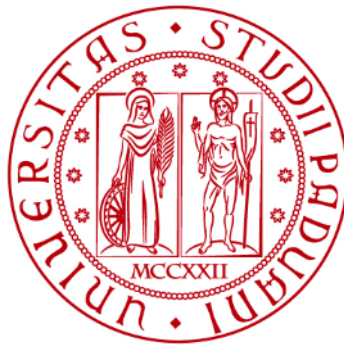


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE**  
*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



**TESI DI LAUREA**

**Mobile mapping, sniffer bikes e Citizen Science:  
dispositivi mobili per il monitoraggio diffuso della  
qualità dell'aria e delle isole di calore a Padova.**

**Relatore:** Prof. Salvatore Pappalardo

**Correlatore:** Dott. Carlo Zanetti

**Laureando:** Marco Carraro

**ANNO ACCADEMICO 2022-2023**



## Abstract

Negli ultimi anni l'evoluzione e l'accesso alle GeoICT ed alle tecnologie di sensoristica MEMS stanno offrendo nuove opportunità per il *mobile mapping* meteo-climatico ed il monitoraggio della qualità dell'aria. Il dibattito tecnico-scientifico oggi, tuttavia, si polarizza tra l'utilizzo di stazioni ufficiali di misure atmosferiche e quello che integra micro-sensoristica *low cost* su dispositivi mobili. Le prime acquisiscono dati ad elevata accuratezza ed affidabilità, abbinate però ad elevati costi e scarsa diffusione sul territorio; i secondi, invece, permettono di generare elevate quantità di dati georeferenziati acquisiti su ampie porzioni di territorio, consentendo quindi un monitoraggio spazialmente diffuso, a discapito di una minor accuratezza del dato. Tra i diversi dispositivi mobili per la mappatura di parametri atmosferici, le "*sniffer bikes*" rappresentano in tal senso un ottimo esempio di sfruttamento di sensori a basso costo abbinati al coinvolgimento attivo di normali cittadini. L'acquisizione e generazione di dati si basa sugli approcci propri della *Citizen Science*: tramite un processo partecipato, si affida l'uso di strumentazione tecnica a cittadini non professionisti in modo da sfruttare, per l'acquisizione dei parametri ambientali, i loro spostamenti quotidiani soprattutto nelle aree urbane. L'obiettivo del presente studio è testare e valutare prestazioni ed accuratezza di due dispositivi per il *mobile mapping sniffer bike*, per il monitoraggio ambientale diffuso partecipato, attualmente presenti sul mercato internazionale: MeteoTracker e Sodaq AIR. Le analisi si basano su prove e test sperimentali dei dispositivi, sia in condizioni ambientali controllate (acquisizione dati in modalità statica e dinamica) che nella dimensione "*real-world*" su scala urbana, a Padova. Le prove sono state svolte attraverso confronti con un termometro di precisione calibrato e certificato (accuratezza  $\pm 0.08$  °C) e con le stazioni ufficiali Arpav per quanto concerne i dati di qualità dell'aria. In secondo luogo, una volta comprovata la loro efficienza, sono stati analizzati i dati raccolti da tali sensori su più mesi nell'area urbana di Padova, per verificare la qualità dell'aria e le isole di calore di alcune delle zone principali della città. I risultati di tale sperimentazione rappresentano un primo contributo alla comprensione della qualità dei dati generati dall'uso di *sniffer bikes* per lo studio degli eventi meteo-climatici estremi e per il monitoraggio della qualità dell'aria.





# Indice

1. Introduzione .....	1
1.1 Il ruolo della <i>Citizen Science</i> .....	1
1.2 Qualità dell'aria e salute in Unione Europea .....	2
1.2.1 Qualità dell'aria in Pianura Padana.....	5
1.3 <i>Device</i> mobili e per il monitoraggio ambientale: <i>le sniffer bikes</i> .....	7
1.4 <i>Citizen Science</i> per il monitoraggio ambientale: progetti nazionali e internazionali.....	8
1.5 Obiettivi .....	11
2. Materiali e metodi .....	13
2.1 Materiali .....	13
2.1.1 Termometro Lutron.....	13
2.1.2 Dispositivo mobile MeteoTracker .....	14
2.1.3 Sodaq AIR .....	15
2.1.4 <i>Softwares</i> per l'elaborazione dei dati .....	17
2.2 Metodi .....	17
2.2.1 Test in modalità statica: temperatura .....	17
2.2.2 Sodaq AIR post aggiornamento <i>firmware</i> (gennaio 2023).....	17
2.2.3 Test in statica: qualità dell'aria .....	18
2.2.4 Test in modalità dinamica.....	18
2.2.5 <i>Mobile Mapping</i> nella città di Padova .....	19
2.2.6 Elaborazione e analisi dati ambientali .....	19
3. Risultati e discussione.....	25
3.1 Modalità statica: test e analisi comparativa dei valori termometrici .....	25

3.2 Test e analisi comparativa dei valori termometrici in modalità statica: dispositivo Sodaq AIR .....	27
3.3 Test e analisi comparativa PM 2.5: Sodaq AIR versus stazione ARPAV Monselice .....	29
3.4 Test e analisi comparativa in modalità dinamica: Sodaq AIR versus MeteoTracker .....	30
3.5 Test in dinamica: analisi della correlazione .....	32
3.6 Test in dinamica: scarto medio e deviazione standard .....	33
3.7 Test in dinamica: confronto umidità – delta T (Sodaq Air e MeteoTracker) .....	34
3.8 Test in dinamica: rappresentazione su QGIS .....	37
3.9 Raccolta dati a Padova, calcolo km totali .....	40
3.10 Raccolta dati a Padova, temperatura e PM 2.5 su giornate selezionate .....	41
3.11 Raccolta dati a Padova, confronto temperature con stazione meteo del Portello e concentrazioni di PM 2.5 .....	46
4. Conclusioni .....	49
5. Ringraziamenti .....	50
6. Bibliografia .....	51
7. Sitografia .....	52
Allegato 1 .....	54
Allegato 2 .....	55
Allegato 3 .....	60





# 1. Introduzione

## 1.1 Il ruolo della *Citizen Science*

La necessità di monitorare costantemente i parametri ambientali delle città - sempre più estese e popolate - ha portato negli ultimi anni al coinvolgimento diretto dei cittadini nella raccolta dei dati e nelle attività di ricerca. Questo processo, chiamato appunto *Citizen Science*, applicato al focus di questa tesi su monitoraggio della qualità dell'aria e delle isole di calore in città, si traduce nella creazione di *devices*, in grado di raccogliere campioni d'aria, che vengono acquisiti, generati e condivisi direttamente ai cittadini. Questi campioni vengono poi analizzati dagli strumenti stessi, restituendo dati di varia natura, e ciò permette di aumentare notevolmente la mole di dati a disposizione dei ricercatori, ed inoltre si viene a creare una mappatura della città stessa mostrando le differenze tra le varie zone soggette a raccolta dei campioni. I cittadini passano quindi ad avere un ruolo attivo nelle attività di ricerca, finalizzate al monitoraggio delle condizioni in città che favoriscano un ambiente il più salubre possibile per la vita degli abitanti stessi. Tale idea, nata negli anni passati, sta prendendo sempre più piede principalmente all'estero. Grazie a questo processo, i cittadini possono diventare attivi e protagonisti sul territorio e supportare i processi locali di *decision-making* (Rubio-Iglesias et al., 2020). Recentemente anche in Italia si stanno diffondendo tali approcci di *Citizen Science* aprendo nuove prospettive ed opportunità. Secondo Blandino (2022) infatti: "Spesso lo standard nel mondo della ricerca è rappresentato da sensori ad altissima precisione e dal costo non irrisorio. Ma quando dal laboratorio si passa al mondo reale la sensoristica di alto livello non è per forza la soluzione ideale: la precisione dei dati raccolti potrebbe risultare eccessiva rispetto all'effettivo utilizzo che se ne fa, mentre i costi lieviterebbero a dismisura". L'autore continua citando come esempio il monitoraggio ambientale, con riferimento in particolare alla raccolta di dati sulla qualità dell'aria, caratterizzato da stazioni fisse di rilevamento che utilizzano sensoristica raffinata e costosa riportando dati precisi ma riferiti solo a certe zone della città (Blandino, 2022). Viene proposta come alternativa possibile, complementare a tali stazioni, l'utilizzo di sensori *low cost* applicati alle biciclette per una mappatura più dettagliata dell'intera città (Blandino, 2022).

## 1.2 Qualità dell'aria e salute in Unione Europea

“Air pollution is a major health concern for Europeans. In 2020 in the European Union, 96% of the urban population was exposed to levels of fine particulate matter above the health-based guideline level set by the World Health Organization”. Con questa frase l’Agenzia di Protezione Ambientale europea (EEA, 2022) evidenzia la problematica della qualità dell’aria nelle principali città, mettendo a fuoco soprattutto le implicazioni sulla salute delle polveri sottili come il PM 2.5, il PM 10 e l’ozono (O3). I dati riportati in figura 1, riferiti per di più all’anno 2020 dove si sono registrate diminuzioni delle concentrazioni medie soprattutto di NO<sub>2</sub> dovute al *lockdown*, mostrano come il problema della qualità dell’aria sia una delle maggiori preoccupazioni per quanto riguarda l’Unione Europea in tema di salute e sicurezza.

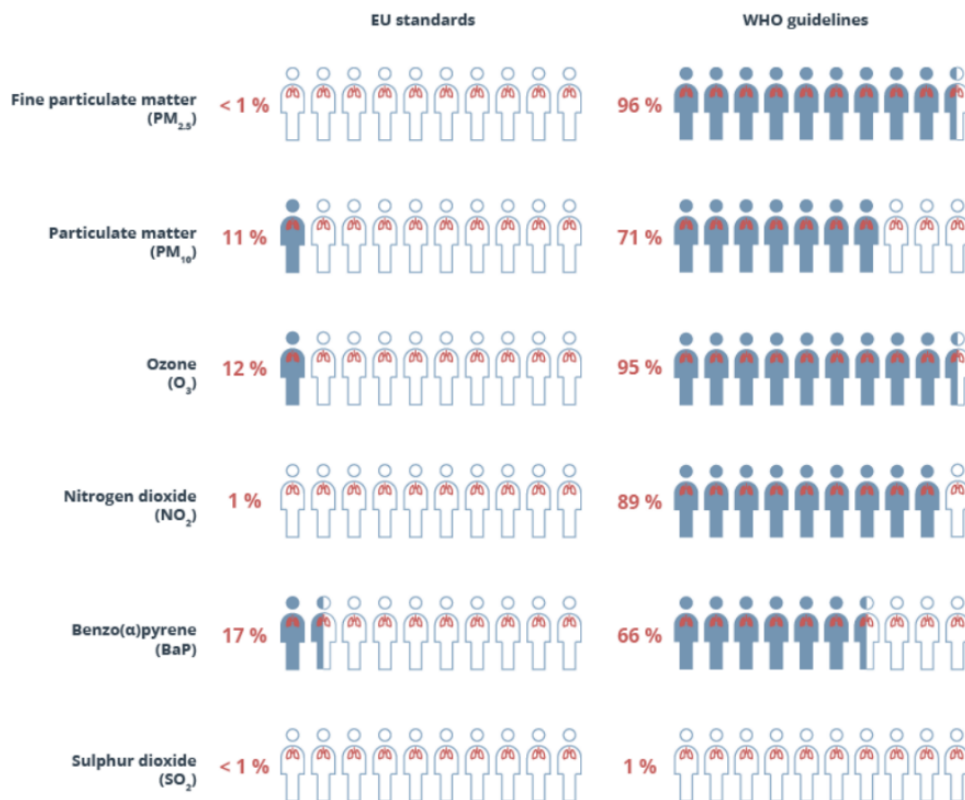


Figura 1 – Percentuale di popolazione dell’Unione Europea esposta a valori di inquinanti atmosferici sopra agli *standard* europei e alle linee guida della WHO (EEA, 2022)

La differenza tra gli standard imposti dall’Unione Europea e le linee guida dettate dalla *World Health Organization* (WHO) non deve ingannare rispetto alla gravità del problema, visto che infatti i primi sono molto meno stringenti rispetto ai secondi: ad esempio, per quanto riguarda la concentrazione di PM 2.5, l’EU impone un limite su base media annua di 25 µg/m<sup>3</sup> contro i 5 µg/m<sup>3</sup> suggeriti dalla WHO. Il superamento di tali valori, si è tradotto in conseguenze dal punto di vista di salute e sicurezza

dei cittadini dell'Unione. Secondo i dati dell'EEA, infatti, nell'anno 2020 l'inquinamento dell'aria ha portato ad un aumento significativo di morti premature nei 27 Stati membri. L'esposizione a polveri sottili come il particolato ha comportato circa 238 mila morti premature; l'esposizione al diossido di azoto NO<sub>2</sub> e all'ozono O<sub>3</sub> ha comportato rispettivamente 49 mila e 24 mila morti premature (EEA, 2022). Accanto a tali numeri, si affiancano quelli relativi alla popolazione affetta da patologie legate alla *air pollution*, le quali vengono stimate in YLDs (“*yars lived with disability*”), ovvero anni di vita vissuti con una disabilità dovuta a problemi polmonari. Per il 2019, i numeri riportati dall'EEA riguardo a tale categoria parlano di oltre 175 mila YLDs sia per l'esposizione ai PM 2.5 sia all'esposizione al NO<sub>2</sub> (EEA, 2022).

“L'inquinamento dell'aria è il più grande rischio ambientale per la salute in Europa, causando malattie cardiovascolari e respiratorie che portano alla perdita di anni di vita in buona salute e, nei casi più gravi, a morti premature.” (EEA, 2022)

Uno degli obiettivi del *Green Deal* Europeo è proprio quello di ridurre l'inquinamento di aria, acqua e suolo fino a livelli che non siano più pericolosi per la salute umana e per gli ecosistemi naturali entro il 2050. Tale volontà è stata tradotta nel piano d'azione dell'UE "Verso l'inquinamento zero per l'aria, l'acqua e il suolo", adottato il 12 maggio 2021 dalla Commissione Europea, e che fissa traguardi a medio e lungo termine per il raggiungimento degli obiettivi fissati. Il target “*zero pollution*” include, tra i suoi obiettivi, il ridurre il numero di morti premature dovute all'inquinamento dell'aria di almeno il 55% rispetto ai numeri del 2005 (vedi figura 2), e ridurre di almeno il 25%, sempre rispetto al 2005, gli ecosistemi dove le *air pollutions* minacciano la biodiversità. (EEA, 2022)

Tale volontà ha anche portato alla pubblicazione il 26 ottobre 2022, da parte della Commissione Europea, di un'istanza per la revisione delle direttive europee in tema di qualità dell'aria. Le misure chiave prevedono:

- Soglie più severe per l'inquinamento dell'aria, più in linea ai nuovi limiti fissati dall'Organizzazione Mondiale della Sanità;
- Rinforzare il diritto all'aria pulita, tramite anche l'utilizzo della giustizia legale;
- La normativa vigente non prevede la possibilità per i cittadini di chiedere il risarcimento dei danni alla salute dovuti all'inquinamento atmosferico. Le nuove regole porteranno sanzioni più efficaci e possibilità di risarcimento per la violazione delle norme sulla qualità dell'aria;
- Rafforzamento delle norme per il monitoraggio della qualità dell'aria a sostegno di azioni preventive e misure mirate;

- Miglioramento dei modelli per lo studio della qualità dell'aria, in particolare dove essa è particolarmente scadente;
- Migliore informazione pubblica.

(EEA, 2022)

Nonostante i livelli d'inquinamento ancora alti, la strada per raggiungere la *zero pollution* è stata tracciata, anche se sforzi ulteriori saranno necessari per raggiungere la completa neutralità. Già nel 2020, infatti, è stata raggiunta una diminuzione del 45% delle morti in Unione Europea dovute all'inquinamento dell'aria rispetto al 2005 (vedi figura 2), e se il *trend* dovesse continuare l'obiettivo fissato al 2030 di una diminuzione del 55% sarebbe raggiunto prima dell'anno fissato (EEA, 2022). Dal 2020 però, come specifica la EEA, non sono state implementate nuove politiche per migliorare la qualità dell'aria, e di conseguenza dovranno essere fatti ancora sforzi per raggiungere al 2050 la *zero pollution*, (EEA, 2022)

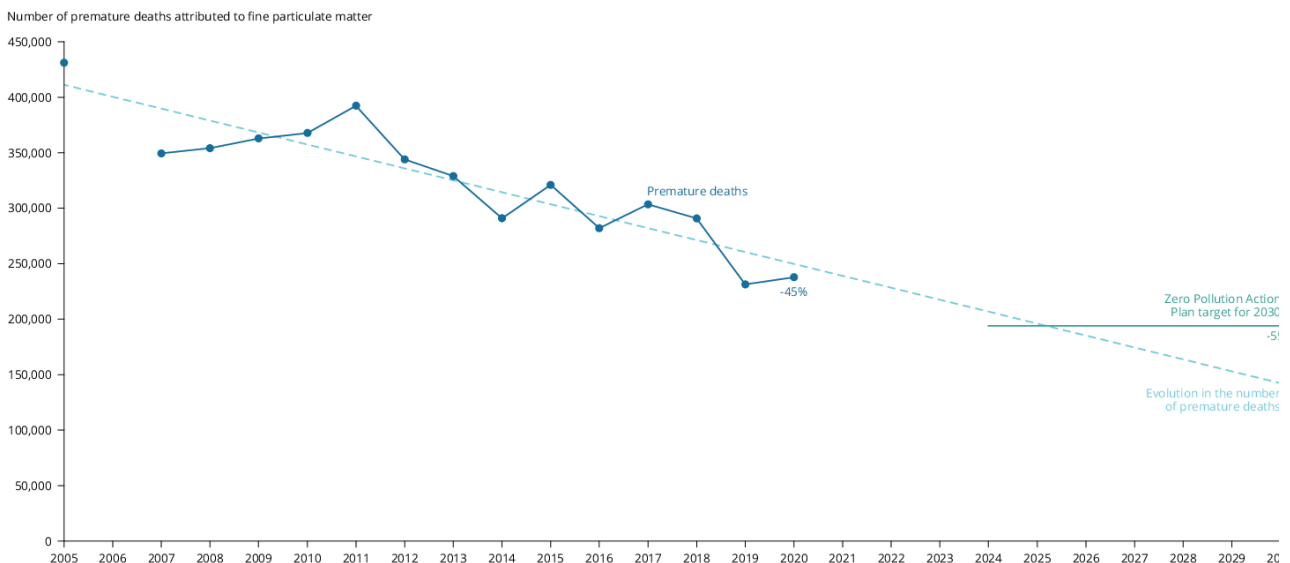


Figura 2 – Numero di morti per anno nell'Unione Europea attribuiti all'inquinamento da polveri sottili dal 2007  
(EEA, 2022)



### 1.2.1 Qualità dell'aria in Pianura Padana

Come si può vedere dalle figure 3 e 4 estratte dal rapporto “*Europe’s air quality status 2022*” della EEA (2022), la Pianura Padana risulta essere una delle zone in Europa più inquinate dal punto di vista della qualità dell’aria. Ciò è dovuto sia all’intensa attività industriale lungo tutto il territorio, sia alla conformazione geografica della regione stessa. Come riporta infatti l’Agenzia di Protezione Ambientale ARPA Lombardia (2017), “La configurazione geografica e le caratteristiche meteorologiche tipiche della Pianura Padana sono tali per cui quest’area è di fatto un unico bacino omogeneo nel quale il PM10 e l’ozono tendono a diffondersi in modo uniforme e, in condizioni di stabilità atmosferica, ad accumularsi.” Un sistema efficace di monitoraggio dell’aria in queste zone risulta quindi necessario al fine di preservare la salute e la qualità della vita dei cittadini.

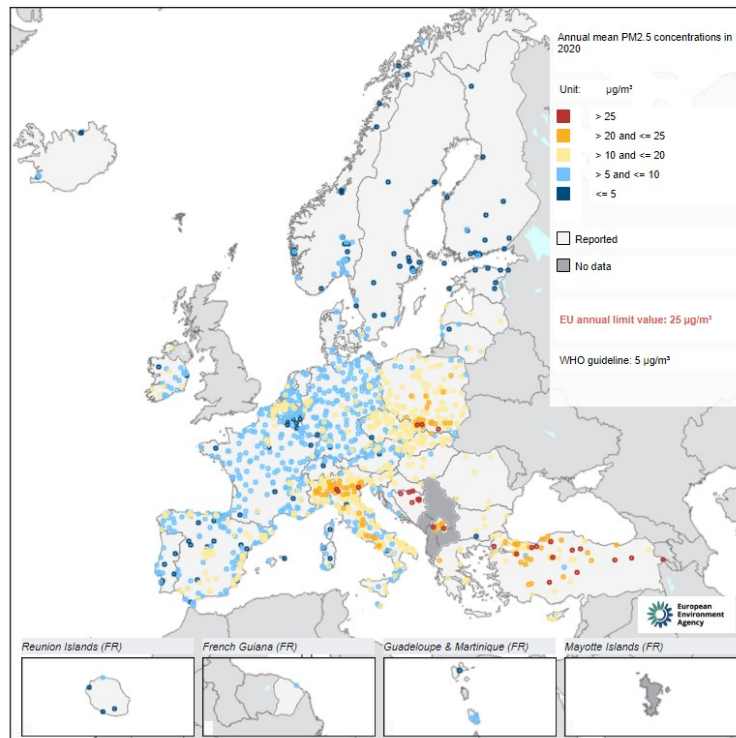


Figura 3 – Concentrazione di PM 2.5 nel 2020 in relazione ai limiti annuali dell'EU ed alle linee guida della WHO (EEA, 2022)

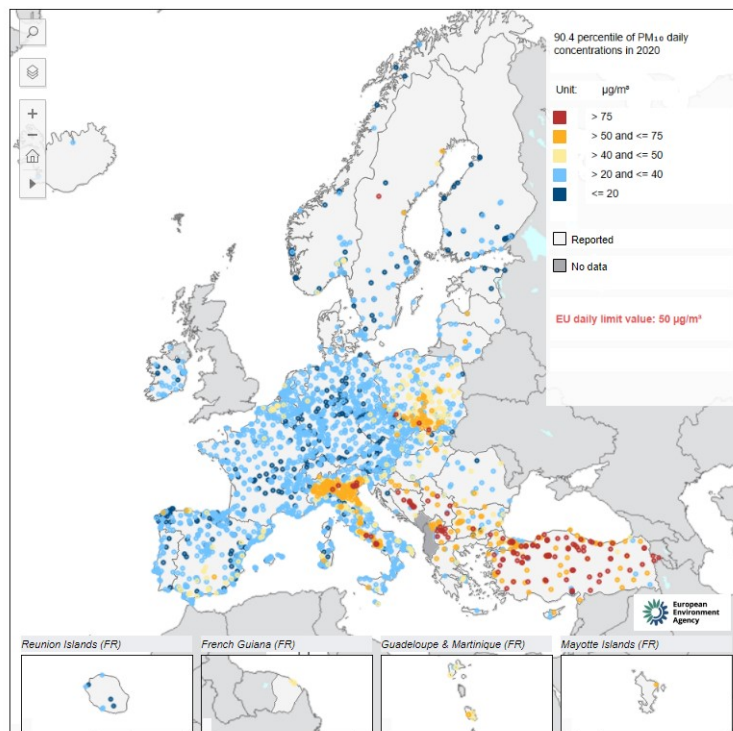


Figura 4 – Concentrazione di PM 10 nel 2020 in relazione ai limiti giornalieri dell'EU ed alle linee guida della WHO (EEA, 2022)

### 1.3 *Device* mobili per il monitoraggio ambientale: le *sniffer bikes*

“Oggi la qualità dell'aria viene misurata principalmente attraverso stazioni di monitoraggio statiche, con conseguenti informazioni limitate sugli inquinanti tossici nel nostro ambiente. E se potessimo saperne di più sulla qualità dell'aria, in qualsiasi momento, e allo stesso tempo stimolare modalità di trasporto sane?”. Con questo *key concept*, i *device* mobili per la mappatura della qualità dell'aria si stanno rapidamente diffondendo sul mercato (FIWARE, 2020).

Le così dette *sniffer bikes* nascono proprio dall'idea sopra citata e dalla necessità di integrare i *devices* per il raccoglimento dati nella vita di routine dei cittadini: i dispositivi *low cost* vengono progettati per essere montati sulle biciclette, rendendo così possibile la raccolta dei campioni d'aria durante gli spostamenti quotidiani per la città. Ciò permette quindi di coprire tante più parti della città quanti sono i dispositivi in movimento, avendo poi una disponibilità di dati abbondante e pressoché quotidiana. I vantaggi derivanti da questo tipo di scelta sono molteplici, ad esempio: stimolare i ciclisti a scegliere strade e percorsi meno inquinati; aiutare i soggetti con patologie respiratorie ad evitare certi livelli di inquinamento dell'aria in momenti della giornata o zone della città differenti; aiutare le amministrazioni locali e provinciali nel prendere decisioni dal punto di vista urbanistico; aiutare le organizzazioni di ricerca a raccogliere più dati per una migliore comprensione dell'inquinamento dell'aria; supportare la neutralità climatica. (FIWARE, 2020)

Tra gli svantaggi, c'è l'impossibilità di poter creare e consegnare un gran numero di strumenti ad alta precisione (sia per i costi che ciò implicherebbe, sia per il fatto che i cittadini coinvolti non sono professionisti ma semplici appassionati). Questo comporta che i sensori non forniscano dati con elevata accuratezza, e ciò rende necessaria una successiva rielaborazione degli stessi per verificarne la bontà. Tuttavia, numerosi sono gli studi compiuti a livello europeo e mondiale su tale implementazione della *Citizen Science*. Di seguito un breve riassunto di alcune pubblicazioni insieme ai risultati ottenuti.

## 1.4 *Citizen Science* per il monitoraggio ambientale: progetti nazionali e internazionali

### 1) “*Measuring temporal and spatial exposure of urban cyclists to air pollutants using an instrumented bike*”

Tale progetto, condotto ad Atlanta (Georgia, USA), tra il gennaio 2018 ed il giugno del 2019, ha lo scopo di perfezionare l’uso delle biciclette ai fini della raccolta dei dati sulla qualità dell’aria, e per mappare l’esposizione dei ciclisti che utilizzano i percorsi ciclabili della città stessa. Oggetto di studio furono quindi in particolare i PM 2.5; i campioni d’aria furono raccolti compiendo diverse volte gli stessi quattro percorsi prestabiliti all’interno della città in giorni e orari diversi. Furono scelti inoltre due percorsi aggiuntivi per verificare l’esposizione dei ciclisti ai PM 2.5 durante diversi momenti della giornata. Anche per la scelta dei sensori da utilizzare è stata fatta una selezione tra tre candidati, optando infine, dopo una iniziale calibrazione, per i sensori *low cost* PMS5003. Lo studio ha confermato le ipotesi iniziali, mostrando come la concentrazione di PM 2.5 sia altamente influenzata dalla presenza di traffico nelle strade oggetto d’esame. Ha però messo anche in evidenza come i fattori ambientali siano più importanti, per quanto riguarda l’esposizione dei ciclisti alle polveri sottili, rispetto alla vicinanza effettiva ai veicoli in determinate zone dei percorsi (Schaffer et al., 2019).

### 2) “*A bicycle-borne sensor for monitoring air pollution near roadways*”

I ricercatori di questo progetto (giugno 2015) hanno dato vita ad un proprio sensore per l’analisi della qualità dell’aria, il quale è stato poi valutato, ed infine è stato utilizzato nelle strade di Changzhou (Cina). Risultata evidente anche in questo lavoro l’influenza del traffico per quanto riguarda la concentrazione di PM nei campioni d’aria (Liu et al., 2015).

### 3) *MeteoTracker*

*MeteoTracker* è un sensore sviluppato dalla IoToyon srl, in grado di raccogliere campioni d’aria ricavandone temperatura e umidità relativa. Può essere montato sia sulle *sniffer bikes*, sia sul tettuccio delle automobili. Si attiva tramite il movimento, e comunica i dati tramite un *app mobile*. I ricercatori del Politecnico di Torino si sono serviti di tale sensore per effettuare una campagna di raccolta dati proprio all’interno della città metropolitana di Torino tra l’inizio di settembre e metà novembre 2021, attraverso sia misurazioni in bici sia in macchina, a diverse altitudini e con diverse condizioni meteorologiche. Le elaborazioni dei dati hanno confermato la validità dello strumento (Antonicciello, 2021).

4) *“Leveraging Citizen Science and low-cost sensors to characterize air pollution exposure of disadvantaged communities in Southern California”*

In questo studio, il monitoraggio dei PM 2.5 effettuato tra giugno e dicembre 2021 tramite sensori *low cost*, ha messo in evidenza come le zone occupate da comunità più “svantaggiate” (povertà, alti tassi di disoccupazione, et cetera) siano soggette a maggiori concentrazioni di polveri sottili. Inoltre, le concentrazioni medie sono risultate maggiori durante il periodo invernale rispetto a quello estivo. Gli autori dello studio sono arrivati ad affermare che, intervenendo sull’ambiente urbano, sia possibile ridurre le disuguaglianze dal punto di vista dell’esposizione agli inquinanti atmosferici, e i sensori *low cost* in tal senso permetterebbero sia di individuare gli *hotspots* di emissioni, sia di monitorare proprio le disparità di esposizione alle polveri sottili (Lu et al., 2022).

5) *iSPEX project: “Citizen Science and Environmental Protection Agencies: engaging citizens to address key environmental challenges”*

L’articolo, del 4 dicembre 2020, tratta il rapporto tra EPAs e la *Citizen Science* e di come, negli ultimi anni, grazie allo sviluppo di Internet e delle tecnologie legate ai *mobile devices*, stia diventando sempre più comune l’affidarsi ai cittadini per affrontare le così dette “*environmental challenges*”. L’articolo racchiude infatti diverse iniziative, relative a sfide di carattere ambientale, che hanno visto la partecipazione attiva dei cittadini: tracciamento della perdita di biodiversità in Estonia, monitoraggio dell’inquinamento dei mari in Europa, piattaforme lanciate dalle EPA nazionali aperte ai cittadini per la comunicazione di dati su varie attività ambientali (come il monitoraggio della proliferazione di specie invasive di granchi e meduse nel Mar Baltico, o informazioni sul *bloom* algale, promosse dal governo finlandese) et cetera. Ma il progetto più vicino alla tematica di questa tesi, è quello intrapreso nei Paesi Bassi nel 2012: il progetto iSPEX prevedeva la misura di aerosol tramite degli *add-on* sulle camere degli *iPhone* dei cittadini. I partecipanti furono più di 3 mila, con oltre 10 mila osservazioni registrate. Il merito di tale iniziativa, più che i risultati della stessa, è stato quello di attirare l’attenzione della RIVM (Istituto Nazionale Olandese dei Paesi Bassi per la Salute Pubblica e l’Ambiente) sulle potenzialità della *Citizen Science*. Questo ha portato alla creazione nel 2016 del programma *Samen Meten* (“Misuriamo Insieme”), con lo sviluppo di un portale *open data* aperto ai cittadini per caricare/scaricare informazioni sulla qualità dell’aria, sensori e altre iniziative di *Citizen Science* alle quali partecipare (Rubio-Iglesias et al., 2020).

6) *Sniffer bike project (Sodaq): “Cycle routes and air quality monitoring with real citizen’s engagement”*

L’articolo è del 1° ottobre 2020, e mostra il progetto di utilizzo delle *sniffer bikes* iniziato nel 2018 dalla provincia di Utrecht (Paesi Bassi) per convogliare il bisogno di monitorare la qualità dell’aria della città e la volontà di incentivare ulteriormente l’utilizzo delle biciclette da parte dei cittadini. I sensori utilizzati sono stati la prima e la seconda versione del Sodaq Air e, tramite l’aiuto di numerosi volontari di diverse municipalità/province olandesi, sono stati raccolti oltre 35 milioni di punti nel corso di un anno (estate 2019-estate 2020). L’agenzia di protezione ambientale olandese – il RIVM *Dutch National Institute for Public Health and the Environment* - ha raccolto i dati, presenti comunque su una piattaforma online, e li ha confrontati con quelli ufficiali. Tale progetto ha portato a diverse iniziative, tra le quali una *hub* per l’implementazione di nuove *sniffer bikes* tramite una collaborazione tra aziende, istituti governativi e istituti di ricerca (Hof et al., 2020).

7) *Monitoraggio concentrazioni CO<sub>2</sub> a Barcellona e nella sua zona metropolitana: “Transects of urban CO<sub>2</sub> measurements on a bicycle-based atmospheric sensor”*

L’articolo, del 5 luglio 2022, contiene i risultati di una campagna di misurazioni della qualità dell’aria, nella città metropolitana di Barcellona e in un transetto suburbano che circonda il comune di Viladecans, proprio tramite l’utilizzo di sensori *low cost* montati sulle *sniffer bikes*. Come sensore è stato usato l’ARANET3, in grado di campionare la concentrazione in ppm di CO<sub>2</sub> ma sprovvisto di localizzatore GPS e quindi utilizzato in coppia con un *Iphone 8* per favorire la geolocalizzazione. Dagli esperimenti effettuati, è risultato chiaro come le zone urbane presentassero maggiori quantitativi di ppm di CO<sub>2</sub>, con in particolare picchi in corrispondenza delle aree soggette a maggior traffico. Effetto contrario, e quindi di diminuzione di tali concentrazioni, è stato registrato in vicinanza di parchi e zone agricole (Mazon, 2022).

8) Progetto ARPA Veneto, con sensore NOVA SDS011: “Potenzialità e limiti nell’utilizzo di sensori *low-cost* per la misura del particolato atmosferico PM10 in aria ambiente”

Anche l’ARPA Veneto nel 2020 ha effettuato dei test per verificare le potenzialità e i limiti della sensoristica *low cost*, confrontando i valori di PM 10 ottenuti con quelli dalla strumentazione *standard*. Il sensore utilizzato è stato il NOVA SDS011, e sono state fatte due diverse campagne di misura (la prima dal 1° settembre al 31 ottobre 2019 e la seconda dal 6 dicembre 2019 al 30 gennaio 2020). Durante tutto il monitoraggio, effettuato presso la sede ARPAV di via Lissa a Mestre (VE), i sensori *low-cost* sono stati affiancati a due diversi analizzatori automatici di PM10 conformi a norma di legge. I risultati hanno mostrato una buona coerenza di valori registrati tra diversi dispositivi della stessa marca e modello, e anche buona confrontabilità con i valori degli analizzatori ufficiali, con una però grande differenza per quanto riguarda l’accuratezza (scarto di valori) dovuta probabilmente alle condizioni di umidità superiori rispetto a quelle ottimali previste dagli *standard* prestazionali dei sensori (Zagolin et al., 2020).

## 1.5 Obiettivi

Lo scopo della presente tesi intende testare e sperimentare l’accuratezza dei dati acquisiti da sensoristica *low cost* come strumenti complementari alle stazioni ufficiali di misura per l’acquisizione di variabili meteorologiche e di qualità dell’aria. L’obiettivo generale della tesi, infatti, vuole sperimentare l’utilizzo di dispositivi a basso costo per il *mobile mapping* spazializzato del microclima urbano e della qualità dell’aria. Per poter condurre tale sperimentazione, sono stati utilizzati due diverse tipologie di *devices* progettate entrambi per essere installate su biciclette e monopattini, comunemente chiamate *sniffer bikes*. Si tratta di dispositivi come Sodaq Air e MeteoTracker (versione *smartphone*) che acquisiscono variabili meteorologiche e dati sulla qualità dell’aria come il particolato (Sodaq) e come temperatura e umidità (MeteoTracker). La prima parte della sperimentazione consiste in una serie di test in ambiente controllato, in modalità statica e dinamica, per valutare le prestazioni e l’affidabilità dell’acquisizione dati dei due strumenti. A tal scopo verrà usato un termometro con calibrazione certificata che fungerà “da bianco” durante le sperimentazioni svolte. La seconda del lavoro di tesi, invece rappresenta il *core* della ricerca e prevede l’analisi dei dati raccolti su più mesi (ottobre 2022-gennaio 2023) in condizioni “*real-world*” lungo numerose vie della città Padova. Ciò servirà ad individuare *hotspot* di inquinamento atmosferico circa il particolato (PM 2.5) e ad acquisire dati di terreno circa le cosiddette isole di calore urbano, ovvero zone che presentano anomalie termiche positive all’interno di una stessa area urbana.





## 2. Materiali e metodi

### 2.1 Materiali

#### 2.1.1 Termometro Lutron

Al fine di poter analizzare l'accuratezza dei valori di temperatura acquisiti dai dispositivi mobili è stato impiegato un termometro certificato e calibrato, con sonda esterna: il termometro Lutron TM-947SD (figura 5). Tale termometro consente di poter stimare l'accuratezza dei dati acquisiti dai dispositivi mobili con una precisione di 0.08 °C. Lo strumento utilizzato presenta le seguenti caratteristiche:

- Componenti: termometro Lutron TM-947SD, sonda (con cavo per collegamento al termometro)
- Connettività: nessuna connettività, dati registrati su scheda SD
- Parametri misurati (utili ai fini dei test): temperatura
- Frequenza di campionamento: ogni 10 secondi
- Modalità di recupero dati: scheda SD che registra i dati rimovibile fisicamente dal termometro per passare i file esternamente. Il termometro ha una funzione propria per formattare la scheda prima di una nuova registrazione dati



Figura 5 – Foto del termometro Lutron collegato alla sua sonda

Il termometro Lutron TM-947SD è stato sottoposto a calibrazione e taratura (vedasi allegato 1).

## 2.1.2 Dispositivo mobile MeteoTracker

Il MeteoTracker (figure 6 e 7) è un *device low cost*, costruito dall'azienda italiana IoToyon srl, per la raccolta e l'analisi di campioni d'aria in modalità dinamica. Di seguito le sue specifiche:

- Versione: MeteoTracker MT01 *Smartphone*
- Componenti: stazione MeteoTracker, *Bike Holder*, cavo USB-C, guaina di riserva
- Connettività: *Bluetooth* per connessione all'*app mobile* dello *smartphone*
- Parametri misurati (utili ai fini dei test): temperatura, umidità
- Frequenza di campionamento: possibilità di scegliere tra campionamento ogni tot. secondi, oppure ogni tot. metri percorsi
- Modalità di recupero dati: tramite l'*app mobile* è possibile scaricare i dati delle proprie sessioni in formato .csv



Figura 6 – Foto della stazione MeteoTracker (dal sito ufficiale del prodotto)



Figura 7 – Foto della stazione Meteotracker insieme ai componenti forniti con la *box* del prodotto

### 2.1.3 Sodaq AIR

Il Sodaq AIR è un *device low cost* della casa produttrice olandese Sodaq. A differenza del MeteoTracker, esso possiede anche un sensore per analizzare la qualità dell'aria. Di seguito le sue caratteristiche:

- Componenti: stazione Sodaq Air, *Bike Holder* con magneti e vite per aggancio, cavo USB-C
- Connettività: carta SIM LTE-M per aggancio alle celle telefoniche
- Parametri misurati (utili ai fini dei test): temperatura, umidità, PM 2.5 (strumento certificato solo per i PM 2.5, e non per PM 1 e PM 10 dei quali restituisce solo valori indicativi)
- Frequenza di campionamento:
  - Modalità statica: ogni 5 minuti
  - Modalità dinamica: ogni 10 secondi

Modalità di recupero dati:

- Sito "*knowyourair.net*": fornisce una rappresentazione puntuale tramite una griglia a maglie di 100 m x 100 m che mettono insieme tutti i dati registrati al loro interno durante quell'ora, e restituiscono i valori massimi, minimi e medi di temperatura, umidità, PM 1, PM 2.5 e PM 10.
- Dati *raw*: ottenuti contattando uno dei tecnici dell'azienda Sodaq



Figura 8 – Componenti del Sodaq Air (dal sito ufficiale del prodotto)



Figura 9 – Foto della stazione Sodaq Air insieme ai componenti forniti con il *box* del prodotto

#### 2.1.4 *Softwares* per l'elaborazione dei dati

Per effettuare la pulizia, l'organizzazione e l'analisi dei dati è stato usato Microsoft Excel, mentre per la rappresentazione geolocalizzata su mappa dei punti QGIS 3.22.14 "Białowieża".

## 2.2 Metodi

I test sperimentali in modalità statica che in dinamica sono stati replicati tre volte ciascuno, per avere un confronto tra più risultati sullo stesso test. A seguire lo schema sperimentale per ciascuna delle modalità adottate.

### 2.2.1 Test in modalità statica: temperatura

Per tale test è stata utilizzata la seguente strumentazione: dispositivo Sodaq Air con cavo e supporto, *power bank*, termometro Lutron con sonda, dispositivo MeteoTracker e supporto, due biciclette. La procedura per svolgere la sperimentazione è la seguente: sulla bicicletta numero uno viene assicurata la sonda del termometro Lutron con lo scotch, ed è fissata sul manubrio il supporto con magnete del Sodaq Air tramite l'apposita vite. Si procede collegando il termometro Lutron alla sonda e impostandolo in modalità *Rec* (registrazione); si posiziona il Sodaq Air sul supporto magnetico senza collegarlo al *power bank*. Sulla bici numero due, si sistema sul manubrio il MeteoTracker tramite il suo supporto, e si collega all'applicazione *mobile* tramite il *bluetooth*. Accesa la sessione del MeteoTracker direttamente dall'*app*, si procede a spostarsi con la bicicletta due in modo che l'accelerometro del *device* registri prima il movimento ed effettui poi la calibrazione. Una volta effettuate queste due fasi, si ritorna alla bicicletta numero uno, si smonta il MeteoTracker dalla bicicletta numero due e lo si assicura al manubrio della bicicletta numero uno. A questo punto si collega il *power bank* al Sodaq Air in modo da attivare la modalità statica, e si fa partire la registrazione dei punti nel termometro Lutron. Dopo 30 minuti si porta la bici con tutti gli strumenti collegati all'interno. Dopo altri 30 minuti, si scollega il Sodaq Air dal *power bank* e lo si smonta dal supporto, si chiude la sessione dall'applicazione *mobile* del MeteoTracker e lo si smonta dal supporto, e si chiude la registrazione dati del termometro Lutron.

### 2.2.2 Sodaq Air post aggiornamento *firmware* (gennaio 2023)

Per tale test è stata utilizzata la seguente strumentazione: dispositivo Sodaq Air con cavo e supporto, *power bank*, termometro Lutron con sonda, bicicletta. La procedura per svolgere la sperimentazione è la seguente: si assicura la sonda al manubrio della bicicletta con lo scotch, e si monta il supporto

magnetico del Sodaq Air tramite l'apposita vite. Si assicura il Sodaq Air sul supporto, e si prepara il termometro Lutron in modalità *Rec*. Successivamente, si fa partire nello stesso momento sia la registrazione dei dati nel termometro Lutron sia si collega il Sodaq Air al *Power Bank*. Dopo 90 minuti (tempi più lunghi rispetto ai precedenti test per vedere i tempi di ambientamento del *device*) si porta la bicicletta con gli strumenti all'esterno. Dopo altri 90 minuti si scollega il Sodaq Air dal *Power Bank*, lo si smonta dal supporto e si chiude la registrazione dati del termometro Lutron.

### 2.2.3 Test in modalità statica: qualità dell'aria

Per tale test è stata utilizzata la seguente strumentazione: due dispositivi Sodaq Air con cavi e supporti, due *power bank*, stazione ARPAV Monselice (coordinate 45.23783545112255° N, 11.744379133619626° E). La procedura per svolgere la sperimentazione è la seguente: si posizionano i due *devices*, vicino alla stazione di misurazione ARPAV di Monselice, tramite gli appositi supporti; si collegano in contemporanea ai *power banks* per attivare nello stesso momento la modalità statica; si scollegano dopo circa quattro ore di rilevazioni.

### 2.2.4 Test in modalità dinamica

Per tale test è stata utilizzata la seguente strumentazione: dispositivo Sodaq Air con cavo e supporto, dispositivo MeteoTracker e supporto, termometro Lutron con sonda, bicicletta. La procedura per svolgere la sperimentazione è la seguente: si fissano termometro Lutron e sonda ad un supporto in corrispondenza del punto iniziale del percorso scelto. Si assicurano MeteoTracker e Sodaq Air al manubrio della bicicletta tramite gli appositi supporti. Si attiva la modalità *Rec* del termometro Lutron. Successivamente, si attiva la sessione del MeteoTracker dall'applicazione *mobile*, si inizia la registrazione dei dati del termometro Lutron, e si inizia a spostarsi con la bicicletta in modo da far sì che si attivi la modalità dinamica del Sodaq Air. Si effettuano quattro giri del percorso scelto (il primo sarà considerato di *warm up*, e quindi scartato nella successiva fase di elaborazione dei dati) passando sempre per l'inizio del percorso, e dove staziona quindi il termometro Lutron. Conclusi i quattro giri, si ferma la sessione del MeteoTracker dall'applicazione, si stacca il Sodaq Air dal magnete e si conclude il raccoglimento dati dal termometro Lutron.

La lunghezza del percorso selezionato è stata di circa 850 m.

### 2.2.5 *Mobile mapping* nella città di Padova

Per tale test è stata utilizzata la seguente strumentazione: quattro dispositivi Sodaq Air con cavi e supporti (da ottobre 2022 a gennaio 2023), dispositivo MeteoTracker e supporto (appaiato ad uno dei Sodaq Air dal 25 novembre 2022), mezzi di spostamento (biciclette o monopattini elettrici). La procedura per svolgere la sperimentazione è la seguente: sono stati raccolti dati in dinamica lungo percorsi prestabiliti e in zone del centro di Padova/immediati dintorni. Periodo di campionamento da ottobre 2022 a gennaio 2023, con in totale quattro *devices* Sodaq Air funzionanti su percorsi e in giornate diverse. Dal 25 novembre 2022, è stato appaiato un *device* MeteoTracker al Sodaq Air sulla tratta principale di misurazione (passante per Corso Milano). Per le modalità di funzionamento degli strumenti, vedere “2.2.4 Test in modalità dinamica”.

Lunghezze relative ai percorsi selezionati:

- Andata: circa 2,5 km
- Ritorno: circa 2,9 km
- Corso Milano: circa 1,1 km

### 2.2.6 Elaborazione e analisi dati ambientali

Di seguito la descrizione e le procedure per la realizzazione delle varie analisi dei dati raccolti e le rispettive rappresentazioni:

#### 1) Test in statica, grafici di confronto

Per i test relativi alla temperatura, vengono creati dei grafici per ogni prova contenenti i valori di temperatura registrati da termometro Lutron, MeteoTracker e Sodaq Air (nel caso delle prove pre-aggiornamento Sodaq) o da termometro Lutron e Sodaq Air (nel secondo caso post aggiornamento del *firmware* Sodaq). Sulle ordinate sono riportati i valori di temperatura in gradi Celsius, e sulle ascisse le scale temporali rese omogenee: infatti il termometro Lutron registra ogni 10 secondi, il MeteoTracker ogni 3 secondi, ed il Sodaq Air ogni cinque minuti (secondo le caratteristiche da scheda tecnica); di conseguenza le misure del MeteoTracker e del Sodaq Air sono state “abbinare” alla scala temporale di riferimento del termometro Lutron. In maniera analoga per le prove post-aggiornamento del Sodaq Air, con la differenza che il tempo totale dei test è stato allungato, e questa volta non è stato utilizzato il MeteoTracker (risultati già chiari dalla prima serie di prove).

## 2) Test in statica, qualità dell'aria (stazione ARPAV di Monselice, PD)

Creazione di una tabella con confronto su base bi-oraria tra i valori medi di PM 2.5 registrati dai due Sodaq Air e quelli ufficiali rilasciati dal sito dell'ARPAV relativi alla stazione di Monselice (PD). Creazione di un grafico a dispersione di confronto tra i valori registrati dai due Sodaq, il quale presenta sulle ascisse i valori del Sodaq 1030 e sulle ordinate quelli del Sodaq 2360. I punti al di sotto della diagonale del grafico, indicano che in quel momento (i Sodaq in statica campionano ogni cinque minuti) il Sodaq 1030 ha registrato un valore maggiore rispetto al Sodaq 2360. Infine, grafico di confronto tra la serie di misure ottenute dai due sensori ed i valori puntuali registrati dalla stazione ARPAV alle 10:00 ed alle 12:00 (il valore delle 8:00 non è stato considerato, visto che gli strumenti erano ancora in fase di accensione).

## 3) Test in dinamica, grafici di confronto

Analogamente alle prove in statica, vengono creati dei grafici che sulle ordinate presentano i valori di temperatura registrati da termometro Lutron, Sodaq Air e MeteoTracker, mentre sulle ascisse le scale temporali rese omogenee rispetto, in questo caso, al MeteoTracker. I valori del Sodaq Air e del termometro Lutron (registrati ogni 10 secondi) vengono quindi ripetuti più volte per poter rispettare l'intervallo di misura del MeteoTracker, che è appunto di tre secondi. Le carte contenenti i punti rilevati sia dal Sodaq Air sia dal MeteoTracker presentano, al posto delle temperature assolute, le differenze di T tra il valore puntuale e la media della sessione di misura dello strumento. Questo permette di mettere in una stessa rappresentazione punti con valori di T che, in termini assoluti, sarebbero molto diversi tra loro, ma che in questo modo diventano confrontabili. Vengono mostrate inoltre le zone della mappa con tendenza ad avere T maggiori rispetto all'intero tragitto percorso.

## 4) Test in dinamica, analisi della correlazione

Calcolo del coefficiente di correlazione  $r$  tra i valori di T registrati dal Sodaq Air e dal MeteoTracker, tramite il pacchetto di analisi dei dati presente in Microsoft Excel, per verificare la presenza di una relazione lineare nel comportamento dei due strumenti.



#### 5) Test in dinamica, scarto medio e deviazione standard

Calcolo dello scarto medio tra Sodaq Air e termometro Lutron, tra MeteoTracker e termometro Lutron, e tra Sodaq Air e MeteoTracker, con anche calcolo della loro deviazione standard (tramite la funzione di Microsoft Excel). Questo per verificare le differenze di misura dei due strumenti sia tra loro, sia rispetto al termometro Lutron che funge da bianco di riferimento.

#### 6) Test in dinamica, confronto umidità – delta T (Sodaq Air e MeteoTracker)

Creazione di grafici di confronto (uno per ogni prova più uno complessivo con le tre sessioni) con le differenze tra i valori di temperatura registrate tra i due strumenti sulle ascisse, mentre sulle ordinate i valori di umidità registrati dal MeteoTracker. Questo per verificare graficamente l'eventuale presenza o meno di un legame tra l'umidità dell'aria e lo scarto tra i valori di temperatura registrati tra i due strumenti. Ripetuta inoltre l'analisi della correlazione tra le differenze di temperatura ed i valori di umidità, ai fini di ricercare una relazione lineare tra i due.

#### 7) Test in dinamica, rappresentazione su QGIS

Preparazione dei *files* formato .csv da poter poi caricare nel programma QGIS. Rappresentazione georeferenziata dei punti registrati dal MeteoTracker e dal Sodaq Air, con anche colorazione dei punti con scala cromatica riferita ai valori di temperatura, per facilitare l'individuazione delle zone a temperature maggiori. Creazione della cartografia (sistema di riferimento "Monte Mario 1") con aggiunta di titolo, legenda, barra di scala, freccia del Nord e *basemap* satellitare "ESRI *Satellite*" (aggiunta tramite il *plugin* "Quick Map Services"). Allo stesso modo, vengono create le carte rappresentanti la qualità dell'aria, ovvero delle concentrazioni di PM 2.5 registrate dal Sodaq Air. Le carte finali di ogni prova, che contengono Sodaq Air e MeteoTracker insieme, presentano, al posto dei valori assoluti di temperatura registrati, le differenze dalla T media della sessione di prova. Questo serve a poter rappresentare insieme valori distanti tra loro, omogeneizzando anche le scale di misura.

#### 8) Raccolta dati a Padova, calcolo km totali

Per la stima dei km totali, è stata usata una funzione di QGIS chiamata "Da punti a percorso", la quale ha trasformato l'insieme di punti registrati dai quattro dispositivi Sodaq Air (che hanno effettuato misurazioni a Padova nel periodo di tempo ottobre 2022-gennaio 2023) in quattro percorsi. Tramite

il calcolatore di campi, presente nelle tabelle attributi dei *layers*, è stato possibile calcolare le lunghezze dei singoli percorsi. Però, alcuni segmenti che compongono i percorsi collegano punti consecutivi nell'ordine di scrittura nei fogli .csv, ma non effettivamente successivi in ordine "di percorso": ad esempio, alcuni segmenti collegano il punto finale di una sessione, con quello iniziale della sessione dopo, scritti quindi successivamente uno all'altro all'interno dei fogli .csv, ma che non sono necessariamente vicini spazialmente e che comunque non rappresentano effettive "distanze sniffate". Di conseguenza, tramite la funzione "esplosi linee" di QGIS, sono stati divisi i percorsi nei segmenti che li compongono. Successivamente, i segmenti di lunghezza superiore a 69.4 m sono stati scartati, lasciando solo i tratti relativi a distanze effettivamente sniffate. La somma di tutti i tratti rimanenti ha restituito i km sniffati totali.

#### 9) Raccolta dati a Padova, temperatura e PM 2.5 su giornate selezionate

Vengono selezionate tre giornate campione per analizzare i valori ottenuti dai *devices* MeteoTracker e Sodaq Air su percorsi di andata e ritorno, decisi a priori, che includono zone di interesse del centro di Padova (Corso Milano in particolare) per quanto riguarda lo studio delle isole di calore. Le tre date sono il 30 novembre 2022, il 6 dicembre 2022 ed il 19 dicembre 2022. Vengono preparati i *files* .csv, relativi ad andata e ritorno e separati per strumento, privi delle "teste" per evitare valori di temperatura fuori scala dovuti al tempo di ambientamento/calibrazione dei *devices* quando vengono messi in funzione. Rappresentazione georeferenziata su QGIS dei punti registrati dal MeteoTracker e dal Sodaq Air, con anche colorazione dei punti con scala cromatica riferita ai valori di temperatura, per facilitare l'individuazione delle zone a temperature maggiori. Creazione della cartografia (sistema di riferimento "Monte Mario 1") con aggiunta di titolo, legenda, barra di scala, freccia del Nord, confini amministrativi di Padova e *basemap* Satellitare "ESRI Satellite" (aggiunta tramite il *plugin* "Quick Map Services"). Analogamente vengono preparate le carte per quanto riguarda la qualità dell'aria, ovvero rappresentanti le concentrazioni di PM 2.5 rilevate dal Sodaq Air tramite gradazione cromatica. Le carte contenenti i punti rilevati sia dal Sodaq Air sia dal MeteoTracker, divise per andata e ritorno, presentano al posto delle temperature assolute le differenze di T tra il valore puntuale e la media della sessione di misura dello strumento. Questo permette di mettere in una stessa rappresentazione punti con valori di T che, in termini assoluti, sarebbero molto diversi tra loro, ma che in questo modo diventano confrontabili mostrando inoltre le zone della città con tendenza ad avere T maggiori rispetto all'intero percorso sniffato.

## 10) Raccolta dati a Padova, confronto temperature con stazione meteo del Portello e concentrazioni di PM 2.5

Creazione di un *file* .csv contenente la differenza, detta appunto “delta T”, tra i valori di temperatura registrati dai quattro Sodaq Air e quelli invece rilasciati dalla stazione meteo del Portello (PD). Questo tipo di soluzione, permette di poter analizzare insieme dati che, se presi in valore assoluto, sarebbero riferiti a mesi, momenti della giornata e condizioni meteo molto differenti tra loro. Rappresentazione georeferenziata su QGIS di questi punti, con anche colorazione tramite scala cromatica riferita al delta T per individuare le zone a temperatura maggiore o minore rispetto ai valori registrati dal Portello. Ulteriore rappresentazione “rasterizzata” nella quale, tramite la funzione “Rasterizza”, si creano dei quadrati 70 m x 70 m che rappresentano la media dei valori di delta T dei punti presenti all’intero del perimetro del quadrato. In questo modo, è possibile vedere le zone mediamente a temperatura maggiore o minore rispetto ai valori registrati dalla stazione del Portello. Nello stesso modo, vengono create le carte (rappresentazione “puntuale” e rasterizzata) per la qualità dell’aria di Padova valutata tramite le concentrazioni di PM 2.5 registrate dai Sodaq Air. In questo secondo caso, però, non sono presenti i valori della stazione Portello per effettuare un confronto, quindi le rappresentazioni mostrano le misure dei *devices* in “valore assoluto” su tutti i mesi di raccolta dati.



## 3. Risultati e discussione

### 3.1 Modalità statica: test e analisi comparativa dei valori termometrici

Da questa prima serie di test risulta evidente l'inefficacia del MeteoTracker per quanto riguarda l'acquisizione di dati in modalità statica; tale risultato è in linea con le caratteristiche del dispositivo che è stato progettato per ottimizzare le rilevazioni in movimento, attivate tramite l'accelerometro. Esso, infatti, nel momento in cui ci si ferma, segna come costante l'ultimo valore di temperatura registrato in movimento, riportando quindi nei grafici in funzione del tempo una retta orizzontale. Tale meccanismo gestito dal *software* di MeteoTracker consente di utilizzare direttamente i dati accurati, rilevati in movimento. Il dispositivo Sodaq Air invece presenta incostanza nella rilevazione dei dati, i quali non sono registrati esattamente ogni cinque minuti e soprattutto non sono misurati come valori puntuali, bensì come sessioni di misura con punti registrati ogni 10 secondi per intervalli di circa due minuti. Inoltre, risulta evidente l'elevato tempo di ambientamento dello strumento, il quale non è riuscito in nessuno dei tre test a raggiungere le temperature segnate dal termometro certificato entro la fine delle prove. Infine, soprattutto nella prima prova ma visibili anche nelle altre due, sono presenti dei *gap* dei dati dovuti ad un'interruzione della modalità statica, come se il *device* uscisse dalla modalità per poi entrarci dopo un certo intervallo di tempo (figura 10).

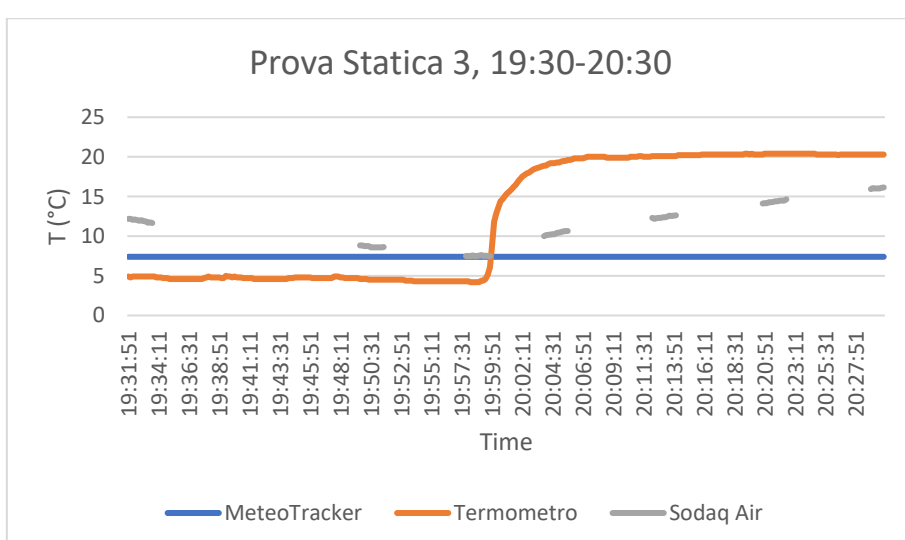
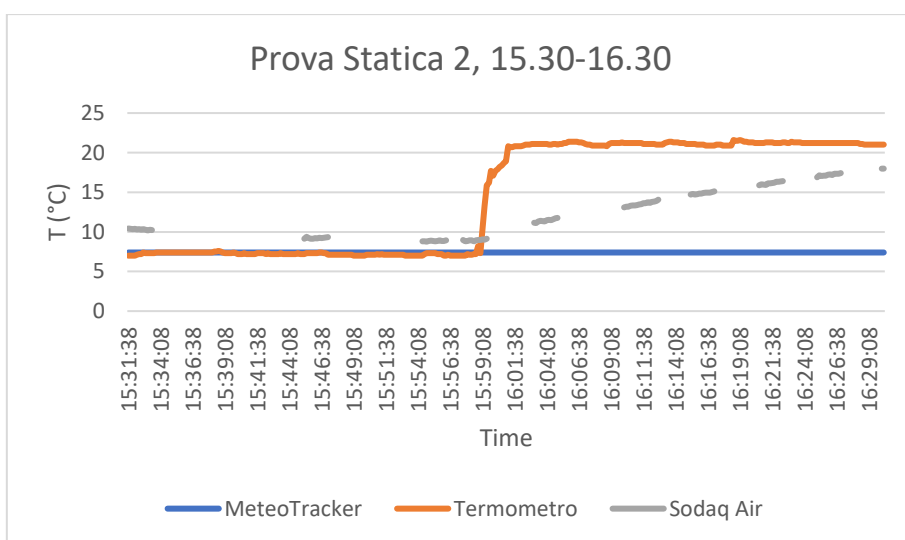
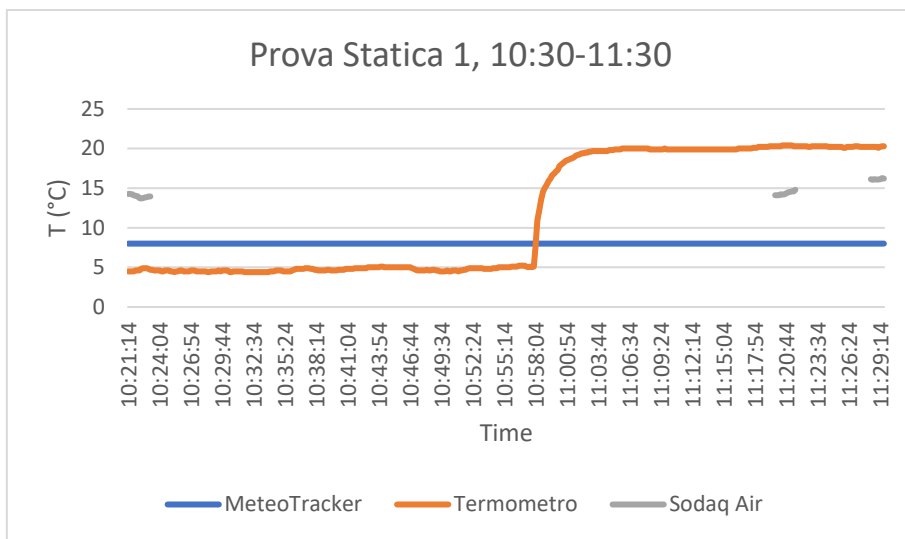


Figure 10a, 10b, 10c – Grafici su prove in statica, valori di temperatura registrati da MeteoTracker, Sondaq Air (pre aggiornamento *firmware*) e termometro Lutron

### 3.2 Test e analisi comparativa dei valori termometrici in modalità statica: dispositivo Sodaq AIR

A seguito di un aggiornamento del *firmware* Sodaq da parte della casa produttrice, i risultati sono complessivamente migliorati (vedi figure 11): gli intervalli di misurazione ora sono ben rispettati, riportando singole plottate puntuali di misura regolarmente ogni cinque minuti. Le curve inoltre seguono molto di più quelle del termometro Lutron, riportando però sempre tempi di ambientamento/adattamento abbastanza elevati visto che, dal momento in cui si passa dall'interno all'esterno, la prova prosegue per altri circa 90 minuti (tempo che è risultato necessario per veder combaciare o quasi i valori dei due strumenti). Se però sia il Sodaq Air che il termometro Lutron si trovano già ad uguale temperatura (come si può vedere nei tratti iniziali dei test, effettuati all'interno), e si traslascia quindi la questione dei tempi di ambientamento del Sodaq Air, i valori registrati risultano simili tra loro. È importante segnalare che, in tale sperimentazione, è stato cambiato il luogo dei test rispetto alle prime statiche, e probabilmente il termometro ha risentito maggiormente dell'influenza del vento riportando delle leggere ondulazioni di valori in corrispondenza proprio delle misurazioni effettuate all'aperto. Inoltre, visti i risultati dei test precedenti, il MeteoTracker non è stato coinvolto in questa seconda serie di prove.

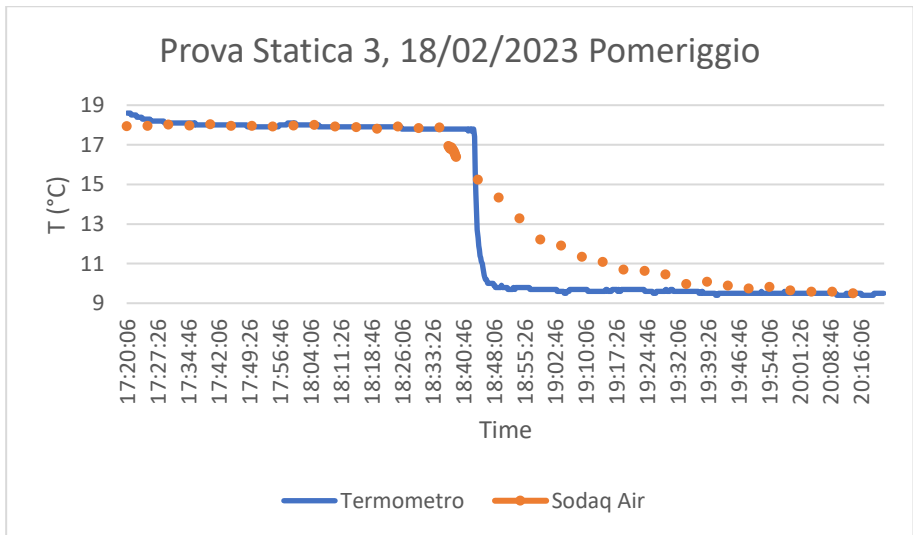
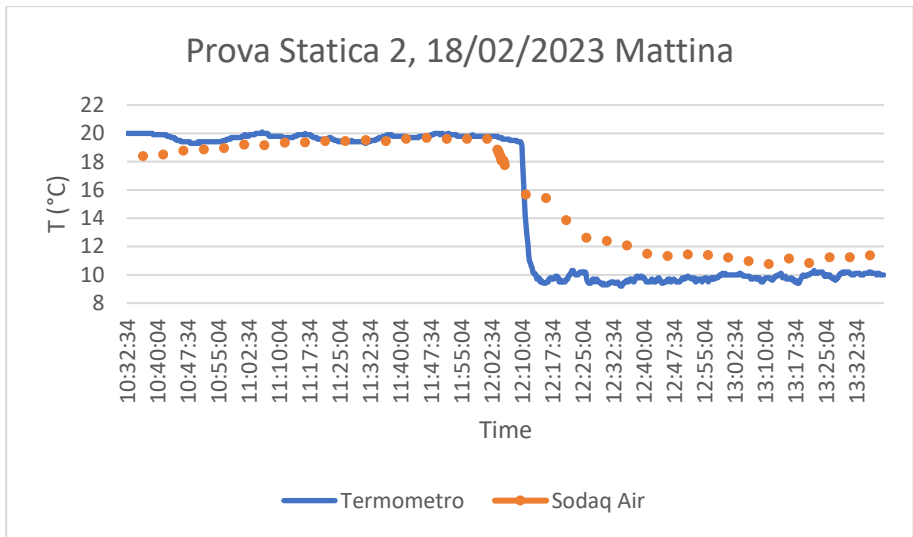
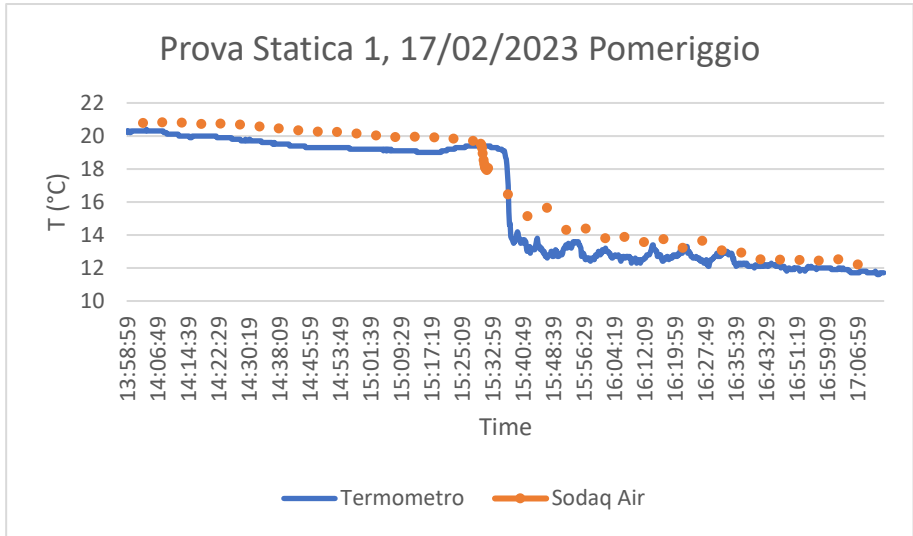


Figure 11a, 11b, 11c – Grafici su prove in statica, valori di temperatura registrati da Sodaq Air (post aggiornamento *firmware*) e termometro Lutron



### 3.3 Test e analisi comparativa PM 2.5: Sodaq AIR versus stazione ARPA (Monselice)

Il dispositivo Sodaq 1030 ha misurato per il 95,7% delle volte (45 misure su 47) un valore maggiore rispetto al Sodaq 2360. Lo scarto medio tra i due strumenti è risultato pari a 12,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , con una deviazione standard sullo scarto medio di 9,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (valore poco significativo, il quale dimostra che lo scarto medio tra i due strumenti varia molto). Quindi i valori riportati dai due strumenti non sono esattamente uguali: il dispositivo Sodaq 1030 che riporta concentrazioni quasi sempre maggiori rispetto a quello 2360. Il risultato non è interpretabile in quanto i due modelli Sodaq Air presentano caratteristiche hardware/software identiche tra loro e la sperimentazione è avvenuta nelle stesse condizioni ambientali (figura 12).

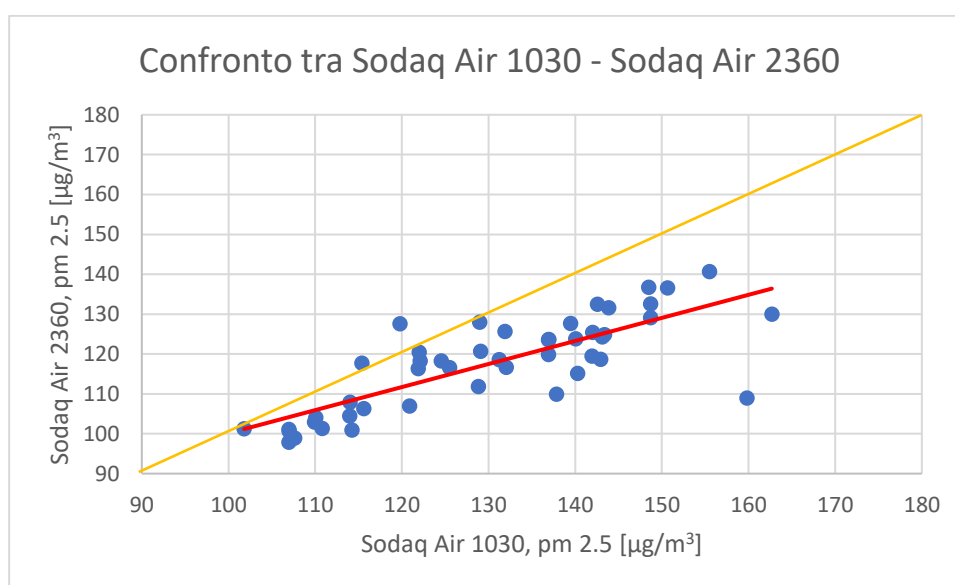


Figura 12 - Grafici di confronto tra i valori di pm 2.5 registrati dai due Sodaq Air. La diagonale gialla serve per dividere i punti con valori maggiori registrati dal Sodaq 1030 da quelli del Sodaq 2360

I risultati delle analisi comparative tra i due dispositivi Sodaq AIR e la stazione ARPA (Monselice) per il monitoraggio della qualità dell'aria sono presentati in tabella1:

	pm 2.5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]		
	08:00	10:00	12:00
Sodaq 1030	131,3	138,9	123,0
Sodaq 2360	107,3	125,8	110,3
ARPAV	57	69	65

Tabella 1 – Tabella di confronto tra i valori di pm 2.5 registrati dai due Sodaq Air e quelli rilasciati dal sito dell'ARPAV riguardanti la stazione di Monselice

Si ritiene opportuno segnalare che, visto che il test è stato effettuato dalle 8:00 alle 12:00, i valori sopra riportati di PM 2.5 dei Sodaq Air sono puntuali per quanto riguarda le ore 8:00, mentre sono una media delle concentrazioni misurate nelle due ore precedenti per quanto riguarda le 10:00 e le 12:00.

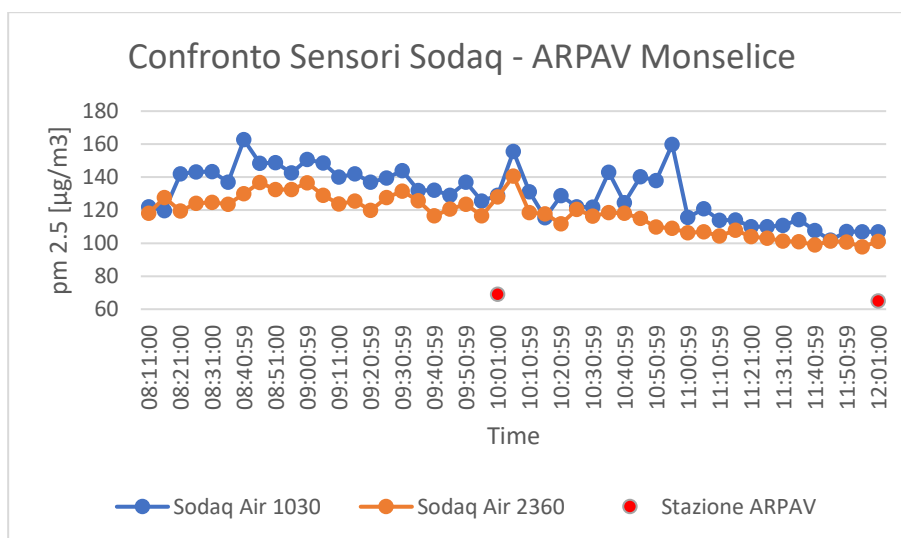


Figura 13 - Grafici di confronto tra i valori di pm 2.5 registrati dai due Sodaq Air (profili lineari) e dalla stazione ARPAV di Monselice (puntuali)

Come si può vedere sia dalla tabella di confronto iniziale (tabella 1) sia dal grafico finale (figura 13), i valori registrati dai sensori Sodaq Air sono molto distanti da quelli ufficiali pubblicati dal sito dell'ARPA relativi alla stazione di Monselice. Si parla infatti di valori registrati di PM 2.5 quasi doppi rispetto a quelli della stazione ufficiale.

Le condizioni meteo non erano ottimali il giorno della prova (22 febbraio 2023), con la presenza di nebbia intorno alla zona della stazione ARPAV. Non ci sono comunque elementi a sufficienza per stabilire se i valori della qualità dell'aria siano stati alterati proprio da questo fattore, o se il problema sia insito alla strumentazione stessa.

### 3.4 Test ed analisi comparativa in modalità dinamica: Sodaq AIR versus Meteotracker

Come si può vedere dai grafici in figura 14, i valori del MeteTracker sono sempre molto vicini a quelli del termometro Lutron, con differenze al massimo attorno al mezzo grado centigrado. Il Sodaq Air invece ha riportato misure di temperatura maggiori rispetto sia al termometro Lutron sia al MeteTracker, con differenze rispetto all'altro *device* comprese tra i 2,5 ed i tre gradi centigradi. Gli andamenti delle due curve (Sodaq Air e MeteTracker) sono simili tra loro in tutte e tre le prove.

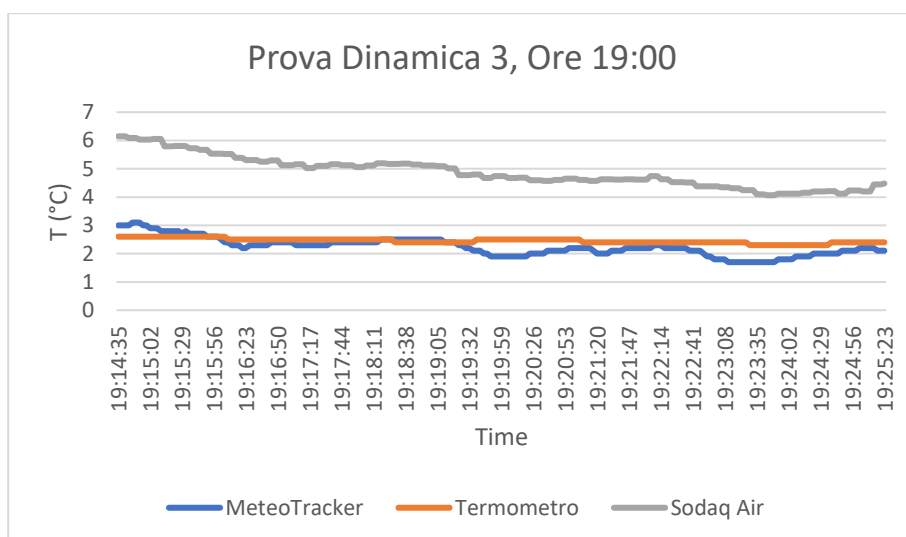
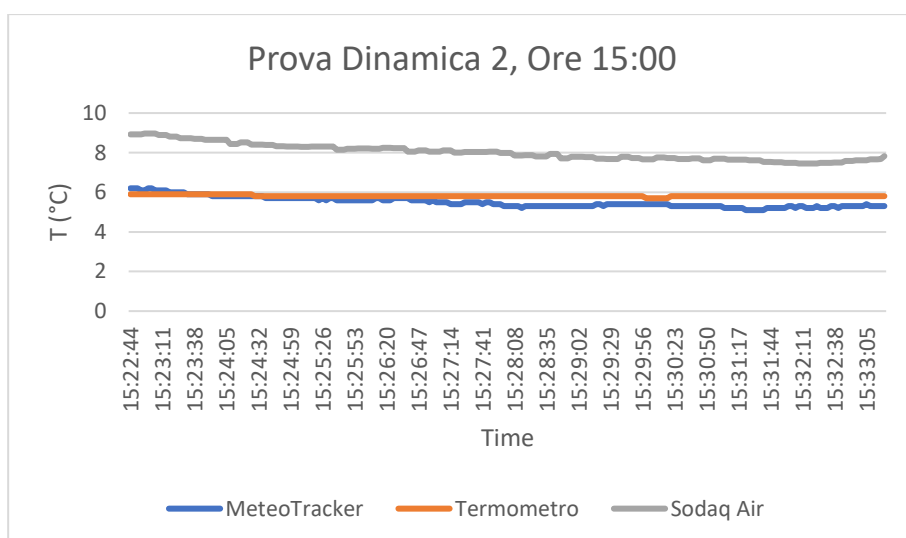
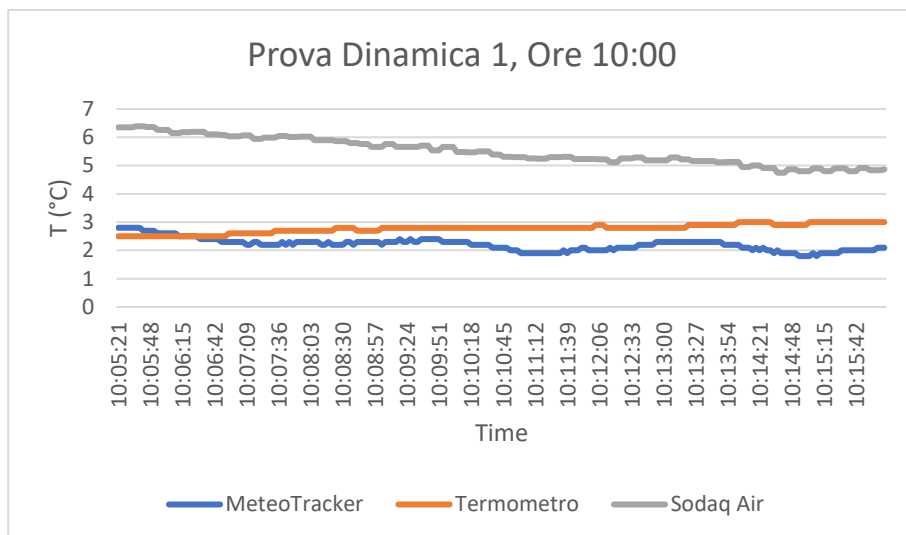


Figure 14a, 14b, 14c - Grafici su prove in dinamica, valori di temperatura registrati da MeteoTracker, Sodaq Air (pre aggiornamento *firmware*) e termometro Lutron

### 3.5 Test in dinamica: analisi della correlazione

Come si vede dalle tabelle 2, dallo studio della correlazione tra i valori di temperatura registrati dai due strumenti, risulta per tutte e tre le prove un alto valore di  $r$ . Questo vuol dire che è presente una buona concordanza tra le temperature misurate dai due *device*, con una relazione lineare diretta che indica come ai valori minori dell'uno corrispondano i valori minori dell'altro, e in maniera analoga per i valori maggiori. Confermata quindi l'ipotesi fatta graficamente secondo la quale l'andamento delle curve di Sodaq Air e MeteoTracker è simile.

Prova dinamica 1, ore 10:00

	<i>MeteoTracker</i>	<i>Sodaq Air</i>
MeteoTracker	1	
Sodaq Air	0,801	1

Prova dinamica 2, ore 15:00

	<i>MeteoTracker</i>	<i>Sodaq Air</i>
MeteoTracker	1	
Sodaq Air	0,958	1

Prova dinamica 3, ore 19:00

	<i>MeteoTracker</i>	<i>Sodaq Air</i>
MeteoTracker	1	
Sodaq Air	0,911	1

Tabelle 2a, 2b, 2c – Tabelle contenenti l'analisi della correlazione tra i valori di temperatura misurati dai *devices* Sodaq Air e MeteoTracker

Al fine di permettere una più facile lettura delle tabelle, si ricorda che l'indice di correlazione  $r$  varia tra -1 (perfetta correlazione negativa) e +1 (perfetta correlazione positiva). In questo caso quindi, i valori di  $r$  molto vicini a +1 indicano che la correlazione tra i due strumenti è fortemente positiva.

### 3.6 Test in dinamica: scarto medio e deviazione standard

Come si può vedere nelle tabelle 3, dallo studio dello scarto medio risulta come il MeteoTracker tenda sempre a sottostimare leggermente i valori di temperatura rispetto al termometro Lutron. Al contrario il Sodaq Air riporta sempre qualche grado centigrado in più rispetto al termometro Lutron, e questo fa sì che la differenza di temperatura in valore assoluto tra i due strumenti si aggiri attorno ai circa tre °C. I due strumenti, quindi, sono confrontabili dal punto di vista degli “andamenti” della temperatura (vedi “4.5 Test in dinamica, analisi della correlazione”), ma presentano in valore assoluto degli scarti notevoli.

#### Prova dinamica 1, ore 10:00

	Sodaq-Termometro	MeteoTracker-Termometro	Sodaq-MeteoTracker
Scarto Medio	2,722	-0,568	3,290
Dev Std sullo Scarto Medio	0,617	0,351	0,324

#### Prova dinamica 2, ore 15:00

	Sodaq-Termometro	MeteoTracker-Termometro	Sodaq-MeteoTracker
Scarto Medio	2,205	-0,311	2,516
Dev Std sullo Scarto Medio	0,384	0,239	0,176

#### Prova dinamica 3, ore 19:00

	Sodaq-Termometro	MeteoTracker-Termometro	Sodaq-MeteoTracker
Scarto Medio	2,418	-0,211	2,629
DevStd sullo Scarto Medio	0,476	0,269	0,285

Tabelle 3a, 3b, 3c – Tabelle contenenti gli scarti medi dei valori di temperatura tra i tre strumenti (a due a due) con anche la relativa deviazione standard sullo scarto medio

### 3.7 Test in dinamica: confronto umidità – delta T (Sodaq AIR e MeteoTracker)

Sia dalle figure 15 che dalle tabelle 4 sul confronto tra umidità e scarti di temperatura, sembra risultare una buona relazione lineare inversa, la quale fa sì che a valori minori di umidità corrispondano maggiori differenze di temperatura registrate da Sodaq Air e MeteoTracker. Quindi, più i valori di umidità sono alti, minore è lo scarto di temperature registrate dai due *devices*. Sarebbero comunque necessari maggiori test per confermare l'esistenza di tale relazione.

Prova dinamica 1, ore 10:00

	<i>Scarto Sodaq-MeteoTracker</i>	<i>Hum [%]</i>
Scarto Sodaq-MeteoTracker	1	
Hum [%]	-0,771	1

Prova dinamica 2, ore 15:00

	<i>Scarti Sodaq-MeteoTracker</i>	<i>Hum [%]</i>
Scarti Sodaq-MeteoTracker	1	
Hum [%]	-0,653	1

Prova dinamica 3, ore 19:00

	<i>Scarti Sodaq-MeteoTracker</i>	<i>Hum [%]</i>
Scarti Sodaq-MeteoTracker	1	
Hum [%]	-0,912	1

Tabelle 4a, 4b, 4c – Tabelle contenenti l'analisi della correlazione tra gli scarti dei valori di temperatura tra Sodaq Air e MeteoTracker, e l'umidità relativa misurata dal MeteoTracker

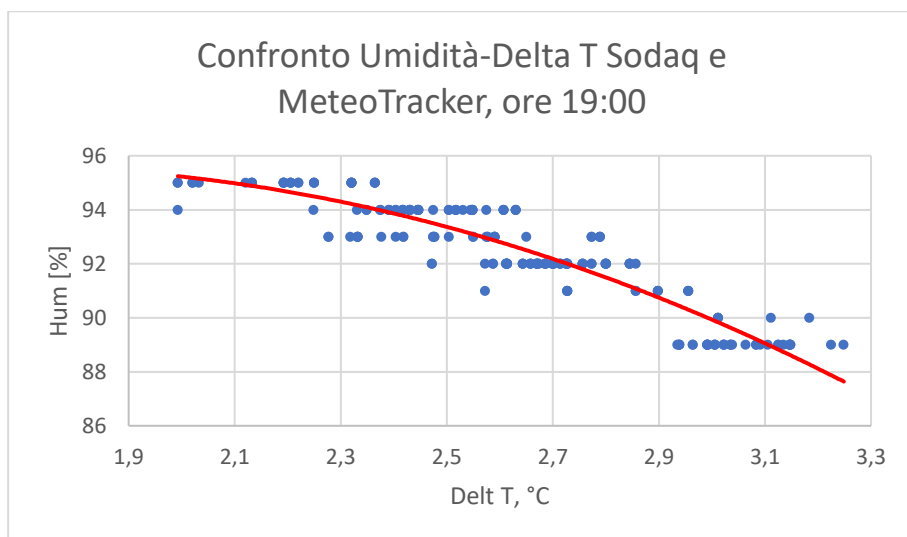
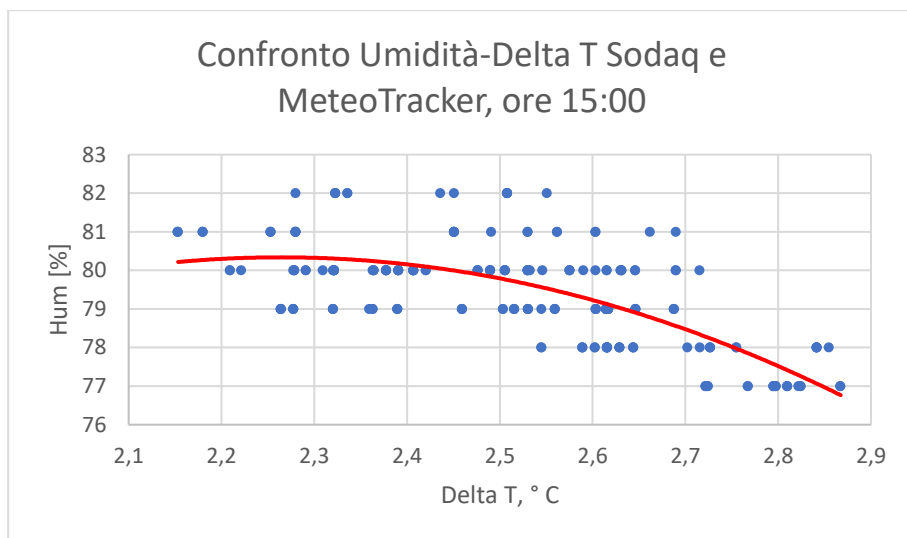
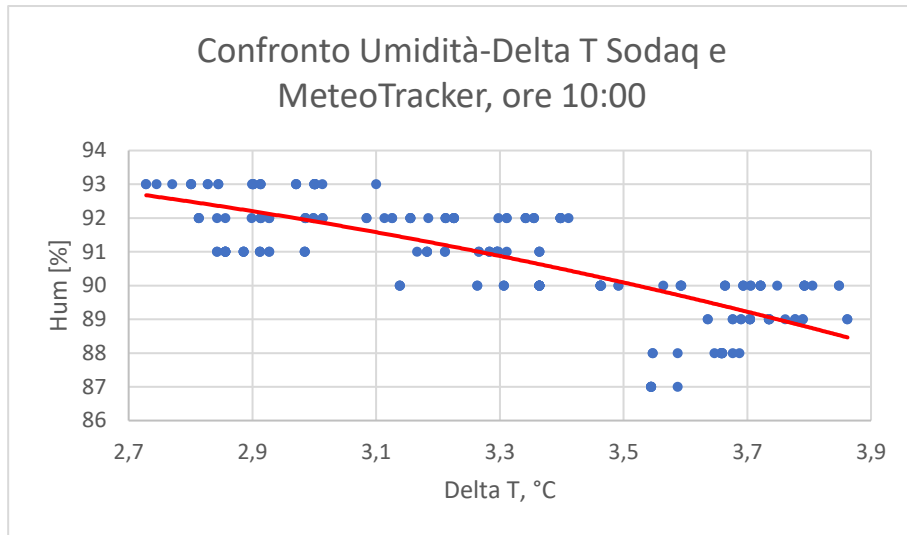


Figure 15a, 15b, 15c - Grafici su di confronto prove dinamiche tra i valori degli scarti di temperatura tra Sodaq Air e MeteoTracker e l'umidità relativa misurata dal MeteoTracker (divisi per prova)

Di seguito il grafico contenente i risultati di tutte e tre le prove insieme:

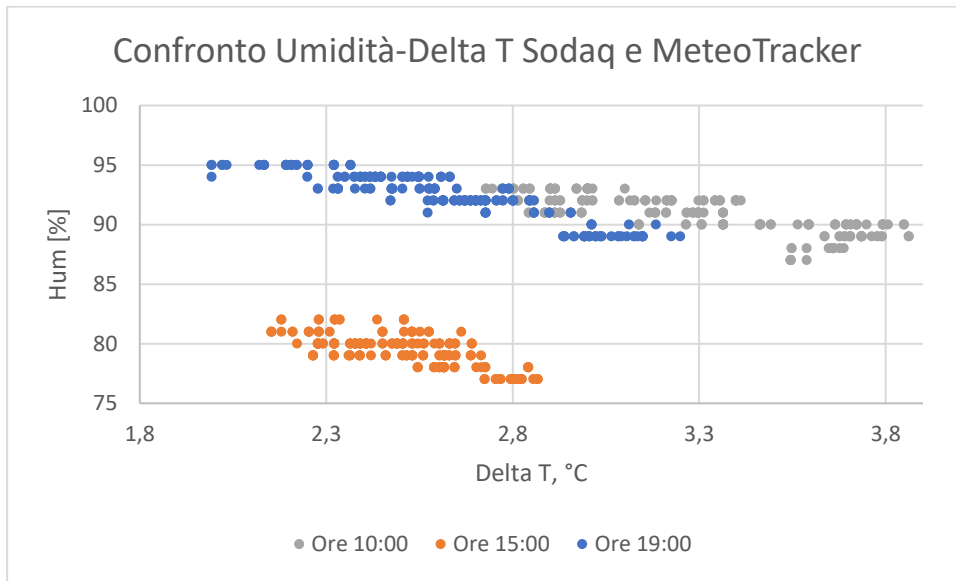


Figura 16 - Grafici su di confronto tra i valori degli scarti di temperatura tra Sodaq Air e MeteoTracker e l'umidità relativa misurata dal MeteoTracker (tutte e tre le prove insieme)



### 3.8 Test in dinamica: rappresentazione su QGIS

In queste prove dinamiche, il MeteoTracker ha registrato punti ogni 10 m, e non ogni 10 s come nelle statiche. Esso infatti registra in uno o nell'altro modo a seconda che vengano percorsi prima i 10 m, o se passino 10 s nei quali tale distanza non è stata percorsa. Visto che la prova è stata eseguita in bicicletta, la velocità era tale a far attivare la prima opzione.

Dalla figura 17 si nota come, anche per la modalità dinamica, siano emersi i problemi di ambientamento del Sodaq Air. Infatti, nonostante sia stato effettuato un giro di *warm up*, successivamente tolto dai fogli .csv prima della rappresentazione geolocalizzata, sono ancora visibili i punti colorati "per giro": i punti a T maggiore corrispondono al secondo giro, e quelli a T minore al quarto. Un singolo giro di *warm up*, corrispondente a circa 850 m, risulta quindi non sufficiente per farlo adattare alle temperature esterne. Nonostante ciò, i punti a temperatura maggiore di ogni giro si trovano in corrispondenza delle zone abitate. Il MeteoTracker invece, nonostante alcuni punti del secondo giro (primo post *warm up*) mostrino la tendenza presente nel Sodaq Air a riportare T elevate dovute ai tempi di ambientamento, mette in evidenza in maniera più marcata come le temperature maggiori si registrino nelle zone vicino alle abitazioni e quelle minori in corrispondenza delle zone di più aperta campagna.

Per quanto riguarda la qualità dell'aria (figura 18), le prove dinamiche hanno restituito valori meno elevati rispetto a quelle statiche, ed inoltre sembra ci sia la tendenza delle zone abitate a presentare valori di PM 2.5 maggiori rispetto a quelle rurali. Si deduce quindi, che o la modalità dinamica del Sodaq Air registra valori più accurati, per quanto riguarda la qualità dell'aria, rispetto a quella statica, oppure i valori di PM 2.5 seguono l'andamento della temperatura: se confrontate infatti, le carte di temperatura e PM 2.5 risultano molto simili, anche se non ci sono elementi a sufficienza per confermare che le zone a T maggiore siano anche quelle più inquinate.

Per vedere la cartografia relativa alla seconda ed alla terza prova, fare riferimento all'allegato 2.



Figura 17 – Carte prove dinamiche, valori di temperatura registrati dal Sodaq Air



Figura 18 – Carte prove dinamiche, valori di PM 2.5 registrati dal Sodaq Air





Figura 19 – Carte prove dinamiche, valori di temperatura registrati dal MeteoTracker



Figura 20 – Carte prove dinamiche, valori di temperatura registrati dal MeteoTracker e dal Sodaq Air. Riportati i delta T rispetto alla temperatura media della sessione di prova

### 3.9 *Mobile mapping* a Padova, calcolo km totali

Nell'intera campagna di misurazioni a Padova, sono stati percorsi complessivamente circa 735 km.

La soglia di lunghezza massima dei segmenti è stata scelta considerando che la velocità massima raggiunta in bicicletta o monopattino elettrico (mezzi usati nella campagna di misurazione) in un ambito urbano come quello del centro di Padova, è più o meno 25 km/h, che sono circa 6.94 m/s. Considerando che il tempo di campionamento del Sodaq Air è di 10 s, allora la distanza percorsa a quella velocità in 10 s è di 69,4 m. Tutti i segmenti, ricavati “esplosando” i percorsi dei quattro *devices* Sodaq Air, di lunghezza superiore ai 69,4 m non sono quindi stati considerati nel calcolo dei km totali.

### 3.10 Mobile mapping a Padova: temperatura e PM 2.5 su giornate selezionate

6 dicembre 2022

Dalla rappresentazione geolocalizzata (figure 21, 23, 24, 25, 27, 28), è possibile vedere in entrambi i momenti della giornata come le zone del centro, in particolare Corso Milano e via Altinate, siano ad una temperatura maggiore rispetto alle zone immediatamente periferiche al centro. Come già visto nei test precedenti, il Sodaq Air presenta valori di temperatura superiori a quelli del MeteoTracker di circa 3 °C.

Per quanto riguarda la qualità dell'aria (figure 22 e 26), i PM 2.5 sembrano seguire in maniera meno netta i valori di temperatura come visto nei test, anche se questa tendenza non è del tutto svanita. Le zone del centro risultano quelle più inquinate, e durante il pomeriggio sono stati rilevati valori più alti di PM 2.5 rispetto alla mattina. Inoltre, risulta alto il livello di inquinamento attorno alla rotonda che collega via Volturno e Corso Milano.

Risulta quindi anche dalle rilevazioni “sul campo”, come il MeteoTracker fornisca risultati coerenti tra le varie sessioni, mentre il Sodaq Air sia più variabile nei risultati seppur mantenendo la tendenza a mostrare valori di PM 2.5 e temperature maggiori nelle zone del centro, seguendo, per il secondo parametro, in maniera abbastanza fedele i risultati del MeteoTracker.

Per vedere la cartografia relativa alle altre due giornate selezionate (30 novembre 2022 e 19 dicembre 2022) fare riferimento all'allegato 3.





Figura 21 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto d’andata registrati dal Sodaq Air

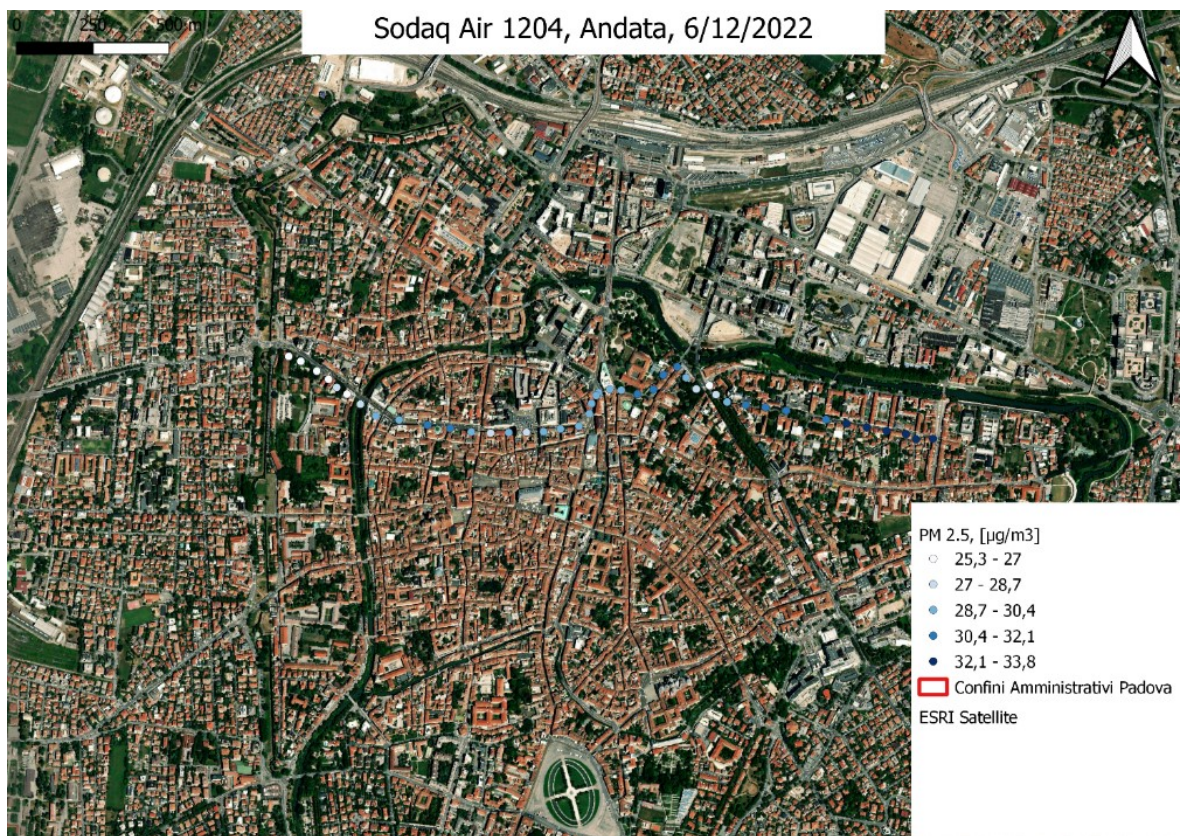


Figura 22 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di PM 2.5 nel tratto d’andata registrati dal Sodaq Air





Figura 23 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto d’andata registrati dal MeteoTracker



Figura 24 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto d’andata registrati dal MeteoTracker e Sodaq Air. Riportati i valori di delta T rispetto alla temperatura media della sessione



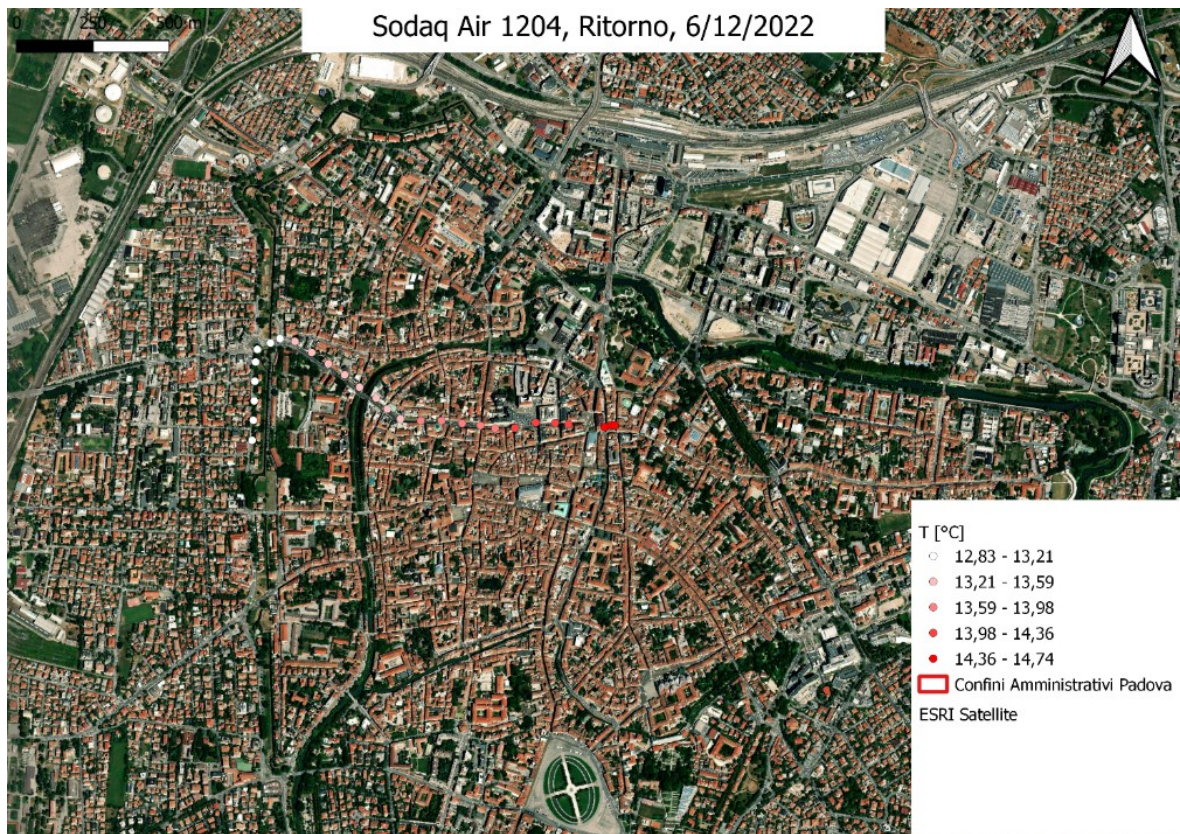


Figura 25 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto di ritorno registrati dal Sodaq Air

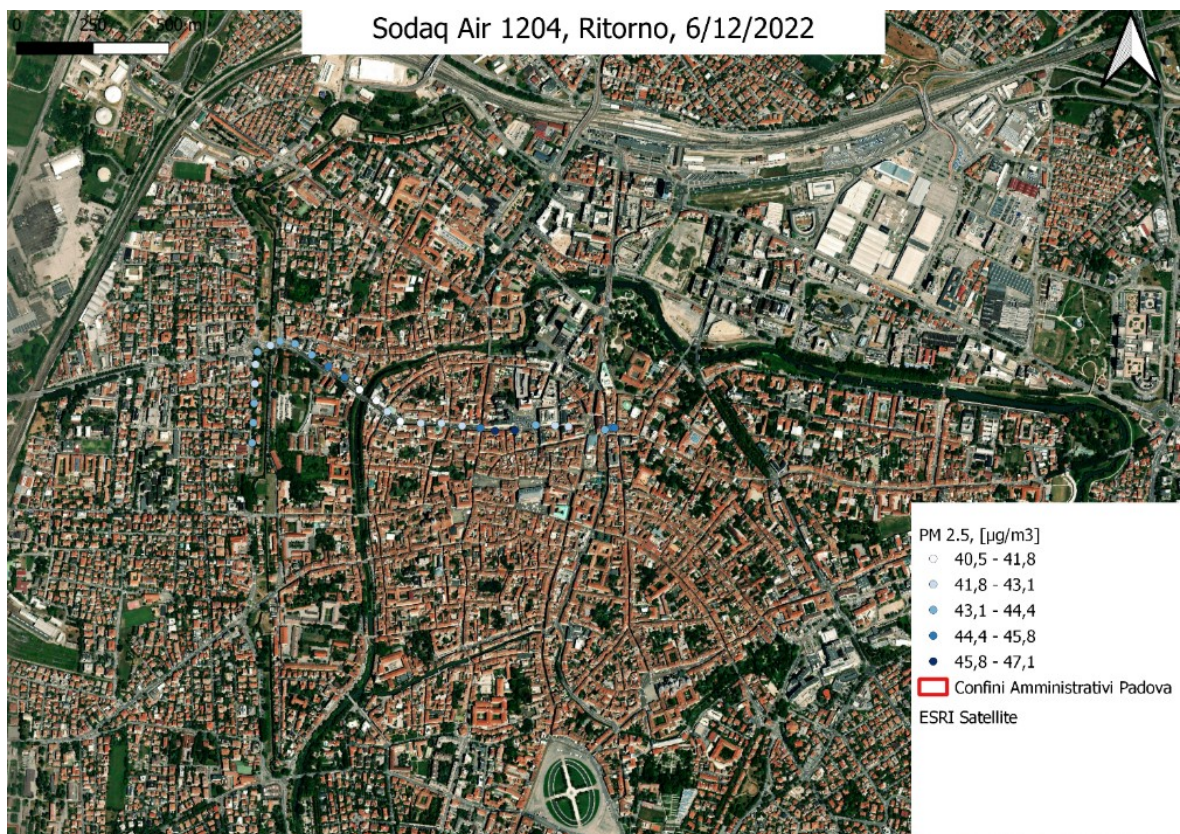


Figura 26 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di PM 2.5 nel tratto di ritorno registrati dal Sodaq Air





Figura 27 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto di ritorno registrati dal MeteoTracker



Figura 28 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto di ritorno registrati dal MeteoTracker e Sodaq Air. Riportati i valori di delta T rispetto alla temperatura media della sessione



### 3.11 Raccolta dati a Padova, confronto temperature con stazione meteo del Portello e concentrazioni di PM 2.5

Dalle figure 29 e 30 si evince che le zone del centro sono mediamente più calde rispetto ai valori registrati dalla stazione del Portello, mentre quelle fuori dal centro sono mediamente più fredde. Questo, insieme a ciò che è stato visto nelle sessioni singole di misura, conferma le ipotesi iniziali riguardo all'isole di calore nel centro di Padova.

Invece, come già anticipato nella sezione di materiali e metodi, per quanto riguarda la qualità dell'aria non c'è una stazione in centro a Padova che possa fornire valori che fungano da bianco di paragone, e quindi i dati rappresentati nelle figure 31 e 32 seguenti sono relativi a mesi interi di misurazione, momenti diversi della giornata e a condizioni ambientali molto varie. Nonostante ciò, è possibile vedere come le zone con colorazione più scura, e quindi con concentrazioni di PM 2.5 elevate, si trovino in zone del centro della città, confermando anche in questo caso, come con la temperatura, le ipotesi iniziali.

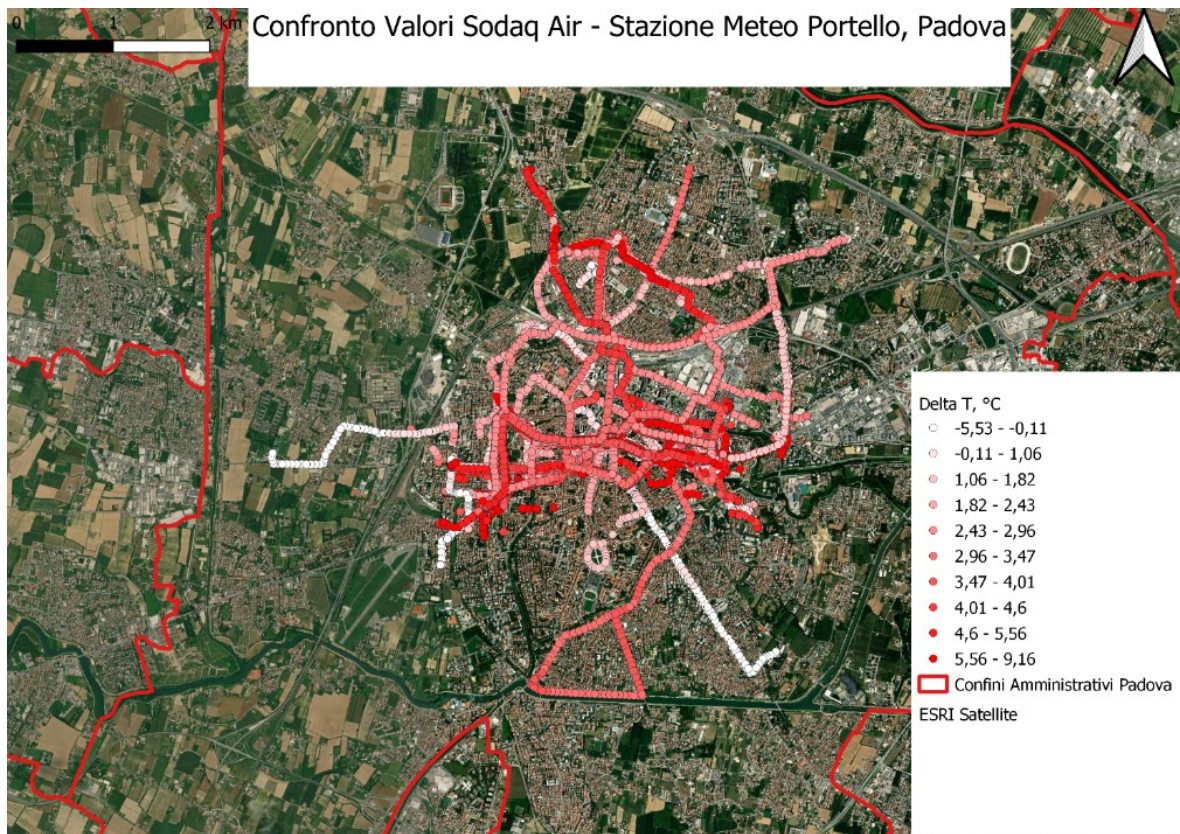


Figura 29 – Differenze di temperatura tra i valori registrati dai quattro Sodaq Air nei mesi di campagna di misurazione e la stazione del Portello

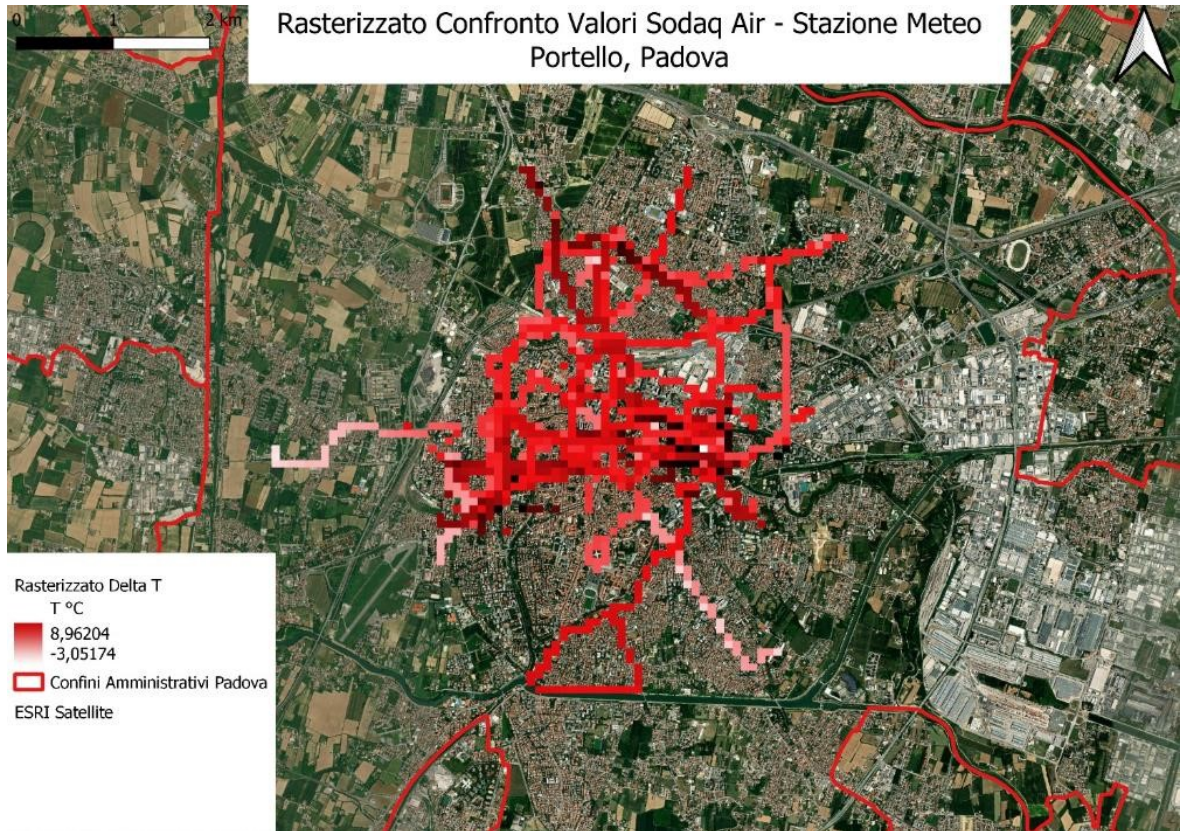


Figura 30 – Rasterizzato delle differenze di temperatura tra i valori registrati dai quattro Sodaq Air nei mesi di campagna di misurazione e la stazione del Portello



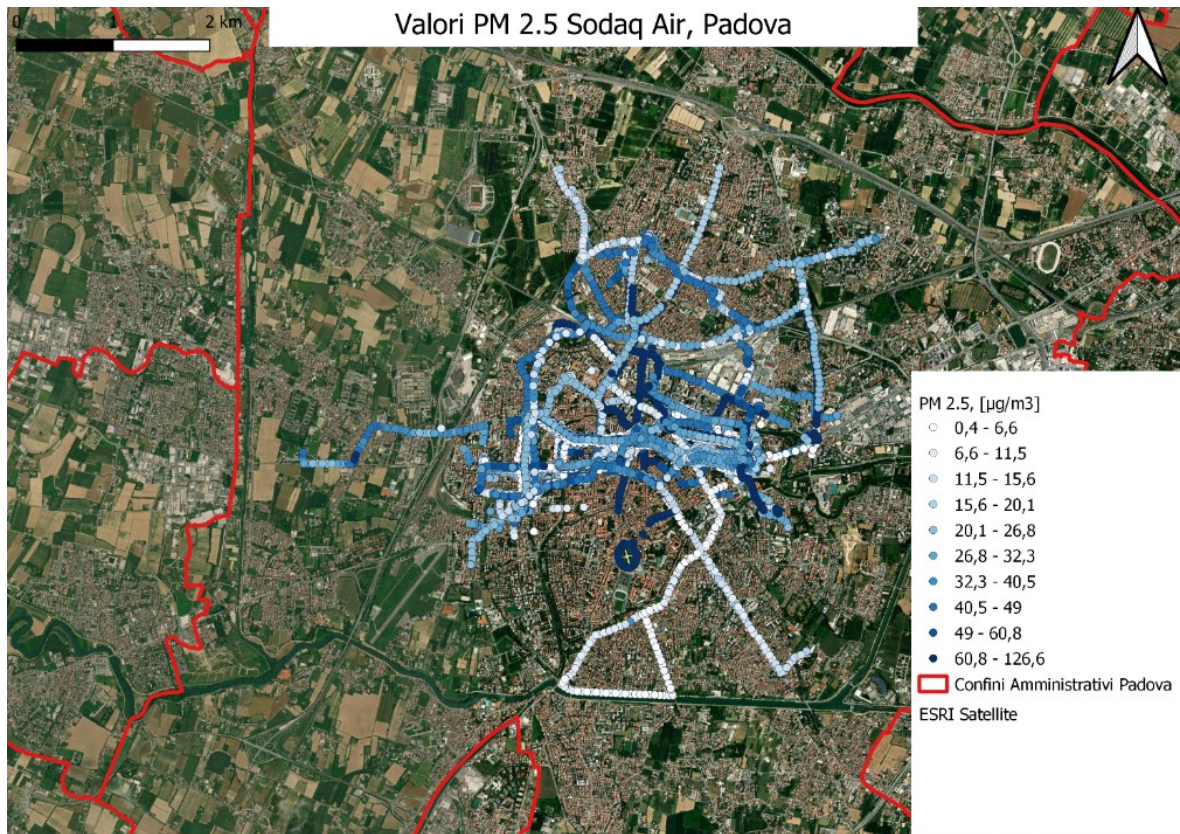


Figura 31 – Valori di PM 2.5 registrati dai quattro Sodaq Air nei mesi di campagna di misurazione

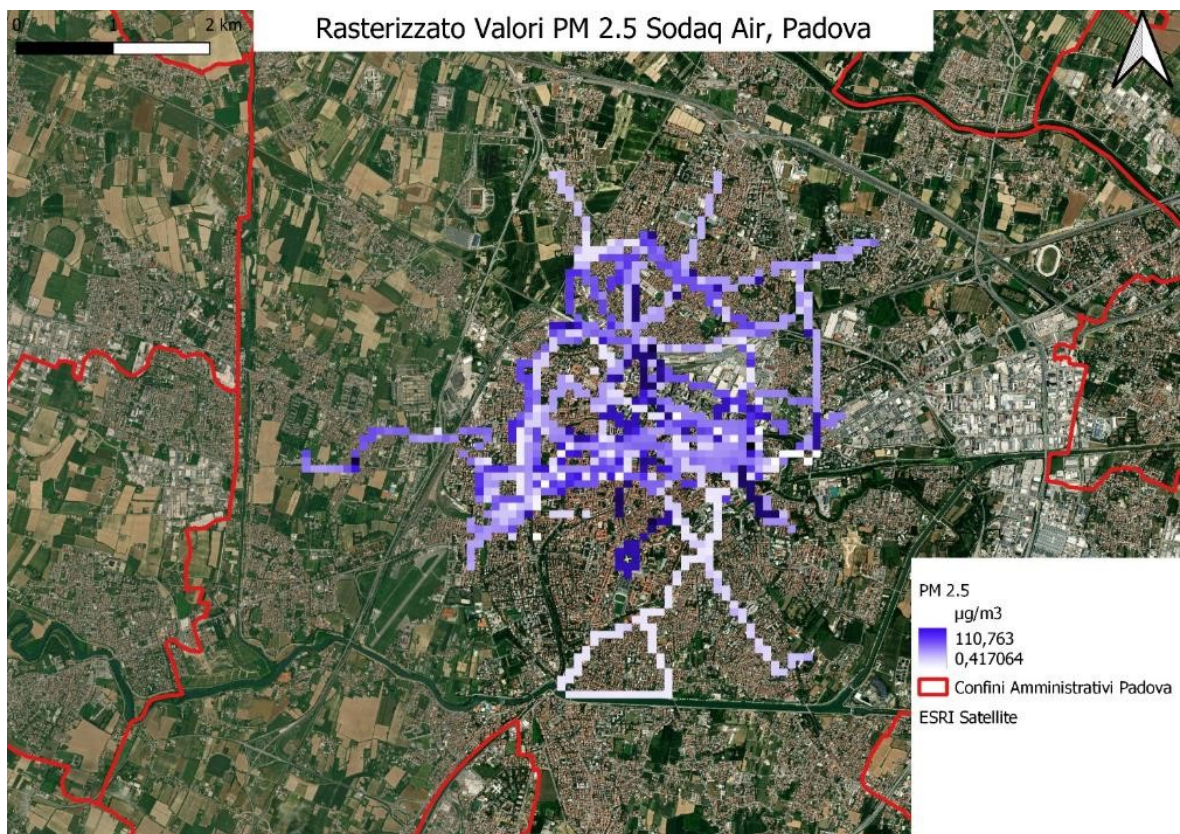


Figura 32 – Rasterizzato dei valori di PM 2.5 registrati dai quattro Sodaq Air nei mesi di campagna di misurazione

## 4. Conclusioni

Dopo la serie di test effettuati, è risultato come il MeteoTracker non sia funzionale alla modalità statica, ma molto efficace per quanto riguarda le rilevazioni delle temperature in modalità dinamica. Il Sodaq Air invece ha migliorato le sue prestazioni per quanto riguarda la modalità statica dopo l'aggiornamento del *firmware*, però presenta ancora difficoltà dovute ai tempi di adattamento a nuove temperature troppo lunghi, sia per la modalità statica che per quella dinamica. Questo problema fa sì che le sue misure in “valore assoluto” siano spesso inaffidabili. Inoltre è ancora da individuare la causa dei valori molto alti registrati in modalità statica nei test a Monselice, i quali fanno dubitare dell'affidabilità del sensore, anche se i risultati nelle misurazioni successive in dinamica sembrano più realistici nonostante l'apparente legame con i valori di temperatura (seppur non netto e non confermato). Complessivamente quindi, i due sensori si sono dimostrati confrontabili dal punto di vista delle temperature, con il MeteoTracker più affidabile del Sodaq Air dal punto di vista del valore reale misurato; per quanto riguarda la qualità dell'aria invece, il Sodaq Air non ha dato garanzie sui valori che fornisce, anche se la sua tendenza a misurare maggiori concentrazioni di PM 2.5 nelle zone urbane e più trafficate è risultata evidente.

Seppur con questi limiti, le ipotesi dello studio sono risultate confermate: le zone del centro di Padova presentano temperature maggiori, con l'individuazione di un'isola di calore che va dall'inizio di Corso Milano fino alla zona del Portello (oltre la quale non ci si è spinti con le misurazioni). Le considerazioni sulla qualità dell'aria sono legate a quelle che sono le prestazioni del sensore Sodaq Air, ma nonostante ciò le zone più trafficate della città hanno dimostrato di essere le più soggette ad alte concentrazioni di PM 2.5.

Lo sfruttamento della sensoristica *low cost* ha quindi dimostrato le sue potenzialità: seppur con la necessità di maggiori investimenti per il miglioramento dei sensori, la mole di dati raccolta è stata elevata, ed i valori registrati hanno mostrato la necessità di tenere monitorato il centro urbano con metodologie che vadano oltre i bollettini puntuali delle singole stazioni di misura dell'ARPAV, le quali, oltre a coprire piccole porzioni di territorio, restituiscono dati su base singola giornaliera (stazioni di Arcella, Mandria, Granze, APS1 a Terranegra, APS2 di via Carli) o al massimo bi-oraria (stazione di Monselice). Tali limiti non consentono di monitorare né le fluttuazioni orarie di PM 2.5 dovute al traffico ed al momento della giornata, né le zone della città a maggiore temperatura, perdendo quindi informazioni importanti che servirebbero per prendere decisioni dal punto di vista della salute e sicurezza dei cittadini di Padova.



## 5. Ringraziamenti

Voglio ringraziare innanzitutto i miei due relatori, il prof. Salvatore Pappalardo e il dott. Carlo Zanetti, per avermi proposto e reso partecipe di questo ambizioso progetto di tesi che mi ha molto stimolato ed entusiasmato fin dal primo momento. Successivamente, un sentito grazie va ai miei genitori Giorgio ed Elisa e a mia sorella Anna, i quali in primis mi hanno dato la possibilità di studiare e soprattutto mi hanno sostenuto durante tutto il mio percorso universitario, appoggiandomi anche nella scelta di cambiare facoltà dopo il primo anno. Mi sento di estendere questo grazie a tutta la mia famiglia, con i miei zii e cugini che sono stati partecipi insieme a me di ogni tappa di questo viaggio, ed in particolare a mia nonna Amalia, mia prima sostenitrice e tifosa in ogni momento. Un ultimo, ma non ultimo, ringraziamento va a tutti i miei amici e amiche che sono stati fondamentali in questi tre e mezzo lunghi anni, e senza dei quali non sarei riuscito a mantenere il giusto equilibrio nella mia vita di studente e non.

## 6. Bibliografia

Antoniciello, G. (2021). MeteoTracker, una piccola ma promettente stazione meteo portatile. NIMBUS 86.

[https://meteotracker.com/wp-content/uploads/2022/03/Nimbus86\\_03\\_MeteoTracker\\_rid-1.pdf](https://meteotracker.com/wp-content/uploads/2022/03/Nimbus86_03_MeteoTracker_rid-1.pdf)

ARPA (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente) Lombardia. (2017). Progetto Bacino Padano. <https://www.arpalombardia.it/Pages/Aria/Aria-Progetti/Progetto-Bacino-Padano.aspx>

Blandino, G. (2022). Monitorare le polveri sottili, grazie alle bici: sensori *low cost* più *bikesharing* per ampliare le rilevazioni sull'inquinamento in città. Eurac Research, <https://www.eurac.edu/it/magazine/monitoraggio-ambientale-polveri-sottili-bici>

European Environment Agency (EEA). (2022). Air quality in Europe 2022. doi: 10.2800/488115

European Environment Agency (EEA). (2022). Air quality in Europe 2022: Europe's air quality status 2022. doi: 10.2800/049755

European Environment Agency (EEA). (2022). Air quality in Europe 2022: Health impacts of air pollution in Europe 2022. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution>

Hof, A., Schouwenaar, C., van Aken, S., Wesselink, J.W., de Jong, P. (2020). Cycle routes and air quality monitoring with real citizen's engagement. FIWARE.

<https://www.fiware.org/2020/10/01/cycle-routes-and-air-quality-monitoring-with-real-citizens-engagement/>

Liu, X., Li, B., Jiang, A., Qi, S., Xiang, C. and xu, N. (2015). A bicycle-borne sensor for monitoring air pollution near roadways. 166-167. 10.1109/ICCE-TW.2015.7216835.

Lu, T., Liu, Y., Garcia, A., Wang, M., Li, Y., Bravo-villasenor, G., Campos, K., Xu, J. and Han, B. (2022). Leveraging Citizen Science and Low-Cost Sensors to Characterize Air Pollution Exposure of Disadvantaged Communities in Southern California. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022, 19(14):8777. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148777>

Mazon, J. (2022). Transects of urban CO<sub>2</sub> measurements on a bicycle-based atmospheric sensor. *Weather*, 77: 352-355. <https://doi.org/10.1002/wea.4243>

Rubio-Iglesias, J.M., Edovald, T., Grew, R., Kark, T., Kideys, A.E., Peltola, T. and Volten, H. (2020) Citizen Science and Environmental Protection Agencies: Engaging Citizens to Address Key Environmental Challenges. *Frontiers in Climate*, Vol. 2. doi: 10.3389/fclim.2020.600998

Schaffer, K. G., Gadsby, A., Alton, N., Maddox, S., Lowentritt, S. J., LeDantec, C., Rodgers M. and Watkins, K. (2019). Measuring Temporal and Spatial Exposure of Urban Cyclists to Air Pollutants Using an Instrumented Bike (No. GT-01-09). Center for Advancing Research in Transportation Emissions, Energy, and Health. Texas A&M Transportation Institute. <http://www.carttech.org/wp-content/uploads/2020/11/01-09-GT-Measuring-Temporal-and-Spatial-Exposure-of-Urban-Cyclists-to-Air-Pollutants-Using-an-Instrumented-Bike-Watkins.pdf>

Zagolin, L., Marson, G. and De Bortoli, A. (2020). Potenzialità e limiti nell'utilizzo di sensori low-cost per la misura del particolato atmosferico PM10 in aria ambiente. ARPAV. [https://www.snambiente.it/wp-content/uploads/2020/12/Aria-Sensori-lowcost\\_Report-2020.pdf](https://www.snambiente.it/wp-content/uploads/2020/12/Aria-Sensori-lowcost_Report-2020.pdf)

## 7. Sitografia

[https://meteotracker.com/wp-content/uploads/2022/03/Nimbus86\\_03\\_MeteoTracker\\_rid-1.pdf](https://meteotracker.com/wp-content/uploads/2022/03/Nimbus86_03_MeteoTracker_rid-1.pdf)

<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wea.4243>

<https://www.arpalombardia.it/Pages/Aria/Aria-Progetti/Progetto-Bacino-Padano.aspx>

<https://www.arpa.veneto.it/dati-ambientali/dati-in-diretta/aria/qualita-aria-dati-in-diretta>

<http://www.carttech.org/wp-content/uploads/2020/11/01-09-GT-Measuring-Temporal-and-Spatial-Exposure-of-Urban-Cyclists-to-Air-Pollutants-Using-an-Instrumented-Bike-Watkins.pdf>

<https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022>

<https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution>

<https://www.eea.europa.eu/publications/status-of-air-quality-in-Europe-2022/europes-air-quality-status-2022>

<https://www.eurac.edu/it/magazine/monitoraggio-ambientale-polveri-sottili-bici>

<https://www.fiware.org/2020/10/01/cycle-routes-and-air-quality-monitoring-with-real-citizens-engagement/>



<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fclim.2020.600998/full>


[https://www.researchgate.net/publication/288641134\\_A\\_bicycle-borne\\_sensor\\_for\\_monitoring\\_air\\_pollution\\_near\\_roadways](https://www.researchgate.net/publication/288641134_A_bicycle-borne_sensor_for_monitoring_air_pollution_near_roadways)

[https://www.researchgate.net/publication/362141478\\_Leveraging\\_Citizen\\_Science\\_and\\_Low-Cost\\_Sensors\\_to\\_Characterize\\_Air\\_Pollution\\_Exposure\\_of\\_Disadvantaged\\_Communities\\_in\\_Southern\\_California/fulltext/62e4453b9d410c5ff36dc01a/Leveraging-Citizen-Science-and-Low-Cost-Sensors-to-Characterize-Air-Pollution-Exposure-of-Disadvantaged-Communities-in-Southern-California.pdf](https://www.researchgate.net/publication/362141478_Leveraging_Citizen_Science_and_Low-Cost_Sensors_to_Characterize_Air_Pollution_Exposure_of_Disadvantaged_Communities_in_Southern_California/fulltext/62e4453b9d410c5ff36dc01a/Leveraging-Citizen-Science-and-Low-Cost-Sensors-to-Characterize-Air-Pollution-Exposure-of-Disadvantaged-Communities-in-Southern-California.pdf)


<https://wwwold.arpa.veneto.it/arpavinforma/pubblicazioni/potenzialita-e-limiti-nell2019utilizzo-di-sensori-low-cost-per-la-misura-del-particolato-atmosferico-pm10-in-aria-ambiente/>

# Allegato 1

Foglio con certificazione della taratura del termometro Lutron da parte di un laboratorio accreditato.



Centro di Taratura LAT N° 123  
Calibration Centre  
Laboratorio Accreditato di Taratura



LAT N° 123  
Membro degli Accordi di Mutuo Riconoscimento  
EA, IAF e ILAC  
Signatory of EA, IAF and ILAC Mutual Recognition Agreements

Certificato di Taratura LAT 123 19-ST-1109 Pagina 3 di 3

### RISULTATI DELLA TARATURA

**Catena Termometrica con sonda a termoresistenza Pt100**

Costruttore : LT LUTRON  
Modello : TM-947SD (Ingresso "PT2")  
Matricola : I.475772  
Risoluzione: 0,1 °C

Dati relativi alla sonda:  
Costruttore: N.n.  
Modello: PT56c (Pt100)  
Matricola : 470-0014

PUNTO N°	TEMPERATURA DI RIFERIMENTO [°C]	TEMPERATURA INDICATA [°C]	DIFFERENZA [°C]	INCERTEZZA DI MISURA [°C]
1	14,99	15,3	0,31	0,08
2	30,03	30,4	0,37	0,08
3	45,00	45,4	0,40	0,08
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				

La sonda a termoresistenza PT100 in oggetto è stata collegata all'ingresso "PT2" dello strumento indicatore in taratura.

Su specifica richiesta del Cliente la taratura è stata effettuata con un numero ridotto di punti.  
I punti di taratura sono stati indicati dal committente.

CertCAT\_v3.11.xls

Figura 33 – Certificato taratura termometro Lutron

## Allegato 2

Qui di seguito sono riportate le carte relative agli altri due test in dinamica, eseguiti in modo analogo a quello riportato nel capitolo “3.8 Test in dinamica, rappresentazione su QGIS”. I risultati e le considerazioni che possiamo trarre sono le stesse della prima prova, e vanno a confermare le valutazioni sugli strumenti scritte in precedenza.

### Prova Dinamica 2, Ore 15:00



Figura 34 – Carte prove dinamiche, valori di temperatura registrati dal Sodaq Air





Figura 35 – Carte prove dinamiche, valori di PM 2.5 registrati dal Sodaq Air



Figura 36 – Carte prove dinamiche, valori di temperatura registrati dal MeteoTracker





Figura 37 – Carte prove dinamiche, valori di temperatura registrati dal MeteoTracker e dal Sodaq Air. Riportati i delta T rispetto alla temperatura media della sessione di prova



Prova Dinamica 3, Ore 19:00



Figura 38 – Carte prove dinamiche, valori di temperatura registrati dal Sodaq Air



Figura 39 – Carte prove dinamiche, valori di PM 2.5 registrati dal Sodaq Air





Figura 40 – Carte prove dinamiche, valori di temperatura registrati dal MeteoTracker



Figura 41 – Carte prove dinamiche, valori di temperatura registrati dal MeteoTracker e dal Sodaq Air. Riportati i delta T rispetto alla temperatura media della sessione di prova

## Allegato 3

Questo allegato contiene la parte cartografica e le considerazioni sulle altre due giornate selezionate nella campagna di misura di Padova oltre al 6 dicembre 2022.

30 novembre 2022

Più evidente al ritorno che in andata, però è possibile vedere in entrambi i momenti della giornata come le zone del centro, in particolare Corso Milano, via Francesco Marzolo, via Altinate e via del Portello, siano ad una temperatura maggiore rispetto alle zone immediatamente periferiche rispetto al centro. Al mattino, intorno alle ore 8:00, il delta T tra le zone più calde e quelle più fredde è minore rispetto al ritorno nel primo pomeriggio, ore 16:30 circa. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che nel corso della mattinata l'energia termica si è accumulata tramite il traffico e tramite le radiazioni solari, facendo sì che a quell'ora la T delle zone del centro fosse maggiore in proporzione a quella della periferia rispetto al mattino. Inoltre, come visto dai test sugli strumenti, si può notare come in valore assoluto le differenze di temperatura registrate da Sodaq Air e MeteoTracker siano molto diverse, però i delta T tra le temperature massime e minime sono circa uguali tra i due strumenti. Per quanto riguarda la qualità dell'aria, i PM 2.5 sembrano seguire in maniera meno netta i valori di temperatura (vedi in particolare le code del ritorno nelle figure 46 e 47) come visto nei test, anche se questa tendenza non è del tutto svanita. Le zone del centro risultano quelle più inquinate, e la mattina al contrario ha fatto rilevare i valori più alti di PM 2.5.



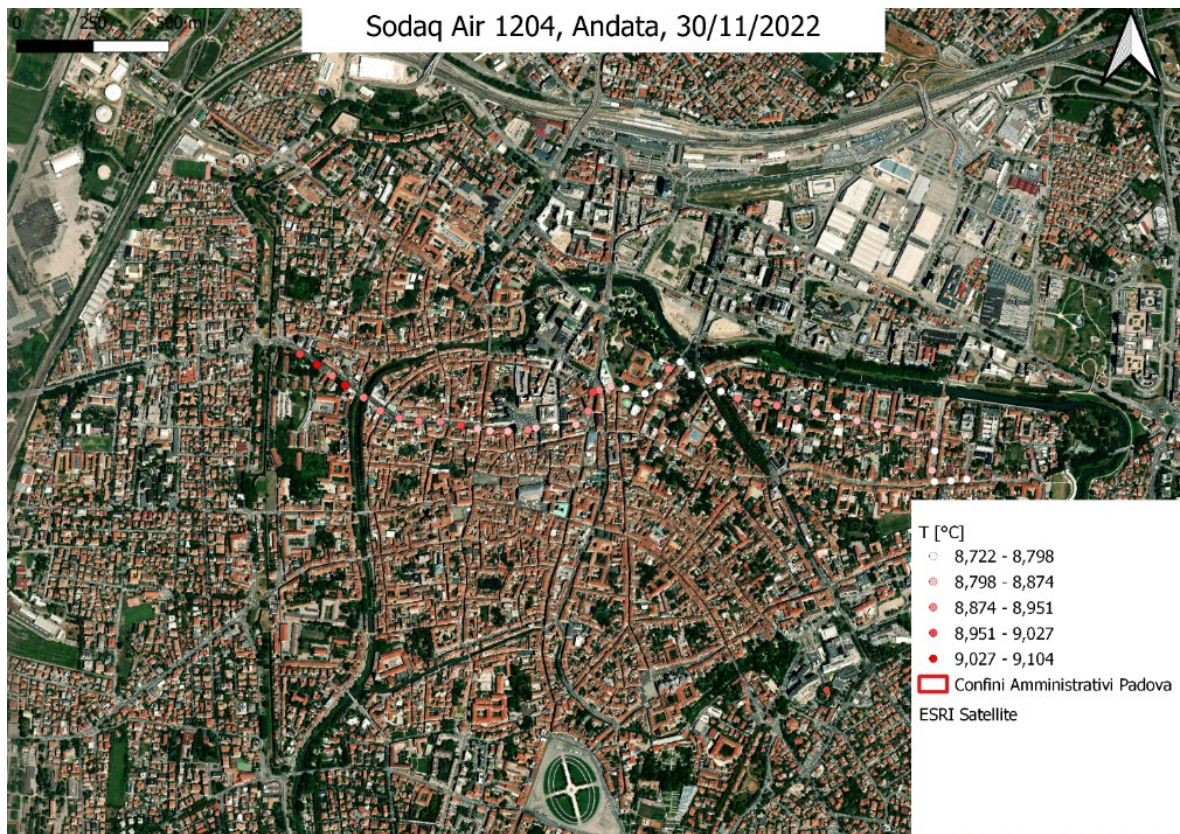


Figura 42 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto d’andata registrati dal Sodaq Air

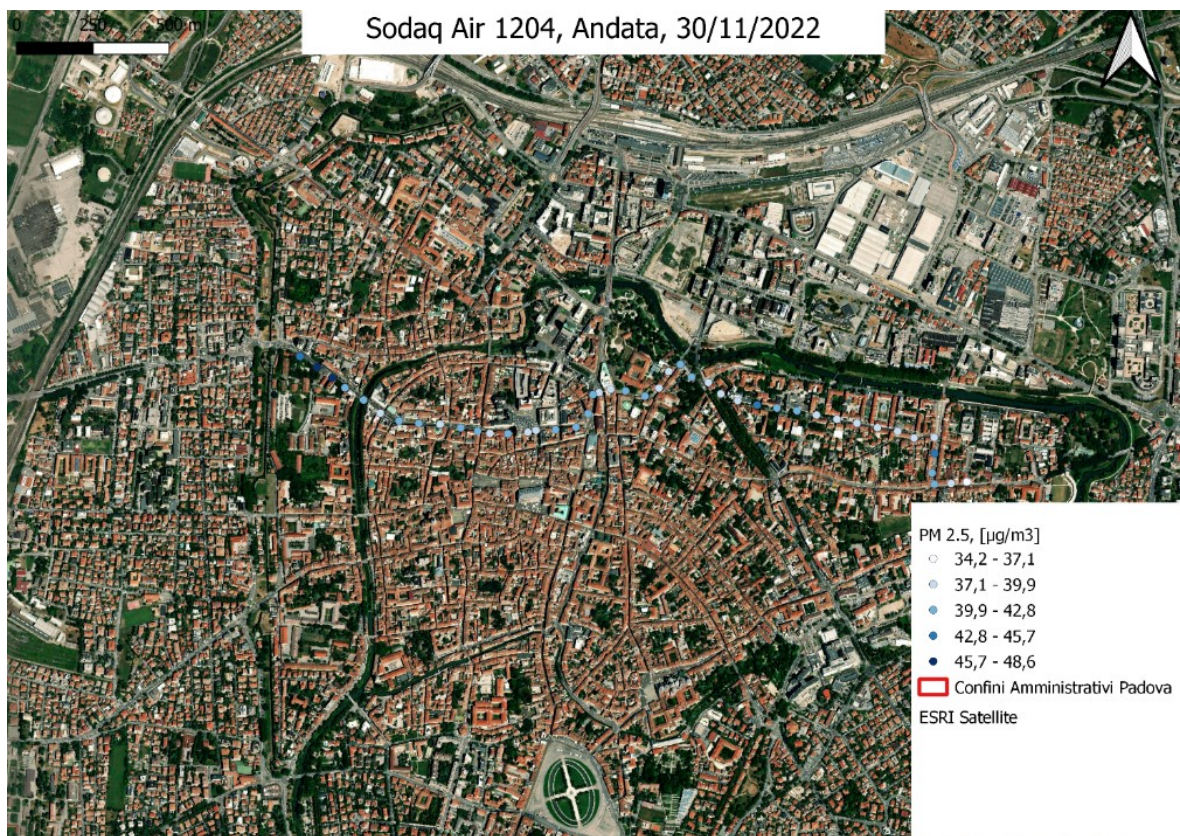


Figura 43 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di PM 2.5 nel tratto d’andata registrati dal Sodaq Air



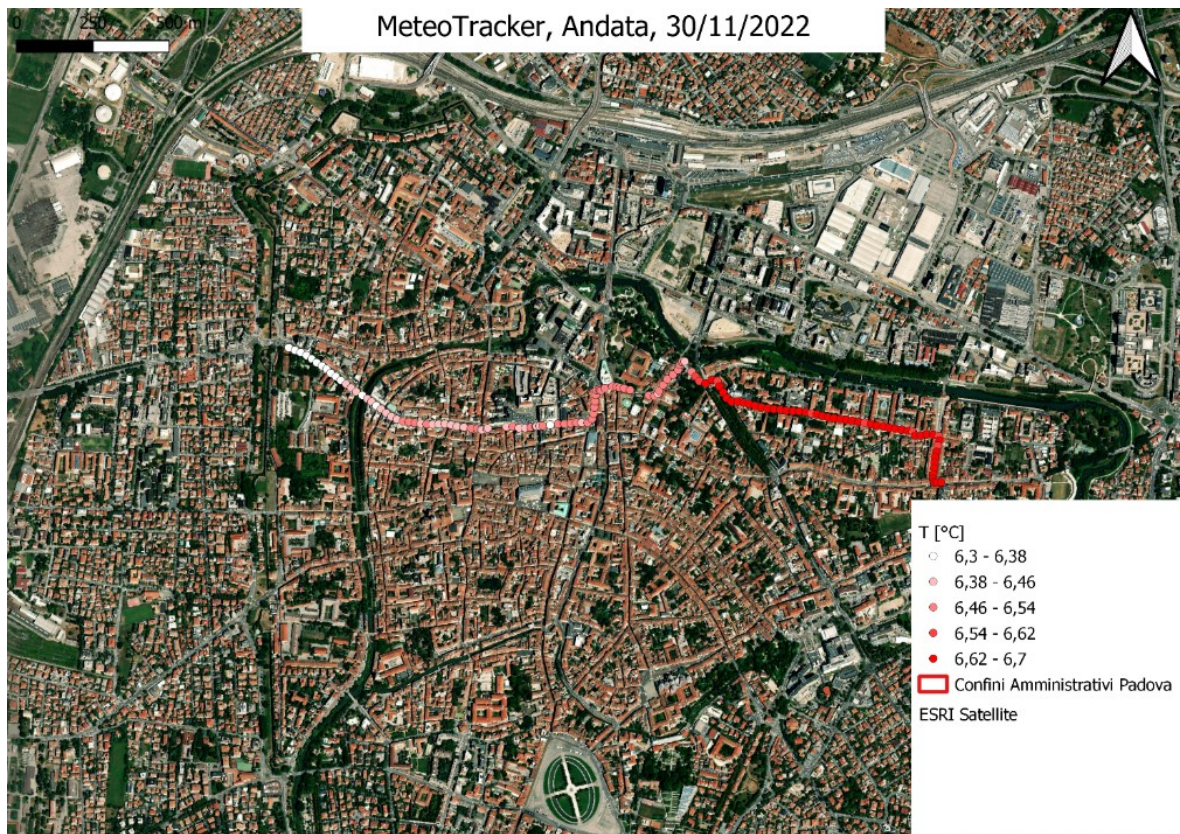


Figura 44 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto d’andata registrati dal MeteoTracker



Figura 45 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto d’andata registrati dal MeteoTracker e Sodaq Air. Riportati i valori di delta T rispetto alla temperatura media della sessione



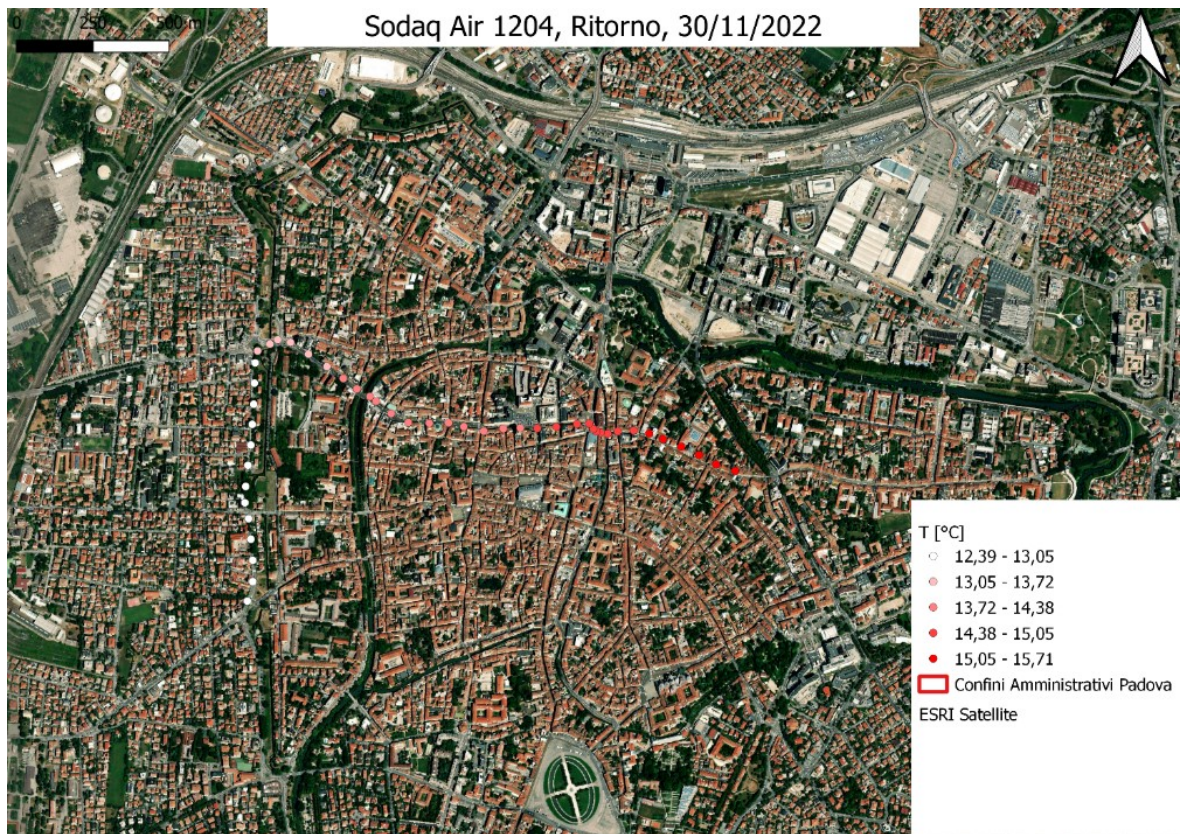


Figura 46 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto di ritorno registrati dal Sodaq Air

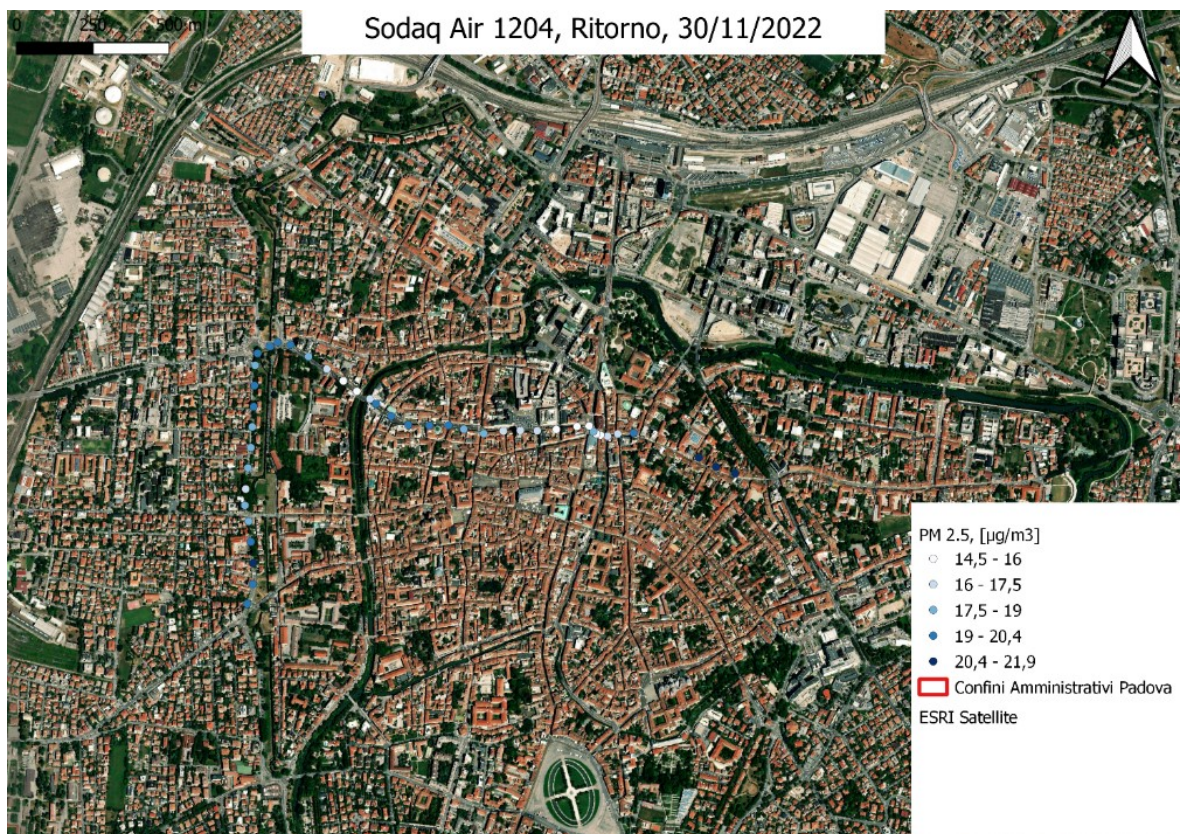


Figura 47 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di PM 2.5 nel tratto di ritorno registrati dal Sodaq Air



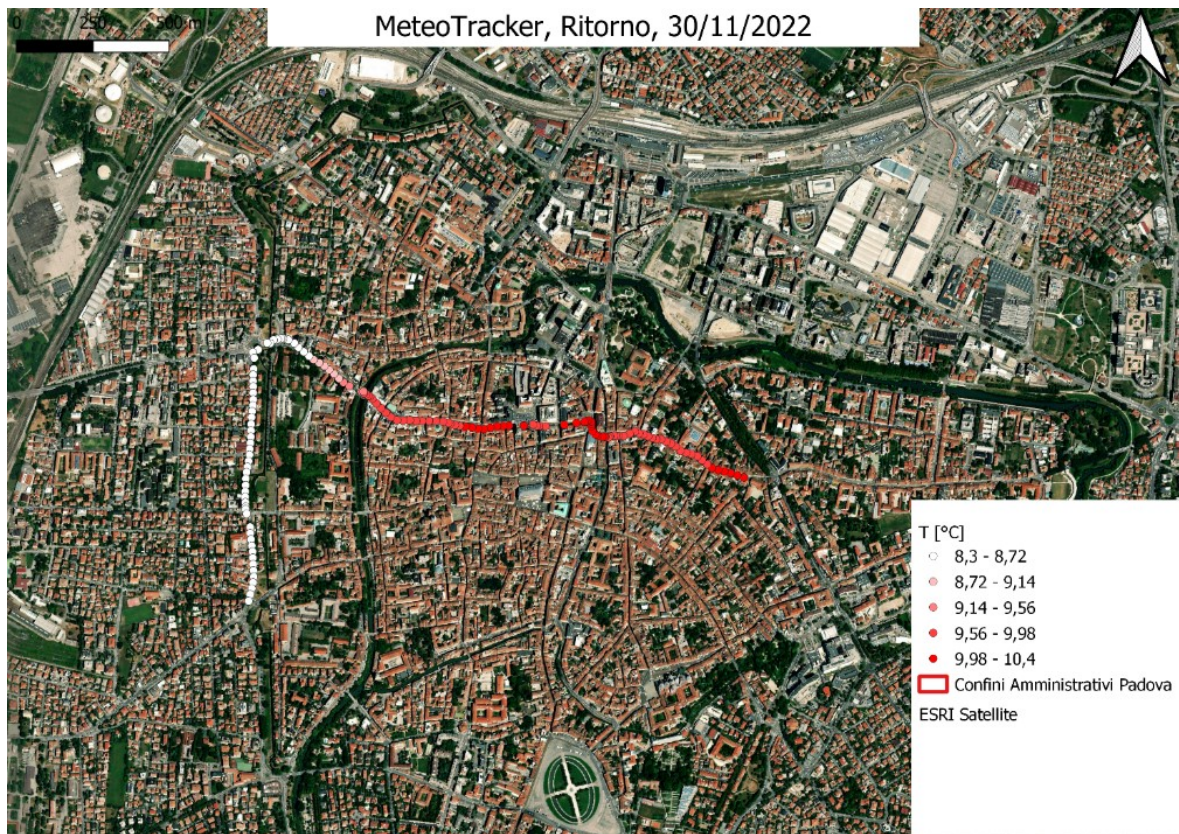


Figura 48 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto di ritorno registrati dal MeteoTracker



Figura 49 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto di ritorno registrati dal MeteoTracker e Sodaq Air. Riportati i valori di delta T rispetto alla temperatura media della sessione



19 Dicembre 2022

Anche in questo caso, le considerazioni precedentemente scritte possono essere ripetute. Le zone del centro risultano le più calde, e per la qualità dell'aria si confermano più inquinate le zone di Corso Milano e intorno alla rotonda precedentemente citata, anche rispetto ad altre zone del centro stesso (vedi via Marzolo nella figura 53).

I delta T maggiori, tra zone più calde e zone più fredde, sono stati registrati il pomeriggio, e le concentrazioni di PM 2.5 maggiori, in valore assoluto, più o meno si equivalgono tra mattina e pomeriggio.



Figura 50 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto d'andata registrati dal Sodaq Air





Figura 51 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di PM 2.5 nel tratto d'andata registrati dal Sodaq Air

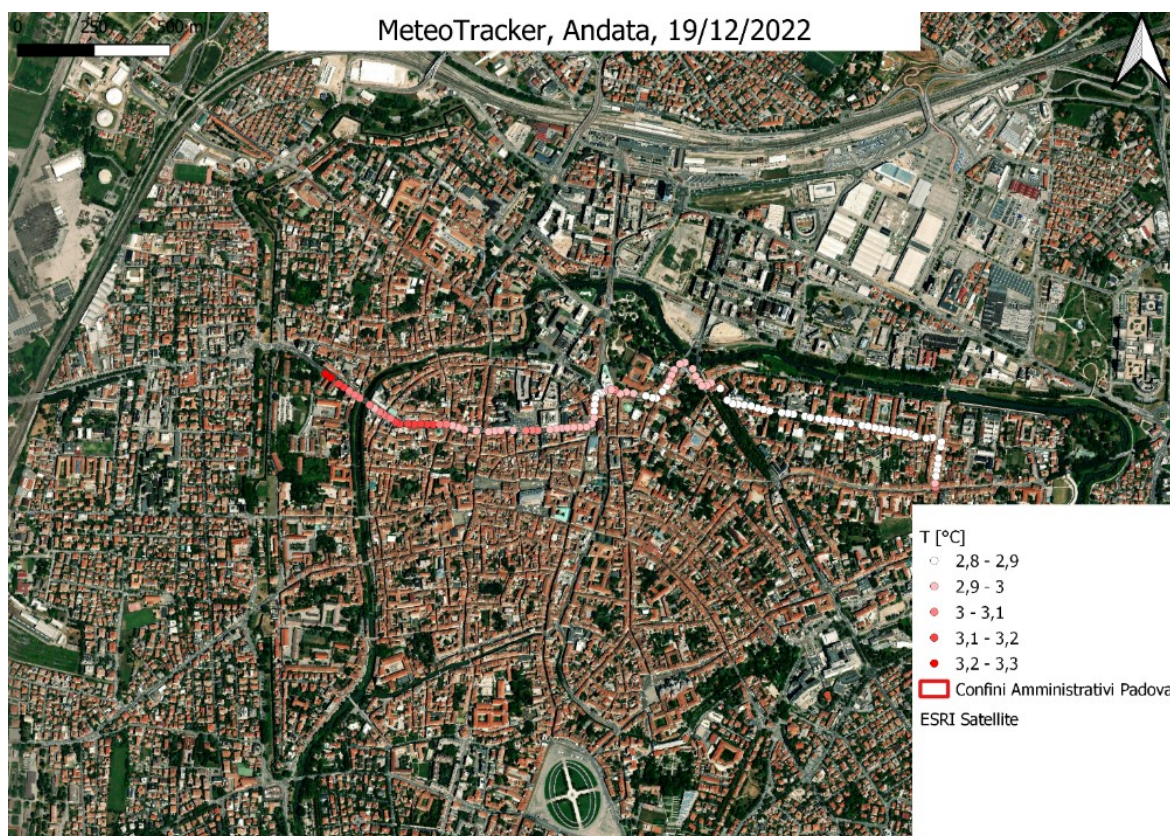


Figura 52 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto d'andata registrati dal MeteoTracker





Figura 53 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto d’andata registrati dal MeteoTracker e Sodaq Air. Riportati i valori di delta T rispetto alla temperatura media della sessione

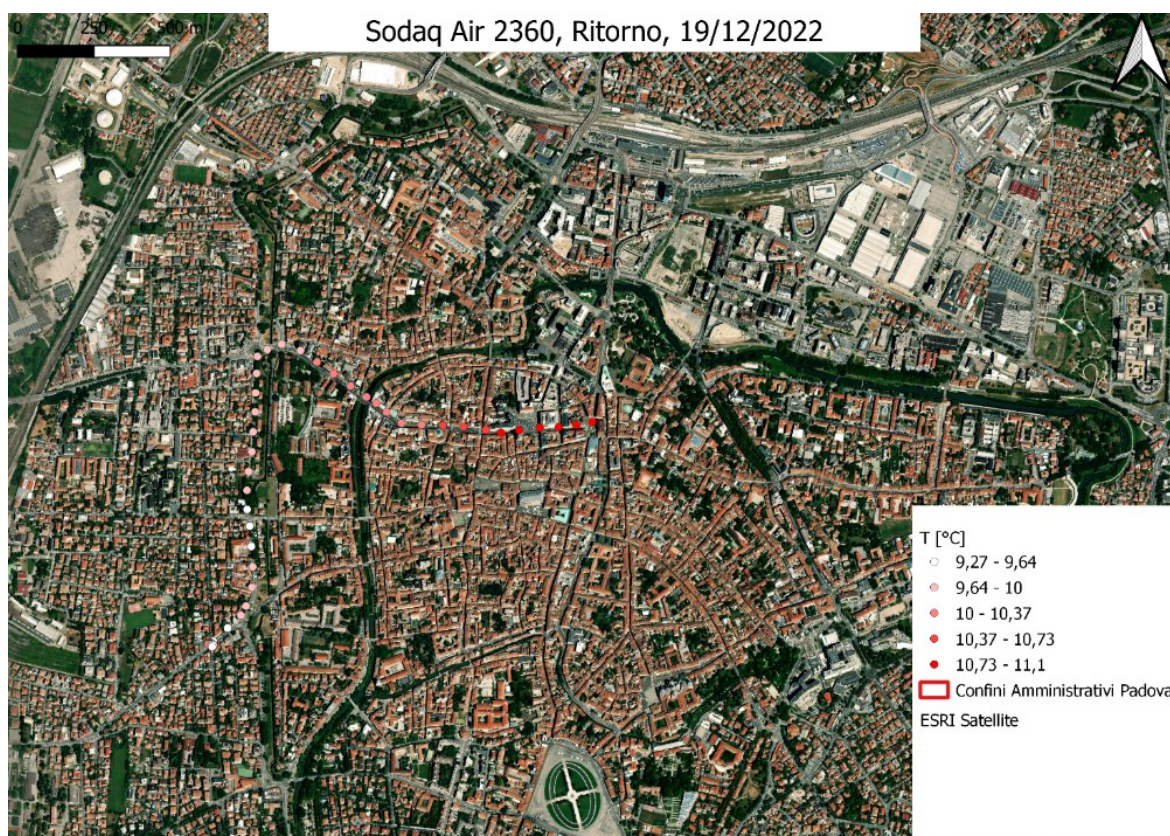


Figura 54 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto di ritorno registrati dal Sodaq Air



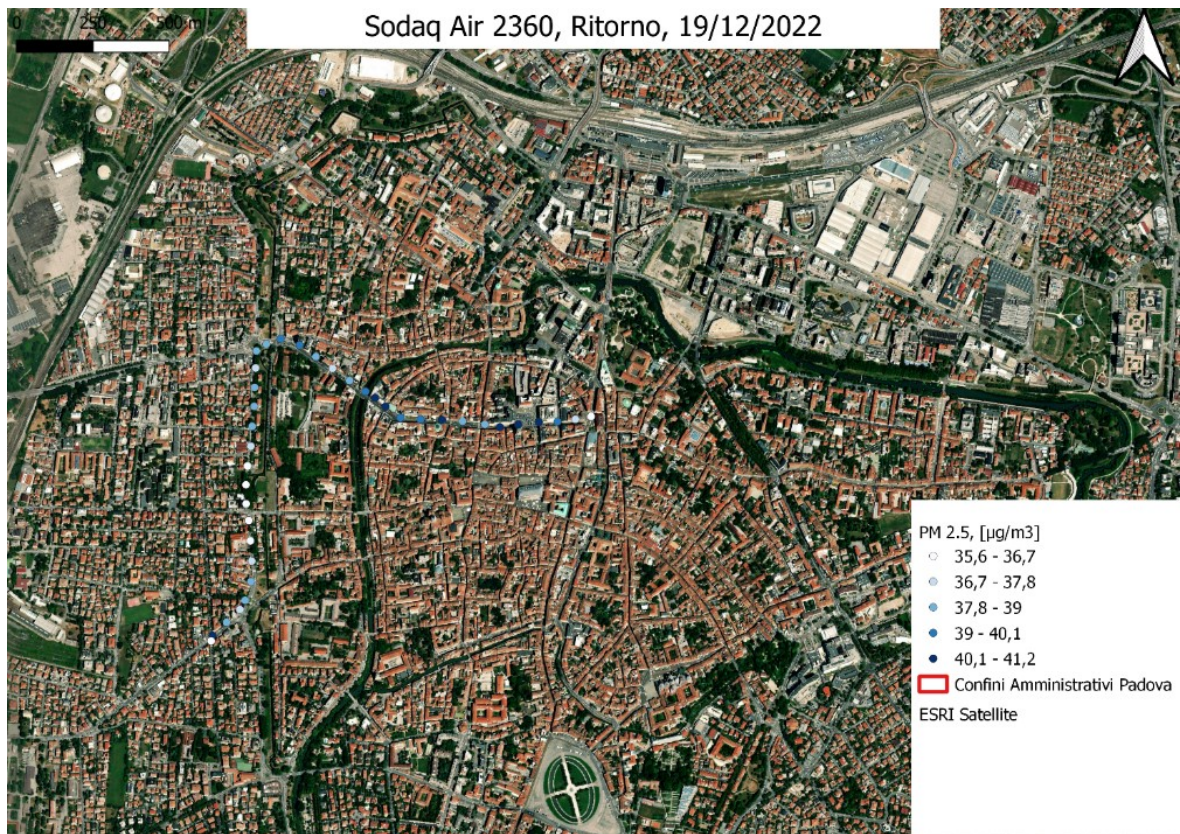


Figura 55 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di PM 2.5 nel tratto di ritorno registrati dal Sodaq Air



Figura 56 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto di ritorno registrati dal MeteoTracker



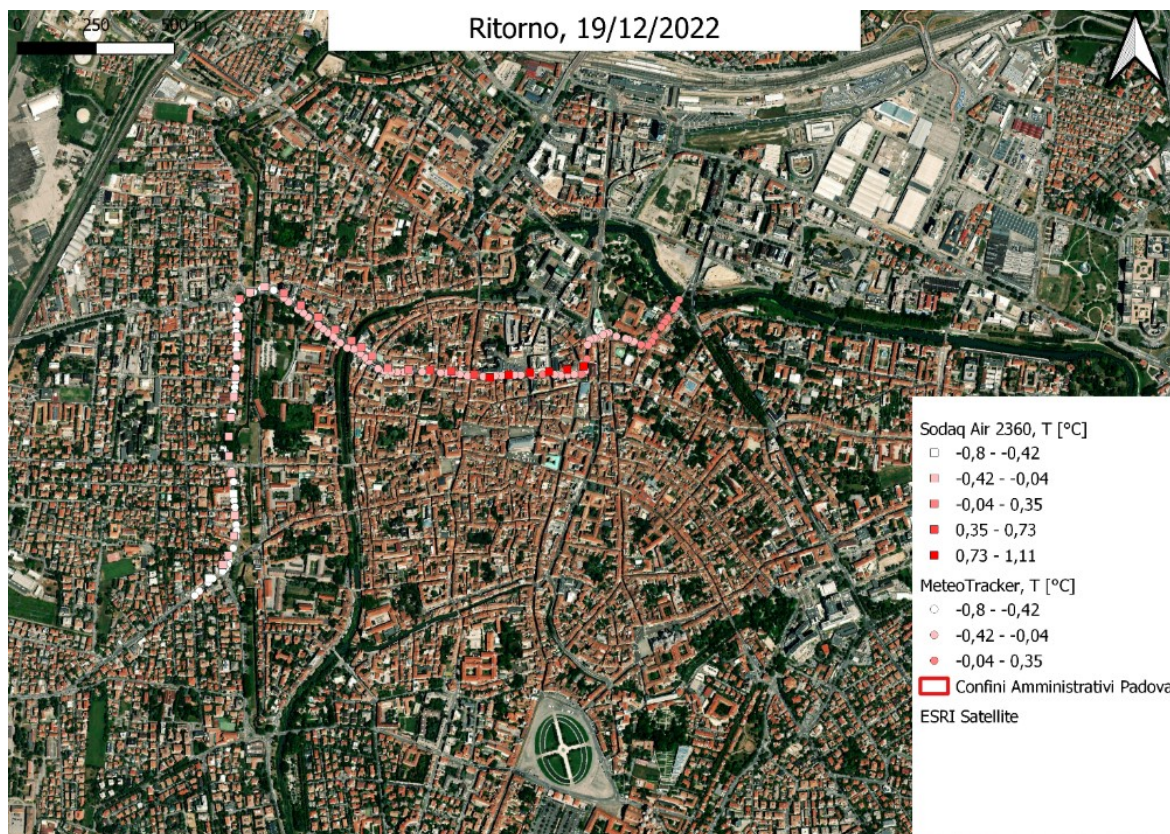


Figura 57 – Carte sessioni selezionate a Padova, valori di temperatura nel tratto di ritorno registrati dal MeteoTracker e Sodaq Air. Riportati i valori di delta T rispetto alla temperatura media della sessione