
- $\phi$  è la latitudine del sito;
- di notte viene imposto  $Cld = 8$ .

### Costanti Cinetiche di Reazione

I fenomeni di dispersione degli inquinanti a livello del quartiere sono caratterizzati da una scala di tempo dell'ordine di poche decine di minuti. Essendo che la maggior parte delle reazioni che avvengono in atmosfera hanno tempi di reazione molto più lunghi questi vengono trascurati all'interno del software. Una reazione, che invece avviene in un tempo abbastanza breve da modificare in maniera importante i campi di concentrazione di alcuni inquinanti è sicuramente quella che coinvolge gli ossidi di nitrogeno, le quali reazioni inducono una creazione/distruzione dell'ozono. Siccome il ciclo chimico è molto complesso SIRANE utilizza una semplificazione di questo attraverso il ciclo di Chapman, riportato di [2] e scritto di seguito:



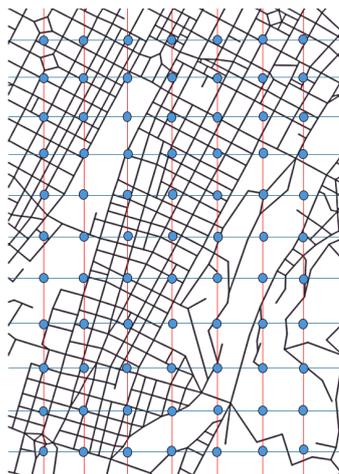
A questo punto si nota che la reattività di  $O\cdot$  è molto alta, tanto che il tempo caratteristico risulta trascurabile rispetto alle altre. Per procedere, consideriamo, allora, condizioni di foto-stazionarietà [13] e o il rapporto  $k_1/k_3$  costante in spazio e tempo o solo in spazio. Utilizzando questa ultima ipotesi si possono scrivere le seguenti equazioni per le due costanti riportate in [12]:

$$\begin{cases} k_1 = \frac{1}{60} \left(0.5699 - [9.056 \cdot 10^{-3}(90 - \chi)]^{2.546}\right) \left(1 - 0.75 \left[\frac{Cld}{8}\right]^{3.4}\right) \\ k_3 = 1.325 \cdot 10^5 \exp\left(-\frac{1430}{T}\right) \end{cases}$$

con  $\chi$  che rappresenta l'elevazione solare.

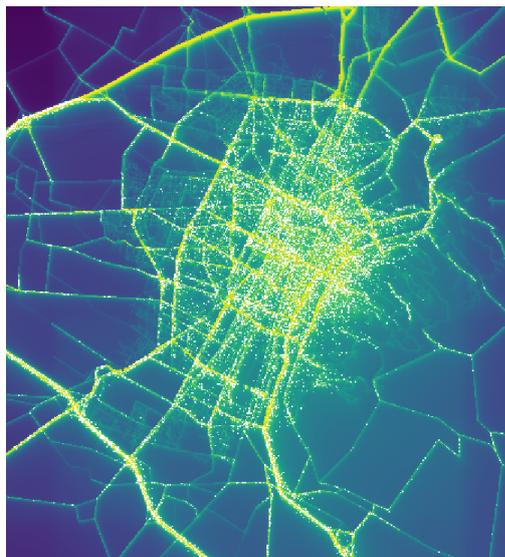
## 1.4.2 Risultati sulla Griglia e Statistiche sulla Griglia

All'interno di questa sezione si considerano quelli che sono gli output sulla griglia. Prima di ciò si definisce cos'è una griglia. Questa rappresenta un'insieme di punti equispaziati disposti all'interno di un'area geografica, come si vede in figura 1.6. I risultati ottenuti al di sopra della griglia forniscono informazioni circa le



**Figura 1.6:** Esempio di una griglia posizionata su di una mappa. Nell'immagine la griglia è rappresentata dai punti che si trovano all'intersezione delle linee perpendicolari tra loro.

concentrazioni giornaliere degli inquinanti nei punti che fanno parte della griglia. Come visto nella parte dei parametri di input, questo tipo di informazione è restituita in diversi modi, come ad esempio tramite un file di testo ASCII o di tipo binario. In entrambi questi casi ad ogni punto viene associato il valore della concentrazione dell'inquinante. Altro modo in cui viene restituita questa informazione è attraverso dei file con estensione *.grid* i quali vengono letti tramite il software *QGIS*. Questi rappresentano le concentrazioni nei vari punti colorandoli e variando l'intensità del colore in base alla concentrazione dell'inquinante, come mostrato in figura 1.7. Un secondo tipo di file di output che si descriverà all'interno di questa sezione è costituito dai file che forniscono una statistica sulla griglia, come il massimo, il minimo e il numero di ore in cui l'inquinante ha superato un certo percentile. Le modalità in cui vengono restituite queste statistiche sono le medesime dei risultati di griglia. Per ogni statistica e per ogni inquinante viene restituito un file differente. Ad esempio per la statistica del minimo della concentrazione di *NO* durante l'arco di una giornata, si potrà avere un file ASCII, un file binario o un file con estensione *.grid*, nel quale per ogni punto della griglia si fornisce il valore del minimo.



**Figura 1.7:** Esempio di un file con estensione `.grid` che indica la concentrazione di *NO* all'interno di un reticolo urbano di Torino tramite una colorazione che cambia a seconda del valore di concentrazione all'interno dei vari punti.

### 1.4.3 Ricettori e Statistiche sui Ricettori

Le ultime tipologie di risultato che si ottengono sono quelli relativi ai ricettori. Questi rappresentano alcuni punti specifici nei quali vengono misurate le concentrazioni dei vari inquinanti per ogni ora della simulazione. Per ogni ricettore e per ogni slot orario viene restituito un file di testo dove vengono riportate le concentrazioni dei vari inquinanti e il deposito secco di questi. Per quanto riguarda le statistiche da considerare sui vari ricettori, è presente una in particolar modo che risulta importante per capire come si comporta il modello e si trova all'interno di alcuni file di testo chiamati *QQ\_plot*. Questi sono file calcolati per ogni ricettore e ogni inquinante. All'interno di ogni file *QQ\_plot* sono presenti prima le concentrazioni ottenute dal modello per ogni ora della simulazione in ordine crescente e nella seconda colonna quelle date in input e quindi misurate nello stesso ricettore, negli stessi slot orari e sempre disposte in ordine crescente, un esempio è riportato in figura 1.8.

Gli ultimi file di output che vengono presentati sono quelli relativi alle statistiche dei ricettori. Questi sono file di testo con estensione *.dat* dove per ogni inquinante e per ogni stazione vengono fornite alcune statistiche. Alcune di queste sono riportate qui di seguito:

- il massimo e il minimo delle concentrazioni per ogni ricettore sia modellato che misurato;

File	Modifica	Visualizza
c_Mod	c_Mes	
6.43	2.00	
7.43	2.00	
9.69	2.00	
12.65	2.00	
14.25	2.00	
14.28	2.00	
14.84	2.00	
15.94	2.00	
19.59	3.00	
20.13	3.00	
22.30	3.00	
24.50	3.00	
24.77	3.00	
26.46	3.00	
29.71	3.00	
31.05	3.00	
34.07	3.00	
39.09	3.00	
39.63	3.00	
52.05	3.00	
60.69	3.00	
71.27	3.00	
73.48	4.00	
76.58	4.00	
122.47	5.00	

**Figura 1.8:** Esempio di come è scritto un file *QQ\_plot* per un ricettore. In questo esempio specifico si mostra il file relativo al ricettore di Baldissera per l'inquinante *NO*. Nel file la prima riga contiene le concentrazioni dell'inquinante trovate col modello per ogni ora e disposte in ordine crescente, mentre nella seconda riga vi sono le concentrazioni misurate per ogni ora sul ricettore sempre disposte in ordine crescente.

- il numero di ore e di giorni in cui viene superato un certo percentile per ogni ricettore sia per le concentrazioni trovate tramite il modello che per quelle misurate;
- lo scarto quadratico medio normalizzato tra la serie temporale di concentrazioni ottenuta dal modello e quella misurata;
- l'errore relativo medio tra la serie temporale delle concentrazioni ottenuta dal modello e quella misurata;
- il coefficiente di correlazione tra la serie temporale del modello e quella misurata.

Un esempio di un file di testo di questo ultimo tipo è dato in figura 1.9.



## Capitolo 2

# Analisi di Sensitività

Un metodo particolarmente efficace per comprendere il fenomeno di dispersione degli inquinanti è l'Analisi di Sensitività. Questa tecnica permette di studiare l'impatto delle variazioni di specifiche grandezze fornite in ingresso sul risultato finale, fornendo così una visione d'insieme sui fattori che influenzano il fenomeno in esame. Tale analisi si rivela utile, ad esempio, quando è necessario avviare una campagna di riduzione della diffusione degli inquinanti. Nel contesto della presente tesi, l'obiettivo è valutare come e in che misura le variazioni dei parametri meteorologici forniti in input influenzino i risultati meteorologici in output, per poi analizzare l'impatto di tali variazioni sulle concentrazioni di inquinanti. Si prenderà inizialmente in esame il caso di Lione, come riportato in [3], presentando i risultati e la metodologia utilizzata. Successivamente, verrà condotta un'analisi simile per la città di Torino, illustrando i risultati ottenuti.

### 2.1 Caso di Lione

Per comprendere come eseguire l'analisi di sensitività si comincia studiando la campagna LYON6. Questa è stata effettuata nei giorni compresi tra il 9 e il 24 Luglio 2001. La scelta del periodo è dovuta ad una semplificazione delle misurazioni, infatti, in estate il contributo delle sorgenti superficiali risulta trascurabile perché i riscaldamenti domestici non vengono attivati. Per quanto riguarda la zona è stata scelta la VI circoscrizione di Lione. I motivi di tale scelta sono molteplici, i principali sono la regolarità della zona e l'assenza di fabbriche che rende anche trascurabile il contributo delle sorgenti puntuali.

Questa campagna ha avuto il fine di definire i dati standard, ossia i dati dai quali verranno effettuate le variazioni per l'analisi. I dati raccolti sono relativi al flusso veicolare, alle condizioni meteorologiche, alle concentrazioni di inquinanti e all'inquinamento di fondo. Successivamente si è proseguito con la definizione

dello scenario della simulazione e il set-up del modello i quali sono necessari a far funzionare il software. Qui si definiscono la geometria urbana, la distribuzione spaziale e temporale delle emissioni e l'evoluzione temporale sia dei parametri meteo che dell'inquinamento di fondo. Una volta eseguito questo step si esegue l'analisi di sensitività vera e propria.

### 2.1.1 Analisi di sensitività nel caso di Lione

Al fine di eseguire l'analisi di sensitività risulta necessaria la quantificazione della "distanza" tra i risultati ricavati con i dati standard e quelli ottenuti mediante una variazione dei dati di input. Per fare ciò si definiscono alcuni parametri. All'interno di [3] vengono utilizzati i seguenti:

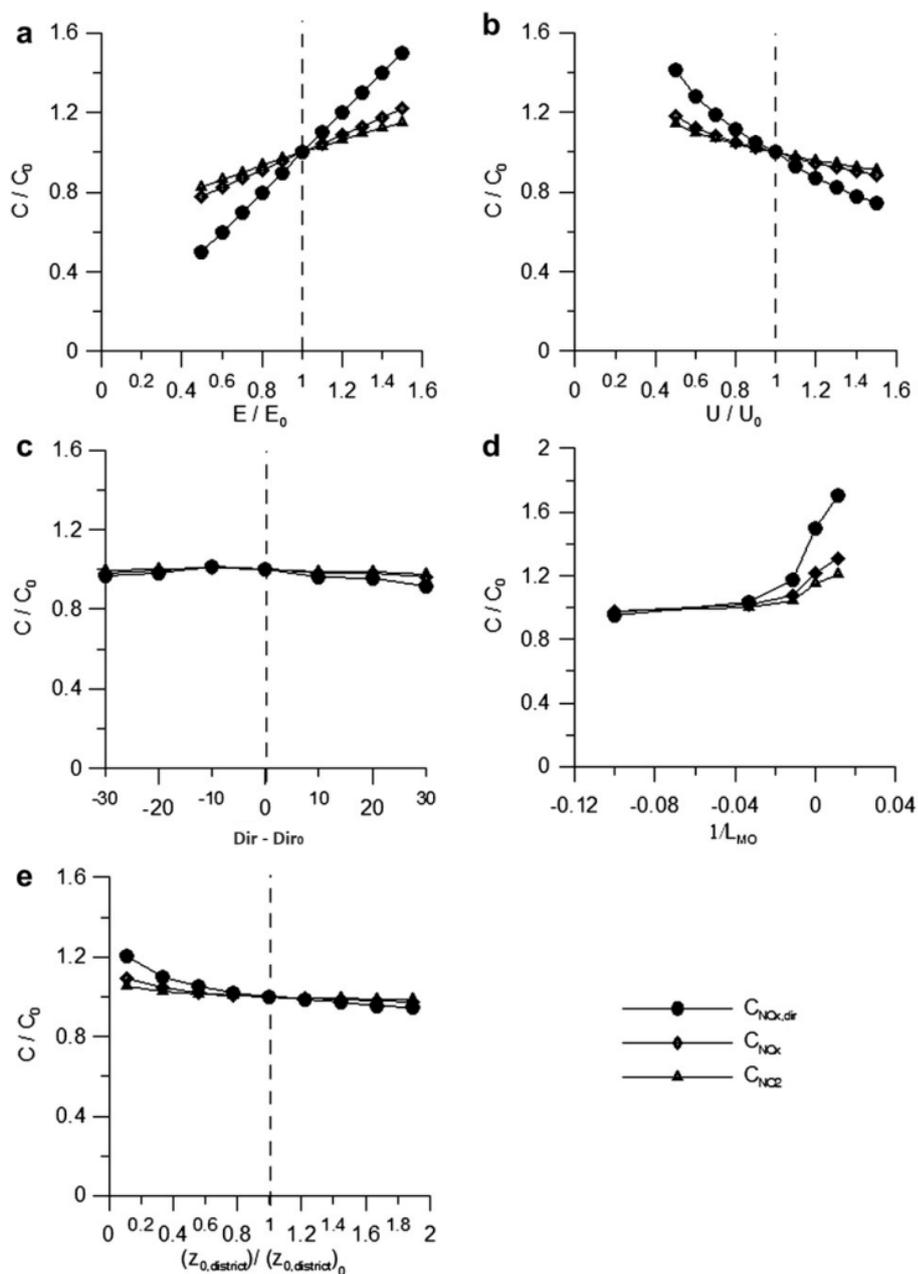
- $C_{NO_X,dir}$  che rappresenta la concentrazione di  $NO_X$  mediata nei 15 giorni e su tutte le strade del quartiere, senza prendere in considerazione l'inquinamento di fondo;
- $C_{NO_X}$  che rappresenta la concentrazione di  $NO_X$  mediata nei 15 giorni e su tutte le strade del quartiere considerando l'inquinamento di fondo;
- $C_{NO_2}$  che rappresenta la concentrazione di  $NO_2$  mediata nei 15 giorni e su tutte le strade del quartiere tenendo in considerazione l'inquinamento di fondo.

Prima di mostrare e commentare i risultati è utile menzionare la particolare importanza del contributo dovuto all'inquinamento di fondo. Nelle simulazioni successive la campagna LYON6, infatti, si sono ottenuti valori di  $36.36 \mu g/m^3$  per  $C_{NO_X,dir}$  e di  $82.79 \mu g/m^3$  per  $C_{NO_X}$ , il che implica che circa il 56% della concentrazione totale corrisponde all'inquinamento di fondo. Questo è il motivo per il quale all'interno di [3] si è deciso di adoperare due concentrazioni per gli ossidi di azoto una che considera l'inquinamento di fondo e l'altra no.

Un ulteriore aspetto da considerare riguarda le tipologie di dati di input che, all'interno di LYON6, sono stati variati per lo studio. I dati forniti sono classificati in tre categorie principali: le emissioni, i parametri meteorologici e la geometria. L'analisi è stata condotta in due fasi: nella prima fase, tutti i parametri sono stati variati del 50% per individuare quale di essi provochi la maggiore variazione sui risultati. Nella seconda fase, è stata eseguita un'analisi di sensitività differenziale (figura 2.1) per esaminare in modo più dettagliato l'influenza di ciascun parametro.

#### Traffico veicolare e emissioni

L'influenza delle emissioni sui risultati del modello è visibile in figura 2.1-a. Qui vengono riportati sull'asse  $y$  i valori dei parametri di concentrazione ottenuti dopo la variazione delle emissioni, divise per il loro valore nel caso standard; mentre sull'asse  $x$  il rapporto  $E/E_0$ , dove con  $E$  si intende il valore delle emissioni a seguito della



**Figura 2.1:** Analisi di sensitività differenziale su a) emissioni degli inquinanti da veicoli  $E$ , b) velocità del vento  $U$ , c) direzione del vento  $Dir$ , d) lunghezza di Monin-Obukhov  $L_{MO}$  ed e) altezza di rugosità  $z_{0,district}$ . I valori di  $E_0$ ,  $U_0$ ,  $Dir_0$  e  $(z_{0,district})_0$  rappresentano i valori dei parametri nello scenario standard.

variazione dei parametri, mentre con  $E_0$  il valore delle emissioni nel caso standard. Si osserva quindi una dipendenza di tipo lineare tra le due variabili poste nei due assi. Per il caso della  $C_{NO_X,dir}$  si nota una variazione analoga tra le due quantità e quindi si osserva che al variare delle emissioni si ha una variazione della stessa entità nella concentrazione considerata. Per gli altri parametri di concentrazione la variazione si riduce, questo perché si considera anche l'inquinamento di fondo e quindi il parametro di concentrazione non dipende solamente dall'emissione.

Per approfondire la dipendenza dalle emissioni si sono considerate le cause che portano all'aumento di queste e quindi l'intensità di traffico, la distribuzione delle code di traffico e i fattori di emissione.

Partendo dall'intensità di traffico questa è stata incrementata del 50% per ogni strada del quartiere. Come si vede in tabella 2.1 questo ha indotto una variazione superiore al 50% nel parametro che non tiene in considerazione l'inquinamento di fondo. Una spiegazione è che la variazione del flusso veicolare faccia variare anche la velocità con cui i mezzi viaggiano inducendo anche una variazione nelle emissioni. Questo effetto si riduce se si considera anche l'inquinamento di fondo.

Per quanto riguarda la variazione nella distribuzione delle code di traffico, bisogna tenere in considerazione diversi fattori tra cui l'anno considerato, infatti, questa può dipendere dalle evoluzioni delle politiche che governano le emissioni nei vari periodi. Il dataset utilizzato in [3] è quello di ADEME il quale fornisce l'annuale evoluzione delle code di traffico fino al 2020. All'interno del lavoro sono stati utilizzati i dati relativi al 2001, al 1999 e al 2003 così da mantenere una differenza di due anni. In tabella 2.1 è possibile osservare che rispetto alle variazioni di anno la  $C_{NO_X,dir}$  ha subito delle variazioni di circa il 15%, mentre negli altri due parametri questa variazione risulta più contenuta con modifiche intorno al 7% e al 4%.

Infine si è fatto variare il tasso di emissione di  $NO_2$ , che corrisponde alla quantità  $NO_2/NO_X$ . La variazione di questo dato non va ad incidere sui due parametri  $C_{NO_X,dir}$  e  $C_{NO_X}$  in quanto sono collegati solo alla concentrazione di  $NO_X$ . Se si considera invece  $C_{NO_2}$  in tabella 2.1 si può osservare che una variazione del 50% sia in positivo che in negativo comporta una variazione del parametro di circa il 2%.

**Tabella 2.1:** tabella con all'interno le variazioni dei parametri di emissione e le relative variazioni sui parametri di concentrazione.

	Emissions +50%	Emissions -50%	Traffic +50%	Traffic -50%	Vehicular fleet 1999	Vehicular fleet 2003	$NO_2/NO_x$ at emission +50% (=0.15)	$NO_2/NO_x$ at emission -50% (=-0.05)
Relative variation $C_{NO_x,dir}$	+50%	-50%	+59.33%	-51.70%	+15.99%	-15.22%	0%	0%
Relative variation $C_{NO_x}$	+21.96%	-21.96%	+26.06%	-22.71%	+7.02%	-6.68%	0%	0%
Relative variation $C_{NO_2}$	+14.22%	-16.60%	+16.75%	-17.29%	+4.76%	-4.75%	-2.15%	+2.11%

### Dati Meteorologici

I risultati dell'analisi sui parametri meteo sono riportati all'interno della tabella 2.2. Il dato che induce maggior variazione nei parametri è sicuramente la velocità del vento. Questa, infatti, tramite il suo aumento induce un incremento di circa il 40% sulla  $C_{NO_{x,dir}}$ , mentre una sua diminuzione provoca un decremento di circa il 25%. Per quanto riguarda gli altri parametri, in tabella 2.2 è possibile osservare che una variazione della velocità del vento induce delle variazioni di minore entità, ma sempre con una simile asimmetria. Questa è dovuta al fatto che una variazione della velocità del vento induce una modifica nel fenomeno di turbolenza variando l'intensità di questa e i valori dei parametri di stabilità.

Per la direzione del vento, invece, dalla figura 2.1-c è possibile osservare che un incremento o decremento di questa provoca una variazione nei parametri di lieve entità quasi trascurabile.

Si prosegue poi con lo studio della modifica della temperatura. Con un incremento o decremento di circa  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  si è ottenuta una variazione nei parametri di concentrazione molto contenuta. Come si può osservare in tabella 2.2 questa variazione è dell'ordine dello 0.06% per  $C_{NO_{x,dir}}$  e per  $C_{NO_x}$ , mentre risulta essere circa 0.4% per la  $C_{NO_2}$ . Altro parametro meteo studiato all'interno di questa analisi è la copertura nuvolosa. Durante la campagna LYON6 si è registrata una media per questo dato di 4.9 okta. Per lo studio di sensitività si è proceduto portando prima a 0 okta il valore di questo parametro (imponendo cielo libero da nuvole) e successivamente si è imposto pari ad 8 okta (imponendo cielo completamente nuvoloso). In tabella 2.2 è possibile notare una variazione intorno allo 0.5% per i casi di cielo libero e del 5% circa nel caso di cielo nuvoloso.

Siccome le simulazioni sono eseguite durante l'estate in cui le ore diurne sono più della media annuale, si avrà un maggior numero di ore in cui l'atmosfera sarà instabile. A questo punto in [3] per mostrare gli effetti del periodo dell'anno sui risultati si è deciso di eseguire una simulazione mantenendo tutti i dati ma spostando il periodo a Gennaio. Questo ha portato una variazione di  $C_{NO_{x,dir}}$  di circa il 40%, per  $C_{NO_x}$  di circa il 19% e per  $C_{NO_2}$  di circa il 10%.

Si passa a considerare il coefficiente di Priestley-Taylor, il quale rappresenta la quantità di vapore acqueo al livello del suolo che può evaporare. Un valore pari a 0 indica un terreno completamente secco, al contrario un valore pari ad 1 indica un suolo saturo. Per la simulazione standard si è imposto il suo valore pari a 0.5, mentre per l'analisi di sensitività si sono imposti i due valori estremi 0 e 1. Come risultato si sono ottenute variazioni che vanno da  $-5.35\%$  a  $+14.73\%$  per  $C_{NO_{x,dir}}$ . Per quanto riguarda gli altri due parametri di concentrazione queste variazioni sono di minore entità e sono riportate in tabella 2.2. L'ultimo dato meteorologico del quale viene eseguita l'analisi è la lunghezza di Monin-Obukhov. Questa analisi viene svolta in due modi, il primo consiste nel variare il valore minimo per questa quantità, mentre il secondo si concentra sull'effetto delle condizioni di stabilità forzate. Per

quanto riguarda la lunghezza minima questa è stata introdotta nel software per far sì non si abbiano casi di atmosfera troppo stabili e irrealistici. Il valore standard è di  $90m$ , quando viene ridotto la concentrazione tende ad aumentare a causa delle condizioni di stabilità maggiore. Si è proceduto riducendo il valore minimo a  $50m$  e ottenendo per tutti e tre i parametri una variazione inferiore al 2%. Il secondo metodo utilizzato è stato quello di imporre un valore fisso per  $L_{MO}$  per tutta la durata della simulazione. Sono stati testati 5 casi, tre con condizioni di instabilità ( $L_{MO}$  pari a  $-10$ ,  $-30$  e  $-90$ ), una neutrale ( $L_{MO} = \infty$ ) e una con condizioni stabili ( $L_{MO} = 90$ ). I risultati di tali test sono riportati in figura 2.1-d dove i parametri normalizzati attraverso il caso standard sono riportati sull'asse  $y$  mentre l'inverso della  $L_{MO}$  è riportato sull'asse  $x$ . Si osserva che per valori di  $L_{MO}$  positivi si ha una variazione maggiore nei parametri di concentrazione, mentre per valori di  $L_{MO}$  negativi i parametri restano pressoché uguali al caso base. Questo può essere spiegato se si considera che a Luglio la lunghezza di Monin-Obukhov è maggiormente instabile in quanto le ore di luce risultano maggiori rispetto a quelle di buio e perciò forzare la stabilità dell'atmosfera è un qualcosa di più differente dal caso standard rispetto al forzare l'instabilità.

**Tabella 2.2:** tabella con all'interno le variazioni dei parametri di meteo e le relative variazioni sui parametri di concentrazione.

	Wind speed +50%	Wind speed -50%	Temperature +5 °C	Temperature -5 °C	Cloud coverage = 0 octas	Cloud coverage = 8 octas
Relative Var. of $C_{NO_{x,dir}}$	-25.81%	+41.60%	+0.06%	+0.13%	+0.61%	+9.25%
Relative Var. of $C_{NO_x}$	-11.34%	+18.27%	+0.03%	+0.06%	+0.27%	+4.06%
Relative Var. of $C_{NO_2}$	-8.41%	+13.53%	+0.46%	-0.44%	+0.16%	+2.60%

	Simulation performed in january	Priestley -Taylor coeff. = 0	Priestley -Taylor coeff. = 1	$L_{MO}$ minimal = 50 m
Relative Var. of $C_{NO_{x,dir}}$	+43.02%	-5.35%	+14.73%	+1.84%
Relative Var. of $C_{NO_x}$	+18.89%	-2.35%	+6.47%	+0.81%
Relative Var. of $C_{NO_2}$	+9.80%	-1.59%	+3.97%	+0.49%

### Parametri geometrici

I parametri geometrici investigati per l'analisi di sensitività in [3] sono la rugosità del quartiere (indicata anche con District roughness o  $z_{0,district}$ ) e la rugosità degli edifici (indicata anche con Building roughness o  $z_{0,build}$ ). La prima è stimata attraverso relazioni morfometriche come proposto in [14] e utilizzato per modellare il profilo di velocità media. La seconda, invece, è usata per calcolare la velocità media all'interno del canyon stradale. SIRANE utilizza un valore pari a 0.05 m per la  $z_{0,build}$ . Il coefficiente di rugosità aerodinamica agisce su due fronti opposti: il primo consiste nel ridurre la velocità al livello del terreno così da far aumentare le concentrazioni; mentre il secondo consiste nell'aumentare i livelli di turbolenza la quale riduce le concentrazioni. I risultati dell'analisi di sensitività su questi parametri sono riportati in figura 2.1-e e in tabella 2.3. Si può osservare che una variazione di  $z_{0,district}$  del 50% porta ad una modifica di  $C_{NO_{x,dir}}$  tra il 3% e il 6%, mentre la variazione negli altri parametri di concentrazione risulta più contenuta. Per quanto riguarda una modifica dello  $z_{0,build}$  questo comporta una variazione di  $C_{NO_{x,dir}}$  tra l'1% e il 3%. Per quanto riguarda gli altri parametri anche qui le variazioni dal caso base risultano di minore entità rispetto a quelle che si sono trovate per  $C_{NO_{x,dir}}$ . Sulla base dei risultati ottenuti si può affermare che la variazione dei parametri geometrici analizzati induce una modifica nei parametri di concentrazione trascurabile.

**Tabella 2.3:** tabella con all'interno le variazioni dei parametri geometrici e le relative variazioni sui parametri di concentrazione.

	District Roughness +50%	District Roughness -50%
Relative variation of $C_{NO_{x,dir}}$	-3.08%	+6.16%
Relative variation of $C_{NO_x}$	-1.35%	+2.71%
Relative variation of $C_{NO_2}$	-0.80%	+1.55%

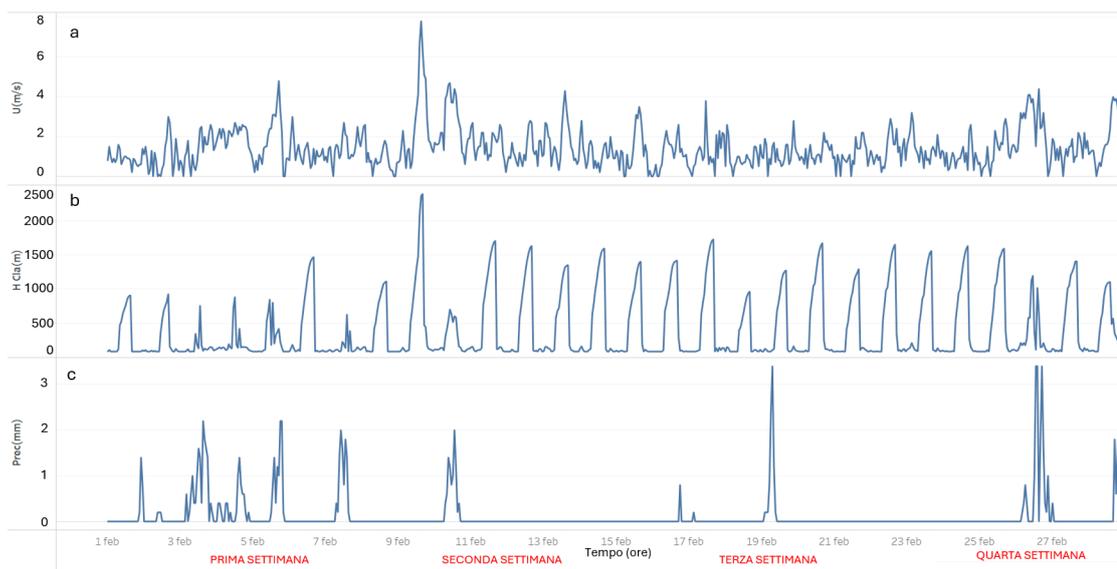
  

	Building roughness = 0.01 m	Building roughness = 0.1 m
Relative variation of $C_{NO_{x,dir}}$	-0.80%	+2.69%
Relative variation of $C_{NO_x}$	-0.35%	+1.18%
Relative variation of $C_{NO_2}$	-0.20%	+0.58%

## 2.2 Analisi su Torino

Una volta visualizzato il caso di Lione, si cerca di riprodurre in maniera simile ma non uguale l'analisi anche su Torino. Per fare questo bisogna innanzitutto scegliere il periodo e il luogo per lo studio.

Per il periodo si è deciso di selezionare una settimana lavorativa all'interno del mese di Febbraio 2014 e prive di festività in modo tale da avere un flusso di traffico ordinario e non falsato. Per la scelta della settimana lavorativa si è proceduto riportando su alcuni grafici (figura 2.2) la velocità del vento ( $U$ ), l'altezza del Boundary Layer ( $H_{Cl}$ ) e le precipitazioni ( $Prec$ ) in modo tale da osservare quale possa essere la scelta migliore. Osservando la figura 2.2 si è deciso di considerare la prima settimana lavorativa che è compresa tra il 3 Febbraio 2014 e il 7 Febbraio 2014. Questa scelta è stata effettuata per via dell'andamento dei parametri considerati, infatti, in figura 2.2 è possibile osservare che nel periodo che va dal 3 al 7 Febbraio sono presenti un maggior numero di precipitazioni rispetto alle altre settimane.



**Figura 2.2:** Grafico nel quale sono riportate sull'asse  $x$  le date all'interno del mese di Febbraio 2014, mentre sull'asse  $y$  sono riportati: a) la velocità del vento  $U$ , b) l'altezza del Boundary Layer ( $H_{Cl}$ ) e in c) le precipitazioni ( $Prec$ ).

Per la zona si è deciso di copiare quello fatto nel caso di Lione e quindi si è selezionata una zona priva di fabbriche e che avesse una forma regolare. Inoltre, si è deciso di scegliere un quartiere abbastanza trafficato così da studiare meglio la componente dovuta alle emissioni puntuali. La scelta è ricaduta sul quartiere di San Salvario riportato in figura 2.3. Questo quartiere confina a nord-ovest con la

zona di Porta Nuova, ad est con il parco del Valentino e a sud con corso Bramante quindi da ogni lato è presente un corso o una via principale che la delimita e risulta trafficata.



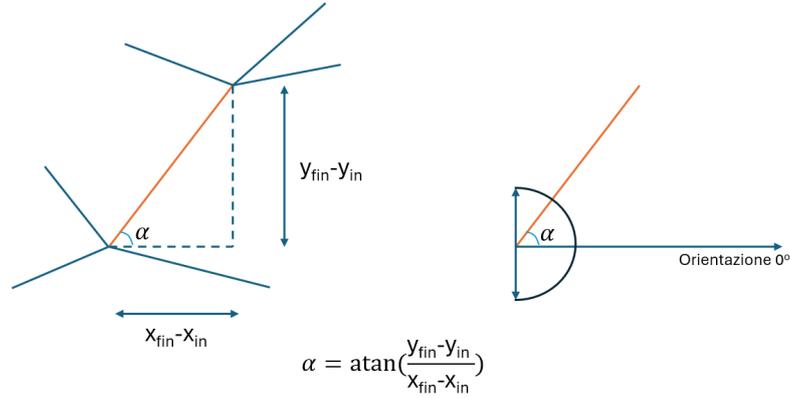
**Figura 2.3:** la zona di Torino chiamata San Salvario scelta per svolgere l'analisi di sensitività. All'interno della figura si vedono le strade che delimitano l'area scelta, in particolare è visibile corso Bramante a sud, il corso che divide il quartiere dal parco del Valentino ad est, corso Vittorio Emanuele che collega San Salvario con la zona di centrale di Torino a nord e via Nizza che divide il quartiere dalla stazione di Porta Nuova ad ovest.

### 2.2.1 Parametri di concentrazione

Il passo successivo per eseguire uno studio simile a quello di Lione consiste nel definire i parametri di concentrazione che descrivono i risultati di una simulazione e quindi la sua configurazione di output. Si è deciso di creare dei nuovi parametri che tenessero conto di altri fattori, come l'orientazione delle strade. I parametri scelti li indicheremo con  $\langle C_{NOX} \rangle_{strada}$  e rappresentano la concentrazione di NOX su ogni strada mediate in tempo. Considerando questa tipologia di parametro di concentrazione avremo un numero di valori pari al numero di strade presenti all'interno del quartiere di San Salvario. Per ridurre i calcoli quindi cercheremo alcune strade rappresentative dell'orientazione e di queste calcoleremo il parametro relativo.

Il primo step per individuare le strade rappresentative consiste nell'osservare se

sono presenti delle orientazioni frequenti. Per fare questo si deve prima indicare come l'orientazione viene calcolata. Il tutto viene riassunto in figura 2.4. Questa viene considerata compresa tra  $-90 \text{ grad}$  e  $+90 \text{ grad}$  così da ridurre le possibili configurazioni al solo angolo piatto.



**Figura 2.4:** all'interno della presente figura  $\alpha$  rappresenta l'orientazione che viene data alla strada rispetto ad una direzione orizzontale diretta verso est.  $\alpha$  inoltre risulta compreso tra  $-90 \text{ grad}$  e  $+90 \text{ grad}$ . Nella figura il segmento stradale viene rappresentato in arancione, mentre in blue sono rappresentati i blocchi stradali in comunicazione con quello considerato.

A questo punto osservando figura 2.3 ci si accorge che sono presenti delle orientazioni ripetute. Per determinarle e notare se a queste corrispondono delle concentrazioni preferenziali si prosegue determinando uno scatterplot. Prima di fare questo definiamo la seguente quantità:

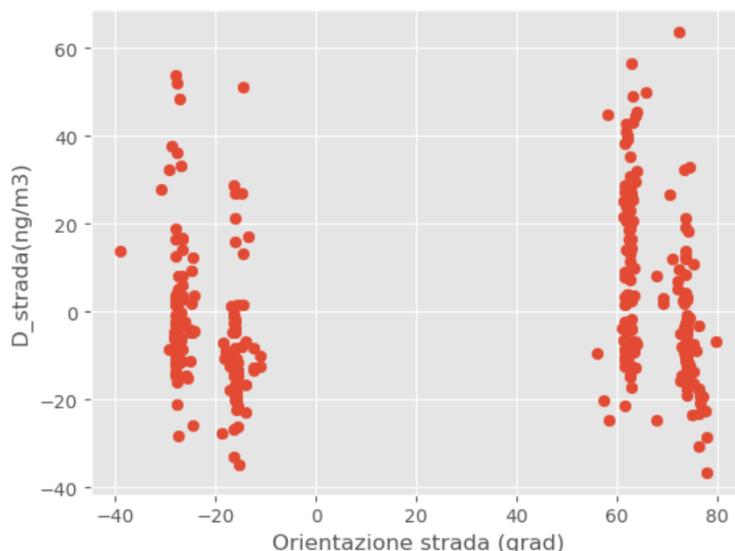
$$\bar{D}_{strada} := \frac{1}{TOT_h} \sum_{i=1}^{TOT_h} (C_{NOX}^{strada}(t_i) - \bar{C}_{NOX}(t_i)) \quad (2.1)$$

dove con:

- $TOT_h$  si indicano il numero di ore considerate;
- $C_{NOX}^{strada}(t_i)$  si indica la concentrazione di  $NO_X$  nella strada considerata all'istante  $t_i$ ;
- $\bar{C}_{NOX}(t_i)$  si intende la media delle concentrazioni di  $NO_X$  sul quartiere all'istante  $t_i$ .

Questa quantità rappresenta la media nel tempo della differenza tra la concentrazione della strada e la concentrazione media del quartiere. Questa quantità

serve per permettere di capire se rispetto alla media globale del quartiere la strada presenta una concentrazione media maggiore o inferiore dell'inquinante  $NO_X$ . A questo punto si passa nel determinare lo scatterplot. Questo è visibile in figura 2.5, dove è possibile osservare che sono presenti quattro direzioni principali che vengono ripetute dalle varie strade del quartiere. Per quanto riguarda la quantità  $\bar{D}_{strada}$  non sembra esserci una relazione esplicita ad eccezione di un'orientazione compresa tra  $-20\text{ grad}$  e  $-10\text{ grad}$  che sembra presentare dei valori per  $\bar{D}_{strada}$  negativi.



**Figura 2.5:** Scatterplot che riporta sull'asse  $x$  l'orientazione delle varie strade all'interno del quartiere di SanSalvario, calcolata considerando la direzione orizzontale come direzione nulla; mentre sull'asse  $y$  è disposta la metrica che considera la differenza media tra concentrazione di  $NO_X$  della strada e quella relativa al quartiere.

A questo punto per la scelta delle metriche da utilizzare si scelgono 4 strade differenti ognuna rappresentativa delle quattro orientazioni viste in figura 2.5. Aprendo il file *QGIS* di cui si è parlato all'interno del capitolo ?? si osserva che per ogni strada è presente un identificativo. In figura 2.6 viene riportato il reticolo stradale con le strade selezionate e il loro identificativo.



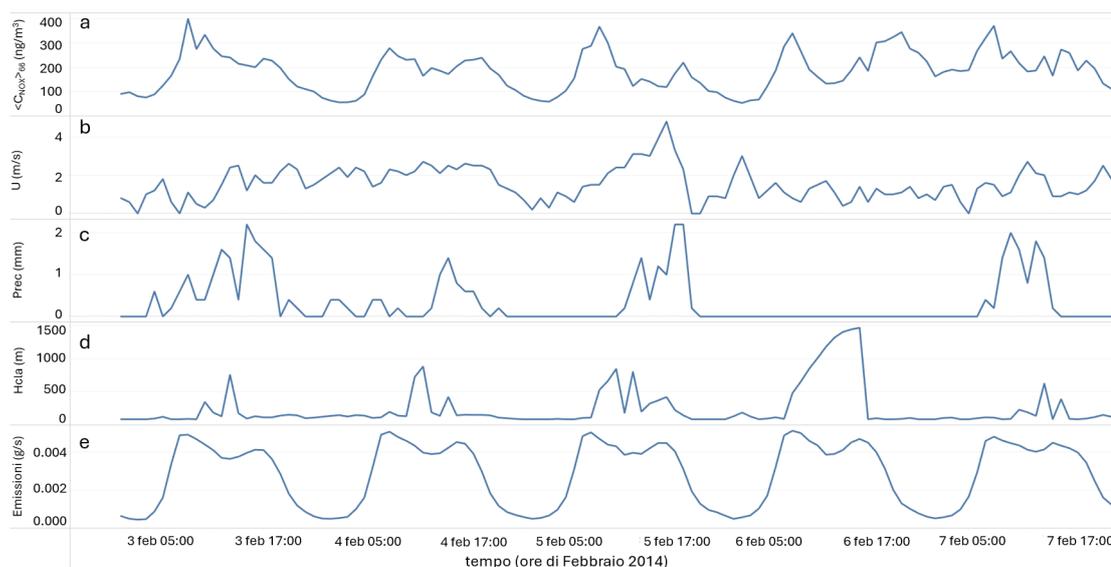
**Figura 2.6:** File *QGIS* con il reticolo stradale del quartiere di San Salvario. All'interno della figura sono evidenziate le 4 strade che sono state selezionate per identificare le orientazioni più presenti e il loro relativo identificativo.

In conclusione i parametri di concentrazione utilizzati saranno:

- $\langle C_{NO_x} \rangle_{66}$ ;
- $\langle C_{NO_x} \rangle_{792}$ ;
- $\langle C_{NO_x} \rangle_{9302}$ ;
- $\langle C_{NO_x} \rangle_{3976}$ ;
- $\langle C_{NO_x} \rangle_{San.Salvario}$ .

### 2.2.2 Parametri di concentrazione per strada

Si considerano adesso i parametri di concentrazione del tipo  $\langle C_{NO_x} \rangle_{strada}$  scelti. Si vuole, quindi, studiare se è presente qualche relazione tra questi e i valori di velocità del vento ( $U$ ), di altezza del Boundary Layer ( $H_{Cla}$ ), di precipitazione ( $Prec$ ) e di emissione. Per capire se è possibile osservare ad occhio una qualche relazione, si procede riportando i grafici delle quantità selezionate uno sopra l'altro. Si riporta in figura 2.7 l'esempio dei grafici per la strada con identificativo 66. Da questo, è possibile osservare, non si riesce a notare una dipendenza esplicita tra le quantità.



**Figura 2.7:** Comparazione degli andamenti di a)  $\langle C_{NOX} \rangle_{66}$ , b) velocità del vento  $U$ , c) precipitazioni  $Prec$ , d) altezza del boundary layer  $H_{Cl_a}$  ed e) emissioni riferite alla strada con identificativo 66 lungo il periodo che va dal 3 al 7 Febbraio 2014.

Si prosegue quindi nel calcolare la cross-correlazione, uno strumento che è in grado di esprimere se due serie di dati sono correlate tra di loro. Si calcola allora questa quantità tra i parametri di concentrazione scelti e i parametri meteo. I risultati di tali calcoli sono riportati in tabella 2.4. Dalla tabella è possibile osservare che con le variabili meteo non sembrano esserci presenti relazioni in quanto il valore più alto di cross-correlazione è dell'ordine di circa 0.2, mentre se si parla della relazione che intercorre tra i parametri di concentrazione considerati e le emissioni come ci si aspetta è presente un valore di cross-correlazione superiore a 0.5, infatti qui il valore minimo è di circa 0.59, mentre il massimo è all'incirca 0.7. Riassumendo figura 2.4 si deduce che i parametri di concentrazione selezionati hanno una bassa correlazione con i parametri meteo considerati. Se invece si considerano le emissioni queste risultano molto correlate con i parametri scelti.

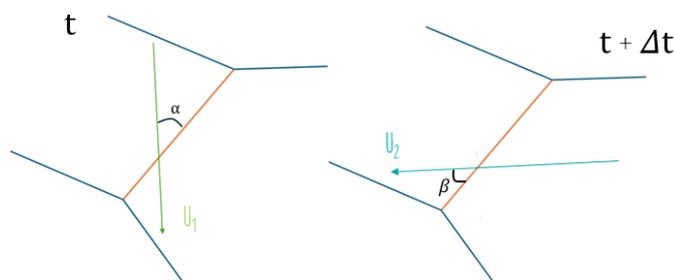
### 2.2.3 Orientazione Relativa e ColorMap

Per proseguire con lo studio della relazione tra concentrazione in strada e la sua orientazione si determina una nuova orientazione che dipende dalla direzione del vento e che quindi varia nel tempo. Si definisce quindi l'orientazione relativa come l'angolo acuto compreso tra la strada e la direzione del vento. Un esempio di questo nuovo parametro può essere osservato in figura 2.8 dove sono riportate le

**Tabella 2.4:** tabella in cui sono riportate le cross-correlazioni tra i vari parametri di concentrazione sia per le strade scelte che per il quartiere di San Salvario. Per ogni colonna è riportato in rosso la cross-correlazione più alta in valore assoluto, mentre in verde quella più bassa.

CONCENTRAZIONE DI NOX	U	HCLA	PREC	EMISSIONI
$\langle C_{NOX} \rangle_{STRADA\ 66}$	-0.075735	0.072647	0.176181	0.672454
$\langle C_{NOX} \rangle_{STRADA\ 792}$	-0.085569	0.075756	0.161426	0.656396
$\langle C_{NOX} \rangle_{STRADA\ 9302}$	-0.069817	0.035819	0.225568	0.715520
$\langle C_{NOX} \rangle_{STRADA\ 3976}$	-0.101169	0.041288	0.159899	0.588891
$\langle C_{NOX} \rangle_{SANSALVARIO}$	-0.079089	0.057099	0.182277	0.677310

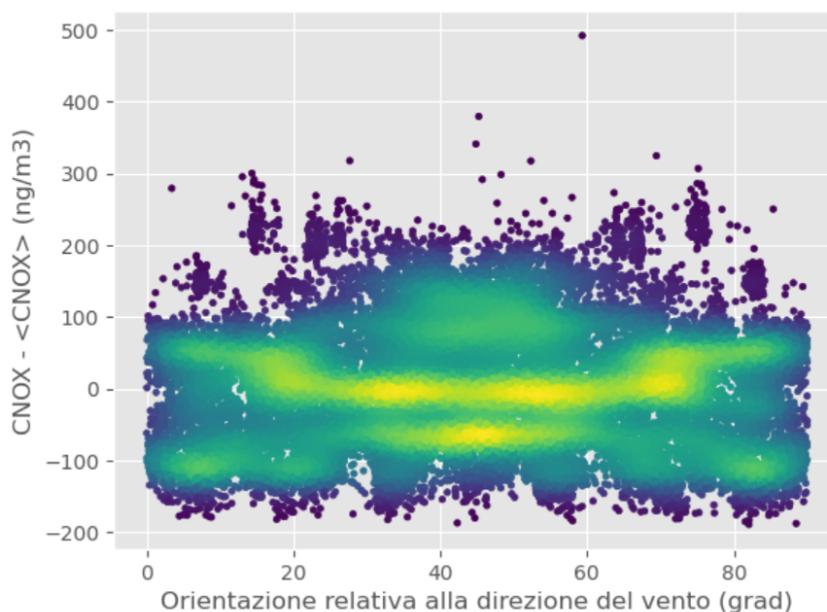
orientazioni relative per la stessa strada ma per istanti di tempo differenti. Una volta determinata questa quantità si vuole riportare uno scatterplot che associ l'orientazione relativa per ogni strada e per ogni ora alla concentrazione di  $NO_X$  per la stessa strada e la stessa ora. Per far sì che si accentuino le differenze tra le concentrazioni di  $NO_X$  delle varie strade si utilizzerà la seguente quantità  $c_{NO_X}^{strada}(t) - \langle c_{NO_X} \rangle(t)$ , dove con  $\langle c_{NO_X} \rangle(t)$  si indica la media delle concentrazioni sulle strade in San Salvario al tempo  $t$ . Sottrarre la quantità media di concentrazione, infatti, accentua le differenze di concentrazione tra le strade (in quanto gli ordini di grandezza delle differenze potrebbero essere molto inferiori a quelli di concentrazione delle strade stesse) e aiuta a comprendere meglio se queste hanno una concentrazione inferiore o superiore alla media.



**Figura 2.8:** In figura vengono rappresentati i valori di orientazione relativa per la stessa strada ma ad istanti di tempo differenti. Al tempo  $t$  l'orientazione è indicata con  $\alpha$ , mentre al tempo  $t + \Delta t$  viene indicata con  $\beta$ .

Si procede quindi determinando lo scatterplot visibile in figura 2.9 dove sull'asse  $x$  viene disposta l'orientazione relativa, mentre sull'asse  $y$  la concentrazione della strada depurata dalla concentrazione media sul quartiere. In figura 2.9 è possibile osservare che a differenza di quanto si possa immaginare lo scatterplot risulta essere simmetrico rispetto l'asse che vede l'orientazione relativa pari a  $45\ grad$ . Il tutto

risulta controintuitivo in quanto ci si aspetterebbe un aumento della concentrazione con l'aumento dell'angolo di orientazione relativa poiché il vento non riuscirebbe a far disperdere bene l'inquinante. Una possibile spiegazione di tale simmetria e del fatto che la densità dei punti con maggior concentrazione risulti superiore intorno ai 45 *grad* potrebbe trovarsi nell'ipotesi che andrebbe dimostrata che il maggior contributo alla concentrazione di una strada arrivi dagli incroci.



**Figura 2.9:** In figura si osserva uno scatterplot che mette in relazione l'orientazione relativa della strada con la concentrazione di  $NO_X$  della strada stessa depurata dalla media della concentrazione dello stesso inquinante mediata su tutto il quartiere di San Salvario. Lo scatterplot utilizza una rappresentazione le cui aree cambiano colore in base alla densità dei punti presenti all'interno, infatti sono visibili aree di colore giallo nelle quali sono presenti una quantità maggiore di punti. Al contrario le aree colorate in viola sono povere di punti.

## 2.2.4 Analisi di sensitività sui parametri meteo di output

Altro aspetto che risulta utile per comprendere meglio la dipendenza dei risultati dai dati di input è quello relativo allo studio di come i parametri meteo forniti al software impattano sui parametri meteorologici ottenuti in output. Per la realizzazione di tale studio bisogna innanzitutto notare che in base al momento della giornata i parametri meteo vengono determinati in maniera differente. Per questo capitolo si considererà il caso giornaliero in cui è presente la radiazione

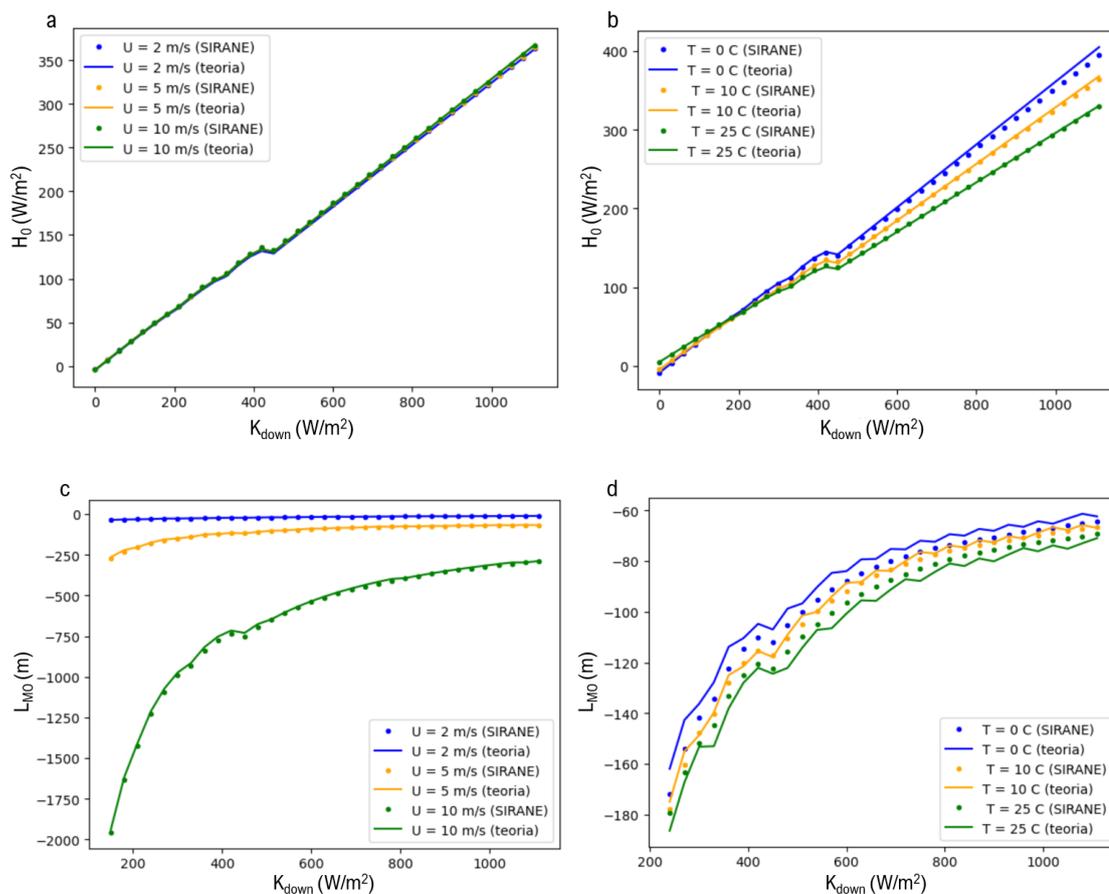
solare e si considereranno i giorni che vanno dal 3 al 7 Febbraio 2014, andando ad incrementare per ogni arco orario considerato un parametro meteo in maniera lineare e quindi con incrementi costanti. Per ottenere una maggior densità di punti così da avere delle curve più vicine alla realtà si è proceduto simulando i giorni di questa settimana per due volte.

I parametri meteo in entrata che si varieranno all'interno del presente studio sono: velocità del vento ( $U$ ), temperatura ( $T$ ) e effetto delle onde corte incidenti ( $K_{down}$ ). Per quanto riguarda i risultati meteo verranno studiati: il flusso di calore sensibile ( $H_0$ ), la lunghezza di Monin-Obukhov ( $L_{MO}$ ), la velocità di attrito ( $u_*$ ), la temperatura di attrito ( $\theta^*$ ) e l'altezza del boundary layer ( $H_{Cla}$ ).

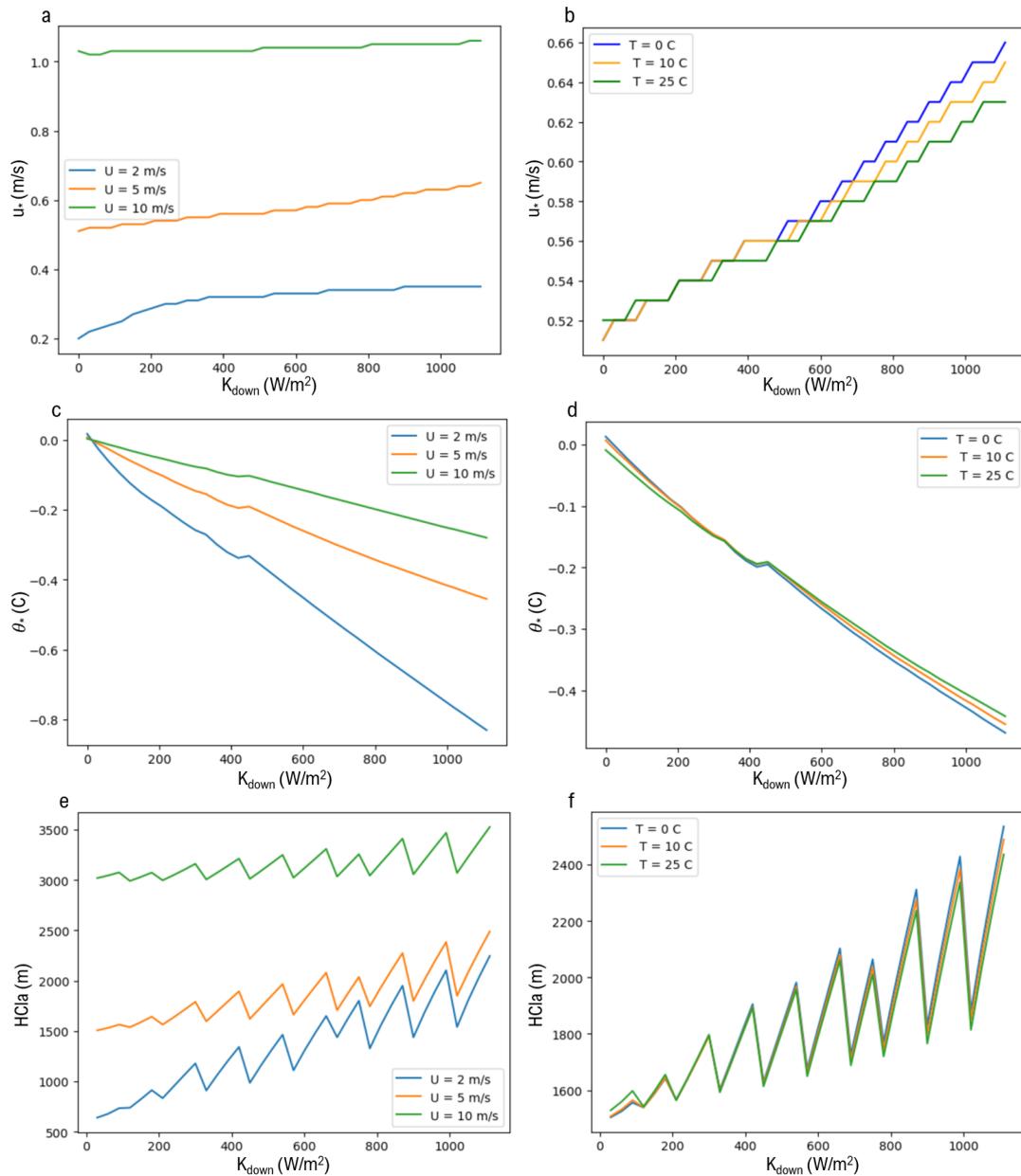
Per quanto riguarda il flusso di calore sensibile e la lunghezza di Monin-Obukhov queste verranno determinate anche da un punto di vista teorico sulla base delle formule introdotte col modello. Più nel dettaglio per determinare il valore di  $H_0$  si parte utilizzando l'equazione (1.6) in quanto l'unico dato a disposizione da cui partire risulta essere  $K_{down}$ , successivamente si procede utilizzando l'equazione (1.7) per il calcolo del flusso di calore sensibile. Per la  $L_{MO}$ , invece, si adopererà l'equazione (1.8) dove verrà utilizzato il valore di  $H_0$  appena determinato. Per quanto riguarda le quantità di  $Cld$  e di  $u_*$  che compaiono all'interno delle equazioni verranno utilizzate quelle ottenute da SIRANE nelle simulazioni.

#### **Variazione delle onde corte incidenti $K_{down}$**

Il primo dato meteo che verrà variato per studiare i suoi effetti sui parametri meteo in uscita è quello relativo alla parte di radiazione solare legata alle onde corte incidenti. Per l'incremento si partirà da un valore per  $K_{down}$  nullo fino ad arrivare ad un valore del parametro pari a  $1142 W/m^2$  che corrisponde al valore massimo trovato. L'incremento del parametro sarà di circa  $30 W/m^2h$ , così da riuscire a coprire tutto l'intervallo selezionato con un numero soddisfacente di punti.



**Figura 2.10:** In figura sono riportati i grafici di variazione delle quantità meteorologiche selezionate in funzione di  $K_{down}$  e a valori di temperatura e velocità del vento differenti. In particolare sono riportati: a) il flusso di calore sensibile in funzione di  $K_{down}$  variando la  $U$  con  $T = 0$  C sia fornito dal software che calcolato teoricamente, b) il flusso di calore sensibile in funzione di  $K_{down}$  variando la  $T$  con  $U = 2$  m/s sia fornito dal software che calcolato teoricamente, c) la lunghezza di Monin-Obukhov in funzione di  $K_{down}$  variando la  $U$  con  $T = 0$  C sia fornita dal software che calcolata teoricamente e d) la lunghezza di Monin-Obukhov in funzione di  $K_{down}$  variando la  $T$  con  $U = 2$  m/s sia fornita dal software che calcolata teoricamente.



**Figura 2.11:** In figura sono riportati i grafici di variazione delle quantità meteo selezionate in funzione di  $K_{down}$  e a valori di temperatura e velocità del vento differenti. In particolare sono riportati: a) la velocità d'attrito in funzione di  $K_{down}$  variando la  $U$  con  $T = 0$  C, b) la velocità d'attrito in funzione di  $K_{down}$  variando la  $T$  con  $U = 2$  m/s, c) la temperatura di attrito in funzione di  $K_{down}$  variando la  $U$  con  $T = 0$  C, d) la temperatura di attrito in funzione di  $K_{down}$  variando la  $T$  con  $U = 2$  m/s, e) l'altezza del boundary layer in funzione di  $K_{down}$  variando la  $U$  con  $T = 0$  C e f) l'altezza del boundary layer in funzione di  $K_{down}$  variando la  $T$  con  $U = 2$  m/s.

I risultati di tali variazioni sono visibili nelle figure 2.10 e 2.11 ed è possibile notare i seguenti andamenti rispetto all'effetto delle onde corte incidenti:

- $H_0$  cresce in maniera lineare indipendentemente da  $U$  e con pendenza variabile rispetto a  $T$ ;
- $L_{MO}$  cresce in maniera logaritmica partendo quando  $K_{down}$  è nullo con valori molto grandi in valore assoluto ma negativi. La  $U$  va a velocizzare la decrescita della lunghezza di Monin-Obukhov al decrescere di  $K_{down}$ , mentre la temperatura sembra traslare verso il basso la curva al suo crescere;
- $HCl_a$  ha un andamento oscillante ma con trend positivo. Questo parametro risulta indipendente dalla temperatura e crescente quando la velocità aumenta;
- $u_*$  varia come la funzione  $\sqrt{x}$  indipendentemente dalla temperatura. La velocità del vento sembra invece traslare la curva verso valori maggiori al crescere di essa;
- $\theta_*$  decresce linearmente con pendenze che variano molto se si impostano differenti velocità del vento, mentre variano quasi nulla se si varia la temperatura.

La maggior parte di questi andamenti rispecchiano un pò ciò che ci si aspetterebbe, infatti:

- un aumento di  $K_{down}$  provoca un incremento del flusso di calore sensibile, questo è dovuto al maggior riscaldamento della superficie terrestre la quale tenderà maggiormente a scambiare calore con l'atmosfera sovrastante e quindi ad incrementare  $H_0$ ;
- un aumento di  $K_{down}$  provoca un incremento della lunghezza di Monin-Obukhov ma una riduzione del suo valore assoluto in quanto l'energia turbolenta indotta da moti convettivi crescerà riducendo il valore assoluto di questa quantità che però risulta essere negativa per l'instabilità dell'atmosfera durante il giorno e quindi si otterrà una crescita;
- un aumento di  $K_{down}$  provoca un incremento dell'altezza del boundary layer in quanto ad esempio un incremento della radiazione solare provoca un aumento della temperatura dell'atmosfera che riduce la viscosità dell'aria aumentando il numero di Reynolds e quindi più facilmente il flusso può passare da laminare a turbolento incrementando così lo spessore dello strato limite;
- un aumento di  $K_{down}$  provoca un incremento della velocità d'attrito in quanto si può ipotizzare aumenti la velocità del fluido nei pressi della superficie terrestre quando questo si riscalda e di conseguenza aumenti  $u_*$ ;

- un aumento di  $K_{down}$  provoca un decremento della temperatura di attrito. Questo sembra un pò controintuitivo in quanto un riscaldamento della superficie terrestre si immagina provochi un aumento della temperatura di attrito, però si potrebbe spiegare con un ipotetico riscaldamento anche dell'aria sovrastante che induce una non modifica della differenza di temperatura tra superficie terrestre e atmosfera.

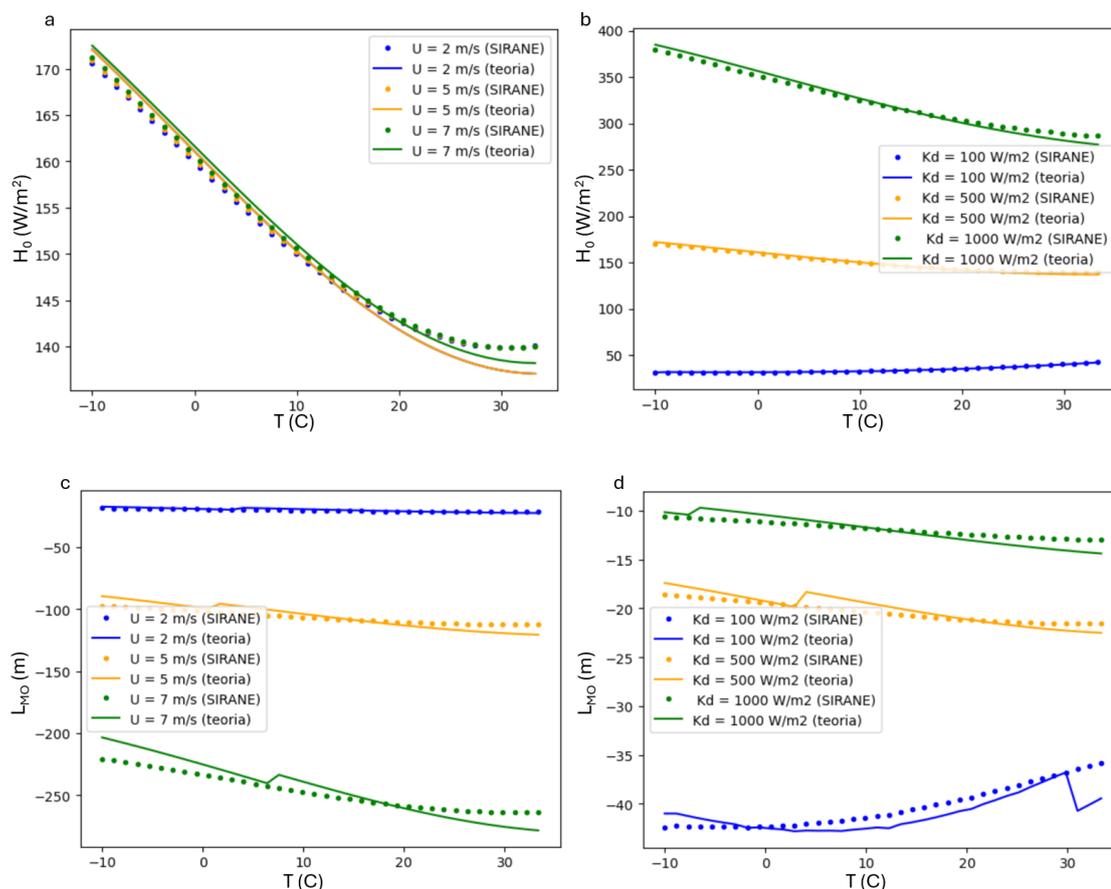
### Variazione della temperatura $T$

Si prosegue considerando la variazione della temperatura e i suoi effetti sui parametri meteo in uscita. Per la variazione si partirà da un valore per  $T$  pari a  $-10\text{ C}$  fino ad arrivare ad un valore del parametro pari a  $34.5\text{ C}$  che corrisponde al valore massimo presente all'interno della serie temporale del 2014 analizzata. L'incremento del parametro sarà di circa  $1.2\text{ C/h}$ , così da riuscire a coprire tutto l'intervallo selezionato con un numero soddisfacente di punti.

I risultati ottenuti sono riportati nelle figure 2.12 e 2.13 ed è possibile osservare i seguenti comportamenti rispetto alla variazione della temperatura:

- $H_0$  decresce come la funzione  $\frac{1}{x^n}$  indipendentemente da  $U$  e con traslazioni della curva verso valori maggiori con il crescere di  $K_{down}$ . Vi è inoltre un valore di  $K_{down}$  per il quale la curva cresce, questo fa presumere che esiste un valore di  $K_{down}$  sotto la quale il flusso di calore sensibile è crescente al crescere della temperatura, osservando la figura 2.10-b questo valore sembra all'incirca pari a  $200\text{ W/m}^2$ ;
- $L_{MO}$  decresce come la funzione  $\frac{1}{x^n}$  ma in maniera meno marcata al flusso di calore sensibile. La velocità tende a traslare la curva verso valori sempre più negativi, mentre il  $K_{down}$  le trasla verso valori sempre meno negativi. Anche qui sembra esistere un valore di  $K_{down}$  sotto il quale il trend della funzione risulta crescente;
- $HCl_a$  risulta oscillante, ma con trend costante. La velocità del vento e la  $K_{down}$  tendono a traslare la curva verso valori sempre più positivi;
- $u_*$  risulta costante rispetto alla  $T$ . Sia la velocità del vento che il  $K_{down}$  tendono a spostare la curva verso valori maggiori;
- $\theta_*$  presenta un andamento molto poco variabile, nella maggior parte dei casi è prima crescente e poi decrescente, rimanendo però con all'incirca lo stesso valore. La velocità del vento trasla la curva verso valori sempre meno negativi, mentre il  $K_{down}$  verso valori sempre più negativi.

Una volta notati i vari andamenti si cerca di dare una spiegazione fisica a questi:



**Figura 2.12:** In figura sono riportati i grafici di variazione delle quantità meteo selezionate in funzione della temperatura e a valori di  $K_{down}$  e velocità del vento differenti. In particolare sono riportati: a) il flusso di calore sensibile in funzione di  $T$  variando la  $U$  con  $K_{down} = 500 \text{ W/m}^2$  sia fornito dal software che calcolato teoricamente, b) il flusso di calore sensibile in funzione di  $T$  variando la  $K_{down}$  con  $U = 2 \text{ m/s}$  sia fornito dal software che calcolato teoricamente, c) la lunghezza di Monin-Obukhov in funzione di  $T$  variando la  $U$  con  $K_{down} = 500 \text{ W/m}^2$  sia fornita dal software che calcolata teoricamente e d) la lunghezza di Monin-Obukhov in funzione di  $T$  variando la  $K_{down}$  con  $U = 2 \text{ m/s}$  sia fornita dal software che calcolata teoricamente.

- un aumento della temperatura provoca una diminuzione del flusso di calore sensibile, questo si può spiegare considerando che una maggiore temperatura dell'atmosfera sovrastante provocherà una minore propensione allo scambio di calore dalla superficie terrestre all'aria sovrastante;

- un aumento della temperatura provoca una decrescita della lunghezza di Monin-Obukhov quando le onde corte incidenti sono abbastanza alte, questo perchè nel caso in esame lo scambio di calore tra superficie terrestre e atmosfera si riduce all'aumentare della temperatura essendo il terreno riscaldato, quindi viene meno la turbolenza di tipo convettivo che provoca un aumento del valore assoluto della funzione che però risulta negativa e quindi decresce. Al contrario se la  $K_{down}$  risulta abbastanza bassa si avrà una superficie terrestre poco riscaldata e un'atmosfera che all'aumentare della temperatura indurrà un maggior flusso di calore verso il terreno con conseguente incremento della turbolenza di tipo convettivo e una diminuzione del valore assoluto della funzione che però essendo negativa cresce;
- un aumento della temperatura non provoca variazioni nell'altezza del boundary layer in quanto quelle oscillazioni sono dovute più alla variazione delle ore durante l'arco della giornata essendo che la quantità è calcolata tramite l'equazione (1.3). Il trend costante risulta non coerente con l'aumento della temperatura che provocherebbe un maggior mescolamento delle particelle d'aria con conseguente aumento dello strato limite atmosferico. Per quanto riguarda la dipendenza dalla velocità del vento e dall'effetto delle onde corte incidenti si vede che la curva viene traslata verso quantità maggiori al crescere delle due quantità. Questo è coerente in quanto la crescita della  $U$  induce un maggiore moto delle particelle d'aria e quindi un maggior mescolamento dell'atmosfera e quindi la crescita del boundary layer, mentre l'incremento della  $K_{down}$  induce un incremento dei moti convettivi che provoca un'innalzamento dello strato limite;
- un incremento della temperatura non provoca una variazione della velocità di attrito, questo si può spiegare se si considera che il fattore determinante nel calcolo della velocità di attrito è la turbolenza di tipo meccanico legata al vento che non viene variata sostanzialmente dalla variazione di temperatura se si considerano i grafici ottenuti. Se si considera invece la velocità del vento una maggiore  $U$  induce una maggiore turbolenza meccanica e quindi si ha una traslazione della curva verso valori maggiori, mentre se si considera l'effetto delle onde corte incidenti queste tendono ad aumentare la  $u_*$  in quanto il riscaldamento della superficie terrestre instaura un'instabilità dell'atmosfera generando dei moti convettivi che aumentano la turbolenza e quindi la velocità di attrito;
- un incremento della temperatura non sembra avere grandi effetti sulla temperatura di attrito, il motivo potrebbe essere correlato ad una non variazione della differenza di temperatura tra superficie terrestre e atmosfera sovrastante dovuta all'incremento della temperatura che non fa variare questo parametro.

Al contrario una maggiore velocità del vento sembra rendere meno negativo tale parametro mentre un maggior effetto delle onde corte incidenti sembra accentuare il valore assoluto della funzione.

### Variazione della velocità del vento $U$

Per concludere si proseguirà studiando l'effetto della variazione della temperatura sui parametri meteorologici scelti. Il valore minimo studiato sarà quello nullo dove l'aria risulta in quiete, mentre il valore massimo sarà pari a  $11.2 \text{ m/s}$  che corrisponde al valore massimo trovato nelle serie etemporali del 2014 a Torino. Per l'incremento questo si è scelto essere pari a  $0.3 \text{ m/sh}$  così da ottenere un numero di punti per interpolare le curve in maniera soddisfacente.

I risultati ottenuti sono riportati nelle figure 2.14 e 2.15 ed è possibile osservare i seguenti comportamenti rispetto alla variazione della velocità del vento:

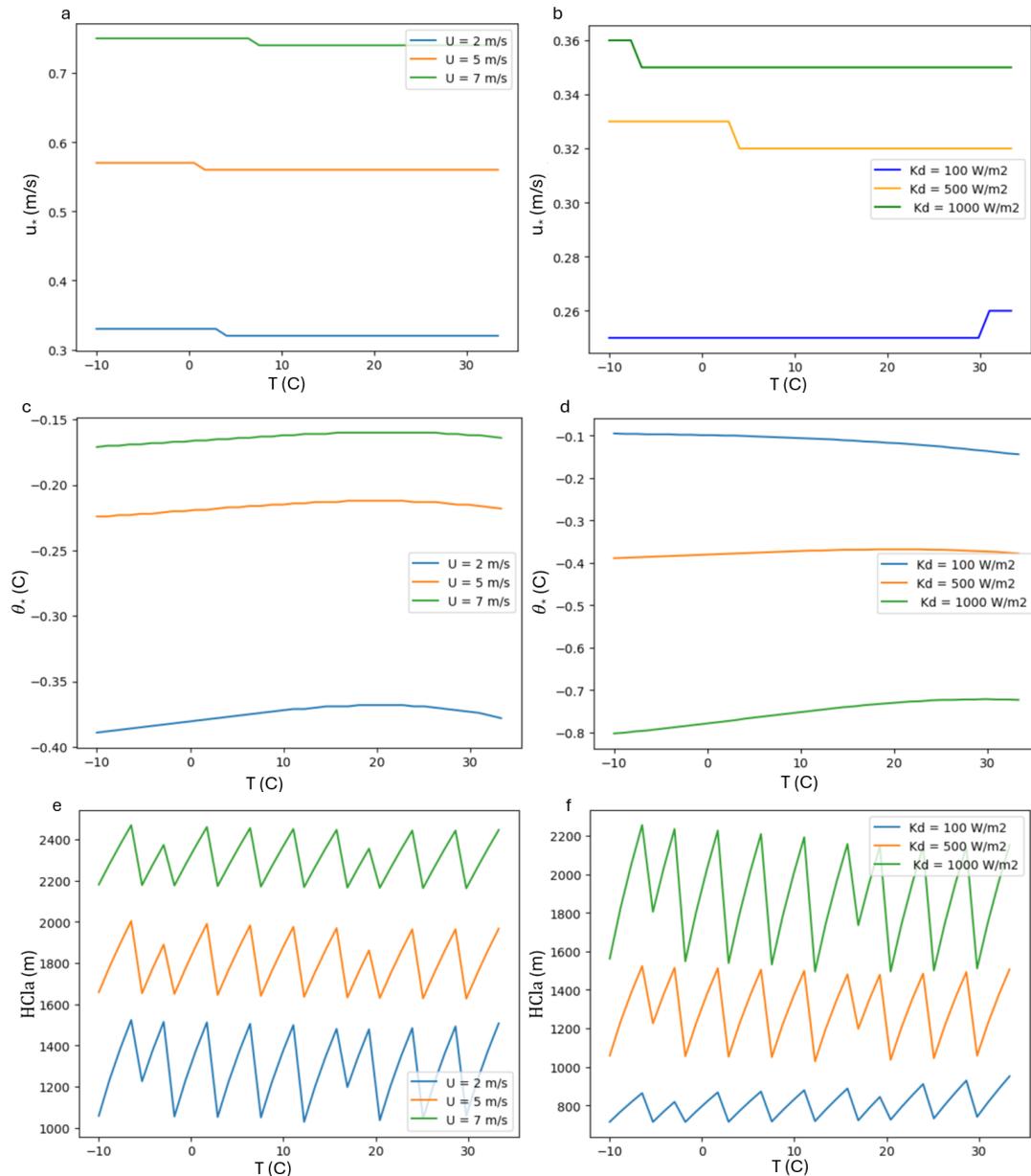
- $H_0$  resta costante al variare di  $U$  e con traslazioni della curva verso valori maggiori con il crescere di  $K_{down}$  e verso valori minori con il crescere di  $T$ ;
- $L_{MO}$  decresce esponenzialmente al crescere della  $U$ . La temperatura non fa variare molto la curva ma il suo crescere fa tendere la curva più velocemente verso valori più negativi, mentre il crescere di  $K_{down}$  tende a far decrescere la curva molto meno rapidamente;
- $HCl_a$  cresce al crescere di  $U$ , tranne per velocità vicine a quella nulla dove risulta oscillante. l'altezza del boundary layer risulta indipendente dalla temperatura mentre la curva viene traslata verso l'alto e viene fatta oscillare maggiormente dall'incremento di  $K_{down}$ ;
- $u_*$  risulta costante fino a velocità pari a  $1 \text{ m/s}$  successivamente si ha una crescita lineare. La velocità di attrito risulta inoltre indipendente dalla temperatura e poco dipendente per velocità medio-basse dal  $K_{down}$ ;
- $\theta_*$  risulta essere costante per valori di  $U$  inferiori ad  $1 \text{ m/s}$ , successivamente si avrà una crescita del tipo  $\sqrt{x}$ . La temperatura di attrito risulta indipendente dalla temperatura, mentre le curve vengono traslate verso il basso e accentuate dal crescere di  $K_{down}$ .

Dopo aver descritto i vari andamenti si cerca di dare una spiegazione fisica a questi:

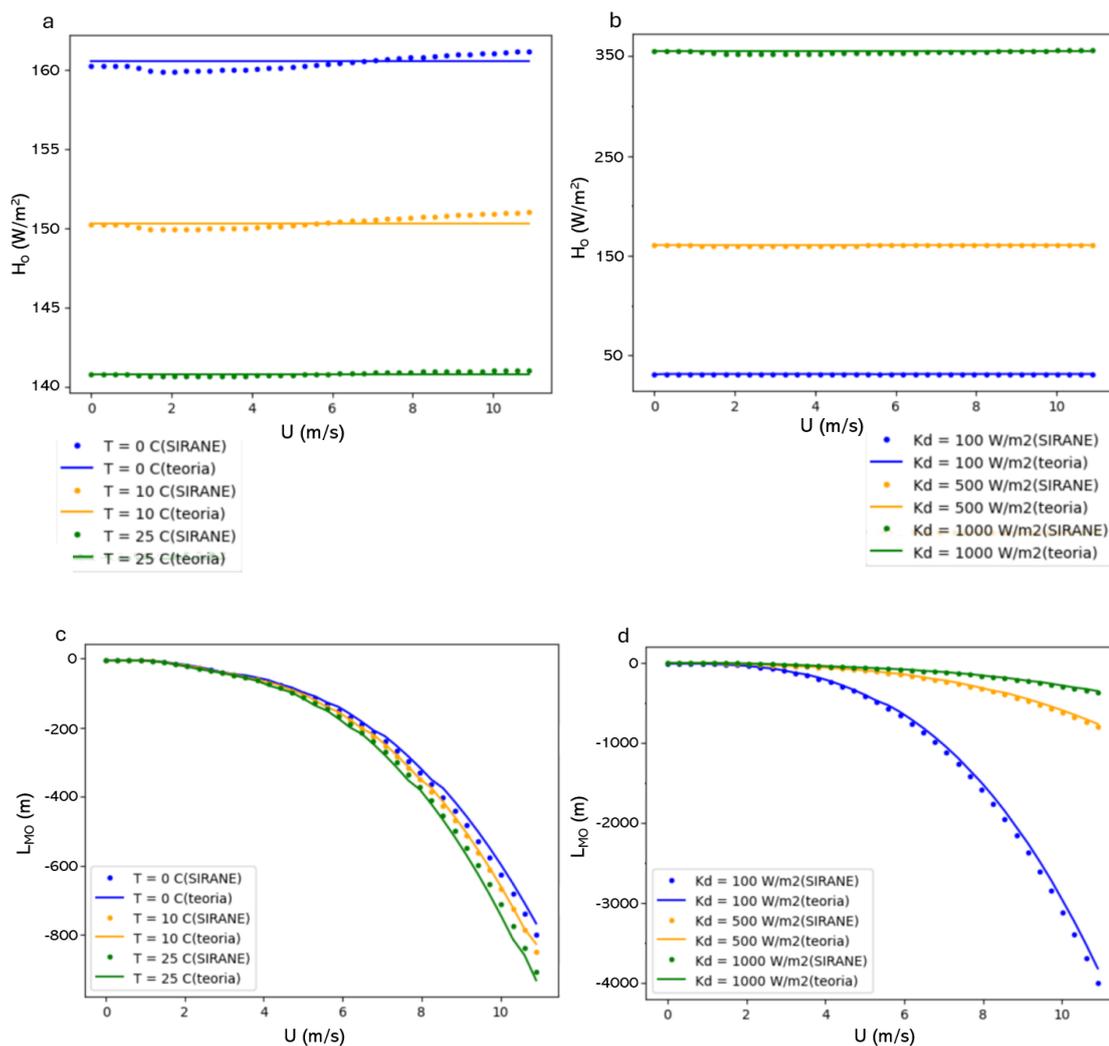
- un aumento della velocità del vento non provoca una variazione nel flusso di calore sensibile, ciò ha senso in quanto questa quantità non intacca il fenomeno di trasporto di calore tra superficie terrestre e atmosfera sovrastante. Al contrario una maggiore temperatura riduce il passaggio di calore da superficie terrestre verso l'atmosfera e quindi la curva viene traslata verso il basso. La

$K_{down}$ , invece svolge un ruolo opposto alla  $T$  in quanto riscalda il terreno favorendo il passaggio di calore dal terreno all'aria sovrastante facendo traslare la curva verso l'alto;

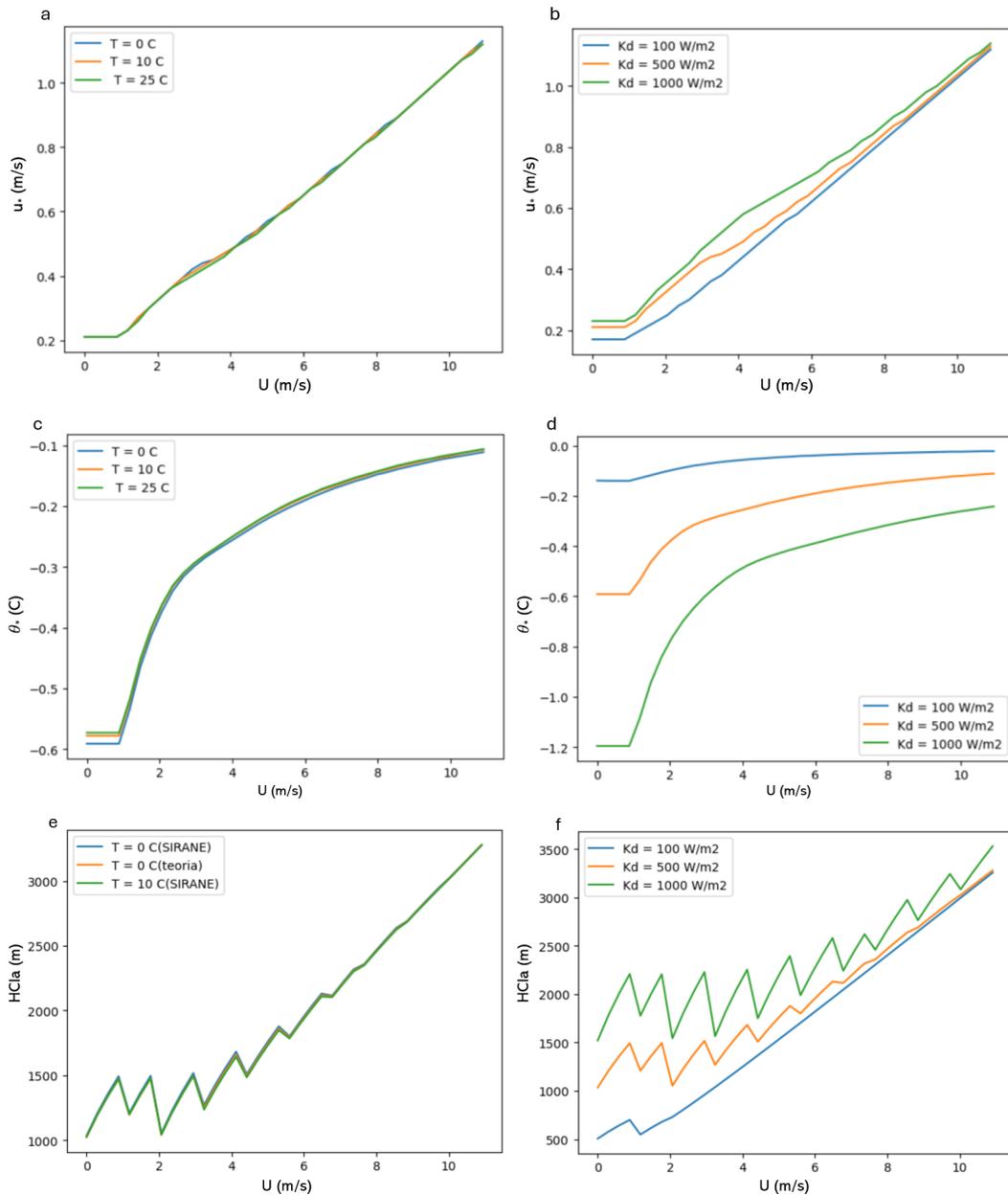
- un aumento della velocità del vento provoca una decrescita della lunghezza di Monin-Obukhov, ma una crescita del suo valore assoluto. Questo si spiega se si considera che la crescita del valore assoluto della funzione è indice di un aumento della turbolenza di tipo meccanico indotto dal vento rispetto a quella prodotta dai moti convettivi. La negatività della funzione invece è dovuta all'instabilità dell'atmosfera durante il giorno. L'aumento della temperatura induce una leggera decrescita della funzione perchè tende a ridurre il moto convettivo dovuto al passaggio di calore da superficie terrestre ad atmosfera e perciò ad aumentare il valore assoluto della funzione che è negativa. La  $K_{down}$ , invece fa crescere i moti convettivi e quindi aumenta la turbolenza di questo tipo andando a ridurre il valore assoluto della funzione che essendo negativa cresce;
- un incremento della velocità del vento provoca un aumento dell'altezza del boundary layer, questo è facilmente intuibile se si pensa che al crescere della velocità si avrà più facilmente il passaggio a flusso turbolento che fa aumentare l'altezza dello strato limite. L' $H_{Cla}$  risulta inoltre indipendente dalla temperatura e crescente al crescere di  $K_{down}$  soprattutto nel caso in cui la  $U$  risulta medio-bassa il che si può spiegare da un aumento della turbolenza convettiva che provoca una crescita dello strato limite;
- la crescita della velocità induce l'incremento della velocità di attrito in quanto la crescita della  $U$  induce un maggiore attrito a livello della superficie terrestre. La  $u_*$  risulta indipendente dalla temperatura, come detto in precedenza questo è dovuto alla dipendenza della  $u_*$  dalla turbolenza meccanica non modificata dalla temperatura. La  $K_{down}$  modifica di poco la velocità di attrito aumentandola per valori medi di velocità del vento. La spiegazione a questo fenomeno potrebbe trovarsi nella propensione di  $K_{down}$  nel favorire il passaggio di calore tra superficie e atmosfera aumentando l'attrito vicino la superficie terrestre. Nel primo tratto vi è una funzione costante in quanto il modello prevede una condizione di quiete fino a circa  $1 \text{ m/s}$ ;
- all'aumentare della velocità la temperatura di attrito cresce, il motivo di tale trend potrebbe ritrovarsi nell'aumento del mescolamento dell'atmosfera dovuto alla crescita della velocità delle sue particelle che vanno a ridurre l'efficienza con cui avviene lo scambio di calore tra la superficie terrestre e l'atmosfera.



**Figura 2.13:** In figura sono riportati i grafici di variazione delle quantità meteo selezionate in funzione della temperatura e a valori di  $K_{down}$  e velocità del vento differenti. In particolare sono riportati: a) la velocità d'attrito in funzione di  $T$  variando la  $U$  con  $K_{down} = 500 \text{ W/m}^2$ , b) la velocità d'attrito in funzione di  $T$  variando la  $K_{down}$  con  $U = 2 \text{ m/s}$ , c) la temperatura di attrito in funzione di  $T$  variando la  $U$  con  $K_{down} = 500 \text{ W/m}^2$ , d) la temperatura di attrito in funzione di  $T$  variando la  $K_{down}$  con  $U = 2 \text{ m/s}$ , e) l'altezza del boundary layer in funzione di  $T$  variando la  $U$  con  $K_{down} = 500 \text{ W/m}^2$  e f) l'altezza del boundary layer in funzione di  $T$  variando la  $K_{down}$  con  $U = 2 \text{ m/s}$ .



**Figura 2.14:** In figura sono riportati i grafici di variazione delle quantità meteo selezionate in funzione della velocità del vento e a valori di  $K_{down}$  e temperatura differenti. In particolare sono riportati: a) il flusso di calore sensibile in funzione di  $U$  variando la  $T$  con  $K_{down} = 500 \text{ W/m}^2$  sia fornito dal software che calcolato teoricamente, b) il flusso di calore sensibile in funzione di  $U$  variando la  $K_{down}$  con  $T = 0 \text{ C}$  sia fornito dal software che calcolato teoricamente, c) la lunghezza di Monin-Obukhov in funzione di  $U$  variando la  $T$  con  $K_{down} = 500 \text{ W/m}^2$  sia fornita dal software che calcolata teoricamente e d) la lunghezza di Monin-Obukhov in funzione di  $U$  variando la  $K_{down}$  con  $T = 0 \text{ C}$  sia fornita dal software che calcolata teoricamente.



**Figura 2.15:** In figura sono riportati i grafici di variazione delle quantità meteo selezionate in funzione della velocità del vento e a valori di  $K_{down}$  e temperatura differenti. In particolare sono riportati: a) la velocità d'attrito in funzione di  $U$  variando la  $T$  con  $K_{down} = 500$  W/m<sup>2</sup>, b) la velocità d'attrito in funzione di  $U$  variando la  $K_{down}$  con  $T = 0$  C, c) la temperatura di attrito in funzione di  $U$  variando la  $T$  con  $K_{down} = 500$  W/m<sup>2</sup>, d) la temperatura di attrito in funzione di  $U$  variando la  $K_{down}$  con  $T = 0$  C, e) l'altezza del boundary layer in funzione di  $U$  variando la  $T$  con  $K_{down} = 500$  W/m<sup>2</sup> e f) l'altezza del boundary layer in funzione di  $U$  variando la  $K_{down}$  con  $T = 0$  C. 47

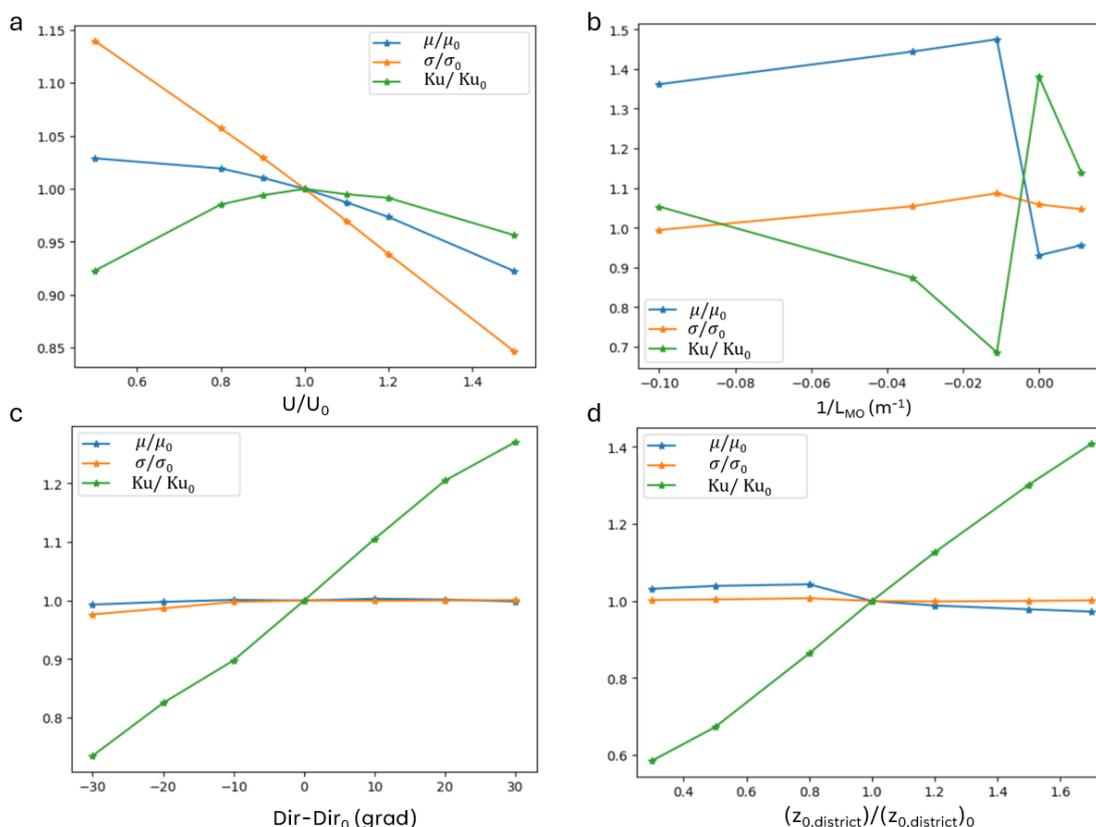
## 2.2.5 Analisi di Sensitività Differenziale

Una volta individuate le dipendenze che legano i parametri meteorologici, il passo successivo dell'analisi di sensitività consiste nel valutare l'impatto delle variazioni dei dati in ingresso sulle concentrazioni di inquinanti ottenute dal modello. Per la valutazione della variazione nei risultati si considera la concentrazione degli ossidi di azoto la quale viene determinata per ogni strada all'interno del quartiere e mediata nel tempo per tutta la durata della simulazione. Si ottengono per ogni simulazione, quindi, un numero di concentrazioni  $\langle C_{NO_x}^{street} \rangle$  pari al numero di strade del quartiere. All'interno della presente tesi si indagano le variazioni di alcuni momenti statistici della distribuzione e della sua deviazione standard. Si investiga come varia in percentuale la media, la deviazione standard e il coefficiente di curtosi rispetto al caso standard per le distribuzioni al modificarsi della velocità del vento, della direzione del vento, della lunghezza di Monin-Obukhov e della rugosità aerodinamica di quartiere. I grafici con i risultati di tale studio sono riportati in figura 2.16. Si fa notare che con standard si indica il caso in cui i dati inseriti in input siano quelli reali.

La velocità del vento all'interno del presente studio viene variata in percentuale tramite incrementi e decrementi del 50%, del 20% e del 10%. I risultati sono riportati in figura 2.16-a dove è possibile osservare che:

- la media delle concentrazioni per le strade aumenta al diminuire della velocità del vento, mentre diminuisce al suo aumentare. Questo risulta coerente se si immagina il vento aiuti a disperdere l'inquinante. Le variazioni risultano maggiori in valore assoluto nel caso in cui ho un aumento dell'intensità del vento rispetto al caso in cui ho una diminuzione di questa, questa asimmetria è da ricercare nella variazione del fenomeno di turbolenza che avviene se l'intensità del vento cambia;
- la deviazione standard risulta decrescente all'aumentare della velocità del vento, come se l'innalzamento del vento renda i valori delle concentrazioni sempre meno variabili tra di loro;
- il coefficiente di curtosi presenta un andamento particolare questo infatti sembra presentare un picco nel caso standard, il che implica che questo è il caso in cui la distribuzione presenta le code più alte e quindi un maggior numero di outliers, mentre il caso in cui la  $U$  viene ridotta del 50% risulta essere quello con il numero inferiore di outliers.

Altro parametro particolarmente importante per lo studio è la lunghezza di Monin-Obukhov. Al fine di eseguire le simulazioni utili allo studio si è imposto il valore 2 per il parametro "Donnees meteorologiques fournies [0/1/2]" all'interno del file di input (tabella 1.1), tramite il quale può essere fornita l'inverso della lunghezza di



**Figura 2.16:** In figura sono riportati i grafici relativi alla variazione relativa della media (in blu), della deviazione standard (in arancione) e del coefficiente di curtosi (in verde) della  $pdf(\langle C_{NO_x}^{street} \rangle)$  rispetto a) alla variazione relativa della velocità del vento, b) all'inverso della lunghezza di Monin-Obukhov, c) alla differenza della direzione del vento rispetto al caso standard e d) alla variazione relativa della rugosità aerodinamica di quartiere.

Monin-Obukhov. Seguendo il paper [3] si investigano 5 valori per questo parametro meteorologico, di cui 3 di instabilità atmosferica ( $L_{MO}$  pari a  $-10 m$ ,  $-30 m$  e  $-90 m$ ), uno di neutralità dell'atmosfera ( $L_{MO}$  pari ad un valore non finito) e l'ultimo di stabilità ( $L_{MO} = 90 m$ ). I risultati sono riportati in figura 2.16-b, dove si nota che la differenza sostanziale tra la stabilità e l'instabilità dell'atmosfera. Osservando la curva delle medie di concentrazioni infatti si nota un drastico calo tra il valore che si registra per  $1/L_{MO}$  pari a  $-0.011 m^{-1}$  (che corrisponde al valore di  $L_{MO} = -90 m$ ) e quello che si ottiene quando  $1/L_{MO}$  è pari a  $0 m^{-1}$  (che corrisponde a  $L_{MO}$  infinita e atmosfera neutra). Questo va contro il principio per cui l'instabilità dell'atmosfera tende a far calare le concentrazioni degli inquinanti in quanto crea un maggior movimento di aria. Inoltre si nota che i valori nel caso

in cui l'atmosfera risulta instabile sono quelli che maggiormente si discostano dal caso standard, questo perché le simulazioni sono state eseguite durante il mese di Febbraio dove le ore in cui l'atmosfera risulta stabile sono maggiori per via delle poche ore di luce. La deviazione standard risulta contenuta, segno che la variabilità delle concentrazioni non viene influenzata molto da questo parametro. Altro dato che invece fa notare il passaggio da atmosfera instabile a stabile è il coefficiente di curtosi. In figura 2.16-b si nota un drastico aumento nel passaggio tra atmosfera instabile a neutra. Il coefficiente infatti cresce considerevolmente e con lui il numero di outliers presenti nella distribuzione.

Si procede con l'analisi variando la direzione del vento. Questa è eseguita sommando o sottraendo 10, 20 o 30 *grad* alle direzioni de vento nel caso standard ad ogni ora. I risultati di tali simulazioni sono riportati in figura 2.16-c, dove si nota che:

- la media delle concentrazioni per le strade non varia molto, tende a decrescere leggermente ma si mantiene vicino al valore del caso standard;
- la deviazione standard risulta anch'essa molto simile a quella che si ottiene nel caso standard, indicando che la distribuzione mantiene circa la stessa variabilità;
- il coefficiente di curtosi presenta un andamento crescente e si mantiene sempre al di sopra del valore nullo (che indica la distribuzione normale). Questo significa che all'aumentare dell'angolo di direzione del vento il numero di outliers tende a crescere.

Infine per concludere l'analisi di sensitività differenziale si esegue la variazione della rugosità aerodinamica del quartiere relativa. Questa influisce ad esempio sul mescolamento dell'aria che provoca una variazione delle concentrazioni di  $NO_X$ . I risultati delle simulazioni sono riportati in figura 2.16-d, nella quale si può osservare che:

- la media delle concentrazioni risulta poco sensibile rispetto alle variazioni della rugosità aerodinamica. La media decresce se la rugosità aerodinamica del quartiere è maggiore rispetto al caso di partenza, mentre cresce se si considerano valori di rugosità inferiori a quello standard;
- la deviazione standard presenta un andamento costante al variare della  $z_{0,district}$  il che implica che la variabilità delle concentrazioni è costante al variare del parametro;
- il coefficiente di curtosi assume, invece, un andamento crescente rispetto al parametro, il che mostra un aumento del numero di outliers al crescere della

$z_{0,district}$ , probabilmente a causa dell'aumento del mescolamento dell'aria e quindi alla maggiore turbolenza.

A completamento dell'analisi risulta utile osservare gli ordini di grandezza delle variazioni ottenute. Queste sono riportate in tabella 2.5, dove è possibile osservare che:

- le variazioni maggiori per la media si registrano per modifiche dell'inverso della lunghezza di Monin-Obukhov e della velocità del vento relativa, indicando questi parametri come quelli più incidenti sulle concentrazioni di  $NO_X$  tra quelli considerati;
- il discostamento della deviazione standard risulta essere di maggior entità, anche qui nei casi di modifiche della velocità del vento relativa e dell'inverso della velocità del vento;
- le variazioni del coefficiente di curtosi relativo sono di entità molto maggiore rispetto alle modifiche che si registrano per le altre quantità.

**Tabella 2.5:** tabella nella quale sono riportati i valori delle variazioni in percentuale nei momenti delle distribuzioni considerate dovute a modifiche della velocità del vento, della direzione del vento, della lunghezza di Monin-Obukhov e della rugosità aerodinamica del quartiere.

PARAMETRO	U + 50%	U - 50%	Dir + 30 grad	Dir - 30 grad	$L_{MO} = -90$ m	$L_{MO} = +90$ m	$z_{0,district} = 0.45$ m	$z_{0,district} = 1.35$ m
Media delle concentrazioni	-7.76%	+2.88%	-0.17%	-0.69%	+47.47%	-4.42%	+3.91%	-2.16%
Deviazione standard delle concentrazioni	-15.33%	+13.95%	+0.07%	-2.37%	+8.67%	+4.67%	+0.38%	+0.02%
Coefficiente di curtosi delle concentrazioni	-7.72%	-4.37%	+27.09%	-26.52%	-31.40%	+13.95%	-32.75%	+30.18%

## Capitolo 3

# Serie Temporali

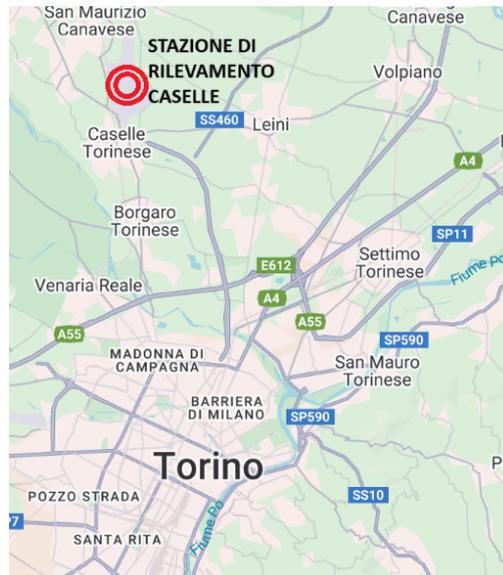
A seguito dell'analisi di sensitività, in cui si è cercata di dare una risposta alla domanda relativa a come i parametri meteo incidessero sui risultati, trova una naturale collocazione la domanda relativa a come i parametri meteo si sono evoluti nel corso degli anni. Per poter trovare una risposta si sono collezionati dati relativi ai 5 parametri meteo utilizzabili per l'input (velocità del vento ( $U$ ), direzione del vento ( $Dir$ ), temperatura ( $T$ ), onde corte incidenti ( $K_{down}$ ) e precipitazioni ( $Prec$ )) lungo un periodo di circa 20 anni riferiti alla città di Torino. Si è proseguito poi eseguendo le simulazioni lungo tutto questo periodo così che si possano determinare i parametri meteo in output. Si procederà poi ad eseguire delle analisi delle serie temporali per: l'altezza del boundary layer ( $H_{Cla}$ ), la velocità del vento ( $U$ ), la temperatura ( $T$ ), l'effetto delle onde corte incidenti ( $K_{down}$ ), la direzione del vento ( $Dir$ ), il flusso di calore sensibile ( $H_0$ ) e la lunghezza di Monin-Obukhov ( $L_{MO}$ ).

### 3.1 Ottenimento dei Dati

Il primo passo per eseguire uno studio di serie temporali è quello di raccogliere i dati necessari sia per lo studio in se, sia per le simulazioni. Il sito dal quale si sono ottenuti i dati è il sito dell'ARPA Piemonte [4], dove si sono selezionati i dati che sono stati misurati a Caselle (figura 3.1) nel periodo che va dal 19 Novembre 2003 al 10 Aprile 2024. I dati ottenuti sono relativi a velocità del vento ( $U$ ), direzione del vento ( $Dir$ ), temperatura ( $T$ ), onde corte incidenti ( $K_{down}$ ) e precipitazioni ( $Prec$ ). Un esempio di file contenente queste informazioni è riportato in figura 3.2, nella quale è possibile osservare che i valori del parametro meteo sono contenuti con cadenza oraria, esattamente come li richiede SIRANE. Per ogni valore è presente un flag di validazione che indica se il dato sulla riga è stato registrato senza problemi o non.

In particolare i flag sono di 4 tipologie differenti:

- 0 sta ad indicare che il dato è stato registrato in maniera corretta;
- \* indica che il dato è stato registrato in maniera incerta (non vi è stato un campionamento globale o erano presenti dei warning);
- Z indica che il dato è stato calcolato correttamente;
- Y indica che il dato è stato calcolato con la presenza di warning o alarm.



**Figura 3.1:** In figura è mostrata la posizione della stazione di rilevamento di Caselle, circondata da doppia circonferenza rossa.

Una volta collezionati i dati risulta utile studiare meglio come questi sono fatti ma soprattutto se al loro interno sono presenti valori per ogni step orario o meno. A questo scopo si è deciso di misurare la grandezza di queste mancanze di valori con il numero di ore per cui durasse, quindi per visualizzare tale dato si è prodotto per ogni parametro meteo un istogramma dove viene riportato il numero di occorrenze per ogni ampiezza di ore. Gli istogrammi sono visibili nelle figure 3.3 e 3.4 dove è possibile notare che la maggior parte delle ampiezze sono di durata breve. Si è deciso allora di sostituire le parti mancanti con durata inferiore o uguale a 5 h con un'interpolazione lineare così da non commettere troppo errore. Le ampiezze di durata superiore sono state invece trascurate.

Una volta ottenuti i vari dati al fine di ottenere le serie temporali relative al flusso di calore sensibile e alla lunghezza di Monin-Obukhov si procede eseguendo

```

Codice richiesta,22697
Codice Stazione, S2896
Denominazione, CASELLE
Localita', CASELLETORINESE
UTM X, 394093 m
UTM Y, 5004633 m
Quota, 285 m s.l.m.
Parametro, Velocita' vento (vettoriale) (m/s)
Periodo pubblicazione, 2003-11-18 / oggi
Periodo richiesto, 2005-01-01 / 2006-01-01
Dati orari
data,ora (UTC),valore,flag| validazione
01/01/2005,00:00, 1.8,0
01/01/2005,01:00, 1.0,0
01/01/2005,02:00, 1.5,0
01/01/2005,03:00, 0.0,0
01/01/2005,04:00, 1.1,0
01/01/2005,05:00, 1.0,0
01/01/2005,06:00, 1.4,0
01/01/2005,07:00, 1.8,0
01/01/2005,08:00, 0.6,0
01/01/2005,09:00, 0.7,0
01/01/2005,10:00, 1.6,0
01/01/2005,11:00, 1.5,0
01/01/2005,12:00, 1.6,0

```

**Figura 3.2:** Esempio di come è fatto un file ottenuto dal sito di ARPA Piemonte. All'interno del file è riportato l'identificativo e il nome della stazione dove sono stati ottenuti i dati, la geolocalizzazione, la quota al livello del mare, il periodo per cui vengono forniti i dati e il parametro meteo in questione. Successivamente sono riportati i dati veri e propri. Per ogni riga è presente la data, l'ora, il valore della quantità richiesta e un flag di validazione che serve ad indicare se il dato è registrato o calcolato senza problemi o con annotazioni.

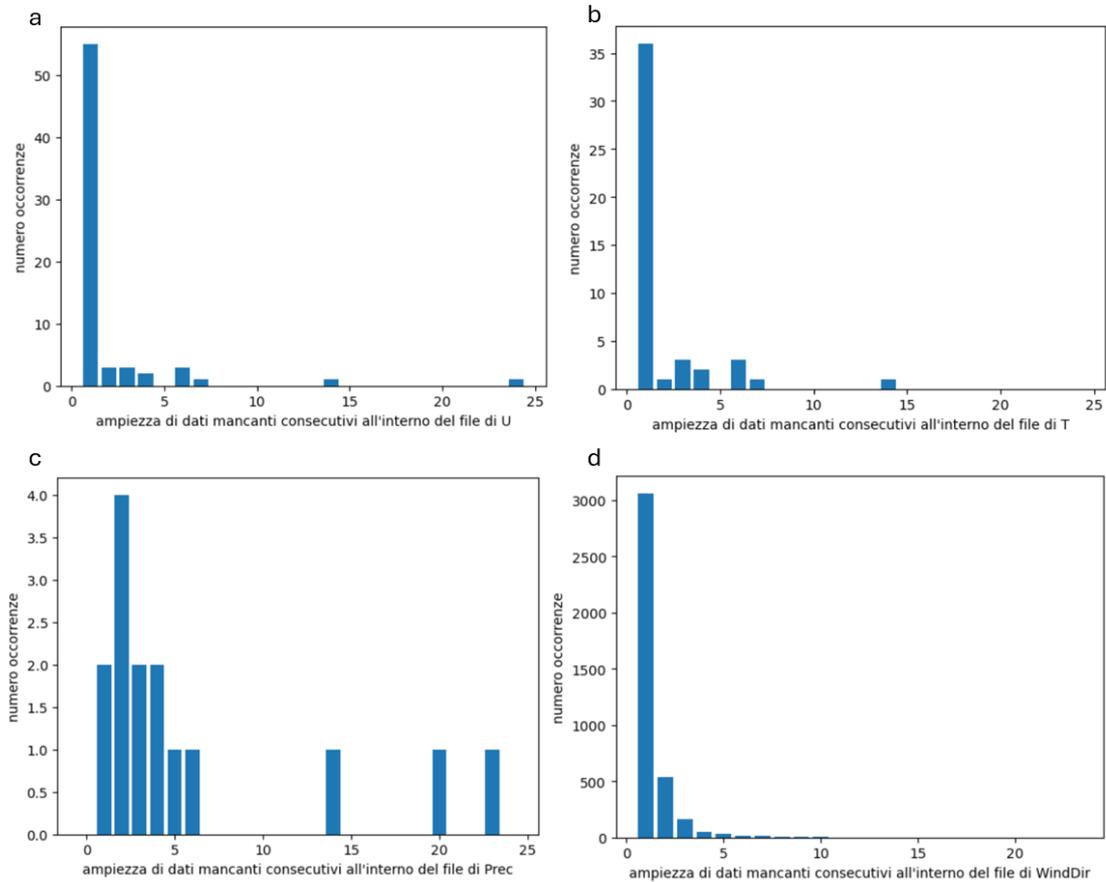
le simulazioni su questo periodo di 20 anni, trascurando le ore in cui per almeno un parametro meteo fosse presente una mancanza di durata superiore alle 5 *h*. Per queste, al fine di ridurre il tempo computazionale delle simulazioni, si è deciso di non eseguire i calcoli relativi alle concentrazioni dei vari inquinanti. Così facendo il tempo computazionale si è ridotto da poco meno di un mese a circa una settimana e mezza. Per fare ciò si è operato attraverso il file di input e i file "DonDefault\_EN.dat" e "DonDefault\_FR.dat" nei quali è possibile annullare i calcoli per le concentrazioni dei vari inquinanti.

## 3.2 Analisi sui parametri

### 3.2.1 Determinazione di eventuali trend

In seguito alla raccolta dati si sono selezionati i seguenti parametri meteo per l'analisi: altezza del boundary layer ( $H_{Cla}$ ), velocità del vento ( $U$ ), temperatura ( $T$ ), effetto delle onde corte incidenti ( $K_{down}$ ), direzione del vento ( $Dir$ ), flusso di calore sensibile ( $H_0$ ) e lunghezza di Monin-Obukhov ( $L_{MO}$ ).

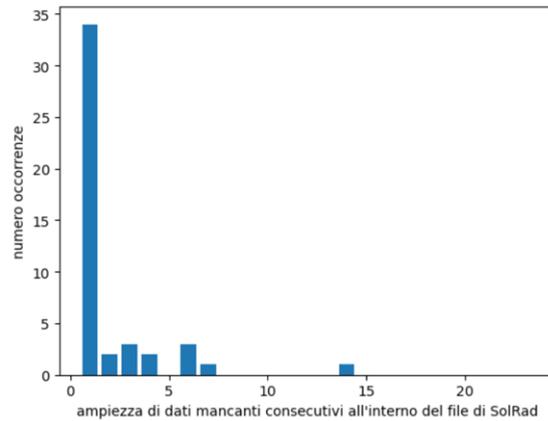
L'analisi relativa alla direzione del vento sarà eseguita in una fase successiva, poiché la natura periodica di questo parametro richiede un trattamento specifico. Si



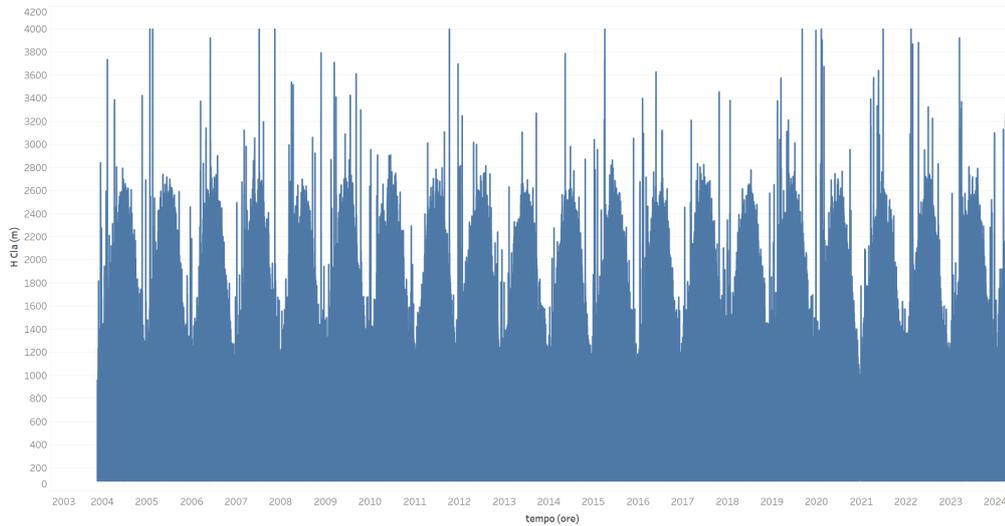
**Figura 3.3:** In figura sono presenti gli istogrammi che associano ad ogni ampiezza di dati mancanti in ore il numero di volte che essa occorre nei file per a) velocità del vento  $U$ , b) temperatura  $T$ , c) precipitazioni  $Prec$  e d) direzione del vento  $Dir$ .

procede ora con l'analisi degli altri parametri. Il primo step consiste nel determinare la presenza di trend per ognuno di questi. A tal fine un primo tentativo può essere quello di osservare attraverso il grafico della serie temporale se sono presenti dei trend visibili ad occhio nudo. I grafici sono presentati nelle figure 3.5, 3.6 e 3.7 dove non sono presenti dei trend apprezzabili ad occhio nudo.

La lunghezza di Monin-Obukhov, invece, viene trattata in maniera differente rispetto agli altri parametri. Questo perchè  $L_{MO}$  può assumere valori con ordini di grandezza molto differenti tra loro (questo parametro, infatti, può passare da essere nullo ad assumere valori di entità elevata) e perciò un grafico con i valori reali del parametro non farebbe apprezzare il suo andamento. Si prosegue quindi categorizzando ogni ora della simulazione con la stabilità dell'atmosfera strettamente



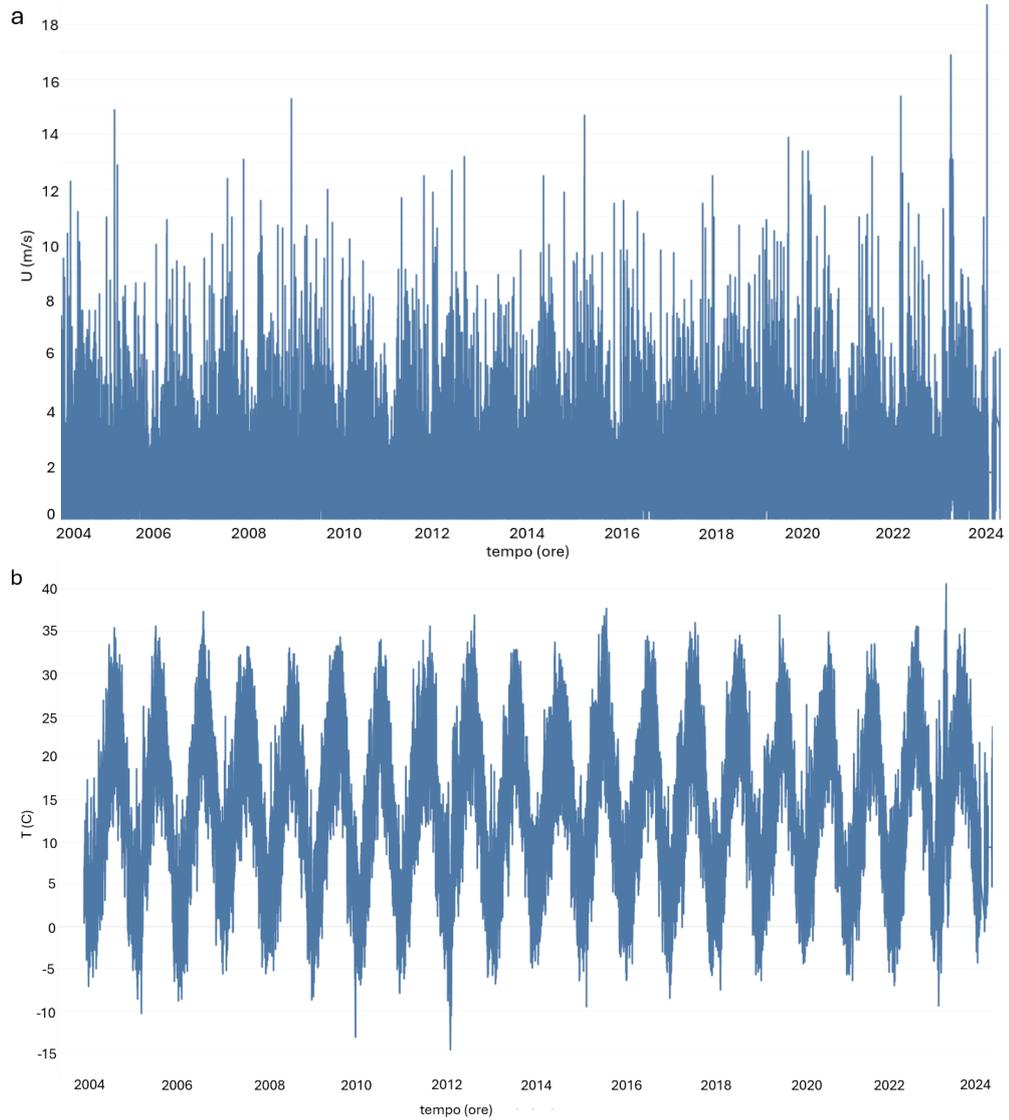
**Figura 3.4:** In figura è presente l'istogramma che associa ad ogni ampiezza di dati mancanti in ore il numero di volte che essa occorre nei file per le onde corte incidenti  $K_{down}$ .



**Figura 3.5:** In figura è presente l'andamento dell'altezza del boundary layer durante il periodo che va dal 19 Novembre 2003 al 10 Aprile 2024 per ogni ora.

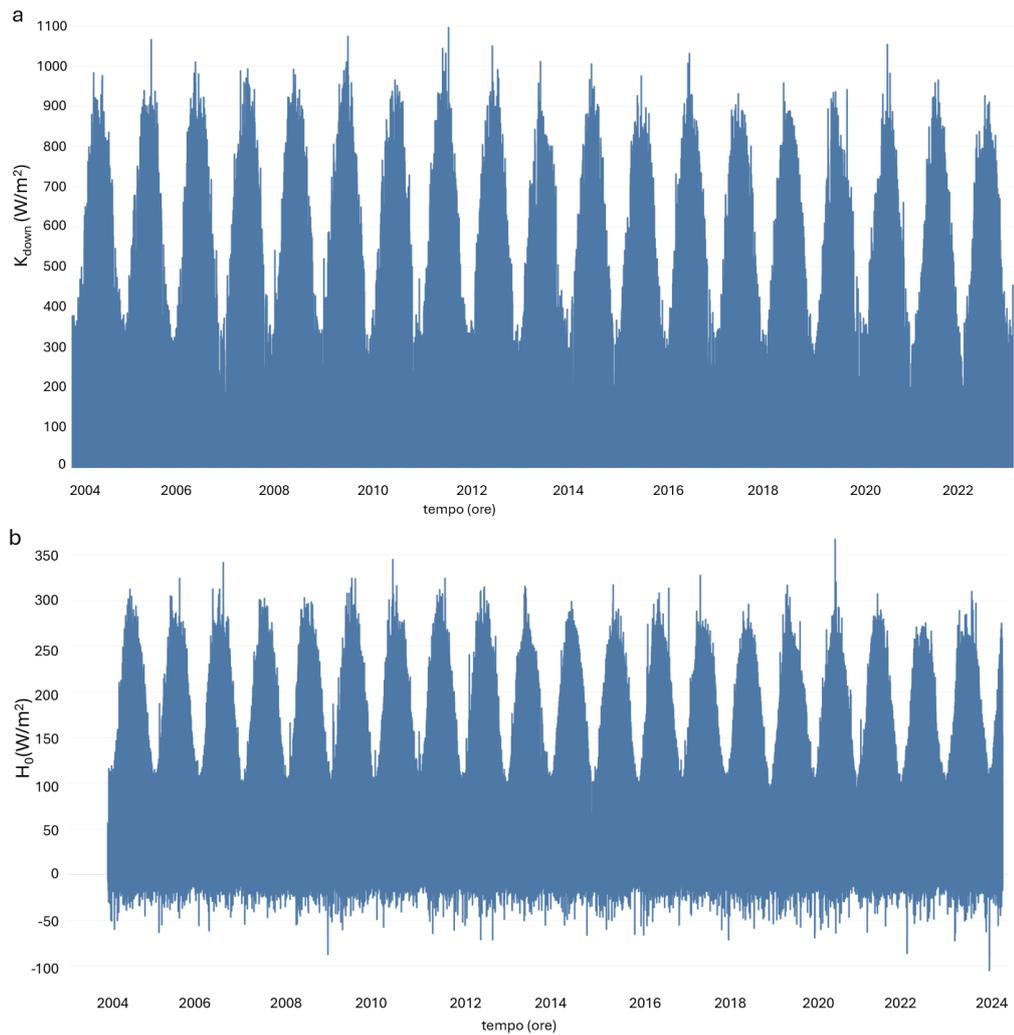
correlata al valore della  $L_{MO}$ . Si avrà quindi la seguente categorizzazione presentata in [15] a cui si assocerà un intero che tornerà utile per lo studio:

- $10 < L_{MO} < 50$ , atmosfera molto stabile a cui si assocerà il valore 3;
- $50 < L_{MO} < 200$ , atmosfera stabile a cui si assocerà il valore 2;
- $200 < L_{MO} < 500$ , atmosfera poco stabile a cui si assocerà il valore 1;



**Figura 3.6:** In figura è presente l'andamento di a) velocità del vento e b) temperatura durante il periodo che va dal 19 Novembre 2003 al 10 Aprile 2024. I valori sono riportati per ogni ora.

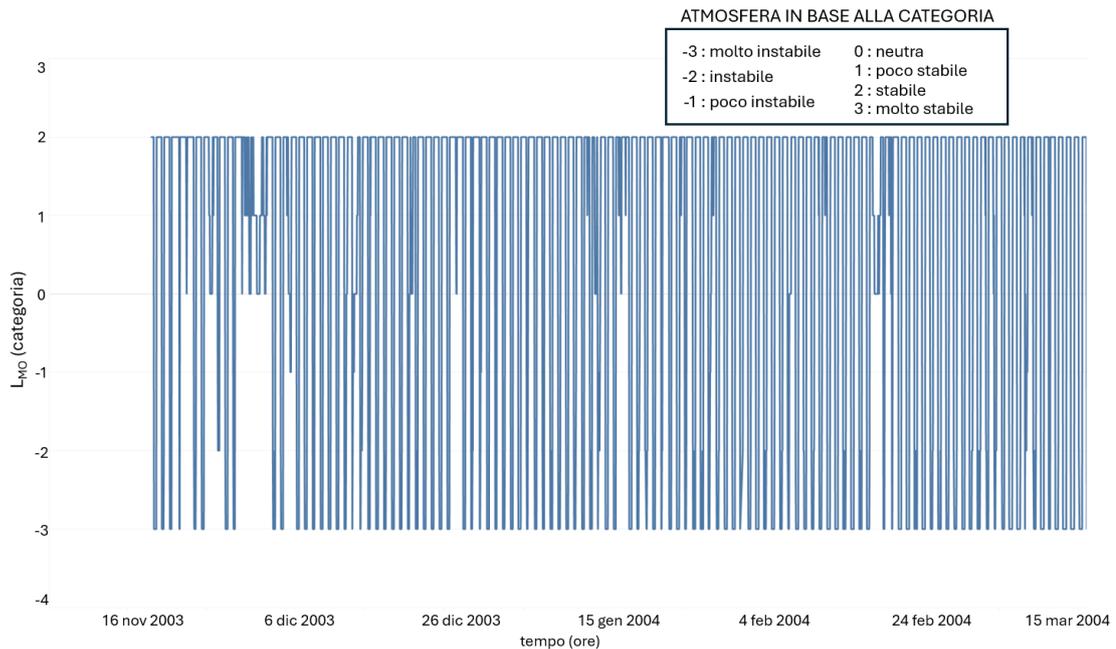
- $|L_{MO}| > 500$ , atmosfera neutra a cui si associerà il valore 0;
- $-500 < L_{MO} < -200$ , atmosfera poco instabile a cui si associerà il valore  $-1$ ;
- $-200 < L_{MO} < -50$ , atmosfera instabile a cui si associerà il valore  $-2$ ;
- $-50 < L_{MO} < -10$ , atmosfera molto instabile a cui si associerà il valore  $-3$ .



**Figura 3.7:** In figura è presente l'andamento di a) effetto delle onde corte e b) flusso di calore sensibile durante il periodo che va dal 19 Novembre 2003 al 10 Aprile 2024. I valori sono riportati per ogni ora.

L'andamento nel tempo della categoria atmosferica è riportato in un periodo che va dal 16 Novembre 2003 al 19 Marzo 2004 in figura 3.8 dove è possibile vedere un andamento molto variabile e poco apprezzabile.

Non avendo determinato la presenza di trend con i soli grafici rappresentanti gli andamenti dei parametri, si procede applicando il metodo dei minimi quadrati per stimare, se esiste, il trend per ogni serie temporale. Per verificare che questo trend sia statisticamente significativo, si è proceduto eseguendo un test statistico ad ognuno di quelli trovati. Il test utilizzato è il test di Mann-Kendall il quale è un test



**Figura 3.8:** In figura è rappresentata l'evoluzione dal 19 novembre 2003 al 16 marzo 2004 della categoria in cui viene a trovarsi la lunghezza di Monin-Obukhov. Sull'asse  $x$  sono presenti le ore del periodo selezionato, mentre sull'asse  $y$  la categoria a cui appartiene, inoltre vi è indicata in base alla categoria la stabilità atmosferica che corrisponde.

non parametrico utilizzato per rilevare la presenza di un trend monotono (crescente o decrescente) in una serie temporale senza fare assunzioni sulla distribuzione dei dati. Al fine di eseguire il test riducendo il costo computazionale si è deciso di ridurre i dati prendendo due valori per giornata anziché i valori orari. I due valori sono ottenuti mediando i dati orari nell'arco di ogni mezzogiornata. Il livello di significatività utilizzato per il test è pari a 0.05 e i risultati dei test sono riportati all'interno della tabella 3.1.

L'unico parametro meteo che presenta un trend statisticamente significativo è la temperatura la quale risulta in aumento all'interno dei 20 anni con una pendenza di circa  $0.069 \text{ }^\circ\text{C}/\text{anno}$  che corrisponde ad un incremento nel periodo selezionato pari a circa  $1.38 \text{ }^\circ\text{C}$ . Questa informazione risulta in linea con quanto riportato all'interno della relazione [16] presente sul sito dell'ARPA Piemonte dove risulta un incremento di circa  $1.2 \text{ }^\circ\text{C}$  molto simile a quello trovato. In tabella 3.2 sono presenti gli incrementi di temperatura negli ultimi 20 anni per diverse regioni nel mondo, i dati sono ottenuti da [16], [17], [18] e [19].

**Tabella 3.1:** Tabella all'interno della quale sono riportati per ogni parametro il p-value relativo al test statistico, il suo risultato e la pendenza determinata attraverso il metodo dei minimi quadrati.

PARAMETRO	p_value	Trend	Pendenza
U	0.215	Nessun Trend	0.0017 m/(s*anno)
T	5.798e-08	Crescente	0.069 C/anno
$K_{down}$	0.346	Nessun Trend	-0.1752 W/m <sup>2</sup> anno
$H_0$	0.671	Nessun Trend	-0.03 W/m <sup>2</sup> anno
$L_{MO}$	0.281	Nessun Trend	0.0019 m/anno
HCl <sub>a</sub>	0.228	Nessun Trend	0.420 m/anno

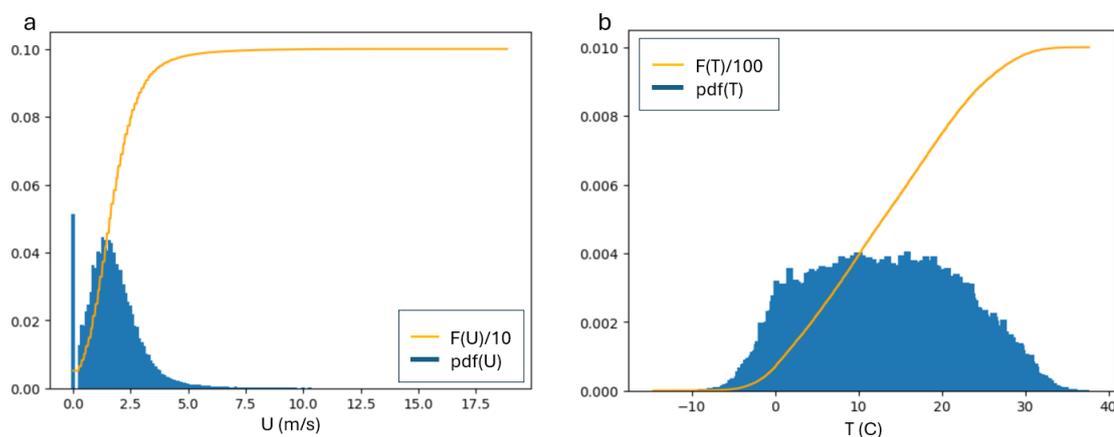
**Tabella 3.2:** Tabella all'interno della quale sono riportati per ogni regione del mondo i valori trovati di incremento della temperatura negli ultimi 20 anni in gradi centigradi.

REGIONE	Incremento di temperatura negli ultimi 20 anni
Torino (determinata)	≈ 1.38 C
Piemonte	≈ 1.2 C
Milano	≈ 2.1 C
Italia	≈ 0.8 C
Mondo	≈ 0.5 C

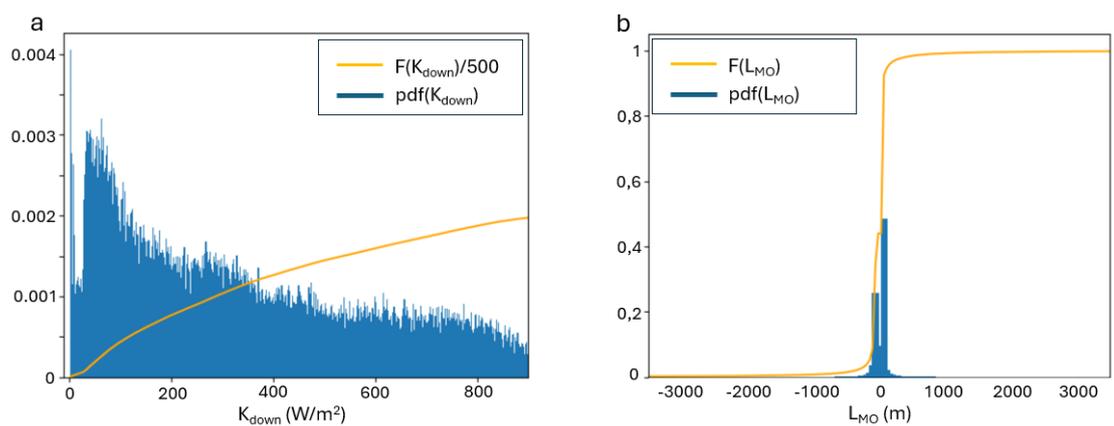
### 3.2.2 Calcolo dei Percentili

Un passo fondamentale successivo all'osservazione dei trend nelle serie temporali è la determinazione della distribuzione dei valori per ciascuna di esse. Questo processo consente di ottenere una comprensione più approfondita delle caratteristiche statistiche delle variabili analizzate, fornendo informazioni cruciali per una valutazione accurata delle loro dinamiche. Si prosegue quindi nel determinare la funzione di densità di probabilità (*pdf*) delle variabili in esame congiuntamente alla loro funzione cumulativa (*F*). Per la determinazione di tali funzioni si è discretizzato l'intervallo di interesse in parti uguali così da valutare per ognuno di essi il numero di valori che rientrano al loro interno. I grafici ottenuti sono riportati nelle figure 3.9, 3.10 e 3.11.

Se si osservano i grafici per la lunghezza di Monin-Obukhov, per il flusso di calore sensibile e per l'altezza del boundary layer si possono osservare dei picchi

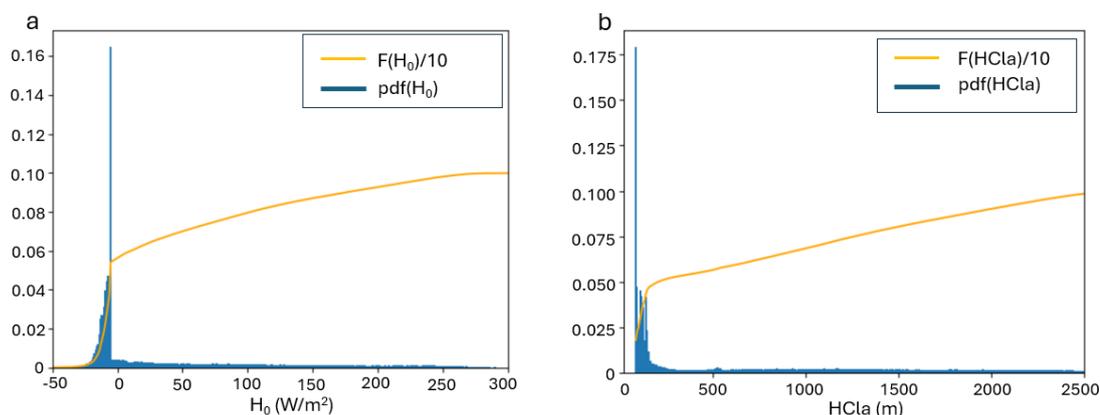


**Figura 3.9:** In figura sono presenti le discretizzazioni dei grafici di densità di probabilità e delle funzioni cumulative divise per un coefficiente in modo tale da rendere apprezzabili entrambi i grafici per a) velocità dl vento  $U$  e per b) temperatura  $T$ .



**Figura 3.10:** In figura sono presenti le discretizzazioni dei grafici di densità di probabilità e delle funzioni cumulative divise per un coefficiente in modo tale da rendere apprezzabili entrambi i grafici per a) effetto delle onde incidenti  $K_{down}$  e per b) lunghezza di Monin-Obukhov  $L_{MO}$ .

con dei valori molto alti tanto che non rendono apprezzabile il resto delle funzioni. Per ovviare a questo problema si sono eseguite delle restrizioni sia a sinistra che a destra dei picchi e sono state riportate nelle figure 3.12 e 3.13 dove è possibile osservare le funzioni densità di probabilità per i valori che risultano essere associati a probabilità con ordini di grandezza inferiori a quelle dei picchi.

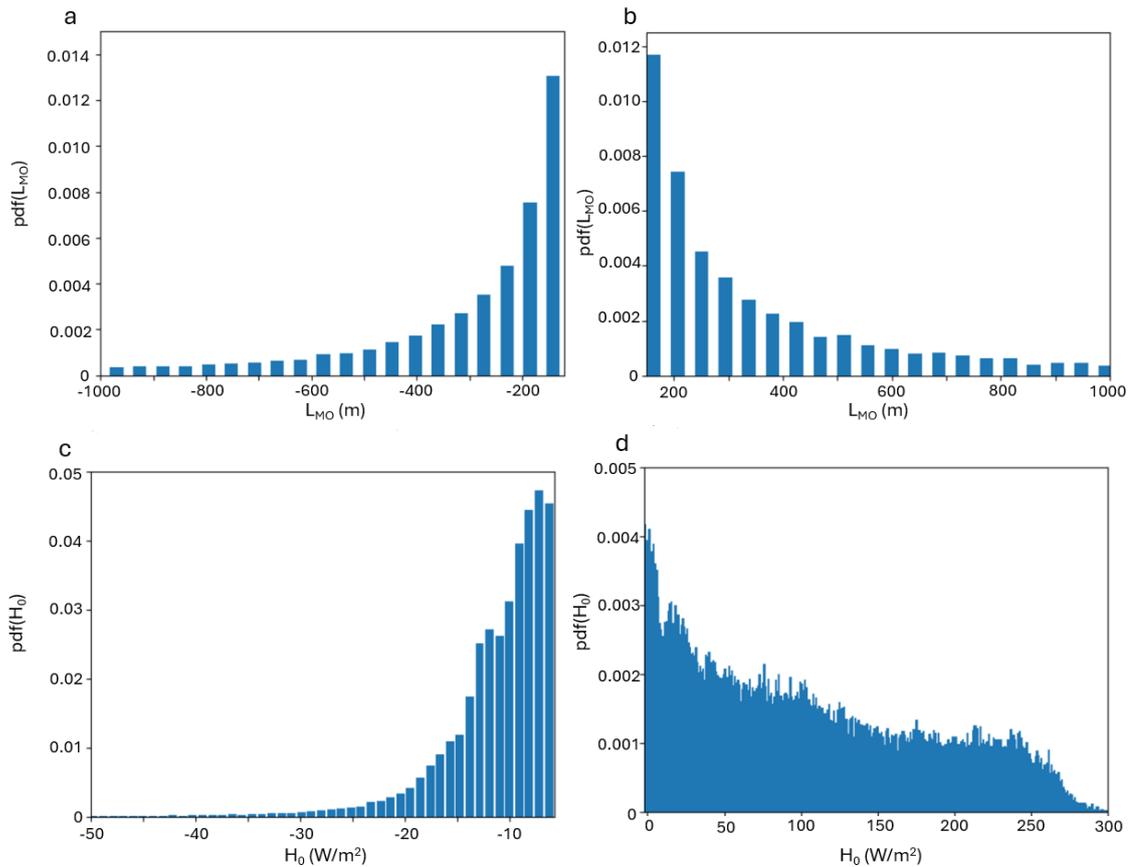


**Figura 3.11:** In figura sono presenti le discretizzazioni dei grafici di densità di probabilità e delle funzioni cumulative divise per un coefficiente in modo tale da rendere apprezzabili entrambi i grafici per a) il flusso di calore sensibile  $H_0$  e per b) l'altezza del boundary layer  $HCl$ .

In figura 3.10-a è rappresentato il grafico della *pdf* per la variabile  $K_{down}$  nella quale non sono stati considerati i valori nulli. Questo è stato fatto in quanto il valore nullo risulterebbe presente sempre nelle ore notturne e quindi in circa il 50% delle ore considerate quindi sarebbe un valore che non ci farebbe apprezzare al meglio la distribuzione delle altre occorrenze della variabile.

Osservando i grafici prodotti si possono osservare delle congruenze con la realtà, infatti:

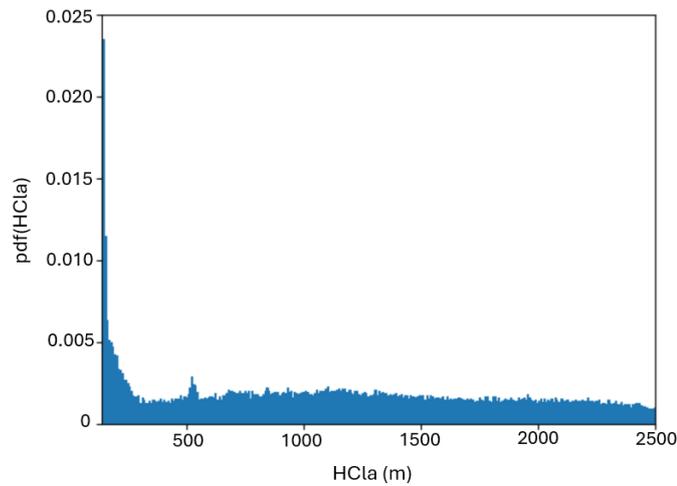
- la velocità del vento presenta un picco per il valore  $U = 0 \text{ m/s}$ , per poi annullarsi subito a destra di tale valore e ricrescere con una maggior densità per valori di bassa entità, il che risulta fisicamente corretto in quanto i valori di forte vento accadono con molta meno frequenza;
- la temperatura presenta una distribuzione abbastanza uniforme tra gli  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  per poi smorzarsi arrivando ad essere nulla a sinistra a circa  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  e a destra a circa  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , il che rispecchia la realtà;
- l'effetto delle onde corte incidenti presenta una distribuzione decrescente, con dei valori molto presenti vicini a quello nullo, questo risulta ragionevole in quanto le giornate più luminose sono quelle meno frequenti;
- il flusso di calore sensibile risulta avere valori negativi maggiormente probabili rispetto a quelli positivi, cosa che è spiegabile per il maggior quantitativo di ore buie dovute sia alle notti che alle ore poco luminose. La distribuzione inoltre è concentrata in valori negativi con basso valore assoluto indice che la maggior parte del calore viene trasferito dall'atmosfera alla superficie terrestre;



**Figura 3.12:** In figura sono presenti le restrizioni delle *pdf* di: a)  $L_{MO}$  a sinistra del picco che si trova per  $L_{MO} = 0 \text{ m}$ , b)  $L_{MO}$  a destra del picco che si trova per  $L_{MO} = 0 \text{ m}$ , c)  $H_0$  a sinistra del picco che si trova circa per  $H_0 = -5 \text{ W/m}^2$  e d)  $H_0$  a destra del picco che si trova circa per  $H_0 = -5 \text{ W/m}^2$ .

- la lunghezza di Monin-Obukhov presenta una distribuzione con valori positivi leggermente più frequenti di quelli negativi. Questo può essere sempre causa della maggiore preponderanza delle ore buie;
- l'altezza del boundary layer assume più facilmente valori intorno ai 90 m, valori che risultano abbastanza bassi, ma che possono essere giustificati dalla presenza del rilevatore a Caselle anziché nella città di Torino dove i valori sarebbero più elevati.

Uno ulteriore step per comprendere meglio le distribuzioni delle variabili è sicuramente quello del calcolo dei percentili. Sono stati scelti l'80°, il 90°, il 95° e il 99° percentile per ciascun parametro considerato. Tali percentili rappresentano



**Figura 3.13:** In figura è presente le restrizioni della  $pdf$  di  $HCl_a$  a destra del picco che si trova circa per 86 m.

le soglie al di sotto delle quali si trova rispettivamente l'80%, il 90%, il 95% e il 99% delle osservazioni relative a ciascuna distribuzione di dati e sono riportati in tabella 3.3.

**Tabella 3.3:** Nella tabella sono riportati per ogni parametro meteo l'80°, il 90°, il 95° e il 99° percentile.

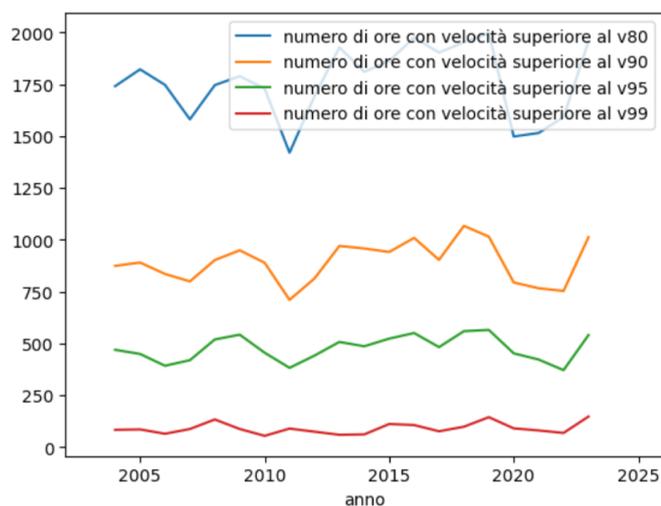
PARAMETRO	p80	p90	p95	p99
U	2.6 m/s	3.2 m/s	3.8 m/s	6.0 m/s
T	21.6 C	25.3 C	27.8 C	31.4 C
$K_{down}$	603 W/m <sup>2</sup>	745 W/m <sup>2</sup>	821 W/m <sup>2</sup>	911 W/m <sup>2</sup>
$L_{MO}$	90 m	90 m	173.19 m	916.45 m
$H_0$	103.00 W/m <sup>2</sup>	176.09 W/m <sup>2</sup>	220.98 W/m <sup>2</sup>	261.70 W/m <sup>2</sup>
HCl <sub>a</sub>	1495.2 m	2004.4 m	2277.5 m	2566.5 m

### 3.2.3 Superamento dei percentili per anno e stagione

Una volta determinati i percentili per le diverse variabili, è naturale chiedersi quante volte, in un determinato periodo, tali soglie vengano superate. In questa sezione verranno analizzati gli andamenti del numero di ore in cui i percentili vengono oltrepassati, con particolare riferimento alla distribuzione per anno e per stagioni. Inoltre, per individuare la presenza di eventuali tendenze in queste nuove serie temporali, verrà applicato il test statistico di Mann-Kendall, il quale consente di verificare l'esistenza di un trend statisticamente significativo. La pendenza di tale trend sarà stimata utilizzando il metodo della pendenza di Sen, che corrisponde alla mediana delle pendenze calcolate tra tutte le coppie di punti  $(t_i, v(t_i))$  e  $(t_j, v(t_j))$  tali che  $t_j > t_i$ .

#### Velocità del vento

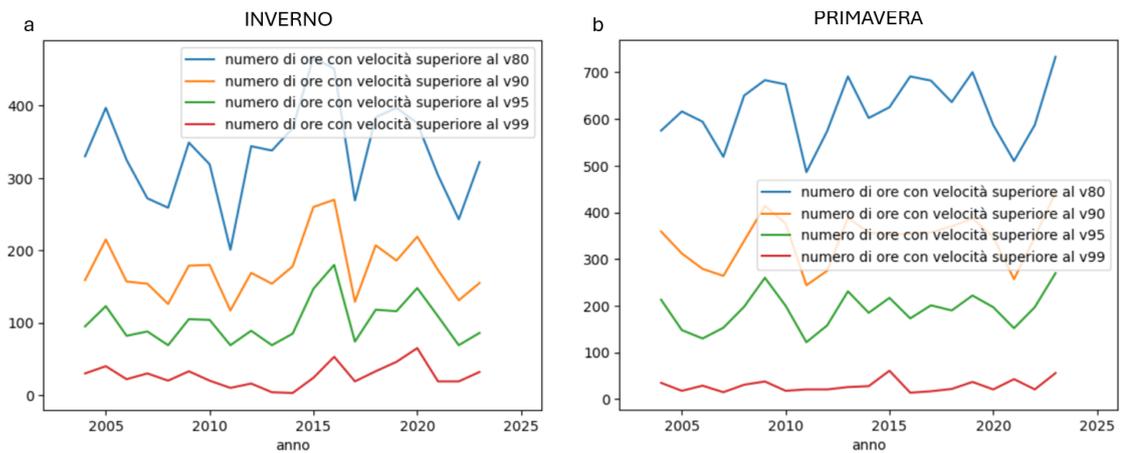
Si presenta in figura 3.14 l'andamento del numero di ore nelle quali la velocità del vento è stata registrata essere oltre i vari percentili.



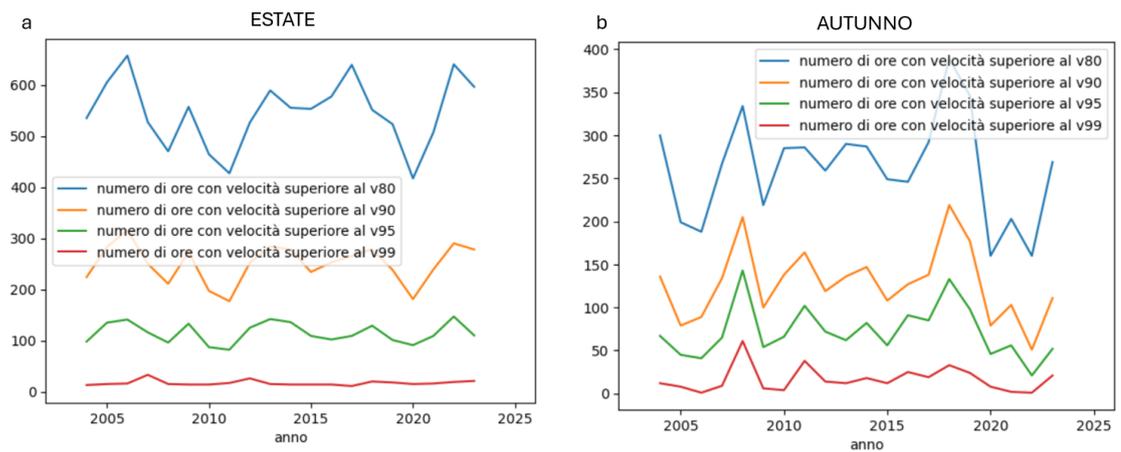
**Figura 3.14:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui la velocità del vento risulta superiore la soglia del 99esimo percentile (in rosso), del 95esimo percentile (in verde), del 90esimo percentile (in arancione) e dell'80esimo percentile (in blu) per ogni anno dal 2004 al 2023.

Oltre agli andamenti per anno nelle figure 3.15 e 3.16 si riportano gli andamenti del numero di ore in cui la  $U$  supera i vari percentili per stagione. Da questi grafici non è possibile notare ad occhio nudo possibili trend.

Si presentano allora i risultati dei test statistici in tabella 3.4 dove è possibile vedere non sono presenti test che portano ad un trend statisticamente significativo per gli andamenti selezionati.



**Figura 3.15:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui la velocità del vento risulta superiore la soglia del 99simo percentile (in rosso), del 95simo percentile (in verde), del 90simo percentile (in arancione) e dell'80simo percentile (in blu) per ogni a) inverno dal 2004 al 2023 e b) primavera dal 2004 al 2023.



**Figura 3.16:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui la velocità del vento risulta superiore la soglia del 99simo percentile (in rosso), del 95simo percentile (in verde), del 90simo percentile (in arancione) e dell'80simo percentile (in blu) per ogni a) estate dal 2004 al 2023 e b) autunno dal 2004 al 2023.

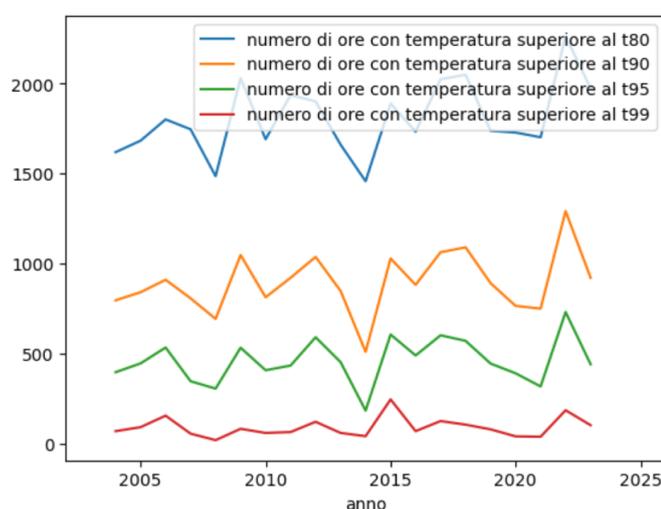
### Temperatura

Si presenta in figura 3.17 l'andamento del numero di ore nelle quali la temperatura è stata registrata essere oltre i vari percentili.

**Tabella 3.4:** Nella tabella sono riportati i  $p\_value$  ottenuti per i test statistici legati alla significatività dei trend per i vari percentili (80,90,95 e 99) della velocità del vento.

U

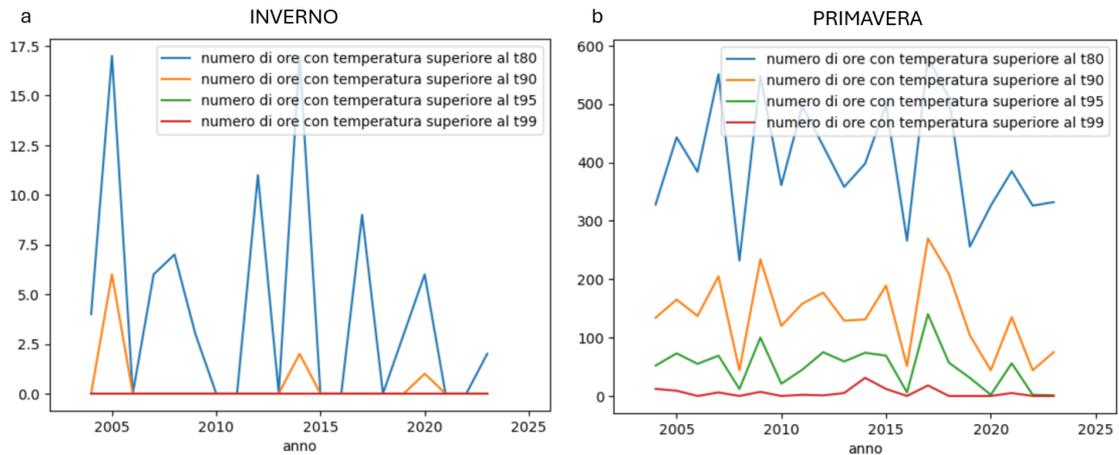
STAGIONE	p_value 80	p_value 90	p_value 95	p_value 99
Annuale	0.256	0.381	0.315	0.770
Inverno	0.846	0.649	0.672	1.000
Primavera	0.256	0.417	0.243	0.434
Estate	0.974	0.745	0.948	0.324
Autunno	0.897	0.897	0.948	0.696



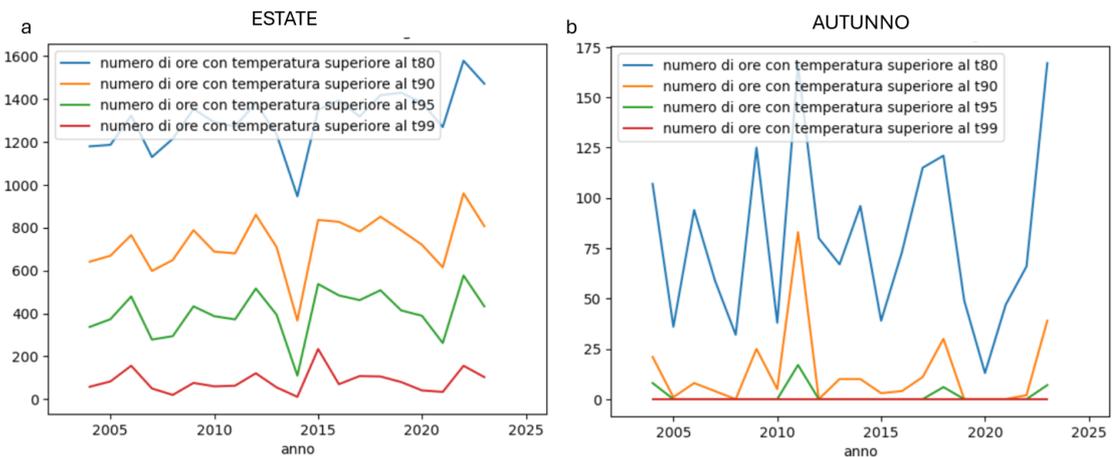
**Figura 3.17:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui la temperatura risulta superiore la soglia del 99esimo percentile (in rosso), del 95esimo percentile (in verde), del 90esimo percentile (in arancione) e dell’80esimo percentile (in blu) per ogni anno dal 2004 al 2023.

Oltre agli andamenti per anno nelle figure 3.18 e 3.19 si riportano gli andamenti del numero di ore in cui la  $T$  supera i vari percentili per stagione. Da questi grafici non è possibile notare ad occhio nudo possibili trend tranne nel caso estivo che sembra il trend sia crescente.

Si presentano allora i risultati dei test statistici in tabella 3.5 dove è possibile vedere un trend positivo segnato in verde per il numero di ore in cui la temperatura ha superato il percentile 80 e 90 in estate (evidenziati in verde).



**Figura 3.18:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui la temperatura risulta superiore la soglia del 99esimo percentile (in rosso), del 95esimo percentile (in verde), del 90esimo percentile (in arancione) e dell’80esimo percentile (in blu) per ogni a) inverno dal 2004 al 2023 e b) primavera dal 2004 al 2023.



**Figura 3.19:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui la temperatura risulta superiore la soglia del 99esimo percentile (in rosso), del 95esimo percentile (in verde), del 90esimo percentile (in arancione) e dell’80esimo percentile (in blu) per ogni a) estate dal 2004 al 2023 e b) autunno dal 2004 al 2023.

### Effetto delle onde corte incidenti

Si presenta in figura 3.20 l’andamento del numero di ore nelle quali l’effetto delle onde corte incidenti è stato registrato essere oltre i vari percentili.

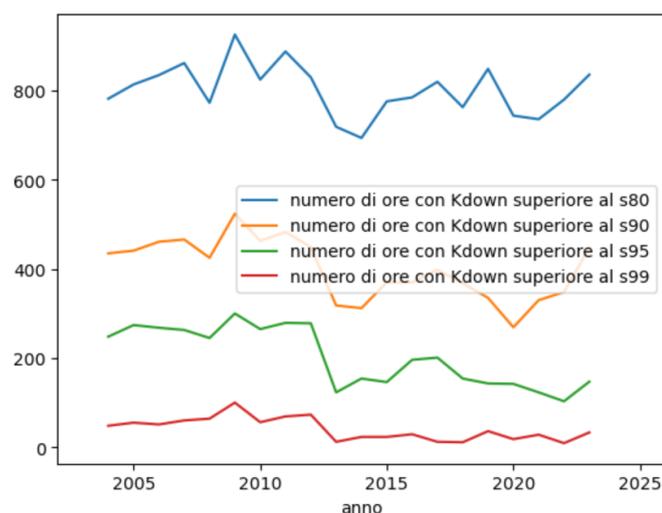
Oltre agli andamenti per anno nelle figure 3.21 e 3.22 si riportano gli andamenti del numero di ore in cui la  $K_{down}$  supera i vari percentili per stagione. Dai grafici

**Tabella 3.5:** Nella tabella sono riportati i  $p\_value$  ottenuti per i test statistici legati alla significatività dei trend per i vari percentili (80,90,95 e 99) della temperatura. I trend statisticamente significativi crescenti sono segnati con il  $p\_value$  verde, mentre in arancione sono segnati quei  $p\_value$  che sono vicino al livello di significatività limite e legati a trend decrescenti.

T

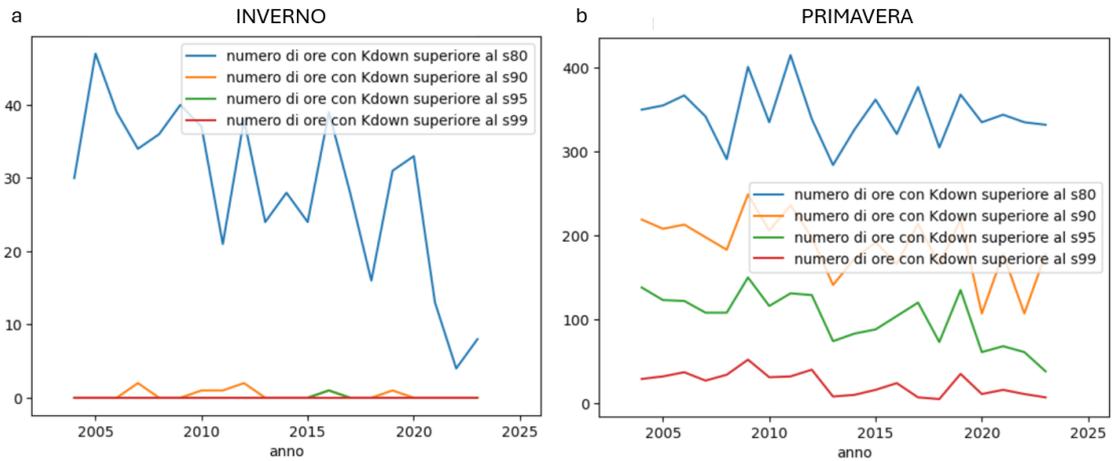
STAGIONE	p_value 80	p_value 90	p_value 95	p_value 99
Annuale	0.127	0.194	0.456	0.770
Inverno	0.274	0.792	1.000	1.000
Primavera	0.436	0.242	0.098	0.161
Estate	0.0016	0.048	0.172	0.649
Autunno	0.820	0.719	0.963	1.000

si riesce a notare già ad occhio nudo la presenza di trend decrescenti che però si investigheranno meglio attraverso i test statistici.

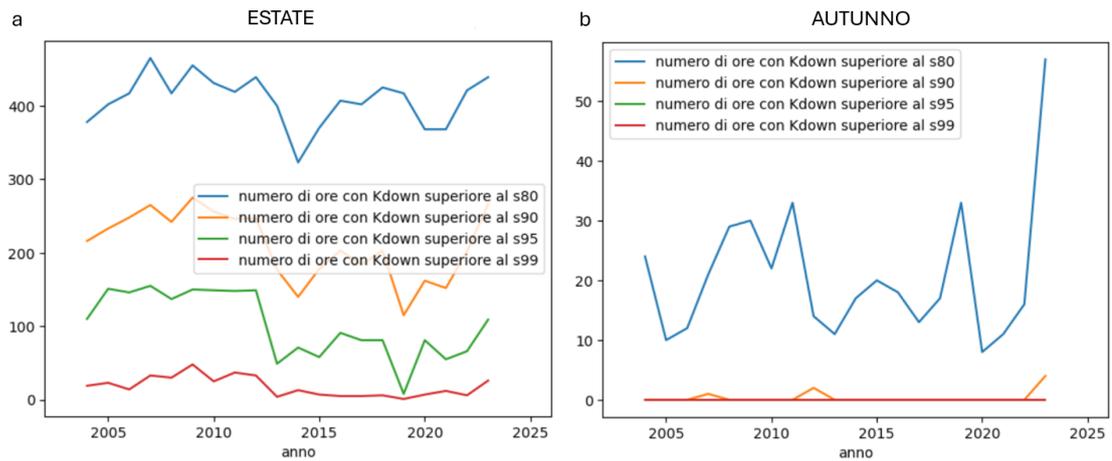


**Figura 3.20:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui la  $K_{down}$  risulta superiore la soglia del 99esimo percentile (in rosso), del 95esimo percentile (in verde), del 90esimo percentile (in arancione) e dell'80esimo percentile (in blu) per ogni anno dal 2004 al 2023.

Si presentano allora i risultati dei test statistici in tabella 3.6 dove è possibile notare alcuni trend negativi segnati in rosso, segno che il numero di ore in cui il sole splende oltre una certa soglia è in decrescita nel corso degli anni.



**Figura 3.21:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui la  $K_{down}$  risulta superiore la soglia del 99simo percentile (in rosso), del 95simo percentile (in verde), del 90simo percentile (in arancione) e dell'80simo percentile (in blu) per ogni a) inverno dal 2004 al 2023 e b) primavera dal 2004 al 2023.



**Figura 3.22:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui la  $K_{down}$  risulta superiore la soglia del 99simo percentile (in rosso), del 95simo percentile (in verde), del 90simo percentile (in arancione) e dell'80simo percentile (in blu) per ogni a) estate dal 2004 al 2023 e b) autunno dal 2004 al 2023.

### Flusso di Calore Sensibile

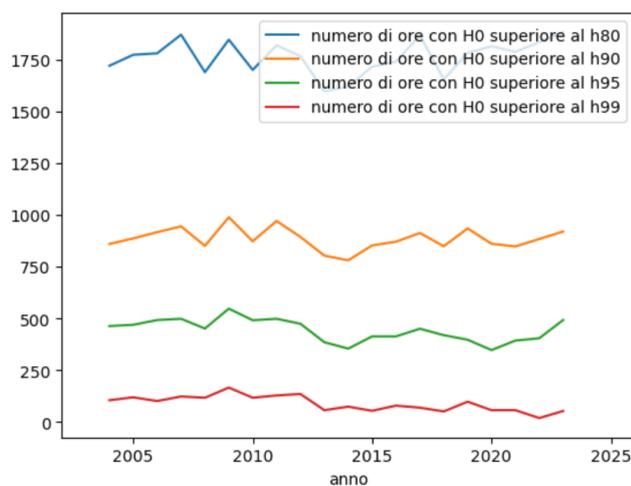
Si presenta in figura 3.23 l'andamento del numero di ore nelle quali il flusso di calore sensibile è stato determinato essere oltre i vari percentili.

Oltre agli andamenti per anno nelle figure 3.24 e 3.25 si riportano gli andamenti del

**Tabella 3.6:** Nella tabella sono riportati i  $p\_value$  ottenuti per i test statistici legati alla significatività dei trend per i vari percentili (80,90,95 e 99) della  $K_{down}$ . I trend statisticamente significativi decrescenti sono segnati con il  $p\_value$  rosso, mentre in arancione sono segnati quei  $p\_value$  che sono vicino al livello di significatività limite e legati a trend decrescenti.

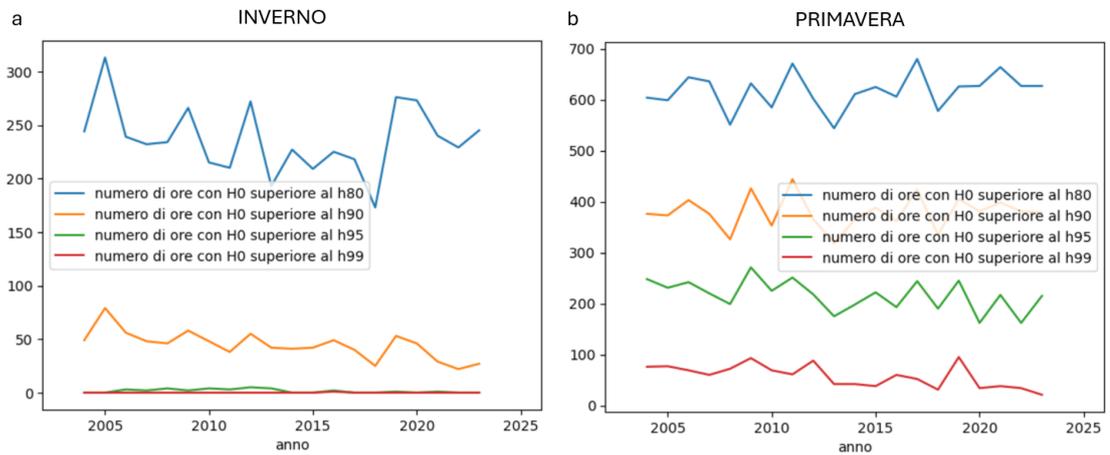
STAGIONE	$K_{down}$			
	p_value 80	p_value 90	p_value 95	p_value 99
Annuale	0.315	0.016	0.0008	0.025
Inverno	0.004	0.543	0.729	1.000
Primavera	0.363	0.012	0.001	0.014
Estate	0.672	0.060	0.006	0.055
Autunno	0.795	0.792	1.000	1.000

numero di ore in cui il flusso d calore sensibile supera i vari percentili per stagione. Dai grafici si nota già ad occhio nudo la presenza di trend decrescenti soprattutto nei casi di superamento del 99simo percentile che però si investigheranno meglio attraverso i test statistici.

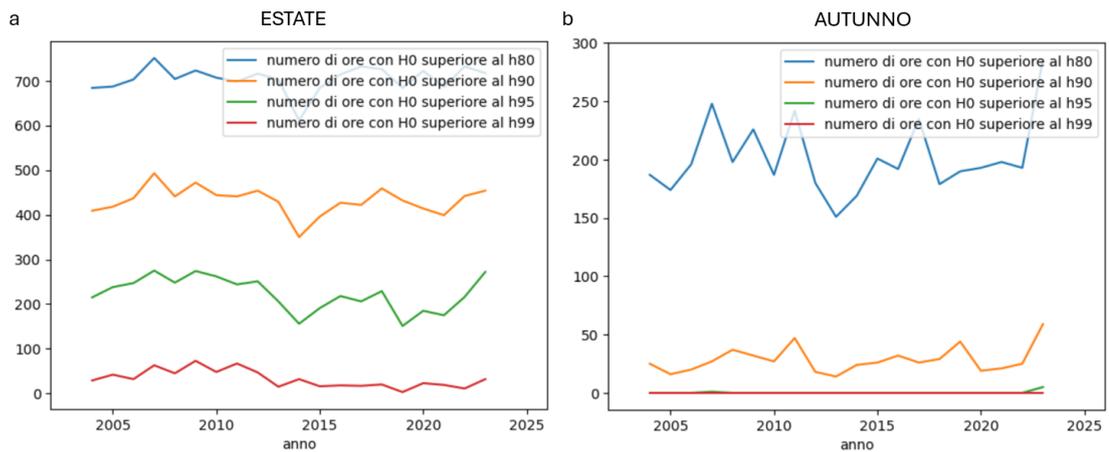


**Figura 3.23:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui il flusso di calore sensibile risulta superiore la soglia del 99simo percentile (in rosso), del 95simo percentile (in verde), del 90simo percentile (in arancione) e dell’80simo percentile (in blu) per ogni anno dal 2004 al 2023.

Si presentano allora i risultati dei test statistici in tabella 3.7 dove si notano alcuni trend negativi segnati in rosso. Questo implica che i trasferimenti importanti



**Figura 3.24:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui il flusso di calore sensibile risulta superiore la soglia del 99simo percentile (in rosso), del 95simo percentile (in verde), del 90simo percentile (in arancione) e dell'80simo percentile (in blu) per ogni a) inverno dal 2004 al 2023 e b) primavera dal 2004 al 2023.



**Figura 3.25:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui il flusso di calore sensibile risulta superiore la soglia del 99simo percentile (in rosso), del 95simo percentile (in verde), del 90simo percentile (in arancione) e dell'80simo percentile (in blu) per ogni a) estate dal 2004 al 2023 e b) autunno dal 2004 al 2023.

di calore dalla superficie terrestre all'atmosfera nel tempo tendono a decrescere in numerosità.

**Tabella 3.7:** Nella tabella sono riportati i  $p\_value$  ottenuti per i test statistici legati alla significatività dei trend per i vari percentili (80,90,95 e 99) del flusso di calore sensibile. I trend statisticamente significativi decrescenti sono segnati con il  $p\_value$  rosso, mentre in arancione sono segnati quei  $p\_value$  che sono vicino al livello di significatività limite e legati a trend decrescenti.

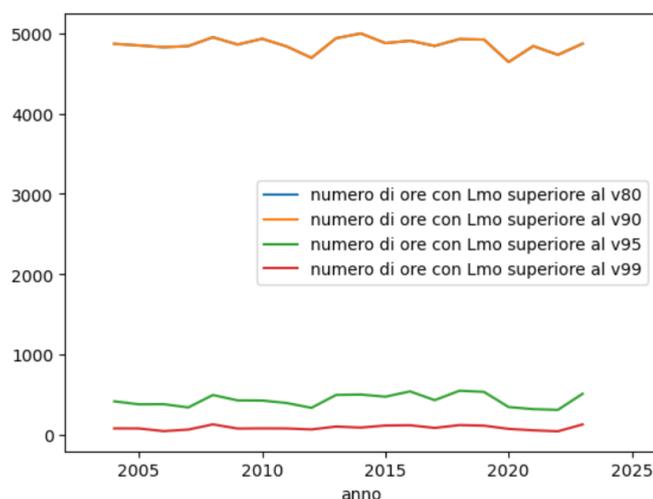
$H_0$

STAGIONE	p_value 80	p_value 90	p_value 95	p_value 99
Annuale	0.256	0.626	0.027	0.002
Inverno	0.581	0.002	0.122	0.729
Primavera	0.298	0.770	0.019	0.001
Estate	0.329	0.770	0.069	0.032
Autunno	0.516	0.416	0.706	1.000

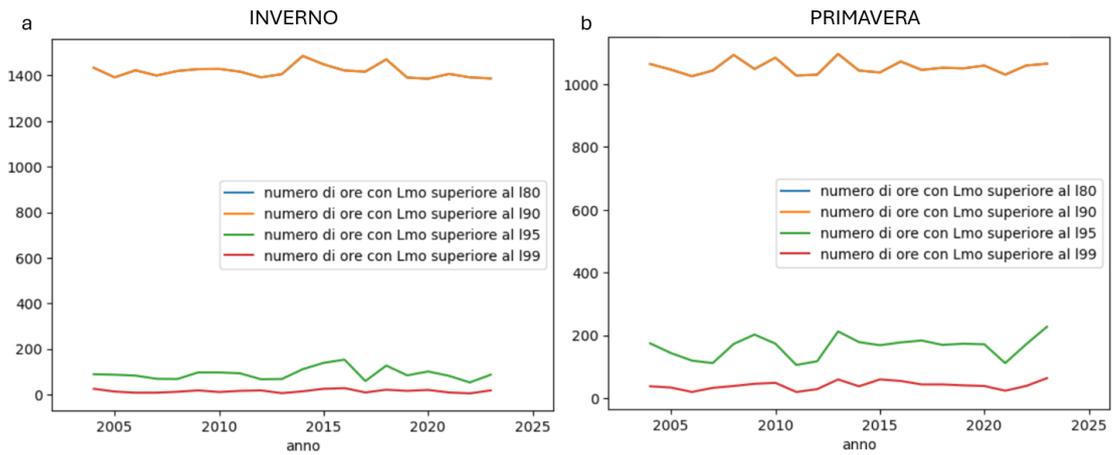
### Lunghezza di Monin-Obukhov

Si presenta in figura 3.26 l'andamento del numero di ore nelle quali lunghezza di Monin-Obukhov è stata determinata essere oltre i vari percentili.

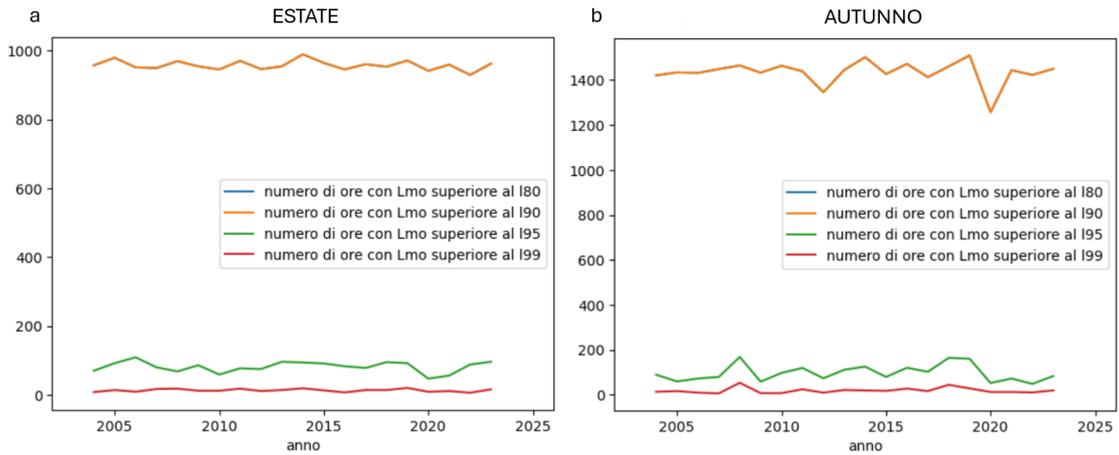
Oltre agli andamenti per anno nelle figure 3.27 e 3.28 si riportano gli andamenti del numero di ore in cui  $L_{MO}$  supera i vari percentili per stagione.



**Figura 3.26:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui lunghezza di Monin-Obukhov risulta superiore la soglia del 99esimo percentile (in rosso), del 95esimo percentile (in verde), del 90esimo percentile (in arancione) e dell'80esimo percentile (in blu) per ogni anno dal 2004 al 2023.



**Figura 3.27:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui la lunghezza di Monin-Obukhov risulta superiore la soglia del 99esimo percentile (in rosso), del 95esimo percentile (in verde), del 90esimo percentile (in arancione) e dell’80esimo percentile (in blu) per ogni a) inverno dal 2004 al 2023 e b) primavera dal 2004 al 2023.



**Figura 3.28:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui la lunghezza di Monin-Obukhov risulta superiore la soglia del 99esimo percentile (in rosso), del 95esimo percentile (in verde), del 90esimo percentile (in arancione) e dell’80esimo percentile (in blu) per ogni a) estate dal 2004 al 2023 e b) autunno dal 2004 al 2023.

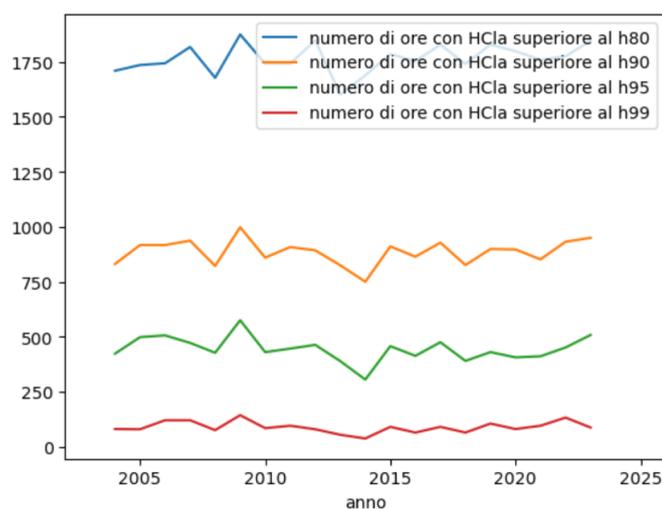
Si presentano allora i risultati dei test statistici in tabella 3.8 dove non sono presenti trend statisticamentew significativi.

**Tabella 3.8:** Nella tabella sono riportati i  $p\_value$  ottenuti per i test statistici legati alla significatività dei trend per i vari percentili (80,90,95 e 99) della lunghezza di Monin-Obukhov.

$L_{MO}$				
STAGIONE	p_value 80	p_value 90	p_value 95	p_value 99
Annuale	0.697	0.697	0.417	0.417
Inverno	0.143	0.143	1.00	0.794
Primavera	0.516	0.516	0.475	0.193
Estate	0.495	0.495	0.820	1.000
Autunno	0.721	0.721	0.871	0.362

### Altezza del boundary layer

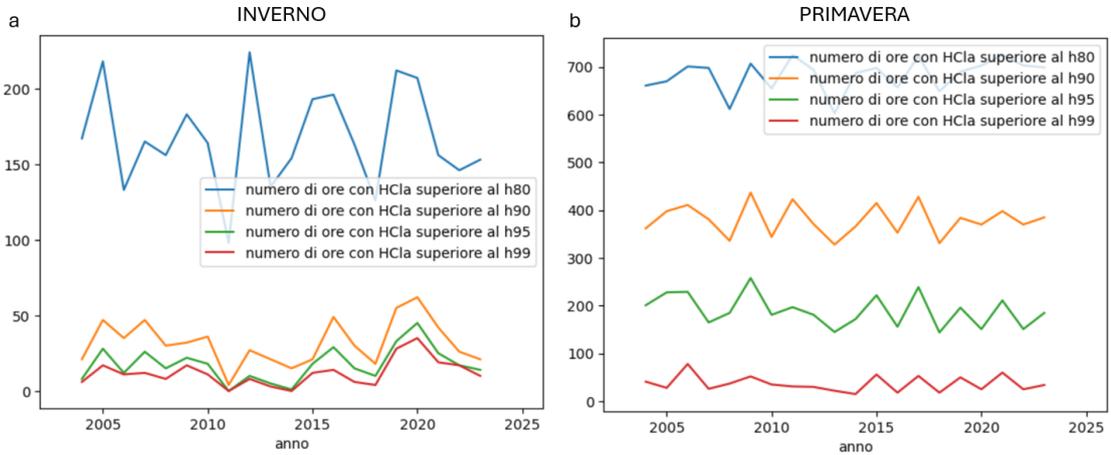
Si presenta in figura 3.29 l'andamento del numero di ore nelle quali la temperatura è stata registrata essere oltre i vari percentili.



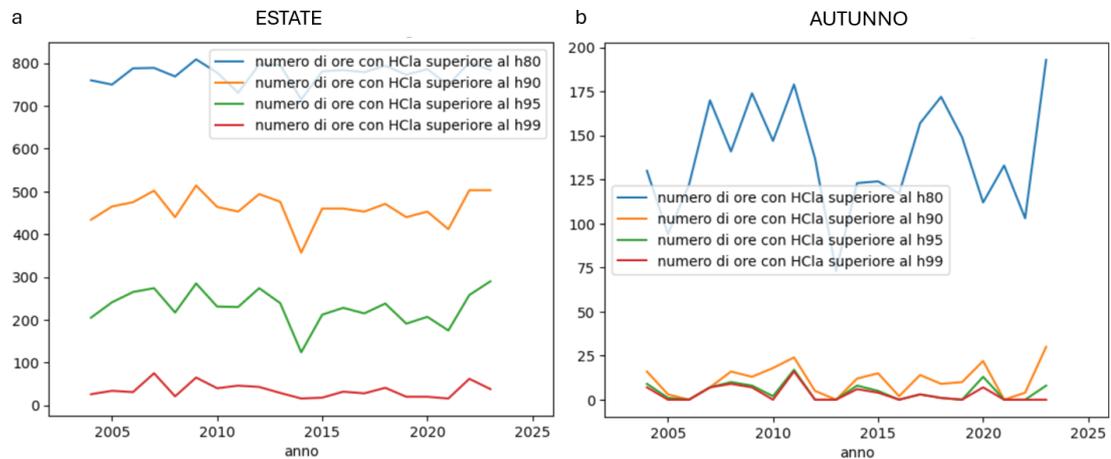
**Figura 3.29:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui l'altezza del boundary layer risulta superiore la soglia del 99esimo percentile (in rosso), del 95esimo percentile (in verde), del 90esimo percentile (in arancione) e dell'80esimo percentile (in blu) per ogni anno dal 2004 al 2023.

Oltre agli andamenti per anno nelle figure 3.30 e 3.31 si riportano gli andamenti del numero di ore in cui la  $HCl$  supera i vari percentili per stagione. Da questi grafici non è possibile notare ad occhio nudo possibili trend. Si proseguirà quindi lo studio applicando il test statistico di Mann-Kendall tramite il quale si valuterà la presenza di trend statisticamente significativi. I risultati sono riportati in tabella

3.9 dove è possibile osservare l'assenza di trend statisticamente significativ in quanto il p-value supera il livello di significatività del test (pari nel nostro caso a 0.05).



**Figura 3.30:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui l'altezza del boundary layer risulta superiore la soglia del 99esimo percentile (in rosso), del 95esimo percentile (in verde), del 90esimo percentile (in arancione) e dell'80esimo percentile (in blu) per ogni a) inverno dal 2004 al 2023 e b) primavera dal 2004 al 2023.



**Figura 3.31:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui l'altezza del boundary layer risulta superiore la soglia del 99esimo percentile (in rosso), del 95esimo percentile (in verde), del 90esimo percentile (in arancione) e dell'80esimo percentile (in blu) per ogni a) estate dal 2004 al 2023 e b) autunno dal 2004 al 2023.

**Tabella 3.9:** Nella tabella sono riportati i  $p\_value$  ottenuti per i test statistici legati alla significatività dei trend per i vari percentili (80,90,95 e 99) dell'altezza del boundary layer.

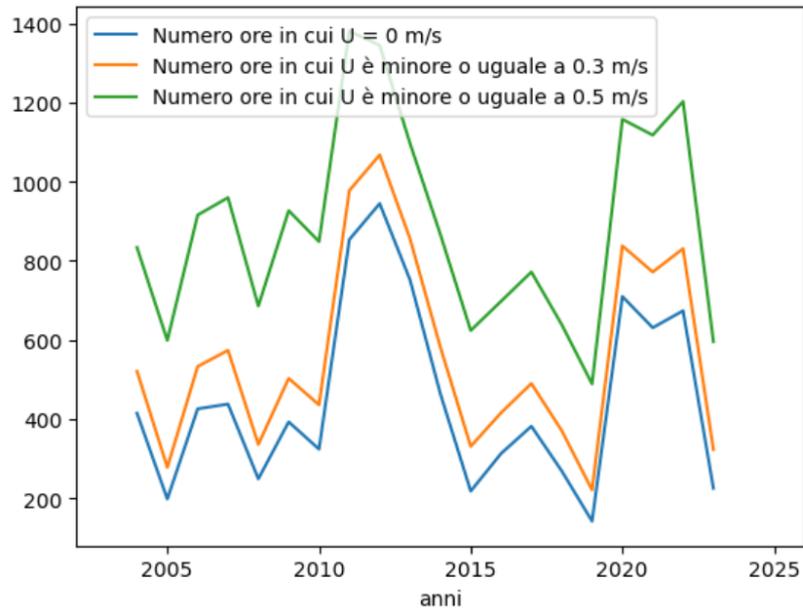
HCl <sub>a</sub>				
STAGIONE	p_value 80	p_value 90	p_value 95	p_value 99
Annuale	0.112	0.745	0.399	0.922
Inverno	0.649	0.922	0.516	0.379
Primavera	0.217	1.000	0.135	0.455
Estate	0.603	0.871	0.399	0.314
Autunno	0.871	0.820	0.318	0.142

### 3.2.4 Ulteriori Analisi sulla velocità del vento

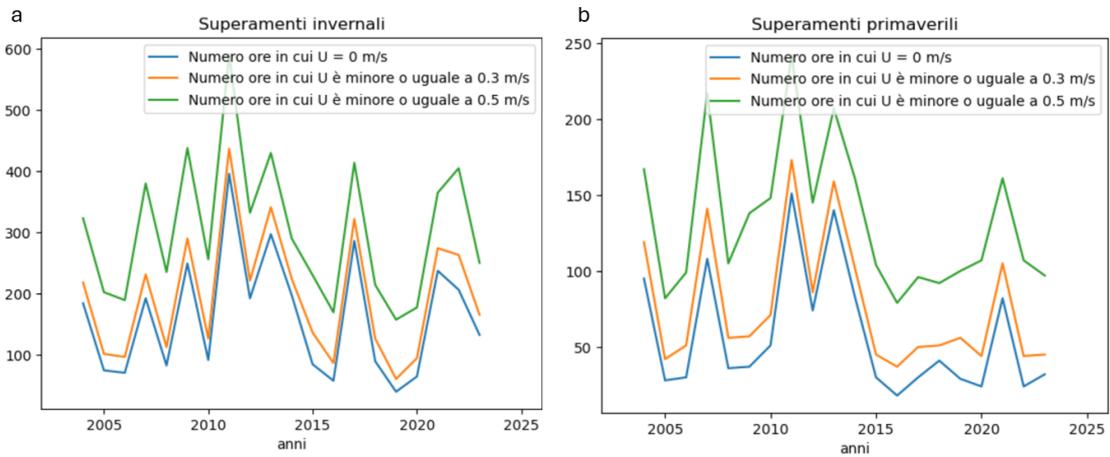
Il parametro relativo alla velocità del vento costituisce uno degli elementi meteorologici di maggior rilievo nello studio della dispersione degli inquinanti atmosferici. In virtù di questa importanza, si intende approfondire alcuni aspetti correlati a tale parametro, tra cui l'analisi del numero di ore in cui si registrano condizioni di calma di vento o velocità particolarmente ridotte, nonché lo studio dei fenomeni di autocorrelazione del vento.

#### Velocità nulle o quasi

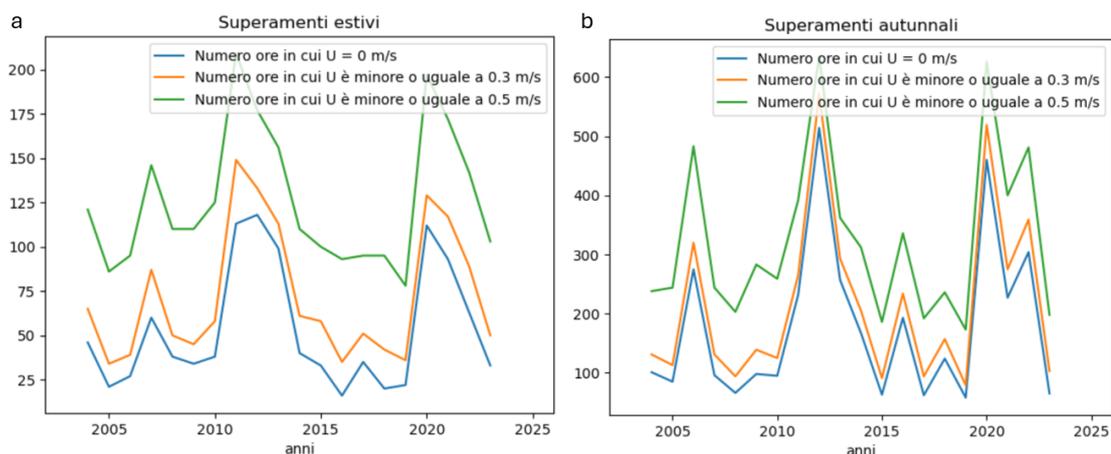
Il primo aspetto di approfondimento riguardante la velocità del vento concerne il numero di ore in cui si verificano condizioni di calma di vento o velocità particolarmente ridotte. Si procede riportando, in un primo momento, i dati relativi al numero di ore con velocità del vento nulla per ciascun anno, per poi analizzare l'evoluzione di tale parametro nel corso degli anni per ciascuna stagione. Successivamente, viene determinato il numero di ore in cui la velocità del vento è risultata inferiore sia al valore di  $0.3\text{ m/s}$  sia al valore di  $0.5\text{ m/s}$ , dapprima su base annua e successivamente analizzando l'evoluzione di tale parametro in funzione delle stagioni. I risultati grafici di tale studio sono riportati nelle figure 3.32, 3.33 e 3.34, nei quali non è visibile un trend in nessuno dei cinque casi. Si procede come già fatto per i casi precedenti eseguendo i test di Mann-Kendall per verificare che i trend che si possono trovare attraverso la pendenza di Sen risultano essere statisticamente significativi. I risultati di tali test sono riportati in tabella 3.10, nella quale non risultano esserci trend statisticamente significativi.



**Figura 3.32:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui la velocità del vento risulta nulla o inferiore a  $0.3 \text{ m/s}$  (curva arancione) o a  $0.5 \text{ m/s}$  (curva verde) negli anni dal 2004 al 2023



**Figura 3.33:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui la velocità del vento risulta nulla o inferiore a  $0.3 \text{ m/s}$  (curva arancione) o a  $0.5 \text{ m/s}$  (curva verde) negli anni dal 2004 al 2023 a) nel periodo invernale e b) nel periodo primaverile.



**Figura 3.34:** In figura sono rappresentati gli andamenti del numero di ore in cui la velocità del vento risulta nulla o inferiore a  $0.3 \text{ m/s}$  (curva arancione) o a  $0.5 \text{ m/s}$  (curva verde) negli anni dal 2004 al 2023 a) nel periodo estivo e b) nel periodo autunnale.

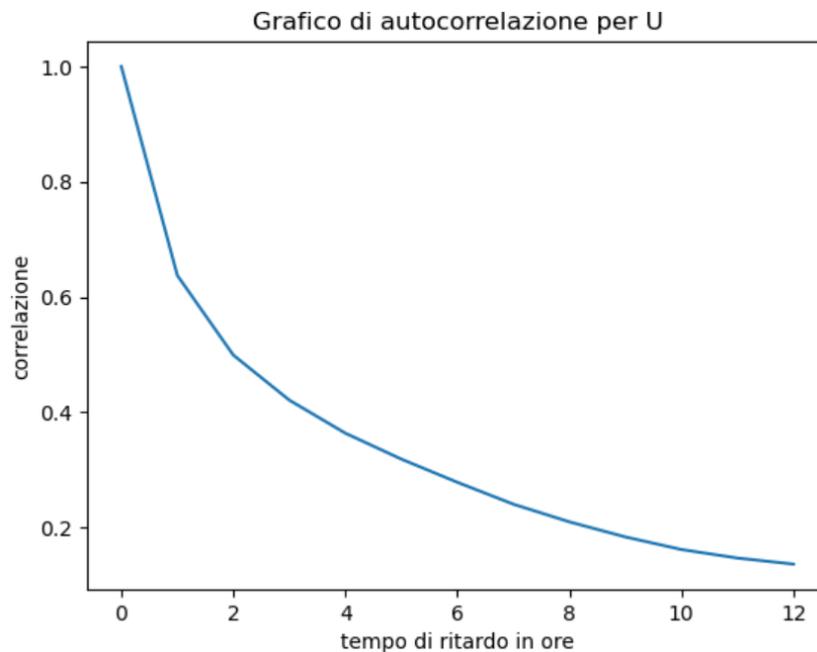
**Tabella 3.10:** Nella tabella sono riportati i  $p\_value$  ottenuti per i test statistici legati alla significatività dei trend per il numero di ore in cui la velocità risulta essere nulla, inferiore a  $0.3 \text{ m/s}$  e inferiore a  $0.5 \text{ m/s}$ .

PERIODO	p_value U = 0 m/s	p_value U ≤ 0.3 m/s	p_value U ≤ 0.5 m/s
Annuale	0.974	0.922	0.922
Inverno	0.948	1.000	0.626
Primavera	0.205	0.229	0.381
Estate	1.000	0.721	0.974
Autunno	0.922	0.673	0.897

### Autocorrelazione della velocità

Un altro aspetto della velocità del vento che vuole essere approfondito all'interno di questa analisi statistica è quello relativo all'autocorrelazione. L'autocorrelazione è una tecnica statistica utilizzata per misurare la dipendenza di un segnale con se stesso a intervalli temporali diversi. Nel contesto della velocità del vento, l'autocorrelazione consente di valutare in che misura i valori di velocità del vento in un dato momento siano correlati con quelli misurati in momenti precedenti. Tale analisi è fondamentale per comprendere la persistenza dei fenomeni ventosi e la loro

evoluzione temporale, poiché può fornire indicazioni sulla durata dei periodi con condizioni simili di vento e sulla struttura temporale dei pattern ventosi. Un'alta autocorrelazione indica una lenta variazione della velocità del vento nel tempo, mentre valori bassi suggeriscono una maggiore variabilità e una minore predicibilità. Nella presente analisi verrà calcolata l'autocorrelazione per i valori della velocità del vento per distanze fino a 12 h, il grafico trovato è riportato in figura 3.35. Come ci si aspetterebbe la correlazione con un ritardo pari a 0 h risulta essere unitaria in quanto è la correlazione della velocità con sé stessa, mentre con l'aumentare del ritardo questa decresce. La decrescita risulta abbastanza rapida in quanto già con un ritardo pari ad 1 h il valore di correlazione scende sotto il valore di 0.7 e se si considera un ritardo di 2 h il suo valore arriva a 0.5. Tutto ciò implica che la velocità del vento dipende dai valori che essa registra ad ore precedenti, ma questa "memoria" tende ad esaurirsi nel giro di poche ore tanto che già dopo 10 h la correlazione assume un valore circa pari a 0.2.

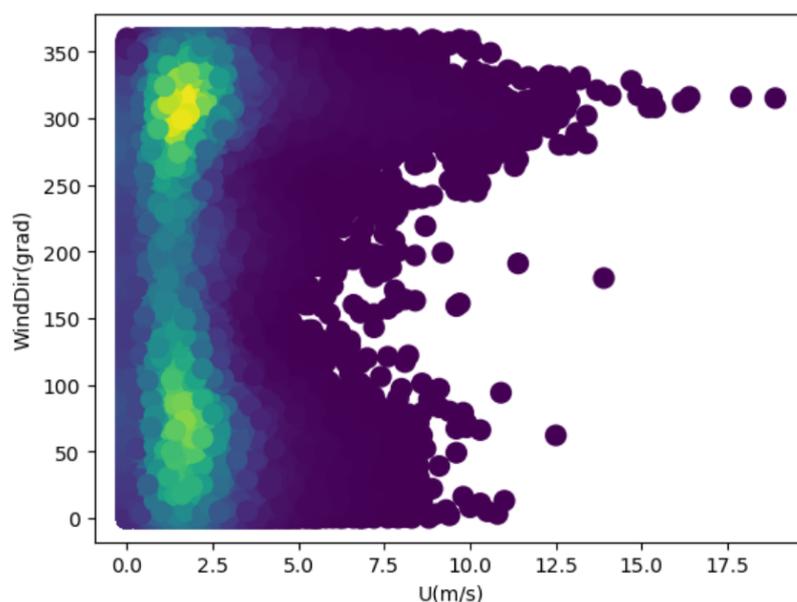


**Figura 3.35:** In figura è mostrato il grafico di autocorrelazione per la velocità del vento. Sull'asse delle  $x$  è presente il ritardo con il quale viene calcolata la correlazione espresso in ore.

### 3.2.5 Direzione del vento

L'ultimo parametro meteorologico protagonista dell'analisi statistica all'interno della presente tesi è la direzione del vento. Questo si è deciso di trattarlo separatamente dagli altri per via della sua periodicità che rende la sua analisi e la rappresentazione dei grafici differente.

Per via del suo stretto collegamento con la velocità del vento è del tutto naturale chiedersi se esista una qualche correlazione tra direzione e velocità del vento. Per rispondere a questa domanda in figura 3.36 si presenta uno scatterplot che mostra le coppie di valori  $(U, Dir)$  per tutte le ore all'interno del periodo 2004-2023 di cui abbiamo i dati.

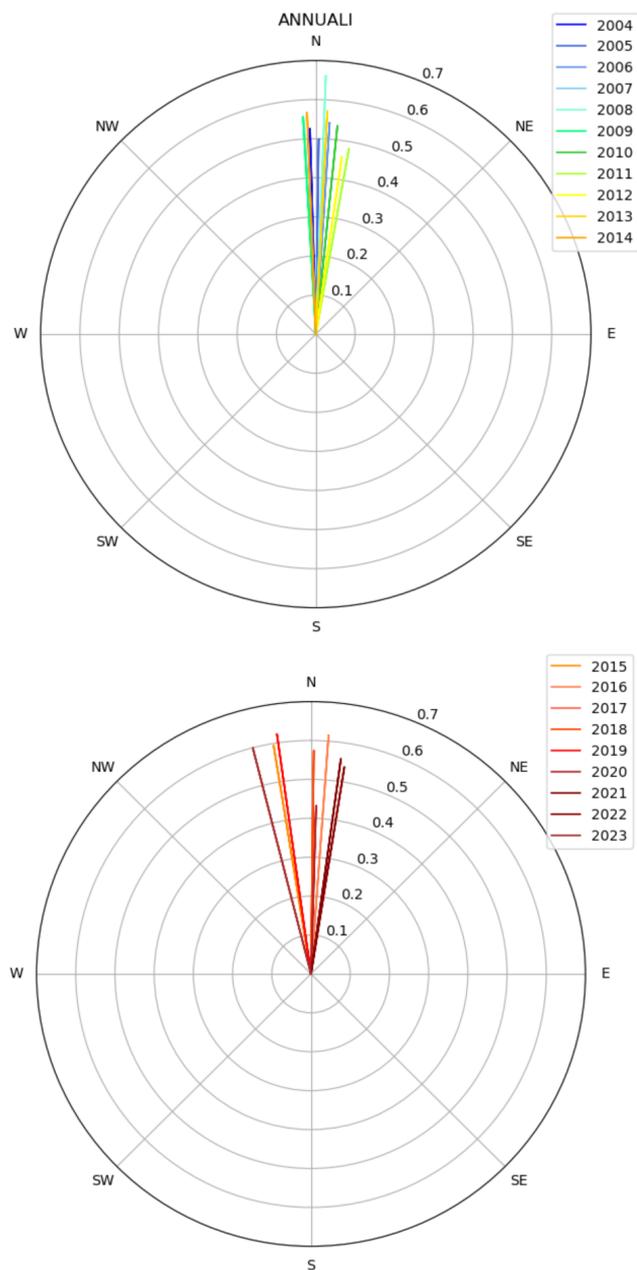


**Figura 3.36:** In figura è mostrato lo scatterplot in cui si mostrano tutte le coppie di punti  $(U, Dir)$  delle serie temporali ottenute dal sito di ARPA Piemonte dal 19 Novembre 2003 al 10 Aprile 2024.

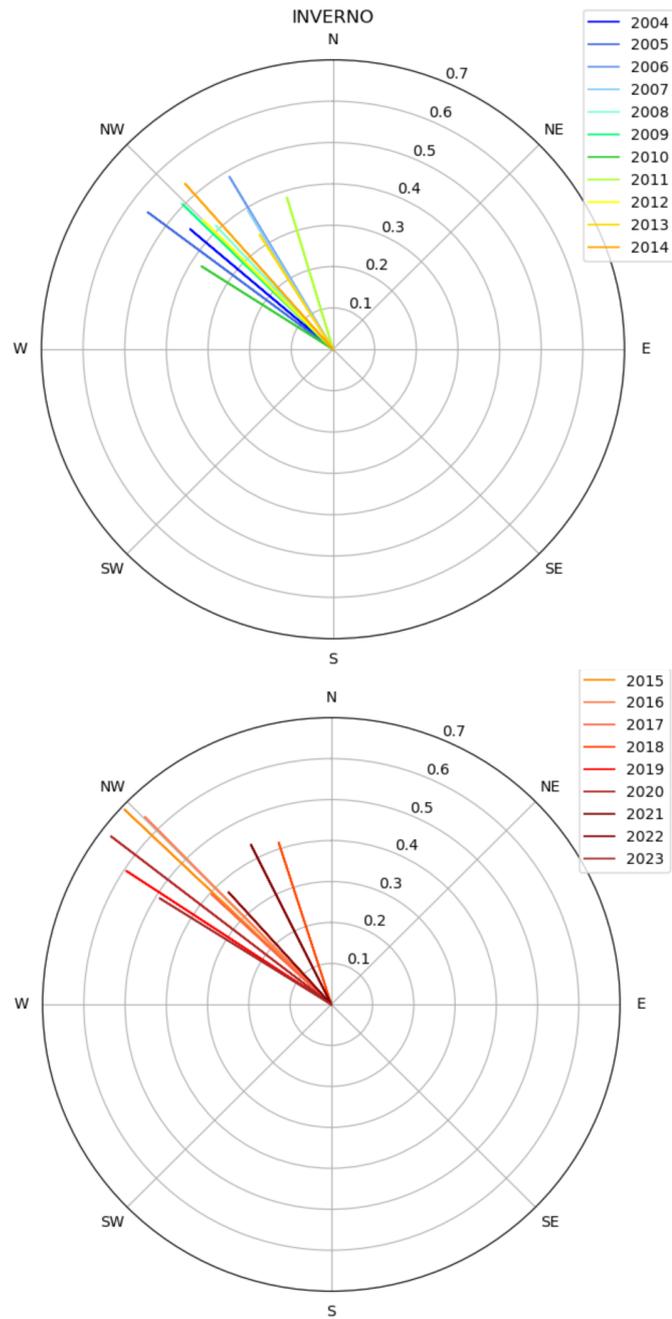
Dal grafico a dispersione riportato in figura 3.36 non emerge una chiara relazione di dipendenza tra la velocità e la direzione del vento. Tuttavia, si osserva una maggiore concentrazione di punti nelle aree circostanti le coppie di valori  $(2 \text{ m/s}, 50 \text{ gradi})$  e  $(2 \text{ m/s}, 300 \text{ gradi})$ .

In seguito, per analizzare l'evoluzione della direzione del vento in relazione alla sua velocità, si procede calcolando inizialmente la media annuale del vettore velocità del vento e, successivamente, la media stagionale dello stesso vettore per ciascun anno. Questo approccio consente di osservare come tali parametri varino annualmente nel periodo compreso tra il 2004 e il 2023. I vettori vengono inoltre posizionati su

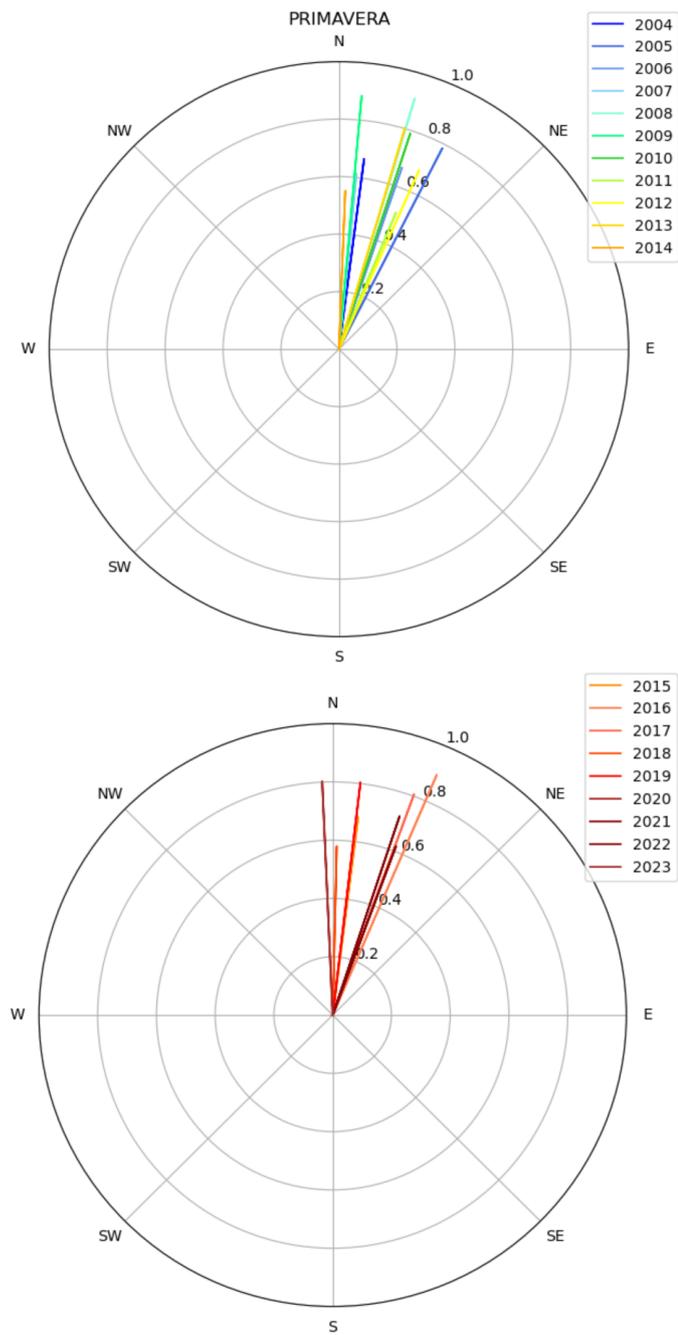
una rosa dei venti in modo da capirne meglio la direzione e con il colore che varia in base ad una scala e seguendo l'evoluzione temporale. Le rose dei venti sono riportate in figura 3.37, 3.38, 3.39, 3.40 e 3.41.



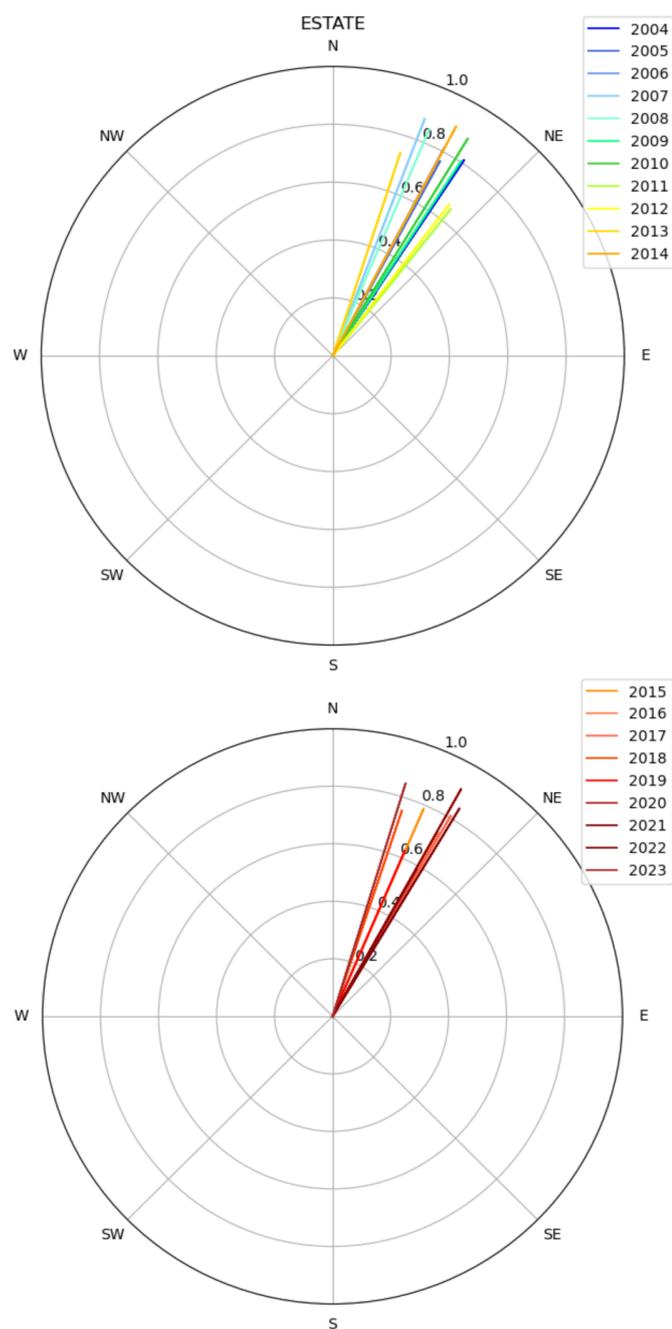
**Figura 3.37:** In figura sono presenti due rose dei venti nelle quali sono posizionati i vettori delle velocità del vento risultanti per ogni anno. Ogni vettore risultante sarà rappresentato con un colore differente in base all'anno che rappresenta.



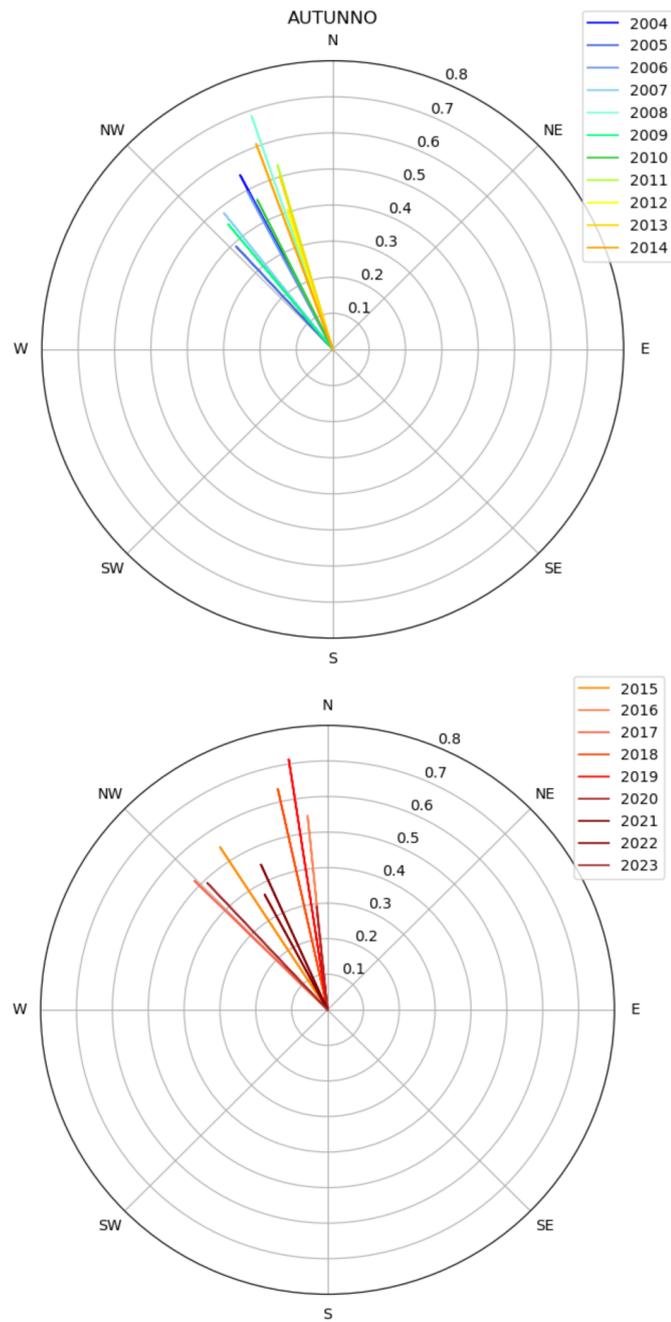
**Figura 3.38:** In figura sono presenti due rose dei venti nelle quali sono posizionati i vettori delle velocità del vento risultanti per ogni anno durante il periodo invernale. Ogni vettore risultante sarà rappresentato con un colore differente in base all'anno che rappresenta.



**Figura 3.39:** In figura sono presenti due rose dei venti nelle quali sono posizionati i vettori delle velocità del vento risultanti per ogni anno durante il periodo primaverile. Ogni vettore risultante sarà rappresentato con un colore differente in base all'anno che rappresenta.



**Figura 3.40:** In figura sono presenti due rose dei venti nelle quali sono posizionati i vettori delle velocità del vento risultanti per ogni anno durante il periodo estivo. Ogni vettore risultante sarà rappresentato con un colore differente in base all'anno che rappresenta.



**Figura 3.41:** In figura sono presenti due rose dei venti nelle quali sono posizionati i vettori delle velocità del vento risultanti per ogni anno durante il periodo autunnale. Ogni vettore risultante sarà rappresentato con un colore differente in base all'anno che rappresenta.

Osservando figura 3.37 è possibile notare la distribuzione dei venti diretta verso il nord con una maggiore dispersione della direzione del vento negli ultimi anni del ventennio. Questo risulta essere supportato dai trend stagionali in quanto questi risultano essere distribuiti verso Nord-Ovest nelle figure 3.38 (inverno) e 3.41 (autunno) e verso Nord-Est nelle figure 3.39 (primavera) e 3.40 (estate).

# Conclusione

La presente tesi ha esaminato l'influenza delle condizioni meteorologiche sulla qualità dell'aria nella città di Torino, in particolare nel quartiere di San Salvario. Attraverso l'analisi condotta con il modello SIRANE, è stato possibile comprendere come la dispersione degli inquinanti, in particolare gli ossidi di azoto ( $NO_X$ ), sia strettamente legata ai parametri meteorologici come la velocità del vento e la temperatura.

I risultati hanno evidenziato il ruolo cruciale del vento nella dispersione degli inquinanti: venti più intensi facilitano il ricambio d'aria e riducono le concentrazioni di  $NO_X$ , mentre venti deboli o condizioni di stasi atmosferica favoriscono il ristagno degli inquinanti, peggiorando la qualità dell'aria. Inoltre, si è osservato che, negli ultimi vent'anni, una riduzione delle ore di elevata radiazione solare ha portato la lunghezza di Monin-Obukhov ad assumere valori negativi di entità medio-alta, con effetti negativi sulle concentrazioni di ossidi di azoto, soprattutto in determinati periodi dell'anno.

Nonostante i risultati significativi, questa ricerca presenta alcune limitazioni. In primo luogo, l'analisi si è concentrata su un singolo quartiere di Torino, sebbene i fenomeni analizzati possano variare sensibilmente in altre zone della città o in contesti urbani diversi. Inoltre, non tutti i parametri meteorologici sono stati presi in considerazione all'interno dell'analisi di sensitività e in quella statistica. Ad esempio le precipitazioni, che tendono a ridurre le concentrazioni di inquinanti nell'aria, non sono state considerate all'interno del presente studio. Un ulteriore lavoro quindi potrebbe tenere in considerazione questo parametro e le relazioni che lo legano al coefficiente di Priestley-Taylor per permettere una maggiore comprensione del fenomeno fisico di dispersione.

L'importanza di questi risultati si riflette anche nelle possibili implicazioni pratiche per le politiche ambientali. La comprensione delle dinamiche atmosferiche e del loro impatto sulla qualità dell'aria potrebbe guidare l'implementazione di misure più efficaci per ridurre l'inquinamento nelle aree urbane. Ad esempio, l'adozione di strategie che tengano conto delle previsioni meteorologiche potrebbe permettere interventi tempestivi, come la limitazione del traffico durante periodi di bassa ventilazione.

Oltre alle applicazioni locali, questo studio solleva questioni di rilevanza globale. In un contesto di cambiamento climatico, l'aumento delle temperature e le variazioni nelle condizioni meteorologiche potrebbero aggravare i problemi di qualità dell'aria, rendendo ancora più urgente l'adozione di misure efficaci per il contenimento delle emissioni. Questo aspetto evidenzia la necessità di politiche climatiche che non solo affrontino la riduzione delle emissioni di gas serra, ma che tengano conto anche degli effetti sulla qualità dell'aria nelle città.

In conclusione, questa tesi ha l'obiettivo di fornire un contributo significativo alla comprensione delle interazioni tra meteo e inquinamento atmosferico in contesti urbani. Pur riconoscendo i limiti e le opportunità di miglioramento, i risultati ottenuti offrono spunti utili per lo sviluppo di politiche ambientali più efficaci e per future ricerche che potrebbero portare a un miglioramento concreto della qualità dell'aria nelle città.

# Bibliografia

- [1] World Health Organization. *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. 2021. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228> (cit. a p. 1).
- [2] L. Soulhac, P. Salizzoni, F.-X. Cierco e R. Perkins. «The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion; part I, presentation of the model». In: *Atmospheric Environment* 45 (lug. 2011), pp. 7379–7395 (cit. alle pp. 1, 4, 14, 16).
- [3] L. Soulhac, P. Salizzoni, P. Mejean, D. Didier e I. Rios. «The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion; PART II, validation of the model on a real case study». In: *Atmospheric Environment* 49 (nov. 2012), pp. 320–337 (cit. alle pp. 1, 3, 21, 22, 24, 25, 27, 49).
- [4] ARPA Piemonte Richiesta Dati. *Richiesta dati meteorologici orari*. 2024. URL: [https://webgis.arpa.piemonte.it/radar/open-scripts/richiesta\\_dati\\_hh\\_2024.php](https://webgis.arpa.piemonte.it/radar/open-scripts/richiesta_dati_hh_2024.php) (cit. alle pp. 2, 52).
- [5] Nieuwstadt, F.T.M., Tennekes e H. «A rate equation for the nocturnal boundary layer height». In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 38 (1981), pp. 1418–1428 (cit. a p. 11).
- [6] Batchvarova, E., Gryning e S.-E. «Applied model for the growth of the daytime mixed layer». In: *Boundary-Layer Meteorology* 56 (1991), pp. 261–274 (cit. a p. 11).
- [7] Garratt e J.R. «The atmospheric boundary layer». In: *Cambridge Atmospheric and Space Science Series* (1992) (cit. a p. 12).
- [8] T. R. Oke. *Boundary Layer CLimates*. Taylor & Francis e-Library, 2002 (cit. a p. 14).
- [9] Holtslag, A.A.M., Van Ulden e A.P. «A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data». In: *Journal of Climate and Applied Meteorology* 22 (1983), pp. 517–529 (cit. a p. 15).

- 
- [10] Priestley, C.H.B., Taylor e R.J. «On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters». In: *Monthly Weather Review* 100 (1972), pp. 81–92 (cit. a p. 15).
- [11] De Bruin, H.A.R., Holtslag e A.A.M. «A simple parameterization of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime compared with the PenmanMonteith concept». In: *Journal of Applied Meteorology* 21 (1982), pp. 1610–1621 (cit. a p. 15).
- [12] F. Kasten, Czeplak e G. «Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud». In: *Solar Energy* 24 (1980), pp. 177–189. (Cit. alle pp. 15, 16).
- [13] L. Soulhac, S. Fellini, C. V. Nguyen e P. Salizzoni. «Evaluation of Photostationary and Non-Photostationary Operational Models for NOX Pollution in a Street Canyon». In: *Atmospheric Environment* 297 (2023) (cit. a p. 16).
- [14] MacDonald, R.W., Griffiths, R.F., Hall e D.J. «An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays». In: *Atmos. Env.* 32-11 (1998), pp. 1857–1864 (cit. a p. 27).
- [15] Gryning, E. Batchvarova, Brümmner, H. Jørgensen e S. Larsen. «On the extension of the wind profile over homogeneous terrain beyond the surface boundary layer». In: *Boundary-Layer Meteorol* 124 (2007), pp. 251–268 (cit. a p. 56).
- [16] ARPA Piemonte. *Andamento delle temperature - Anni 1958-2023*. 2024. URL: <https://relazione.ambiente.piemonte.it/2024/andamento-delle-temperature-anni-1958-2023> (cit. a p. 59).
- [17] ARPA Lombardia. *La stazione di Milano Brera*. 2024. URL: <https://www.arpalombardia.it/temi-ambientali/meteo-e-clima/clima/la-stazione-di-milano-brera/> (cit. a p. 59).
- [18] ISPRA. *Gli indicatori del clima in Italia del 2021*. 2022. URL: [https://www.isprambiente.gov.it/files2022/pubblicazioni/stato-ambiente/rapporto\\_clima\\_2021.pdf](https://www.isprambiente.gov.it/files2022/pubblicazioni/stato-ambiente/rapporto_clima_2021.pdf) (cit. a p. 59).
- [19] NASA. *Global Temperature*. URL: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/?intent=121> (cit. a p. 59).