



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO

Dipartimento di Ingegneria Civile,
Ambientale e Meccanica

VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DELLE EMISSIONI DAL
TERMOVALORIZZATORE DI BOLZANO

CARATTERIZZAZIONE DELLE EMISSIONI E DELLA
DISPERSIONE A SUPPORTO DI AZIONI DI
MONITORAGGIO E DI GESTIONE DI SITUAZIONI
CRITICHE

RELAZIONE TECNICA

Prefazione

La presente relazione tecnica finale è stata elaborata in adempimento di quanto previsto dalla convenzione stipulata in data 16 settembre 2015 fra il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento e la Società EcoCenter S.p.A. (art.4 c.3), per l'esecuzione di una consulenza dal titolo "*Studio tecnico per la valutazione dell'impatto delle emissioni dal termovalorizzatore di Bolzano – Caratterizzazione delle emissioni e della dispersione a supporto di azioni di monitoraggio e di gestione di situazioni critiche*" e successiva integrazione di data 12 luglio 2017.

Lo studio si è sviluppato nelle seguenti azioni:

1. Caratterizzazione meteo-climatologica dell'area d'indagine mediante analisi di dati da stazioni di misura esistenti nell'area e da strumentazione appositamente installata nell'ambito dello studio per campagne di misura mirate.
2. Progettazione ed implementazione di una catena modellistica per la simulazione numerica dei processi meteorologici e di dispersione degli inquinanti sulla base delle migliori soluzioni tecnologiche disponibili.
3. Esecuzione di campagne di misura con rilasci controllati di gas tracciante passivo ed inerte in corrispondenza di giornate climatologicamente rappresentative per l'area d'indagine, supportate da simulazioni in tempo reale mediante la catena modellistica per prevedere le aree di maggiore ricaduta del tracciante.
4. Validazione e calibrazione della catena modellistica, sulla base delle misure effettuate durante le campagne, allo scopo di ottenere una catena modellistica ottimizzata per le condizioni topografiche e meteorologiche peculiari della conca di Bolzano.
5. Svolgimento di simulazioni numeriche di lungo periodo con il modello validato e tarato per la stima delle concentrazioni medie annue degli inquinanti emessi dall'impianto al fine di individuare i punti in cui collocare una eventuale rete di monitoraggio permanente.

6. Simulazione numerica (con il modello validato e tarato) di eventi accidentali o critici che possono interessare l'impianto e determinare ricadute rilevanti nell'area circostante il termovalorizzatore.

Come previsto dalla convenzione lo studio è stato condotto sotto la responsabilità tecnico-scientifica del prof. Dino Zardi, coordinatore del Gruppo di Fisica dell'Atmosfera del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università degli studi di Trento, e grazie alla collaborazione dell'ing. Marco Falocchi, dell'ing. Lorenzo Giovannini, dell'ing. Elena Tomasi, afferenti allo stesso Gruppo, e dell'ing. Gianluca Antonacci della società CISMA s.r.l., nonché dell'apporto di altri soggetti individuati nella successiva Introduzione.

Indice

Introduzione	1
1 Monitoraggio e caratterizzazione dei processi atmosferici nella conca di Bolzano	6
1.1 Descrizione generale	6
1.2 Layout strumentale	7
1.2.1 Strumentazione per il monitoraggio meteorologico già presente nell'area d'indagine	7
1.2.2 Strumentazione aggiuntiva	9
1.3 Caratterizzazione climatologica	16
1.4 Analisi della struttura termica della conca di Bolzano	20
1.4.1 Fenomeni invernali tipici	21
1.4.2 Caratterizzazione di un anno climatologicamente rappresentativo	25
1.5 Caratterizzazione del regime dei venti	31
1.5.1 Campo di vento allo sbocco a sud della Conca di Bolzano	32
1.6 Campo di vento allo sbocco della Val d'Isarco nella Conca di Bolzano	40
2 Modelli numerici utilizzati	44
2.1 Modello meteorologico prognostico: Weather Research and Forecasting (WRF)	44
2.2 Modello meteorologico diagnostico: CALMET	46
2.3 Modello di dispersione: CALPUFF	46
3 Campagne di misura con rilascio di tracciante	48
3.1 Descrizione generale	48
3.1.1 Selezione del gas tracciante	49
3.1.2 Modalità di rilascio del gas tracciante	50
3.1.3 Modalità di campionamento	51
3.1.4 Analisi di laboratorio per la determinazione delle concentrazioni di tracciante	53

3.1.5	Catene modellistiche a supporto delle campagne di misura	53
3.1.6	Modalità di esecuzione delle campagne di misura	55
3.2	Campagna 2016	56
3.2.1	Catena modellistica nowcasting	56
3.2.2	Condizioni meteorologiche durante i rilasci	57
3.2.3	Descrizione dei rilasci e risultati	64
3.2.4	Revisione della conduzione degli esperimenti di rilascio	66
3.3	Campagna 2017	67
3.3.1	Catena modellistica nowcasting	68
3.3.2	Condizioni meteorologiche durante i rilasci	69
3.3.3	Descrizione dei rilasci e risultati	73
4	Calibrazione della catena modellistica sulla base dei campionamenti effettuati	80
4.1	Simulazione meteorologica ad alta risoluzione	81
4.2	Simulazioni della dispersione del tracciante mediante modello CAL-PUFF: calibrazione del modello	88
4.2.1	Procedura e scopo della calibrazione	88
4.2.2	Analisi di stabilità e scelta dei macro-parametri da calibrare	89
4.2.3	Individuazione degli indici di valutazione delle simulazioni	90
4.2.4	Calibrazione del modello sui macro-parametri	92
4.2.5	Calibrazione di dettaglio sui parametri secondari	95
5	Valutazione delle concentrazioni medie annue	96
5.1	Simulazioni meteorologiche di lungo periodo	96
5.2	Simulazioni di dispersione degli inquinanti rilasciati dal termovalorizzatore	104
5.3	Risultati	106
5.3.1	Concentrazioni medie annue	106
5.3.2	Concentrazioni massime giornaliere	112
5.3.3	Concentrazioni massime orarie	117
6	Valutazione di ipotetici scenari critici	121
6.1	Caratterizzazione del rilascio accidentale in termini di emissioni	121
6.2	Individuazione delle condizioni meteorologiche sfavorevoli	123
6.2.1	Caso critico per Bolzano - 26/02/16	123
6.2.2	Caso critico per Laives - 03/11/16	123
6.2.3	Caso critico per l'alta Val d'Adige - 01/12/16	124
6.2.4	Caso critico per la zona di Appiano - 11/02/16	124

6.3	Risultati	124
6.3.1	Caso critico per Bolzano	127
6.3.2	Caso critico per Laives	128
6.3.3	Caso critico per l'alta Val D'Adige	129
6.3.4	Caso critico per la zona di Appiano	130
Conclusioni		131
A Valutazione del giorno medio e del giorno caratteristico		135
A.1	Definizioni e creazione del dataset	135
A.2	Determinazione del giorno medio e del giorno caratteristico	137
B Sensoristica di telerilevamento utilizzata per lo studio		140
B.1	Profilatore termico MTP5-HE	140
B.1.1	Verifica dell'attendibilità dei dati misurati dal profilatore termico	141
B.2	Apparecchiatura SODAR	145
B.2.1	Principio di funzionamento del sensore	145
B.2.2	Installazione e utilizzo della strumentazione SODAR nell'ambito dello studio tecnico e contestualizzazione delle misure con le caratteristiche del sito sperimentale.	149
B.3	Strumentazione Doppler Wind-LIDAR	153
C Campagna sperimentale per la determinazione del pennacchio del termovalorizzatore		157
D Collaborazioni di ricerca e comunicazione dei risultati		160
Bibliografia		165

Elenco delle figure

1.1	Fotografie rilevate in occasione del sopralluogo effettuato in data 23/09/2015: (a) lato Sud del tetto dell’impianto e nuovo camino; (b) posizione della stazione meteorologica ad inizio studio; (c) identificazione del punto sul tetto in cui ricollocare la stazione.	8
1.2	Immagini relative all’installazione della strumentazione SODAR sul tetto del termovalorizzatore durante la prima campagna test 26-30/10/2015: (a) antenna; (b-d) installazione della struttura di pannelli fonoassorbenti; (e, f) installazione ultimata.	10
1.3	Installazione della strumentazione SODAR presso l’aeroporto civile “G. Caproni” di Trento (loc. Mattarello) a fianco del Wind Profiler gestito dal Servizio Meteorologico della Provincia Autonoma di Trento (Meteotrentino), durante la seconda campagna test 3-21/12/2015: (a) antenna e struttura di pannelli fonoassorbenti; (b) Wind Profiler (sinistra) e SODAR (destra).	11
1.4	Installazione del Doppler Wind-LIDAR sul tetto di Palazzo 12 della Provincia Autonoma di Bolzano: (a) vista della città di Bolzano dal sito di misura; (b) sbocco della Val d’Isarco nella conca; (c, d) Doppler Wind-LIDAR durante la campagna di misure; (e) disinstallazione.	14
1.5	Risultati dell’analisi climatologica condotta sulla base dei dati misurati dalla stazione di Bolzano Ospedale per il periodo invernale (dicembre-febbraio). (a) Distribuzione in frequenza delle classi di stabilità oraria ottenute attraverso la classificazione proposta da Pasquill-Gifford e le classi di stabilità oraria più frequenti utilizzate per definire il giorno medio. (b) Cicli giornalieri della direzione del vento per i giorni caratteristici individuati (grigio) e (linee colorate) i giorni caratteristici con ciclo giornaliero simile. (c) Cicli giornalieri della temperatura dell’aria per i giorni caratteristici selezionati nel grafico precedente.	18

1.6	Risultati dell'analisi climatologica condotta sulla base dei dati misurati dalla stazione di Bolzano Ospedale per il periodo estivo (giugno-agosto). (a) Distribuzione in frequenza delle classi di stabilità oraria ottenute attraverso la classificazione proposta da Pasquill-Gifford e le classi di stabilità oraria più frequenti utilizzate per definire il giorno medio. (b) Cicli giornalieri della direzione del vento per i giorni caratteristici individuati (grigio) e (linee colorate) i giorni caratteristici con ciclo giornaliero simile. (c) Cicli giornalieri della temperatura dell'aria per i giorni caratteristici selezionati nel grafico precedente.	19
1.7	Rappresentazione schematica dello sviluppo di un'inversione termica in una valle e della conseguente modifica del profilo verticale della temperatura dell'aria (Whiteman, 2000)	20
1.8	Quadro sinottico del periodo 5-13 dicembre 2016. Evoluzione dell'altezza del geopotenziale a 500 hPa. Nei grafici si osserva che fino all'11 dicembre sull'area mediterranea ed in particolare sull'Italia è insistita un'alta pressione (colori caldi) con assenza di forzanti sinottiche. Dal 12 dicembre, invece, il lobo di bassa pressione (colori freddi) sull'Europa orientale si sposta verso l'Italia, sviluppando venti sinottici che si configurano come eventi di Föhn all'interno della conca di Bolzano (rianalisi CFSR, http://www.wetterzentrale.de).	22
1.9	Temperatura dell'aria (a) misurata dal profilatore termico, andamento del gradiente della temperatura (b) e profili verticali dell'intensità (c) e della direzione del vento (d) misurati dal SODAR sul tetto del termovalorizzatore, nel periodo 5-13 dicembre 2016. Si indica l'effetto sul campo di temperature dell'intrusione del Föhn il 12 dicembre, che spira prevalentemente da NE con intensità superiori a 6 m s^{-1} fino al suolo.	23
1.10	Profili medio annuale e medi stagionali della temperatura dell'aria, misurati dal profilatore termico presso l'aeroporto di Bolzano, per l'anno 2016. Le linee con i punti rappresentano il profilo medio, mentre le linee orizzontali le deviazioni standard delle temperature alle diverse quote. Sullo sfondo la sezione trasversale E-W della Conca di Bolzano all'altezza del termovalorizzatore.	28
1.11	Cicli medi giornalieri a scala oraria e suddivisi per stagione della temperatura dell'aria misurata dal profilatore termico installato presso l'aeroporto di Bolzano. Sullo sfondo la sezione trasversale E-W della Conca di Bolzano all'altezza del termovalorizzatore.	29

1.12	Distribuzione in frequenza delle diverse tipologie di inversione termica ottenute analizzando i profili medi orari di temperatura misurati dal profilatore termico a disposizione per l'anno 2016. L'analisi dei profili di temperatura è stata condotta investigando la presenza di inversioni termiche, inversioni termiche al suolo, in quota o situazioni miste in cui nel medesimo profilo coesistono diverse tipologie di inversione.	30
1.13	Distribuzione in frequenza stagionale, a scala oraria, delle diverse tipologie di inversione termica ottenute analizzando i profili medi orari di temperatura misurati dal profilatore termico.	30
1.14	Analisi di frequenza delle direzioni (centro) e delle intensità del vento (destra) al variare della quota, ottenute dall'analisi dei dati misurati dal SODAR nel periodo 28 agosto 2016 - 5 maggio 2017. Nel grafico di sinistra si riporta (in scala logaritmica) il numero di dati disponibili per ciascun livello verticale.	33
1.15	Analisi di frequenza stagionale delle direzioni (centro) e delle intensità del vento (destra) al variare della quota, ottenute dall'analisi dei dati forniti dal SODAR nel periodo 28 agosto 2016 - 5 maggio 2017. Per ciascun periodo, i grafici a sinistra mostrano il numero di dati disponibili per la stagione investigata.	36
1.16	Cicli giornalieri di direzione e di intensità del vento per il periodo autunnale alle quote di 90 m, 140 m e 250 m s.l.m.	37
1.17	Cicli giornalieri di direzione e di intensità del vento per il periodo invernale alle quote di 90 m, 140 m e 250 m s.l.m.	38
1.18	Cicli giornalieri di direzione e di intensità del vento per il periodo primaverile alle quote di 90 m, 140 m e 250 m s.l.m.	39
1.19	Profili verticali di vento misurati dal 27 al 30 gennaio 2017 dal Wind-LIDAR (sopra) allo sbocco della Val d'Isarco e dal SODAR (sotto) sul tetto del termovalorizzatore.	42
1.20	Campo di vento simulato dal modello prognostico WRF per l'evento di <i>valley-exit jet</i> osservato nella notte tra il 28 e il 29 gennaio 2017 (mappa di sfondo da Google Earth). Entrambe le immagini si riferiscono al medesimo istante temporale, ma restituiscono il campo di vento a due diverse quote: a 10 m dal suolo (sinistra) e a 750 m s.l.m. (925 hPa), circa 450 m dal suolo (destra).	43

3.1	Modalità di rilascio del tracciante. Sezione verticale dell'impianto di termovalorizzazione con evidenziati i punti di inserimento del tracciante, del sistema di ventilazione e di misura della concentrazione di tracciante nei fumi.	51
3.2	Bottiglia a tenuta con valvola a baionetta (sinistra) e sacchetto di Teflon con pompetta (destra). Le fotografie sono state scattate durante le prove con tracciate rispettivamente del 14 febbraio 2017 e del 27 gennaio 2016.	52
3.3	Schema a blocchi della catena modellistica in modalità <i>forecasting</i> , implementata a supporto delle campagne di misura con rilascio di tracciante, utilizzata per allertare le squadre di campionamento e per individuare la posizione sul territorio delle aree di massima ricaduta, in cui raccogliere i campioni.	54
3.4	Schema a blocchi della catena modellistica di <i>nowcasting</i> , per le campagne di misura 2016. Utilizzata per confermare o modificare la posizione delle squadre di campionamento e per coordinare i campionamenti (orario di inizio e di fine prova per ciascuna squadra) in fase di rilascio.	57
3.5	Diagrammi tempo-quota della temperatura e del gradiente termico misurati dal profilatore il 22 gennaio 2016. Nel pannello inferiore, relativo al gradiente termico, i colori blu, ciano e giallo identificano rispettivamente inversione termica, condizioni stabili e condizioni instabili.	58
3.6	Diagrammi tempo-quota della velocità (pannello superiore) e della direzione (pannello centrale) del vento misurate dal SODAR sul tetto dell'impianto di termovalorizzazione. Il pannello superiore mostra l'evoluzione del profilo verticale del vento durante le ore centrali della giornata del 22 gennaio 2016, dalle 6:00 fino alle 17:00.	59
3.7	Velocità e direzioni del vento a 10 m dal suolo misurate dalle varie stazioni meteorologiche al suolo il 22 gennaio 2016.	60
3.8	Diagrammi tempo-quota della temperatura e del gradiente termico misurati dal profilatore il 27 gennaio 2016. Nel pannello inferiore, relativo al gradiente termico, i colori blu, ciano e giallo identificano rispettivamente inversione termica, condizioni stabili e condizioni instabili.	61

3.9	Diagrammi tempo-quota della velocità (pannello superiore) e della direzione (pannello centrale) del vento misurate dal SODAR sul tetto dell'impianto di termovalorizzazione. Il pannello superiore mostra l'evoluzione del profilo verticale del vento durante la mattinata del 27 gennaio 2016, dalle 5:00 fino alle 11:00.	62
3.10	Velocità e direzioni del vento a 10 m dal suolo misurate dalle varie stazioni meteorologiche al suolo il 27 gennaio 2016. WS5, WS7 e WS13 sono stazioni collocate sui versanti, le rimanenti sono stazioni di fondovalle.	63
3.11	Dislocazione delle squadre di campionamento (punti rossi) durante la campagna di misura del 22 gennaio 2016.	64
3.12	Dislocazione delle squadre di campionamento (punti rossi) durante la campagna di misura del 27 gennaio 2016 (mappa di sfondo da Google Earth).	66
3.13	Schema a blocchi della catena modellistica di <i>nowcasting</i> , per le campagne di misura 2017. Utilizzata per confermare o modificare la posizione delle squadre di campionamento e per coordinare i campionamenti (orario di inizio e di fine prova per ciascuna squadra) in fase di rilascio.	68
3.14	Diagrammi tempo-quota della temperatura e del gradiente termico misurati dal profilatore il 14 febbraio 2017. Nel pannello inferiore, relativo al gradiente termico, i colori blu, ciano e giallo identificano rispettivamente inversione termica, condizioni stabili e condizioni instabili.	69
3.15	Diagrammi tempo-quota della velocità (pannello superiore) e della direzione (pannello centrale) del vento misurate dal SODAR sul tetto dell'impianto di termovalorizzazione. Il pannello superiore mostra l'evoluzione del profilo verticale del vento durante le ore centrali del 14 febbraio 2017, dalle 6:00 fino alle 17:00.	70
3.16	Diagrammi tempo-quota della velocità (pannello superiore) e della direzione (pannello centrale) del vento misurate dal LIDAR collocato all'uscita della Val d'Isarco nella conca di Bolzano. Il pannello superiore mostra l'evoluzione del profilo verticale del vento durante le ore centrali del 14 febbraio 2017, dalle 6:00 fino alle 17:00.	71
3.17	Velocità e direzione del vento a 10 m da suolo misurate dalle varie stazioni meteorologiche al suolo il 14 febbraio 2017.	73

- 3.18 Posizioni delle squadre di campionamento durante la campagna di misure condotta il 14 febbraio 2017 (mappa di sfondo da Google Earth). In giallo, i punti di campionamento della maglia fissa, in blu, i punti di campionamento della maglia mobile per il rilascio del mattino (pannello di sinistra) e quello del pomeriggio (pannello di destra). 74
- 3.19 Concentrazioni misurate al suolo durante il primo rilascio di tracciante (campagna di misura 2017). L'istogramma blu rappresenta i valori di concentrazione misurati in ciascun punto di campionamento con le bottiglie sottovuoto (FG = maglia fissa; MG = maglia mobile). Lo sfondo grigio caratterizza gli istanti durante i quali non è avvenuto alcun campionamento. Durante il rilascio mattutino nessuna misura rappresentativa è stata raccolta con i sacchetti in Teflon. Nell'ultimo pannello è evidenziata la posizione di ciascuna squadra di campionamento con i corrispondenti indicatori. 76
- 3.20 Evoluzione temporale delle misure di concentrazione al suolo misurate a seguito del rilascio mattutino del 14 febbraio 2017. I pannelli da in alto a sinistra fino in basso a destra corrispondono ai seguenti istanti temporali: 9:45, 10:15, 10:30, 10:45, 11:00 (mappa di sfondo da Google Earth). 77
- 3.21 Concentrazioni misurate al suolo durante il secondo rilascio di tracciante (campagna di misura 2017). L'istogramma blu rappresenta i valori di concentrazione misurati in ciascun punto di campionamento con le bottiglie sottovuoto (FG = maglia fissa; MG = maglia mobile). Lo sfondo grigio caratterizza gli istanti durante i quali non è avvenuto alcun campionamento. Durante il rilascio mattutino nessuna misura rappresentativa è stata raccolta con i sacchetti in Teflon. Nell'ultimo pannello è evidenziata la posizione di ciascuna squadra di campionamento con i corrispondenti indicatori. 78
- 3.22 Evoluzione temporale delle misure di concentrazione al suolo misurate a seguito del rilascio pomeridiano del 14 febbraio 2017. I pannelli da in alto a sinistra fino in basso a destra corrispondono ai seguenti istanti temporali: 14:00, 14:30, 15:00, 15:30, 16:00 (mappa di sfondo da Google Earth). 79
- 4.1 Domini innestati nel modello WRF per la simulazione di calibrazione del modello CALPUFF, dal Nord Italia fino alla Conca di Bolzano, con le corrispondenti elevazioni. Il punto nel pannello di destra indica la posizione dell'impianto di termovalorizzazione. 81

4.2	Posizione delle stazioni di misura utilizzate come fonte di dati per l'assimilazione nella simulazione meteorologica effettuata per la calibrazione del modello CALPUFF sulla Conca di Bolzano. In diversi colori sono indicate le stazioni meteorologiche standard, con dei cerchi con una croce sono invece indicati i profilatori di vento (i due punti a nord) e di temperatura (il punto più a sud). Lo sfondo è rappresentato da curve di livello tracciate ogni 200m.	83
4.3	Nei pannelli superiori, direzione e velocità del vento a 950 hPa (circa 300 m dal suolo) alle ore 1500 UTC ottenute con il modello WRF nella sua configurazione preliminare (a sinistra) e definitiva (a destra); in scala di grigi è riportata la copertura di neve presente sul dominio come da dati ECMWF (a sinistra) e come modificata appositamente per la simulazione (a destra); i punti rappresentano le posizioni delle stazioni meteorologiche assimilate. Nei pannelli inferiori, direzione e velocità del vento misurata e modellata da WRF nella sua configurazione preliminare (a sinistra) e definitiva (a destra) presso la stazione di Gargazzone (indicata da un triangolo nei pannelli superiori). . . .	84
4.4	Diagrammi tempo-quota della velocità e della direzione del vento misurate dal LIDAR (pannelli primo e secondo) e calcolate dal modello WRF (pannelli terzo e quarto) per la simulazione per la calibrazione del modello CALPUFF.	86
4.5	Diagrammi tempo-quota della temperatura e del gradiente termico misurati dal profilatore (pannelli primo e secondo) e calcolati dal modello WRF (pannelli terzo e quarto) per la simulazione per la calibrazione del modello CALPUFF. Nel pannello inferiore, relativo al gradiente termico, i colori blu, ciano e giallo identificano rispettivamente inversione termica, condizioni stabili e condizioni instabili.	87
4.6	Concentrazioni al suolo (mediate su 5 min) simulate dalle quattro simulazioni CALPUFF testate (righe): prima colonna ore 8:00 LST (un'ora dopo l'inizio del primo rilascio), seconda colonna ore 9:00 LST, terza colonna ore 10:00 LST.	94
5.1	Domini innestati nel modello WRF per la simulazione annuale, dal Nord Italia fino alla Conca di Bolzano, con le corrispondenti elevazioni.	97
5.2	Confronto tra le rose del vento relative alla stazione di Bronzolo ottenute a) dalle simulazioni con il modello WRF per l'anno 2016 e b) dai dati misurati nello stesso periodo.	99

5.3	Confronto tra le rose del vento relative alla stazione di Caldaro ottenute a) dalle simulazioni con il modello WRF per l'anno 2016 e b) dai dati misurati nello stesso periodo.	99
5.4	Confronto tra le rose del vento relative alla stazione di Corno del Renon ottenute a) dalle simulazioni con il modello WRF per l'anno 2016 e b) dai dati misurati nello stesso periodo.	100
5.5	Confronto tra le rose del vento relative alla stazione di Fié allo Sciliar ottenute a) dalle simulazioni con il modello WRF per l'anno 2016 e b) dai dati misurati nello stesso periodo.	100
5.6	Confronto tra le rose del vento relative alla stazione di Nova Ponente ottenute a) dalle simulazioni con il modello WRF per l'anno 2016 e b) dai dati misurati nello stesso periodo.	101
5.7	Confronto tra le rose del vento relative alla stazione di San Genesio ottenute a) dalle simulazioni con il modello WRF per l'anno 2016 e b) dai dati misurati nello stesso periodo.	101
5.8	Scatterplot dei valori di temperatura a 2 m dal suolo misurati e simulati da WRF per l'anno 2016 per la stazione di Bolzano.	102
5.9	Scatterplot dei valori di temperatura a 2 m dal suolo misurati e simulati da WRF per l'anno 2016 per la stazione di Laimburg.	102
5.10	Scatterplot dei valori di temperatura a 2 m dal suolo misurati e simulati da WRF per l'anno 2016 per la stazione di Nova Ponente.	103
5.11	Scatterplot dei valori di temperatura a 2 m dal suolo misurati e simulati da WRF per l'anno 2016 per la stazione di San Genesio.	103
5.12	Fattore di diluizione per le mappe di concentrazione media annuale sulla Conca di Bolzano.	109
5.13	Concentrazioni medie annue di PM10 sulla conca di Bolzano.	110
5.14	Concentrazioni medie annue di NO ₂ sulla conca di Bolzano.	111
5.15	Composizione dei massimi giornalieri di PM10 ottenuti in ciascun punto del dominio sull'intero anno 2016.	114
5.16	Composizione dei massimi giornalieri di SO ₂ ottenuti in ciascun punto del dominio sull'intero anno 2016.	115
5.17	Composizione dei massimi giornalieri su 8 ore di CO ottenuti in ciascun punto del dominio sull'intero anno 2016.	116
5.18	Composizione dei massimi orari di NO ₂ ottenuti in ciascun punto del dominio sull'intero anno 2016.	118
5.19	Localizzazione dei punti in cui viene superata la concentrazione oraria al suolo di NO ₂ di 5 µg m ⁻³ , pari al 5% del valore limite legislativo, e frequenza di accadimento su base annua (numero ore/anno).	119

5.20	Composizione dei massimi orari di SO ₂ ottenuti in ciascun punto del dominio sull'intero anno 2016.	120
6.1	Condizioni meteorologiche critiche simulate durante i giorni selezionati (righe) per l'ipotetico avvenimento di rilasci accidentali. Prima e seconda colonna: profili verticali di intensità e direzione del vento in corrispondenza del camino; terza e quarta colonna: profili verticali di temperatura e gradiente termico in corrispondenza del camino. . .	126
6.2	Caso critico per Bolzano: area di ricaduta del pennacchio in termini di concentrazioni al suolo di PM10 in condizioni di emissioni standard (sinistra) e in condizioni di ipotetico rilascio accidentale (destra) alle ore 1400 UTC del 26/02/2016.	127
6.3	Caso critico per Laives: area di ricaduta del pennacchio in termini di concentrazioni al suolo di PM10 in condizioni di emissioni standard (sinistra) e in condizioni di ipotetico rilascio accidentale (destra) alle ore 0900 UTC del 03/11/2016.	128
6.4	Caso critico per l'alta Val d'Adige: area di ricaduta del pennacchio in termini di concentrazioni al suolo di PM10 in condizioni di emissioni standard (sinistra) e in condizioni di ipotetico rilascio accidentale (destra) alle ore 0600 UTC del 01/12/2016.	129
6.5	Caso critico per la zona di Appiano: area di ricaduta del pennacchio in termini di concentrazioni al suolo di PM10 in condizioni di emissioni standard (sinistra) e in condizioni di ipotetico rilascio accidentale (destra) alle ore 0700 UTC il 11/02/2016.	130
B.1	Confronto tra la temperatura dell'aria misurata del profilatore termico a 750 m dal suolo e la temperatura dell'aria misurata dalla stazione di San Genesio a 970 m s.l.m. (in alto). Statistiche delle anomalie di temperatura tra profilatore termico e stazione di San Genesio per l'anno 2016, in riferimento alle temperature misurate presso San Genesio.	142
B.2	Confronti stagionali tra le temperature dell'aria misurate dal profilatore termico a 750 m dal suolo e la temperatura dell'aria misurata dalla stazione al suolo di San Genesio (970 m s.l.m.) e statistiche stagionali delle anomalie delle temperature misurate dai due sensori.	144
B.3	Rappresentazione schematica relativa al funzionamento di un SODAR monostatico.	146
B.4	Schema esemplificativo delle componenti del SODAR utilizzato durante lo studio (immagine tratta da Scintec, 2006)	149

B.5	Distorsione della struttura di pannelli fonoassorbenti a seguito di eventi intensi di Föhn (a, b). Rinforzo alla struttura dei pannelli fonoassorbenti del SODAR effettuata nel mese di novembre 2016: il supporto per l'antenna (c) e i rinforzi di alluminio applicati all'esterno dei pannelli (d).	151
B.6	Segnale registrato del SODAR dal 27 settembre al 3 ottobre 2016 (sopra) e andamento della temperatura dell'aria misurato presso la stazione di Bolzano Ospedale (sotto).	152
B.7	Interazione dei fumi emessi dal termovalorizzatore con le misure del SODAR. Si riportano per i giorni 16 e 17 febbraio 2017 i grafici della velocità verticale del vento (sopra), della direzione (centro) e dell'intensità (sotto). I dati riportati sono medie semiorarie.	153
B.8	Tipologie di scansione implementate nel Doppler Wind-LIDAR utilizzato durante lo studio: (a) Range Height Index (RHI), (b) Plan Position Index (PPI), (c) Doppler Beam Swigging technique (DBS). Immagini tratte da Barthelmie et al. (2016).	156
C.1	Sito sperimentale e installazione della strumentazione per l'esecuzione delle campagne di misura (a sinistra). Dettaglio della strumentazione utilizzata (a destra). Nel cerchio rosso lo spettro-radiometro, nel rettangolo azzurro il LIDAR	158
C.2	Forme assunte dal pennacchio del termovalorizzatore durante la campagna	159

Elenco delle tabelle

3.1	Caratteristiche del rilascio di gas tracciante effettuato durante la campagna di misura del 22 gennaio 2016.	64
3.2	Numero di campioni raccolti durante la campagna del 22 gennaio 2016 in base alle loro caratteristiche.	65
3.3	Caratteristiche del rilascio di gas tracciante effettuato durante la campagna di misura del 27 gennaio 2016.	65
3.4	Numero di campioni raccolti durante la campagna del 27 gennaio 2016 in base alle loro caratteristiche.	66
3.5	Caratteristiche dei rilasci di gas tracciante effettuati durante la campagna di misura 2017.	73
3.6	Numero di campioni raccolti durante la campagna 2017 in base alle loro caratteristiche.	75
4.1	Caratteristiche dei domini annidati nel modello WRF per la simulazione di calibrazione del modello CALPUFF.	82
4.2	Riassunto delle caratteristiche della serie di valori misurati disponibile per la procedura di calibrazione.	92
4.3	Riassunto delle principali caratteristiche dei due rilasci di tracciante effettuati nella campagna di misura del 2017 come modellati nelle simulazioni di dispersione con CALPUFF.	92
4.4	Combinazioni di parametrizzazioni utilizzati per ciascuna simulazione CLAPUFF in fase di calibrazione del modello (P-G: classi di Pasquill-Gifford; S-L: grandezze scala dello Strato Limite)	93
4.5	Indici statistici calcolati per ciascuna simulazione di dispersione effettuata con CALPUFF in fase di calibrazione. I valori in blu evidenziano il miglior valore ottenuto per ciascun indice.	95
5.1	Caratteristiche dei domini annidati nel modello WRF per la simulazione annuale.	97
5.2	Emissioni medie mensili e annuali e caratteristiche dei fumi per il 2016 (fonte: report annuale Ecocenter).	105

5.3	Concentrazione medie annue massime calcolate per i vari inquinanti emessi a camino	109
5.4	Confronto fra valori di concentrazione media annua di PM10 calcolata nel punto di massimo (Max assoluto), calcolata in corrispondenza della stazione di qualità dell'aria di riferimento (Mod BZ5), misurato dalla centralina di qualità dell'aria (Mis BZ5) e fissato nell'Allegato XI del DLgs 155/10 come valore limite.	110
5.5	Confronto fra valori di concentrazione media annua di NO ₂ calcolata nel punto di massimo (Max assoluto), calcolata in corrispondenza della stazione di qualità dell'aria di riferimento (Mod BZ5), misurata dalla centralina di qualità dell'aria APPA (Mis BZ5) e fissato nell'Allegato XI del DLgs 155/10 come valore limite.	111
5.6	Confronto fra valori di concentrazione massima giornaliera di PM10 calcolato nel punto di massimo (Max assoluto), misurato dalla centralina di qualità dell'aria APPA (Max Mis BZ5) e fissato nell'Allegato XI del DLgs 155/10 come valore limite da non superarsi più di 35 volte l'anno.	114
5.7	Confronto fra valori di concentrazione massima giornaliera di SO ₂ calcolato nel punto di massimo (Max assoluto), misurato dalla centralina di qualità dell'aria APPA (Max Mis BZ6) e fissato nell'Allegato XI del DLgs 155/10 come valore limite da non superarsi più di 3 volte l'anno.	115
5.8	Confronto fra valori di concentrazione massima giornaliera su 8 ore di CO calcolato nel punto di massimo (Max assoluto), misurato dalla centralina di qualità dell'aria APPA (Max Mis BZ5) e fissato nell'Allegato XI del DLgs 155/10 come valore limite da non superarsi.	116
5.9	Confronto fra valori di concentrazione massima oraria di NO ₂ calcolato nel punto di massimo (Max assoluto), misurato dalla centralina di qualità dell'aria APPA (Max Mis BZ5) e fissato nell'Allegato XI del DLgs 155/10 come valore limite da non superarsi più di 18 volte l'anno.	118
5.10	Confronto fra valori di concentrazione massima oraria di SO ₂ calcolato nel punto di massimo (Max assoluto), misurato dalla centralina di qualità dell'aria APPA (Max Mis BZ6) e fissato nell'Allegato XI del DLgs 155/10 come valore limite da non superarsi più di 24 volte l'anno.	120

6.1 Emissioni a camino in condizioni normali (sistema di filtraggio operativo) e in condizioni accidentali (completa disattivazione del sistema di filtraggio) e loro rapporto. 122

A.1 Classi di stabilità atmosferica nelle ore diurne e nelle ore notturne in accordo con la classificazione di Pasquill-Gifford. 136

A.2 Giorni rappresentativi per i periodi invernale ed estivo che coincidono con il giorno medio per 23 ore su 24. Per ciascun giorno si riporta l'ora in cui il giorno rappresentativo si discosta dal giorno medio, la classe di stabilità osservata (Classe obs.)e la classe di stabilità del giorno medio (Classe g. medio). 139

B.1 Principali specifiche tecniche del SODAR utilizzato durante lo studio. 147

Introduzione

Le recenti normative in ambito ambientale, prevedono che gli impianti di termovalorizzazione si dotino di una rete al suolo permanente per il monitoraggio degli inquinanti emessi nei fumi. La progettazione di una rete per il monitoraggio della ricaduta degli inquinanti immessi in atmosfera dai fumi di un impianto è condotta a partire dalla valutazione dalle mappe d’impatto dell’impianto stesso, rappresentate in termini di concentrazioni medie annue. Quest’informazione è tipicamente ottenuta attraverso la modellazione numerica dei processi meteorologici e di dispersione degli inquinanti per l’area d’indagine, condotta su di un orizzonte temporale di un anno.

Lo studio tecnico, qui descritto, è stato condotto con l’obiettivo di ottemperare alle richieste imposte dalla normativa vigente, determinando mappe d’impatto accurate e realistiche delle emissioni del termovalorizzatore sulla conca di Bolzano. Tuttavia, in contesti montani come la conca di Bolzano, la modellazione numerica dei fenomeni atmosferici è resa difficoltosa dall’interazione del vento con la topografia complessa, dalla presenza di circolazioni locali (e.g. Giovannini et al., 2014a,b, 2017) e dallo sviluppo di inversioni termiche negli strati più bassi di atmosfera, che non sono sempre colte correttamente dai modelli. Da ciò segue che la possibilità di modellare realisticamente la dispersione e la deposizione al suolo degli inquinanti dipende dalla capacità dei modelli utilizzati di simulare correttamente i processi atmosferici. Al fine quindi di far fronte a queste difficoltà, una parte significativa dello studio ha riguardato la progettazione e la validazione di una catena modellistica, costituita da modelli meteorologici e di dispersione degli inquinanti, e rappresentativa per la conca di Bolzano. La realizzazione di campagne di misura con rilascio controllato di un tracciante passivo ed inerte attraverso il camino del termovalorizzatore e la successiva misura delle concentrazioni di tracciante al suolo, ha permesso di ottenere un dataset utilizzato per la calibrazione e la validazione della catena modellistica.

Lo studio tecnico ha visto coinvolti i seguenti partner:

1. EcoCenter S.p.A.: Società gestore dell’impianto di termovalorizzazione e committente dello studio.

2. Eco-Research S.r.l.: Laboratorio di analisi di microinquinanti organici ed inorganici.
3. Gruppo di Fisica dell'Atmosfera del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università degli Studi di Trento (nel seguito UNITN).
4. Agenzia Provinciale per l'Ambiente della Provincia Autonoma di Bolzano ed in particolare l'Ufficio Aria/Rumore e il Laboratorio di Chimica-Fisica.

Nel corso dello studio sono stati coinvolti soggetti esterni al fine di avvalersi di supporto qualificato:

1. Per la modellazione numerica dei processi di dispersione degli inquinanti in atmosfera, è stata coinvolta la Società CISMA S.r.l. (Centro di Ingegneria e Sviluppo di Modelli per l'Ambiente), in quanto esperta di modellistica ambientale e con particolare riferimento ai processi atmosferici che caratterizzano l'area di Bolzano.
2. Per le analisi di laboratorio necessarie a determinare le concentrazioni di traccianti contenute nei campioni raccolti durante le campagne sperimentali, ci si è avvalsi della collaborazione con l'Istituto di Ricerche Farmacologiche "Mario Negri".

La relazione tecnica si articola in 6 Capitoli completati da 4 Appendici e da 4 Allegati tecnici. I Capitoli e le Appendici rendicontano le attività svolte durante lo studio tecnico, le analisi effettuate ed i risultati ottenuti. Negli Allegati tecnici si riportano invece le mappe di ricaduta al suolo degli inquinanti normati e presenti nei fumi del termovalorizzatore.

Capitolo 1 *Monitoraggio e caratterizzazione dei processi atmosferici nella Conca di Bolzano.* Questo capitolo è dedicato alla contestualizzazione dell'area di studio. In particolare, si riportano: (i) il layout strumentale per il monitoraggio meteorologico utilizzato durante lo studio già presente nell'area d'indagine ed installato appositamente per lo studio; (ii) i risultati dell'analisi climatologica effettuata per definire il giorno medio ed il giorno caratteristico sia per il periodo invernale, sia per il periodo estivo in riferimento a condizioni significative per i processi di dispersione degli inquinanti; (iii) la caratterizzazione della struttura termica della conca di Bolzano attraverso l'analisi di profili di temperatura misurati presso l'aeroporto civile della città; (iv) la caratterizzazione anemometrica della conca di Bolzano, con particolare riferimento alle circolazioni in corrispondenza del termovalorizzatore e dello sbocco della Val d'Isarco nella conca.

Capitolo 2 *Modelli numerici utilizzati.* Si descrivono i modelli numerici utilizzati per la simulazione dei processi meteorologici e di dispersione degli inquinanti, ed implementati per realizzare la catena modellistica. Questo capitolo si propone di fornire le informazioni necessarie a comprendere il funzionamento dei modelli, che saranno richiamati nel corso della relazione.

Capitolo 3 *Campagne di misura con rilascio di tracciante.* Come anticipato, al fine di verificare la predittività della catena modellistica implementata, sono state ideate e condotte campagne sperimentali con rilascio di tracciante. Il beneficio di un tale lavoro consiste nel disporre di un dataset sperimentale, rappresentativo dell'area in esame, che permetta di confrontare realisticamente gli scenari simulati con le concentrazioni di tracciante misurate al suolo. In questo capitolo sono descritte: (i) le attività svolte per organizzare le campagne di misura; (ii) la modalità di svolgimento delle prove; (iii) le attività svolte durante i rilasci e gli esiti delle misure.

Capitolo 4 *Calibrazione della catena modellistica sulla base dei campionamenti effettuati.* Il dataset di concentrazioni al suolo raccolto durante le campagne sperimentali con rilascio di tracciante è utilizzato come riferimento per calibrare i parametri dei modelli che regolano i processi meteorologici e di dispersione degli inquinanti. A tal fine è stato possibile ottenere una catena modellistica validata per la simulazione realistica di tali processi fisici all'interno della conca di Bolzano.

Capitolo 5 *Valutazione delle concentrazioni medie annue.* La catena modellistica validata è stata utilizzata per simulare su scala annuale la dispersione degli inquinanti. Nel capitolo si riportano e si commentano le mappe di concentrazioni medie orarie, massime giornaliere e massime orarie per i diversi inquinanti considerati.

Capitolo 6 *Valutazione degli scenari potenzialmente critici.* La catena modellistica validata è stata utilizzata per simulare la dispersione degli inquinanti in corrispondenza di uno scenario potenzialmente critico sia per l'impianto, in termini di emissioni, sia per le condizioni meteorologiche (trasporto dell'inquinante in aree abitate). Analogamente a quanto condotto per il capitolo precedente, si riportano e si commentano le mappe di concentrazioni simulate per i diversi inquinanti considerati.

Appendice A *Valutazione del giorno medio e del giorno caratteristico.* Si dettaglia la metodologia utilizzata per condurre l'analisi climatologica della conca di Bolzano.

Appendice B *Sensoristica di telerilevamento utilizzata per lo studio.* Durante lo studio ci si è avvalsi di dati meteorologici forniti da strumentazione di telerilevamento installata all'interno della conca di Bolzano. In particolare, il profilatore termico installato presso l'aeroporto di Bolzano ha fornito il profilo verticale di temperatura nei primi 1000 m di atmosfera, mentre il SODAR ed il Doppler Wind-LIDAR installati rispettivamente sul tetto del termovalorizzatore e sul tetto di Palazzo 12 della Provincia Autonoma di Bolzano, hanno fornito i profili verticali di velocità e direzione del vento. In questa appendice si descrivono i principi di funzionamento dei tre dispositivi e la loro contestualizzazione all'interno del caso studio.

Appendice C *Campagna sperimentale per la determinazione del pennacchio del termovalorizzatore.* Si descrive brevemente la campagna di misure condotta in collaborazione con l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-ISAC), Sezione di Bologna, finalizzato alla misura della quota di risalita del pennacchio mediante tecniche di telerilevamento.

Appendice D *Collaborazioni di ricerca e comunicazione dei risultati.* Lo studio tecnico ha evidenziato sin dalle sue fasi iniziali un'importante valenza scientifica. Attraverso la comunicazione dei risultati preliminari dello studio, in sede di convegni scientifici nazionali ed internazionali, il caso studio del termovalorizzatore di Bolzano è stato posto all'attenzione della comunità scientifica internazionale. Ciò ha permesso di stringere le collaborazioni di ricerca riportate in Appendice.

Allegato tecnico 1 Mappe delle concentrazioni al suolo medie annue degli inquinanti simulati: polveri sottili totali (PM10), biossido di azoto (NO₂) e ossidi di azoto (NO_x), biossido di zolfo (SO₂), monossido di carbonio (CO), carbonio organico totale (COT), acido cloridrico (HCl), mercurio (Hg) e ammoniaca (NH₃).

Allegato tecnico 2 Mappe delle concentrazioni al suolo massime giornaliere rappresentate in termini di polveri sottili totali (PM10) e di biossido di zolfo (SO₂).

Allegato tecnico 3 Mappe delle concentrazioni al suolo massime orarie rappresentate in termini di ossidi di azoto (NO_x) e di biossido di zolfo (SO₂).

Allegato tecnico 4 Mappe delle concentrazioni al suolo degli inquinanti ottenute simulando un ipotetico evento accidentale con elevate emissioni di inquinanti al camino ed in concomitanza di condizioni meteorologiche sfavorevoli sia in termini di dispersione degli inquinanti, sia in termini di ricaduta degli stessi in aree sensibili. Le mappe sono state ottenute per polveri sottili totali (PM10), ossidi di azoto

(NO_x), biossido di zolfo (SO₂), monossido di carbonio (CO), carbonio organico totale (COT), acido cloridrico (HCl), mercurio (Hg) e ammoniaca (NH₃).

CAPITOLO 1

Monitoraggio e caratterizzazione dei processi atmosferici nella conca di Bolzano

1.1 Descrizione generale

La disponibilità di misure meteorologiche costituisce un prerequisito fondamentale sia per una adeguata comprensione dei processi atmosferici che caratterizzano l'area di studio, sia per una corretta valutazione degli scenari simulati dai modelli meteorologici numerici. Per questi motivi, le azioni preliminari intraprese nello studio hanno riguardato:

1. la definizione della strumentazione per il monitoraggio meteorologico nella conca di Bolzano;
2. la caratterizzazione meteo-climatologica dell'area, con particolare riferimento alle condizioni che giocano un ruolo fondamentale nei processi di trasporto e di dispersione degli inquinanti.

Questo Capitolo è strutturato nelle seguenti Sezioni. La Sez. 1.2 è dedicata alla descrizione del layout strumentale per il monitoraggio meteorologico utilizzato durante lo studio. In particolare, si riporta sia la strumentazione già presente nell'area di studio (Sez. 1.2.1) sia la strumentazione installata appositamente per l'acquisizione dei profili verticali del vento (SODAR e Doppler Wind-LIDAR, Sez. 1.2.2). In Sez. 1.3 si riporta la caratterizzazione meteo-climatologica dell'area in esame che, attraverso l'analisi di stazioni convenzionali al suolo, ha permesso di determinare il giorno medio e il giorno caratteristico rappresentativi per i processi meteorologici e di dispersione degli inquinanti all'interno della Conca. Le Sezioni 1.4 e 1.5 sono invece dedicate rispettivamente all'analisi dei profili verticali di temperatura e di vento allo scopo di acquisire informazioni circa la struttura termica ed anemometrica all'interno della Conca. In particolare, utilizzando il 2016 come anno

rappresentativo, in Sezione 1.4 si analizza la frequenza dei fenomeni di inversione termica. Sulla base dell'analisi dei profili di vento misurati dal SODAR e dal Doppler Wind-LIDAR, in occasione di brevi campagne sperimentali svolte durante lo studio tecnico, (Sez. 1.5) si è invece caratterizzato il regime anemometrico, identificando le diverse circolazioni locali e sinottiche all'interno della Conca.

1.2 Layout strumentale

1.2.1 Strumentazione per il monitoraggio meteorologico già presente nell'area d'indagine

Si è inizialmente provveduto ad identificare la strumentazione per il monitoraggio meteorologico già presente nell'area di studio in particolare quella in grado di trasmettere i dati acquisiti in tempo reale, in vista delle successive attività sperimentali. L'indagine ha permesso di selezionare:

- Le stazioni convenzionali del Servizio Meteorologico della Provincia Autonoma di Bolzano, che forniscono misure di: temperatura ed umidità dell'aria a 2 m, intensità e direzione del vento a 10 m, radiazione globale e pressione atmosferica (Salorno, Ora, Laimburg, Bronzolo, Caldaro, Bolzano Ospedale, San Genesio, Sarentino, Renon, Nova Levante, Nova Ponente, Gargazzone, Merano, Fié allo Sciliar, Barbiano Colma).
- Le stazioni convenzionali gestite dall'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente della Provincia Autonoma di Bolzano, che restituiscono misure di: temperatura ed umidità dell'aria a 2 m, intensità e direzione del vento, radiazione globale e pressione atmosferica (Bolzano Fiera e Bolzano Via Amba Alagi).
- La stazione meteorologica installata sul tetto del termovalorizzatore a circa 40 m dal suolo, di proprietà di EcoCenter, che restituisce misure di: temperatura ed umidità dell'aria, intensità e direzione del vento, pressione atmosferica.
- Il profilatore termico (MTP5-HE) installato presso l'aeroporto di Bolzano e gestito dall'Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente della Provincia Autonoma di Bolzano, per la misura del profilo verticale di temperatura dell'aria nei primi 1000 m di atmosfera al di sopra del piano campagna.

In particolare, all'inizio dello studio, si è chiesto a EcoCenter di ricollocare la stazione meteorologica sul tetto dell'impianto in corrispondenza del punto più elevato del setto perimetrale, al fine di ridurre il più possibile ogni errore di misura



Figura 1.1: Fotografie rilevate in occasione del sopralluogo effettuato in data 23/09/2015: (a) lato Sud del tetto dell'impianto e nuovo camino; (b) posizione della stazione meteorologica ad inizio studio; (c) identificazione del punto sul tetto in cui ricollocare la stazione.

dovuto all'interazione del vento con la struttura dell'impianto (Figura 1.1). Contestualmente si è proceduto a strutturare su un server il database a cui trasmettere i dati disponibili in tempo reale e onde consentire alla catena modellistica di attingere i dati necessari per la simulazione numerica dei processi meteorologici e di dispersione degli inquinanti. Il sistema di acquisizione dei dati ha infatti il compito di:

1. effettuare il download di tutti i dati disponibili in tempo reale;
2. omogeneizzare le serie di dati al fine di renderli fruibili per le analisi. In particolare, sono stati realizzati opportuni programmi che permettono di: sincronizzare i dati, effettuare una preliminare valutazione di qualità e calcolare le medie orarie;
3. preparare i file di input necessari alla catena modellistica.

1.2.2 Strumentazione aggiuntiva

SODAR

La conoscenza del campo di moto (direzione ed intensità del vento) in corrispondenza della bocca del camino del termovalorizzatore costituisce un'informazione essenziale, in quanto permette di modellare correttamente i processi di trasporto e di dispersione degli inquinanti già in prossimità del punto di rilascio. Al fine quindi di acquisire informazioni circa la struttura verticale del vento in prossimità del punto di rilascio dei fumi del termovalorizzatore, UNITN ha installato la propria strumentazione SODAR sul tetto dell'impianto, a circa 40 m sopra il piano campagna. L'apparecchiatura SODAR è una tecnica di telerilevamento che permette la misura del profilo verticale del vento, attraverso l'analisi di segnali acustici retrodiffusi dalla turbolenza atmosferica a seguito di quelli emessi da un'antenna verso l'atmosfera. In particolare, la misura della velocità del vento si ottiene attraverso la determinazione dello sfasamento Doppler tra il segnale emesso e il segnale retrodiffuso (maggiori informazioni sul funzionamento del SODAR sono riportate in Appendice B.2). Poiché questa tecnologia è basata sull'analisi di onde acustiche, la presenza di rumore di fondo può condizionare la misura, attenuando l'intensità del segnale riflesso. Per questo motivo, prima di utilizzare la strumentazione ai fini dello studio, si sono effettuate due brevi campagne di misura, allo scopo di verificarne il corretto funzionamento.

La prima campagna, dal 26 al 30 ottobre 2015, ha permesso di verificare sia l'effettiva possibilità di installazione sul tetto del termovalorizzatore, sia la compatibilità del rumore ambientale presso il sito sperimentale con il funzionamento della strumentazione (Figura 1.2). In particolare, si è proceduto a testare e calibrare la strumentazione SODAR sulla base del rumore di fondo rilevato presso l'impianto, dato che il sito sperimentale risulta essere particolarmente rumoroso, a causa dei seguenti fattori:

- attività di esercizio dell'impianto;

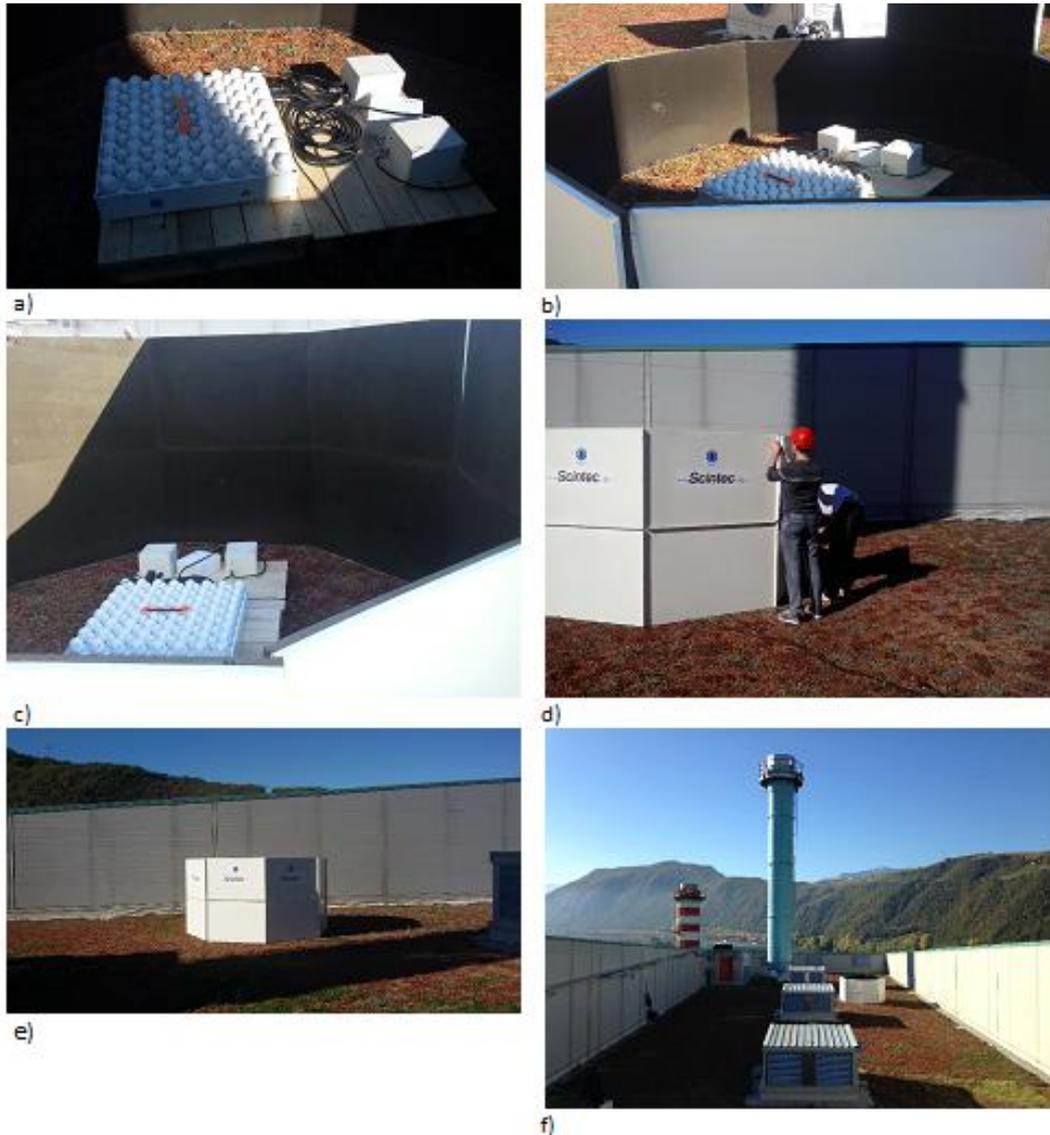


Figura 1.2: Immagini relative all'installazione della strumentazione SODAR sul tetto del termovalorizzatore durante la prima campagna test 26-30/10/2015: (a) antenna; (b-d) installazione della struttura di pannelli fonoassorbenti; (e, f) installazione ultimata.

- interazione del vento con la struttura del termovalorizzatore;
- rumore indotto dal traffico veicolare lungo il tratto autostradale che costeggia l'impianto.

Questa campagna sperimentale ha inoltre permesso di predisporre e collaudare il sistema di trasmissione dei dati in tempo reale verso il database predisposto sul server, trasferendo profili di vento misurati dal SODAR, dati misurati dalla stazione meteorologica sul tetto dell'impianto e dati relativi alle emissioni dal camino del termovalorizzatore (portata e temperatura dei fumi), misurati dal Sistema di Monitoraggio delle Emissioni (SME).

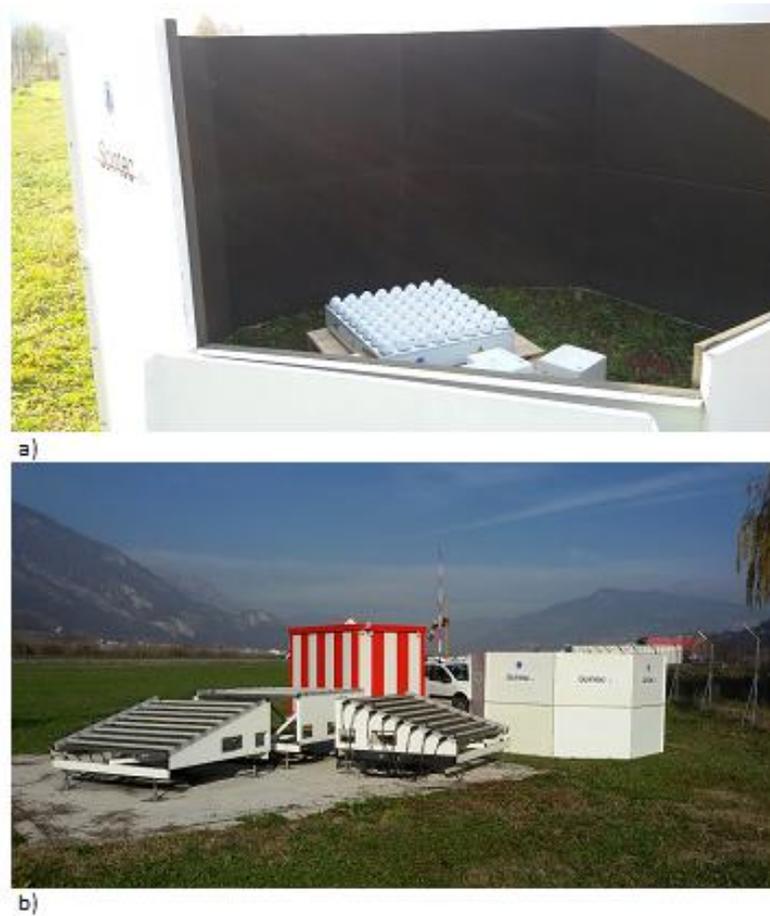


Figura 1.3: Installazione della strumentazione SODAR presso l'aeroporto civile "G. Caproni" di Trento (loc. Mattarello) a fianco del Wind Profiler gestito dal Servizio Meteorologico della Provincia Autonoma di Trento (Meteotrentino), durante la seconda campagna test 3-21/12/2015: (a) antenna e struttura di pannelli fonoassorbenti; (b) Wind Profiler (sinistra) e SODAR (destra).

La seconda campagna di test, dal 3 al 21 dicembre 2015, è stata eseguita per verificare il corretto funzionamento della strumentazione. Il SODAR è stato installato nelle vicinanze del WindProfiler gestito dal Servizio Meteorologico della Provincia Autonoma di Trento (Meteotrentino) presso l'aeroporto civile "G. Caproni" di Trento (Figura 1.3). Attraverso il confronto dei profili di vento misurati dai due sensori, si è potuta verificare la correttezza dei dati registrati dal SODAR. L'esito positivo delle prove ha quindi confermato la possibilità di utilizzare la strumentazione SODAR a supporto delle attività sperimentali previste dallo studio tecnico. In particolare, si è provveduto ad installare e a gestire la strumentazione SODAR sul tetto del termovalorizzatore durante due periodi:

1. dal 12 gennaio al 20 febbraio 2016 (39 giorni);
2. dal 29 agosto 2016 al 5 maggio 2017 (250 giorni).

Doppler Wind-LIDAR

Durante la prima campagna sperimentale dello studio (12 gennaio - 20 febbraio 2016) la strumentazione SODAR installata sul tetto del termovalorizzatore ha permesso di osservare la presenza di vento particolarmente intenso che spira da NE a circa 450 m dal suolo nelle ore notturne, fino alla prima mattinata, con la possibilità di intercettare il pennacchio dei fumi emessi dall'impianto.

Come riportato nel seguito di questo capitolo, le simulazioni numeriche ad alta risoluzione, successivamente condotte per meglio caratterizzare le circolazioni della conca di Bolzano, hanno permesso di identificare questo vento come una corrente a getto in uscita dalla Val d'Isarco (*valley-exit jet*, Whiteman, 2000). Si è infatti osservato che il vento di drenaggio della Val d'Isarco, a causa del restringimento della sezione, accelera in corrispondenza dello sbocco della valle nella Conca di Bolzano. Inoltre, la stabilità atmosferica indotta dallo sviluppo di inversioni termiche al suolo disaccoppia l'atmosfera all'interno dell'inversione (praticamente ferma) da quello al di sopra dell'inversione. Ciò permette al *valley-exit jet* di spirare con intensità elevate, dell'ordine di 10 m s^{-1} (36 km h^{-1}) al di sopra della città di Bolzano, senza interagire con il campo di vento più vicino al suolo, che resta molto debole, con intensità inferiori a 1 m s^{-1} (3.6 km h^{-1}).

Poiché l'eventuale interazione del *valley-exit jet* della Val d'Isarco con il pennacchio dei fumi del camino del termovalorizzatore potrebbe modificare significativamente lo scenario di trasporto e di dispersione degli inquinanti, si è ritenuto importante approfondire la caratterizzazione delle circolazioni locali in corrispondenza dello sbocco della Val d'Isarco nella Conca di Bolzano (ad Est della città). Si è pertanto organizzata una campagna sperimentale dedicata all'approfondimento di questo fenomeno, che fosse anche di supporto alle campagne di misura previste dallo studio tecnico per l'inverno 2017. Si è così proceduto nel definire:

1. la tipologia di strumentazione più adeguata per la misura del campo di vento;
2. il sito sperimentale più idoneo per l'esecuzione delle misure;
3. le modalità di trasferimento in tempo reale dei dati raccolti, per l'assimilazione nella catena modellistica.

Si è preferito l'utilizzo di un Doppler Wind-LIDAR (tecnologia basata su onde elettromagnetiche), piuttosto che di un SODAR (tecnologia basata su impulsi acustici). Il principio fisico di funzionamento di un Doppler Wind-LIDAR è simile al funzionamento di un SODAR, ma anziché emettere impulsi acustici, un

Wind-LIDAR emette impulsi elettromagnetici di lunghezza d'onda fissata (si veda l'Appendice B.3 per maggiori dettagli sul funzionamento del dispositivo). Pertanto, entrambe le tipologie di sensore consentono la misura del profilo verticale del campo di vento. Tuttavia la strumentazione LIDAR permette di effettuare le misure anche in area residenziale, senza arrecare disturbo alla popolazione che risiede in vicinanza del punto di misura.

Sulla base di approfondite indagini effettuate nella letteratura tecnico-scientifica o mediante contatti con diversi esperti del settore a livello internazionale, si è optato per il modello Doppler Wind-LIDAR WindCube 100s della ditta Leosphere. La strumentazione è stata noleggiata da EcoCenter per un periodo di 3 mesi (dal 5 gennaio al 5 aprile 2017).

Il 30 dicembre 2016, si è effettuato un sopralluogo presso Palazzo 12 della Provincia Autonoma di Bolzano per verificare l'adeguatezza del sito sperimentale. Ciò ha permesso di osservare che il sito offriva una buona visione sia dello sbocco della Val d'Isarco sia della Conca di Bolzano. Inoltre il personale tecnico di Palazzo 12 ha dato la propria disponibilità per la collocazione di un cavo di alimentazione del sensore e per la predisposizione di una connessione internet per il trasferimento dei dati.

Il 5 gennaio 2017 il Wind-LIDAR è stato collocato sul tetto di Palazzo 12, mentre la sua installazione ed attivazione ha avuto luogo il 9 e il 10 gennaio (Figura 1.4). L'installazione è stata condotta da un ingegnere specializzato della casa fornitrice Leosphere, che ha anche tenuto un breve corso di training (8 ore) sul funzionamento della strumentazione, con parte teorica e pratica.

A seguito di problemi tecnici non è stato possibile attivare, presso Palazzo 12, la rete internet per il trasferimento in tempo reale dei dati e per il controllo remoto della strumentazione. Ciò ha reso impraticabile il metodo di trasferimento dati inizialmente pianificato e difficoltosa la gestione della strumentazione. Al fine di risolvere il problema è stato messo a disposizione un notebook, lasciato nel locale tecnico sul tetto di Palazzo 12, collegato direttamente al sensore tramite cavo ethernet. Il trasferimento dei dati è stato invece effettuato grazie ad una scheda SIM, messa a disposizione da EcoCenter, e connessa al pc mediante una chiavetta USB. Numerose sono state le difficoltà tecniche riscontrate per mantenere una connessione stabile. Ciò ha richiesto numerosi interventi sul campo, al fine di ripristinare la connessione e di verificare in loco il funzionamento della strumentazione. Si è inoltre gestita la parte relativa alla calibrazione, al setting e alla trasmissione dei dati misurati alla catena modellistica.

Vista l'imminente campagna sperimentale con rilascio di tracciante passivo dal camino del termovalorizzatore, il primo periodo di funzionamento del Doppler Wind-

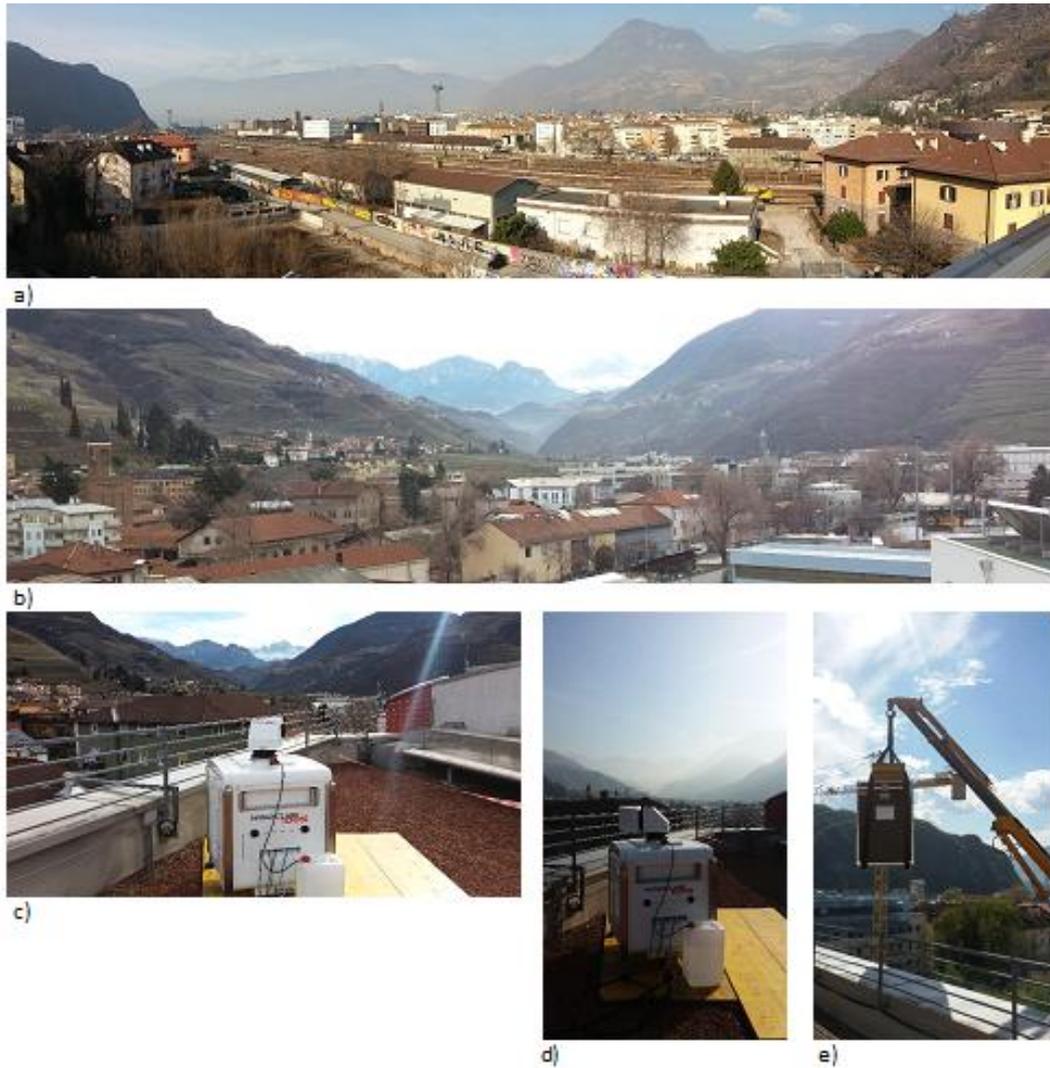


Figura 1.4: Installazione del Doppler Wind-LIDAR sul tetto di Palazzo 12 della Provincia Autonoma di Bolzano: (a) vista della città di Bolzano dal sito di misura; (b) sbocco della Val d'Isarco nella conca; (c, d) Doppler Wind-LIDAR durante la campagna di misure; (e) disinstallazione.

LIDAR è stato dedicato alla misura i profili verticali di intensità e di direzione del vento, necessari per alimentare la catena modellistica. In questa fase il Wind-LIDAR ha restituito misure del profilo di vento ogni 5 secondi. Considerato l'elevato traffico che avrebbe comportato il trasferimento di tutti i dati, si sono predisposti dei programmi dedicati per il preprocessing dei dati del Wind-LIDAR sul notebook installato nel locale tecnico di Palazzo 12 prima del loro trasferimento alla catena modellistica.

Terminate le campagne sperimentali con rilascio di tracciante, il Wind-LIDAR è stato impostato per effettuare scansioni di dettaglio che hanno permesso la ricostruzione tridimensionale del campo di moto sia allo sbocco della Val d'Isarco,

sia nella Conca di Bolzano. Infatti oltre alla misura del profilo verticale del vento questi sensori permettono di effettuare scansioni lungo piani o superfici coniche al fine di acquisire informazioni circa la struttura tridimensionale del campo di moto. Rimandando all'Appendice B.3 per maggiori informazioni, si riassumono di seguito le strategie di misura adottate.

Il Wind-LIDAR è stato impostato per eseguire quattro diversi set di scansioni finalizzate a:

- misurare con elevato dettaglio spaziale il campo di moto nei primi 1500 m che separano Palazzo 12 dall'imbocco della Val d'Isarco (scansioni con elevazione fissata e azimuth variabili, durata della scansione 15 minuti circa);
- misurare la struttura verticale del campo di moto eseguendo scansioni a 360 gradi rispetto alla posizione del sensore lungo piani verticali, variando di volta in volta l'azimuth di un angolo di 10 gradi (scansioni con azimuth fissato ed elevazione variabile, durata della scansione 12 minuti circa);
- misurare la struttura planare del campo di moto eseguendo scansioni a 360 gradi rispetto alla posizione del sensore lungo superfici coniche variando di volta in volta l'elevazione (scansioni con elevazione fissata ed azimuth variabile, durata della scansione 12 minuti circa);
- misurare il profilo verticale del vento al di sopra del sensore. Questa misura è stata effettuata negli intervalli tra le tipologie di scansione sopra elencate.

La durata totale di un intero ciclo di misure è di 45 minuti circa.

1.3 Caratterizzazione climatologica

Si è effettuata una caratterizzazione meteo-climatica dell'area in esame attraverso l'analisi dei dati misurati dalla stazione meteorologica di Bolzano Ospedale, gestita dal Servizio Meteorologico della Provincia Autonoma di Bolzano.

L'analisi è stata condotta attraverso la valutazione del "giorno medio" e del "giorno caratteristico", per il periodo invernale (dicembre-febbraio) e per il periodo estivo (giugno-agosto), utilizzando come variabili guida la stabilità atmosferica e la direzione del vento. Infatti, la stabilità atmosferica controlla le modalità di trasporto/dispersione dell'inquinante, mentre la direzione del vento determina le aree di ricaduta al suolo dell'inquinante.

Come riportato in Appendice A, il giorno medio è definito su base climatologica mediando i cicli giornalieri della grandezza meteorologica di interesse, mentre il giorno caratteristico è un giorno, realmente verificatosi, il cui ciclo giornaliero di poco si discosta da quello del giorno medio. Il vantaggio di una tale analisi consiste nel disporre di uno strumento per selezionare le giornate che risultano climatologicamente rappresentative per la Conca di Bolzano e significative per lo studio della dispersione degli inquinanti. In particolare, l'analisi climatologica ha prodotto risultati utili per comprendere la climatologia dell'area in indagine e una base oggettiva per selezionare le giornate in cui effettuare le prove con il rilascio del tracciante.

In Figura 1.5 e Figura 1.6 si riportano le frequenze orarie delle classi di stabilità atmosferica di Pasquill-Gifford, ottenute rispettivamente per il periodo invernale e per il periodo estivo, sulla base della procedura descritta in Appendice A. Si osservano le seguenti caratteristiche:

1. Durante il periodo invernale l'atmosfera è:
 - mediamente stabile (classe F) dalla sera (ore 19 locali) alla mattina (ore 7);
 - neutra (classe D) durante le principali transizioni della giornata (alba e tramonto);
 - debolmente convettiva (classi B e C) nelle ore centrali della giornata (11-15);
2. durante il periodo estivo l'atmosfera è:
 - stabile (classe F) nelle ore notturne (dopo le 21 locali) e prima dell'alba (fino alle ore 4 locali);
 - neutra (classe D) all'alba (5 - 7) e dopo il tramonto (19 - 20);

- debolmente convettiva (classi B e C) al mattino (8 - 10) e nel secondo pomeriggio (15-18);
- molto convettiva (classe A) nel primo pomeriggio (12 - 14).

Per entrambe le stagioni si osserva che, in mattinata, la transizione da una situazione (classi E, F) o neutra (D) ad una situazione convettiva avviene attraverso la classe di stabilità B, associata a condizioni di bassa radiazione solare o di vento debole. Viceversa, nel pomeriggio, l'atmosfera è debolmente convettiva e la classe C è la condizione più frequente. In termini di dispersione degli inquinanti, ci si attende che il meccanismo di trasporto avvertivo sia prevalente rispetto alla dispersione turbolenta, soprattutto nelle ore notturne, quando l'atmosfera è stabile (classi E, F), mentre nelle ore centrali della giornata, la convezione termica che si instaura grazie al riscaldamento del suolo (anche se debole nel periodo invernale), aumenta il miscelamento dell'atmosfera e quindi la probabilità di disperdere maggiormente gli inquinanti anche negli strati più elevati. Individuato il giorno medio si è proceduto alla determinazione dei giorni caratteristici. Siccome non sono state osservate giornate in cui la distribuzione delle classi di stabilità coincidesse con quella del giorno medio, si è proceduto selezionando le giornate in cui le classi di stabilità oraria coincidono con quelle del giorno medio, a meno di un'ora. Come riportato con maggiore dettaglio in Appendice A, le giornate rappresentative individuate sono state ulteriormente classificate selezionandole prima sulla base del pattern del ciclo giornaliero della direzione del vento e poi sulla base del ciclo giornaliero di temperatura. Ciò ha permesso di determinare le seguenti giornate caratteristiche:

1. 29 dicembre 2007: giornata molto fredda con una temperatura minima di -8°C ed una temperatura massima di 4°C ;
2. 10 gennaio 2008: giornata rappresentativa della temperatura media invernale per l'area in esame (minima -4°C , massima 6°C);
3. 29 luglio 2009: giornata particolarmente calda, con minima di 22°C e massima di 33°C .

Le Figura 1.5 e Figura 1.6 mostrano, per entrambi i periodi investigati, la determinazione del giorno medio attraverso l'analisi delle distribuzioni orarie delle classi di stabilità e la selezione dei giorni rappresentativi sulla base dei cicli giornalieri di direzione del vento e di temperatura dell'aria.

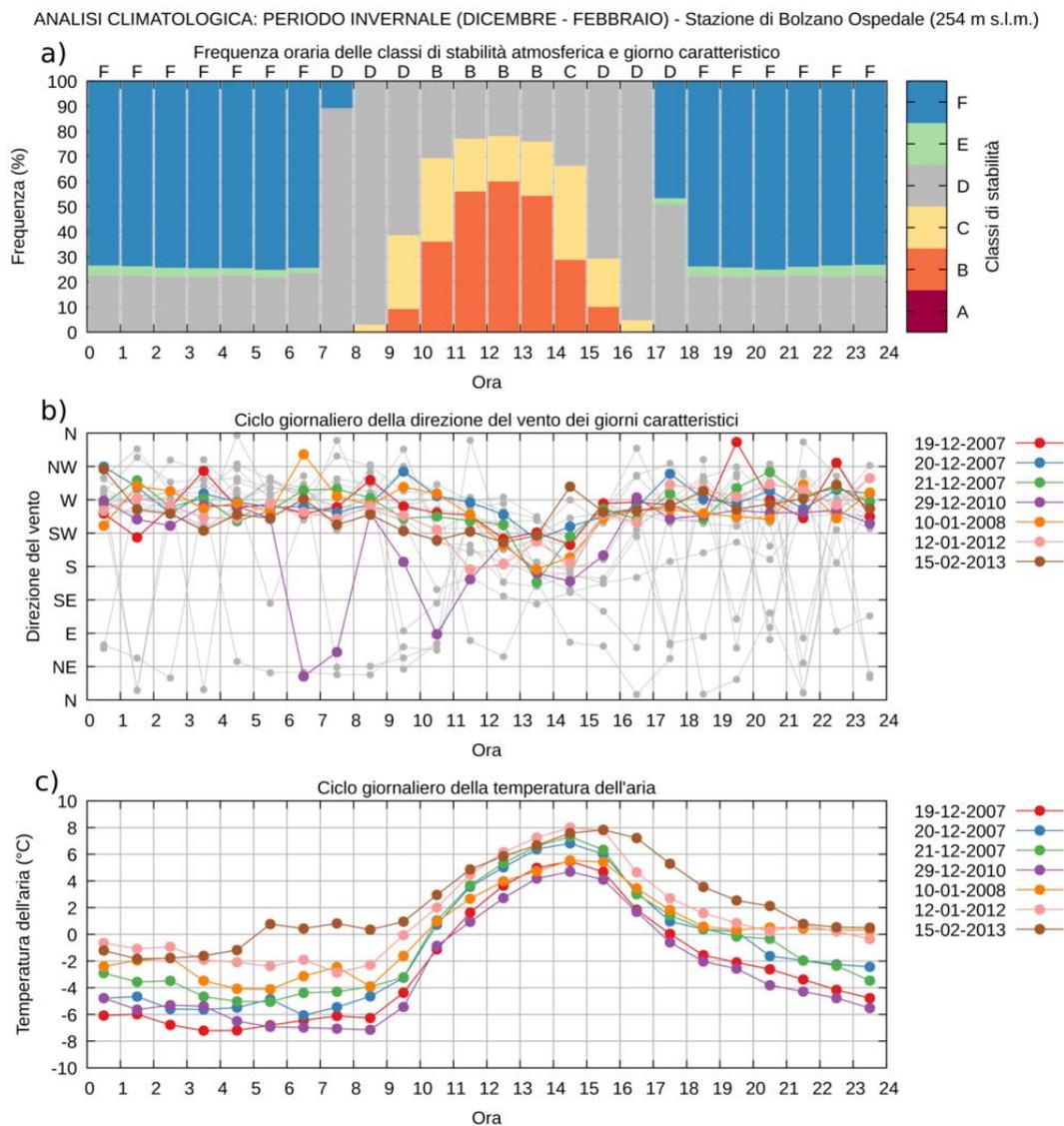


Figura 1.5: Risultati dell'analisi climatica condotta sulla base dei dati misurati dalla stazione di Bolzano Ospedale per il periodo invernale (dicembre-febbraio). (a) Distribuzione in frequenza delle classi di stabilità oraria ottenute attraverso la classificazione proposta da Pasquill-Gifford e le classi di stabilità oraria più frequenti utilizzate per definire il giorno medio. (b) Cicli giornalieri della direzione del vento per i giorni caratteristici individuati (grigio) e (linee colorate) i giorni caratteristici con ciclo giornaliero simile. (c) Cicli giornalieri della temperatura dell'aria per i giorni caratteristici selezionati nel grafico precedente.

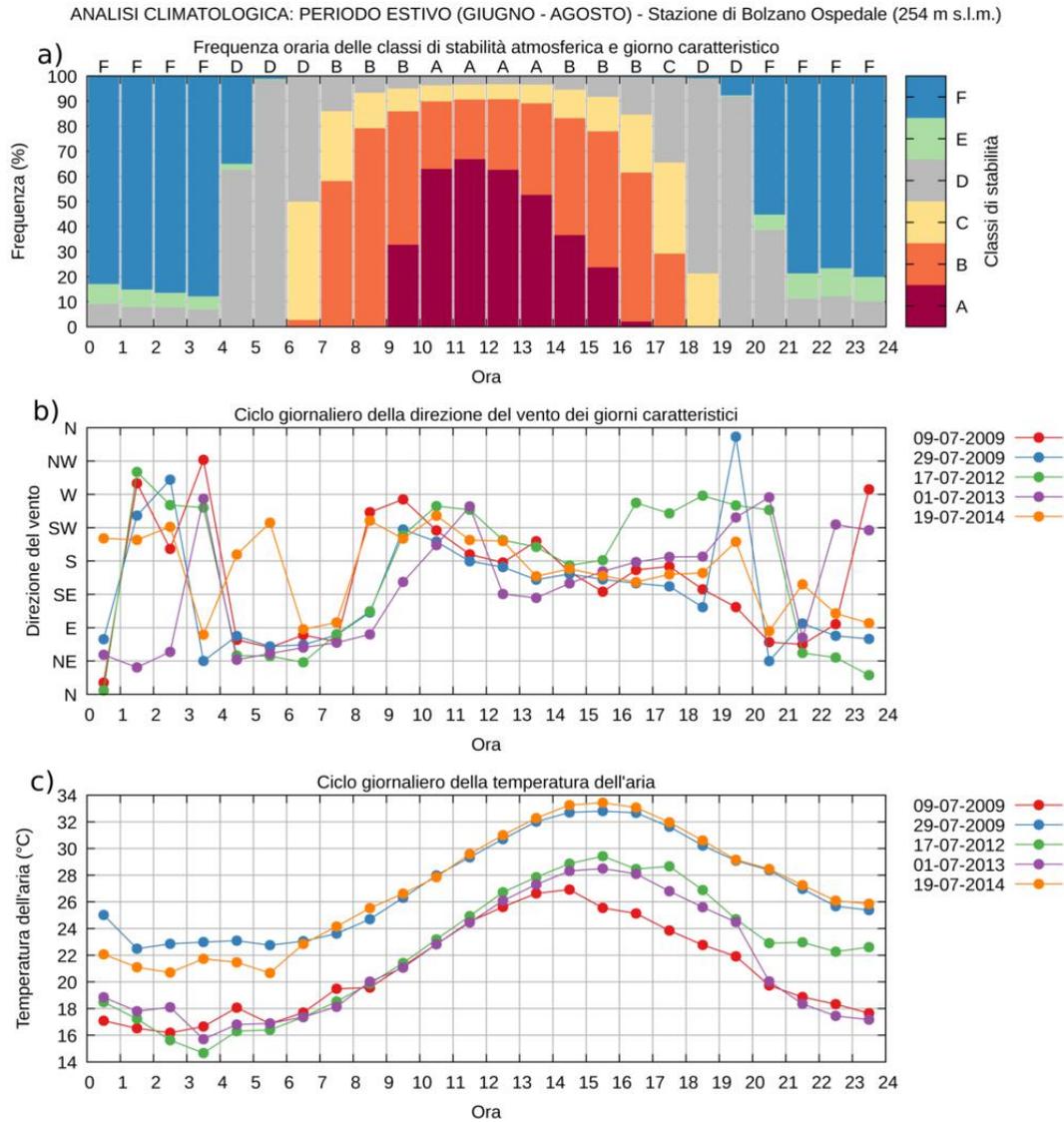


Figura 1.6: Risultati dell'analisi climatologica condotta sulla base dei dati misurati dalla stazione di Bolzano Ospedale per il periodo estivo (giugno-agosto). (a) Distribuzione in frequenza delle classi di stabilità oraria ottenute attraverso la classificazione proposta da Pasquill-Gifford e le classi di stabilità oraria più frequenti utilizzate per definire il giorno medio. (b) Cicli giornalieri della direzione del vento per i giorni caratteristici individuati (grigio) e (linee colorate) i giorni caratteristici con ciclo giornaliero simile. (c) Cicli giornalieri della temperatura dell'aria per i giorni caratteristici selezionati nel grafico precedente.

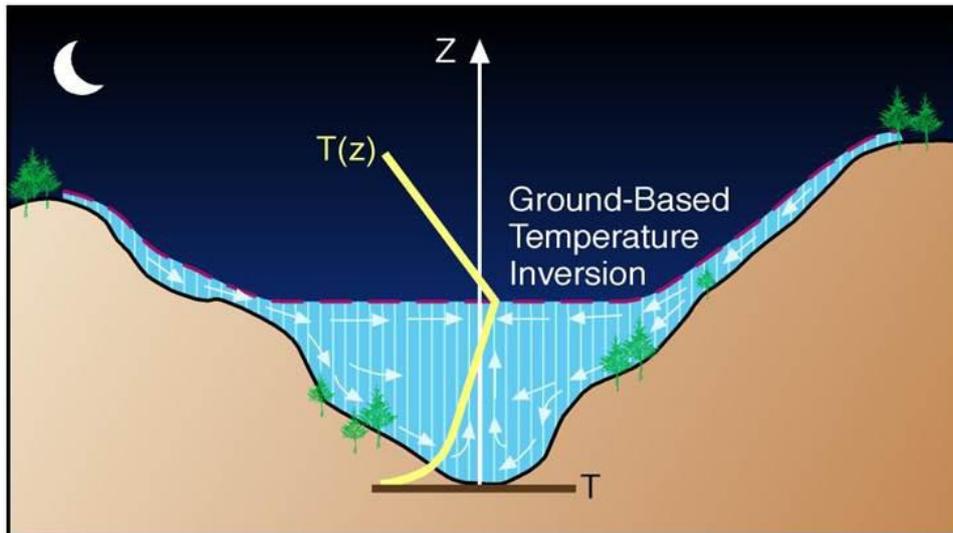


Figura 1.7: Rappresentazione schematica dello sviluppo di un'inversione termica in una valle e della conseguente modifica del profilo verticale della temperatura dell'aria (Whiteman, 2000)

1.4 Analisi della struttura termica della conca di Bolzano

In ambienti montani, a differenza dei territori pianeggianti, la topografia gioca un ruolo chiave nella caratterizzazione dei processi atmosferici, ed in particolare della struttura termica dell'atmosfera in prossimità del suolo. In particolare, la schermatura orografica protegge l'atmosfera all'interno delle valli dai venti che spirano nell'atmosfera libera e riduce sia la ventilazione da parte dei venti in quota, sia il periodo di riscaldamento per irraggiamento delle superfici. Inoltre, nelle ore notturne, venti catabatici discendono lungo i versanti e trasportano nel fondovalle masse d'aria fredda.

Normalmente, la temperatura dell'aria diminuisce all'aumentare della quota. Quando questa condizione non si verifica, ossia quando la temperatura dell'aria aumenta con la quota, si parla di inversione termica. Si possono individuare due tipologie di inversione termica: al suolo, quando lo strato di atmosfera interessato dall'inversione poggia sulla superficie, e in quota, quando l'inversione termica è confinata tra due strati di atmosfera. In entrambi i casi lo strato di atmosfera interessato dall'inversione termica mostra una stratificazione molto stabile, che inibisce i moti verticali e riduce i processi di dispersione turbolenta, fino ad annullarli. Si comprende quindi come l'annullamento della capacità di rimescolamento dell'atmosfera possa portare a condizioni particolarmente gravose in termini di qualità dell'aria.

Nelle valli montane le inversioni termiche al suolo costituiscono la tipologia di inversione termica più frequente, soprattutto nel periodo invernale (Figura 1.7). Qui, in genere, le inversioni si sviluppano a partire dal tardo pomeriggio ed aumentano di spessore durante la notte. L'assenza di significative forzanti sinottiche, la presenza di cielo sereno o poco nuvoloso e calma di vento o venti con velocità modesta sono le condizioni che favoriscono lo sviluppo dell'inversione termica. Inoltre, è frequente osservare come il perdurare di condizioni di alta pressione determini un continuo apporto di masse di aria fredda sul fondovalle. La sovrapposizione di queste masse d'aria può dar luogo a persistenti inversioni termiche. La rimozione di un'inversione termica può essere determinata dal passaggio di fronti freddi sufficientemente intensi, che, come nel caso dell'area di Bolzano sono accompagnati nella fase iniziale dallo sviluppo di venti di Föhn. Questi venti sono un meccanismo particolarmente efficiente per la rottura dell'inversione termica al suolo, ma solo quando hanno una forza sufficiente per raggiungere il fondovalle. Un altro meccanismo che permette la rottura dell'inversione termica, almeno nelle ore centrali della giornata, è lo sviluppo di uno strato di rimescolamento. Quando, durante il giorno, l'irraggiamento riscalda il suolo, determinando anche un progressivo riscaldamento dell'aria a partire dagli strati inferiori, si sviluppa un (sottile) strato convettivo che cresce di spessore all'aumentare del riscaldamento della superficie determina un'erosione dal basso dell'inversione termica, ripristinando il miscelamento dell'aria prossima al suolo con gli strati più elevati di atmosfera.

Come anticipato, al fine di monitorare il profilo di temperatura dell'aria nella Conca di Bolzano, nel presente studio tecnico si sono utilizzati i profili di temperatura misurati al profilatore termico (MTP5-HE) installato presso l'aeroporto della città (237 m s.l.m.). Questo sensore permette la misura del profilo di temperatura nei primi 1000 metri di atmosfera a partire dal suolo, con una risoluzione verticale di 50 m (maggiori dettagli sul sensore sono riportati in Appendice B.1). Di seguito vengono presentate due diverse analisi volte rispettivamente alla caratterizzazione di fenomeni tipici per la conca di Bolzano (Sezione 1.4.1) e alla caratterizzazione di un anno climatologicamente rappresentativo (Sezione 1.4.2), il 2016, selezionato per le applicazioni sul lungo periodo del presente studio (Capitolo 5).

1.4.1 Fenomeni invernali tipici

Per meglio chiarire quanto finora riportato, si descrive a titolo di esempio l'evento di inversione termica che ha interessato la Conca di Bolzano dal 5 al 13 dicembre 2016. Durante queste giornate, come mostrato in Figura 1.8, l'assenza di forzanti sinottiche sul Nord Italia ha permesso il progressivo raffreddamento del fondovalle

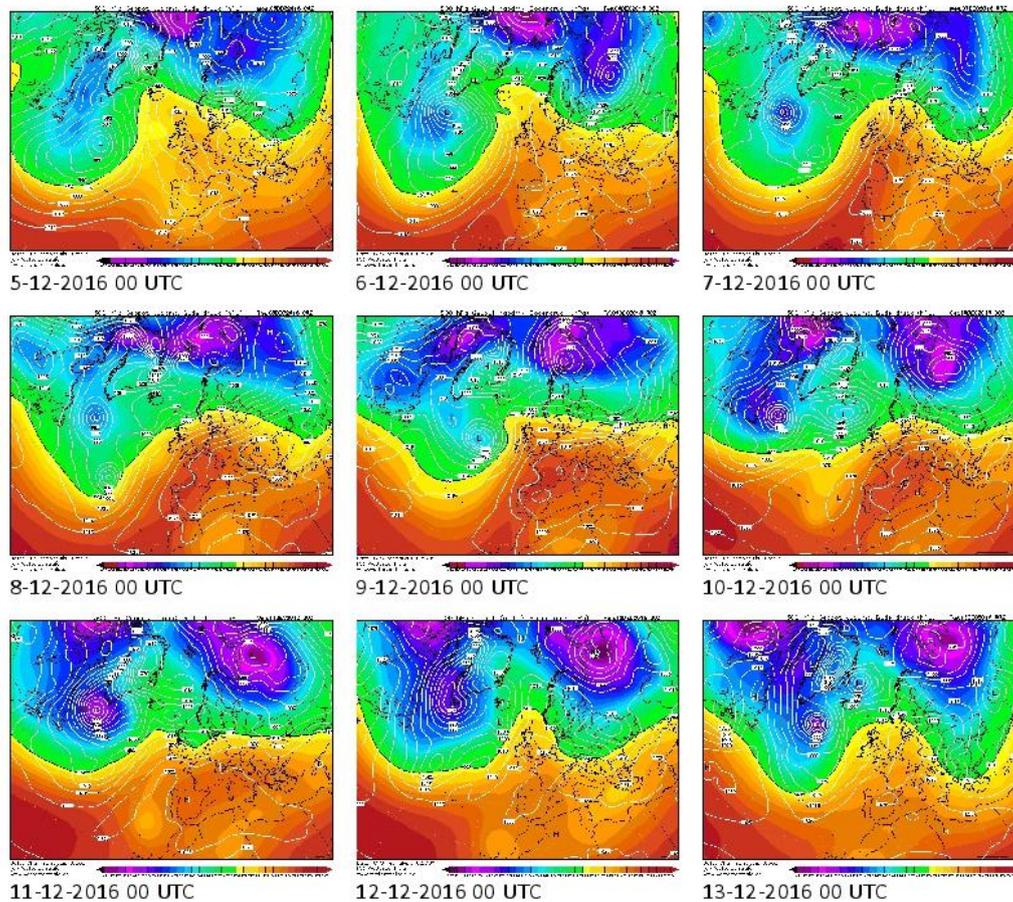


Figura 1.8: Quadro sinottico del periodo 5-13 dicembre 2016. Evoluzione dell'altezza del geopotenziale a 500 hPa. Nei grafici si osserva che fino all'11 dicembre sull'area mediterranea ed in particolare sull'Italia è insediata un'alta pressione (colori caldi) con assenza di forzanti sinottiche. Dal 12 dicembre, invece, il lobo di bassa pressione (colori freddi) sull'Europa orientale si sposta verso l'Italia, sviluppando venti sinottici che si configurano come eventi di Föhn all'interno della conca di Bolzano (rianalisi CFSR, <http://www.wetterzentrale.de>).

e lo sviluppo di inversioni termiche particolarmente intense e persistenti che hanno interessato i primi 600 m di atmosfera.

In Figura 1.9 si riporta l'evoluzione temporale della temperatura dell'aria con il gradiente di temperatura osservato in queste giornate. Inoltre vengono riportati anche i profili verticali di vento misurati dal SODAR sul tetto del termovalorizzatore, al fine di avere un'informazione circa l'anemometria dell'area alle diverse quote. Si ricorda che il gradiente di temperatura è definito come il rapporto tra la differenza di temperatura dell'aria a due diverse quote $\Delta T = T(z_2) - T(z_1)$ e la distanza tra le due quote $\Delta z = z_2 - z_1$. Normalmente la temperatura dell'aria diminuisce con la quota. Al fine quindi di avere un valore positivo, è convenzione definire il gradiente termico (*lapse rate*) dell'atmosfera Γ come l'opposto di $\Delta T/\Delta z$,

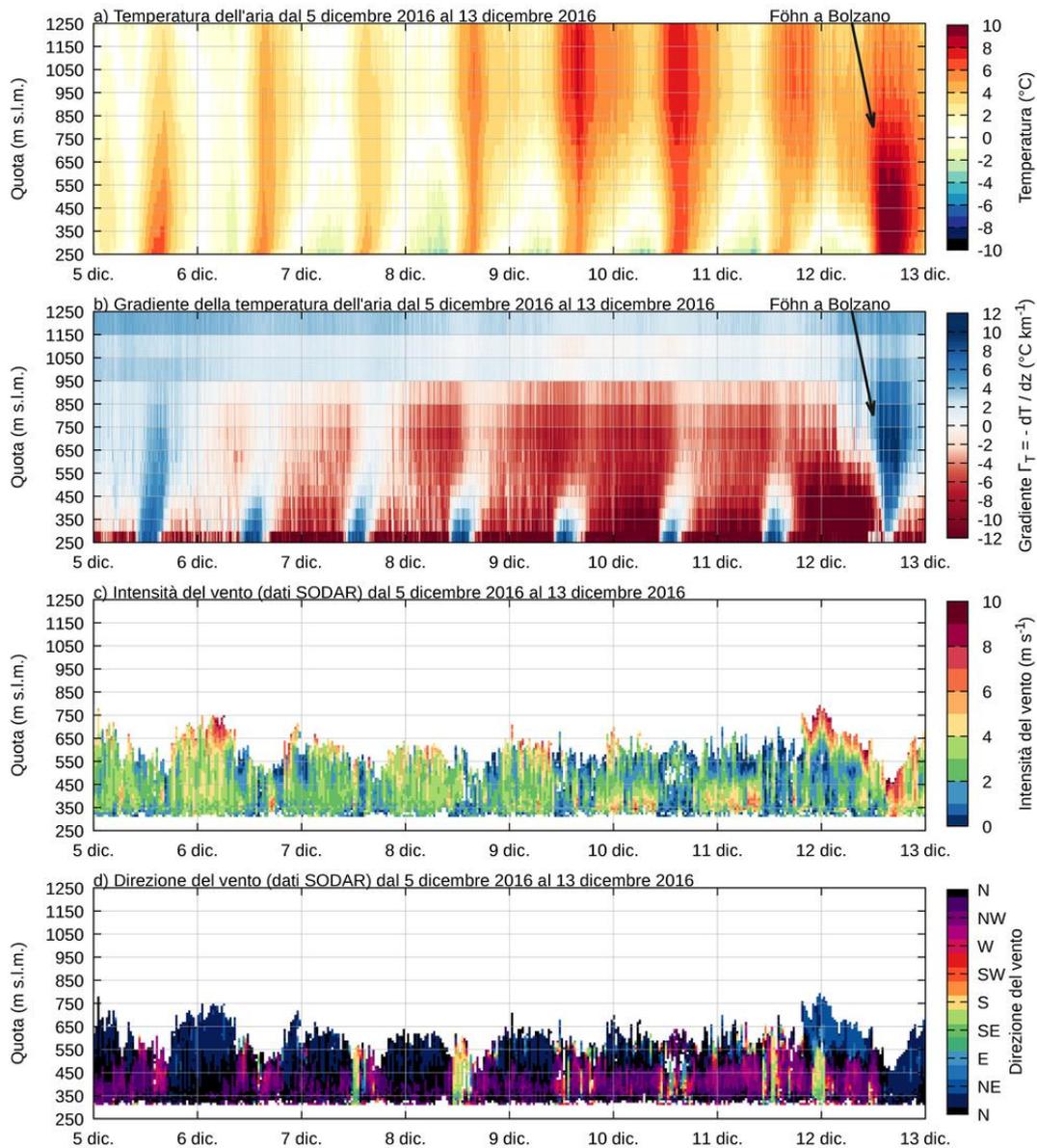


Figura 1.9: Temperatura dell'aria (a) misurata dal profilatore termico, andamento del gradiente della temperatura (b) e profili verticali dell'intensità (c) e della direzione del vento (d) misurati dal SODAR sul tetto del termovalorizzatore, nel periodo 5-13 dicembre 2016. Si indica l'effetto sul campo di temperature dell'intrusione del Föhn il 12 dicembre, che spirava prevalentemente da NE con intensità superiori a 6 m s^{-1} fino al suolo.

ossia $\Gamma = -\Delta T/\Delta z$. In questo modo il gradiente termico assume valori negativi in presenza di inversioni termiche, ossia quando la temperatura aumenta con la quota.

Attraverso l'analisi dei grafici riportati in Figura 1.9, e basandosi sulla descrizione della situazione meteorologica fornita nel ClimaReport N.252 per il mese di dicembre 2016, pubblicato dal Servizio Meteorologico della Provincia Autonoma di Bolzano, si osserva che:

1. la presenza di nubi basse nella notte tra il 4 e il 5 dicembre ha rallentato

il processo di raffreddamento dell'aria nel fondovalle, inibendo lo sviluppo dell'inversione termica al suolo, il cui spessore non supera i primi 200 m circa di atmosfera;

2. dalla tarda mattinata del 5 dicembre il cielo torna ad essere sereno e lo sviluppo al suolo dello strato di mescolamento permette l'erosione dell'inversione termica.;
3. nel tardo pomeriggio del 5 dicembre una nuova inversione termica inizia a svilupparsi. In questo caso, l'assenza di nubi alle basse quote favorisce un più rapido raffreddamento del suolo e quindi, durante la notte, l'inversione termica cresce fino a raggiungere una quota massima intorno a 850 m s.l.m.;
4. nelle giornate del 6 e del 7 dicembre si osserva lo sviluppo dello strato di miscelamento che dalla tarda mattinata erode l'inversione termica al suolo. Tuttavia, il progressivo raffreddamento dell'aria nella Conca mantiene stabile l'atmosfera in quota, determinando un profilo di temperatura pressoché isoterma tra i 450 e i 950 m s.l.m.;
5. il progressivo riscaldamento del suolo nelle giornate seguenti determina anche l'instaurarsi di debolissimi venti di valle che risalgono la Val d'Adige nelle ore centrali della giornata (Fig. 1c, d). Tuttavia l'apporto termico non è sufficiente a generare uno strato di mescolamento in grado di erodere completamente l'inversione termica. Infatti, dall'8 all'11 dicembre, l'inversione termica persiste fino a 700 m al di sopra del suolo. Queste condizioni risultano essere le più gravose dal punto di vista della qualità dell'aria. Infatti, la persistenza dell'inversione termica in quota non permette il miscelamento dell'aria con gli strati più alti dell'atmosfera. Pertanto, nonostante la presenza dello strato di miscelamento, gli inquinanti continuano ad accumularsi nei bassi strati di atmosfera;
6. a partire dal pomeriggio dell'11 dicembre la situazione sinottica si modifica. Per effetto di una bassa pressione, si verificano nevicate in corrispondenza della linea di confine, seguite da venti di Föhn (Fig. 1.9c, d). Il Föhn, che inizia a spirare incanalandosi nelle vallate a nord di Bolzano, raggiunge la Conca di Bolzano nella giornata del 12. In corrispondenza di questo evento si osserva un rapido aumento della temperatura dell'aria, che al suolo raggiunge una temperatura di 16°C, provocando un rialzo termico di circa 18°C nell'arco di poche ore. Contestualmente al riscaldamento dell'aria e al miscelamento meccanico indotto dal Föhn, si assiste ad una rapida erosione dall'alto dell'inversione termica.

1.4.2 Caratterizzazione di un anno climatologicamente rappresentativo

Si è selezionato l'anno 2016, come verrà chiarito più in dettaglio nel seguito, come anno climatologicamente rappresentativo per l'esecuzione delle simulazioni di lungo periodo (Capitolo 5) e quindi per la determinazione delle mappe d'impatto del termovalorizzatore. Al fine di acquisire informazioni circa la struttura termica all'interno della conca di Bolzano con particolare riferimento alla presenza di inversioni termiche, si è proceduto all'analisi dei profili orari di temperatura misurati dal profilatore termico (MTP5-HE).

Sulla base del dataset disponibile si è proceduto nel determinare:

1. il profilo di temperatura medio annuo ed i profili di temperatura medi per ciascuna stagione;
2. il ciclo giornaliero medio stagionale dei profili di temperatura a scala oraria.

Il profilo medio annuo (Figura 1.10a) mostra che la temperatura dell'aria all'interno della Conca di Bolzano per l'anno 2016 ha assunto valori medi di circa 12°C in prossimità del suolo e di circa 8°C in corrispondenza della massima quota investigata dal profilatore termico (1000 m al di sopra del piano campagna). Tuttavia la grande variabilità di questi valori (deviazione standard pari a circa 8°C) ha suggerito di stimare i profili medi suddividendo il campione per stagioni. Tali profili (Figura 1.10b, c, d) mostrano come la temperatura dell'aria risenta del ciclo stagionale. Nei mesi invernali la temperatura media oscilla tra 2°C al suolo e 1°C a 1000 m dal suolo, mentre nei mesi estivi la temperatura media è di circa 21°C al suolo e di circa 16°C in quota. Entrambi i profili sono caratterizzati da deviazioni standard contenute, dell'ordine dei 3°C, tuttavia le distribuzioni della temperatura con la quota sono sensibilmente diverse nelle due stagioni. Il progressivo aumento della temperatura con la quota nei primi 150 m di atmosfera, che caratterizza il profilo invernale, indica la presenza di frequenti e significative inversioni termiche al suolo.

I profili medi di temperatura per il periodo primaverile ed autunnale mostrano invece caratteristiche simili, sia in termini di valori medi, sia in termini di deviazioni standard. Questo comportamento può essere attribuito al fatto che queste due stagioni caratterizzano la transizione dal periodo invernale a quello estivo e viceversa. Dunque i contributi della stagione fredda e di quella calda sono tra loro bilanciati.

Al fine di investigare la variabilità giornaliera della temperatura durante ciascuna stagione, ed in particolare di individuare la dinamica delle inversioni termiche, si sono stimati i cicli giornalieri medi orari della temperatura alle diverse quote e per ciascuna stagione (Figura 1.11). Si osserva così che:

1. l'inverno (Figura 1.11a) è la stagione che presenta le inversioni termiche al suolo più significative e persistenti durante la giornata. Mediamente, l'inversione termica inizia a svilupparsi dal secondo pomeriggio (dopo le 16), progressivamente aumenta di spessore durante la sera e nelle ore notturne, quando l'atmosfera diventa più stabile, raggiunge la massima estensione nella prima mattinata. Dopo l'alba, il riscaldamento del suolo determina un rapido aumento della temperatura dell'aria negli strati bassi di atmosfera. Ciò determina lo sviluppo di uno strato di miscelamento che cresce in spessore con l'aumentare del riscaldamento e progressivamente erode dal basso l'inversione termica. In particolare, il grafico in Figura 1.11a mostra come verso le 10 del mattino i primi 400 m di atmosfera siano in condizioni pressoché isoterme (ossia la temperatura dell'aria sia pressoché costante con la quota);
2. la primavera e l'autunno sono le due stagioni in cui è ancora possibile osservare inversioni termiche al suolo, anche se di spessore inferiore rispetto al periodo invernale, occupando mediamente i primi 200 m di atmosfera dal suolo. In questo caso, il periodo della giornata in cui mediamente è presente l'inversione termica è ridotto. Infatti, l'inversione inizia a svilupparsi dopo le 18, mentre inizia ad essere erosa dallo strato di miscelamento già dopo le 8 del mattino;
3. d'estate il fenomeno dell'inversione termica è invece circoscritto alle sole ore notturne, ed interessa mediamente i primi 50-100 m di atmosfera.

Lo studio delle inversioni termiche in ambiente montano è tuttora oggetto di ricerca, in quanto strettamente correlato alle problematiche della qualità dell'aria e della dispersione degli inquinanti (Chang et al., 2006; Ezau et al., 2013; Wolf et al., 2014; Chemel et al., 2016). Alcuni di questi studi si focalizzano sulla definizione di algoritmi che permettano di identificare in modo automatico la presenza di inversioni termiche allo scopo di ricavare informazioni utili a caratterizzare l'inversione (Kadygrov et al., 1999). Nel presente studio si è fatto riferimento alla metodologia proposta da Wolf et al. (2014).

I profili orari di temperatura sono stati analizzati e suddivisi sulla base della presenza di inversioni termiche. In particolare si sono individuati profili con:

1. assenza di inversioni termiche;
2. presenza di inversioni termiche al suolo;
3. presenza di inversioni termiche in quota;
4. condizioni miste.

La distribuzione in frequenza delle tipologie di inversione termica ottenute per l'anno 2016 (Figura 1.12) mostra come le inversioni termiche siano un fenomeno ricorrente all'interno della Conca di Bolzano, infatti solo il 49.6% dei profili investigati non è affetto da inversione termica. In particolare, le inversioni termiche al suolo sono la tipologia di inversione termica più frequente, ed interessano il 38.6% del dataset a disposizione. Le inversioni termiche in quota (7.8%) possono essere invece ricondotte al residuo di inversioni termiche al suolo, progressivamente erose dal basso per lo sviluppo dello strato di miscelamento. Ad ulteriore prova, in Figura 1.13, si osserva che le inversioni termiche in quota sono più frequenti in corrispondenza delle ore centrali della giornata, quando non è invece presente l'inversione termica al suolo. I mesi primaverili sono caratterizzati da inversioni termiche al suolo che interessano soprattutto le ore notturne, come precedentemente osservato. Inoltre, la mancanza di inversioni termiche in quota durante le ore centrali della giornata suggerisce che in questo periodo dell'anno lo sviluppo dello strato di mescolamento è più rapido ed efficiente nell'erosione l'inversione al suolo. L'analisi condotta per i mesi estivi ed autunnali evidenzia invece la presenza di inversioni termiche in quota anche nelle ore notturne.

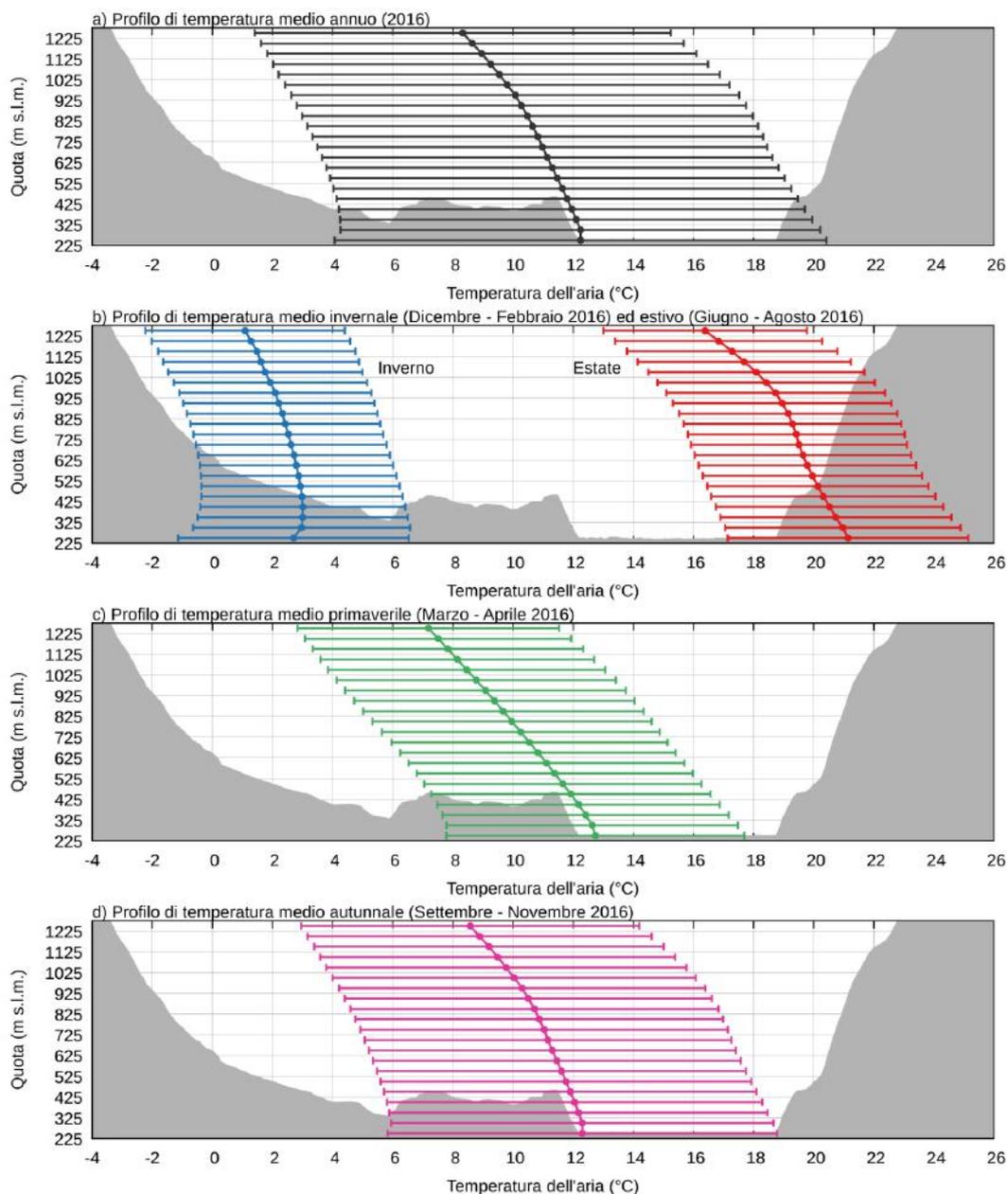


Figura 1.10: Profili medio annuale e medi stagionali della temperatura dell'aria, misurati dal profilatore termico presso l'aeroporto di Bolzano, per l'anno 2016. Le linee con i punti rappresentano il profilo medio, mentre le linee orizzontali le deviazioni standard delle temperature alle diverse quote. Sullo sfondo la sezione trasversale E-W della Conca di Bolzano all'altezza del termovalorizzatore.

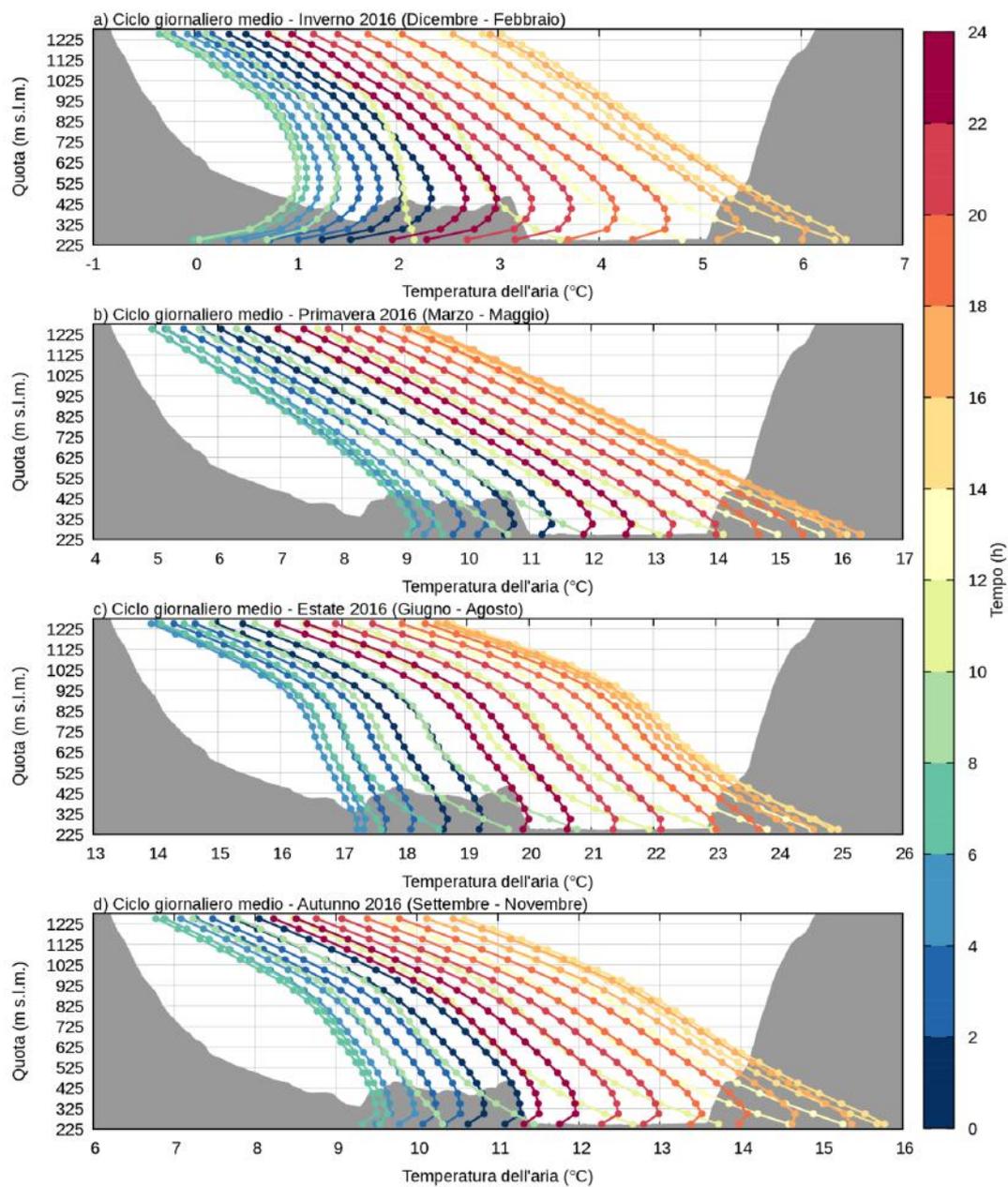


Figura 1.11: Cicli medi giornalieri a scala oraria e suddivisi per stagione della temperatura dell'aria misurata dal profilatore termico installato presso l'aeroporto di Bolzano. Sullo sfondo la sezione trasversale E-W della Conca di Bolzano all'altezza del termovalorizzatore.

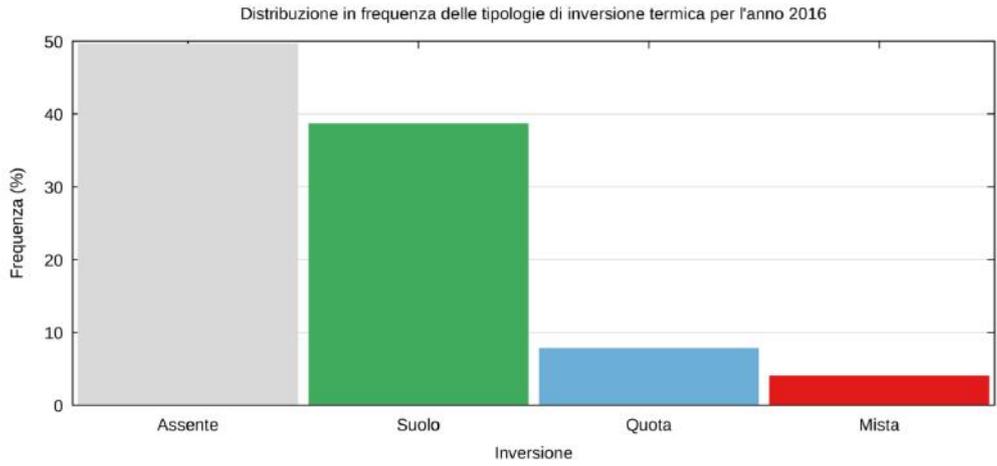


Figura 1.12: Distribuzione in frequenza delle diverse tipologie di inversione termica ottenute analizzando i profili medi orari di temperatura misurati dal profilatore termico a disposizione per l'anno 2016. L'analisi dei profili di temperatura è stata condotta investigando la presenza di inversioni termiche, inversioni termiche al suolo, in quota o situazioni miste in cui nel medesimo profilo coesistono diverse tipologie di inversione.

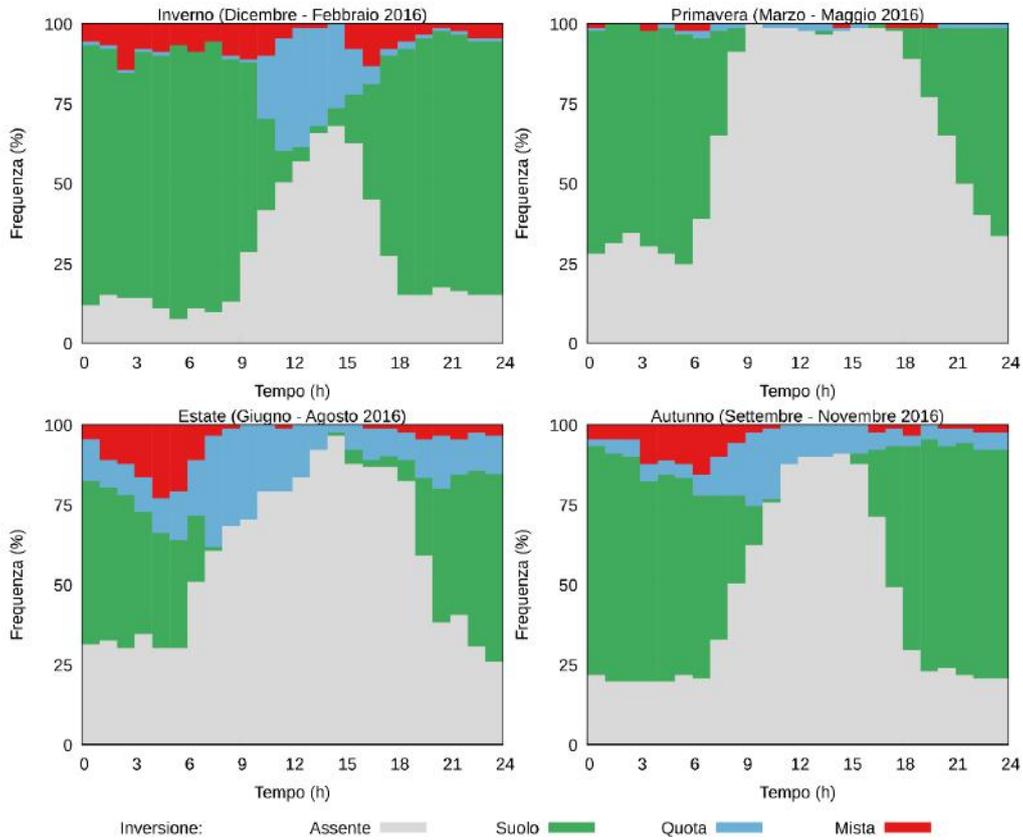


Figura 1.13: Distribuzione in frequenza stagionale, a scala oraria, delle diverse tipologie di inversione termica ottenute analizzando i profili medi orari di temperatura misurati dal profilatore termico.

1.5 Caratterizzazione del regime dei venti

Gli ultimi due pannelli riportati in Figura 1.9 mostrano l'andamento temporale dei profili semiorari dell'intensità e della direzione del vento misurati dal SODAR installato sul tetto del termovalorizzatore dal 5 al 12 dicembre 2016. Questi grafici permettono di mettere in luce la complessità del campo di vento presso l'area in esame. Infatti, anche se riferiti al solo periodo invernale e raccolti in corrispondenza di un evento di inversione termica persistente, i grafici mostrano:

1. la presenza di un debole ciclo giornaliero dei venti, caratterizzato da intensità del vento maggiori nelle ore notturne ($2-4 \text{ m s}^{-1}$) e da venti più deboli nelle ore centrali della giornata (intensità del vento inferiori a 2 m s^{-1});
2. deboli venti di valle che spirano da Sud, risalendo la Val d'Adige, nelle ore centrali della giornata, quando l'irraggiamento solare è in grado di riscaldare sufficientemente il fondovalle;
3. una struttura del campo di vento molto più complessa nelle ore notturne, anche per la presenza dell'inversione termica, che disaccoppia il campo di moto a circa 450 m s.l.m. Infatti, negli strati bassi di atmosfera si osserva la presenza dei venti di drenaggio che spirano della Val d'Adige (NW-NNW) con intensità intorno a 4 m s^{-1} . Alle quote superiori, invece si apprezza la presenza di venti molto più intensi (velocità superiori a $5-6 \text{ m s}^{-1}$) che spirano da NE.
4. l'evento di Föhn nella notte tra l'11 e il 12 dicembre, da prima visibile solo sopra i 550 m s.l.m., successivamente, dopo essersi incanalato nella Conca di Bolzano, spira nelle ore centrali della giornata con intensità elevate ($6-8 \text{ m s}^{-1}$) anche in prossimità del suolo. In questo caso, il SODAR non è stato in grado di restituire misure attendibili oltre i 450 m s.l.m. principalmente per effetto del rumore di fondo determinato dall'interazione delle forti raffiche di vento con la struttura dell'edificio.

L'assenza di forzanti sinottiche che ha caratterizzato le giornate dal 5 all'11 dicembre ha permesso di attribuire al vento che si osserva spirare da NE sopra i 450 m s.l.m. le caratteristiche di un vento di drenaggio, determinato dall'instaurarsi di gradienti termici. Le analisi condotte durante lo studio hanno permesso di ricondurre questo vento al drenaggio della Val d'Isarco, che in corrispondenza dello sbocco della Val d'Isarco nella Conca di Bolzano accelera comportandosi come un *valley-exit jet*.

La descrizione riportata mette in luce come la complessità topografica che caratterizza la conca di Bolzano si rifletta anche nella complessità del campo di vento. Infatti, in assenza di forzanti sinottiche, le circolazioni termiche che si sviluppano in ciascuna delle valli tributarie confluiscono all'interno della conca, interagendo tra loro e dando luogo a complesse strutture del campo di moto. Inoltre, soprattutto durante il periodo invernale, la presenza di numerose ed intense inversioni termiche al suolo influisce significativamente sulla dinamica delle circolazioni locali. In particolare tra le circolazioni locali più significative si è osservata la presenza del *valley-exit jet* della Val d'Isarco, che verrà meglio caratterizzato nel seguito di questo capitolo (Sez. 1.6).

In presenza di forzanti sinottiche, invece, sono soprattutto gli eventi di Föhn a caratterizzare maggiormente le circolazioni della conca.

Durante lo studio tecnico, la disponibilità di profili di velocità e di direzione del vento forniti dal SODAR sul tetto del termovalorizzatore e le scansioni del Doppler Wind-LIDAR sul tetto di Palazzo 12, hanno permesso di caratterizzare il campo di vento sia in corrispondenza dello sbocco a Sud della conca di Bolzano, sia in corrispondenza della confluenza della Val d'Isarco ad est di Bolzano. Tali analisi sono riportate rispettivamente in Sezione 1.5.1 e in Sezione 1.6.

Per meglio comprendere la dinamica delle circolazioni locali, si sono condotte anche simulazioni numeriche ad alta risoluzione del campo di moto, in corrispondenza di eventi significativi, assimilando i dati disponibili all'interno dell'area di studio. Per ragioni di spazio non vengono riportate nella presente relazione tecnica.

1.5.1 Campo di vento allo sbocco a sud della Conca di Bolzano

I profili di vento (intensità e direzione) misurati dal SODAR sono stati analizzati per investigare il regime dei venti al di sopra del termovalorizzatore, in corrispondenza del margine meridionale della Conca di Bolzano. Le analisi sono state svolte utilizzando i dati raccolti durante la seconda campagna di misure (28 agosto 2016 - 5 maggio 2017). Infatti, la seconda campagna di misure ha interessato un periodo più esteso rispetto alla prima (12 gennaio - 20 febbraio 2016) e di conseguenza è da considerarsi più rappresentativa per la caratterizzazione delle circolazioni locali.

L'analisi dei profili semiorari di direzione e di intensità del vento, ottenuti nel periodo 28 Agosto 2016 - 05 Maggio 2017, ha permesso di ottenere le distribuzioni in frequenza rappresentate in Figura 1.14. I grafici, ottenuti analizzando circa 240000 dati, individuano per ciascuna quota le direzioni e le intensità che si sono verificate con maggiore frequenza durante il periodo investigato. Il regime dei venti così ottenuto mostra un'alternanza di venti che spirano lungo l'asse della Val d'Adige sia

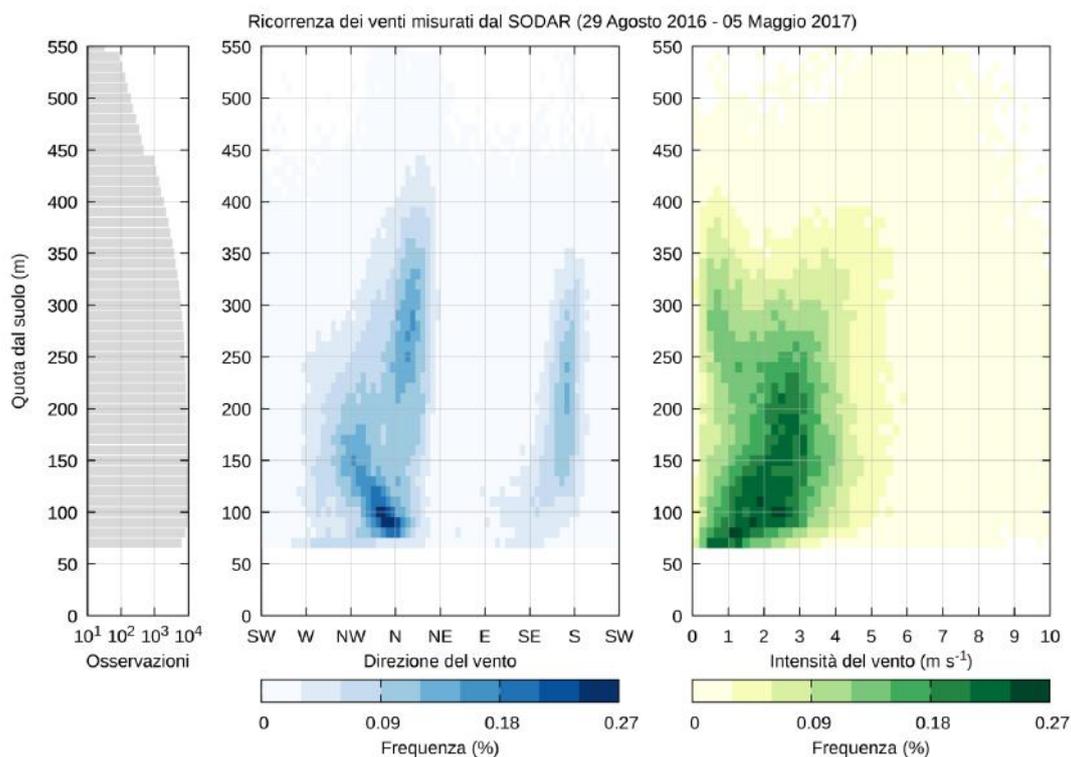


Figura 1.14: Analisi di frequenza delle direzioni (centro) e delle intensità del vento (destra) al variare della quota, ottenute dall'analisi dei dati misurati dal SODAR nel periodo 28 agosto 2016 - 5 maggio 2017. Nel grafico di sinistra si riporta (in scala logaritmica) il numero di dati disponibili per ciascun livello verticale.

da Nord (venti in discesa o di drenaggio), sia da Sud (venti di risalita). Ciò evidenzia quindi come il regime anemometrico sia pressoché dominato da circolazioni termiche locali. Si osserva inoltre che la topografia influenza la distribuzione delle che spirano da Sud. Partendo dalle quote più basse, si nota una progressiva rotazione delle direzioni più frequenti nei primi 200-250 m di atmosfera, che da Nord migrano verso Nord-Ovest. Oltre questa quota, i venti spirano invece con maggiore frequenza dal settore di direzioni compreso tra Nord e Nord-Est. La rotazione dei venti negli strati inferiori può essere ricondotta alla presenza della collina di Castel Firmiano, a Nord dell'impianto, che determina un ostacolo per i venti di drenaggio in discesa dal tratto di Val d'Adige a NW di Bolzano. Infatti, gli strati più bassi di questi venti, per poter proseguire verso Sud, devono aggirare la collina, mentre gli strati che si trovano ad una quota superiore continuano a spirare mantenendo la loro direzione iniziale senza risentire dell'ostacolo. L'analisi di frequenza delle intensità del vento (Figura 1.14 a destra) mostra complessivamente una grande variabilità che può essere giustificata considerando sia l'estensione temporale del dataset, che contiene la ciclicità stagionale dei venti di valle, sia l'intrusione nell'area di studio di venti sinottici anche intensi (ad esempio Föhn). Soffermandosi sulla distribuzione

delle intensità dei venti più frequenti, si osserva che le intensità del vento tendono ad aumentare con la quota, fino a circa 200-250 m dal suolo. Alle quote superiori la distribuzione ottenuta mostra una biforcazione. In particolare, si osservano venti che si indeboliscono all'aumentare della quota (velocità inferiori a 1 m s^{-1}) e venti che progressivamente aumentano di intensità con la quota. La prima situazione può essere ricondotta alla presenza di venti di drenaggio deboli, che sono tipicamente caratterizzati da un massimo dell'intensità del vento in vicinanza del suolo, mentre la seconda situazione può essere ricondotta sia all'intrusione di venti sinottici sia a circolazioni termiche, come venti di risalita (soprattutto nel periodo primaverile) e al *valley-exit jet* della Val d'Isarco.

Al fine di investigare effetti stagionali sulle circolazioni, il dataset iniziale è stato suddiviso in tre periodi: autunnale (da Settembre a Novembre), invernale (da Dicembre a Febbraio) e primaverile (da Marzo a Maggio). Analogamente a quanto condotto in precedenza, per ciascun periodo è stata effettuata un'analisi di frequenza delle intensità e delle direzioni del vento. In Figura 1.15 si riportano le distribuzioni ottenute, mentre le analisi di frequenza riportate nei grafici delle Figure 1.16, Figura 1.17 e Figura 1.18 permettono di ricavare informazioni sulla ciclicità giornaliera dei venti (intensità e direzione) per ciascuna stagione e a tre diverse quote. Si osserva così che:

1. il periodo autunnale, ed in parte il periodo primaverile, sono caratterizzati dall'alternanza di diverse circolazioni, dovute alle caratteristiche di transizione di queste stagioni. Il periodo autunnale Figura 1.16 è un periodo di progressivo raffreddamento che tuttavia risente, soprattutto all'inizio, delle circolazioni termiche che si sono sviluppate in estate. In primavera 1.18, viceversa, il progressivo aumento delle temperature determina l'instaurarsi di gradienti termici che portano allo sviluppo di intense circolazioni termiche;
2. in autunno (Figura 1.15, grafici sopra) il regime dei venti vede la presenza di venti di pendio che spirano nei primi 150 m circa di atmosfera trasversalmente alla Val d'Adige, da Ovest lungo il versante della collina del Monte di Mezzo, soprattutto nelle ore notturne e da Est nella tarda mattinata (anche se meno frequenti), con intensità del vento relativamente basse (inferiori a 2 m s^{-1}). Si osservano poi venti di valle, soprattutto da Nord;
3. le distribuzioni in frequenza dei venti nel periodo invernale (Figura 1.15, grafici centrali) mostrano venti che spirano prevalentemente da Nord, con una struttura verticale analoga a quella descritte in Figura 1.14. Per questo periodo la biforcazione della distribuzione delle intensità del vento sopra i 250 m dal suolo è più evidente, proprio perché il debole riscaldamento del suolo

favorisce lo sviluppo di venti di drenaggio, rispetto a venti di risalita, e quindi è più facile apprezzare la presenza del *valley-exit jet* della Val d'Isarco. Infatti, i cicli giornalieri delle intensità del vento (Figura 1.17) mostrano che a tutte le quote la velocità del vento è maggiore durante le ore notturne ($3-4 \text{ m s}^{-1}$) ed inferiore nelle ore centrali della giornata ($1-2 \text{ m s}^{-1}$);

4. in primavera, invece, il progressivo riscaldamento dell'aria permette lo sviluppo di venti di valle di risalita anche intensi (superiori a 4 m s^{-1}) che spirano nelle ore centrali della giornata e costituiscono la condizione più frequente rispetto ai venti di drenaggio da nord (Figura 1.15, grafici sotto e Figura 1.18).

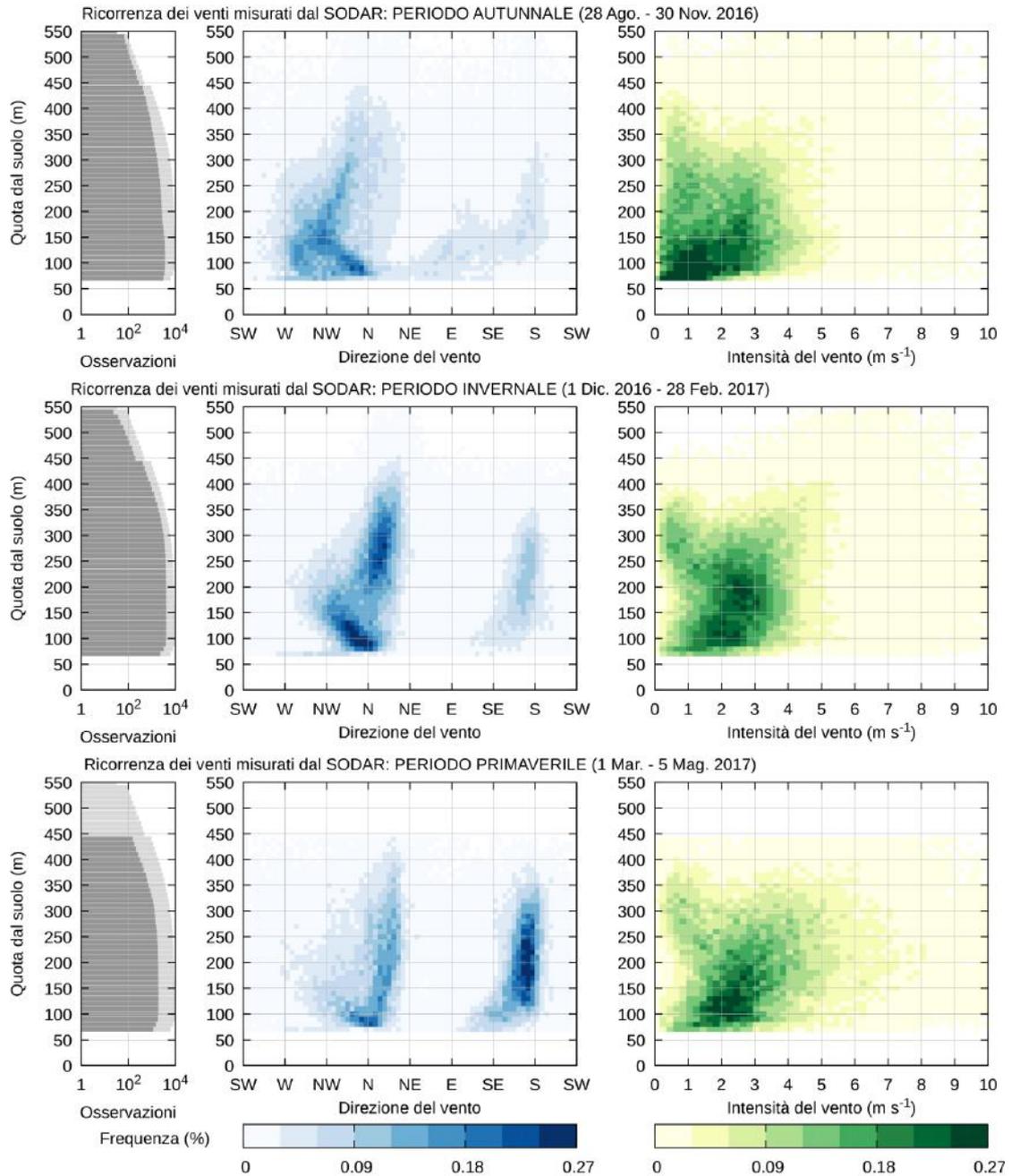


Figura 1.15: Analisi di frequenza stagionale delle direzioni (centro) e delle intensità del vento (destra) al variare della quota, ottenute dall'analisi dei dati forniti dal SODAR nel periodo 28 agosto 2016 – 5 maggio 2017. Per ciascun periodo, i grafici a sinistra mostrano il numero di dati disponibili per la stagione investigata.

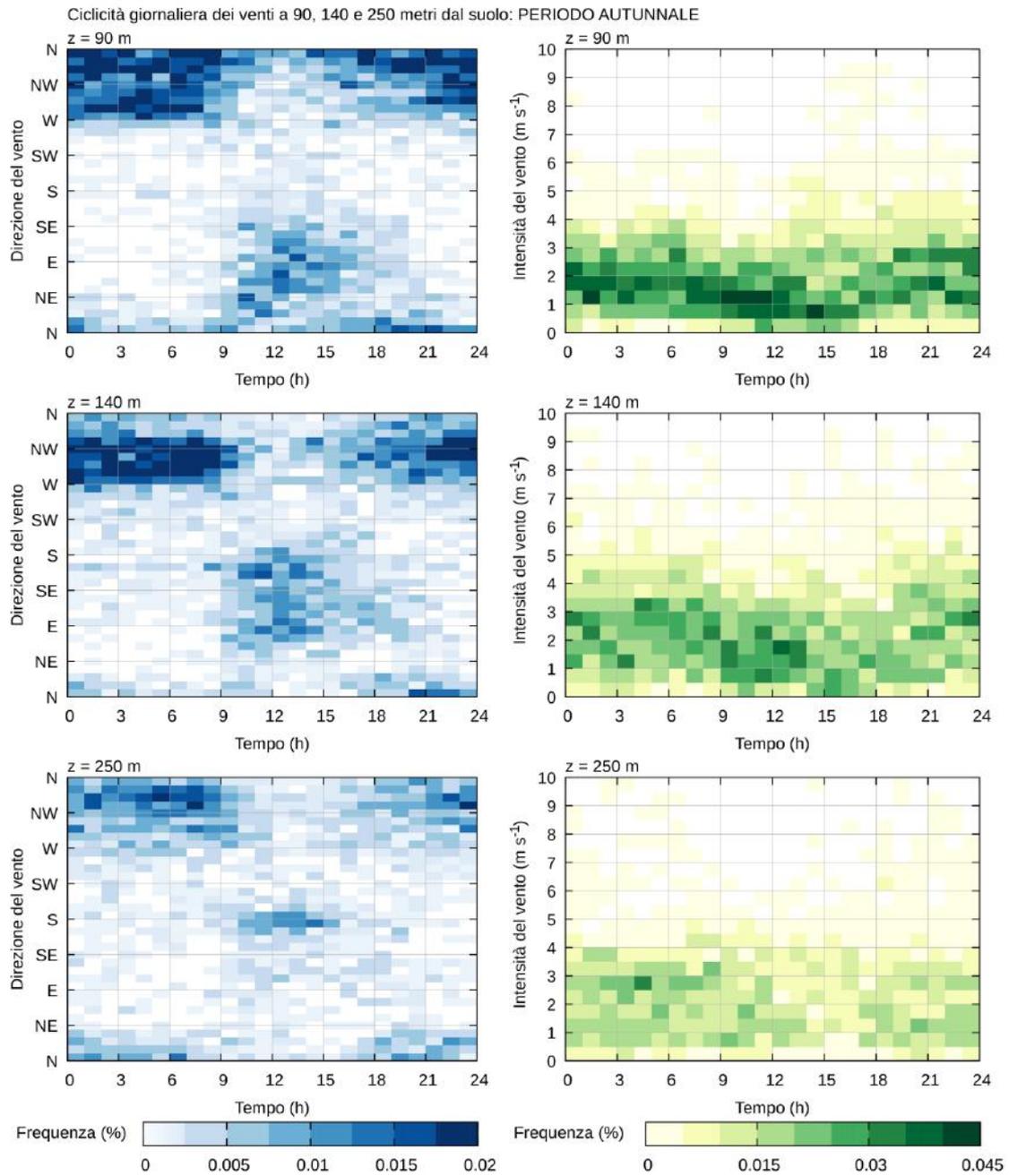


Figura 1.16: Cicli giornalieri di direzione e di intensità del vento per il periodo autunnale alle quote di 90 m, 140 m e 250 m s.l.m.

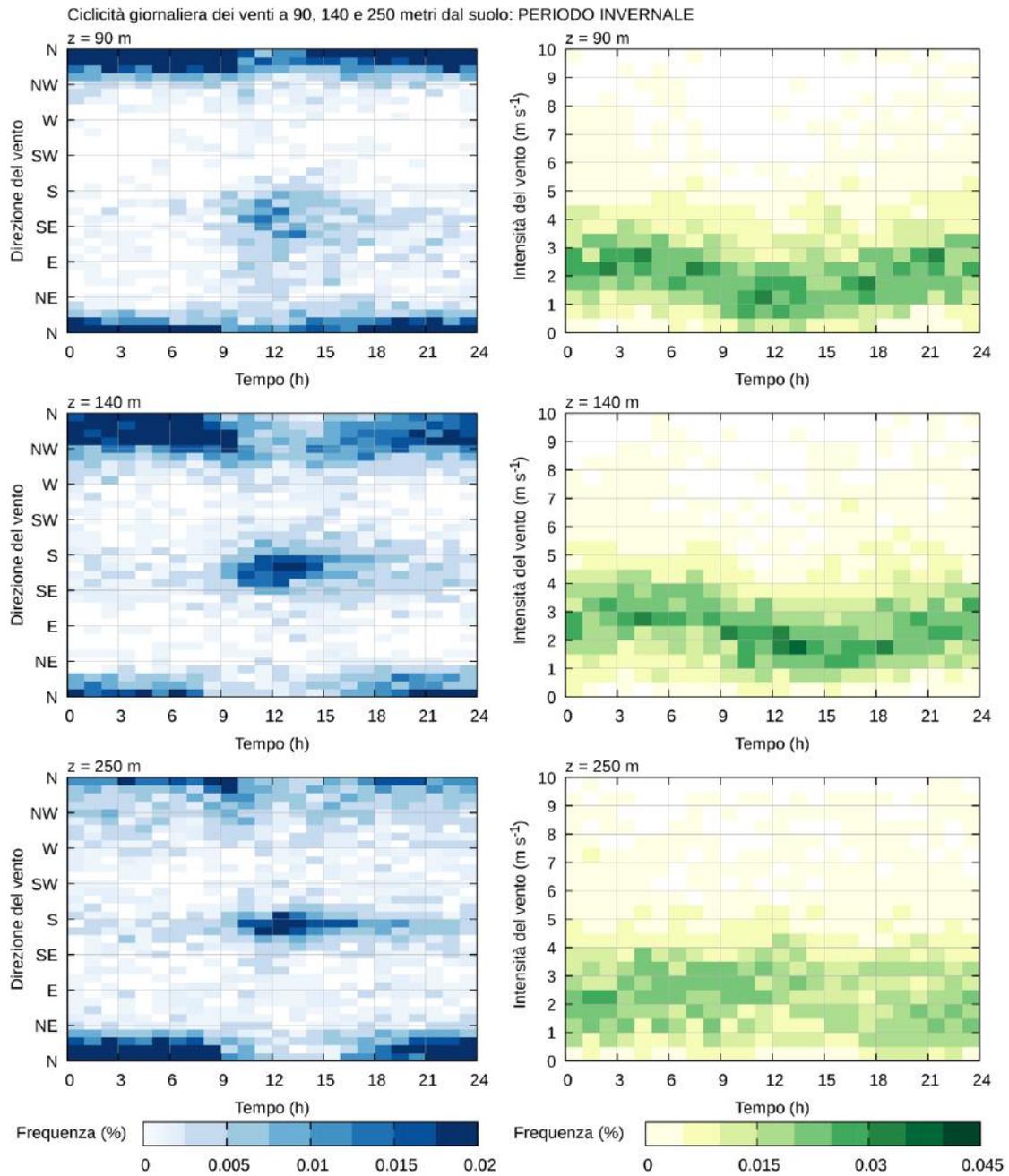


Figura 1.17: Cicli giornalieri di direzione e di intensità del vento per il periodo invernale alle quote di 90 m, 140 m e 250 m s.l.m.

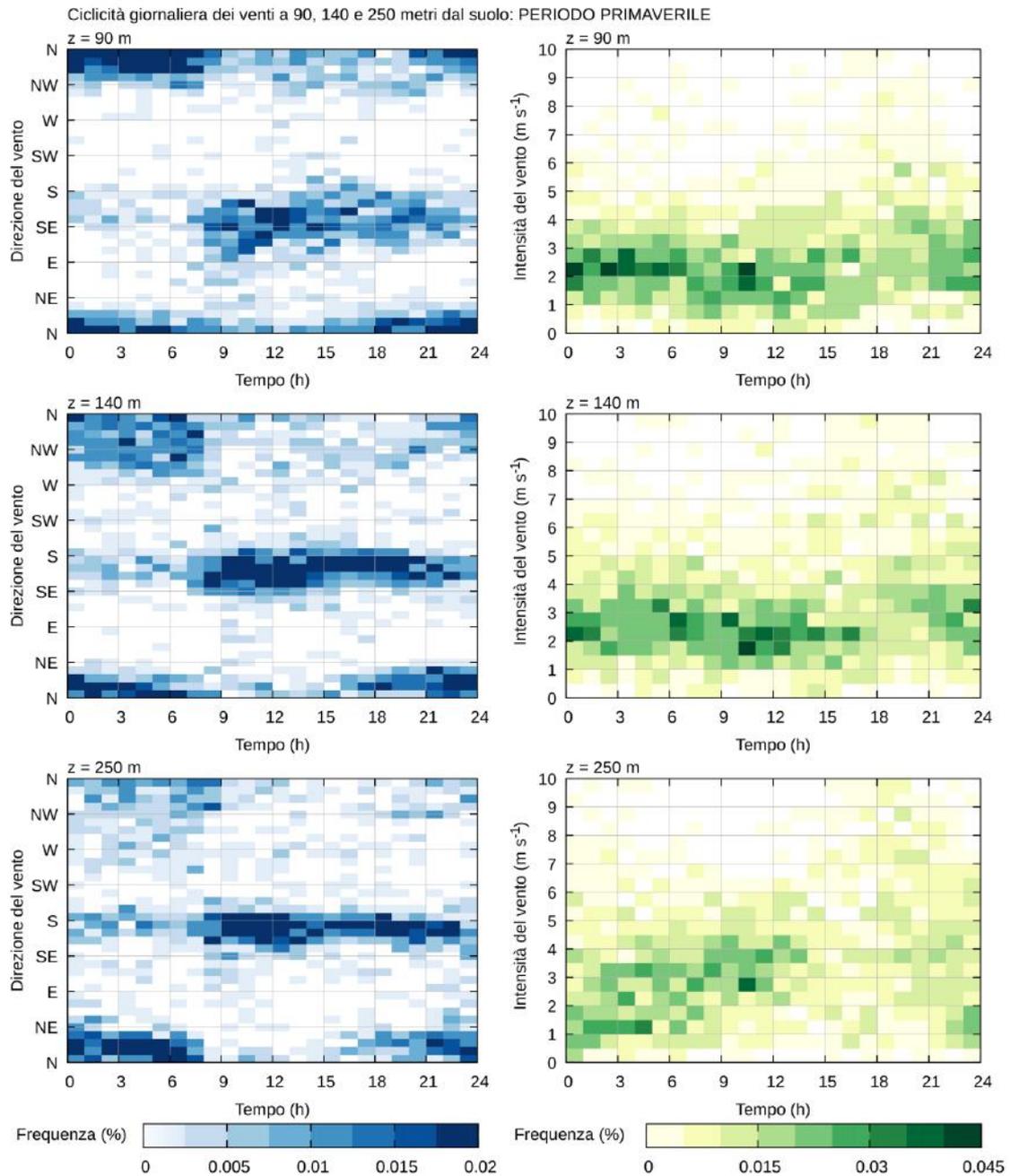


Figura 1.18: Cicli giornalieri di direzione e di intensità del vento per il periodo primaverile alle quote di 90 m, 140 m e 250 m s.l.m.

1.6 Campo di vento allo sbocco della Val d'Isarco nella Conca di Bolzano

Come introdotto, durante lo studio si è osservato che in presenza di deboli forzanti sinottiche il vento di drenaggio della Val d'Isarco, in corrispondenza dello sbocco della valle nella conca di Bolzano, si comporta come una corrente a getto. Questo fenomeno, che nella letteratura scientifica è definito come *valley-exit jet*, è determinato dall'interazione del campo di vento con la topografia. In particolare, affinché si sviluppi un *valley-exit jet* è necessario che la valle in cui spirava il vento di drenaggio sia molto stretta e che lo sbocco nella pianura adiacente, in questo caso la Conca di Bolzano, avvenga in modo brusco. Condizioni che caratterizzano il tratto finale della Val d'Isarco (Figura 1.4). Queste due caratteristiche determinano l'accelerazione del flusso in corrispondenza della sezione di sbocco e quindi l'instaurarsi di un vento molto intenso, il cui profilo di velocità mostra un picco in prossimità del suolo. Al fine di investigare il campo di moto in corrispondenza dello sbocco della Val d'Isarco nella conca di Bolzano, si è condotta una campagna di misure specifica, mediante l'impiego di un Doppler Wind-LIDAR, installato sul tetto di Palazzo 12 della Provincia Autonoma di Bolzano.

In Figura 1.19 si mostrano i profili verticali di intensità e di direzione del vento misurati dal 27 al 30 gennaio 2017 sia dal Doppler Wind-LIDAR, sia dal SODAR. Queste giornate sono state caratterizzate dalla presenza di un campo di alta pressione e assenza di forzanti sinottiche, che hanno contribuito a determinare importanti inversioni termiche al suolo, in particolare nelle ore notturne, e soprattutto hanno determinato lo sviluppo del *valley-exit jet* della Val d'Isarco. I profili misurati dal Wind-LIDAR (Figura 1.19a) mostrano che, in assenza di forzanti sinottiche, il campo di vento allo sbocco della Val d'Isarco è pressoché dominato dall'alternanza di venti che spirano da Ovest risalendo la valle nelle ore centrali della giornata e da venti di drenaggio che la discendono (venti da Est) nelle ore notturne. In particolare, i venti di drenaggio, che qui si configurano appunto come un *valley-exit jet*, spirano dal tardo pomeriggio, occupando gli strati bassi di atmosfera, per poi aumentare di spessore ed intensità nella serata. Dai grafici si osservano alcune caratteristiche tipiche dei *valley-exit jet* (Drobinski et al., 2005; Chrust et al., 2013):

1. l'intensità del vento è elevata (superiore a 6 m s^{-1}) ed aumenta durante le ore notturne fino a raggiungere un massimo nella mattinata (maggiore di 10 m s^{-1});
2. il massimo delle velocità, soprattutto all'inizio del fenomeno, è posizionato in prossimità del suolo, mentre durante la notte si osservano molteplici picchi di

velocità, che possono essere attribuiti all'interazione del *valley-exit jet* con la stratificazione stabile dell'atmosfera indotta dall'inversione termica;

3. il fenomeno si esaurisce in modo brusco nella mattinata.

Inoltre, in Figura 1.19b si riportano i profili di vento misurati contemporaneamente dal SODAR sul tetto del termovalorizzatore. Si osserva, anche in questo caso, la presenza di un ciclo giornaliero in cui si alternano venti da Sud che risalgono la Val d'Adige nelle ore centrali della giornata e la presenza di venti di drenaggio che invece la discendono nelle ore notturne. In particolare, nelle ore notturne si osserva ancora che fino a circa 450 m s.l.m. Il campo di vento è dominato dai venti di drenaggio che spirano da NW, mentre oltre questa quota si osserva il drenaggio della Val d'Isarco da NE. Relativamente alle intensità del vento, i profili misurati mostrano intensità superiori a 4 m s^{-1} solamente oltre i 550 m s.l.m. Inoltre si osserva che il SODAR non è in grado di cogliere tutto lo spessore del *valley-exit jet*, ma solamente il bordo inferiore.

Al fine di meglio comprendere la dinamica del *valley-exit jet*, l'evento del 28-29 gennaio 2017 è stato simulato numericamente con il modello meteorologico prognostico WRF (Weather Research and Forecasting Model, si veda il Capitolo 2). Durante questo evento, nella Conca di Bolzano, si era sviluppata un'inversione termica che ha raggiunto nel corso della notte uno spessore di circa 700 m. La simulazione è stata condotta risolvendo ad alta risoluzione il campo meteorologico all'interno della Conca di Bolzano, al fine di cogliere nel miglior modo possibile le caratteristiche locali del fenomeno. In particolare, il dominio di calcolo è stato suddiviso in celle aventi una risoluzione orizzontale di 0.3 km, con 62 livelli verticali spaziatosi di 30 m nei primi 1000 m di atmosfera. Inoltre, per aumentare la rappresentatività del risultato, durante la simulazione sono stati assimilati i dati al suolo provenienti da 15 stazioni al suolo, dal profilatore termico, dal SODAR e dal Wind-LIDAR. Si osserva qui che le simulazioni di eventi singoli condotte durante lo studio, oltre ad aiutare a comprendere con maggiore dettaglio la fenomenologia dei processi meteorologici all'interno della Conca di Bolzano, hanno anche permesso di acquisire sensibilità sulla risoluzione necessaria ai modelli meteorologici per cogliere questi fenomeni. Più in generale, queste analisi hanno aiutato alla definizione del setting più idoneo per la simulazione numerica di lungo periodo del campo meteorologico.

In Figura 1.20 si riportano i campi di vento simulati con il modello prognostico WRF in corrispondenza del medesimo istante temporale (00 UTC) ma a due diverse quote: a 10 m dal suolo e a 750 m s.l.m. Dall'analisi emerge che:

1. in prossimità del suolo (Figura 1.20, sinistra) i venti sono molto deboli, inferiori a 2 m s^{-1} e non si apprezza la presenza del *valley-exit jet*, che invece resta

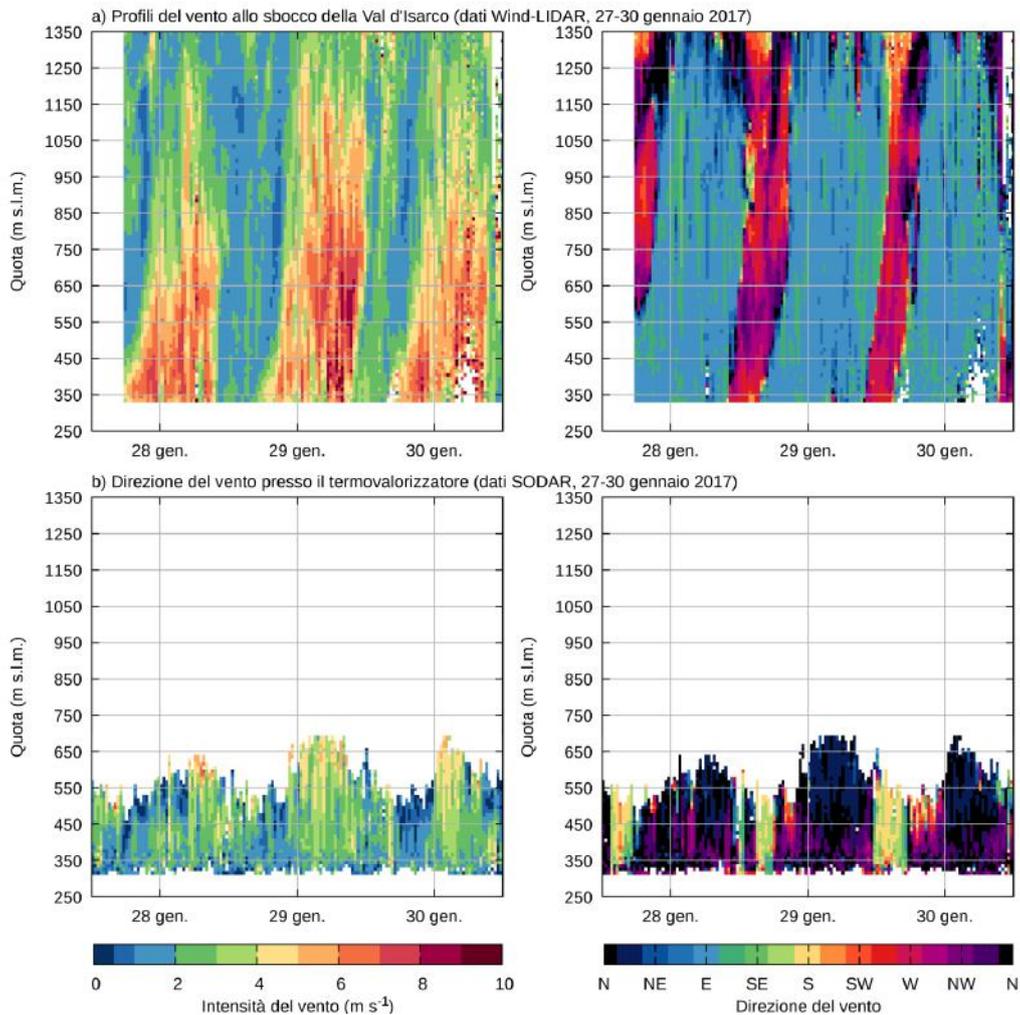


Figura 1.19: Profili verticali di vento misurati dal 27 al 30 gennaio 2017 dal Wind-LIDAR (sopra) allo sbocco della Val d'Isarco e dal SODAR (sotto) sul tetto del termovalorizzatore.

in quota.

2. a 750 m s.l.m. è invece evidente la presenza del *valley-exit jet* (Figura 1.20, destra). Infatti, si osserva che all'interno della Val d'Isarco il vento di drenaggio spirava con un'intensità compresa tra 3 e 4 m s^{-1} . In corrispondenza dello sbocco della valle nella Conca di Bolzano, invece, l'intensità del vento aumenta significativamente assumendo valori tra 6 e 7 m s^{-1} .
3. il *valley-exit jet*, per effetto dei vincoli indotti dall'orografia che caratterizza la conca e per la presenza dell'inversione termica, curva sopra la città di Bolzano e si incanala nella Val d'Adige.

Dalle simulazioni è inoltre emerso che il *valley-exit jet* è potenzialmente più caldo rispetto all'aria presente nella conca di Bolzano, soprattutto quando si sviluppano inversioni termiche al suolo. Di conseguenza, il *valley-exit jet* è soggetto ad un effetto

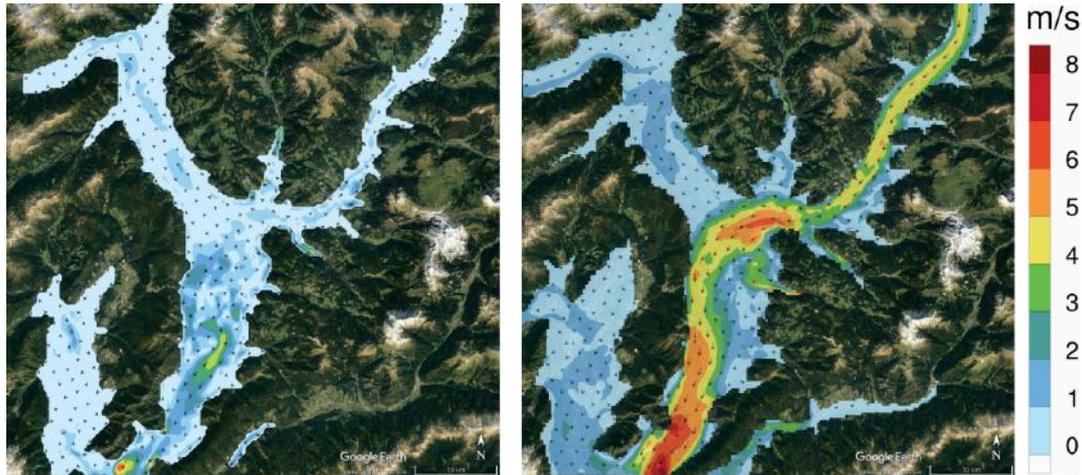


Figura 1.20: Campo di vento simulato dal modello prognostico WRF per l'evento di *valley-exit jet* osservato nella notte tra il 28 e il 29 gennaio 2017 (mappa di sfondo da Google Earth). Entrambe le immagini si riferiscono al medesimo istante temporale, ma restituiscono il campo di vento a due diverse quote: a 10 m dal suolo (sinistra) e a 750 m s.l.m. (925 hPa), circa 450 m dal suolo (destra).

di galleggiamento che lo fa spirare al di sopra dell'inversione termica. In presenza di forzanti sinottiche, e soprattutto durante intensi eventi di Föhn, si osserva lo sviluppo di una forma particolare di *valley-exit jet*, che nella letteratura scientifica è definita *dynamically-driven*, ossia determinata da forzanti sinottiche e non più dal gradiente di temperatura all'interno della valle (*thermally-driven*). In questi casi è il vento sinottico che dopo essersi incanalato nella Val d'Isarco, incontra le forzanti topografiche in corrispondenza dello sbocco nella Conca di Bolzano e quindi accelera, aumentando di intensità. Le indagini condotte, sia attraverso l'analisi dei dati dai profilatori di vento (SODAR e Wind-LIDAR) sia attraverso le simulazioni numeriche, hanno permesso di osservare che il *valley-exit jet* della Val d'Isarco (sia *thermally-driven*, sia *dynamically-driven*) è un fenomeno ricorrente, soprattutto nei mesi invernali.

Come introdotto, l'interazione del pennacchio dei fumi del termovalorizzatore con questa corrente a getto, può modificare sensibilmente lo scenario di ricaduta al suolo degli inquinanti. Alla luce dei risultati ottenuti, si può concludere che il *valley-exit jet* della Val d'Isarco spira al di sopra del termovalorizzatore principalmente quando nella conca si sviluppano inversioni termiche al suolo, o in presenza di eventi di Föhn. Inoltre, l'analisi dei dati SODAR ha permesso di evidenziare come questa corrente spiri mediamente ad una quota superiore a 450 m s.l.m. Pertanto ci si attende che l'interazione dei fumi con il *valley-exit jet* avvenga qualora il pennacchio dell'impianto raggiunga tale quota.

CAPITOLO 2

Modelli numerici utilizzati

La determinazione (i) delle aree di ricaduta del tracciante utilizzato durante le campagne sperimentali e (ii) delle mappe medie annue di concentrazioni al suolo degli inquinanti rilasciati dal termovalorizzatore sono state effettuate mediante la simulazione numerica dei campi meteorologici e della dispersione degli inquinanti. A tal fine, si è allestita una catena modellistica per la simulazione numerica sia dei processi meteorologici sia di qualità dell'aria, costituita dalla seguente combinazione di modelli:

1. Il modello meteorologico prognostico WRF (*Weather Research and Forecasting*);
2. Il modello meteorologico diagnostico CALMET;
3. Il modello di qualità dell'aria CALPUFF.

Questi modelli sono attualmente considerati la *best available technology* in riferimento agli scopi dello studio tecnico. In particolare, si sottolinea che i modelli CALMET e CALPUFF sono tra i modelli consigliati nelle linee guida dalla *U.S. Environmental Protection Agency* (U.S. EPA) per la modellazione della qualità dell'aria anche in ambiente a terreno complesso. Nelle sezioni seguenti si riporta una descrizione essenziale dei tre modelli numerici utilizzati e una breve sintesi delle loro diverse modalità di applicazione, implementate nelle varie fasi di svolgimento del progetto.

2.1 Modello meteorologico prognostico: Weather Research and Forecasting (WRF)

I modelli prognostici sono modelli numerici in grado di simulare l'evoluzione spaziale e temporale del campo meteorologico. La simulazione è condotta risolvendo nume-

ricamente le equazioni matematiche differenziali che governano la fisica dei processi atmosferici a partire da opportune condizioni iniziali e al contorno. In particolare, le principali equazioni risolte sono:

1. le equazioni di conservazione della quantità di moto, che modellano le tre componenti del vento medio (componenti planari e verticale del vento);
2. l'equazione di conservazione della massa;
3. l'equazione di conservazione dell'energia;
4. le equazioni della termodinamica che modellano il comportamento dei gas (pressione, densità) ed in particolare del contenuto d'acqua.

La modellazione del campo meteorologico mediante un modello prognostico è computazionalmente onerosa. Infatti, la non linearità delle equazioni matematiche coinvolte richiede l'utilizzo di sofisticate tecniche numeriche iterative per la convergenza delle soluzioni. Inoltre, l'onerosità computazionale dipende anche da altri fattori, quali:

- la dimensione del dominio di calcolo, ossia quanto è vasta l'area di cui si vuole simulare il campo meteorologico;
- la risoluzione spaziale del dominio di calcolo: esso risulta infatti suddiviso in celle caratterizzate da una dimensione di griglia orizzontale e da una altezza verticale. Il modello simula il campo meteorologico in corrispondenza del baricentro di ciascuna cella o sui lati della stessa, a seconda della variabile considerata. Ne segue quindi che il modello restituisce campi meteorologici tanto meglio risolti quanto più piccola è la dimensione delle celle.

Compito del modellista è quello di definire, in funzione delle necessità, la configurazione ottimale del modello, che spesso risulta essere un compromesso tra un elevato dettaglio della simulazione e il tempo di calcolo necessario per ottenerla. Nell'ambito del presente studio tecnico si è utilizzato il modello prognostico WRF "Weather Research and Forecasting" (Skamarock et al., 2005) sviluppato presso il National Center for Atmospheric Research (NCAR, Boulder, Colorado, USA). Il modello WRF è attualmente utilizzato sia nella comune pratica operativa, sia per scopi di ricerca (e.g. Giovannini et al., 2014a,b). Si tratta di un codice open-source, costantemente aggiornato e al cui sviluppo può contribuire l'intera comunità scientifica (e.g. Tomasi et al., 2017). Come verrà descritto nel seguito, le simulazioni sono state condotte utilizzando la tecnica dei domini annidati. A partire dagli output di modelli a scala globale (GFS o ECMWF) il campo meteorologico è stato risolto su domini annidati di dimensione via via più piccola, ma con crescente risoluzione spaziale.

2.2 Modello meteorologico diagnostico: CALMET

CALMET è il modello meteorologico diagnostico (Scire et al., 2000) utilizzato nella catena modellistica allestita per il presente studio. I modelli diagnostici ricostruiscono i campi meteorologici per una determinata area a partire da osservazioni raccolte sul territorio. Il loro ruolo è quello di spazializzare le variabili meteorologiche misurate ad ogni istante di interesse, sul dominio di calcolo. Tale spazializzazione viene effettuata sulla base di un numero ridotto di equazioni (di fatto la sola conservazione della massa) e risulta tanto più accurata quanto più ricco è l'insieme di osservazioni sperimentali utilizzato (tipicamente misure al suolo e almeno un profilo verticale). Le semplificazioni adottate da questi modelli si riflettono soprattutto su due fattori: (i) i tempi di calcolo necessari risultano significativamente ridotti rispetto all'applicazione di un modello prognostico completo, (ii) la qualità dei risultati risulta tipicamente meno affidabile, specialmente in applicazioni su terreno complesso. Al contrario dei modelli prognostici, i modelli diagnostici non sono in grado di prevedere l'evoluzione dei campi meteorologici ad istanti temporali successivi alle ultime misure disponibili, ma si limitano, in queste circostanze, a ricostruire i campi sotto l'ipotesi di persistenza delle ultime condizioni misurate.

CALMET, a partire da misure meteorologiche, dai dati di orografia ed utilizzo del suolo ricostruisce il campo tridimensionale del vento e della temperatura e di altre grandezze meteorologiche utili per la simulazione della dispersione degli inquinanti, tra cui la velocità d'attrito, l'altezza di rimescolamento e la lunghezza di Monin-Obukhov.

Nell'ambito del presente studio, CALMET è stato utilizzato in diverse modalità all'interno delle varie catene modellistiche implementate. Questo modello, infatti, può essere utilizzato come un vero e proprio modello diagnostico, se le uniche informazioni meteorologiche disponibili sono misure. Alternativamente, esso può essere alimentato dai risultati ottenuti con un modello prognostico, al fine di infittirli su una griglia a più alta risoluzione (che richiederebbe un investimento computazionale troppo elevato per essere risolto dal modello prognostico): così facendo, CALMET interviene sui campi meteorologici solamente come interpolatore di dati su una diversa griglia.

2.3 Modello di dispersione: CALPUFF

CALPUFF (Scire et al., 2000b) è un modello di dispersione semi-Lagrangiano a puff, multi-specie e multi-strato che simula gli effetti di condizioni meteorologiche

variabili nel tempo e nello spazio sul trasporto, la trasformazione e la rimozione di inquinanti in atmosfera.

In particolare, CALPUFF simula il trasporto degli inquinanti muovendo il baricentro di ciascun puff rilasciato dalla sorgente emissiva in modo lagrangiano mentre simula la diffusione in modo gaussiano. Il risultato di tale approccio composito è che il modello schematizza l'emissione come un insieme di "nuvole" (puff), spostando ciascuna di esse all'interno del dominio per effetto del moto medio e deformandole sulla base di una funzione gaussiana (soluzione analitica dell'equazione di diffusione in atmosfera). La funzione gaussiana è parametrizzata sulla base delle varianze del vento modellate in ciascuna cella.

Il modello CALPUFF può essere utilizzato su scale spaziali che vanno dalle decine alle centinaia di chilometri. Esso include algoritmi che consentono di tenere conto di effetti di sotto griglia, come ad esempio quelli generati dalla presenza di terreno complesso, rendendolo il modello raccomandato dall'EPA per applicazioni su topografia complessa.

Per il presente studio, il modello CALPUFF è stato applicato per l'emissione della singola specie di tracciante dal camino del termovalorizzatore nelle fasi di conduzione dell'esperimento di rilascio e di calibrazione dei modelli sulla base delle misure di tracciante raccolte. Quindi, in fase di applicazione del modello calibrato, per le simulazioni annuali e di ipotetici eventi accidentali, il modello CALPUFF è stato utilizzato per riprodurre la dispersione di tutti gli inquinanti rilasciati a camino dal termovalorizzatore.

CAPITOLO 3

Campagne di misura con rilascio di tracciante

I processi meteorologici che caratterizzano gli ambienti montani sono di difficile modellazione a causa degli effetti della topografia complessa sui campi meteorologici: sviluppo di circolazioni locali, non facilmente individuabili, formazione di profili termici caratteristici che influenzano fortemente la stabilità atmosferica. Da ciò segue che, in questi ambienti, la possibilità di modellare realisticamente la dispersione e la deposizione al suolo degli inquinanti dipende dalla capacità dei modelli utilizzati di cogliere e simulare correttamente i processi atmosferici.

Al fine di verificare e possibilmente migliorare la capacità predittiva della catena modellistica implementata per il presente studio, si sono ideate e condotte campagne sperimentali con rilascio di tracciante. Il vantaggio di un tale lavoro consiste nel disporre di un dataset sperimentale che permetta di confrontare gli scenari simulati con le concentrazioni di tracciante misurate al suolo e procedere quindi ad una calibrazione dei modelli sul contesto analizzato, al fine di ottenere una catena modellistica tarata per la conca di Bolzano, da utilizzare per le simulazioni di lungo periodo.

Nel presente capitolo vengono presentate le campagne sperimentali di rilascio di tracciante a camino del termovalorizzatore e di raccolta di dati di concentrazioni al suolo svolte per il presente studio. In Sezione 3.1 si riporta una descrizione generale della procedura seguita per le campagne svolte, mentre nelle Sezioni a seguire (3.2 e 3.3) si descrivono nel dettaglio le campagne svolte, con particolare attenzione alla catena modellistica implementata, alle condizioni meteorologiche verificatesi, e agli esiti dei campionamenti raccolti.

3.1 Descrizione generale

Le campagne di misura sono state condotte rilasciando, attraverso il camino di collettamento dei fumi del termovalorizzatore, un gas tracciante passivo (esafluoruro

di zolfo, SF₆), selezionato come tracciante. Contestualmente, la catena modellistica ha simulato le aree di ricaduta al suolo del tracciante e in corrispondenza delle aree con massima ricaduta, sono stati raccolti campioni di aria da parte di squadre al terra. Conclusa la campagna di misura, i campioni raccolti sono stati analizzati presso i laboratori di Eco-Research per determinare le concentrazioni di tracciante contenute.

I rilasci di tracciante sono stati condotti in corrispondenza di giornate selezionate sulla base delle analisi climatologiche descritte al Capitolo 1, che risultassero quindi rappresentative dell'area d'indagine, sia per i processi meteorologici, sia per quelli di dispersione. Durante lo studio si sono effettuati complessivamente quattro rilasci di tracciante: il 22 gennaio 2016 (pomeriggio), il 27 gennaio 2016 (mattina) e il 14 febbraio 2017 (mattina e pomeriggio). Nel seguito di questo capitolo si dettagliano le attività svolte in corrispondenza di ciascuna prova.

3.1.1 Selezione del gas tracciante

Una delle azioni preliminari in preparazione agli esperimenti è stata la selezione del tracciante da utilizzare durante le campagne di misura. Poiché l'oggetto dello studio è la valutazione dell'impatto delle emissioni del termovalorizzatore, come prima ipotesi di lavoro si è pensato di individuare come tracciante una sostanza già presente nei fumi emessi dall'impianto. Tale sostanza doveva però essere immessa in atmosfera esclusivamente dal termovalorizzatore e facilmente rilevabile nei campioni raccolti durante le misure di campo. La prima condizione garantiva l'univocità della sorgente, ossia che le concentrazioni di sostanza rilevate non provengano da sorgenti diverse dal termovalorizzatore. La seconda condizione imponeva invece un vincolo sull'effettiva possibilità di ottenere misure rappresentative di concentrazione.

Dopo aver appurato che nessuna delle sostanze presenti nei fumi dell'impianto soddisfa le due precedenti condizioni, in quanto o non è garantita l'univocità della sorgente (ad esempio gli ossidi di azoto sono prodotti anche dal traffico veicolare che scorre lungo il tratto di autostrada a fianco dell'impianto) o le concentrazioni presenti nei fumi sono troppo basse per essere rilevate in campo su durate brevi come quelle delle campagne dello studio (durata di qualche ora), si è proceduto alla valutazione di altre opzioni. Si è quindi concordato di selezionare, sulla base della letteratura scientifica disponibile, un tracciante passivo ed atossico da immettere ad hoc nei fumi del termovalorizzatore durante gli esperimenti.

L'indagine ha permesso di individuare come tracciante l'esaffluoruro di zolfo (SF₆, MM = 146 g mol⁻¹) che in aria ambiente si presenta allo stato gassoso. Questo gas è già stato utilizzato in passato per lo studio dei processi di dispersione atmosferica in diversi contesti (Draxler et al., 2001; Hall et al., 2011; Martin et al., 2011; An et al.,

2013): a scala continentale (Addis et al., 1998; Min et al., 2002; Lopez et al., 2015); in ambienti montuosi con terreno complesso (Whiteman, 1989; Kalthoff et al., 2000; Darby et al., 2006) e in ambiente urbano, sia alla scala di città (Camuffo et al., 1979; Gryning & Lyck, 1980; Allwine & Flaherty, 2006; Doran et al., 2007) che alla scala di quartiere (Britter et al., 2002; Gromke et al., 2008; Wood et al., 2009). Inoltre è stato utilizzato come tracciante anche per lo studio della dispersione degli inquinanti immessi in atmosfera da camini di impianti industriali (Emberlin, 1981; Zannetti et al., 1986).

L'esafluoruro di zolfo si presta come un tracciante adeguato per il caso allo studio in quanto, oltre ad essere incolore ed inodore:

- è atossico per la salute umana come confermato dal suo utilizzo in ambienti urbani e dalla attestazione rilasciata dall'Istituto "Mario Negri";
- è presente in traccia nell'aria ambiente, con una concentrazione media che a scala globale si attesta attorno ai 10 ppt_v (Manca, 2017). Non si tratta di un gas naturalmente presente in atmosfera, la sua presenza nell'aria ambiente è dovuta principalmente ad attività antropiche. Tipicamente è utilizzato come isolante elettrico in centrali e in cabine blindate, ma ha anche applicazione in ambiente medico. Queste caratteristiche fanno sì che anche basse concentrazioni di esafluoruro di zolfo possano essere ricondotte univocamente a rilasci controllati effettuati ad hoc per il presente studio;
- non è presente nei fumi del termovalorizzatore e non subisce effetti di degradazione o di combustione alle temperature di esercizio dei fumi del termovalorizzatore pari a 140°C (Proctor et al., 1987). Il gas è stato acquistato da EcoCenter s.p.a. tramite il rifornitore SAPIO s.r.l., che ha provveduto a fornire la strumentazione necessaria per effettuare in sicurezza i rilasci.

3.1.2 Modalità di rilascio del gas tracciante

Le operazioni di rilascio del gas tracciante sono state organizzate e coordinate dal personale di Eco-Research e di EcoCenter sotto la supervisione dal direttore di Eco-Research, Dott. Werner Tirler. Il tracciante viene rilasciato, per la durata programmata, regolando le valvole che controllano i serbatoi in cui è il gas è stoccato. Il dosaggio del gas è effettuato in modo da garantire una concentrazione al camino costante. L'immissione avviene per mezzo di una flangia inserita alla base del camino e a monte del ventilatore, al fine di garantire la miscelazione del tracciante con i fumi prodotti dall'impianto (Figura 3.1). Contemporaneamente, poco prima dello sbocco del camino, sono stati posizionati in sala SME due spettrometri di

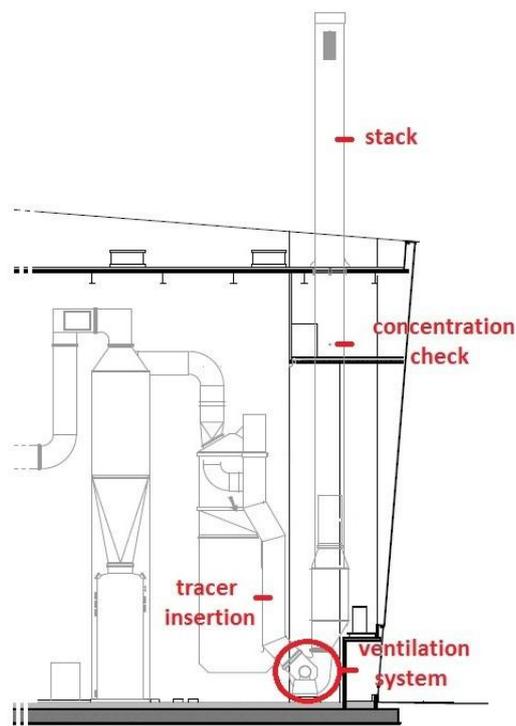


Figura 3.1: Modalità di rilascio del tracciante. Sezione verticale dell'impianto di termovalorizzazione con evidenziati i punti di inserimento del tracciante, del sistema di ventilazione e di misura della concentrazione di tracciante nei fumi.

massa che consentono la misura in tempo reale della concentrazione del tracciante. In questo modo oltre a conoscere la concentrazione effettivamente rilasciata è anche possibile verificare che questa sia costante durante il rilascio. La determinazione della massa complessivamente rilasciata è inoltre ricalcolata ex post: le bombole contenenti il gas tracciante sono pesate immediatamente prima dell'inizio di ciascun rilascio e immediatamente dopo il termine del rilascio.

3.1.3 Modalità di campionamento

Il campionamento a terra è stato effettuato utilizzando strumentazione specifica per il prelievo di campioni di qualità dell'aria. In particolare sono state utilizzate sia bottiglie a vuoto, sia sacchetti in Teflon (Figura 3.2).

Le bottiglie a vuoto sono la tecnica di campionamento considerata più affidabile. Si tratta di bottiglie in vetro dalla capacità di 1 litro in cui è creato il vuoto e chiuse in sommità da una valvola a tenuta. L'apertura della bottiglia avviene installando una valvola a baionetta dotata di un ugello tarato: una volta rimossa, al termine del campionamento, richiude la bottiglia. Il riempimento avviene per aspirazione dell'aria ambiente nella bottiglia attraverso l'ugello che garantisce un flusso costante fino ad un riempimento della bottiglia dell'80% circa. Il tempo di



Figura 3.2: Bottiglia a tenuta con valvola a baionetta (sinistra) e sacchetto di Teflon con pompetta (destra). Le fotografie sono state scattate durante le prove con tracciate rispettivamente del 14 febbraio 2017 e del 27 gennaio 2016.

riempimento dipende dalla tipologia di ugello utilizzato. Per il presente studio sono stati utilizzate due tipologie di ugelli che consentono il riempimento delle bottiglie in 20 minuti e in 60 minuti. La tenuta delle bottiglie permette il mantenimento delle caratteristiche dei campioni fino a circa 30 giorni dopo la raccolta.

I sacchetti di Teflon sono riempiti utilizzando opportune pompette, per le quali è possibile selezionare la velocità di aspirazione dell'aria ambiente (tipicamente dai 5 ai 60 minuti per il riempimento del sacchetto). La chiusura dei sacchetti non è a tenuta, pertanto i campioni raccolti tendono a deteriorarsi velocemente. In questo caso è necessario procedere all'analisi dei campioni entro un paio d'ore dopo la loro raccolta. Queste motivazioni hanno portato a considerare i sacchetti come metodo di supporto alla precedente modalità di campionamento. La dislocazione dei punti di monitoraggio è stata valutata sulla base delle previsioni meteorologiche e della dispersione mediante la catena modellistica. L'effettuazione dei prelievi è stata affidata a squadre operatori. Durante i campionamenti, ciascuna squadra è stata dotata di un modulo da compilare, contenente tutti i dati necessari per identificare il campionamento. In particolare, nei moduli sono presenti: l'identificativo della squadra che ha effettuato la misura, la posizione in cui è stato effettuato il campionamento, l'identificativo del campione (riportato sul campione stesso), le tempistiche del campionamento (ora di inizio e ora di fine) ed eventuali note.

3.1.4 Analisi di laboratorio per la determinazione delle concentrazioni di tracciante

La misura delle concentrazioni del gas tracciante è stata eseguita dai laboratori di Eco-Research, coadiuvato dal supporto tecnico di personale dell'Istituto "Mario Negri". La tecnica di laboratorio adottata per la quantificazione del gas tracciante è la ionizzazione chimica negativa con spettroscopia ad alta risoluzione. La soglia di rilevabilità raggiunta è pari a 1 ppb_v per le campagne del 2016 e 30 ppt_v per la campagna del 2017.

3.1.5 Catene modellistiche a supporto delle campagne di misura

Si è implementata una catena modellistica a supporto delle campagne di misura, che è stata progettata per operare sia in modalità previsionale (*forecasting*), sia in modalità *real-time* (*nowcasting*), assimilando anche i dati da misure meteorologiche raccolte dalle stazioni disponibili all'interno del dominio, ed i parametri relativi alle emissioni del termovalorizzatore (in particolare portata e temperatura dei fumi).

Come prima azione si è proceduto alla creazione del database, necessario per poter assimilare i dati meteorologici, misurati nella conca di Bolzano, ed i dati delle emissioni del termovalorizzatore (temperatura e portata dei fumi, nel seguito dati SME). Il database riceve automaticamente tutti i dati meteorologici ed i dati SME, li sincronizza ed effettua le operazioni necessarie al fine di ottenere un input robusto per la catena modellistica.

La catena modellistica *forecasting* (Figura 3.3) ha visto l'utilizzo dei modelli meteorologici WRF (prognostico) e CALMET (diagnostico) e del modello CALPUFF per la simulazione degli scenari di dispersione e di ricaduta al suolo del tracciante. A partire dagli output del modello a scala globale americano NCEP-GFS (*Global Forecasting System*, sviluppato dal *National Centers for Environmental Prediction*, NCEP), il modello prognostico WRF simula per le 24 ore successive il campo meteorologico atteso nella conca di Bolzano. Il campo meteorologico, nel dominio più interno (20x20 km), è riprodotto con una risoluzione orizzontale di 2 km. Successivamente il campo meteorologico simulato da WRF viene fornito in ingresso al modello CALMET, che ne aumenta la risoluzione orizzontale a 200 m e verticale su 11 livelli (20, 40, 65, 100, 130, 200, 400, 600, 1000, 1800, 3000 m). Il modello di dispersione CALPUFF utilizza l'output di CALMET per simulare il trasporto e la dispersione del tracciante rilasciato dal camino del termovalorizzatore. Infine, il post-processing delle simulazioni di dispersione permette di ottenere le mappe di concentrazione al suolo del tracciante. Le informazioni restituite dalla catena

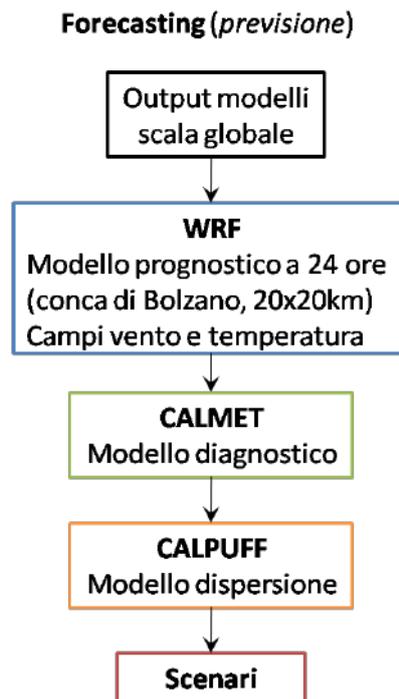


Figura 3.3: Schema a blocchi della catena modellistica in modalità *forecasting*, implementata a supporto delle campagne di misura con rilascio di tracciante, utilizzata per allertare le squadre di campionamento e per individuare la posizione sul territorio delle aree di massima ricaduta, in cui raccogliere i campioni.

modellistica in modalità *forecasting* sono utilizzate per allertare le squadre di campionamento. In particolare, con un preavviso di 48 ore si informano le squadre sul giorno e l'ora del rilascio, mentre a 24 ore dalla prova si fornisce alle squadre la posizione preliminare in cui effettuare i campionamenti. Gli output sono calcolati per diverse ipotesi di rilascio in vari orari del giorno. In particolare, nelle simulazioni in modalità *forecasting* si simulano rilasci costanti per un'ora in tre momenti della giornata (alle 8, alle 13, alle 18).

La modalità di previsione a breve termine (*nowcasting*) è invece utilizzata per coordinare le attività delle squadre di campionamento durante l'esecuzione delle prove. In questa modalità, la catena modellistica simula le aree di ricaduta al suolo del tracciante in tempo reale, fornendo informazioni immediate sull'evoluzione della dispersione del tracciante per le ore successive al rilascio. La struttura della catena modellistica di *nowcasting* è profondamente diversa per le campagne del 2016 e del 2017 e viene quindi demandata alle rispettive sezioni (3.2.1 e 3.3.1) la descrizione di dettaglio di ciascuna catena. Le mappe di concentrazione ottenute sono utilizzate per identificare le aree con la massima ricaduta di tracciante e quindi per confermare o modificare la posizione delle squadre di campionamento e per informarle sulle tempistiche con cui effettuare i campionamenti.

I risultati delle simulazioni (*forecasting* e *nowcasting*) sono stati resi disponibili ai partner del progetto attraverso un sito internet dedicato, dove sono stati archiviati giorno per giorno. Tutti i risultati sono forniti in vari formati sia numerici sia geografici. In quest'ultimo caso i dati sono stati rappresentati come mappe di isoconcentrazione, con scala non lineare e gli output resi disponibili nei seguenti formati:

- KML: formato da visualizzare in Google Earth / Google Maps.
- GeoTIFF: formato immagine che incorpora i riferimenti geografici.
- NETCDF: formato standard autodescrittivo internazionalmente utilizzato per i dati meteorologici.

Al fine di agevolare la lettura e la comprensione delle simulazioni riportate sul sito, è stata redatta e condivisa una breve guida all'utilizzo.

3.1.6 Modalità di esecuzione delle campagne di misura

L'esecuzione delle campagne di misura è stata coordinata come segue:

1. Allerta delle squadre di campionamento. Le squadre di campionamento sono allertate con un preavviso settimanale in cui si comunicano i giorni in cui è possibile effettuare il rilascio. Con un preavviso di 48 ore si comunicano invece il giorno e l'ora in cui verrà effettuato il rilascio. Infine con un'allerta di 24 ore si informano le squadre circa la collocazione preliminare sul territorio dei punti in cui effettuare i campionamenti.

In particolare, le informazioni comunicate nella seconda e la terza allerta sono ottenute dall'analisi degli scenari (meteorologici e di dispersione) simulati dalla catena modellistica in modalità *forecasting*.

2. Immediatamente prima del rilascio, sulla base degli ultimi scenari simulati dalla catena modellistica in modalità *forecasting*, si comunica alle squadre di campionamento la conferma o la modifica della posizione dei punti di misura. La catena modellistica viene utilizzata in modalità *nowcasting*, ossia con scenari aggiornati alle condizioni meteorologiche correnti, per definire l'orario di inizio dei campionamenti e la strategia di campionamento.

3. Inizio ed esecuzione della prova. L'unità di immissione del gas tracciante, coordinata da Eco-Research, avvia la procedura di rilascio. L'unità modellistica comunica alle squadre di campionamento eventuali modifiche sulla collocazione delle squadre o sulle tempistiche del campionamento. Le squadre

avviano il campionamento e compilano dei moduli prestampati contenenti i dati necessari in fase di elaborazione dei campioni raccolti.

4. Al termine delle misure i campioni sono trasportati al laboratorio di Eco-Research per le analisi.

Vista la complessità delle operazioni, soprattutto legate al coordinamento delle diverse unità, il pomeriggio del 20 gennaio 2016 si è effettuata una prova generale, allo scopo di far emergere eventuali criticità che non fossero state considerate in precedenza. Durante questa prova non è stato rilasciato il gas tracciante, ma ci si è basati sulle simulazioni della catena modellistica in modalità *forecasting* per i giorni precedenti e *nowcasting* durante le prove. La prova ha avuto un riscontro positivo, e si è così proceduto ad organizzare le successive prove di rilascio.

3.2 Campagna 2016

Il 22 e il 27 gennaio 2016 sono state condotte le campagne di misura con rilascio di tracciante. Le due giornate sono state individuate per effettuare due rilasci che si differenziassero in termini di area di ricaduta del tracciante. Il 22 gennaio è stato scelto per un rilascio pomeridiano con vento da sud che quindi interessasse la zona a nord dell'impianto di termovalorizzazione. Il 27 gennaio è stato scelto per un rilascio di prima mattina, in condizioni di inversione termica, con vento da nord che interessasse quindi la zona a sud dell'impianto.

3.2.1 Catena modellistica nowcasting

La catena modellistica utilizzata in modalità *nowcasting* durante le campagne di misura del 2016, e schematizzata in Figura 3.4, è stata implementata utilizzando i modelli CALMET (per la simulazione del campo meteorologico) e CALPUFF (per la simulazione della dispersione). I campi meteorologico e di dispersione sono stati risolti con approccio diagnostico, a partire da osservazioni meteorologiche misurate, su un dominio quadrato di 20 km di lato, centrato sul termovalorizzatore, con una risoluzione orizzontale di 200 m e su 11 livelli verticali a 20, 40, 65, 100, 130, 200, 400, 600, 1000, 1800, 3000 m dal suolo.

Ogni 30 minuti, a partire dal rilascio, CALMET assimila i dati meteorologici misurati puntualmente nella conca di Bolzano e li spazializza sulla base di parametrizzazioni fisiche dei processi atmosferici in esso contenuti. In particolare, durante le campagne di misura del 2016, sono assimilati i seguenti dati:

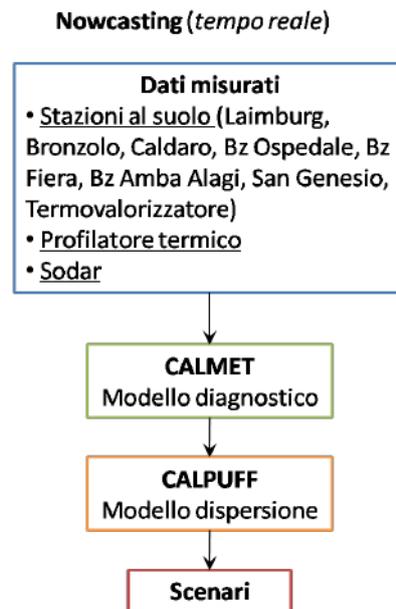


Figura 3.4: Schema a blocchi della catena modellistica di *nowcasting*, per le campagne di misura 2016. Utilizzata per confermare o modificare la posizione delle squadre di campionamento e per coordinare i campionamenti (orario di inizio e di fine prova per ciascuna squadra) in fase di rilascio.

- Dati al suolo di vento, temperatura, pressione atmosferica e di radiazione globale misurati dalle stazioni di Laimburg, Bronzolo, Caldaro, Bolzano Ospedale, Bolzano Fiera, Bolzano Via Amba Alagi, San Genesio e dalla stazione meteorologica installata sul tetto del termovalorizzatore.
- Profilo di temperatura dell'aria nei primi 1000 m di atmosfera al di sopra del suolo, misurati dal profilatore termico (MTP5-HE) installato presso l'aeroporto di Bolzano.
- Profilo del vento (velocità e direzione), misurato dal SODAR installato sul tetto del termovalorizzatore.

Il campo meteorologico, ricostruito da CALMET, è dato in input al modello di dispersione CALPUFF, che dopo aver assimilato i dati di portata e di temperatura dei fumi in uscita dal termovalorizzatore (dati SME), simula la dispersione del tracciante ipotizzando un rilascio stazionario al camino con concentrazione di tracciante pari a 500 ppb_v e durata di 40 minuti. Il post-processing delle simulazioni permette di valutare l'evoluzione temporale delle aree di ricaduta al suolo del tracciante.

3.2.2 Condizioni meteorologiche durante i rilasci

Rilascio del 22 gennaio 2016

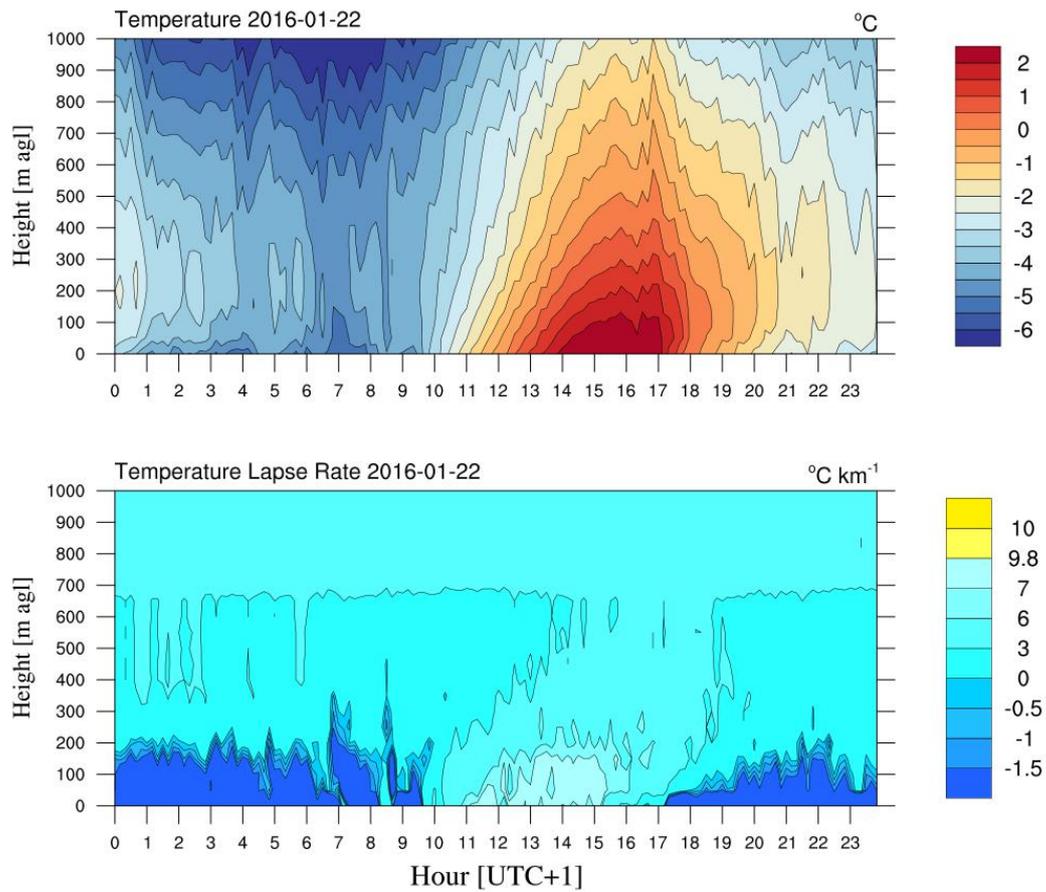


Figura 3.5: Diagrammi tempo-quota della temperatura e del gradiente termico misurati dal profilatore il 22 gennaio 2016. Nel pannello inferiore, relativo al gradiente termico, i colori blu, ciano e giallo identificano rispettivamente inversione termica, condizioni stabili e condizioni instabili.

Le principali caratteristiche meteorologiche della giornata del 22 gennaio 2016 vengono di seguito analizzate sulla base delle misure registrate dal profilatore termico, il SODAR, e le stazioni al suolo. In Figura 3.5 si riportano i profili verticali di temperatura e gradiente termico misurati dal profilatore termico. Le osservazioni mostrano chiaramente la presenza di una inversione termica al suolo che persiste nelle ore più fredde della giornata e si estende fino a 200 m di quota: essa viene rotta fra le ore 10:00 e le 17:00. Il rilascio di tracciante, effettuato fra le 13:00 e le 13:40 è quindi stato effettuato in condizioni di atmosfera debolmente stabile.

In Figura 3.6 si riportano invece le osservazioni registrate dal SODAR, posizionato sul tetto dell'inceneritore, in termini di velocità e direzione del vento. Data la rumorosità dello strumento in azione, tali misure sono state condotte solamente dalle 5:00 alle 19:00 del 22 gennaio, per evitare problemi di disturbo alla quiete pubblica. Le osservazioni mostrano la presenza di una corrente proveniente da nord, dalle 5:00 fino alle 10:00 del mattino, e si estende fino a 300 m di quota. Al contrario,

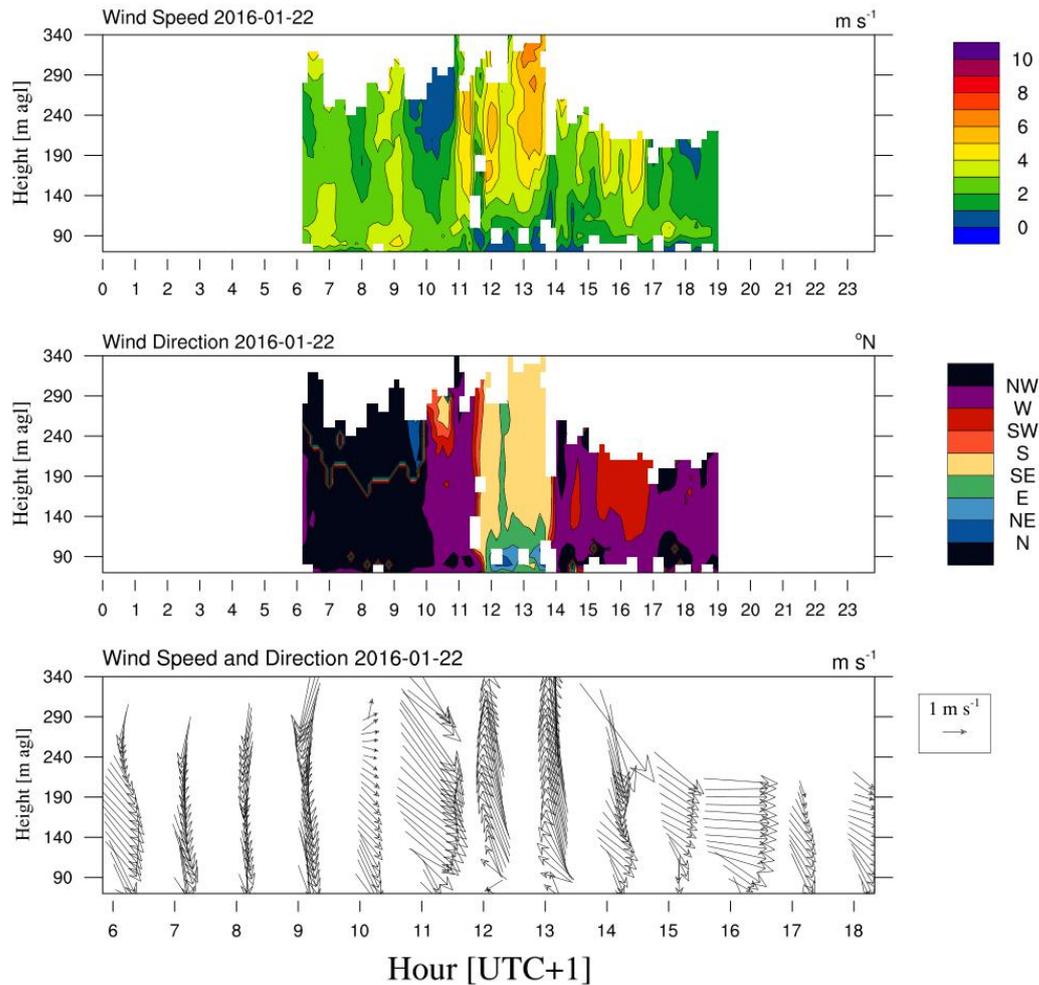


Figura 3.6: Diagrammi tempo-quota della velocità (pannello superiore) e della direzione (pannello centrale) del vento misurate dal SODAR sul tetto dell'impianto di termovalorizzazione. Il pannello superiore mostra l'evoluzione del profilo verticale del vento durante le ore centrali della giornata del 22 gennaio 2016, dalle 6:00 fino alle 17:00.

nelle ore centrali della giornata, lo strumento individua un forte vento che spirava da sud sopra l'impianto di termovalorizzazione. Tra le 12:00 e le 13:00, il SODAR registra intensità del vento molto elevate, specialmente negli strati alti, ma tali misure non sono da ritenersi valide in quanto la misura è condizionata dall'elevata temperatura (140°C) del pennacchio, che sorvola la strumentazione, compromettendone la qualità delle misure. Nonostante questo, le informazioni relative alla direzione del vento rimangono valide, in quanto esse non vengono influenzate dalla temperatura dell'aria. A partire dalle ore 14:00 il regime di vento cambia nuovamente, repentinamente, con l'instaurarsi di un vento spirante da nord-ovest. Le stazioni meteorologiche al suolo collocate nel fondovalle (Figura 3.7) mostrano velocità del vento a 10 m dal suolo molto basse e con direzioni variabili. Nelle ore centrali della giornata si può notare come le stazioni di fondovalle più vicine alla conca (WS3,

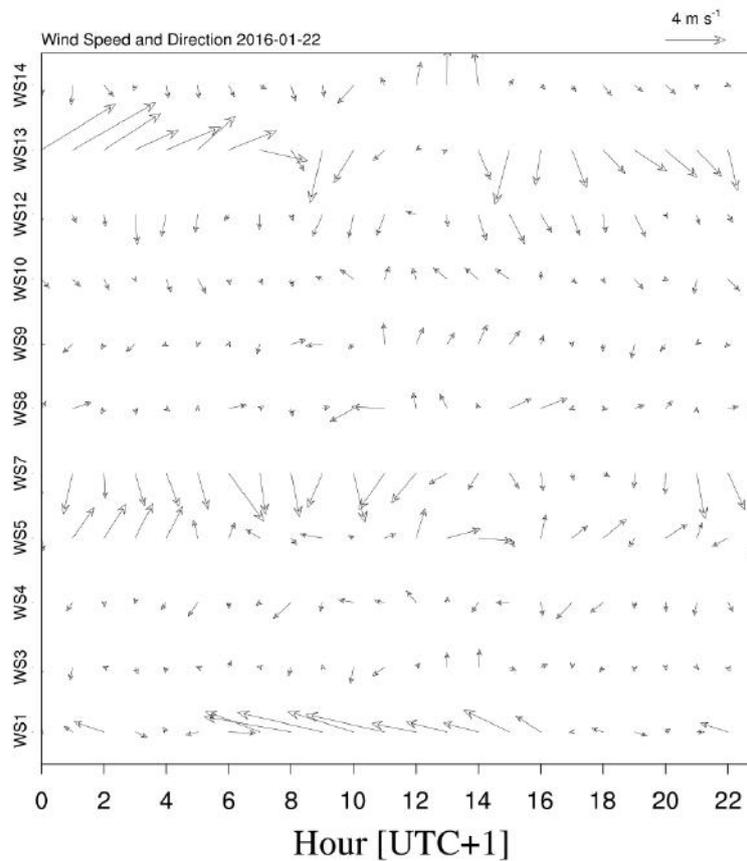


Figura 3.7: Velocità e direzioni del vento a 10 m dal suolo misurate dalle varie stazioni meteorologiche al suolo il 22 gennaio 2016.

WS4, WS8 e WS10) abbiano registrato l'instaurarsi di un debole vento da sud. Le stazioni sui versanti WS5, WS7 and WS13, misurano invece intensità del vento maggiori.

Rilascio del 27 gennaio 2016

Le principali caratteristiche meteorologiche della giornata del 27 gennaio 2016 vengono di seguito analizzate sulla base delle misure registrate dal profilatore termico, il SODAR, e le stazioni al suolo.

In Figura 3.8 si riportano i profili verticali di temperatura e gradiente termico misurati dal profilatore termico. Le osservazioni mostrano chiaramente la presenza di una intensa inversione termica al suolo che persiste per la maggior parte della giornata e si estende fino a 700 m di quota: essa viene rotta solamente fra le 11:00 e le 16:00, ma l'atmosfera rimane comunque stabile. In Figura 3.9 si riportano invece le osservazioni registrate dal SODAR, posizionato sul tetto dell'inceneritore, in termini di velocità e direzione del vento. Data la rumorosità dello strumento in

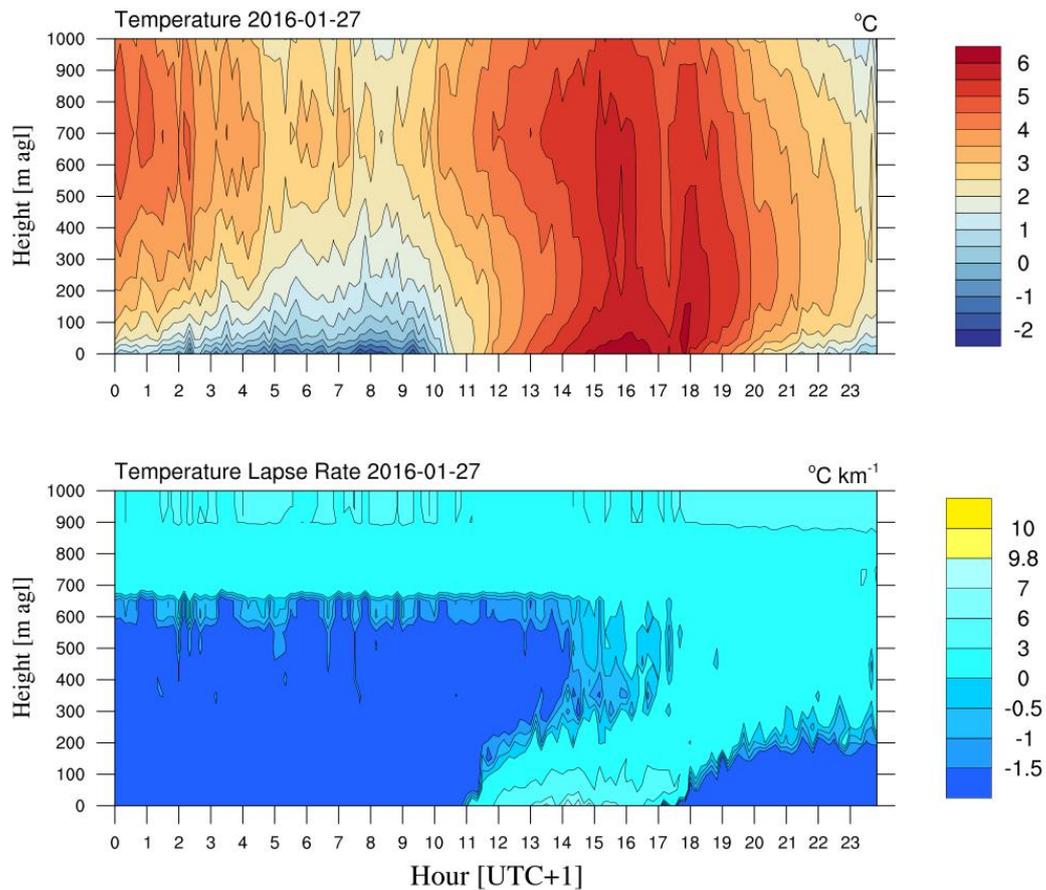


Figura 3.8: Diagrammi tempo-quota della temperatura e del gradiente termico misurati dal profilatore il 27 gennaio 2016. Nel pannello inferiore, relativo al gradiente termico, i colori blu, ciano e giallo identificano rispettivamente inversione termica, condizioni stabili e condizioni instabili.

azione, tali misure sono state condotte solamente dalle 5:00 alle 19:00 del 27 gennaio, per evitare problemi di disturbo alla quiete pubblica. Le osservazioni mostrano la presenza di una corrente di drenaggio che discende la Val d'Adige, dalle 5:00 alle 10:00 del mattino, e si estende fino a 200 m di quota. Al contrario, negli strati superiori di atmosfera, lo strumento individua un forte vento che spirava da nord sopra l'impianto di termovalorizzazione. Tali misure evidenziano la presenza di due regimi di vento disaccoppiati che spirano sopra il termovalorizzatore, con intensità e direzioni molto diverse: tale struttura del campo di moto rende molto complessa e delicata la modellazione della dispersione del tracciante dal camino. Supponendo infatti di riuscire a ricostruire in modo appropriato il campo di vento, anche una piccola variazione nel calcolo della quota effettiva del rilascio può comportare una grande differenza nella stima della direzione di dispersione del pennacchio.

Tutte le stazioni meteorologiche al suolo collocate nel fondovalle (Figura 3.10) mostrano velocità del vento a 10 m da suolo molto basse e con direzioni variabili:

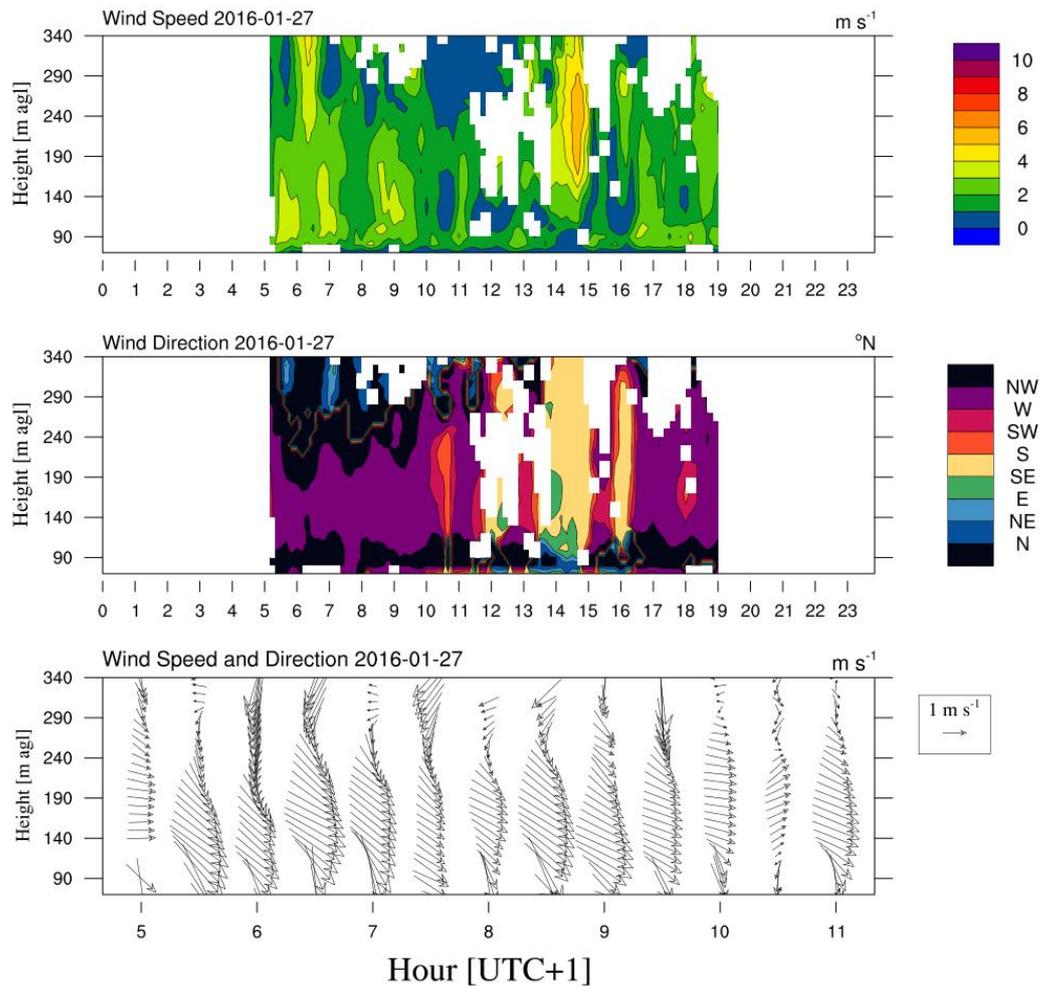


Figura 3.9: Diagrammi tempo-quota della velocità (pannello superiore) e della direzione (pannello centrale) del vento misurate dal SODAR sul tetto dell’impianto di termovalorizzazione. Il pannello superiore mostra l’evoluzione del profilo verticale del vento durante la mattinata del 27 gennaio 2016, dalle 5:00 fino alle 11:00.

tali condizioni, combinate con la presenza di inversione termica, rappresentano le tipiche situazioni critiche invernali per la stagnazione di inquinanti. Solamente le stazioni WS5, WS7 and WS13, collocate sui versati, misurano intensità del vento maggiori.

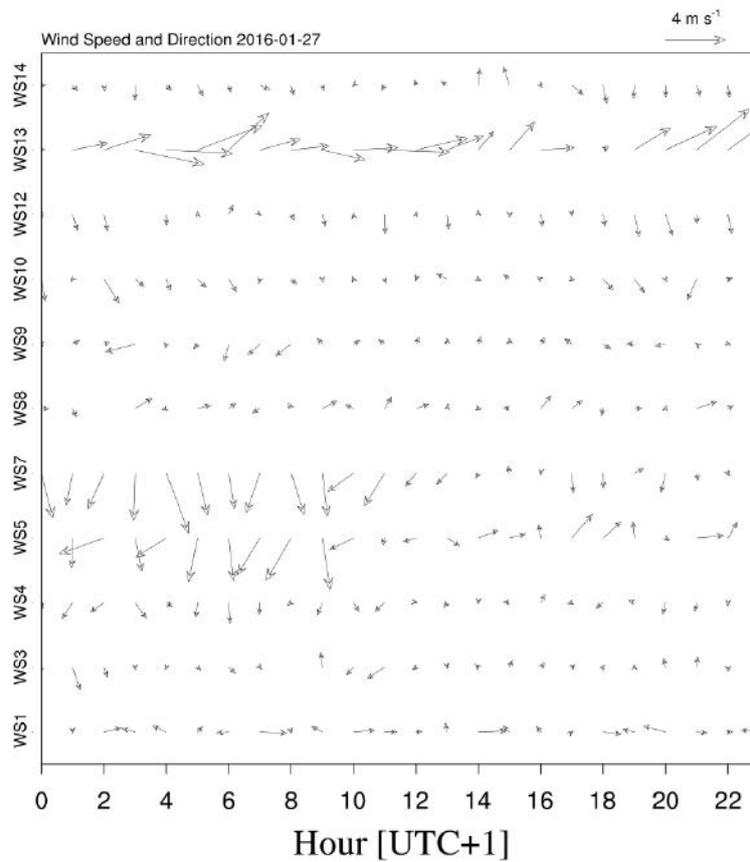


Figura 3.10: Velocità e direzioni del vento a 10 m dal suolo misurate dalle varie stazioni meteorologiche al suolo il 27 gennaio 2016. WS5, WS7 e WS13 sono stazioni collocate sui versanti, le rimanenti sono stazioni di fondovalle.

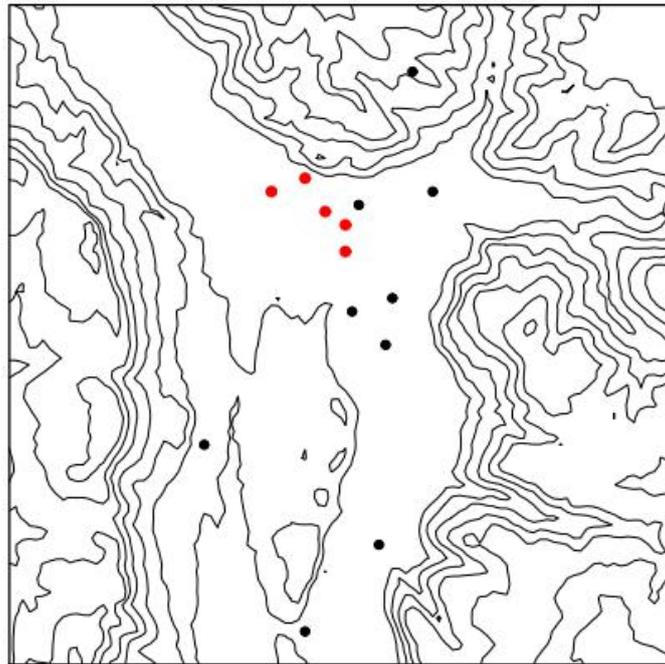


Figura 3.11: Dislocazione delle squadre di campionamento (punti rossi) durante la campagna di misura del 22 gennaio 2016.

3.2.3 Descrizione dei rilasci e risultati

Rilascio del 22 gennaio 2016

Il rilascio del 22 gennaio 2016 è avvenuto dalle 13:00 alle 13:40, in condizioni di debole stabilità atmosferica. Durante questa prova la concentrazione del gas tracciante al camino è stata di 350 ppm. In Tabella 3.1 vengono riassunte le principali caratteristiche del rilascio.

Durate l'esperimento del 22 gennaio 2016, il campionamento al suolo è avvenuto per mezzo di 5 squadre disposte sul territorio (APPA Ufficio Aria e Rumore, APPA Chimica-Fisica, EcoCenter, Eco-Research, Istituto "Mario Negri") e rappresentate nella mappa di Figura 3.11. In accordo con le misure meteorologiche raccolte prima del rilascio e gli scenari prodotti dalla catena modellistica diagnostica di *nowcasting*, le squadre sono state disposte nella zona a nord dell'impianto, in corrispondenza della zona di ricaduta attesa. Come mostrato in Figura 3.6, infatti, il pennacchio sarebbe dovuto essere trasportato verso nord dal vento di risalita misurato in corri-

Tabella 3.1: Caratteristiche del rilascio di gas tracciante effettuato durante la campagna di misura del 22 gennaio 2016.

Rilascio	Giorno	Ora [UTC+1]	Durata [min]	Massa Rilasciata [kg]	Punti di campionamento
2201	22/01/2016	13:00	40	170	5

Tabella 3.2: Numero di campioni raccolti durante la campagna del 22 gennaio 2016 in base alle loro caratteristiche.

Media Temporale	Strumento	Nr campioni
20 min	Bottiglie sottovuoto	20
TOT		20

spondenza dell'impianto. Ciascuna squadra ha raccolto sequenzialmente 4 campioni di aria mediante l'utilizzo delle bottiglie, per un totale di 20 campioni (Tabella 3.2). Ciascun campionamento ha avuto una durata di 20 minuti a partire dalle 13:20, per terminare alle 14:40. Un'ora dopo il rilascio si è osservato un debole vento di drenaggio dalla Val d'Adige da ovest.

Rilascio del 27 gennaio 2016

Il 27 gennaio 2016 è stato effettuato un rilascio di tracciante a partire dalle ore 7:00 fino alle 7:40, in condizioni di marcata stabilità atmosferica. Durante questa prova la concentrazione del gas tracciante al camino è stata di 450 ppm. In Tabella 3.3 vengono riassunte le principali caratteristiche del rilascio.

Durante l'esperimento del 27 gennaio 2016, il campionamento al suolo è avvenuto per mezzo di 6 squadre disposte sul territorio (APPA Ufficio Aria e Rumore, APPA Chimica-Fisica, EcoCenter, Eco-Research, Istituto "Mario Negri", UNITN) e rappresentate nella mappa di Figura 3.12. In accordo con le misure meteorologiche raccolte e gli scenari prodotti dalla catena modellistica di *nowcasting*, le squadre sono state disposte nella zona a sud dell'impianto, in corrispondenza della zona di ricaduta attesa. Ciascuna squadra ha raccolto sequenzialmente 4 campioni di aria mediante l'utilizzo delle bottiglie ed un campione di aria aggiuntivo mediante sacchetto in Teflon con pompetta ad aria, per un totale di 30 campioni (Tabella 3.4). Ciascun campionamento ha avuto una durata di 20 minuti a partire dalle 8:10. per terminare alle 9:50.

Le analisi di laboratorio condotte dai laboratori di Eco-Research e dell'Istituto Mario Negri, effettuate con una sensibilità della strumentazione di 1 ppb_v, non hanno

Tabella 3.3: Caratteristiche del rilascio di gas tracciante effettuato durante la campagna di misura del 27 gennaio 2016.

Rilascio	Giorno	Ora [UTC+1]	Durata [min]	Massa Rilasciata [kg]	Punti di campionamento
2701	27/01/2016	17:00	40	220	6

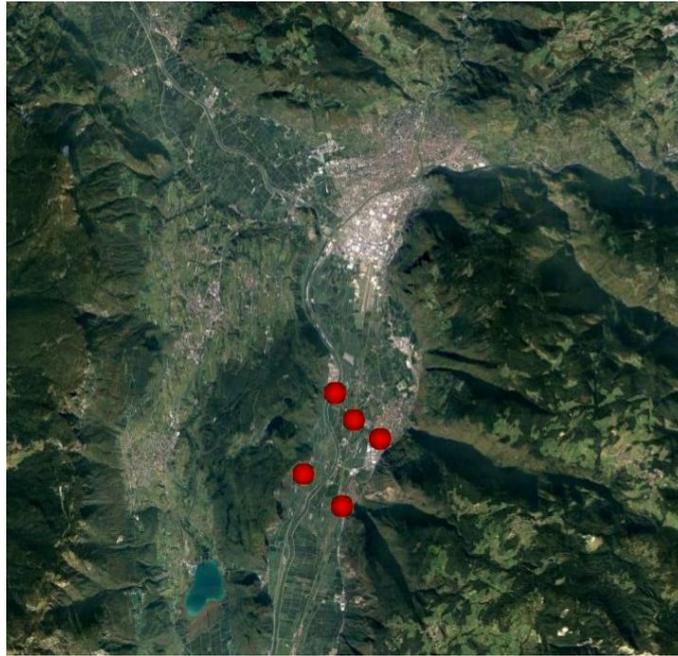


Figura 3.12: Dislocazione delle squadre di campionamento (punti rossi) durante la campagna di misura del 27 gennaio 2016 (mappa di sfondo da Google Earth).

Tabella 3.4: Numero di campioni raccolti durante la campagna del 27 gennaio 2016 in base alle loro caratteristiche.

Media Temporale	Strumento	Nr campioni
20 min	Bottiglie sottovuoto	25
20 min	Sacchetti in Teflon	5
TOT		30

rilevato concentrazioni apprezzabili di tracciante in nessuno dei campioni raccolti. Tale risultato è da ritenersi prodotto, da un lato, dall'elevatissima variabilità del campo di moto all'interno della conca e, dall'altro, dall'elevato grado di diluizione delle sostanze rilasciate a camino. Per questo motivo, gli strumenti modellistici e di analisi dei campioni raccolti utilizzati durante le campagne di misura del 2016 si sono dimostrati non sufficienti ad affrontare il problema analizzato in modo appropriato. Si è quindi messa in evidenza la necessità di rivedere la procedura di conduzione degli esperimenti, come descritto nella seguente sezione.

3.2.4 Revisione della conduzione degli esperimenti di rilascio

A conclusione delle prime campagne, le analisi di laboratorio delle concentrazioni di tracciante non hanno restituito alcun risultato apprezzabile per entrambe le prove, in quanto non sono stati osservati valori di concentrazione di tracciante nei campioni raccolti superiori ad 1 ppb_v. Tale risultato ha dimostrato come il proble-

ma affrontato richiedesse un approccio molto più dettagliato e complesso di quanto preventivato. Per questo motivo sono state riconsiderate:

1. le metodiche di analisi di laboratorio, al fine di raggiungere maggiore sensibilità nella lettura dei campioni, individuando quindi concentrazioni inferiori a 1 ppbv;
2. il design della catena modellistica, al fine di incrementare l'affidabilità della previsione meteorologica e delle zone di ricaduta al suolo del tracciante;
3. le strategie di campionamento, al fine di aumentare se possibile il numero di punti di prelievo e gli intervalli temporali di campionamento, aumentando la rappresentatività dei dati raccolti.

Grazie all'attiva collaborazione di tutti i partner, che hanno congiuntamente operato un rilevante sforzo sia dal punto di vista sperimentale sia modellistico, la campagna 2017 è stata condotta con rilevanti miglioramenti in tutte le fasi dell'esperimento, dal rilascio, alla previsione della dispersione, al campionamento, fino alle analisi dei campioni raccolti. Nella sezione a seguire vengono evidenziati i perfezionamenti apportati alla conduzione degli esperimenti per la campagna 2017.

3.3 Campagna 2017

La campagna di misura 2017 è stata condotta con diversi miglioramenti all'interno design degli esperimenti. In particolare, si è intervenuti:

1. sulla ricostruzione del campo meteorologico, aggiungendo la strumentazione Wind-LIDAR all'uscita della Val d'Isarco;
2. sulla strategia di immissione del gas tracciante a camino: sono state utilizzate opportune valvole e manometri che hanno permesso una regolazione più accurata dell'erogazione del tracciante.
3. sulla catena modellistica di *nowcasting*, ridisegnata e implementata come descritto in Sezione 3.3.1;
4. sulla strategia di campionamento, aumentando sia il numero di squadre, sia il numero di strumenti per il campionamento a disposizione;
5. sulla modalità di analisi dei campioni raccolti, raggiungendo una soglia di rilevabilità pari a 30 ppt_v.

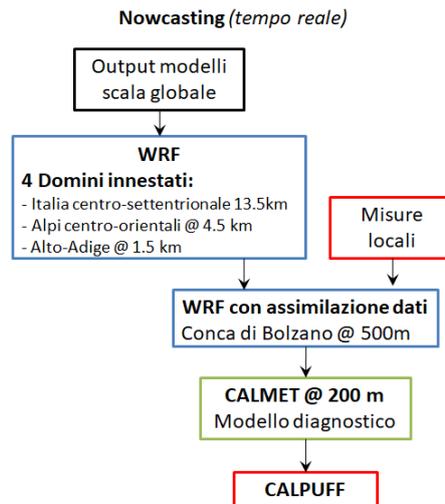


Figura 3.13: Schema a blocchi della catena modellistica di *nowcasting*, per le campagne di misura 2017. Utilizzata per confermare o modificare la posizione delle squadre di campionamento e per coordinare i campionamenti (orario di inizio e di fine prova per ciascuna squadra) in fase di rilascio.

La campagna di misura 2017 si è svolta il 14 febbraio. Durante questa giornata sono stati effettuati due rilasci di tracciante, uno alle ore 7:00 e uno alle ore 12:45, ed i campionamenti sono stati effettuati per mezzo di 14 squadre distribuite sul territorio. Sette squadre hanno mantenuto le stesse posizioni durante entrambi i rilasci, costituendo una maglia di campionamento fissa; le sette squadre rimanenti sono andate a costituire una maglia di campionamento mobile, e le loro posizioni sono state determinate in base ai risultati della catena modellistica di *nowcasting* (Figura 3.13). Di seguito si procede a descrivere la catena modellistica implementata ed utilizzata durante i rilasci per la disposizione delle squadre mobili, le condizioni meteorologiche realizzatesi durante i due rilasci e i dati raccolti in termini di concentrazioni al suolo.

3.3.1 Catena modellistica nowcasting

La catena modellistica utilizzata in fase di *nowcasting* per le campagne del 2017 è stata progettata per far fronte alle criticità emerse dalla rianalisi dei rilasci effettuati nel 2016. Il campo meteorologico viene calcolato in tempo reale dal modello prognostico WRF, su un dominio di circa 20 km², centrato sulla conca di Bolzano, con una risoluzione di 500 m. Il modello WRF assimila misure meteorologiche provenienti da 7 stazioni meteorologiche standard (San Genesio, Bolzano Ospedale, Bolzano via Amba Alagi, Bolzano Fiera, Caldaro, Laimburg e Bronzolo) e dai profilatori di temperatura (aeroporto di Bolzano) e di vento (strumentazione SODAR sul tetto dell'inceneritore e LIDAR all'uscita della val d'Isarco). La strumentazione

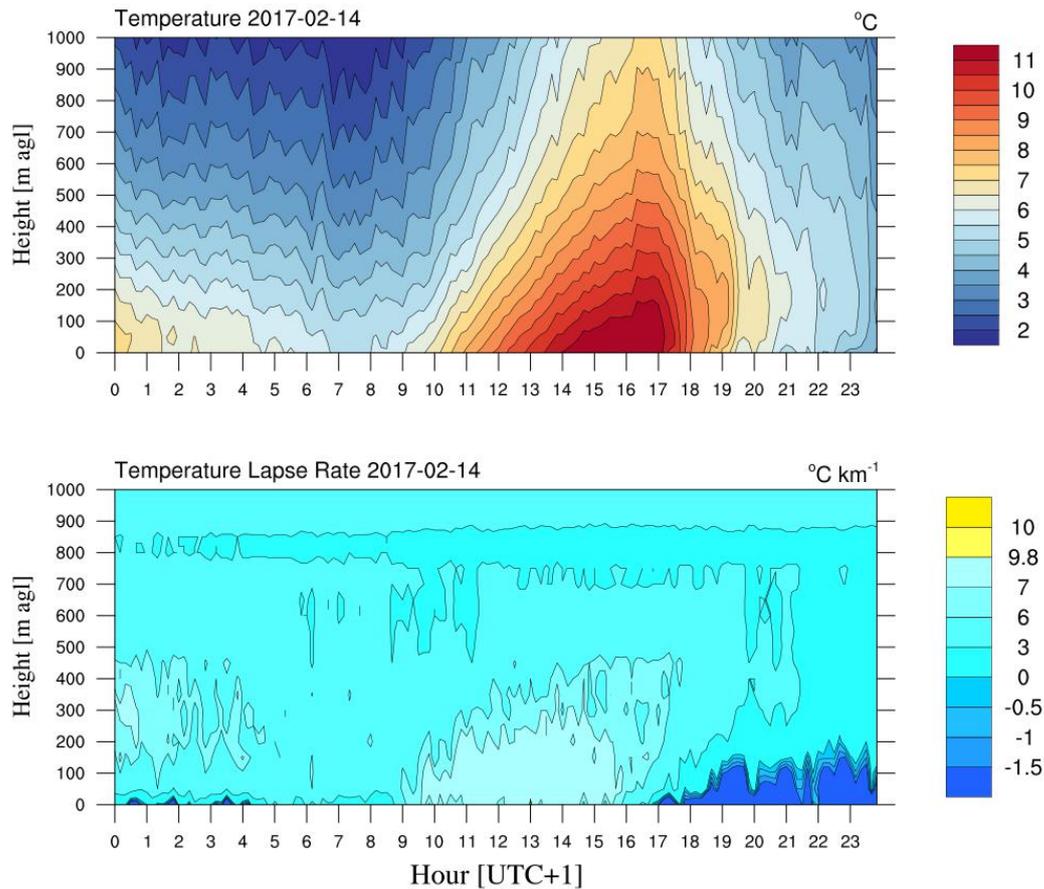


Figura 3.14: Diagrammi tempo-quota della temperatura e del gradiente termico misurati dal profilatore il 14 febbraio 2017. Nel pannello inferiore, relativo al gradiente termico, i colori blu, ciano e giallo identificano rispettivamente inversione termica, condizioni stabili e condizioni instabili.

LIDAR è stata predisposta appositamente per la campagna di misura 2017, con lo scopo di misurare le correnti che caratterizzano lo sbocco della val d’Isarco nella conca di Bolzano e che costituiscono una componente critica nella ricostruzione delle circolazioni nella conca. Il modello WRF così configurato produce i campi meteorologici a partire dalla mezzanotte del giorno del rilascio fino alla sera dello stesso, assimilando dati misurati fino all’ora in cui la catena modellistica viene lanciata. I campi meteorologici così ottenuti vengono forniti in ingresso al modello di dispersione CALPUFF che procede alla simulazione della dispersione di tracciante, con una risoluzione di 200 m. Sulla base di tali risultati vengono stabilite le posizioni delle 7 squadre costituenti la maglia mobile.

3.3.2 Condizioni meteorologiche durante i rilasci

Di seguito si riporta l’analisi delle condizioni meteorologiche realizzatesi il 14 febbraio 2017, sulla base delle misure registrate dal profilatore termico, dal SODAR,

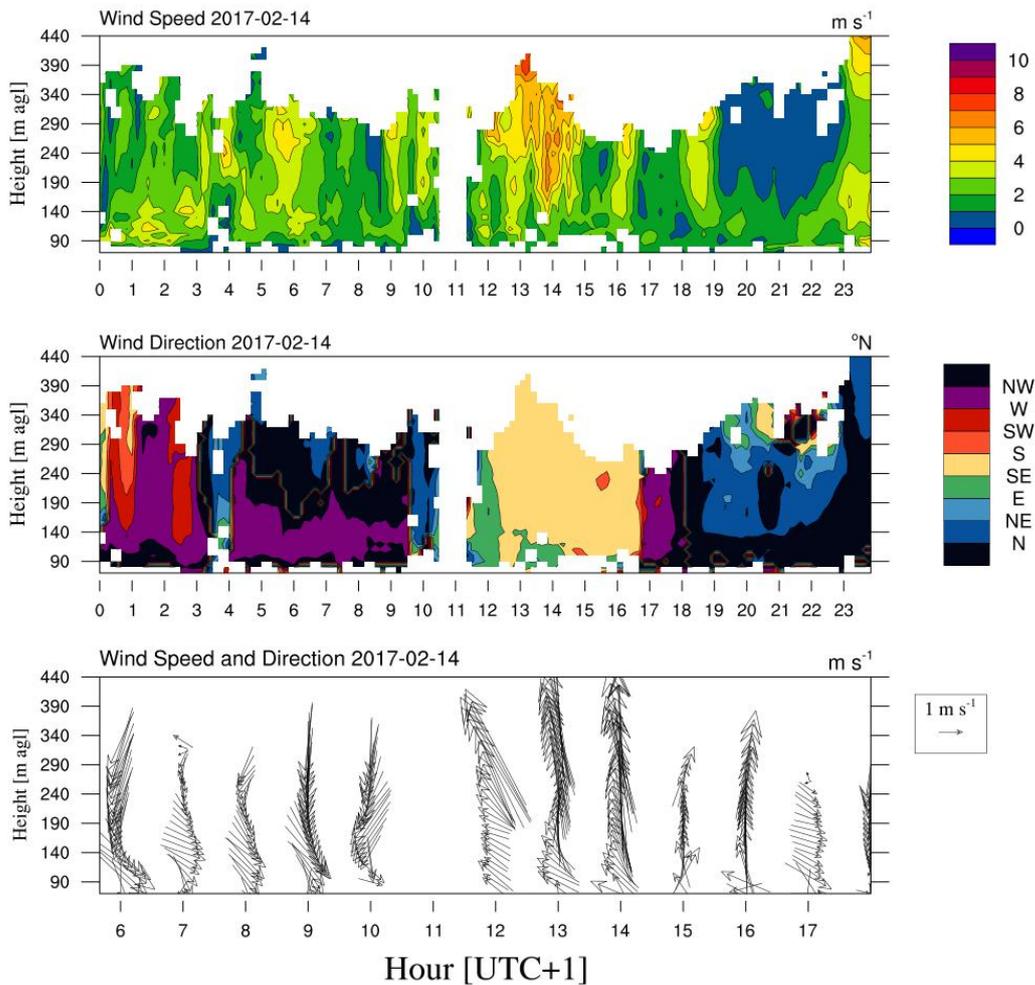


Figura 3.15: Diagrammi tempo-quota della velocità (pannello superiore) e della direzione (pannello centrale) del vento misurate dal SODAR sul tetto dell’impianto di termovalorizzazione. Il pannello superiore mostra l’evoluzione del profilo verticale del vento durante le ore centrali del 14 febbraio 2017, dalle 6:00 fino alle 17:00.

dal LIDAR e dalle stazioni al suolo. In Figura 3.14 si riportano i diagrammi tempo-quota della temperatura e del gradiente termico misurati dal profilatore. Le misure mostrano come la giornata sia stata caratterizzata da una debole stabilità atmosferica, con profili pressoché neutrali dalle ore 10:00 alle 16:00.

Le misure registrate dal SODAR vengono riportate in Figura 3.15, nella quale si nota una breve interruzione dello strumento dalle 10:30 alle 11:30, dovuta ad un problema tecnico. A partire dalla prima mattina, fino alle 10:00 circa, si notano due flussi disaccoppiati: una corrente che spira da nord-ovest negli strati bassi, fino a circa 150 m, ed una corrente che spira invece da nord/nord-est sovrastante. Quest’ultima è da identificarsi come la corrente a getto in fuoriuscita dalla Val d’I-sarco descritta in Sezione 1.5, che in corrispondenza della conca di Bolzano cambia la propria direzione a causa delle costrizioni orografiche. Dalle 11:00 alle 16:00, si

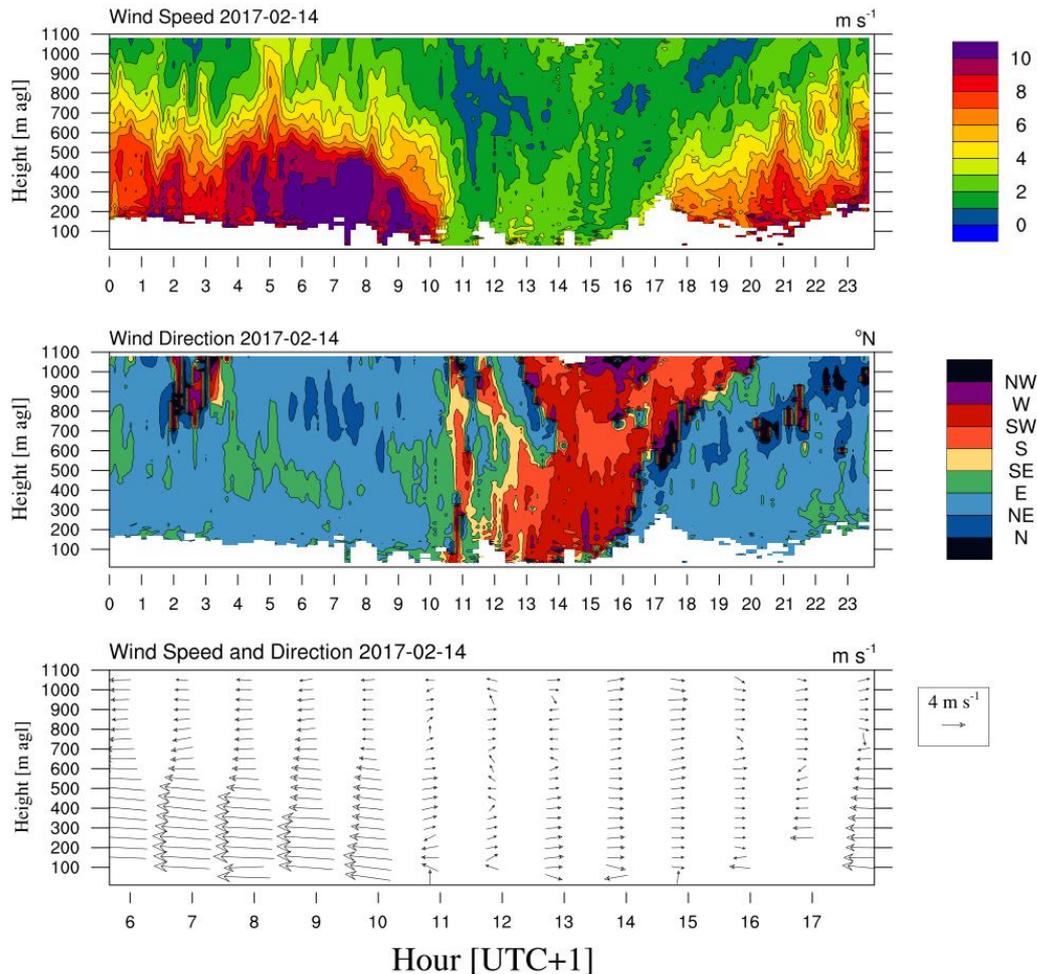


Figura 3.16: Diagrammi tempo-quota della velocità (pannello superiore) e della direzione (pannello centrale) del vento misurate dal LIDAR collocato all'uscita della Val d'Isarco nella conca di Bolzano. Il pannello superiore mostra l'evoluzione del profilo verticale del vento durante le ore centrali del 14 febbraio 2017, dalle 6:00 fino alle 17:00.

instaura un vento di risalita nella Val d'Adige da sud. In questa finestra di tempo, il SODAR registra intensità del vento molto elevate, specialmente negli strati alti, ma tali misure non sono da ritenersi valide in quanto la misura è condizionata dall'elevata temperatura (140°C) del pennacchio, che sorvola la strumentazione, compromettendone il funzionamento. Nonostante questo, le informazioni relative alla direzione del vento rimangono valide, in quanto esse non vengono influenzate dalla temperatura dell'aria. Nel tardo pomeriggio, l'intensità del vento da sud diminuisce e la direzione predominante torna ad essere da nord/nord-est.

Un quadro diverso, ma coerente con tale configurazione, viene invece fornito dal LIDAR, situato a pochi chilometri a nord est del termovalorizzatore (Figura 3.16). Tale strumento restituisce informazioni a partire da 300 m dal suolo fino a circa 1 km. Durante le ore notturne, fino alle 10 del mattino della giornata di interesse,

il LIDAR misura un'intensa corrente di drenaggio in uscita dalla Val d'Isarco. La velocità del vento di tale corrente risulta molto elevata, raggiungendo intensità superiori ai 10 m s^{-1} , e l'estensione verticale raggiunge quote di 800 m sopra il suolo. Nella tarda mattinata, la corrente in uscita dalla Val d'Isarco si indebolisce fino a svanire e viene sostituita da un vento di risalita da sud-ovest, caratterizzato da intensità molto minori ma maggiore estensione verticale (fino a 1 km). Nel pomeriggio, a partire dalle ore 16, il vento di risalita comincia ad indebolirsi gradualmente a partire dai bassi strati fino in quota, lasciando nuovamente posto al vento di drenaggio da nord-est che torna a spirare. La corrente a getto registrata dal LIDAR in uscita dalla Val d'Isarco, proveniente da nord-est, è la stessa corrente individuata dal SODAR negli strati alti, proveniente da nord: il jet, forzato dall'orografia della zona, è infatti costretto a cambiare direzione una volta raggiunta la conca di Bolzano, incanalandosi nella Val d'Adige verso Sud e spirando quindi prevalentemente da nord in corrispondenza del termovalorizzatore. Risulta interessante notare come, durante la precedente giornata di test (27 gennaio 2016), il SODAR registrasse la stessa corrente ma con intensità inferiori e soltanto a quote più elevate. Tale differenza nella struttura del campo di moto è da imputarsi al diverso campo termico che caratterizza le due giornate. Il 27 gennaio 2016 una forte inversione termica caratterizza la conca di Bolzano, creando un cuscino di aria fredda che impedisce alla corrente a getto (più calda) di penetrare i bassi strati dell'atmosfera. Al contrario, il 14 febbraio 2017 la temperatura nella conca di Bolzano è più elevata e non è presente alcuna inversione termica: in tali condizioni, il *valley-exit jet* può penetrare fino a strati più bassi dell'atmosfera.

Informazioni relative a tale fenomeno possono essere ricavate anche dalle misure raccolte dalle stazioni al suolo, riportate in Figura 3.17. Particolarmente interessanti risultano le osservazioni di intensità e direzione del vento a 10 m raccolte dalle stazioni WS12, WS8 e WS7: tutte e tre le stazioni misurano vento forte durante la notte, fino alle 10-11 del mattino; la direzione del vento risulta da Nord in corrispondenza della stazione nella Val d'Isarco, da nord-est nella conca di Bolzano e da nord/nord-ovest sulla piana di Caldaro. Tali misure suggeriscono il fatto che tutte e tre le stazioni siano disposte lungo l'asse della corrente a getto della Val d'Isarco e sono consistenti con le misure raccolte dalle strumentazioni SODAR e dal LIDAR. Al contrario, le altre stazioni al suolo misurano, per la giornata del 14 febbraio, venti deboli che si rinforzano leggermente solamente nelle ore centrali della giornata, quando si instaurano venti di risalita nelle valli.

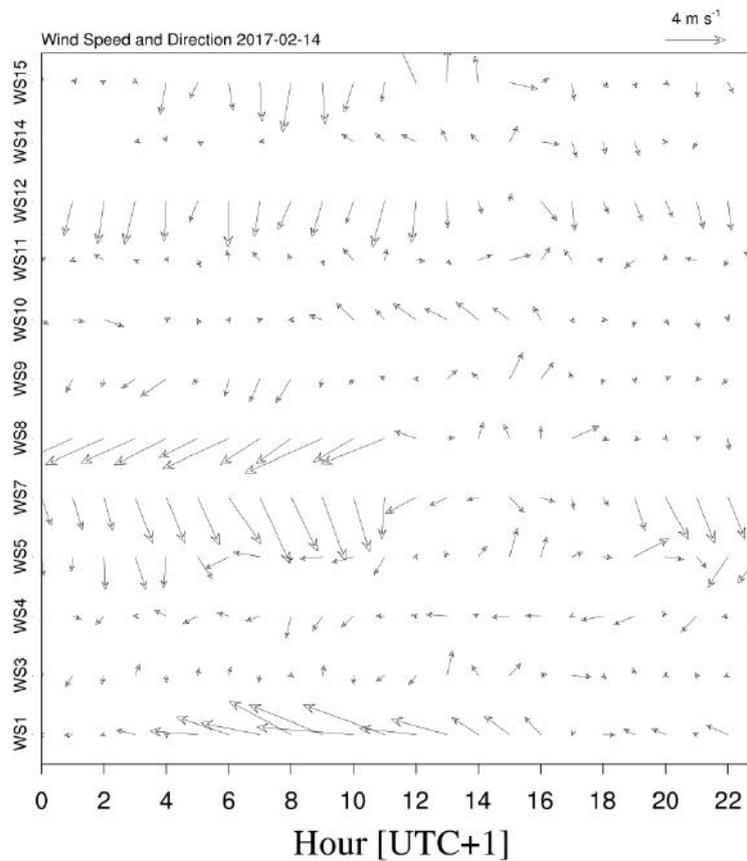


Figura 3.17: Velocità e direzione del vento a 10 m da suolo misurate dalle varie stazioni meteorologiche al suolo il 14 febbraio 2017.

3.3.3 Descrizione dei rilasci e risultati

Nella giornata del 14 febbraio 2017 sono stati effettuati due rilasci di gas tracciante: uno alle ore 7:00, della durata di 1 h, ed uno alle ore 12:45, della durata di 1.5 h. In Tabella 3.5 vengono riportate le principali caratteristiche di ciascun rilascio. Durante la campagna di misura 2017, sono state impiegate 14 squadre di campionamento, distribuite sul territorio circostante l'impianto di termovalorizzazione. La strategia di campionamento per questa campagna di misura prevede l'utilizzo di 7 squadre collocate in punti fissi, durante entrambi i rilasci, a formare una griglia di campionamento fissa. Le altre 7 squadre formano invece la maglia di campiona-

Tabella 3.5: Caratteristiche dei rilasci di gas tracciante effettuati durante la campagna di misura 2017.

Rilascio	Giorno	Ora [UTC+1]	Durata [min]	Massa Rilasciata [kg]	Punti di campionamento
1 - 1402	14/02/2017	7:00	60	150	14
2 - 1402	14/02/2017	12:45	90	450	14



Figura 3.18: Posizioni delle squadre di campionamento durante la campagna di misure condotta il 14 febbraio 2017 (mappa di sfondo da Google Earth). In giallo, i punti di campionamento della maglia fissa, in blu, i punti di campionamento della maglia mobile per il rilascio del mattino (pannello di sinistra) e quello del pomeriggio (pannello di destra).

mento mobile, e le loro posizioni vengono quindi stabilite in base alle previsioni di dispersione del tracciante effettuate in fase di *nowcasting*.

Come mostrato in Figura 3.18, quattro squadre componenti la maglia fissa sono posizionate nella città di Bolzano, una nella zona industriale di Vurza, una vicina all'abitato di Laives e una nelle vicinanze dell'impianto di termovalorizzazione, sul versante ovest della Val d'Adige (Castel Firmiano). Le squadre componenti la maglia mobile hanno invece assunto diverse posizioni durante i due rilasci, al mattino ed al pomeriggio, mostrate in Figura 3.18. Durante questa campagna di misura, ciascuna squadra di campionamento ha raccolto campioni di aria ambiente con un set di bottiglie sottovuoto in vetro da 1 litro, a riempimento automatico (Figura 3.2). Con tale strumentazione si sono raccolti campioni da 1 h e da 20 min. Tre squadre hanno inoltre raccolto delle misure aggiuntive, mediante secchetti di Teflon riempiti con pompe ad aria. La tempistica e scelta del tipo di campionamento è stata guidata dai risultati delle simulazioni di dispersione effettuate con la catena modellistica di *nowcasting*. In Tabella 3.6 si riportano i numeri di campioni raccolti per ciascuna tipologia. I campioni raccolti sono stati analizzati dai laboratori di Eco-Research mediante spettroscopia di massa con un limite di rilevabilità di 30 ppt_v.

In Figura 3.19, sono presentati i campioni raccolti durante il primo rilascio. Il campionamento è cominciato alle ore 8:30, ma, a quest'ora, solamente una squadra,

Tabella 3.6: Numero di campioni raccolti durante la campagna 2017 in base alle loro caratteristiche.

Media Temporale	Strumento	Nr campioni
60 min	Bottiglie sottovuoto	34
20 min	Bottiglie sottovuoto	21
25 min	Sacchetti in Teflon	1
15 min	Sacchetti in Teflon	4
10 min	Sacchetti in Teflon	8
5 min	Sacchetti in Teflon	11
TOT		79

posizionata a nord-est dell'impianto, ha misurato concentrazioni rilevabili. Tale riscontro dimostra come il tracciante abbia impiegato indicativamente 2 h per raggiungere il suolo, dato che il rilascio è cominciato alle ore 7:00. Una dispersione così lenta del tracciante risulta coerente con le condizioni di stabilità atmosferica registrate dagli strumenti meteorologici, discusse nelle sezioni precedenti. Le concentrazioni al suolo misurate cominciano ad aumentare dopo le ore 9:00, nei punti di campionamento collocati nel lato est della Val d'Adige, specialmente in quelli più a sud. Solo più tardi, il tracciante è stato rilevato anche dalle stazioni posizionate nel lato ovest della Val d'Adige. Le misure raccolte suggeriscono quindi che il pennacchio si sia mosso inizialmente verso sud-est e poi sia stato disperso nell'intera Val d'Adige. Il tracciante rilasciato, coerentemente con le misure di velocità e direzione del vento raccolte nella zona, non ha mai raggiunto i punti di campionamento collocati a nord del termovalorizzatore. In Figura 3.20 si presentano le concentrazioni misurate sulla mappa della zona, a cinque istanti diversi, per fornire un'idea del pattern di dispersione osservato.

In Figura 3.21 si presentano i campioni raccolti durante il secondo rilascio del 14 febbraio 2017 (si noti che il secondo, il quinto ed il decimo pannello hanno una diversa scala sull'asse delle ordinate, date le elevate concentrazioni misurate). In questo caso, le prime quantità rilevabili di tracciante sono state misurate appena 30 minuti dopo l'inizio del rilascio, coerentemente con la debole instabilità osservata dal punto di vista meteorologico. La concentrazione più elevata è stata registrata presso Castel Firmiano, il punto di campionamento più vicino al termovalorizzatore, verso nord-ovest. A questa misura seguono elevati rilevamenti nella maggior parte dei punti di campionamento a nord dell'impianto, con picchi di concentrazione nella parte ovest della conca di Bolzano. Tali osservazioni suggeriscono quindi che il pennacchio si sia mosso verso nord-ovest, andando in seguito ad interessare l'intera conca di Bolzano. Solamente tracce del gas inerte utilizzato sono state rilevate a sud dell'impianto di termovalorizzazione. In Figura 3.22 si riportano in pianta le

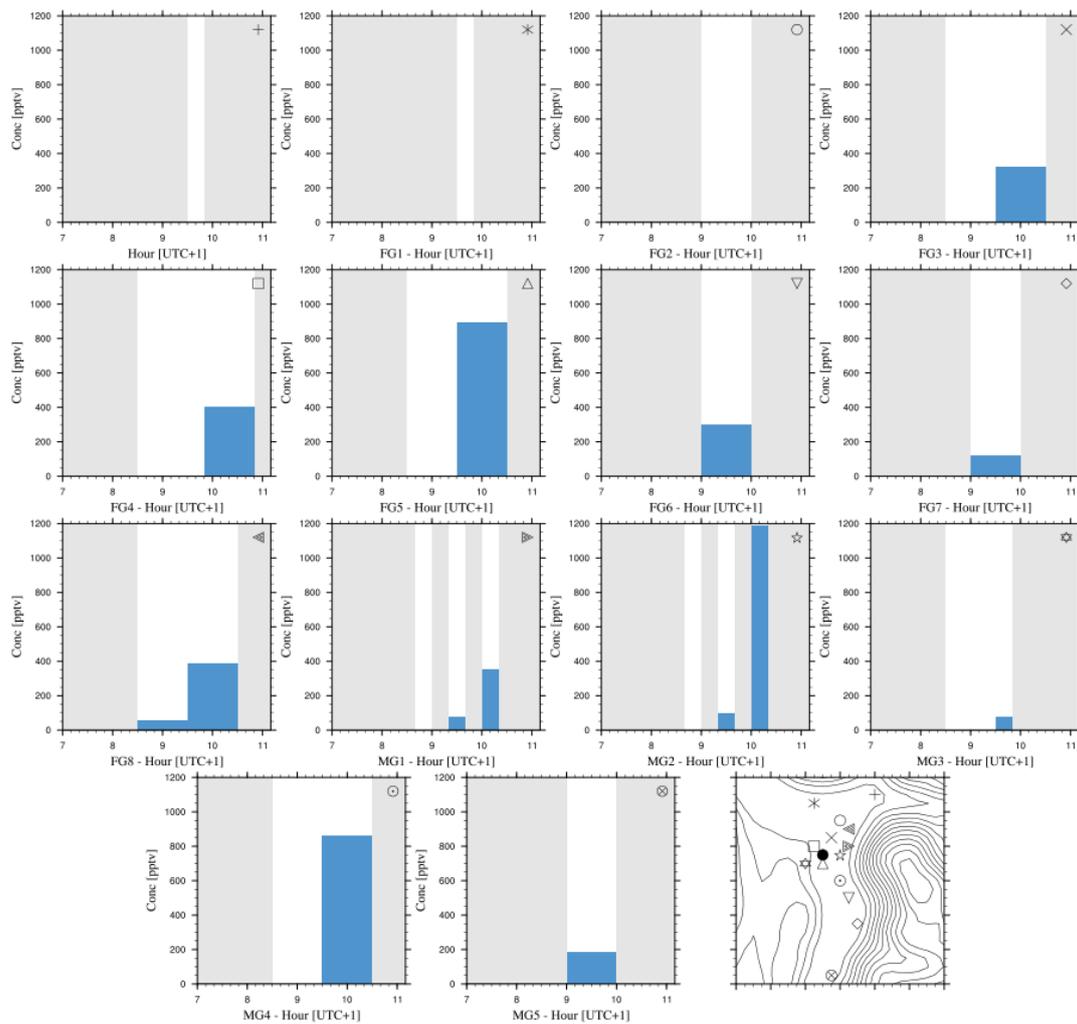


Figura 3.19: Concentrazioni misurate al suolo durante il primo rilascio di tracciante (campagna di misura 2017). L'istogramma blu rappresenta i valori di concentrazione misurati in ciascun punto di campionamento con le bottiglie sottovuoto (FG = maglia fissa; MG = maglia mobile). Lo sfondo grigio caratterizza gli istanti durante i quali non è avvenuto alcun campionamento. Durante il rilascio mattutino nessuna misura rappresentativa è stata raccolta con i sacchetti in Teflon. Nell'ultimo pannello è evidenziata la posizione di ciascuna squadra di campionamento con i corrispondenti indicatori.

concentrazioni misurate dai vari punti di campionamento, in cinque diversi istanti, con lo scopo di fornire una traccia del pattern di dispersione del tracciante durante il rilascio pomeridiano.

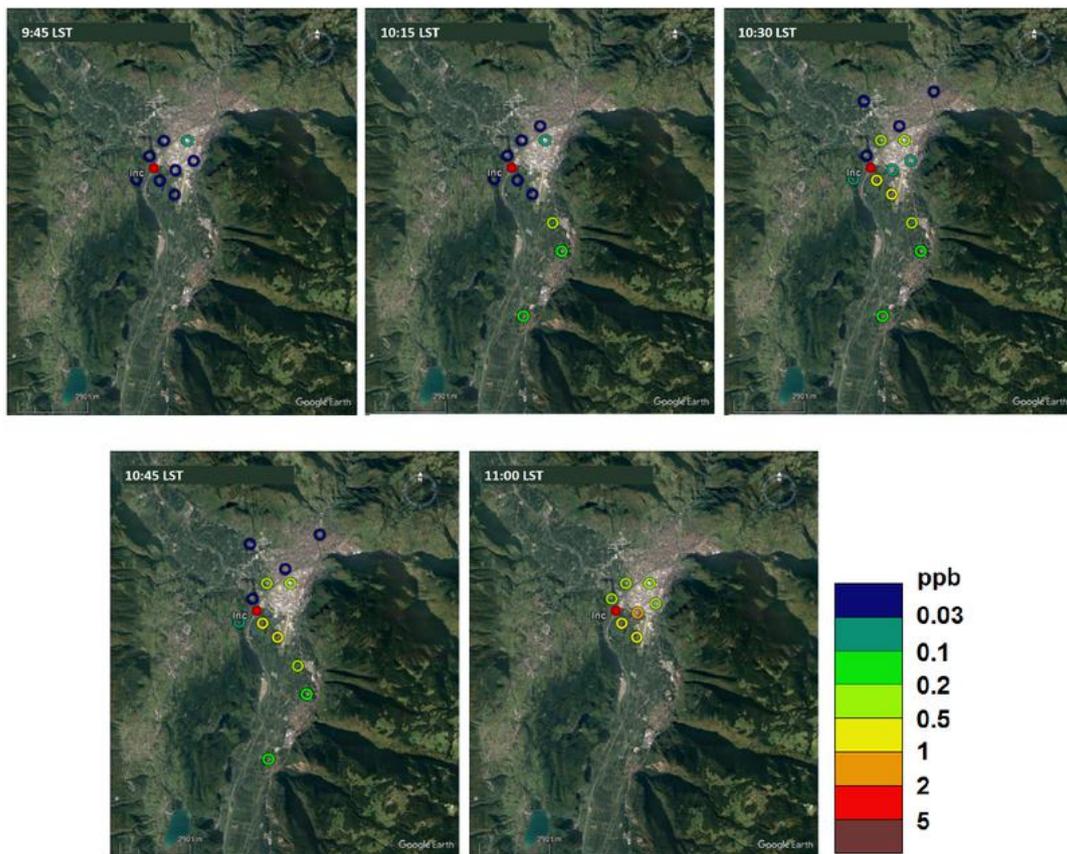


Figura 3.20: Evoluzione temporale delle misure di concentrazione al suolo misurate a seguito del rilascio mattutino del 14 febbraio 2017. I pannelli da in alto a sinistra fino in basso a destra corrispondono ai seguenti istanti temporali: 9:45, 10:15, 10:30, 10:45, 11:00 (mappa di sfondo da Google Earth).

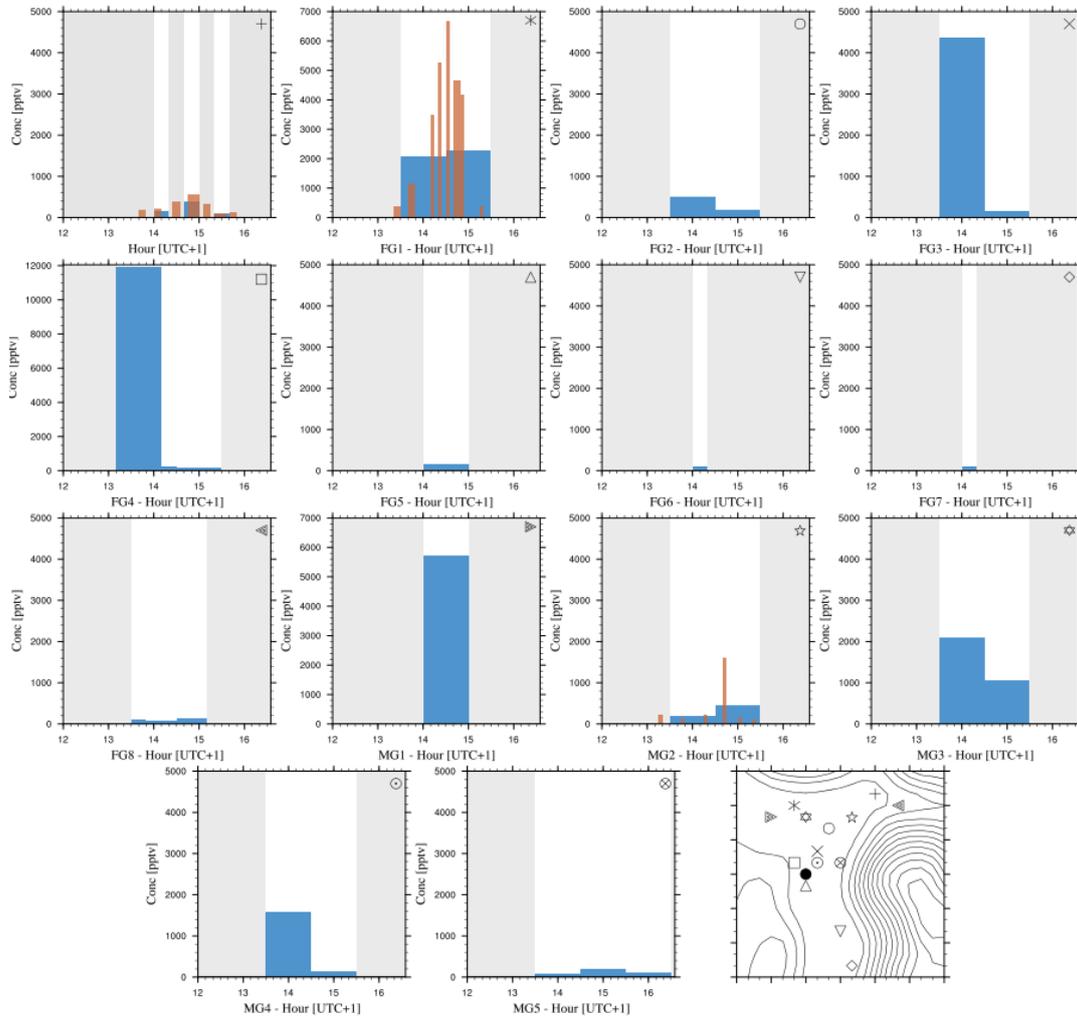


Figura 3.21: Concentrazioni misurate al suolo durante il secondo rilascio di tracciante (campagna di misura 2017). L'istogramma blu rappresenta i valori di concentrazione misurati in ciascun punto di campionamento con le bottiglie sottovuoto (FG = maglia fissa; MG = maglia mobile). Lo sfondo grigio caratterizza gli istanti durante i quali non è avvenuto alcun campionamento. Durante il rilascio mattutino nessuna misura rappresentativa è stata raccolta con i sacchetti in Teflon. Nell'ultimo pannello è evidenziata la posizione di ciascuna squadra di campionamento con i corrispondenti indicatori.

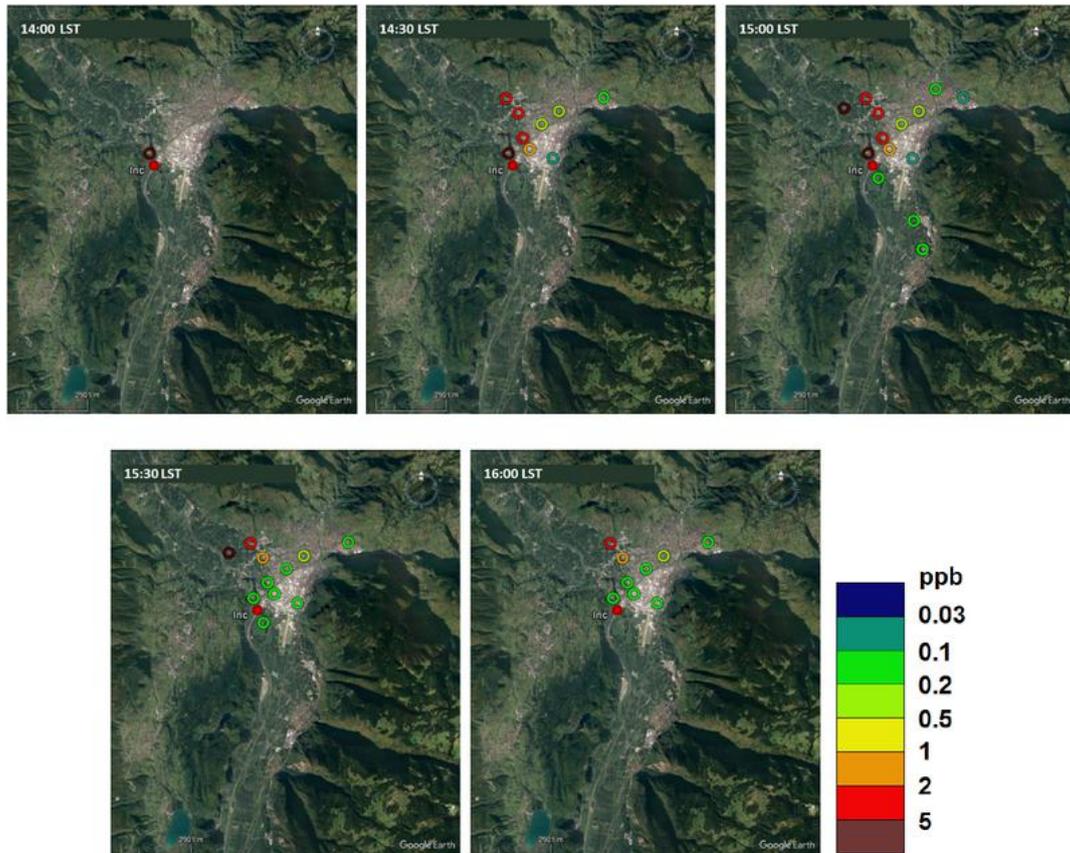


Figura 3.22: Evoluzione temporale delle misure di concentrazione al suolo misurate a seguito del rilascio pomeridiano del 14 febbraio 2017. I pannelli da in alto a sinistra fino in basso a destra corrispondono ai seguenti istanti temporali: 14:00, 14:30, 15:00, 15:30, 16:00 (mappa di sfondo da Google Earth).

CAPITOLO 4

Calibrazione della catena modellistica sulla base dei campionamenti effettuati

Nel presente capitolo viene presentata la procedura utilizzata per calibrare la catena modellistica sulla Conca di Bolzano utilizzando i dati di concentrazione raccolti durante le campagne di misura del 2017, presentate nel precedente Capitolo 3, in Sezione 3.3.

In particolare, la procedura di calibrazione ha interessato il solo modello di dispersione CALPUFF, sotto l'ipotesi che le incertezze insite nella modellazione dei processi dispersivi siano maggiori di quelle relative alla ricostruzione del campo meteorologico. In questo contesto, quindi, si è proceduto ad effettuare una simulazione meteorologica dell'intero giorno del rilascio, il più precisa possibile, ed in seguito alla calibrazione del modello CALPUFF alimentato da tale unico input meteorologico.

Nelle sezioni a seguire si presentano nel dettaglio entrambi i passaggi eseguiti: in Sezione 4.1 si riporta la descrizione della simulazione meteorologica, e la valutazione dei risultati con essa ottenuti. In Sezione 4.2 si descrive invece la procedura di calibrazione effettuata sul modello CALPUFF, dalla descrizione teorica di un processo di calibrazione (Sezione 4.2.1), ai passaggi intermedi effettuati (Sezioni 4.2.2 e 4.2.3), fino alla caratterizzazione delle varie configurazioni di CALPUFF testate, all'analisi dei risultati ottenuti e alla scelta della configurazione più performante.

In base ai risultati ottenuti nella presente analisi si è potuto individuare la configurazione ottimale del modello CALPUFF che meglio riproducesse i dati misurati e selezionarla quindi per le applicazioni della catena modellistica a scala annuale (Capitolo 5) e per la riproduzione di ipotetici eventi accidentali (Capitolo 6).

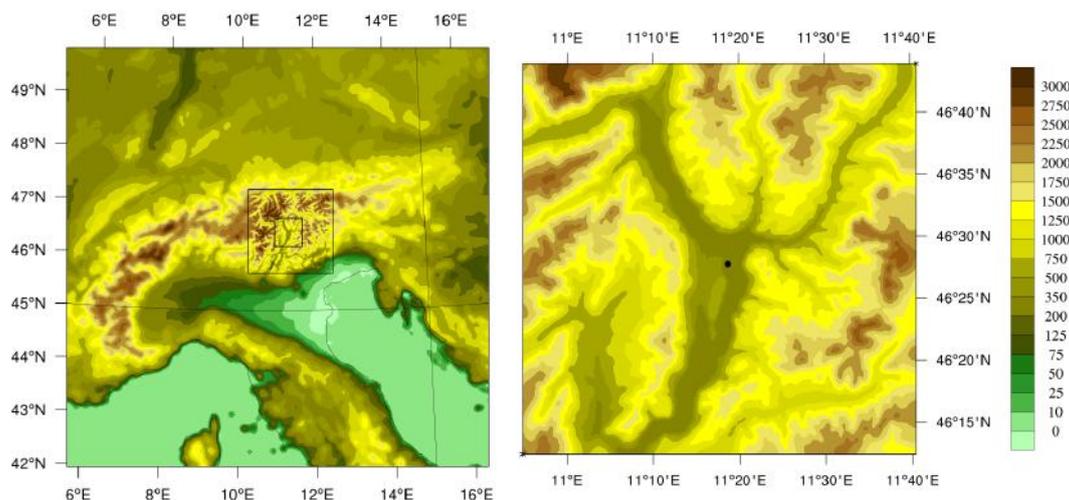


Figura 4.1: Domini innestati nel modello WRF per la simulazione di calibrazione del modello CALPUFF, dal Nord Italia fino alla Conca di Bolzano, con le corrispondenti elevazioni. Il punto nel pannello di destra indica la posizione dell'impianto di termovalorizzazione.

4.1 Simulazione meteorologica ad alta risoluzione

La simulazione meteorologica per la procedura di calibrazione è stata effettuata con strumenti allo stato dell'arte e con numerosi accorgimenti tecnici e scientifici, con l'obiettivo di riprodurre in modo più accurato possibile i campi meteorologici, riducendo al massimo le incertezze legate alla ricostruzione dei campi meteorologici da fornire in ingresso al modello di dispersione. In particolare, la simulazione effettuata risulta particolarmente avanzata, data l'elevata risoluzione della griglia orizzontale e verticale, l'elevata risoluzione dei dati meteorologici in ingresso utilizzati come condizioni al contorno e iniziali, e l'elevato numero e la qualità non comune dei dati da misure assimilati nel modello meteorologico. La realizzazione di tale approfondita analisi è stata possibile anche grazie alle collaborazioni instauratesi durante lo svolgimento del progetto con il *National Center for Atmospheric Research* (NCAR, Boulder, CO-USA), con l'Università degli Studi del Piemonte Orientale (Vercelli, IT) e con l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-ISAC, Torino, IT).

La simulazione meteorologica è stata effettuata con il modello WRF (Sezione 2.1), versione 3.8.1, con 3 domini annidati (Figura 4.1) ed assimilazione oraria dei dati misurati nel dominio più interno. Il dominio esterno risolve i campi meteorologici su una griglia orizzontale di 4.5 km mentre nel dominio più interno si raggiunge una risoluzione di 300 m (Tabella 4.1). Una risoluzione così elevata nel dominio più esterno risulta appropriata in quanto le condizioni iniziali e al contorno fornite alla

Tabella 4.1: Caratteristiche dei domini annidati nel modello WRF per la simulazione di calibrazione del modello CALPUFF.

Numero del dominio	Risoluzione Orizzontale [km]	Dimensioni in x e y [km]	Passo temporale [s]
1	4.5	784x784	10
2	0.9	167.4x167.4	2
3	0.3	58.8x58.8	0.67

simulazione sono costituite dai dati *ECMWF HRES Operational data*, a cadenza di 6 ore e con risoluzione di 9 km. La griglia verticale della simulazione è composta da 62 livelli verticali distribuiti in maniera tale che la risoluzione sia maggiore vicino al suolo e vada via via riducendosi a quote superiori: nei primi 300 m sopra il suolo sono presenti 30 livelli, con uno spessore corrispondente di circa 30 m, mentre altri 14 livelli ricadono nello strato di atmosfera compreso tra i 300 e i 1000 m.

La simulazione copre l'intera giornata del 14 febbraio 2017, durante la quale sono stati effettuati i due rilasci per il presente studio. Per garantire che la simulazione potesse concludersi senza incorrere in errori di instabilità numerica, spesso indotta dall'orografia in simulazioni ad alta risoluzione effettuate su terreno complesso, il passo di calcolo temporale è stato impostato a 10 s nel dominio più esterno, al quale corrisponde un *time-step* di 0.67 s per il dominio più interno (Tabella 4.1): tali elevate risoluzioni richiedono un notevole impiego di risorse computazionali, per poter concludere la simulazione in tempi consoni con le necessità di utilizzo dei risultati.

Data l'elevata risoluzione della griglia di calcolo raggiunta nel dominio più interno, è necessario fornire al modello dei dati statici in ingresso coerenti con tale risoluzione. Per questo motivo, i dati di elevazione del terreno (*Digital Terrain Model*, DTM, de Ferranti, 2013) e di classificazione di uso del suolo (*Corine Land Cover data* riclassificati secondo la *IGBP Land Cover Type Classification*, EEA, 2006; Giovannini et al., 2014a) forniti per questa applicazione hanno, rispettivamente, risoluzione di 30 m e 100 m, coerentemente superiori a quella di calcolo di 300 m.

Per incrementare ulteriormente l'affidabilità dei risultati del modello meteorologico, è stata applicata la tecnica dell'*observational nudging*, ovvero della assimilazione di dati misurati durante l'esecuzione della simulazione. Tale tecnica consente di indirizzare le soluzioni calcolate dal modello verso i dati effettivamente misurati sul territorio, forzandolo gradualmente a riportarsi ai valori osservati qualora la sua soluzione se ne discostasse troppo marcatamente. Così facendo, il modello è portato ad introdurre, nei punti di misura, delle graduali correzioni nel calcolo delle variabili meteorologiche, che verosimilmente gli consentono di risolvere in modo più

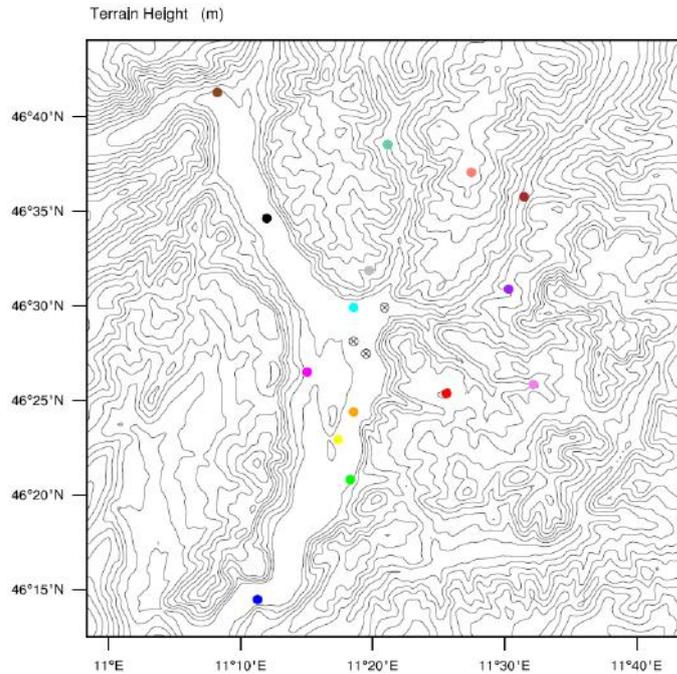


Figura 4.2: Posizione delle stazioni di misura utilizzate come fonte di dati per l'assimilazione nella simulazione meteorologica effettuata per la calibrazione del modello CALPUFF sulla Conca di Bolzano. In diversi colori sono indicate le stazioni meteorologiche standard, con dei cerchi con una croce sono invece indicati i profilatori di vento (i due punti a nord) e di temperatura (il punto più a sud). Lo sfondo è rappresentato da curve di livello tracciate ogni 200m.

realistico i campi di moto anche negli altri punti di griglia. Nella presente analisi i dati utilizzati per l'assimilazione sono molteplici e di diversa natura. In particolare, sono stati assimilati:

1. tutti i dati da misure (temperatura e umidità dell'aria, velocità e direzione del vento) forniti dalle 15 stazioni meteorologiche standard presenti nel dominio di calcolo e gestite dal Servizio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano (punti colorati in Figura 4.2;
2. i dati di intensità e direzione del vento provenienti da profili verticali dagli strumenti LIDAR e SODAR installati per il presente progetto di studio rispettivamente allo sbocco della Val d'Isarco e sul tetto dell'inceneritore (vedasi Sezione 1.2);
3. i profili verticali di temperatura misurati dal profilatore termico in funzione presso l'aeroporto di Bolzano.

Tutti i dati registrati dalle sopraccitate stazioni sono stati assimilati nella simulazione meteorologica effettuata con cadenza oraria.

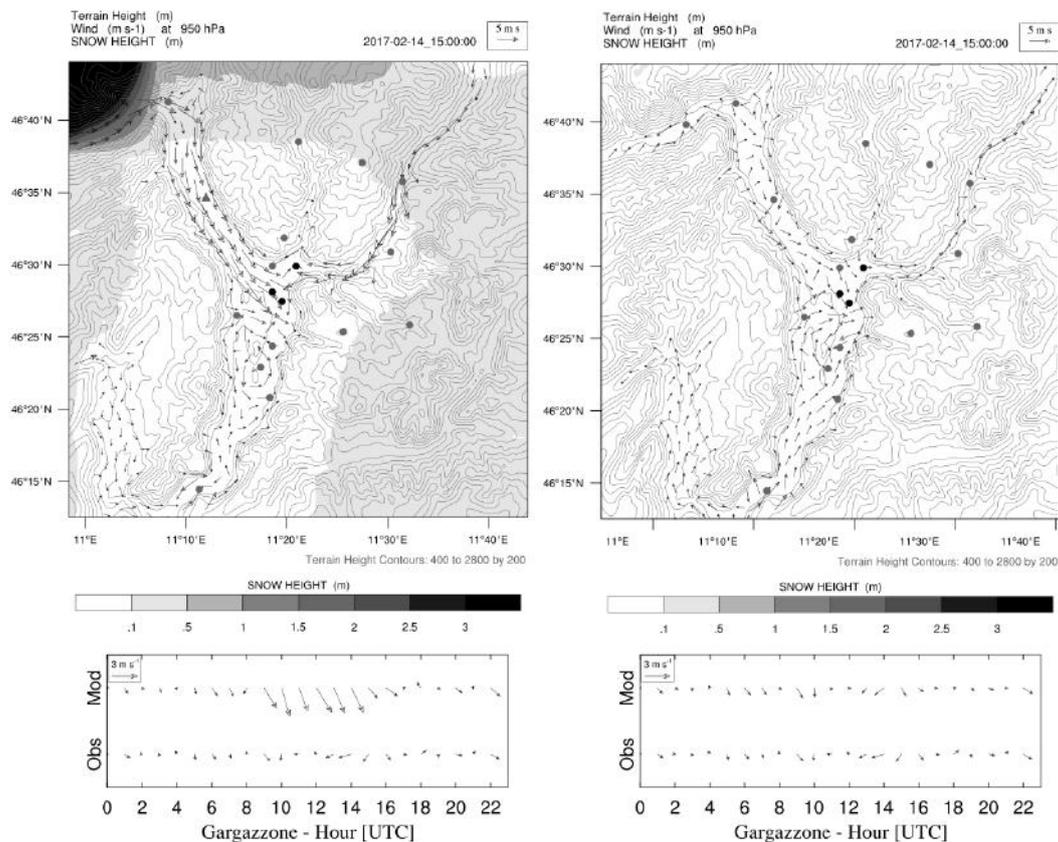


Figura 4.3: Nei pannelli superiori, direzione e velocità del vento a 950 hPa (circa 300 m dal suolo) alle ore 1500 UTC ottenute con il modello WRF nella sua configurazione preliminare (a sinistra) e definitiva (a destra); in scala di grigi è riportata la copertura di neve presente sul dominio come da dati ECMWF (a sinistra) e come modificata appositamente per la simulazione (a destra); i punti rappresentano le posizioni delle stazioni meteorologiche assimilate. Nei pannelli inferiori, direzione e velocità del vento misurata e modellata da WRF nella sua configurazione preliminare (a sinistra) e definitiva (a destra) presso la stazione di Gargazzone (indicata da un triangolo nei pannelli superiori).

I risultati preliminari ottenuti con questa configurazione del modello WRF presentavano lo sviluppo di una forte corrente di drenaggio nel fondovalle della Val d'Adige fra Merano e Bolzano nel primo pomeriggio del giorno analizzato: in Figura 4.3, pannello di sinistra, si riporta il vento simulato alle ore 1500 UTC a 950 hPa di quota (corrispondenti a circa 300 m dal suolo). Tale vento di drenaggio non è stato registrato da alcuna delle stazioni disponibili, specialmente dalla stazione di Gargazzone, posizionata a metà del tratto di Val d'Adige fra Merano e Bolzano, che, al contrario dei risultati della simulazione, ha misurato intensità di vento molto deboli.

In Figura 4.3, nel pannello inferiore a sinistra, che riporta il ciclo giornaliero del vento modellato e misurato nella stazione di Gargazzone, si evidenzia come il modello meteorologico forzi la presenza di tale forte vento da nord nelle ore centrali

della giornata, nonostante informazioni di bassa intensità del vento siano state assimilate e quindi fornite come input al modello. La riproduzione di tale vento di drenaggio risulta particolarmente problematica per la ricostruzione della dispersione del tracciante: esso investe infatti direttamente l'impianto del termovalorizzatore, ad una quota verosimilmente interessata dalla presenza del pennacchio e durante il secondo rilascio di tracciante, con evidenti rilevanti effetti sulla sua traiettoria di dispersione. Per questo motivo, è stata svolta un'analisi di dettaglio sulle cause che portano alla generazione di questo fenomeno. Il motivo per il quale il modello forza il drenaggio nella Val d'Adige è la presenza nei valori di inizializzazione del modello di una rilevante copertura nevosa nell'angolo nord-occidentale del dominio, derivante dai dati in ingresso al modello, mostrata in Figura 4.3 in scala di grigi. Tale accumulo di neve, che non ha riscontro alcuno nelle osservazioni, genera una rilevante differenza di temperatura spuria fra l'area di Merano e il centro del dominio, che produce la corrente di drenaggio individuata. Per ovviare a questo inconveniente si è intervenuti direttamente sulla procedura di inizializzazione della neve nel modello meteorologico, rimuovendo completamente la copertura nevosa spuria dal dominio e riproducendo più correttamente l'effettiva condizione del suolo del giorno del rilascio. Così facendo si ottengono risultati molto più soddisfacenti e realistici, come mostrato in Figura 4.3, pannello in alto a destra: la parte alta della Val d'Adige è ora caratterizzata da venti con intensità molto ridotte e senza una prevalente direzione, come misurato dalla stazione di Gargazzone. In questo contesto, il modello è infatti anche in grado di assimilare con molta precisione i dati misurati, come mostrato in Figura 4.3, pannello in basso a destra, visto che è stata rimossa la forzante fisica che lo induceva a generare la corrente di drenaggio.

Si riporta di seguito il confronto fra i risultati ottenuti con la configurazione definitiva del modello WRF e le osservazioni disponibili, con lo scopo di fornire una panoramica della qualità dei campi meteorologici ottenuti. Nella lettura di tale confronto va ricordato che le osservazioni utilizzate in questo frangente come termine di paragone sono in realtà state fornite come input al modello: quando quindi si riscontrano discrepanze tra il modello e le misure significa che sono presenti delle forzanti fisiche così marcate da impedire al modello di avvicinarsi alle misure (come ad esempio succedeva a causa della copertura nevosa) ed effettuare l'assimilazione in modo appropriato. In Figura 4.4 vengono presentati i risultati ottenuti in corrispondenza della posizione del LIDAR, a confronto con le misure registrate dallo strumento. Il confronto dimostra come ci sia buona corrispondenza fra i risultati numerici e le misure, sia in termini di tempistiche di sviluppo delle diverse correnti, sia in termini di intensità dei fenomeni rilevati. Lo sviluppo nel tempo del *valley-exit jet* della Val d'Isarco (Sezione 1.6) è ben ricostruito dal modello, come anche il

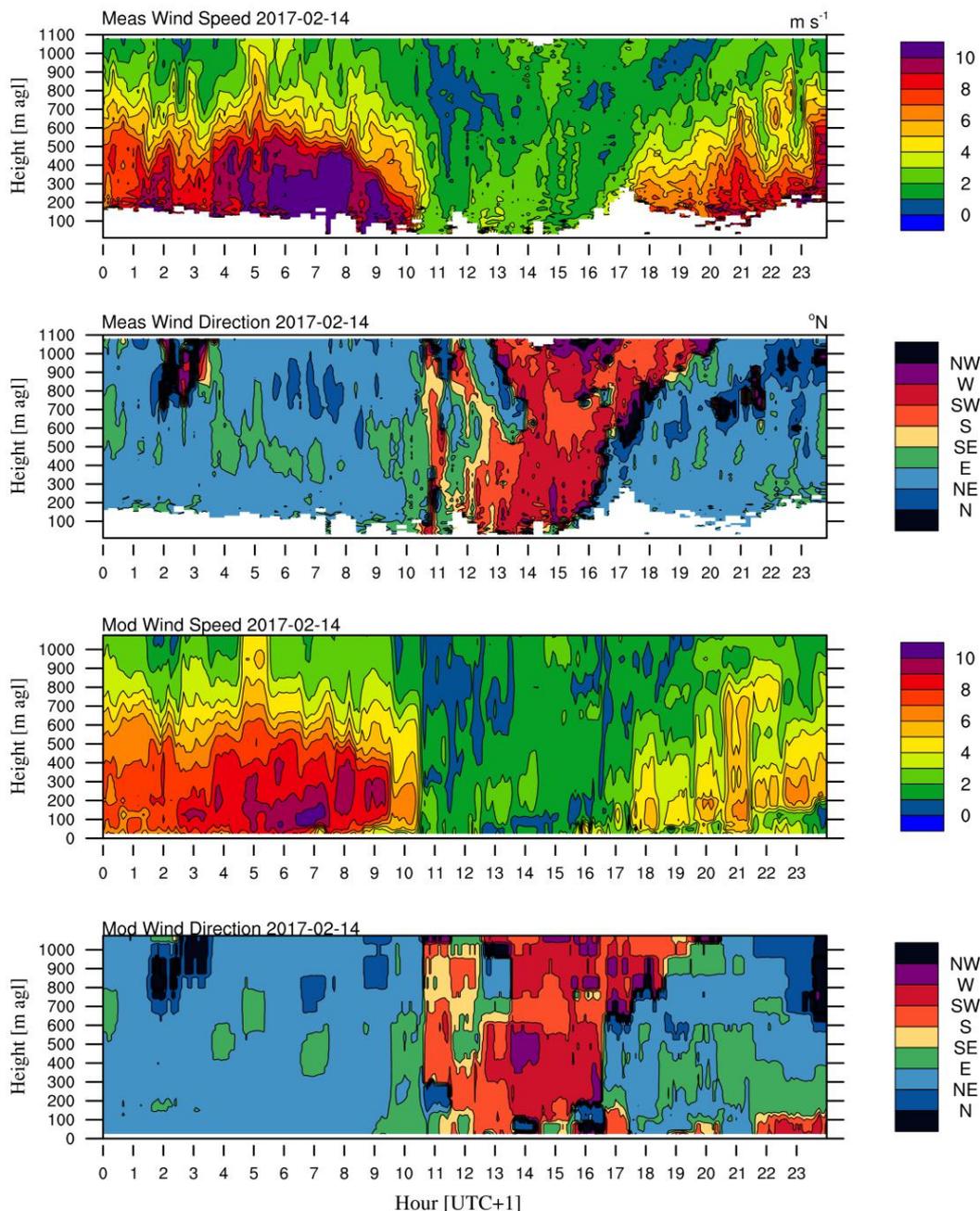


Figura 4.4: Diagrammi tempo-quota della velocità e della direzione del vento misurate dal LIDAR (pannelli primo e secondo) e calcolate dal modello WRF (pannelli terzo e quarto) per la simulazione per la calibrazione del modello CALPUFF.

suo spessore verticale, mentre la sua intensità è leggermente sottostimata.

I profili verticali di temperatura ottenuti in corrispondenza del profilatore termico (Figura 4.5) riproducono in modo accurato le misure raccolte, ad eccezione di un sottile strato di instabilità sviluppato dal modello in corrispondenza delle ore centrali della giornata. Come mostrato, i risultati ottenuti dalla simulazione meteorologica effettuata sono soddisfacenti, a seguito dell'intervento sulla copertu-

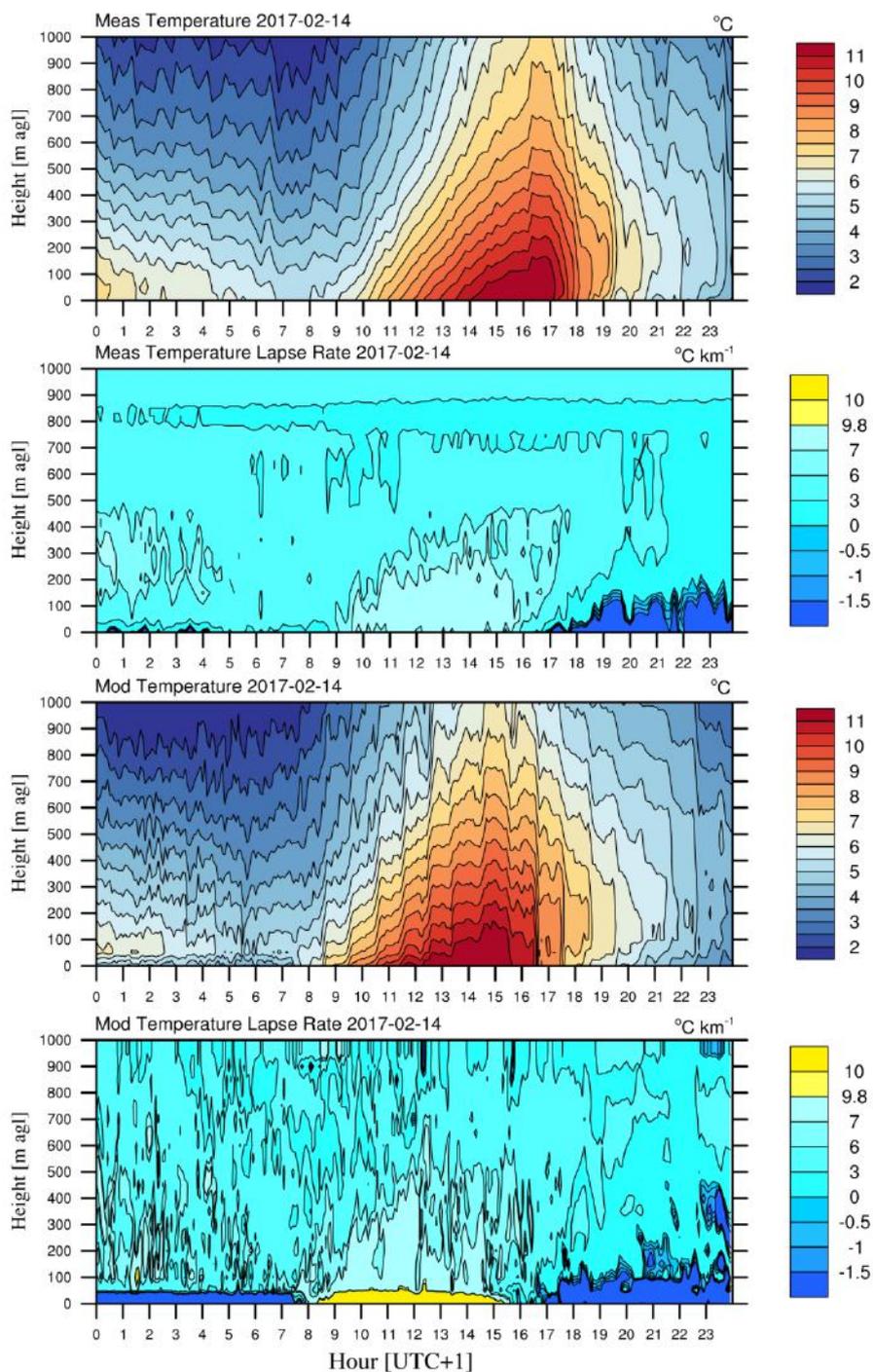


Figura 4.5: Diagrammi tempo-quota della temperatura e del gradiente termico misurati dal profilatore (pannelli primo e secondo) e calcolati dal modello WRF (pannelli terzo e quarto) per la simulazione per la calibrazione del modello CALPUFF. Nel pannello inferiore, relativo al gradiente termico, i colori blu, ciano e giallo identificano rispettivamente inversione termica, condizioni stabili e condizioni instabili.

ra nevosa, e rappresentano un'affidabile base di dati in ingresso per il modello di dispersione.

4.2 Simulazioni della dispersione del tracciante mediante modello CALPUFF: calibrazione del modello

In questo capitolo viene presentata la procedura seguita per la calibrazione del modello CALPUFF per applicazioni nella Conca di Bolzano, effettuata grazie alla disponibilità dei dati raccolti durante gli esperimenti di rilascio del 2017.

La procedura di calibrazione del modello CALPUFF sui dati di concentrazione raccolti è stata effettuata seguendo una procedura in 4 fasi:

1. individuazione di un set di macro-parametri che maggiormente influenzano i risultati del modello CALPUFF;
2. set-up di quattro diverse simulazioni CALPUFF che condividono tutte le impostazioni sul dominio di calcolo, sulla scansione temporale, sui dati in ingresso e su tutte le parametrizzazioni eccetto quelle individuate al punto 1;
3. confronto dei risultati ottenuti con le misure raccolte ed individuazione della miglior configurazione del modello;
4. affinamento della calibrazione per mezzo di test effettuati su parametri secondari sulla sola simulazione più performante.

Di seguito, nella Sezione 4.2.1, si definisce in che cosa consiste la procedura di calibrazione e qual è il suo scopo ultimo. Le Sezioni a seguire, la 4.2.2 e la 4.2.3, presentano le operazioni preliminari di scelta dei parametri del modello e di scelta delle funzioni obiettivo per guidare la calibrazione stessa. La Sezione 4.2.4, riporta invece i risultati della procedura di calibrazione effettuata sul modello di dispersione. In Sezione 4.2.5 si presenta infine la calibrazione di fine effettuata su parametri secondari del modello CALPUFF.

4.2.1 Procedura e scopo della calibrazione

L'applicazione di un modello numerico matematico, descrittivo di un fenomeno fisico (in questo caso della dispersione degli inquinanti) quando applicato ad un sistema reale porta ad un risultato spesso non soddisfacente per gli scopi predittivi che il modello si propone di raggiungere. I modelli di dispersione degli inquinanti, in particolare, riscontrano spesso difficoltà nella ricostruzione di campi di concentrazione al suolo quando applicati su terreno complesso. La procedura di calibrazione è un

metodo di raffinamento del modello preso in considerazione che consente di migliorarne la prestazione, facendo sì che gli output di tale modello si avvicinino il più possibile a valori osservati in situazioni controllate: il suo scopo ultimo è, quindi, quello di ottenere un modello calibrato che potrà essere utilizzato con più successo per scopi predittivi o di simulazione del fenomeno di interesse, su periodi diversi da quelli di registrazione dei dati, a patto che si possano considerare invariate le condizioni fisiche e climatiche del sistema analizzato. Questo adattamento si ottiene variando i parametri contenuti nel modello, che in genere sono fissati a determinati valori nella sua configurazione standard, in base a precedenti test effettuati su casi di letteratura ben documentati e con ampi e numerosi dataset.

Il problema essenziale di molti modelli di dispersione è l'impossibilità di misurare direttamente, con un buon grado di accuratezza, molti dei parametri in essi contenuti ed i loro valori vanno quindi stimati in base a diverse considerazioni che generano incertezza nel modello stesso: l'ipotesi che sta alla base della procedura di calibrazione è che la discrepanza fra dati misurati e dati simulati sia da attribuire unicamente alla scelta dei valori di tali parametri. Sotto questa ipotesi, quindi, lo scopo della calibrazione diventa scegliere l'insieme di valori dei parametri che massimizza la prestazione del modello.

Quando i parametri compaiono all'interno della funzione costituente del modello, in maniera non lineare, la soluzione per l'ottimizzazione dei risultati va ricercata in maniera iterativa: la procedura di calibrazione consisterà quindi nel calcolo degli output per diversi valori dei parametri e nella scelta, fra questi output, di quello a prestazione migliore. Per poter effettuare tale scelta sarà indispensabile fissare un criterio di riferimento, indice della bontà del modello, che servirà per individuare, fra le tante serie di dati simulati di cui si sarà in possesso, quella che più si avvicina ai valori misurati.

Per procedere quindi alla calibrazione di un modello è necessario effettuare due operazioni preliminari indispensabili: la scelta dei parametri che più generano incertezza nel modello, in genere mediante un'analisi di stabilità, e la scelta di una funzione obiettivo da utilizzare come indice per l'individuazione del miglior output ottenuto.

4.2.2 Analisi di stabilità e scelta dei macro-parametri da calibrare

Il modello di dispersione CALPUFF è un modello complesso all'interno del quale esistono molteplici parametrizzazioni di diversi processi. Per effettuare quindi un processo di calibrazione computazionalmente sostenibile ed efficace nei risultati è necessario procedere a selezionare quali dei tanti parametri del modello siano i più

rilevanti, ovvero producano più differenze nei risultati finali: tale procedura viene detta analisi di stabilità. I parametri individuati come più rilevanti andranno fatti variare nella procedura di calibrazione, mentre gli altri verranno mantenuti costanti sui valori fissati di default nel modello in base al contesto di applicazione.

Essendo CALPUFF un modello applicabile per molteplici e diverse applicazioni, non solo presenta molte parametrizzazioni per molti processi da descrivere, ma addirittura molteplici e alternative parametrizzazioni per la descrizione di ciascun processo coinvolto. Per questo motivo, la presente calibrazione è stata effettuata non su singoli parametri fisici, ma su macro-parametri che selezionano con quale approccio descrivere i processi. In particolare, il modello CALPUFF è risultato particolarmente sensibile, in applicazioni in contesto montano, a due macro-parametri che stabiliscono: (i) la modalità di emissione dei puff e (ii) la procedura di calcolo dei coefficienti di dispersione.

Il modello CALPUFF semi-Lagrangiano Gaussiano a puff rappresenta i rilasci continui dalle diverse fonti come un numero discreto di rilasci contenenti una prefissata quantità di inquinanti/traccianti. La modalità di emissione dei puff può essere simulata con due diversi schemi: mediante la rappresentazione dei rilasci con puff Gaussiani sferici (simmetrici radialmente, schema di default) oppure mediante la rappresentazione dei rilasci con puff oblungi, allungati nella direzione principale del vento.

Il secondo macro-parametro individuato stabilisce invece lo schema di calcolo utilizzato per ottenere i coefficienti di dispersione orizzontale σ_y e verticale σ_z . Tali quantità regolano l'intensità della dispersione lungo le rispettive direzioni, per ciascun puff rilasciato nel dominio. Le due principali procedure implementate in CALPUFF per il calcolo di queste quantità sono: il calcolo di σ_y e σ_z a partire dalle classi di stabilità di Pasquill-Gifford ricavate dalle informazioni meteorologiche a disposizione in ciascuna cella (schema di default); il calcolo di σ_y e σ_z in funzione delle deviazioni standard del vento in orizzontale e verticale, ricavate da grandezze scala meteorologiche dello strato limite calcolate cella per cella (lunghezza di Monin-Obukhov, velocità di attrito, velocità convettiva, etc.).

La calibrazione del modello è quindi stata effettuata modificando gli schemi relativi ai due macro-parametri selezionati e valutando i risultati rispetto alle misure raccolte, come presentato in Sezione 4.2.5.

4.2.3 Individuazione degli indici di valutazione delle simulazioni

Per procedere alla calibrazione è necessario stabilire a priori quali siano i criteri di valutazione della performance delle diverse simulazioni che si andranno a testare.

Una volta estratti dai risultati di ogni simulazione i valori modellati di concentrazione al suolo corrispondenti (per posizione e istante) a ciascuna misura raccolta, si è in possesso di diverse serie modellate da confrontare con la serie osservata: fra queste sarà necessario scegliere la migliore, ovvero quella che minimizza gli errori rispetto alle misure. Nella presente analisi è stata effettuata una valutazione di tipo statistico, basata su cinque indici (Chang & Hanna, 2004) di seguito definiti. Nelle equazioni, O_i sono gli i -esimi valori osservati di concentrazione al suolo, M_i^s sono gli i -esimi valori modellati dalla s -esima configurazione di CALPUFF testata ed N è il numero totale di campioni raccolti, nonché il numero totale di risultati della singola simulazione considerati.

- Media osservata VS media modellata:

$$\bar{O} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i \quad \text{e} \quad \overline{M^s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i^s$$

- Correlazione:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(M_i^s - \overline{M^s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i^s - \overline{M^s})^2}}$$

- Fractional BIAS:

$$FB = 2 \frac{\bar{O} - \overline{M^s}}{\bar{O} + \overline{M^s}}$$

- Errore quadratico medio normalizzato:

$$NMSE = \frac{\overline{(M_i^s - O_i)^2}}{\overline{M^s} \bar{O}} = N \frac{\sum_{i=1}^N (M_i^s - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N M_i^s \sum_{i=1}^N O_i}$$

- Fattore2: rappresenta la frazione dei valori modellati che ricadono in un intervallo compreso fra un mezzo e due volte le osservazioni

$$f^2 = \frac{1}{N} (\#M_i : 0.5 \leq \frac{M_i}{O_i} \leq 2)$$

La serie di dati osservati O_i utilizzata in fase di calibrazione è rappresentata da tutti i dati di concentrazione di tracciante al suolo raccolti durante la campagna di misura del 2017, complessivamente quindi composta da 79 valori misurati.

In Tabella 4.2 sono riassunte le caratteristiche dei campioni disponibili. La simulazione più performante sarà quella, fra le simulazioni testate, che presenterà i migliori valori per gli indici statistici selezionati, ovvero: media modellata più

Tabella 4.2: Riassunto delle caratteristiche della serie di valori misurati disponibile per la procedura di calibrazione.

Media temporale	Strumento	Nr. campioni
60 min	Bottiglie	34
20 min	Bottiglie	21
25 min	Sacchetti	1
15 min	Sacchetti	4
10 min	Sacchetti	8
5 min	Sacchetti	11
TOT		79

simile alla media osservata, massima correlazione, minori fractional BIAS ed errore quadratico medio normalizzato, e massimo fattore².

4.2.4 Calibrazione del modello sui macro-parametri

Le simulazioni CALPUFF eseguite per la calibrazione del modello sui macro-parametri individuati sono, complessivamente, quattro. Tutte le simulazioni condividono le stesse impostazioni in termini di definizione del dominio di calcolo, risoluzioni orizzontale e verticale, passo temporale, fornitura delle condizioni al contorno e passaggio dei dati meteorologici in ingresso.

Le simulazioni di dispersione sono state effettuate su un lasso temporale che copre il giorno dei rilasci dalle ore 0600 UTC (ora di inizio del primo rilascio) e le 1700 UTC (circa 5 ore dopo il termine del secondo rilascio). Il camino dell'impianto di termovalorizzazione è stato simulato come una fonte puntuale, alla quota di 60 m sopra il suolo (altezza del camino), che rilascia per tutta la durata dei rilasci una concentrazione costante, misurata a camino durante gli esperimenti. Le caratteristiche di entrambi i rilasci come modellate nelle simulazioni effettuate sono riportate in Tabella 4.3.

Ciò che le distingue sono unicamente le parametrizzazioni utilizzate per la modalità di emissione dei puff (sferici o oblungi) e per il calcolo dei coefficienti di dispersione (da classi di stabilità o da grandezze scala dello strato limite): le possibili combinazioni di queste opzioni sono quindi, complessivamente, 4.

Tabella 4.3: Riassunto delle principali caratteristiche dei due rilasci di tracciante effettuati nella campagna di misura del 2017 come modellati nelle simulazioni di dispersione con CALPUFF.

Rilascio	Ora [LST]	Durata [h]	Massa di tracciante rilasciata [kg]	Temperatura [°C]	Velocità d'uscita [m s⁻¹]
1	07:00	1	150	140	7.9
2	12:45	1.5	450	140	7.8

Tabella 4.4: Combinazioni di parametrizzazioni utilizzati per ciascuna simulazione CALPUFF in fase di calibrazione del modello (P-G: classi di Pasquill-Gifford; S-L: grandezze scala dello Strato Limite)

		Coefficienti di dispersione	
		da P-G	da S-L
Emissione	Puff	Sim1	Sim2
	Slug	Sim3	Sim4

I dati meteorologici derivanti dalla simulazione del modello WRF vengono passati a CALPUFF tramite il pre-processore CALMET, che fornisce input meteorologici con cadenza oraria. La risoluzione orizzontale della simulazione CALPUFF è di 300 m, pari a quella utilizzata per il modello WRF: in questo modo, il pre-processore CALMET non interviene come interpolatore sui campi meteorologici a disposizione e quindi non introduce incertezze aggiuntive. Per quanto riguarda la risoluzione verticale, il modello CALPUFF è stato impostato su 10 livelli verticali nei primi 300 m dal suolo, con il primo livello a 20 m. Il passo temporale utilizzato è di 5 min.

Le quattro simulazioni effettuate con CALPUFF si distinguono fra loro per i macro-parametri selezionati e la loro combinazione. In particolare, in Tabella 4.4, si riportano le opzioni selezionate per le varie simulazioni, numerate da 1 a 4: la combinazione di macro-parametri consigliata dal manuale di applicazione del modello è evidenziata in blu e corrisponde alla simulazione 1. Con queste impostazioni si sono effettuate le quattro simulazioni CALPUFF che restituiscono quattro diversi risultati in termini di concentrazioni al suolo.

In Figura 4.6 si riporta un confronto qualitativo delle concentrazioni al suolo ottenute mediante le diverse simulazioni: le immagini mostrano rilevanti differenze non solo in termini di valori delle concentrazioni al suolo, ma anche di aree interessate dalla ricaduta del tracciante e di velocità di dispersione del tracciante. Dalle istantanee riportate si intuisce come il macro-parametro più rilevante sia quello relativo al calcolo dei coefficienti di dispersione: le simulazioni sono infatti simili a coppie, che condividono lo stesso calcolo dei coefficienti di dispersione. L'effetto della modalità di rilascio, a puff sferici od oblungi, ha un effetto minore, ma pur sempre rilevante. Per ottenere una valutazione oggettiva della prestazione di ciascuna simulazione, si è proceduto all'estrazione dei valori simulati corrispondenti a ciascuna misura e al calcolo degli indici statistici di cui alla Sezione 4.2.3. I risultati ottenuti per ciascuna simulazione vengono riportati in Tabella 4.5, in cui è evidenziato (in blu) il miglior valore ottenuto per ciascun indice.

Le simulazioni che presentano valori migliori per il diversi indici statistici sono la simulazione 2 e la simulazione 4: la simulazione 2 presenta i migliori valori per

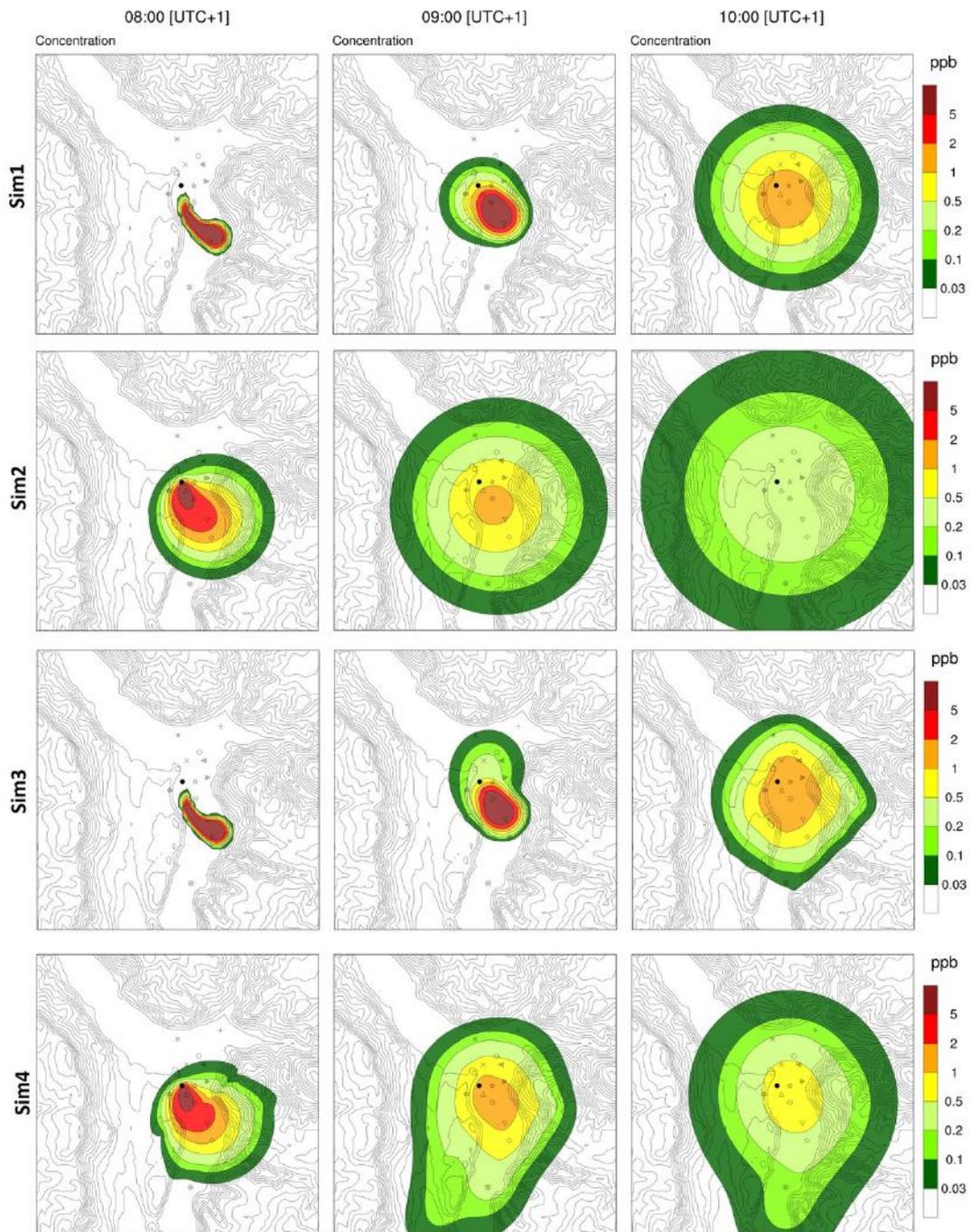


Figura 4.6: Concentrazioni al suolo (mediate su 5 min) simulate dalle quattro simulazioni CALPUFF testate (righe): prima colonna ore 8:00 LST (un'ora dopo l'inizio del primo rilascio), seconda colonna ore 9:00 LST, terza colonna ore 10:00 LST.

media simulata e correlazione dei dati, mentre la simulazione 4 presenta i migliori valori per errore quadratico medio normalizzato e fattore 2. La simulazione 3 è più performante rispetto alle altre solamente in termini di fractional BIAS, e presenta una rilevante sovrastima della media simulata rispetto alle osservazioni e correlazio-

Tabella 4.5: Indici statistici calcolati per ciascuna simulazione di dispersione effettuata con CALPUFF in fase di calibrazione. I valori in blu evidenziano il miglior valore ottenuto per ciascun indice.

	\bar{O}	\bar{M}	\bar{R}	\bar{FB}	\overline{NMSE}	f^2
Sim1	900	1075	-0.07	0.18	11.9	0.23
Sim2	900	927	0.12	0.03	8.31	0.20
Sim3	900	1119	-0.08	0.22	12.6	0.23
Sim4	900	995	0.11	0.10	7.76	0.28

ne molto bassa. La simulazione 1 ha una prestazione simile alla 3. L'analisi di tali risultati permette di concludere che, dal punto di vista statistico, le migliori simulazioni sono quelle che utilizzano il calcolo dei coefficienti di dispersione a partire dalle grandezze scala dello strato limite (lunghezza di Monin Obukhov, velocità di attrito, velocità convettiva, etc.). Tale parametrizzazione consente infatti di ottenere valori di concentrazione media modellata più vicini alle misure, nonché valori più vicini al valore di riferimento in termini di R ; FB e $NMSE$. La valutazione statistica non consente invece di stabilire quale, fra le simulazioni 2 e 4, presenti la prestazione più elevata: ciascuna di esse, infatti, presenta valori migliori per due indici statistici sui cinque presi in considerazione. Per effettuare tale scelta è stata quindi effettuata una valutazione di tipo qualitativo. Il rilascio di puff oblungi genera zone di ricaduta che risentono maggiormente della direzione del vento nel punto di rilascio e di transizione del puff: tale proprietà risulta di particolare importanza in un ambiente a terreno complesso come quello di applicazione del presente studio. In aggiunta, la concentrazione media modellata e la persistenza di concentrazioni elevate ottenute con tale configurazione (simulazione 4) sono maggiori rispetto a quelle della simulazione 2: operando questa scelta, nonostante le misure raccolte si avvicinasero di più alla media calcolata nella simulazione 2, si effettua quindi una decisione a favore di sicurezza.

4.2.5 Calibrazione di dettaglio sui parametri secondari

Una volta individuata la configurazione del modello CALPUFF più performante, si è effettuata un'ulteriore procedura di calibrazione su parametri secondari del modello, che nel loro complesso controllano gli algoritmi del calcolo dei profili di stabilità atmosferica. I risultati ottenuti con le varie simulazioni eseguite non hanno presentato differenze fra loro rilevanti e hanno quindi portato alla scelta di mantenere i valori di default impostati nel modello. La configurazione più performante è stata quindi individuata nella simulazione 4 e la stessa è stata utilizzata per le applicazioni della catena modellistica a scala annuale (Capitolo 5) e per la riproduzione di ipotetici eventi accidentali (Capitolo 6).

CAPITOLO 5

Valutazione delle concentrazioni medie annue

Nel presente Capitolo vengono presentate le simulazioni annuali effettuate con la catena modellistica WRF-CALMET-CALPUFF calibrata, per riprodurre la dispersione delle emissioni del termovalorizzatore in condizioni di normale regime di funzionamento.

Per effettuare tali simulazioni si è scelto come anno di riferimento il 2016, anno meteorologicamente rappresentativo e per il quale erano disponibili molti dati meteorologici (compresi quelli del profilatore termico) e l'intera serie di dati SME dei rilasci a camino (con cadenza semi-oraria). L'anno 2016 è stato quindi simulato per intero sulla conca di Bolzano sia con il modello meteorologico, sia con il modello di dispersione degli inquinanti.

Scopo ultimo di tale analisi è quello di ottenere delle mappe di concentrazione media annua (Allegato tecnico 1) e, a seconda degli inquinanti, massima giornaliera (Allegato tecnico 2) o massima oraria (Allegato tecnico 3) di supporto alla eventuale dislocazione sul territorio di una rete di stazioni di monitoraggio per il controllo della ricaduta delle emissioni del termovalorizzatore nella Conca di Bolzano.

Nelle Sezioni a seguire si riportano: le caratteristiche tecniche della simulazione meteorologica annuale svolta con il modello WRF (Sezione 5.1), le caratteristiche tecniche della simulazione annuale di dispersione degli inquinanti svolta con la suite di modelli CALMET/CALPUFF (Sezione 5.2); la discussione sui principali risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche in termini di concentrazioni al suolo (Sezione 5.3).

5.1 Simulazioni meteorologiche di lungo periodo

La simulazione meteorologica di lungo periodo è stata effettuata con il modello WRF (Sezione 2.1), versione 3.8.1, con 4 domini annidati (Figura 5.1) ed assimilazione oraria dei dati misurati nel dominio più interno. Il dominio esterno risolve i campi

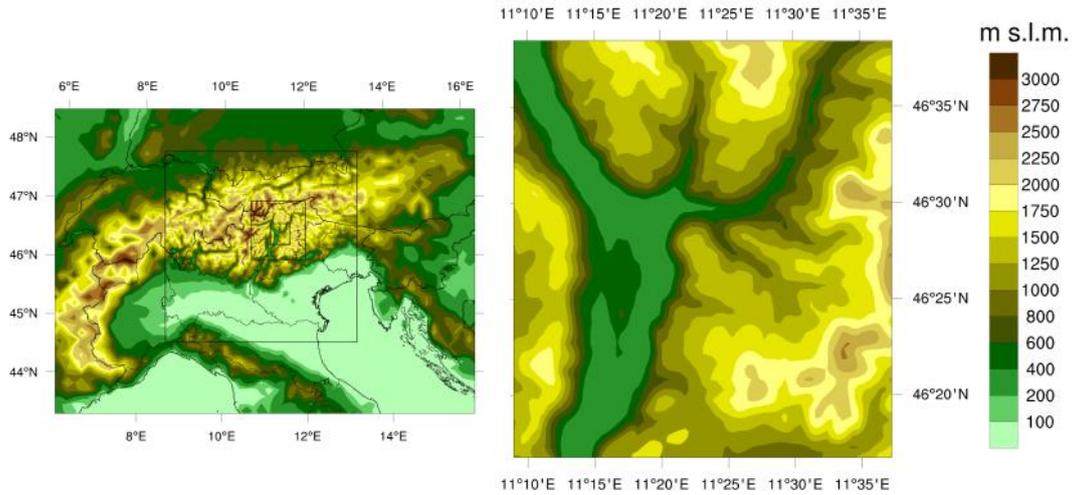


Figura 5.1: Domini innestati nel modello WRF per la simulazione annuale, dal Nord Italia fino alla Conca di Bolzano, con le corrispondenti elevazioni.

meteorologici su una griglia orizzontale di 13.5 km, mentre nel dominio più interno si raggiunge una risoluzione di 500 m (Tabella 5.1). Le condizioni iniziali e al contorno fornite alla simulazione sono costituite dai dati NCEP GFS (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3/>), a cadenza di 6 ore e con risoluzione di 0.25 gradi (circa 27 km). La griglia verticale della simulazione è composta da 62 livelli verticali distribuiti in maniera tale che la risoluzione sia maggiore vicino al suolo dove occorre riprodurre più accuratamente i processi di scambio con le superfici e di trasporto, e vada via via riducendosi a quote superiori: nei primi 1000 m sopra il suolo sono presenti 22 livelli, con uno spessore corrispondente di circa 47 m.

La simulazione copre l'intero anno 2016, ed è stata effettuata con passo temporale adattivo, regolato automaticamente dal modello per evitare di incorrere in problemi di instabilità numerica.

Data l'elevata risoluzione della griglia di calcolo raggiunta nel dominio più interno, è necessario fornire al modello dei dati statici in ingresso coerenti con tale risoluzione. Per questo motivo, i dati di elevazione del terreno (*Digital Terrain Model*, DTM, de Ferranti, 2013) e di classificazione di uso del suolo (*Corine Land*

Tabella 5.1: Caratteristiche dei domini annidati nel modello WRF per la simulazione annuale.

Numero del dominio	Risoluzione Orizzontale [km]	Dimensioni in x e y [km]
1	13.5	823.5x621
2	4.5	369x369
3	1.5	105x114
4	0.5	38x41

Cover data riclassificati secondo la IGBP *Land Cover Type Classification*, EEA, 2006; Giovannini et al., 2014a) forniti per questa applicazione hanno, rispettivamente, risoluzione di 30 m e 100 m, coerentemente superiori a quella di calcolo di 500 m.

Per incrementare ulteriormente l'affidabilità dei risultati del modello meteorologico, è stata applicata la tecnica dell'*observational nudging*, ovvero della assimilazione di dati misurati durante l'esecuzione della simulazione. Nella presente analisi sono stati assimilati i dati provenienti da tutte le stazioni meteorologiche presenti nel dominio (14) e dal profilatore termico, con cadenza oraria.

Si sono confrontati i risultati della simulazione così configurata con le misure raccolte nelle principali stazioni meteorologiche della zona. Come già evidenziato in precedenza per la simulazione per la calibrazione di CALPUFF (Sezione 4.2), è importante sottolineare che i confronti presentati sono da leggersi tenendo presente che le misure sono state assimilate dal modello e quindi fornitegli come input.

Nelle Figure 5.2-5.7 viene mostrato il confronto tra le rose del vento ottenute dagli output del modello WRF e dai valori misurati in alcune stazioni adottate come esempio. Si può notare come generalmente ci sia un buon accordo tra misure e valori simulati, sia per le stazioni posizionate sul fondovalle sia per le stazioni in quota. In particolare WRF riproduce più fedelmente i valori misurati nelle stazioni in quota (ad esempio Corno del Renon), dove il campo di vento è determinato in gran parte da forzanti sinottiche e gli effetti locali sono meno importanti. Al contrario, maggiori discrepanze tra modello e misure si sono riscontrate in quelle stazioni in cui gli effetti locali dovuti alla complessità orografica del territorio non sono catturati completamente da WRF. Infatti, nonostante l'alta risoluzione utilizzata per le presenti simulazioni, in alcuni casi alcuni dettagli orografici non sono comunque risolti dal modello, in quanto hanno scale spaziali più piccole della griglia di calcolo.

Si riporta infine, attraverso gli scatterplot alle Figure 5.8-5.11, il confronto tra le temperature a 2 m dal suolo simulate da WRF e misurate in alcune delle stazioni utilizzate per l'assimilazione. Quasi tutti i valori si dispongono lungo la bisettrice, evidenziando un buon accordo tra misure e modello. Tuttavia si può notare che in alcuni casi vi sia una leggera sottostima da parte del modello, soprattutto alle basse temperature.

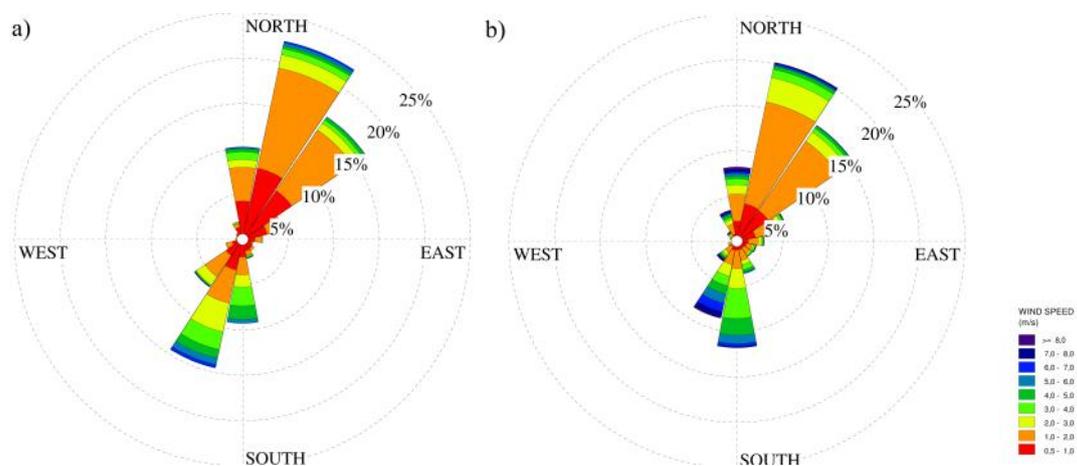


Figura 5.2: Confronto tra le rose del vento relative alla stazione di Bronzolo ottenute a) dalle simulazioni con il modello WRF per l'anno 2016 e b) dai dati misurati nello stesso periodo.

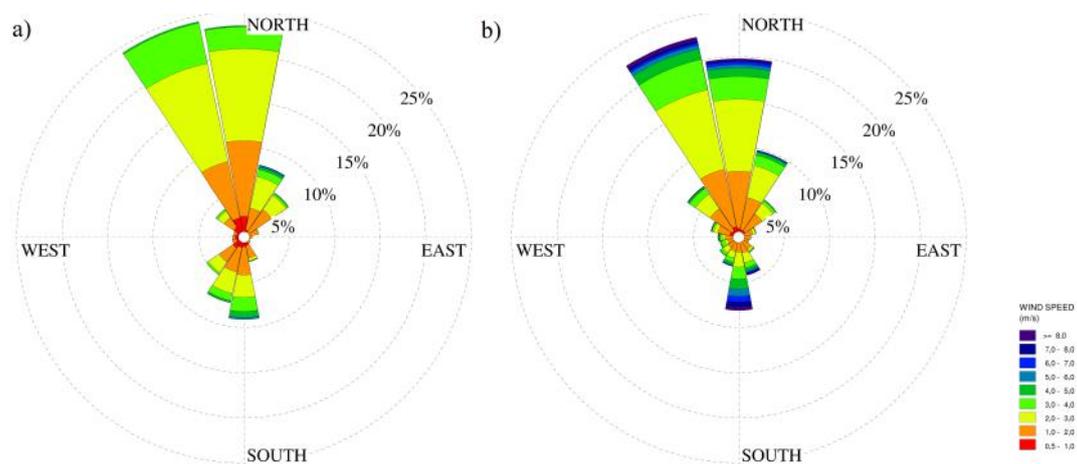


Figura 5.3: Confronto tra le rose del vento relative alla stazione di Caldaro ottenute a) dalle simulazioni con il modello WRF per l'anno 2016 e b) dai dati misurati nello stesso periodo.

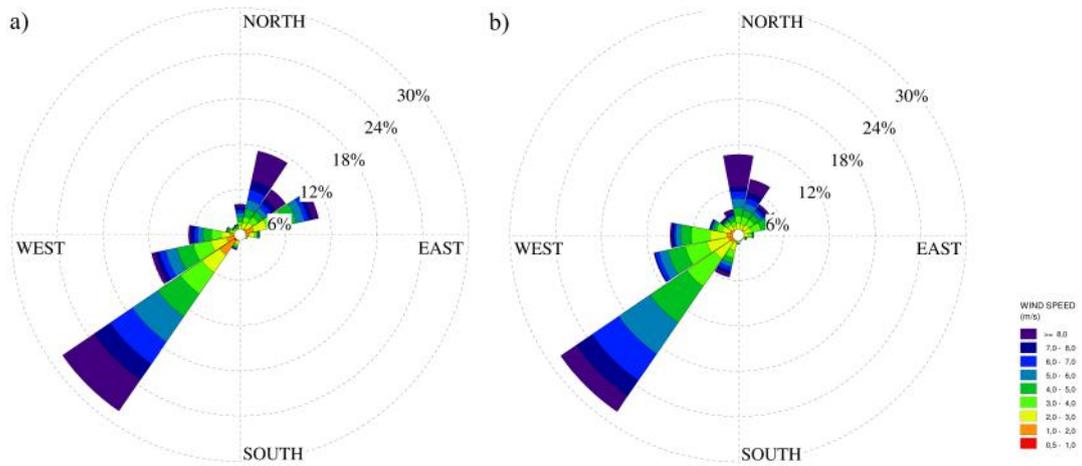


Figura 5.4: Confronto tra le rose del vento relative alla stazione di Corno del Renon ottenute a) dalle simulazioni con il modello WRF per l'anno 2016 e b) dai dati misurati nello stesso periodo.

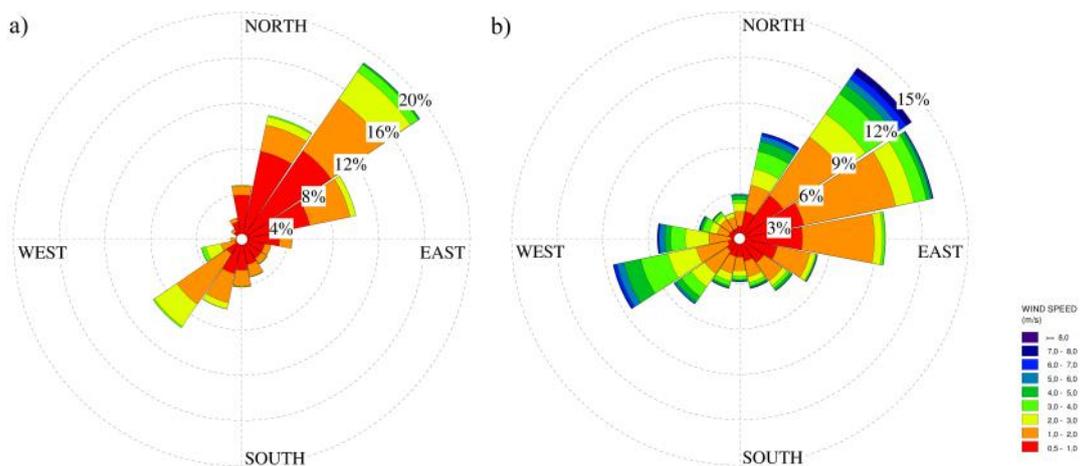


Figura 5.5: Confronto tra le rose del vento relative alla stazione di Fié allo Sciliar ottenute a) dalle simulazioni con il modello WRF per l'anno 2016 e b) dai dati misurati nello stesso periodo.

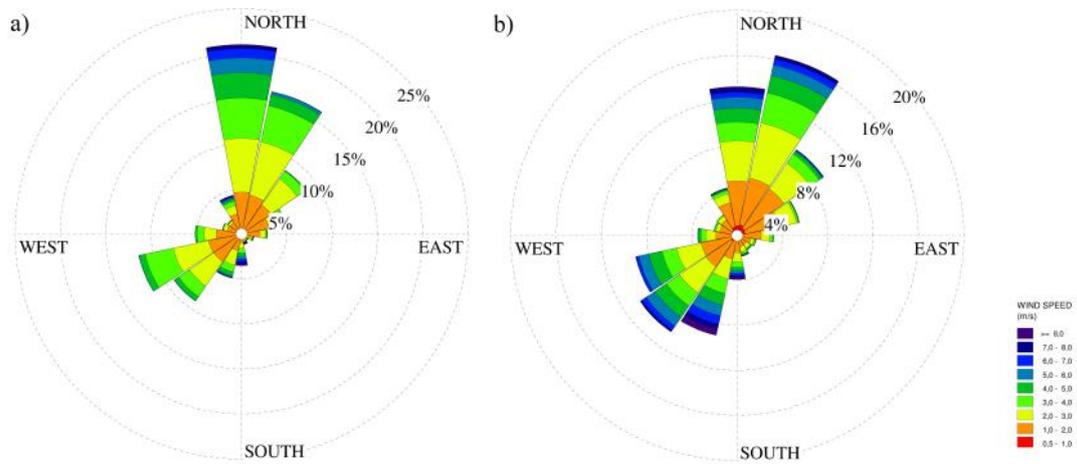


Figura 5.6: Confronto tra le rose del vento relative alla stazione di Nova Ponente ottenute a) dalle simulazioni con il modello WRF per l'anno 2016 e b) dai dati misurati nello stesso periodo.

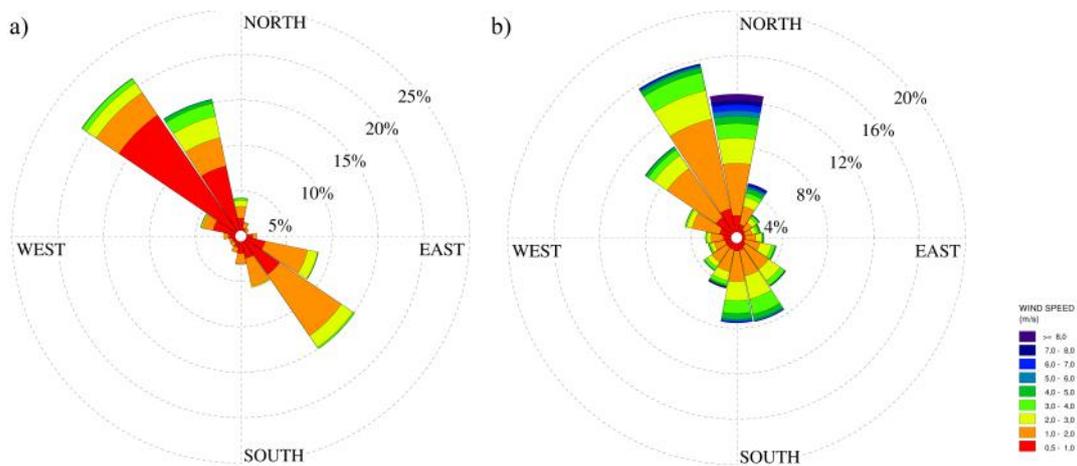


Figura 5.7: Confronto tra le rose del vento relative alla stazione di San Genesio ottenute a) dalle simulazioni con il modello WRF per l'anno 2016 e b) dai dati misurati nello stesso periodo.

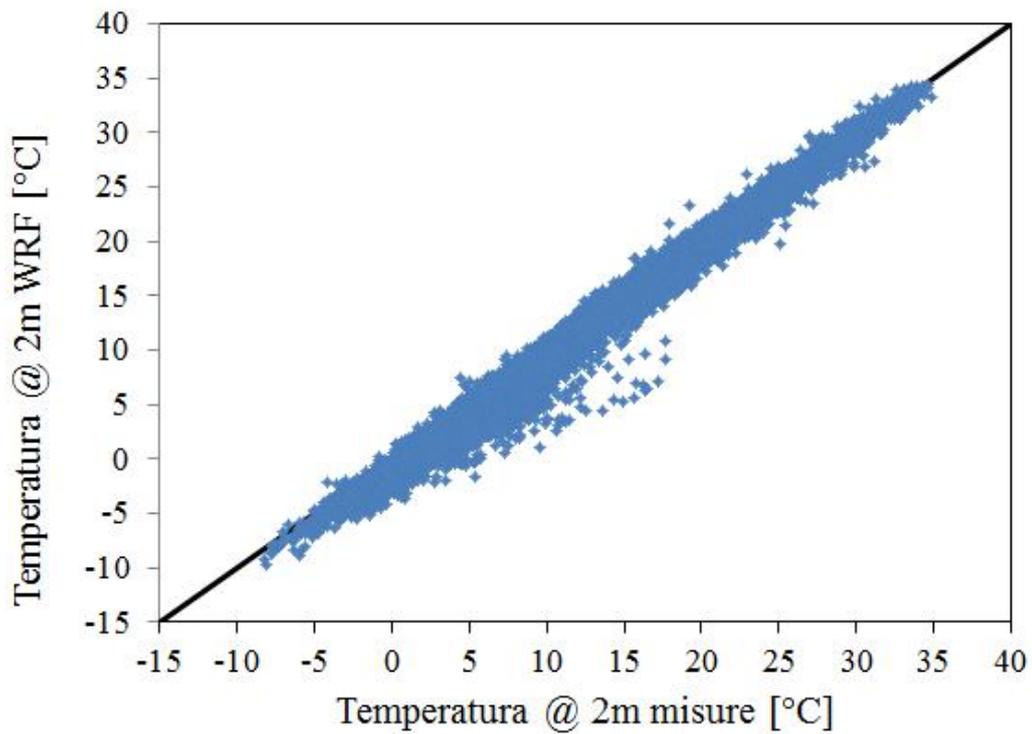


Figura 5.8: Scatterplot dei valori di temperatura a 2 m dal suolo misurati e simulati da WRF per l'anno 2016 per la stazione di Bolzano.

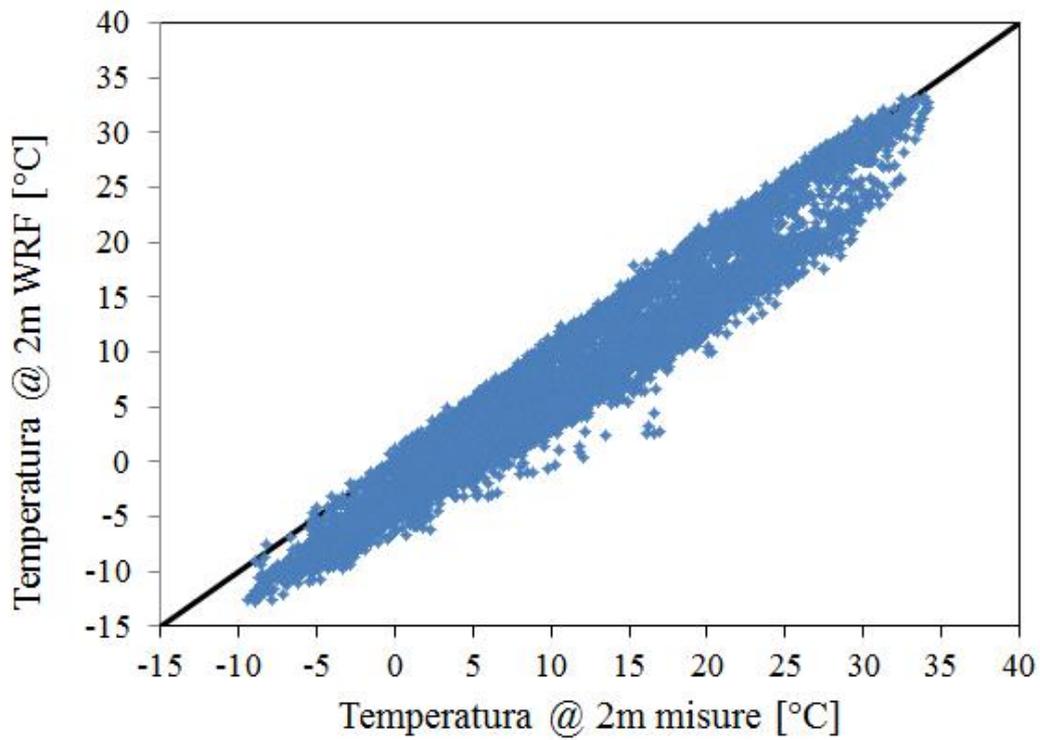


Figura 5.9: Scatterplot dei valori di temperatura a 2 m dal suolo misurati e simulati da WRF per l'anno 2016 per la stazione di Laimburg.

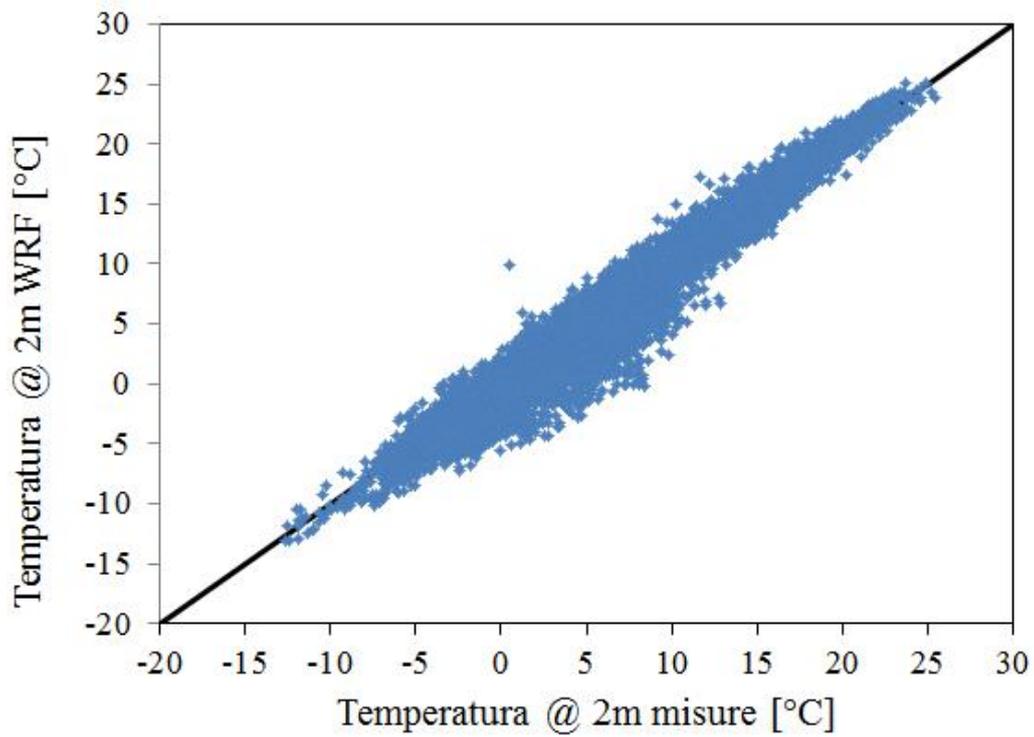


Figura 5.10: Scatterplot dei valori di temperatura a 2 m dal suolo misurati e simulati da WRF per l'anno 2016 per la stazione di Nova Ponente.

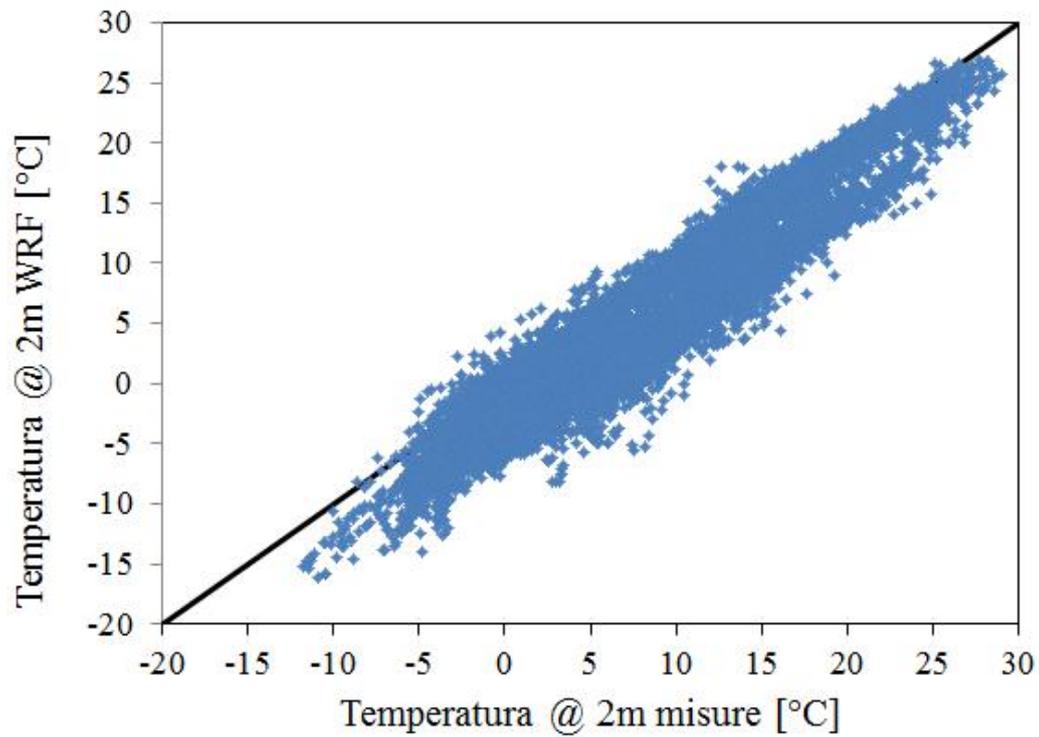


Figura 5.11: Scatterplot dei valori di temperatura a 2 m dal suolo misurati e simulati da WRF per l'anno 2016 per la stazione di San Genesio.

5.2 Simulazioni di dispersione degli inquinanti rilasciati dal termovalorizzatore

La simulazione di dispersione è stata effettuata su un periodo che copre l'intero anno 2016 con i macro-parametri individuati grazie alla procedura di calibrazione di cui al Capitolo 4.

I dati meteorologici derivanti dalla simulazione del modello WRF vengono passati a CALPUFF tramite il pre-processore CALMET, che fornisce input meteorologici orari. La risoluzione orizzontale della simulazione CALPUFF è di 200 m, più elevata rispetto a quella di 500 m del modello WRF: il pre-processore CALMET interviene quindi nell'infittire i campi meteorologici forniti da WRF, provvedendo ad interpolarli sulla griglia di calcolo più fitta. Per quanto riguarda la risoluzione verticale, il modello CALPUFF è stato impostato per avere 10 livelli verticali nei primi 300 m dal suolo, con il primo livello a 20 m. Il passo temporale utilizzato è di 1 h.

Il camino dell'impianto di termovalorizzazione è stato simulato come una fonte puntuale, alla quota di 60 m sopra il suolo (altezza del camino), come per la simulazione dei rilasci 2017. Il camino emette però in questo caso le concentrazioni misurate a camino per tutti gli inquinanti di interesse, nello specifico: ossido di carbonio (CO), carbonio organico totale (COT), acido cloridrico (HCl), mercurio (Hg), ammoniaca (NH₃), ossidi di azoto (NO_x), polveri sottili (PTS), anidride solforosa (SO₂). Le concentrazioni di tali inquinanti sono state ricavate di dati SME pubblicati da Ecocenter per il 2016, con cadenza semi-oraria: i valori utilizzati nel modello CALPUFF sono valori medi orari. Per dare un'indicazione dei valori utilizzati nelle simulazioni, in Tabella 5.2 si riportano i valori di emissione medi mensili e annuali misurati da Ecocenter per il 2016. Anche i dati di portata e della temperatura dei fumi forniti dal sistema SME sono stati utilizzati nelle simulazioni per caratterizzare le emissioni a camino. Tutti gli inquinanti simulati si comportano come sostanze passive, ad eccezione degli NO_x, che vengono trattati come specie reattiva. I risultati per gli inquinanti passivi avranno quindi tutti lo stesso pattern a meno di un fattore di scala, legato alla concentrazione a camino. Per il calcolo degli ossidi di azoto è stata eseguita la metodologia proposta da Romeberg et al. (1996), che consente di ottenere la quota parte di NO e NO₂ a partire dal valore calcolato di NO_x in base a dei coefficienti medi annuali. Nella sezione a seguire vengono presentati i risultati ottenuti dalle simulazioni CALPUFF effettuate.

Tabella 5.2: Emissioni medie mensili e annuali e caratteristiche dei fumi per il 2016 (fonte: report annuale Ecocenter).

	SO ₂ [mg/Nm ³]	HCl [mg/Nm ³]	Hg [μg/Nm ³]	CO [mg/Nm ³]	POLV [mg/Nm ³]	NO _x [mg/Nm ³]	COT [mg/Nm ³]	NH ₃ [mg/Nm ³]	Q fumi [Nm ³ /h]	O ₂ [%]	T fumi [°C]
Gen	3.29	1.17	0.14	0.87	0.4	30.03	1.01	0.6	90962.37	9.24	144.06
Feb	3.47	1.05	0.13	1.39	0.4	30.05	1.01	0.62	87100.15	9.29	143.91
Mar	3	1.05	0.42	1.55	0.4	29.98	0.97	0.61	87362.05	9.37	143.93
Apr	3.15	0.97	0.14	2.08	0.4	30.11	1.08	0.62	89223.39	9.4	143.75
Mag	2.15	0.88	2.18	1.93	0.41	29.93	1.03	0.6	86401.32	9.33	145.24
Giu	3.03	1.11	0.45	2.22	0.41	29.86	1.02	0.66	89766.38	9.55	151.39
Lug	2.91	1.23	0.17	1.8	0.42	30.1	0.96	0.69	98337.96	9.52	159.96
Ago	2.94	1.12	0.12	4.15	0.42	30.17	1.01	0.67	90751.18	9.77	152.17
Set	2.92	1.16	0.13	2.03	0.41	30.03	0.97	0.62	93644.98	10.21	150.72
Ott	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nov	3.38	1.02	0.32	1.79	0.48	29.95	1.04	0.6	112817.6	10.37	143.34
Dic	2.87	1.13	1.46	1.15	0.45	30.05	1	0.56	109947.1	10.47	142.58
Media	3	1.08	0.52	1.9	0.42	30.03	1.01	0.62	94328.67	9.69	147.34

5.3 Risultati

In questa sezione si procede alla presentazione dei risultati ottenuti dalla catena modellistica in termini di concentrazioni al suolo per i diversi inquinanti analizzati. I valori ottenuti dalle simulazioni vengono confrontati con i corrispondenti valori misurati da due diverse centraline di qualità dell'aria, gestite dalla Agenzia Provinciale per l'Ambiente della Provincia Autonoma di Bolzano. Nello specifico vengono utilizzate le misure riportate nel Report Annuale sulla qualità dell'aria 2016 pubblicato dall'Agenzia (Bolzano, 2017) riferite alle seguenti stazioni:

1. Piazza Adriano, Bolzano (codice BZ5), per PM10, NO₂, e CO;
2. via Amba Alagi, Bolzano (codice BZ6), per SO₂.

I valori modellati vengono anche confrontati con i corrispondenti valori limite di legge riportati nel DLgs 155/10.

5.3.1 Concentrazioni medie annue

Le mappe di concentrazione media annua al suolo sono state calcolate per tutti gli inquinanti simulati. Per questioni di brevità si riportano in questa sezione:

1. la mappa del fattore di diluizione, rappresentativa del pattern di concentrazione per tutte le sostanze modellate;
2. la tabella del valore massimo ottenuto nella mappa di concentrazione media annua per ciascun inquinante;
3. le mappe di concentrazione media annua delle PM10 e del biossido di azoto, che costituiscono due degli inquinanti di maggiore interesse per l'impianto analizzato.

Le mappe relative alle concentrazioni medie annue di tutti gli altri inquinanti vengono invece riportate nell'Allegato tecnico 1 della presente relazione.

Il fattore di diluizione rappresenta il fattore scala che consente di calcolare le concentrazioni al suolo di tutte le sostanze passive in funzione della concentrazione di emissione a camino ed è definito come:

$$FD = \frac{\text{concentrazioni aria ambiente}[\mu \text{ gm}^{-3}]}{\text{concentrazione a camino}[\mu \text{ gm}^{-3}]}$$

Poiché le sostanze passive sono soggette a processi dispersivi del tutto analoghi fra loro, il fattore di diluizione costituisce una costante: osservare la mappa del FD

significa quindi studiare il pattern dispersivo valido per tutti gli inquinanti passivi, a meno di un fattore di correzione di scala, pari alla concentrazione a camino. La mappa del fattore di diluizione viene presentata in Figura 5.12.

Il pattern di ricaduta al suolo medio annuo risulta fortemente influenzato dall'orografia complessa del territorio: si riscontrano infatti zone a maggior impatto lungo l'asse della Val d'Adige, sia a nord-ovest, sia a sud dell'impianto. L'area di ricaduta ottenuta sull'intero dominio è perfettamente compatibile con il regime di venti che caratterizza la Conca (descritto nel Capitolo 1 della presente relazione): i venti termici di risalita e di drenaggio che si realizzano nelle valli tendono a spostare il pennacchio in uscita dal camino alternativamente a nord o a sud dell'impianto; la flessione delle zone di ricaduta verso nord ovest è il risultato sia dell'incanalamento dei venti provenienti da sud nella parte alta della Val d'Adige, sia dell'effetto del *valley-exit jet* della Val d'Isarco che, spirando da nord est, scherma parzialmente la città di Bolzano dalla dispersione dei contaminanti in direzione della città.

L'area di massima ricaduta è, nello specifico, molto vicina all'impianto di termovalorizzazione e identificabile come quella di Castel Firmiano, ovvero della punta più a nord del Monte di Mezzo. Tale zona risulta particolarmente esposta alle emissioni del termovalorizzatore, essendo sopraelevata rispetto al fondovalle e in traiettoria di impatto del pennacchio in condizioni di vento da sud. Per quanto riguarda i valori del fattore di diluizione, si può notare come i valori massimi ottenuti siano pari a circa $7.8 \cdot 10^{-5}$, corrispondenti a $0.078 \mu\text{g m}^{-3}$ di contaminante in aria ambiente per ogni singolo mg m^{-3} emesso a camino. Le concentrazioni ottenute per i singoli inquinanti rilasciati dall'impianto sono quindi molto basse, grazie alla combinazione di numerosi e fattori concorrenti:

1. le concentrazioni di contaminanti già molto ridotte all'emissione a camino a seguito dei trattamenti di abbattimento;
2. le elevate temperatura e quantità di moto proprie del pennacchio in fase di rilascio, che consentono un rilevante innalzamento della sorgente virtuale;
3. le condizioni meteorologiche medie annuali della Conca, nella quale si realizzano correnti molto varie, anche ad elevata intensità, con direzioni variabili nel tempo, che evitano la persistenza di ricaduta in un'unica zona del territorio su base annua.

In Tabella 5.3 si riportano i valori massimi di concentrazione al suolo ottenuti per ciascun inquinante, nella zona di Castel Firmiano. Tali valori risultano tutti molto ridotti, in particolar modo quello relativo al mercurio, emesso alla sorgente in quantità inferiori di tre ordini di grandezza rispetto agli altri contaminanti.

In Figura 5.13 si riporta la mappa delle concentrazioni medie annue per le PM10, che ricalca, come accennato, il pattern di dispersione di Figura 5.12. Il valore massimo calcolato per le PM10 è pari $0.01 \mu\text{g m}^{-3}$ e si realizza in corrispondenza della zona di Castel Firmiano. In Tabella 5.4 si riportano i valori di concentrazione media annua ottenuti nel punto di massimo assoluto e in corrispondenza della centralina di qualità dell'aria di riferimento, confrontati con due importanti valori di riferimento: (i) il valore del fondo di PM10 medio annuo misurato dalla stessa centralina di qualità dell'aria (BZ5) per il 2016; e (ii) il valore limite di legge secondo l'Allegato XI del DLgs 155/10 imposto sul valore di concentrazione media annua per le PM10. Il confronto mostra come il contributo dell'impianto al valore di fondo di concentrazione media annua di PM10 corrisponda a circa lo 0.06% del totale, anche in corrispondenza del punto di massima ricaduta: tale percentuale scende notevolmente se il confronto viene fatto in corrispondenza del punto di misura del fondo ambiente, BZ5 (0.002%). Il contributo è ovviamente ancora più piccolo se il confronto viene effettuato rispetto al valore limite di legge, peraltro ampiamente rispettato anche dal valore di fondo. Un confronto del tutto analogo può essere fatto per il biossido di azoto, la cui mappa annuale viene riportata in Figura 5.14: nonostante gli ossidi di azoto siano una sostanza reattiva, il pattern di ricaduta al suolo è analogo a quello delle specie passive, in quanto la formula di Romberg applicata per validare empiricamente la scomposizione di NO_x in NO_2 ed NO introduce essenzialmente un fattore di scala aggiuntivo a quello dipendente dalla emissione a camino. Il valore di concentrazione media annua massimo ottenuto per NO_2 è pari $0.36 \mu\text{g m}^{-3}$, sempre riscontrato nella zona di Castel Firmiano. Tale valore, insieme al valore medio annuo calcolato in corrispondenza di Piazza Adriano (BZ5), può di nuovo essere confrontato con due importanti valori di riferimento: (i) il valore del fondo di NO_2 medio annuo misurato dalla centralina di qualità dell'aria BZ5 per il 2016, e (ii) il valore limite di legge secondo l'Allegato XI del DLgs 155/10 imposto sul valore di concentrazione media annua per NO_2 . Il confronto di tali valori viene riportato in 5.5. Il confronto mostra come il contributo dell'impianto al valore di fondo misurato per NO_2 corrisponda a circa l'1.1% del totale, in corrispondenza del punto di massima ricaduta. Il contributo è ovviamente ancora minore se il confronto viene effettuato nel punto corrispondente alla stazione BZ5, dove il valore medio annuo modellato è di $0.015 \mu\text{g m}^{-3}$ che corrisponde a circa lo 0.05% del fondo misurato. Tale percentuale diminuisce ulteriormente se il confronto viene effettuato rispetto al valore limite di legge, rispettato anche dal valore di fondo.

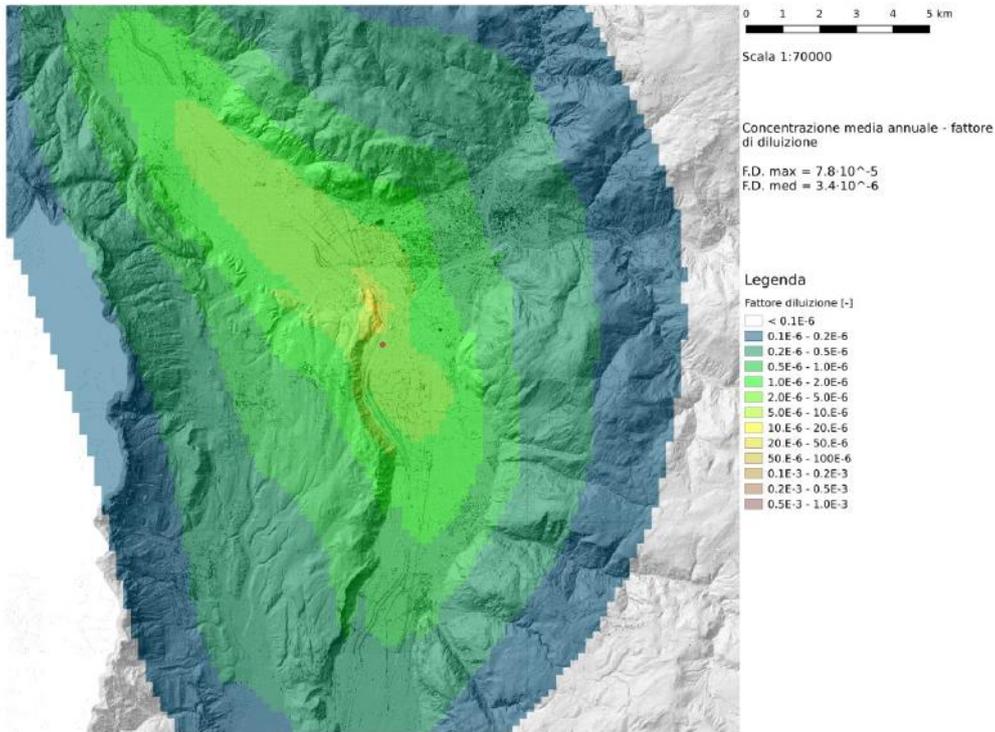


Figura 5.12: Fattore di diluizione per le mappe di concentrazione media annuale sulla Conca di Bolzano.

Tabella 5.3: Concentrazione medie annue massime calcolate per i vari inquinanti emessi a camino

	Emissione [mg Nm ⁻³]	Max [μg Nm ⁻³]
SO ₂	3	0.04
HCl	1.08	0.02
Hg	$5.20 \cdot 10^{-4}$	$1.00 \cdot 10^{-5}$
CO	1.9	0.03
PM10	0.42	0.01
COT	1.01	0.02
NH ₃	0.62	0.01

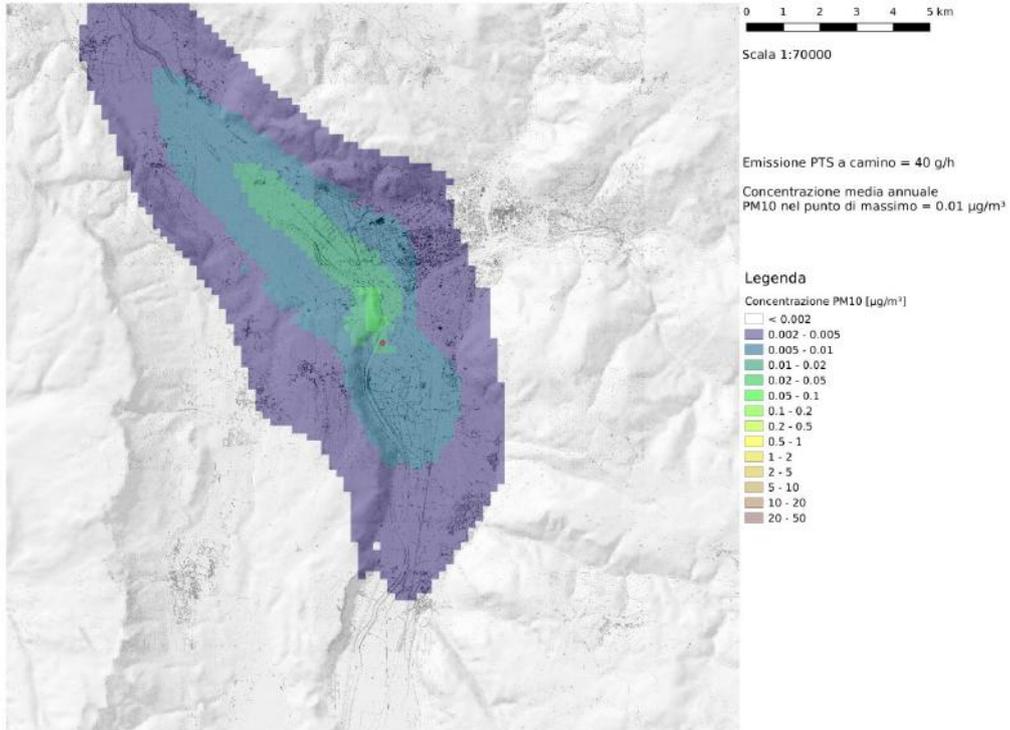


Figura 5.13: Concentrazioni medie annue di PM10 sulla conca di Bolzano.

Tabella 5.4: Confronto fra valori di concentrazione media annua di PM10 calcolata nel punto di massimo (Max assoluto), calcolata in corrispondenza della stazione di qualità dell'aria di riferimento (Mod BZ5), misurato dalla centralina di qualità dell'aria (Mis BZ5) e fissato nell'Allegato XI del DLgs 155/10 come valore limite.

	Max assoluto	Mod BZ5	Mis BZ5	Limite legislativo
PM10 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	0.01	0.0003	17	40

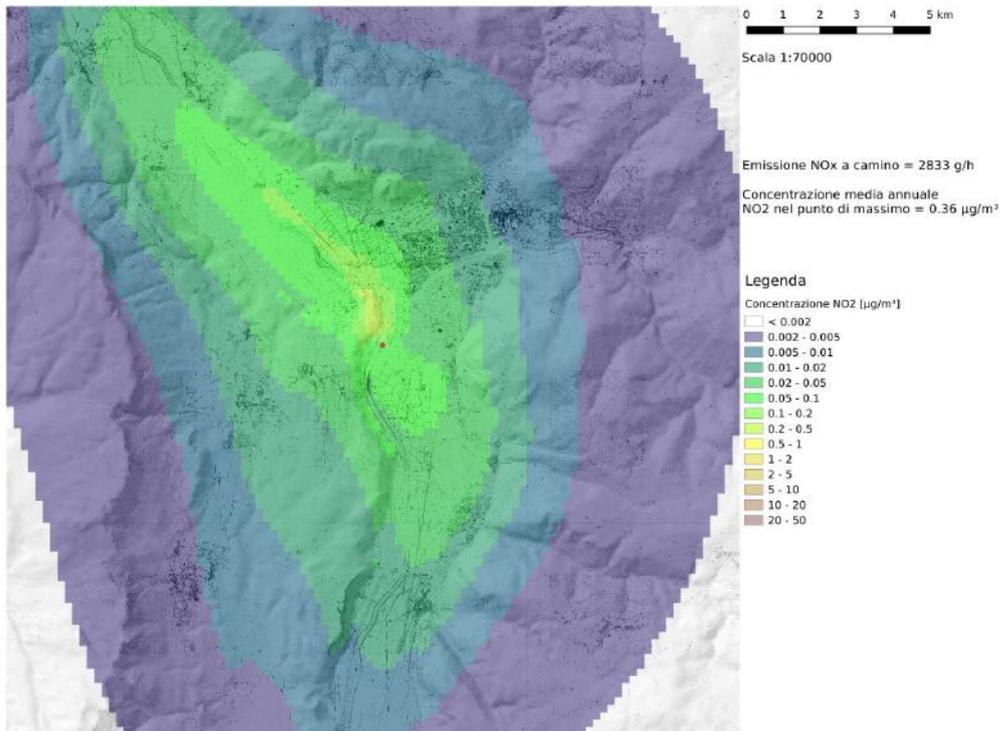


Figura 5.14: Concentrazioni medie annue di NO₂ sulla conca di Bolzano.

Tabella 5.5: Confronto fra valori di concentrazione media annua di NO₂ calcolata nel punto di massimo (Max assoluto), calcolata in corrispondenza della stazione di qualità dell'aria di riferimento (Mod BZ5), misurata dalla centralina di qualità dell'aria APPA (Mis BZ5) e fissato nell'Allegato XI del DLgs 155/10 come valore limite.

	Max assoluto	Mod BZ5	Mis BZ5	Limite legislativo
NO ₂ [$\mu\text{g m}^{-3}$]	0.36	0.015	31.3	40

5.3.2 Concentrazioni massime giornaliere

Per le PM10 si è analizzata anche la mappa della distribuzione dei massimi giornalieri, che riporta, per ciascun punto, il valore massimo giornaliero realizzatosi su tutto l'arco dell'anno. Tale distribuzione, riportata in Figura 5.15, non si realizzerà mai concretamente, in quanto i valori massimi riportati non si sono realizzati tutti contemporaneamente nella simulazione effettuata. Nonostante questo, tale composizione risulta un utile riferimento per confrontare il contributo dell'impianto al valore di concentrazione massima giornaliera sulla conca, vincolato anch'esso da limiti di legge. Tabella 5.6 vengono messi a confronto il valore massimo, fra i valori massimi modellati (che si realizza in un punto nella zona di Castel Firmiano), il valore massimo giornaliero misurato dalla stazione BZ5 e il limite di legge da DLgs 155/10, da non superarsi più di 35 volte l'anno.

Come mostrato dal confronto di Tabella 5.6, il valore misurato risulta molto inferiore rispetto al corrispondente valore misurato dalla centralina BZ5. È inoltre importante sottolineare che, in questo confronto:

1. i due massimi confrontati non si sono realizzati nello stesso luogo;
2. i due massimi confrontati non si sono verificati contemporaneamente: non è infatti detto che alla condizione più critica misurata in Piazza Adriano corrisponda la condizione più critica a Castel Firmiano.

Il confronto riportato va quindi considerato come il peggior scenario possibile: con queste premesse e in queste ipotetiche condizioni, la percentuale di contributo del termovalorizzatore al valore massimo giornaliero è pari a 0.06%.

Un'analoga analisi sui massimi giornalieri può essere effettuata per il biossido di zolfo, SO₂, anch'esso soggetto a vincolo di legge su questo periodo di mediazione. In Figura 5.16 si riporta la mappa relativa a tale analisi. Il confronto fra valore massimo modellato e massimo misurato indica una differenza di un ordine di grandezza fra le due quantità, corrispondente ad una percentuale di contributo dell'impianto sul totale misurato del 5% (Tabella 5.7). Tale percentuale, più elevata rispetto a quelle fin qui riscontrate va letta con le dovute precisazioni. Anzitutto, valgono tutte le considerazioni fatte per le corrispondenti mappe di PM10, ovvero che il confronto diretto di questi due valori è il risultato del caso più sfavorevole che può essere costruito sulla base dei dati a disposizione, caso peraltro che non si realizza nella realtà. In secondo luogo, risulta in questo caso importante osservare la differenza esistente fra il valore del fondo misurato e quello imposto come limite legislativo: il valore del fondo risulta un ordine di grandezza inferiore a quello imposto dal legislatore. Ciò significa che la quota parte attribuibile al termovaloriz-

zatore, qualora si dovesse raggiungere (o superare) il valore limite di legge, sarebbe al più pari allo 0.2%.

La stessa analisi viene di seguito riproposta per il monossido di carbonio, CO, normato in termini di concentrazione massima giornaliera su 8 ore. La mappa relativa alle concentrazioni calcolate seguendo la normativa viene riportata in Figura 5.17, mentre in 5.8 si riporta il confronto fra valori ottenuti dalla simulazione, valori misurati e limite imposto dal DLgs155/10. I valori riportati indicano differenze di tre ordini di grandezza fra valore calcolato e valore misurato, e valore limite: il contributo del termovalorizzatore alla quota di tale contaminante è pertanto molto piccolo.

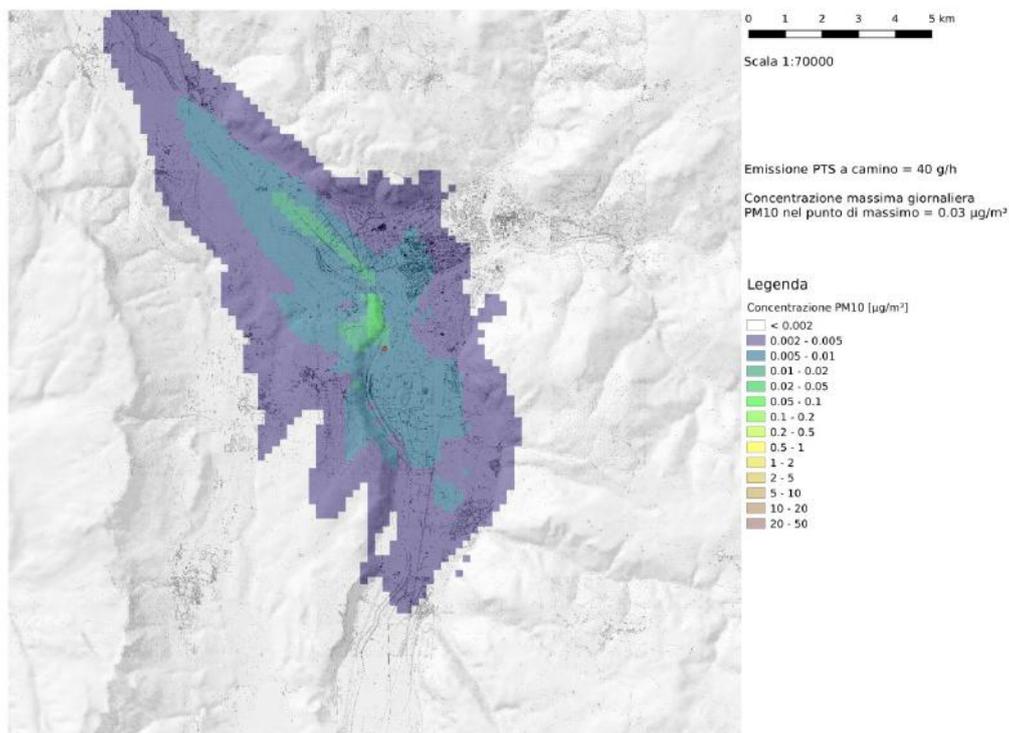


Figura 5.15: Composizione dei massimi giornalieri di PM10 ottenuti in ciascun punto del dominio sull'intero anno 2016.

Tabella 5.6: Confronto fra valori di concentrazione massima giornaliera di PM10 calcolato nel punto di massimo (Max assoluto), misurato dalla centralina di qualità dell'aria APPA (Max Mis BZ5) e fissato nell'Allegato XI del DLgs 155/10 come valore limite da non superarsi più di 35 volte l'anno.

	Max assoluto	Max Mis BZ5	Limite legislativo
PM10 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	0.03	>50	50

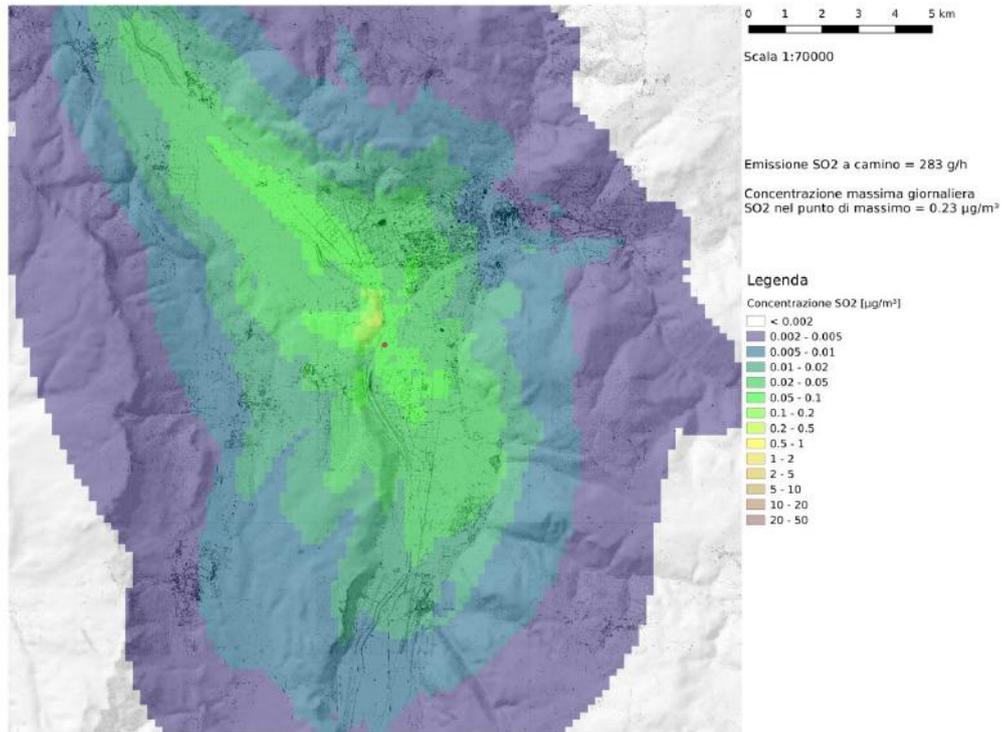


Figura 5.16: Composizione dei massimi giornalieri di SO₂ ottenuti in ciascun punto del dominio sull'intero anno 2016.

Tabella 5.7: Confronto fra valori di concentrazione massima giornaliera di SO₂ calcolato nel punto di massimo (Max assoluto), misurato dalla centralina di qualità dell'aria APPA (Max Mis BZ6) e fissato nell'Allegato XI del DLgs 155/10 come valore limite da non superarsi più di 3 volte l'anno.

	Max assoluto	Max Mis BZ6	Limite legislativo
SO ₂ [$\mu\text{g m}^{-3}$]	0.23	4.6	125

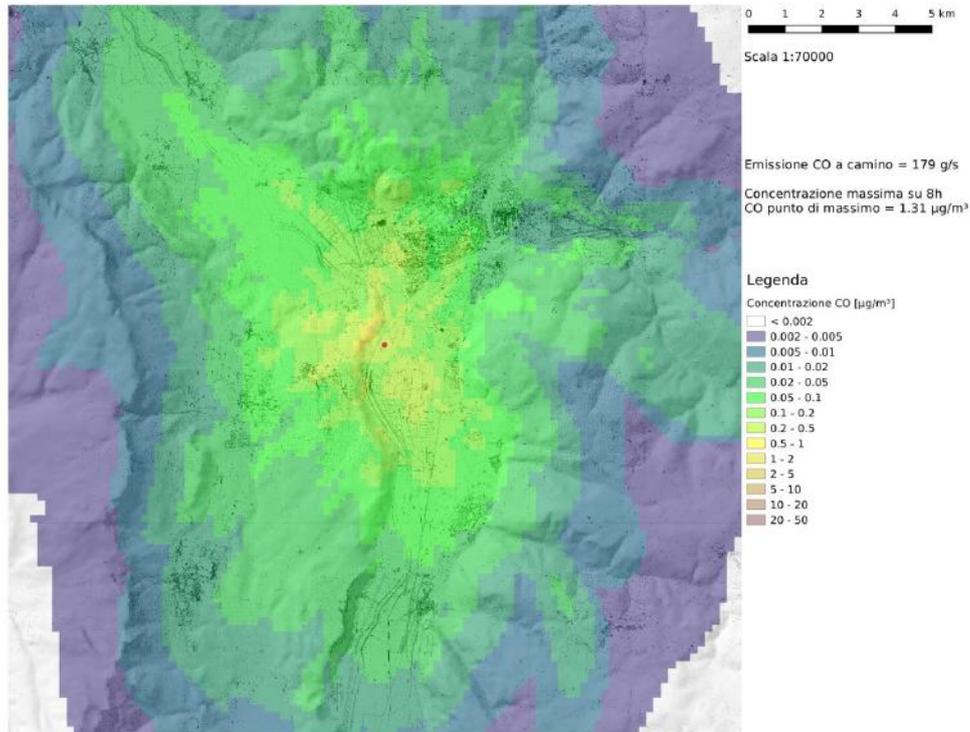


Figura 5.17: Composizione dei massimi giornalieri su 8 ore di CO ottenuti in ciascun punto del dominio sull'intero anno 2016.

Tabella 5.8: Confronto fra valori di concentrazione massima giornaliera su 8 ore di CO calcolato nel punto di massimo (Max assoluto), misurato dalla centralina di qualità dell'aria APPA (Max Mis BZ5) e fissato nell'Allegato XI del DLgs 155/10 come valore limite da non superarsi.

	Max assoluto	Max Mis BZ5	Limite legislativo
CO [$\mu\text{g m}^{-3}$]	1.31	$1.7 \cdot 10^3$	10^4

5.3.3 Concentrazioni massime orarie

Le distribuzioni dei massimi orari sono state analizzate per i contaminanti soggetti a valori limiti da normativa su queste categorie di concentrazione: NO₂ ed SO₂. La Figura 5.18 riporta, per ciascun punto, il valore massimo orario di NO₂ calcolato su tutto l'arco dell'anno simulato, costituendo quindi la composizione dei peggiori scenari di tutti i punti del dominio. Si noti che il pattern delle mappe dei valori massimi orari è molto più distribuito rispetto a quello riscontrato per i valori medi annuali: i massimi di concentrazione oraria, infatti, risentono più del valore medio annuo delle condizioni meteorologiche istantanee in cui si realizzano. I valori ottenuti, come atteso, sono più elevati di quelli della mappa media annua, e raggiungono $19.3 \mu\text{g m}^{-3}$ nel punto di massimo, sempre in zona Castel Firmiano. In Tabella 5.9 si presenta il confronto fra valore massimo orario calcolato, valore massimo orario misurato nella stazione BZ5 e limite legislativo da non superare più di 18 volte l'anno. Il contributo dell'impianto del termovalorizzatore è in questo caso più rilevante rispetto ai casi precedentemente analizzati. Anche tralasciando il confronto con il valore massimo misurato (che può essersi realizzato in momenti diversi rispetto a quelli dei massimi simulati e che viene rilevato in una diversa area del dominio), il confronto con il valore limite di legge evidenzia un contributo dell'impianto del 10%. Data l'entità del contributo riscontrato, risulta opportuno approfondire la ricorrenza di tale valore su base annua. A questo scopo si è proceduto al calcolo del numero di ore, sull'arco annuale, per ogni cella del dominio, in cui il valore di concentrazione di NO₂ supera il 2.5% del valore limite legislativo (ovvero $5 \mu\text{g m}^{-3}$). I risultati di tale analisi vengono riportati in Figura 5.19. La mappa mostra anzitutto come i punti interessati dal superamento di tale valore per più di 9 ore all'anno (pari allo 0.1% delle ore annuali) ricadano tutti nelle immediate vicinanze dell'impianto, in zone poco abitate. Nei punti più critici, il valore di $5 \mu\text{g m}^{-3}$ viene superato al massimo per il 2% delle ore dell'anno.

Analoghe considerazioni valgono per il biossido di zolfo, SO₂. La Figura 5.20 presenta la mappa dei massimi orari di SO₂ calcolati dal modello di dispersione. I valori sono inferiori rispetto a quelli ottenuti per il biossido di azoto ma rimangono comunque rilevanti se confrontati con il valore massimo misurato nella stazione di riferimento BZ5 (Tabella 5.10): il contributo stimato del termovalorizzatore sarebbe in questo caso pari a circa il 7.6%. Di nuovo tale informazione va letta con le dovute cautele, ovvero che i due valori massimi confrontati si realizzano in tempi diversi e in punti diversi. In più, per quanto riguarda il biossido di zolfo, il confronto con il limite di legge (Tabella 5.10) è, oltre che più rappresentativo, favorevole, dato che il contributo dell'inceneritore al raggiungimento di tale limite sarebbe solo dello 0.5%.

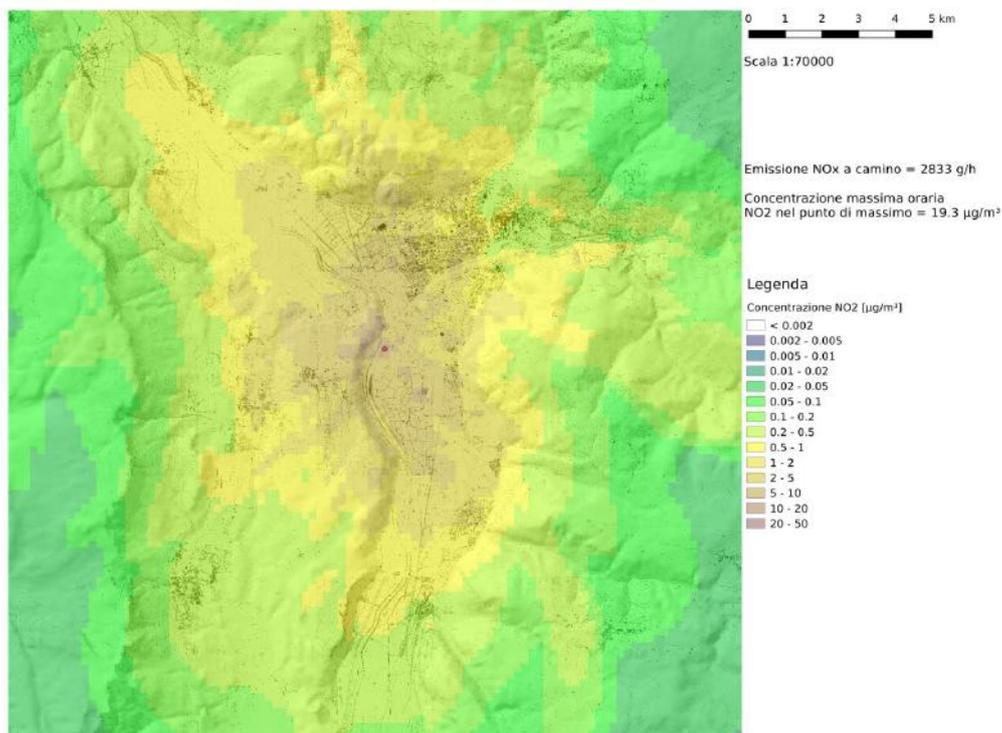


Figura 5.18: Composizione dei massimi orari di NO₂ ottenuti in ciascun punto del dominio sull'intero anno 2016.

Tabella 5.9: Confronto fra valori di concentrazione massima oraria di NO₂ calcolato nel punto di massimo (Max assoluto), misurato dalla centralina di qualità dell'aria APPA (Max Mis BZ5) e fissato nell'Allegato XI del DLgs 155/10 come valore limite da non superarsi più di 18 volte l'anno.

	Max assoluto	Max Mis BZ5	Limite legislativo
NO ₂ [µg m ⁻³]	19.3	113	200

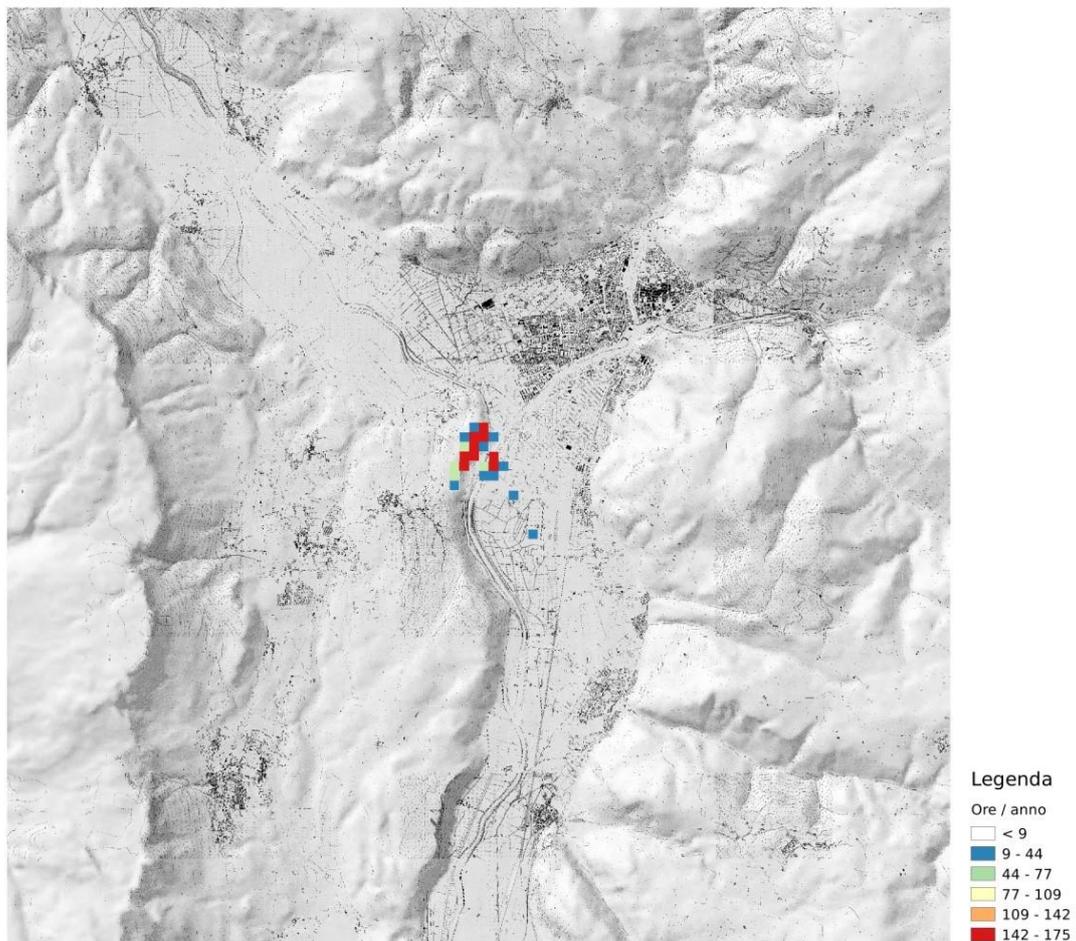


Figura 5.19: Localizzazione dei punti in cui viene superata la concentrazione oraria al suolo di NO_2 di $5 \mu\text{g m}^{-3}$, pari al 5% del valore limite legislativo, e frequenza di accadimento su base annua (numero ore/anno).

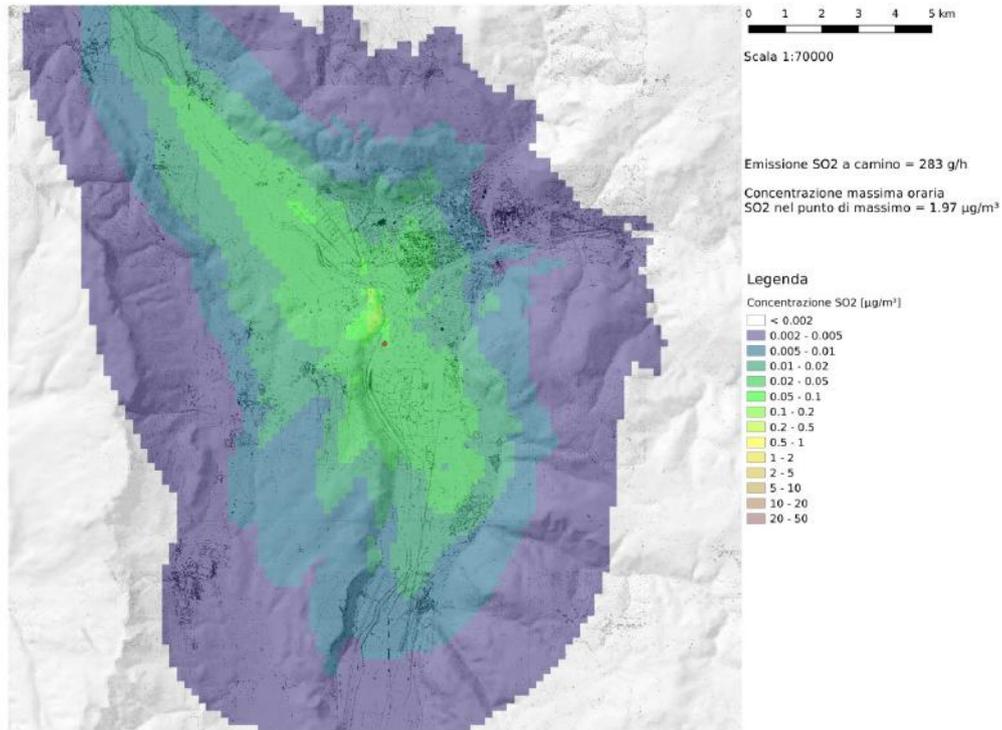


Figura 5.20: Composizione dei massimi orari di SO₂ ottenuti in ciascun punto del dominio sull'intero anno 2016.

Tabella 5.10: Confronto fra valori di concentrazione massima oraria di SO₂ calcolato nel punto di massimo (Max assoluto), misurato dalla centralina di qualità dell'aria APPA (Max Mis BZ6) e fissato nell'Allegato XI del DLgs 155/10 come valore limite da non superarsi più di 24 volte l'anno.

	Max assoluto	Max Mis BZ6	Limite legislativo
SO ₂ [µg m ⁻³]	1.97	25.9	350

CAPITOLO 6

Valutazione di ipotetici scenari critici

Nel presente Capitolo si presenta l'analisi svolta su potenziali scenari di eventi accidentali critici. Tale approccio consente di mettere in evidenza zone di ricaduta diverse da quelle evidenziate dall'analisi su base annua, che vengono coinvolte da concentrazioni maggiori solo in determinate e più rare condizioni meteorologiche. In aggiunta, tale analisi fornisce interessanti informazioni sul potenziale rischio di esposizione della popolazione durante eventi accidentali.

Data la natura puramente ipotetica dell'analisi, è stato necessario innanzitutto stabilire le ipotesi di lavoro, ovvero stabilire che tipo di eventi analizzare dal punto di vista impiantistico e meteorologico, per condurre un'analisi che potesse avere un interesse concreto, per quanto focalizzata su eventi poco probabili.

La principale ipotesi di partenza è quella dell'occorrenza dell'ipotetico incidente, con rilasci a camino molto elevati, in condizioni meteorologiche sfavorevoli, che concentrano i rilasci su zone abitate. Tale combinazione di fattori costituisce, già di per sé, il peggiore degli scenari possibili. A valle di questa ipotesi è stato necessario stabilire come caratterizzare le emissioni a camino, procedura presentata in Sezione 6.1, e come caratterizzare le condizioni meteorologiche, procedura presentata in Sezione 6.2. Stabilite le ipotesi di lavoro, si sono effettuate diverse simulazioni degli ipotetici eventi accidentali selezionati, utilizzando la catena modellistica calibrata WRF-CALPUFF. I risultati ottenuti vengono presentati e discussi in Sezione 6.3.

6.1 Caratterizzazione del rilascio accidentale in termini di emissioni

In accordo con le parti coinvolte nello studio, si è ritenuto che l'evento accidentale da analizzare fosse la completa disattivazione di tutti i filtri presenti sulla linea fumo dell'impianto. Si è ipotizzato che tale simulazione accidentale potesse protrarsi

Tabella 6.1: Emissioni a camino in condizioni normali (sistema di filtraggio operativo) e in condizioni accidentali (completa disattivazione del sistema di filtraggio) e loro rapporto.

Sostanza	Condizioni normali	Condizioni accidentali	Rapporto
	[g h ⁻¹]	[g h ⁻¹]	
CO	179	868	4.8
COT	95	95	1
HCl	102	253744	2490.7
Hg	0.049	1.45	29.6
NH ₃	58	179	3.1
NO _x	2833	38297	13.5
PTS	40	129579	3270.7
SO ₂	283	40278	142.3

per una durata massima di 4 h consecutive. Un incidente di questa portata, in termini di emissioni e di durata, costituisce senza dubbio uno scenario critico e la sua probabilità di accadimento è del tutto remota (il calcolo della stessa esula dagli scopi del presente studio).

Le ipotesi fatte consentono di caratterizzare lo scenario critico con una elevata precisione in termini di emissioni a camino. Sono infatti state effettuate, dai laboratori di Eco-Research, delle misure sui fumi grezzi, a monte del sistema di filtraggio, che forniscono le concentrazioni dei principali inquinanti che verrebbero rilasciate in atmosfera in caso dell'evento accidentale ipotizzato. Tali valori vengono riportati in Tabella 6.1, a confronto con i valori medi registrati per ciascun inquinante dal sistema SME a valle del sistema di filtraggio, in condizioni standard. I valori riportati in tabella mostrano l'elevata efficienza del sistema di filtraggio anzitutto per quanto riguarda le polveri e l'acido cloridrico, le cui emissioni crescono di tre ordini di grandezza con la disattivazione del trattamento fumi. A seguire, nelle condizioni di incidente prospettate, le emissioni di biossido di zolfo crescono di due ordini di grandezza, mentre quelle di mercurio e ossidi di azoto aumentano rispettivamente di 30 e 10 volte rispetto alla norma. Effetti minori, ma pur sempre rilevanti, si hanno sul monossido di carbonio e sull'ammoniaca, mentre rimane inalterata l'emissione di COT. Gli inquinanti considerati nelle simulazioni sono tutti quelli indicati in Tabella 6.1 (CO, COT, HCl, Hg, NH₃, NO_x, PTS, SO₂). Per quanto riguarda i microinquinanti PCDD, PCB e IPA, essi non stati simulati in quanto: (i) la loro concentrazione non è nota a cadenza oraria, in condizioni critiche, e (ii) la loro pericolosità è legata ad esposizione cronica e non accidentale di breve durata.

6.2 Individuazione delle condizioni meteorologiche sfavorevoli

La caratterizzazione meteorologica dei casi accidentali è stata effettuando sfruttando la simulazione WRF annuale effettuata sul 2016. Con l'obiettivo di individuare delle condizioni critiche per le zone più popolate si sono analizzati i risultati della simulazione selezionando, in successione:

1. giornate nelle quali si sono registrati valori massimi di concentrazioni al suolo;
2. giornate nelle quali i massimi di ricaduta sono stati registrati in zone con alta densità abitativa;
3. fasce orarie caratterizzate da persistenza della direzione del vento per almeno 8 ore consecutive.

Tale processo di selezione ha consentito di individuare 4 casi meteorologicamente critici, di seguito brevemente inquadrati.

6.2.1 Caso critico per Bolzano - 26/02/16

L'ipotetico rilascio accidentale critico per la città di Bolzano è stato simulato il 26 febbraio 2016, dalle ore 1100 UTC alle ore 1500 UTC. Durante queste ore infatti, in base alla simulazione annuale, si sono verificate tutte le condizioni critiche prefissate, ovvero concentrazioni massime al suolo sulla città e persistenza delle condizioni meteorologiche per 4 ore. In Figura 6.1, prima riga, si riportano alcune informazioni meteorologiche essenziali sulle ore individuate per questo caso critico. I pannelli riportano i profili verticali di intensità e direzione del vento (pannelli di sinistra) e di temperatura e gradiente termico (pannelli di destra) simulati in corrispondenza del camino dal modello WRF. Tali dati ricostruiscono un scenario con basse intensità del vento, fra 1 e 3 m s^{-1} , con direzione prevalente da sud. Le temperature, coerentemente con il periodo dell'anno selezionato, non sono particolarmente rigide, sempre sopra i 5°C , con un'atmosfera debolmente instabile. Questa combinazione di fattori fa sì che l'area di ricaduta del pennacchio interessi proprio la città di Bolzano, situata a nord est dell'impianto, con concentrazioni più elevate rispetto alla media nonostante il discreto miscelamento dell'aria.

6.2.2 Caso critico per Laives - 03/11/16

Le condizioni meteorologiche più critiche per l'abitato di Laives si sono verificate il 03 novembre 2013, dalle ore 0800 UTC alle ore 1200 UTC. Come mostrato in Figura

6.1, seconda riga, l'intensità del vento in questa finestra temporale è in crescita dalle 0800 alle 1200 mentre la direzione rimane costante da nord. La struttura termica dell'atmosfera la rende debolmente stabile. In queste condizioni il pennacchio viene sospinto verso sud est e interessa l'abitato di Laives.

6.2.3 Caso critico per l'alta Val d'Adige - 01/12/16

La zona di ricaduta del pennacchio dell'impianto interessa la parte alta della Val d'Adige il 01 dicembre 2016, dalle ore 0300 UTC alle ore 0700 UTC (Figura 6.1, terza riga). In questa finestra temporale il modello simula velocità del vento fra 1 e 3 m s^{-1} sopra i 50 m, con direzione prevalente costante da est. La temperatura dell'aria è molto bassa e si è in questo caso in presenza di una forte inversione termica al suolo che raggiunge i 300 m dal suolo. In queste condizioni il pennacchio viene trasportato verso ovest e si incanala nella Val d'Adige a nord ovest di Bolzano, in direzione Merano.

6.2.4 Caso critico per la zona di Appiano - 11/02/16

La zona di Appiano è particolarmente interessata dalla ricaduta del pennacchio l'11 febbraio 2016, dalle 0600 UTC alle 1000 UTC (Figura 6.1, quarta riga). In questa finestra temporale le condizioni meteorologiche sono simili a quelle viste per il caso critico per l'alta Val d'Adige ma con una inversione al suolo meno marcata e con vento da sud nei bassi strati e vento da est negli strati più alti (nelle prime ore considerate). Tali condizioni consentono al pennacchio di risalire più in quota e di essere quindi in grado di valicare il Monte di Mezzo e di ricadere nella zona di Appiano. Nelle ore a seguire, in assenza di vento da est, la ricaduta torna ad interessare lo sbocco della parte alta della Val d'Adige nella conca di Bolzano.

6.3 Risultati

I risultati di seguito presentati sono stati ottenuti effettuando simulazioni di dispersione degli inquinanti con il modello CALPUFF calibrato, configurato con le stesse impostazioni presentate per il run annuale. Le uniche differenze nelle simulazioni discusse in questo Capitolo rispetto a quelle annuali sono le concentrazioni emesse a camino, fissate ai valori di Tabella 6.1 per le 4 ore relative a ciascun caso critico.

Le simulazioni sono state effettuate con le emissioni di tutti gli inquinanti e le mappe ottenute vengono tutte riportate nell'Allegato tecnico 4. Di seguito si discutono invece i risultati ottenuti in termini di PM10, nell'ora più critica per la zona considerata, in quanto risultano l'inquinante più critico in caso di eventi

accidentali. Le emissioni di polveri a camino, in caso di interruzione del filtraggio, aumentano infatti di diversi ordini di grandezza rispetto agli altri contaminanti e le concentrazioni di PM10 al suolo risultano le più critiche per il rispetto dei limiti di legge.

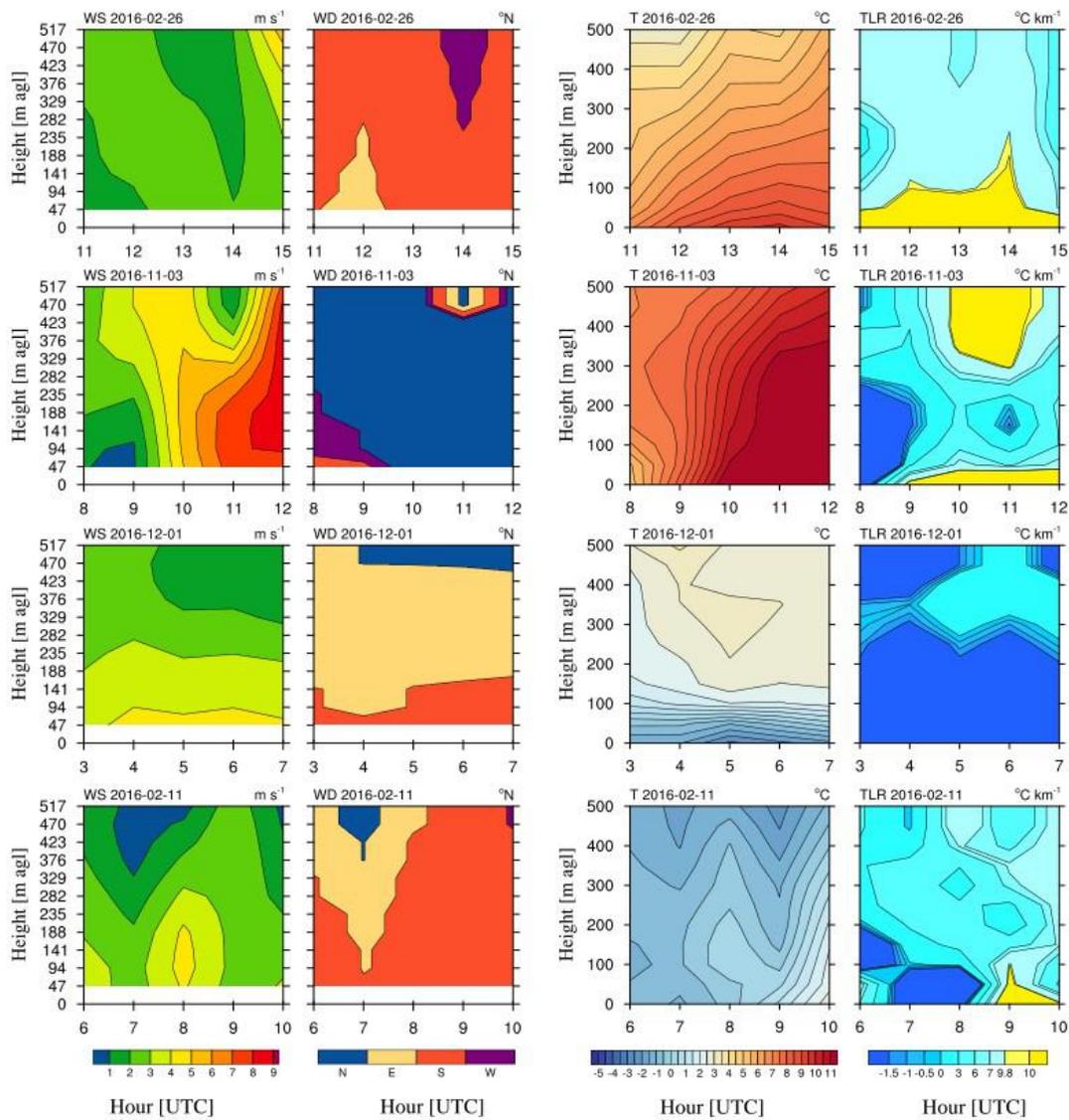


Figura 6.1: Condizioni meteorologiche critiche simulate durante i giorni selezionati (righe) per l'ipotetico avvenimento di rilasci accidentali. Prima e seconda colonna: profili verticali di intensità e direzione del vento in corrispondenza del camino; terza e quarta colonna: profili verticali di temperatura e gradiente termico in corrispondenza del camino.

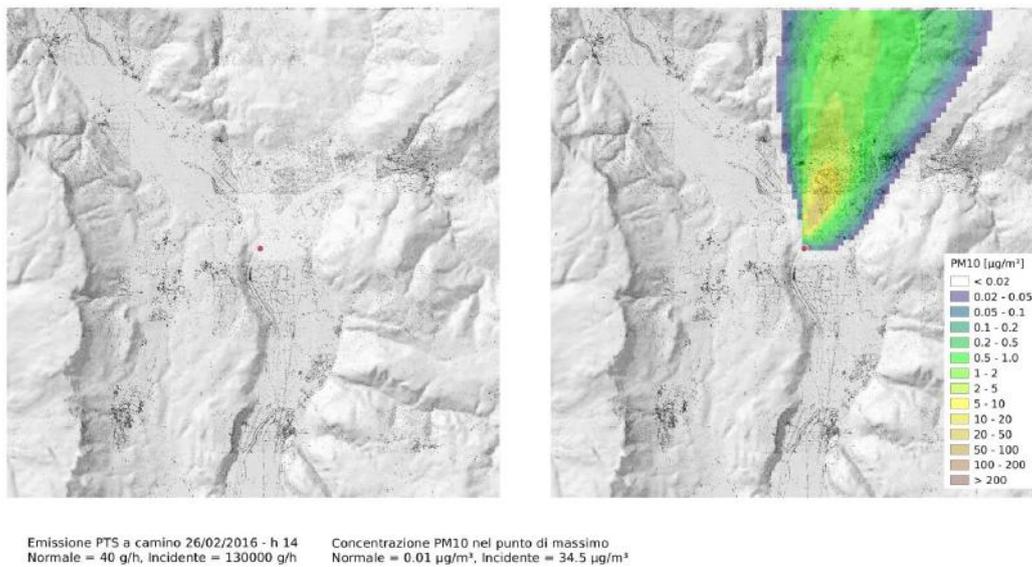


Figura 6.2: Caso critico per Bolzano: area di ricaduta del pennacchio in termini di concentrazioni al suolo di PM10 in condizioni di emissioni standard (sinistra) e in condizioni di ipotetico rilascio accidentale (destra) alle ore 1400 UTC del 26/02/2016.

6.3.1 Caso critico per Bolzano

In Figura 6.2 si riporta l'ora più critica, le 1400 UTC (le altre ore in Allegato tecnico 4), dell'ipotetico incidente simulato per la conca di Bolzano, individuata in base alla realizzazione di valori massimi sull'abitato. La Figura 6.2 riporta sulla sinistra le condizioni di impatto al suolo in condizioni di normale funzionamento dell'impianto, mentre sulla destra quelle di ipotetico rilascio accidentale. Il valore massimo di concentrazione riscontrato al suolo, nel caso accidentale, è di circa $34.5 \mu\text{g m}^{-3}$, contro gli $0.01 \mu\text{g m}^{-3}$ delle condizioni standard: il rapporto fra le concentrazioni standard e in caso di incidente è quindi circa pari a quello riscontrato sulle emissioni a camino, poiché il fattore di diluizione rimane costante per le sostanze passive. La zona di ricaduta del massimo non rientra precisamente nell'abitato di Bolzano, la cui area abitativa ricade in una fascia di concentrazioni che spazia fra 1 e $30 \mu\text{g m}^{-3}$. I valori di PM10 orari non sono vincolati da limiti di legge quindi si possono effettuare valutazioni solamente rispetto al valore limite giornaliero fissato invece a $50 \mu\text{g m}^{-3}$ per non più di 35 volte l'anno. Un valore di $30 \mu\text{g m}^{-3}$ contribuisce chiaramente ad innalzare il valore medio giornaliero delle PM10 per il giorno del rilascio, ma tale effetto risulta smorzato in quanto: (i) il rilascio, in quanto accidentale, è da considerarsi una rara o meglio unica ricorrenza sull'arco annuale, (ii) i valori elevati di concentrazione non persistono a lungo sul territorio, una o due ore al massimo, e si spostano rapidamente.

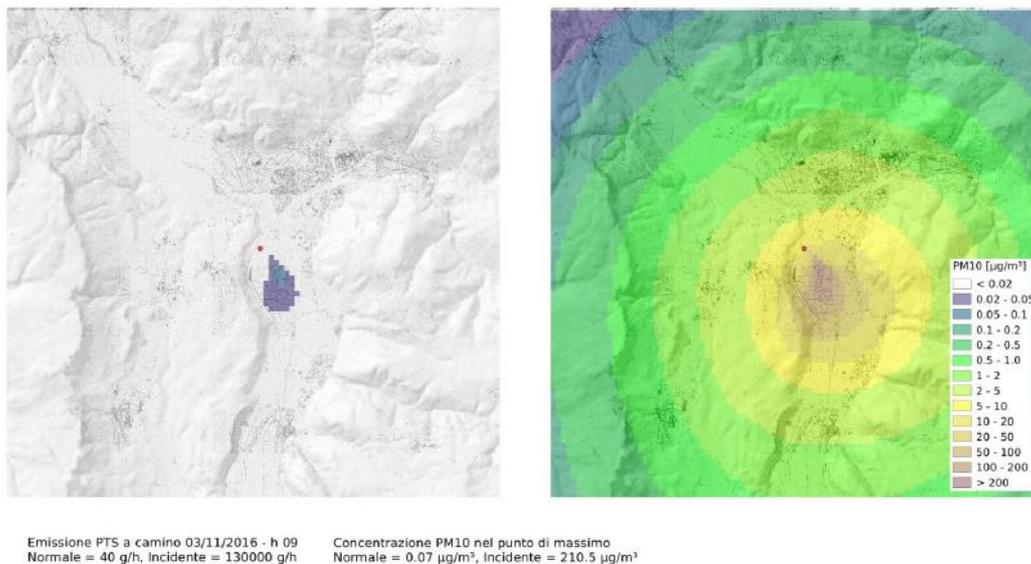


Figura 6.3: Caso critico per Laives: area di ricaduta del pennacchio in termini di concentrazioni al suolo di PM10 in condizioni di emissioni standard (sinistra) e in condizioni di ipotetico rilascio accidentale (destra) alle ore 0900 UTC del 03/11/2016.

6.3.2 Caso critico per Laives

In Figura 6.3 si riporta il confronto fra concentrazioni al suolo in condizioni di funzionamento standard e di ipotetico rilascio accidentale per il caso critico per Laives, alle 0900 UTC del 3 novembre 2016, l'ora più critica (le altre ore in Allegato tecnico 4). A parità di condizioni meteorologiche, la concentrazione massima al suolo riscontrata per le PM10 in caso di incidente è pari a circa 3000 volte quella calcolata in condizioni standard. Tale rapporto corrisponde a quello imposto sulle emissioni a camino (emissione accidentale/emissione standard). Valori massimi di $200 \mu\text{g m}^{-3}$, che si realizzano in questo caso a sud dell'impianto, pesano chiaramente maggiormente sulla media giornaliera calcolata per le PM10, apportando un contributo orario di $8 \mu\text{g m}^{-3}$, anche se si realizzano per una sola ora nell'arco della giornata. La zona interessata dai valori massimi è a nord della cittadina di Laives, dove invece si realizzano valori di concentrazione fra 2 e $20 \mu\text{g m}^{-3}$.

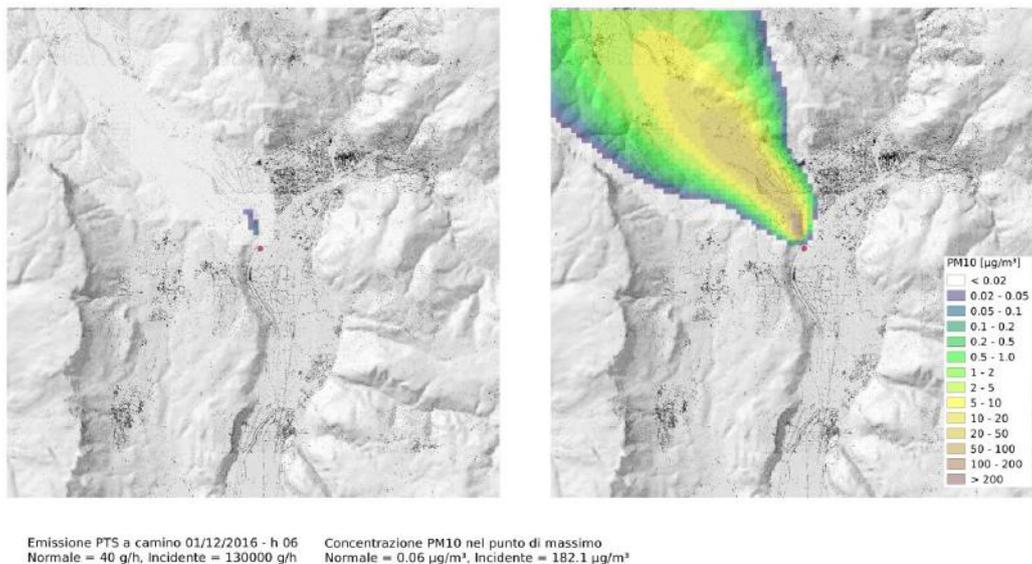


Figura 6.4: Caso critico per l'alta Val d'Adige: area di ricaduta del pennacchio in termini di concentrazioni al suolo di PM10 in condizioni di emissioni standard (sinistra) e in condizioni di ipotetico rilascio accidentale (destra) alle ore 0600 UTC del 01/12/2016.

6.3.3 Caso critico per l'alta Val D'Adige

In Figura 6.4 si riportano le zone di ricaduta nei casi di emissioni standard e accidentali per il caso critico per l'alta Val d'Adige, alle ore 0600 UTC, ora più critica (le altre ore in Allegato tecnico 4). Il valore massimo registrato è pari a $182.1 \mu\text{g m}^{-3}$, contro $0.06 \mu\text{g m}^{-3}$ in condizioni standard (rapporto sempre pari a quello delle emissioni a camino). Tali valori massimi si registrano però nella zona di Castel Firmiano che, come evidenziato anche dall'analisi annuale, risulta la più colpita dalle emissioni del termovalorizzatore. I valori massimi registrati per la zona di interesse sono compresi fra 20 e $50 \mu\text{g m}^{-3}$, e persistono nell'area per circa 4 ore. Le considerazioni per quanto riguarda il confronto con i limiti di legge sono analoghe a quelle effettuate per i casi precedenti.

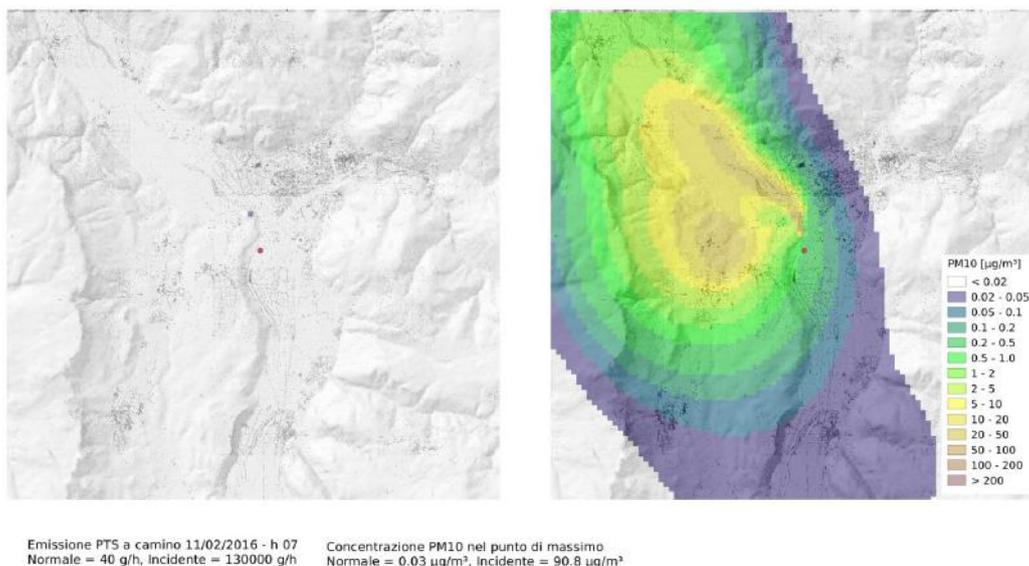


Figura 6.5: Caso critico per la zona di Appiano: area di ricaduta del pennacchio in termini di concentrazioni al suolo di PM10 in condizioni di emissioni standard (sinistra) e in condizioni di ipotetico rilascio accidentale (destra) alle ore 0700 UTC il 11/02/2016.

6.3.4 Caso critico per la zona di Appiano

In Figura 6.5 si mostra il confronto fra condizioni di rilascio standard e rilascio accidentale per il caso critico per Appiano. Le ore con maggiori concentrazioni al suolo calcolate per la zona di Appiano sono le 0700 UTC, quando la zona di interesse ricade nella fascia di concentrazioni compresa fra 20 e 50 $\mu\text{g m}^{-3}$. Tali valori massimi su questa zona non persistono per più di un'ora (vedasi Allegato tecnico 4 per l'evoluzione oraria dell'ipotetico incidente). Il massimo indicato in Figura, 90.8 $\mu\text{g m}^{-3}$, è riferito al massimo assoluto della mappa, che ricade nuovamente sulla zona di Castel Firmiano.

Conclusioni

Sulla base dei risultati conseguiti con le azioni descritte nei Capitoli precedenti si possono trarre alcune considerazioni in merito ai quesiti formulati nell'incarico conferito dalle società EcoCenter circa le caratteristiche meteo-climatologiche della conca di Bolzano e i processi di dispersione a cui sono soggetti gli inquinanti emessi dal camino dell'impianto di termovalorizzazione, a supporto delle azioni di monitoraggio e della gestione di situazioni critiche.

1. Caratterizzazione meteo-climatica della conca di Bolzano

L'analisi climatologica condotta sulla base dei dati rilevati dalla stazione meteorologica di Bolzano Ospedale, sia per il periodo invernale sia per il periodo estivo, mostra che nelle ore notturne l'atmosfera nella conca tende ad essere molto stabile, mentre nelle ore centrali della giornata è debolmente convettiva nel periodo invernale (Figura 1.5) e molto convettiva nel periodo estivo (Figura 1.6). Pertanto, relativamente alla dispersione degli inquinanti, nelle ore notturne il meccanismo di avvezione da parte del vento medio è privilegiato rispetto alla dispersione turbolenta. Viceversa, nelle ore centrali della giornata la convezione dell'aria aumenta il miscelamento dell'atmosfera e quindi la dispersione degli inquinanti. Tale quadro è ulteriormente confermato dall'analisi dei profili verticali di temperatura, forniti dal profilatore termico installato presso l'aeroporto della città. In particolare, si osserva che la stabilità atmosferica della conca è frequentemente associata allo sviluppo di inversioni termiche al suolo (Figura 1.12 e Figura 1.13). Tali inversioni sono confinate negli strati prossimi al suolo in estate (Figura 1.11c), mentre nel periodo invernale oltre ad estendersi a quote maggiori (con uno spessore dello strato di inversione di 400-500 m) possono persistere in quota anche nelle ore centrali della giornata (Figura 1.11a). In quest'ultimo caso si determinano situazioni gravose per la qualità dell'aria a seguito dell'accumulo di inquinanti nei bassi strati di atmosfera.

Il regime dei venti è stato esaminato attraverso l'analisi dei profili verticali di vento misurati da un SODAR, installato sul tetto del termovalorizzatore, e da un Doppler Wind-LIDAR, installato sul tetto di Palazzo 12 della Provincia Autonoma di Bolzano. L'analisi dei dati ha evidenziato la complessità della struttura del campo di vento all'interno della conca. Infatti, in assenza di forzanti sinottiche, il campo di vento è dominato da circolazioni termiche locali che si sviluppano in ciascuna delle valli tributarie della conca, nella quale confluiscono interagendo. La circolazione locale più significativa, anche in riferimento ai processi di dispersione degli inquinanti, è senz'altro costituita dal vento di drenaggio proveniente dalla Val d'Isarco. Si è infatti osservato che il flusso notturno proveniente dalla Val d'Isarco confluisce nella conca di Bolzano assumendo le caratteristiche di una corrente a getto, ossia di una struttura organizzata, caratterizzata da un picco di intensità elevato che può superare i 10 m s^{-1} . L'analisi dei dati raccolti dal Doppler Wind-LIDAR (Figura 1.19) e le simulazioni numeriche ad altissima risoluzione (Figura 1.20), condotte per meglio caratterizzare il fenomeno, hanno evidenziato come la corrente a getto interagisce con le inversioni termiche che si sviluppano all'interno della conca. In particolare, la corrente a getto, entrando da Est, fluttua al di sopra dello strato di atmosfera stabile che ristagna sulla città (mediamente sopra i 450 m dal suolo) ed attraversa la conca per poi incanalarsi verso Sud in Val d'Adige. In queste condizioni si osserva un disaccoppiamento del campo di moto, in quanto al di sotto della corrente il vento è pressoché nullo. Pertanto gli inquinanti emessi a livello del suolo restano confinati negli strati bassi di atmosfera e non sono rimossi dalla corrente a getto. Diversa è la situazione per i fumi emessi dal camino del termovalorizzatore: grazie alla elevazione del camino, alla spinta di galleggiamento dovuta alla elevata temperatura di uscita, e alla velocità verticale di espulsione dalla bocca del camino, il pennacchio può raggiungere quote più elevate della inversione termica.

2. Simulazione dei processi di dispersione mediante modelli numerici

Per poter analizzare in dettaglio i processi di dispersione degli inquinanti emessi a camino si è utilizzata una catena di modelli allo stato dell'arte (Capitolo 2), riconosciuti a livello internazionale per applicazioni a scala locale e su terreno complesso: il modello meteorologico WRF e il modello di dispersione CALMET/CALPUFF.

Per migliorare ulteriormente la loro affidabilità nel contesto della conca di Bolzano si sono organizzate specifiche campagne di misura con il rilascio di traccianti

passivi che consentissero di raccogliere osservazioni dirette sulla ricaduta al suolo degli inquinanti emessi al camino.

Gli esperimenti, presentati nel Capitolo 3, hanno incluso il rilascio al camino di un tracciante passivo, le cui concentrazioni sono state misurate al suolo in diversi punti della Conca di Bolzano e nelle valli vicine. Le campagne svolte il 14 febbraio 2017 hanno consentito di raccogliere 79 campioni di aria ambiente contenente diverse concentrazioni del tracciante.

Le misure di concentrazione determinate con grande accuratezza in laboratorio hanno costituito la base di dati per la calibrazione dei modelli (Capitolo 4). In particolare, si sono utilizzate le informazioni raccolte per individuare la migliore configurazione del modello CALPUFF, al fine di riprodurre l'evoluzione dei rilasci di tracciante effettuati (Sezione 4.2). Tale configurazione, individuata attraverso un'analisi statistica di confronto fra i valori misurati e quelli simulati, è stata poi utilizzata per le diverse applicazioni connesse alle valutazioni richieste dal presente studio (Capitoli 5 e 6).

I risultati degli esperimenti rappresentano altresì un prezioso database informativo per studi di dispersione di inquinanti su terreno complesso, di interesse scientifico internazionale in ragione della loro unicità e della ricchezza di dati contestualmente raccolti (misure meteorologiche e di concentrazione).

La prima applicazione della catena modellistica WRF/CALPUFF così calibrata è la simulazione su base annua della dispersione degli inquinanti emessi a camino, presentata nel Capitolo 5. Per tale applicazione si è scelto come anno di riferimento l'anno 2016, in quanto meteorologicamente rappresentativo della norma e ben documentato in termini di dati da misure meteorologiche e di emissioni dal camino del termovalorizzatore. La simulazione dei valori meteorologici per l'intero anno 2016, ottenuta mediante il modello meteorologico WRF (Sezione 5.1) e la successiva simulazione dei processi di dispersione mediante il modello CALPUFF (Sezione 5.2), hanno consentito di ottenere mappe di concentrazione media annua per tutti gli inquinanti emessi a camino (Sezione 5.3.1 e Allegato tecnico 1), e mappe dei valori massimi orari (Sezione 5.3.2 e Allegato tecnico 2) o giornalieri (Sezione 5.3.3 e Allegato tecnico 3) per gli inquinanti normati per legge. L'affidabilità di tali risultati è molto elevata in quanto essi sono ottenuti dai migliori modelli riconosciuti a livello internazionale per applicazioni su terreno complesso, calibrati sul caso di studio in esame mediante le misure raccolte in campo durante gli esperimenti.

3. Monitoraggio della ricaduta delle emissioni

Le mappe di concentrazione ottenute dalle simulazioni su base annua mostrano che l'impatto delle emissioni dal camino del termovalorizzatore è molto contenuto sulla conca di Bolzano al confronto con altre fonti emissive.

Le simulazioni, finalizzate a fornire indicazioni sul posizionamento di stazioni di misura permanenti per determinare le concentrazioni di inquinanti nelle zone di massima ricaduta, hanno in realtà mostrato che la concentrazione dovuta alle emissioni dal camino è così bassa da risultare non misurabile, per le PM10, e non distinguibile dal valore di fondo per gli NO_x. Anche le concentrazioni degli altri inquinanti, dovute al rilascio del termovalorizzatore, risultano essere così basse da non essere rilevabili o comunque difficilmente distinguibili rispetto al fondo. Pertanto, la dislocazione sul territorio di una rete di monitoraggio permanente risulta di dubbia utilità. In alternativa, l'unica soluzione che può presentare una certa utilità è costituita da sensori sentinella, da utilizzare come sentinelle nel caso di malfunzionamenti che possano produrre concentrazioni al suolo più elevate della norma.

4. Messa a punto di un sistema modellistico specifico per l'impianto

Il sistema modellistico implementato può essere utilizzato, oltre che per scopi di pianificazione, anche a supporto di operazioni di protezione della popolazione in caso di incidente. Per questa ragione la catena modellistica calibrata è stata utilizzata per ricostruire i campi di concentrazione determinati da ipotetici rilasci accidentali a camino (Capitolo 6). Data la natura molto variabile del campo di moto della zona, sia su base giornaliera, sia su base stagionale, si è scelto di individuare alcuni casi critici nei quali si potrebbero realizzare concentrazioni molto elevate su zone a maggiore densità abitativa. I risultati ottenuti (Sezione 6.3 e Allegato tecnico 4) mostrano un significativo aumento delle concentrazioni al suolo, in relazione alle diverse condizioni di aumento delle emissioni a camino. La catena modellistica implementata può essere resa operativa in tempo reale con tempi di esecuzione molto brevi, a supporto di operazioni di protezione civile in caso di eventi accidentali che determinino rilasci di inquinanti significativamente superiori alla norma.

APPENDICE A

Valutazione del giorno medio e del giorno caratteristico

A.1 Definizioni e creazione del dataset

Individuato un periodo di riferimento e la variabile meteorologica di interesse, si definisce (Tirabassi & Nassetti, 1999):

- **Giorno medio:** il ciclo giornaliero ottenuto calcolando il valor medio della variabile per ciascuna ora del giorno.
- **Giorno caratteristico:** il giorno, realmente verificatosi, che meno si discosta da tutti gli altri, ovvero per il quale è minima sulle 24 ore la somma degli scarti quadratici tra i valori valutati nei diversi istanti e gli stessi riferiti al giorno medio.

L'analisi climatologica è stata condotta utilizzando i dati misurati nel periodo dicembre 2006 - dicembre 2014 dalla stazione al suolo di Bolzano Ospedale, gestita dal Servizio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano. Infatti, tra le stazioni meteorologiche presenti nella città di Bolzano, la stazione di Bolzano Ospedale dispone di misure continue ed estese nel tempo di radiazione globale, di intensità e direzione del vento e di temperatura dell'aria, con una risoluzione temporale di 10 minuti. In particolare l'analisi è stata condotta sperimentalmente per i mesi invernali (dicembre-febbraio) e per i mesi estivi (giugno-agosto).

Estratti dal dataset i dati corrispondenti al periodo di interesse (circa 2000 giorni sia per il periodo invernale sia per il periodo estivo), si è proceduto alla determinazione delle serie storiche medie orarie di radiazione globale, intensità e direzione del vento e temperatura dell'aria.

Poiché la stabilità atmosferica determina la modalità con cui avviene la dispersione degli inquinanti, il giorno medio e il giorno caratteristico sono stati determinati

Tabella A.1: Classi di stabilità atmosferica nelle ore diurne e nelle ore notturne in accordo con la classificazione di Pasquill-Gifford.

Vento (m s^{-1})	Ore diurne Radiazione solare globale (W m^{-2})						Ore notturne Radiazione netta (W m^{-2})		
	>700	[700,540[[540,400[[400,270]	[270,140]	<140	>-20	[-20,-40]	<-40
<2	A	A	B	B	C	D	D	F	F
2-3	A	B	B	B	C	D	D	E	F
3-4	B	B	B	C	C	D	D	D	E
4-5	B	B	C	C	D	D	D	D	E
5-6	C	C	C	C	D	D	D	D	D
> 6	C	C	D	D	D	D	D	D	D

sulla base dei valori assunti da questa variabile, in accordo con la classificazione proposta da Pasquill-Gifford. Tale classificazione permette di associare a ciascuna ora una classe di stabilità atmosferica, sulla base di misure al suolo di intensità del vento e di radiazione globale e netta. In Tabella A.1 si riporta la classificazione utilizzata (Sozzi et al., 2002), in cui alle lettere da A a F è associata una classe di stabilità atmosferica:

A: Atmosfera molto convettiva.

B: Atmosfera convettiva o con radiazione solare poco elevata o con elevata intensità del vento.

C: Atmosfera convettiva con debole radiazione solare ed elevata intensità del vento.

D: Atmosfera in condizioni prossime all'adiabaticità, tipiche delle situazioni diurne e notturne con cielo coperto e vento teso.

E: Atmosfera stabile con cielo poco nuvoloso e vento da moderato a intenso.

F: Atmosfera stabile con cielo sereno e vento debole.

Per applicare questa classificazione occorre stimare il dato di radiazione netta, che nelle ore notturne coincide con la radiazione termica netta (o radiazione a onda lunga), assente nella serie storica utilizzata. Infatti, presso la stazione di Bolzano Ospedale è misurata la sola radiazione globale, ossia la somma della radiazione solare diretta e della radiazione solare diffusa, che assume un valore nullo durante le ore notturne. Per colmare la mancanza di dati nelle ore notturne, la serie storica di dati di radiazione termica è stata ricostruita a partire dai dati orari di radiazione globale applicando la metodologia di seguito descritta:

1. Calcolo della radiazione globale media giornaliera per ciascun giorno investigato RG_d :

$$RG_d = \frac{1}{24} \sum_{h=1}^{24} RG_h$$

2. Determinazione della radiazione globale media giornaliera massima mensile $RG_{d,m}$:

$$RG_{d,m} = \max[RG_d]$$

3. Calcolo del rapporto r_d tra la radiazione globale media giornaliera e quella massima del mese a cui appartiene RG_d :

$$r_d = \frac{RG_d}{RG_{d,m}}$$

e determinazione dell'indice di copertura nuvolosa giornaliero medio σ_d :

$$\sigma_d = \begin{cases} 1 & \text{se } r_d < \frac{1}{3} \\ 0.5 & \text{se } \frac{1}{3} \leq r_d \leq \frac{2}{3} \\ 0 & \text{se } r_d > \frac{2}{3} \end{cases}$$

4. Stima della radiazione termica netta LW_d a scala oraria per il giorno di riferimento:

$$LW_d = \begin{cases} -\beta(1 - \sigma_r)\rho c_P T & \text{se } RG_d = 0 \\ 0 & \text{se } RG_d > \frac{2}{3} \end{cases}$$

dove $\beta = 0.08$ è una costante, ρ è la densità dell'aria, c_P è il calore specifico a pressione costante e T è la temperatura dell'aria.

A.2 Determinazione del giorno medio e del giorno caratteristico

A partire dai dati orari di intensità del vento e di radiazione (globale e netta) a ciascuna ora è stata assegnata la corrispondente classe di stabilità riportata in Tabella A.1. Ciò ha poi permesso di ottenere la frequenza oraria delle classi di stabilità per il periodo invernale (Figura 1.5, in alto) e per il periodo estivo (Figura 1.6, in alto). Il giorno medio è quindi stato ricavato valutando la classe di stabilità più frequente per ciascuna ora.

Il confronto tra il giorno medio con le giornate effettivamente verificatesi ha permesso di selezionare i giorni caratteristici, definiti come quei giorni in cui per

almeno 23 ore le classi di stabilità osservate corrispondono a quelle del giorno medio di riferimento per la stagione investigata. Ciò ha permesso di individuare:

1. 21 giorni caratteristici per il periodo invernale;
2. 5 giorni caratteristici per il periodo estivo;

elencati in Tabella A.2.

Successivamente i cicli giornalieri di direzione del vento dei giorni caratteristici sono stati confrontati al fine di individuare le giornate caratterizzate da un regime anemometrico simile (per il periodo invernale Figura 1.5 pannello centrale, e per il periodo estivo Figura 1.6, pannello centrale). Si osserva che nel periodo invernale il vento spira prevalentemente da Ovest, tranne che nelle ore centrali della giornata, quando si osserva un debole accenno di circolazioni termiche che spirano da Sud. Nel periodo estivo, invece, le circolazioni termiche sono più sviluppate e permettono di osservare come il campo di moto, anche in prossimità del suolo, possa essere molto complesso. Infatti, per i giorni selezionati si nota che nelle ore notturne sono prevalenti i venti di drenaggio che spirano da Ovest. Nella tarda mattinata e nella prima serata si osservano venti da Est, mentre nelle ore centrali della giornata si osservano venti in risalita dalla conca di Bolzano con provenienza da Sud. Alla luce delle osservazioni condotte durante lo studio e riportate nella relazione, è ragionevole attendersi che la componente da Est sia associata al vento di drenaggio della Val d'Isarco.

Infine, sono stati analizzati i cicli giornalieri di temperatura dell'aria per i giorni che presentano cicli di direzione del vento tra loro simili. Quest'ultimo confronto è stato eseguito per selezionare le giornate caratteristiche con temperature particolarmente rigide (per il periodo invernale, Figura 1.5 grafico in basso) e con temperature maggiormente elevate (per il periodo estivo, Figura 1.6 grafico in basso).

Tabella A.2: Giorni rappresentativi per i periodi invernale ed estivo che coincidono con il giorno medio per 23 ore su 24. Per ciascun giorno si riporta l'ora in cui il giorno rappresentativo si discosta dal giorno medio, la classe di stabilità osservata (Classe obs.) e la classe di stabilità del giorno medio (Classe g. medio).

Periodo invernale Dicembre - Febbraio				Periodo estivo Giugno - Agosto			
Giorno	Ora	Classe obs.	Classe g. medio	Giorno	Ora	Classe obs.	Classe g. medio
21-12-2006	18	F	D	09-07-2009	7	C	D
23-12-2006	18	F	D	29-07-2009	18	B	C
24-12-2006	18	F	D	17-07-2012	7	C	D
25-12-2006	18	F	D	01-07-2013	8	C	B
26-12-2006	18	F	D	19-07-2014	7	C	D
29-12-2006	18	F	D				
03-01-2007	18	F	D				
05-01-2007	18	F	D				
14-01-2007	18	F	D				
19-12-2007	18	F	D				
20-12-2007	18	F	D				
21-12-2007	18	F	D				
29-12-2007	18	F	D				
10-01-2008	18	F	D				
30-12-2008	18	F	D				
29-12-2010	18	F	D				
24-01-2011	10	C	D				
12-01-2012	18	F	D				
15-02-2013	16	C	D				
21-02-2013	10	C	D				
29-01-2014	18	F	D				

APPENDICE B

Sensoristica di telerilevamento utilizzata per lo studio

B.1 Profilatore termico MTP5-HE

Il profilatore termico MTP5-HE è uno strumento meteorologico per la misura da remoto del profilo di temperatura dall'aria, nei primi 1000 m di atmosfera al di sopra del suolo. I profilatori termici, come l'MTP5-HE, sono frequentemente utilizzati nella pratica meteorologica sia per scopi operativi sia per scopi di ricerca (Ferrario et al., 2006; Ezau et al., 2013; Wolf et al., 2014; Massaro et al., 2015; Caumont et al., 2016; Martinet et al., 2017).

Il principio di funzionamento di questo sensore è tipico dei radiometri passivi. Un radiometro passivo è un sensore costituito da un elemento sensibile che, quando investito dalla radiazione elettromagnetica emessa da un corpo ad una certa temperatura superiore allo zero assoluto (come l'atmosfera), ne misura il flusso specifico di energia ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$). L'MTP5-HE, in particolare, misura la radiazione termica dell'atmosfera in corrispondenza del centro della banda di assorbimento dell'ossigeno molecolare (lunghezza d'onda pari a 5 mm) e attraverso l'applicazione delle Leggi di Wien e di Stefan-Boltzman determina la temperatura dell'aria. Il profilo di temperatura, ossia la temperatura dell'aria a diverse quote, è ottenuto misurando la radiazione dell'atmosfera in corrispondenza di diversi angoli zenitali dell'elemento sensibile.

L'MTP5-HE utilizzato per il presente studio è gestito da APPA Bolzano ed è installato presso l'aeroporto della città (237 m s.l.m.) sul tetto di un edificio a circa 12 m dal suolo. Nelle attuali condizioni operative il profilatore restituisce ogni 10 minuti un profilo verticale di temperatura. Ciascun profilo è ottenuto misurando la temperatura dell'aria in corrispondenza di 11 angoli azimutali tra 0 (orizzontale) a 90 gradi (verticale). Il software che elabora i dati del sensore interpola linearmente

le misure al fine di restituire un profilo di temperatura con una risoluzione verticale di 50 m.

B.1.1 Verifica dell'attendibilità dei dati misurati dal profilatore termico

Si è effettuata una verifica dell'attendibilità dei dati restituiti dal profilatore termico utilizzando il 2016 come anno di riferimento e confrontando i dati di temperatura dell'aria misurati a 2 m dal suolo dalla stazione meteorologica di San Genesio (970 m s.l.m.), con le corrispondenti temperature del profilatore termico a 750 m dal suolo. Come prima azione si è proceduto a rendere confrontabili i due dataset (San Genesio e MTP5-HE), soprattutto per la presenza di eventuali lacune nei dati. Quindi, dopo aver calcolato le medie orarie di temperatura misurate dai due sensori, si sono estratte le sole ore in cui entrambi i sensori hanno restituito dati attendibili. Queste operazioni hanno portato ad escludere dall'analisi un totale di 67 ore (0.8% delle ore disponibili nel 2016), senza quindi intaccare significativamente la rappresentatività statistica del nuovo dataset risulta costituito dalle rimanenti 8717 ore (99.2% delle ore disponibili nel 2016).

Sul dataset di medie orarie così ottenuto, si è effettuato il confronto tra le temperature misurate dei due sensori alla medesima quota.

Anzitutto si sono confrontati i dati rilevati a San Genesio con quelli rilevati dal profilatore termico alla quota di 750 m dal suolo. Individuando un intervallo di temperature comune alle due serie di dati, compreso tra -12°C e 30°C , si è costruita una matrice di 42×42 celle, nella quale i dati sono stati suddivisi in classi con risoluzione di 1°C . In particolare, per ciascuna cella si è calcolato il numero di osservazioni di entrambe le serie che contemporaneamente vi contribuiscono ed infine la normalizzazione del numero di osservazioni per la numerosità complessiva del dataset (8717 osservazioni) ha permesso di determinare la frequenza empirica di ciascuna cella. La rappresentazione del risultato ottenuto è riportata nel grafico in alto di Figura B.1. Qui la frequenza empirica di ciascuna classe evidenzia come la maggior parte dei dati utilizzati sia ben allineata con la bisettrice del primo e terzo quadrante, indice che le due serie di dati sono tra loro confrontabili.

La dispersione delle osservazioni, rispetto alla bisettrice del primo e terzo quadrante, è stata investigata calcolando per ciascuna ora la differenza di temperatura alla medesima quota tra profilatore termico e stazione al suolo di San Genesio. In particolare, le differenze di temperatura sono accorpate in funzione della temperatura dell'aria misurata a San Genesio e utilizzando l'intervallo di temperature già adottato nella precedente analisi, con la medesima risoluzione di 1°C . Infine, per ciascuna classe si è calcolata la media e la deviazione standard delle differenze,

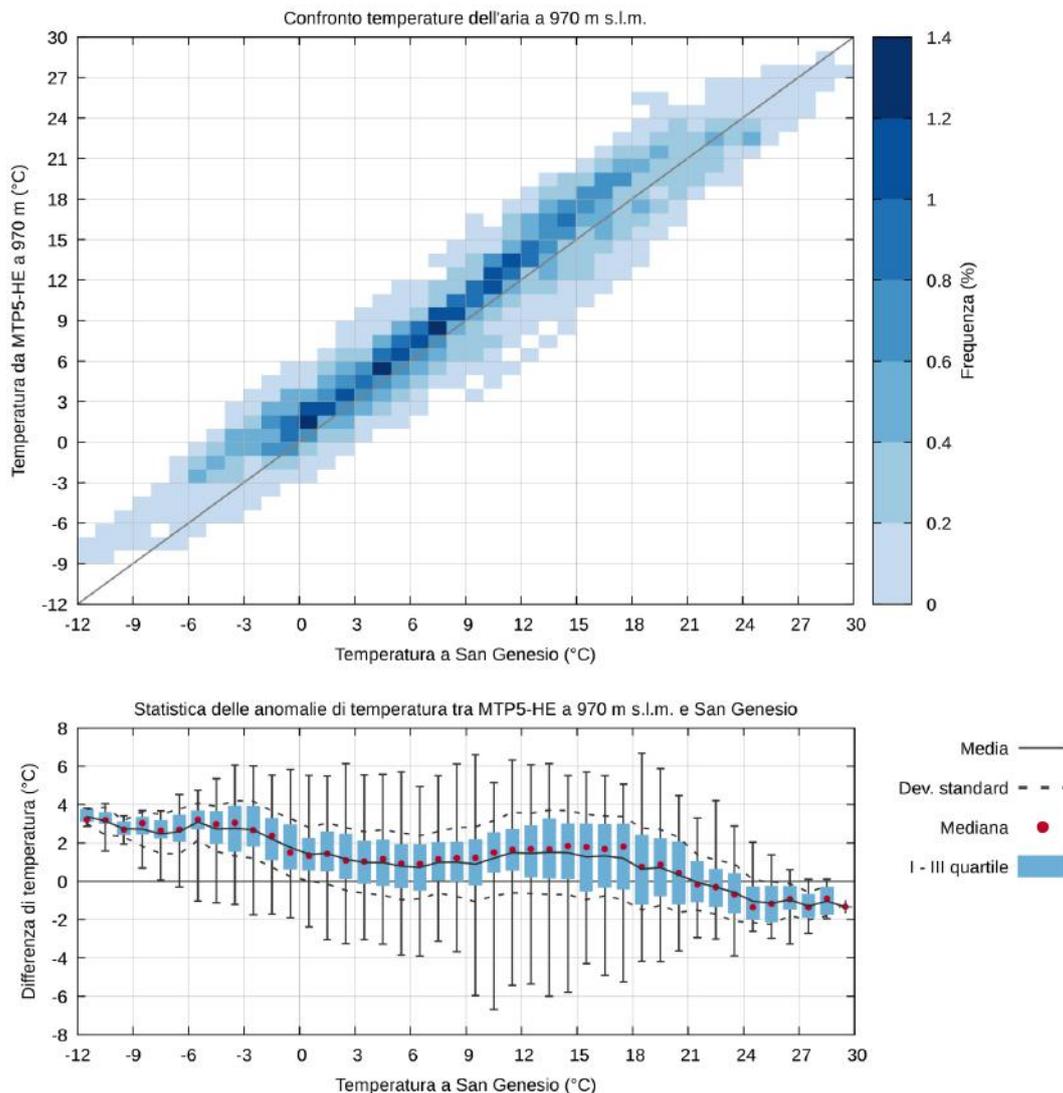


Figura B.1: Confronto tra la temperatura dell'aria misurata del profilatore termico a 750 m dal suolo e la temperatura dell'aria misurata dalla stazione di San Genesio a 970 m s.l.m. (in alto). Statistiche delle anomalie di temperatura tra profilatore termico e stazione di San Genesio per l'anno 2016, in riferimento alle temperature misurate presso San Genesio.

la differenza minima e massima, la mediana e gli scarti interquartili (al 25% e al 75%). Il grafico in basso in Figura B.1 mostra il risultato ottenuto. Si osserva che per l'anno 2016 la temperatura dell'aria misurata dal profilatore termico tende ad essere mediamente superiore rispetto a quella misurata dalla stazione al suolo di San Genesio. Tuttavia, la differenza di temperatura è contenuta, mediamente di 2°C, soprattutto quando San Genesio misura temperature dell'aria comprese tra 0°C e 20°C. Le maggiori differenze si hanno invece per temperature dell'aria inferiori a 0°C e superiori a 20°C. Questo effetto può essere spiegato considerando che il dato di temperatura misurato dal profilatore termico è rappresentativo della temperatura

dell'atmosfera libera, in quanto è molto lontano dal suolo. Un confronto più appropriato si otterrebbe con misure prese mediante radiosondaggio o sensori installati su pallone frenato. Viceversa la temperatura dell'aria misurata a San Genesio è influenzata dal riscaldamento/raffreddamento della topografia. In particolare, lo sviluppo di inversioni termiche al suolo durante i mesi invernali o comunque durante le ore notturne, impone che la temperatura al suolo sia inferiore rispetto a quella al centro della Conca di Bolzano e quindi la differenza tra le due temperature sia positiva. Durante le ore centrali della giornata, invece, il suolo si riscalda molto più velocemente dell'aria e quindi la temperatura misurata a San Genesio, risentendo del riscaldamento della superficie, è superiore rispetto a quella misurata dal profilatore. Ciò è maggiormente evidente quanto la temperatura dell'aria è superiore a 20°C e quindi la differenza assume un valore negativo.

Ad ulteriore conferma, in Figura B.2 si riportano le medesime analisi effettuate in precedenza ma suddividendo il dataset per stagioni. Si osserva che nel periodo invernale e in quello estivo, ossia quando si hanno le maggiori escursioni termiche, le differenze tra le temperature misurate dai due sensori sono molto più marcate che non nel periodo primaverile ed autunnale.

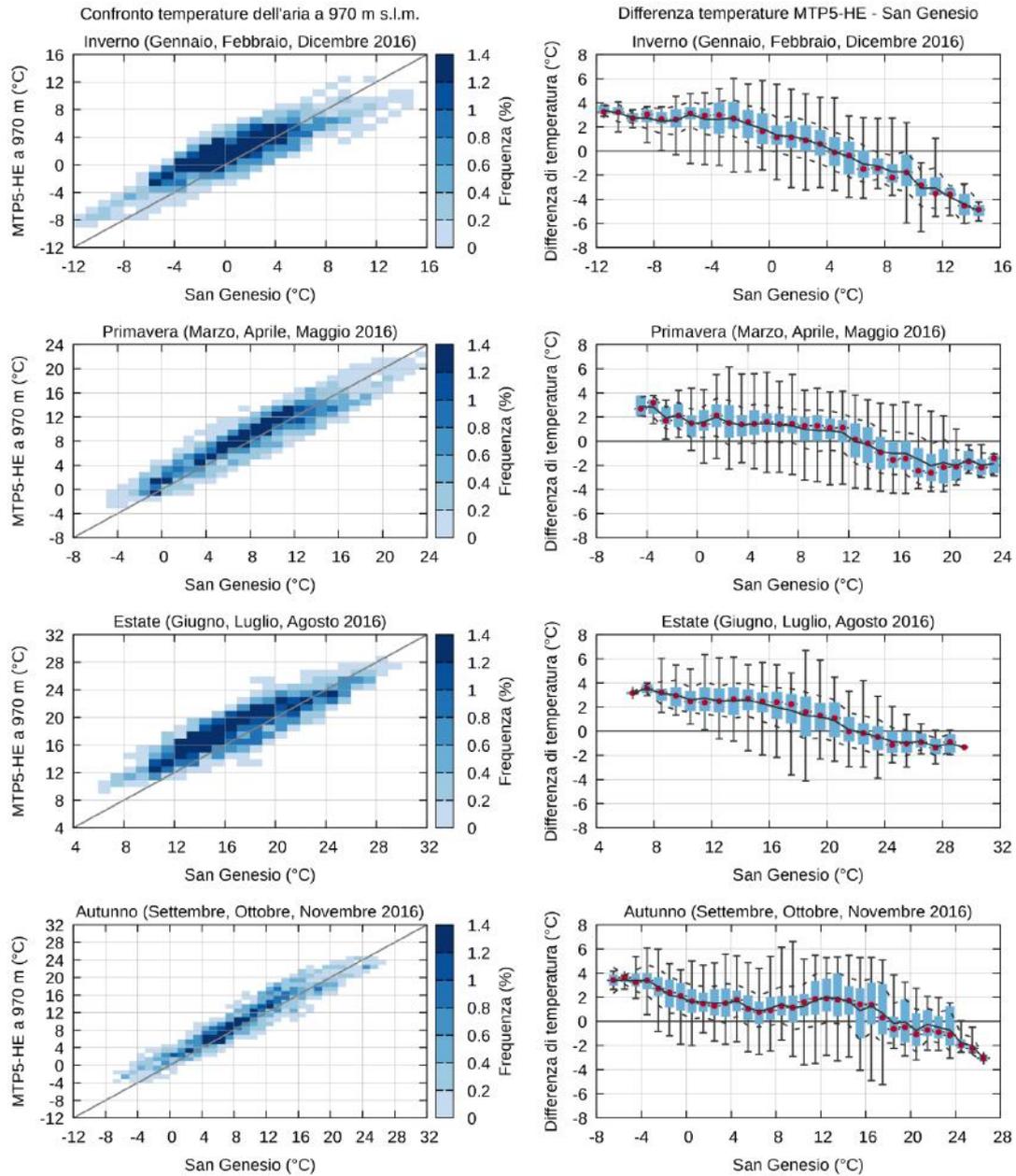


Figura B.2: Confronti stagionali tra le temperature dell'aria misurate dal profilatore termico a 750 m dal suolo e la temperatura dell'aria misurata dalla stazione al suolo di San Genesio (970 m s.l.m.) e statistiche stagionali delle anomalie delle temperature misurate dai due sensori.

B.2 Apparecchiatura SODAR

B.2.1 Principio di funzionamento del sensore

Il SODAR (*SOnic Detection And Ranging*) è un dispositivo per la misura del profilo del vento (intensità e direzione) a diverse quote, attraverso la misura dello sfasamento Doppler di onde acustiche emesse da un'antenna al suolo e retro-diffuse dalla turbolenza atmosferica (Tatarskiĭ, 1967). In generale un SODAR è costituito da una sola antenna (monostatico) o da più antenne (bistatico) con il compito di emettere segnali acustici e di riceverne la eco. I SODAR monostatici, costituiti da un'unica antenna che emette e riceve il segnale, possono essere classificati a loro volta in SODAR ad assi multipli e in SODAR *phased array*. I primi sono costituiti da tre antenne fisicamente separate che emettono e ricevono gli impulsi acustici lungo tre diverse direzioni: tipicamente un'antenna emette e riceve i segnali acustici lungo la verticale, mentre le altre due emettono e ricevono i segnali acustici lungo due direzioni inclinate rispetto la verticale. Nei SODAR *phased array*, invece, l'emissione e la ricezione dei segnali acustici avviene lungo cinque diverse direzioni ed è effettuata da un'unica antenna, tipicamente verso Nord, Est, Sud, Ovest e verticale, modulando i tempi di inizio e ricezione del segnale con opportuno sfasamento.

In commercio, esistono diverse tipologie di SODAR, che si distinguono sulla base dello spessore di atmosfera che si vuole investigare. In particolare, si parla di mini-SODAR per indicare quei dispositivi che restituiscono il campo di vento nei primi 500 m circa di atmosfera al di sopra dell'antenna. Tuttavia, indipendentemente dallo spessore di atmosfera investigato, la qualità dei dati dipende dall'intensità e dalla tipologia di rumore di fondo presente presso il sito sperimentale. Infatti, siccome questi sensori ricostruiscono il campo di vento attraverso l'analisi di segnali acustici, tanto più è intenso il rumore di fondo, tanto più difficile da analizzare il segnale acustico retro-diffuso dalla turbolenza atmosferica. Ne consegue quindi una degradazione della qualità della misura.

Il SODAR messo a disposizione da UNITN per gli scopi dello studio è un MFAS *flat array* SODAR prodotto dalla ditta Scintec (Germania). Si tratta di un mini-SODAR, monostatico, *phased array*, le cui specifiche tecniche sono riportate in Tabella B.1.

In linea del tutto generale, il principio di funzionamento di un SODAR, come quello utilizzato nello studio, è schematizzato in Figura B.3. Si consideri un'atmosfera statica (ossia con assenza di vento) fino alla quota z , oltre la quale sia invece presente uno flusso turbolento di velocità media U . La misura effettuata dal SODAR avviene attraverso le seguenti fasi:

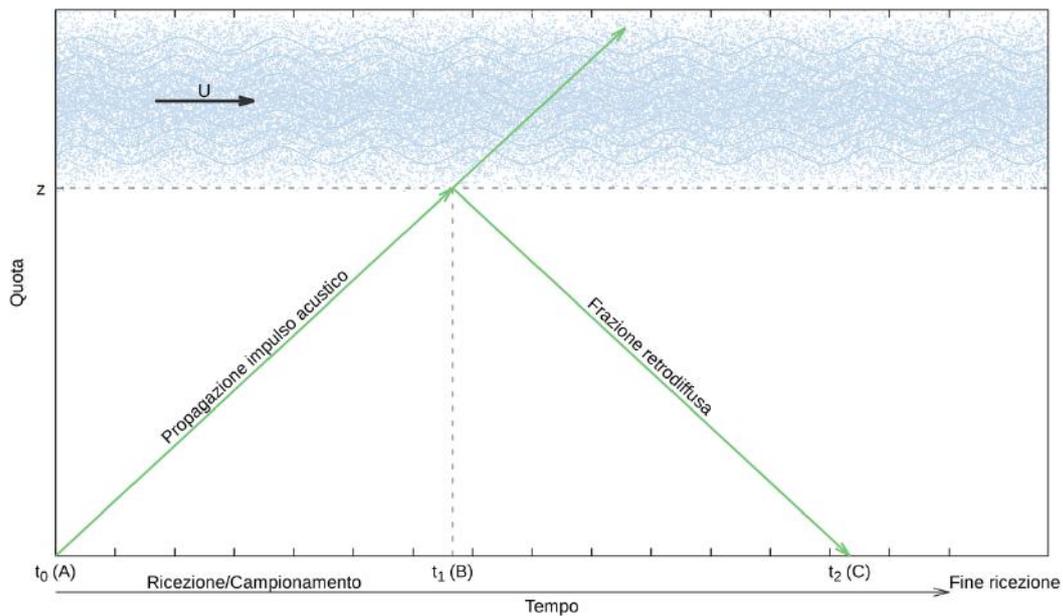


Figura B.3: Rappresentazione schematica relativa al funzionamento di un SODAR monostatico.

1. L'antenna emette all'istante t_0 un impulso acustico di cui sono note: la frequenza f e la direzione di propagazione. In questo esempio si ipotizza che la durata del segnale acustico sia trascurabile. Terminata l'emissione, l'antenna si dispone in modalità di ricezione, ossia, l'antenna "resta in ascolto" del segnale retro-diffuso lungo la direzione di propagazione dell'impulso acustico inizialmente emesso, per una predeterminata finestra temporale, che a sua volta è suddivisa in un numero fissato di sotto-intervalli.
2. Il segnale acustico si propaga in atmosfera alla velocità del suono ($c = 333\text{m s}^{-1}$ circa), finché raggiunge al tempo t_1 la quota z , dove è in parte retro-diffusa a causa della turbolenza atmosferica.
3. Al tempo t_2 il segnale retro-diffuso raggiunge nuovamente l'antenna.
4. Dall'intervallo di tempo trascorso dall'emissione del segnale alla sua ricezione è quindi possibile stimare la quota a cui l'onda acustica è stata retro-diffusa. Infatti segue che:

$$z = c \frac{t_2 - t_0}{2}$$

5. Siccome l'onda acustica è stata riflessa da un mezzo in movimento, il segnale registrato dal SODAR è soggetto ad effetto Doppler e quindi risulta sfasato di una quantità df rispetto al segnale emesso. Pertanto la componente della velocità del vento proiettata lungo la direzione di propagazione dell'onda

Tabella B.1: Principali specifiche tecniche del SODAR utilizzato durante lo studio.

Intervallo di frequenze degli impulsi acustici	1650-2750 Hz
Massimo numero di frequenze per sequenza	10
Potenza del fascio acustico	7.5 W
Angoli di emissione/ricezione	0°, ±22°, ±29°
Massimo numero di livelli verticali	100
Risoluzione verticale	10 m
Spessore dello strato di atmosfera investigato	500-1000 m
Accuratezza della velocità orizzontale del vento	0.1-0.3 m s ⁻¹
Intervallo della velocità orizzontale	±50 m s ⁻¹
Accuratezza della velocità verticale del vento	0.03-0.1 m s ⁻¹
Intervallo della velocità verticale	±10 m s ⁻¹

acustica u_r (velocità radiale) si ottiene dalla relazione:

$$u_r = -\frac{c}{2} \frac{\delta f}{f}$$

Si comprende quindi che dall'analisi del segnale emesso lungo la verticale è possibile determinare la componente verticale del vettore della velocità del vento. La stima delle componenti orizzontali del vento, invece, avviene combinando le velocità radiali ricavate dai fasci acustici omologhi emessi con una certa inclinazione. Ad esempio, la componente del vento in direzione Nord-Sud è ottenuta dalle velocità radiali ricavate dai fasci acustici emessi verso Nord e verso Sud, nota l'inclinazione della direzione di propagazione.

Al fine di aumentare l'accuratezza delle misure, i SODAR possono emettere:

1. Impulsi acustici di un'unica frequenza (monofonici) per una certa durata per aumentare la ridondanza dei segnali captati e quindi per stimare in modo più accurato lo sfasamento Doppler.
2. Impulsi acustici polifonici. Le onde acustiche sono riflesse dalle strutture turbolente con dimensione caratteristica maggiore o uguale alla lunghezza d'onda associata all'impulso acustico emesso. Ciò significa che il SODAR non è in grado di ricostruire il campo di vento in quegli strati in cui la condizione per la rifrazione dell'onda acustica non è soddisfatta. Dunque, la possibilità di emettere fasci di onde acustiche variando la frequenza caratteristica degli impulsi permette di ottenere misure più accurate della velocità del vento.

Relativamente al rumore ambientale, mediante un opportuno trattamento del segnale, i SODAR sono in grado di analizzare e rimuovere dal segnale captato eventuali contaminazioni dovute alla presenza di rumore di fondo, in particolare se

questo è pressoché costante nel tempo. Viceversa, la presenza nel segnale campionato di rumori non stazionari o caratterizzati da frequenze simili a quelle dei fasci acustici emessi dall'antenna (ad esempio le sirene di ambulanze), non sempre sono riconosciuti o correttamente filtrati. In questi casi il SODAR non restituisce un valore, o restituisce la misura contrassegnandola con una flag di qualità del dato.

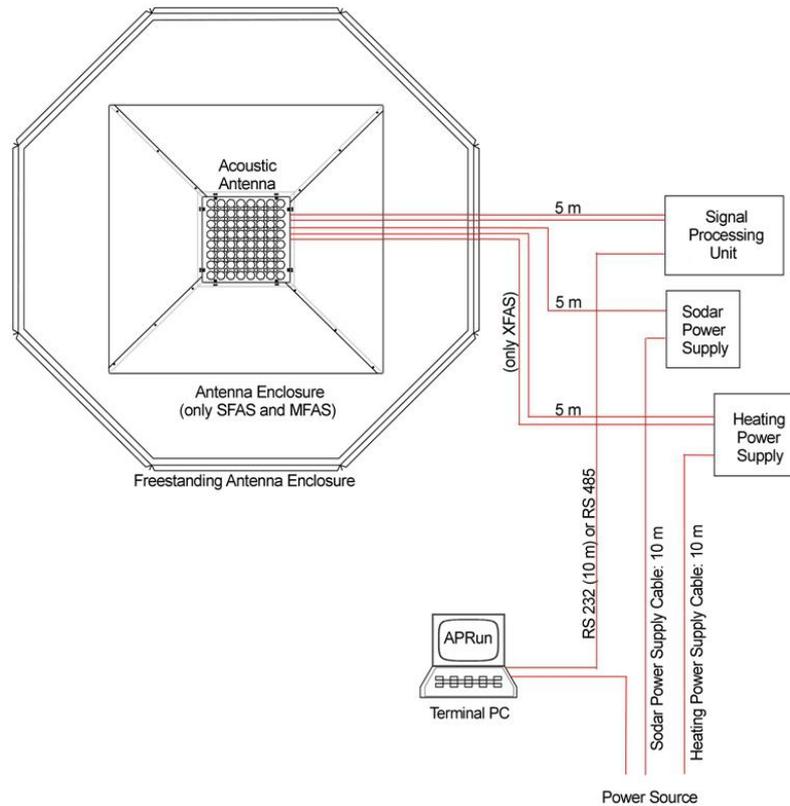


Figura B.4: Schema esemplificativo delle componenti del SODAR utilizzato durante lo studio (immagine tratta da Scintec, 2006)

B.2.2 Installazione e utilizzo della strumentazione SODAR nell'ambito dello studio tecnico e contestualizzazione delle misure con le caratteristiche del sito sperimentale.

Il SODAR utilizzato durante lo studio è stato installato sul tetto del termovalorizzatore a circa 40 m dal suolo, al fine di misurare i profili del vento in prossimità del punto di rilascio dei fumi in atmosfera, durante le campagne di misura con rilascio di tracciante. La definizione degli spazi e delle modalità per l'installazione del SODAR è stata effettuata in prima battuta durante il sopralluogo svolto il 23 settembre 2015 e successivamente verificata durante una breve campagna di misure svolta nel periodo 26-30 ottobre 2015. Le campagne di misura finalizzate alla raccolta di profili verticali del vento sono state invece condotte nei periodi 12 gennaio-20 febbraio 2016 e 29 agosto 2016-05 maggio 2017.

La strumentazione installata, come schematizzato in Figura B.4 è costituita da:

1. un'antenna dotata di una matrice di 64 trasduttori con il compito di emettere e ricevere i segnali acustici;

2. un'unità di analisi del segnale, che ha il compito di analizzare il segnale acustico captato, convertirlo da analogico a digitale, e analizzarlo al fine di restituire la misura di velocità. In particolare dall'analisi dello spettro del segnale è possibile derivare informazioni sulla turbolenza atmosferica. Infatti, tanto più il segnale captato ha un'ampiezza simile a quella del segnale emesso, tanto più risulta sviluppata la turbolenza dello strato di atmosfera che ha riflesso il segnale;
3. un'unità di alimentazione;
4. un'unità di riscaldamento, da utilizzare durante i mesi freddi al fine di evitare danni da gelo alla strumentazione;
5. una struttura ottagonale di pannelli fonoassorbenti da installare attorno all'antenna con lo scopo di isolare l'antenna dal rumore ambientale nelle immediate vicinanze del punto di emissione e contenere i lobi orizzontali dei fasci acustici emessi, garantendo così la sicurezza acustica nelle immediate vicinanze dell'antenna.

La gestione del sensore e dei dati misurati avviene attraverso il software APRun, fornito dalla casa produttrice del SODAR e installato su di un computer portatile, posizionato presso la sala SME del termovalorizzatore. Il computer è stato quindi connesso mediante un cavo all'unità di analisi dei dati, posizionata a fianco dell'antenna sul tetto del termovalorizzatore. Questo computer è stato inoltre utilizzato per trasmettere, attraverso la rete wi-fi dell'impianto, i dati provenienti dal SODAR al database a cui attinge la catena modellistica, unitamente con i dati della stazione meteorologica installata sul tetto del termovalorizzatore e delle emissioni. Inoltre il computer è stato reso accessibile da remoto, al fine di poter gestire le impostazioni del SODAR da remoto.

Il SODAR è stato impostato per investigare i primi di 450 m di atmosfera al di sopra dell'antenna, con una risoluzione verticale di 10 m. I profili di vento sono stati misurati utilizzando fasci acustici polifonici costituiti da 10 diverse frequenze. Relativamente alla durata degli impulsi, si sono utilizzate le durate di default suggerite dal software APRun. Durante le due campagne di misura la strumentazione è stata costantemente tenuta sotto controllo per accertare il corretto funzionamento e intervenire in caso di problemi. In particolare si sono condotti numerosi interventi per risolvere diverse problematiche: tra le più frequenti la perdita di connessione da parte del portatile con la rete dell'impianto. Ciò ha determinato l'interruzione del trasferimento dei dati, ma non la loro acquisizione. Inoltre, in occasione di intensi eventi di Föhn, la struttura di pannelli fonoassorbenti a protezione dell'antenna è



Figura B.5: Distorsione della struttura di pannelli fonoassorbenti a seguito di eventi intensi di Föhn (a, b). Rinforzo alla struttura dei pannelli fonoassorbenti del SODAR effettuata nel mese di novembre 2016: il supporto per l'antenna (c) e i rinforzi di alluminio applicati all'esterno dei pannelli (d).

spesso stata disallineata o spostata, andando, in alcuni casi, ad impattare contro l'antenna. Per far fronte a questo problema, si è provveduto a progettare il rinforzo alla struttura dei pannelli, successivamente installato nel mese di novembre 2016 (Figura B.5).

Relativamente alla gestione del rumore ambientale si è provveduto ad effettuare periodicamente vari test di autocalibrazione del SODAR. Durante questi test il SODAR, oltre a verificare il corretto funzionamento di tutte le diverse componenti, acquisisce ed analizza dati di rumore ambientale che poi utilizza durante la fase di misure per l'analisi dei segnali registrati. Tuttavia il rumore ambientale presso il sito sperimentale non è costante durante la giornata. Una delle principali fonti di disturbo alle misure è il rumore indotto dal traffico lungo il tratto di autostrada che costeggia l'impianto. Si è infatti osservato che, soprattutto in corrispondenza delle ore di punta (mattina e sera), la qualità dei dati raccolti diminuisce, così come lo spessore dello strato di atmosfera investigato.

Altre due fonti di rumore hanno ridotto la capacità del SODAR di investigare gli strati di atmosfera fino alla massima quota impostata, ancorché circoscritti a brevi periodi sono stati: l'accensione del sistema di aerazione del termovalorizzatore nei mesi più caldi e l'interazione di venti particolarmente intensi (eventi di Föhn) con la struttura.

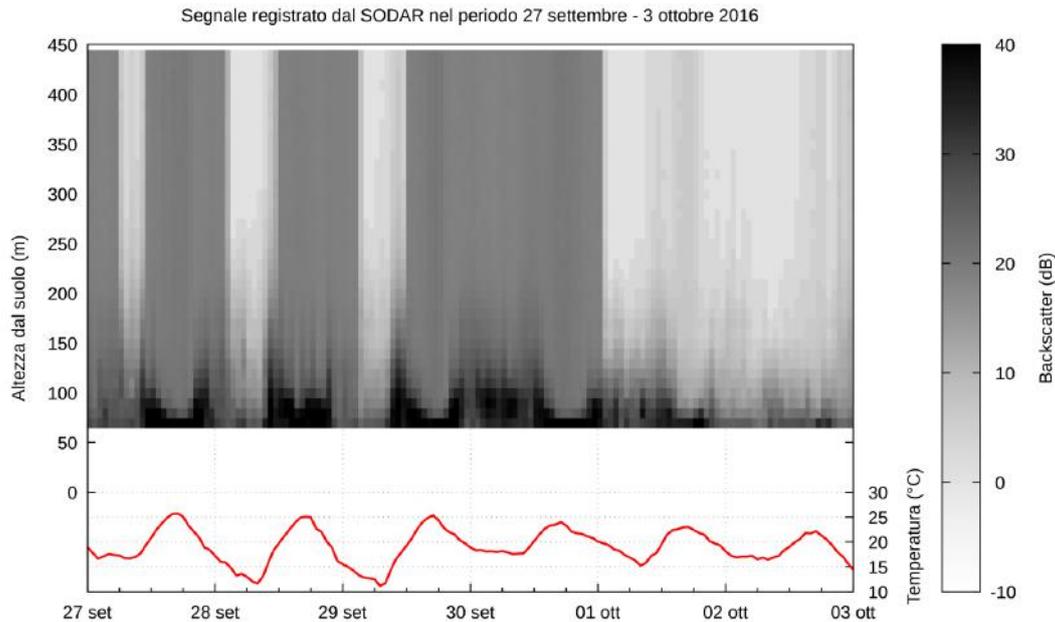


Figura B.6: Segnale registrato del SODAR dal 27 settembre al 3 ottobre 2016 (sopra) e andamento della temperatura dell'aria misurato presso la stazione di Bolzano Ospedale (sotto).

A titolo di esempio, si riporta in Figura B.6 il segnale registrato dal SODAR (*backscatter*) per il periodo 27 settembre-3 ottobre 2016. Dall'immagine si osservano delle fasce orarie in cui il segnale ricevuto è uniformemente distribuito con la quota. Ciò è indice di intenso rumore ambientale nelle vicinanze dell'antenna che “schema” gli echi dei segnali acustici emessi. Questo effetto è associato all'attivazione del sistema di ventilazione dell'impianto.

Infine, si sottolinea l'effetto dell'interazione dei fumi del termovalorizzatore con le onde acustiche del SODAR. I fumi del termovalorizzatore presentano un'intensità di turbolenza (termica e meccanica) superiore a quella dell'atmosfera circostante in cui sono emessi. Di conseguenza il SODAR osserva la presenza in atmosfera di uno strato caratterizzato da maggior turbolenza, soprattutto quando in Val d'Adige spirano venti di risalita (da Sud) che spostano i fumi dell'impianto verso Nord. Poiché i fumi sono trasportati con la velocità del vento medio, non si hanno effetti netti sulla stima delle componenti orizzontali del vento. Si osservano invece valori “anormali” della velocità verticale del vento, che tipicamente è caratterizzata da un valore medio nullo. In Figura B.7 si riportano i grafici delle medie semiorarie della velocità verticale del vento, della direzione e dell'intensità del vento, registrate dal SODAR il 16 e il 17 febbraio 2017. Le due giornate sono state scelte in quanto caratterizzate dalla presenza di un ciclo di venti di valle, seppur debole: nelle ore notturne si osservano venti di drenaggio da nord, mentre nelle ore centrali della giornata spirano venti di risalita da sud. I grafici permettono di apprezzare come il valore medio

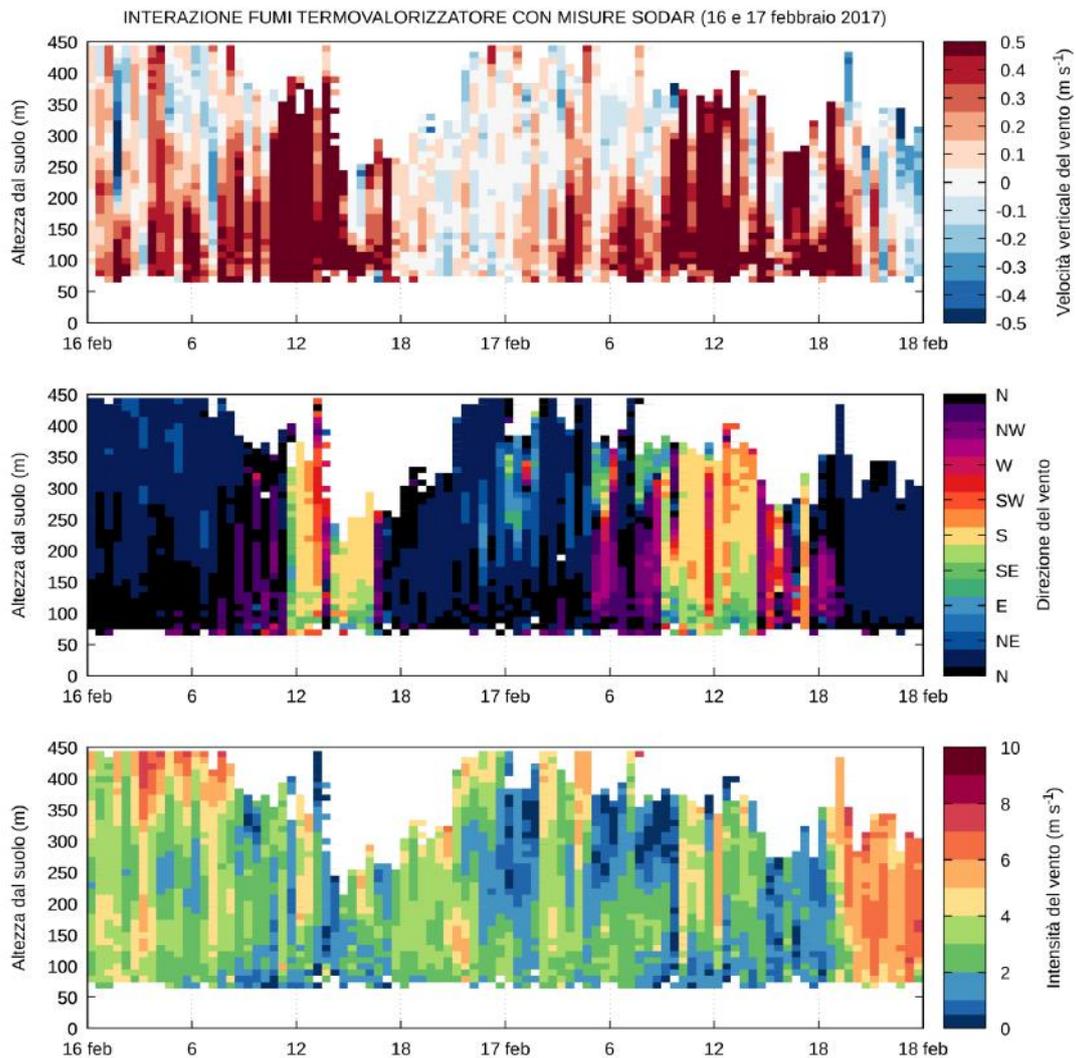


Figura B.7: Interazione dei fumi emessi dal termovalorizzatore con le misure del SODAR. Si riportano per i giorni 16 e 17 febbraio 2017 i grafici della velocità verticale del vento (sopra), della direzione (centro) e dell'intensità (sotto). I dati riportati sono medie semiorarie.

della velocità verticale del vento assuma valori positivi in corrispondenza di venti da sud.

B.3 Strumentazione Doppler Wind-LIDAR

LIDAR (*Light Detaction and Ranging*) è un metodo di telerilevamento che utilizza onde elettromagnetiche, nella forma di impulsi laser, per effettuare misurazioni di distanze. In generale, un LIDAR misura il tempo di volo che intercorre tra l'emissione di un impulso laser e la ricezione del segnale retro-diffuso. In questo modo è possibile conoscere la posizione dell'oggetto che riflette il segnale emesso

moltiplicando il tempo di volo per la velocità della luce e dividendo per due.

I LIDAR utilizzati nel campo della fisica dell'atmosfera si distinguono in due famiglie:

- LIDAR per la misura di quantità scalari (temperatura, aerosol o particolato atmosferico).
- LIDAR per la misura di quantità vettoriali, come la velocità del vento. In questo caso si parla di Wind-LIDAR o più correttamente di Doppler Wind-LIDAR.

Nel caso di applicazioni in atmosfera, il bersaglio che retro-diffonde il segnale laser emesso dal LIDAR è costituito dall'aerosol atmosferico. I Doppler Wind-LIDAR permettono di misurare il vettore della velocità del vento, similmente a quanto descritto per un SODAR, attraverso la misura dello sfasamento Doppler e secondo i seguenti passi:

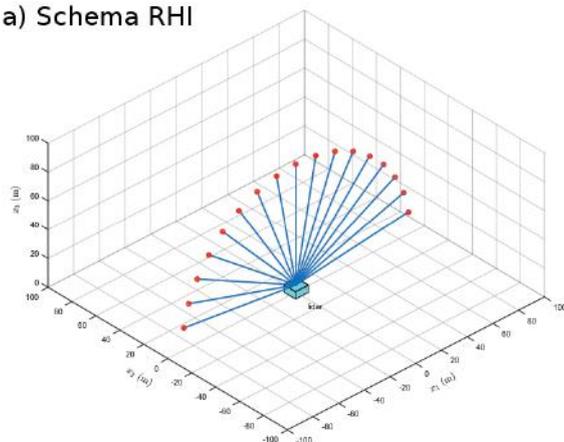
1. il LIDAR genera ed emette un fascio di impulsi laser, la cui forma (ampiezza e frequenza del segnale) è nota, lungo una certa direzione, chiamata linea di vista (*line of sight*: LOS);
2. gli aerosol atmosferici illuminati dal laser retro-diffondono una frazione della radiazione che li ha investiti;
3. il LIDAR registra ad intervalli regolari il segnale retro-diffuso (ampiezza e frequenza) lungo la medesima LOS lungo cui il è stato emesso;
4. poiché gli aerosol sono in movimento, in quanto trasportati dal vento, il segnale retro-diffuso è soggetto all'effetto Doppler, ossia la sua frequenza è modificata in funzione della velocità del mezzo;
5. dall'analisi comparativa del segnale ricevuto con quello emesso il LIDAR restituisce la stima della velocità radiale, ossia della proiezione del vettore della velocità del vento lungo la LOS;

I Doppler Wind-LIDAR permettono una ricostruzione tridimensionale del campo di moto, attraverso l'esecuzione di diverse tipologie di scansione con diverse tipologie di risoluzione. L'affidabilità di questa tecnologia è ben documentata in letteratura (e.g. Neff, 1990; Caya & Zawadzki, 1992; O' Connor et al., 2010; Choukulkar et al., 2012; Wang et al., 2015, 2016), anche per quanto concerne l'utilizzo in ambiente a terreno complesso (e.g. Banta et al., 1995, 2002; Rucker et al., 2008; Chrust et al., 2013; Suomi et al., 2017). In particolare, il Doppler Wind-LIDAR WindCUBE 100S prodotto dalla Leosphere (Francia) e utilizzato durante lo studio tecnico ha permesso di effettuare le seguenti tipologie di scansione:

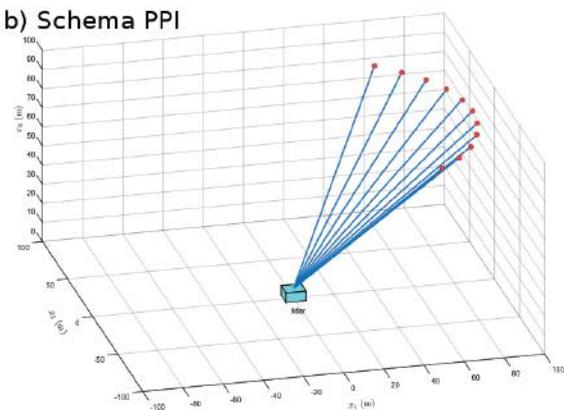
- *Range Height Index* (RHI): il Wind-LIDAR esegue scansioni lungo sezioni verticali (Figura B.8a). Fissato l'azimuth dello scanner rispetto al nord strumentale, il sensore esegue le misure modificando l'angolo di elevazione dello scanner. Questa configurazione è tipicamente utilizzata per lo studio della struttura verticale del campo di moto. In particolare quando la scansione è allineata con la direzione del vento e l'elevazione è inferiore a 10 gradi, la misura della velocità radiale può essere utilizzata per stimare la componente planare dell'intensità del vento, dividendo la velocità radiale per il coseno dell'elevazione;
- *Plan Position Index* (PPI): è la configurazione complementare alla RHI, in quanto le scansioni sono effettuate variando l'azimuth, ma mantenendo costante l'elevazione (Figura B.8b). In questo caso le velocità radiali sono stimate lungo superfici coniche e possono essere utilizzate per studiare la struttura orizzontale del campo di moto;
- *Doppler Beam Swigging technique* (DBS): il Wind-LIDAR esegue la stima diretta del profilo di velocità del vento effettuando misure lungo 5 LOS (Figura B.8c): una verticale e 4 inclinate di 75 gradi tra loro ortogonali. In questo modo le componenti planari della velocità del vento sono stimate analizzando a due a due le velocità radiali misurate lungo le 4 LOS inclinate, mentre la velocità verticale è ottenuta direttamente dalla velocità radiale misurata lungo la verticale.

Il WindCUBE 100S utilizzato nello studio ha permesso di investigare i primi 1200-1500 m di atmosfera con risoluzioni spaziali comprese tra 25 e 50 m lungo ciascuna LOS. La risoluzione temporale delle misure è determinata dalla tipologia di scansione. Ad esempio, la misura del profilo verticale del vento mediante scansione DBS restituisce un profilo ogni 5 s circa (0.2 Hz). Relativamente alla risoluzione spaziale delle misure è possibile identificare diverse strategie che dipendono non solo dagli scopi dello studio e dal fenomeno che si vuole investigare, ma anche dalle caratteristiche dell'atmosfera ed in particolare dalla concentrazione di aerosol. Infatti, in presenza di basse concentrazioni di aerosol, l'intensità del segnale riflesso è debole e risoluzioni spaziali elevate (e.g. 25 m) non permettono al sensore di restituire valori attendibili della velocità del vento.

a) Schema RHI



b) Schema PPI



c) Schema DBS

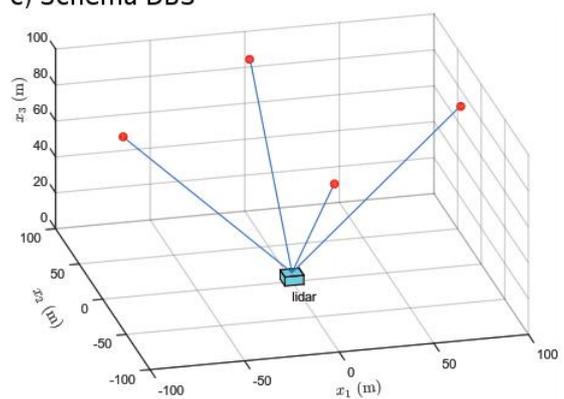


Figura B.8: Tipologie di scansione implementate nel Doppler Wind-LIDAR utilizzato durante lo studio: (a) Range Height Index (RHI), (b) Plan Position Index (PPI), (c) Doppler Beam Swinging technique (DBS). Immagini tratte da Barthelmie et al. (2016).

APPENDICE C

Campagna sperimentale per la determinazione del pennacchio del termovalorizzatore

Uno degli aspetti critici nella modellazione della dispersione degli inquinanti da fonti puntuali è la stima della quota di risalita dei fumi. Al fine di acquisire questa informazione, si è coinvolto l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-ISAC) con sede di Bologna ed in particolare con l'Unità che si occupa dello sviluppo di tecniche di telerilevamento per il monitoraggio delle emissioni in atmosfera. Si sono condotti incontri presso la sede dell'Istituto CNR-ISAC di Bologna (26 febbraio, 9 giugno e 19 settembre 2016) finalizzati alla comprensione delle modalità con cui la tecnologia proposta fosse in grado di ricostruire la forma tridimensionale del pennacchio del termovalorizzatore e quindi stimare la quota a cui avviene la risalita dei fumi.

A seguito dei sopralluoghi svolti il 22 giugno 2016, si è individuato come sito più idoneo per la dislocazione della strumentazione (Figura C.1) il Campo di Paintball di Bolzano (Via Lungo Isarco Destro). La campagna sperimentale si è svolta dal 7 all'11 novembre 2016. Le misure sono state eseguite dal personale tecnico dell'Unità del CNR-ISAC di Bologna, mentre l'Unità dell'Università degli Studi di Trento ha svolto assistenza tecnica sul campo durante tutta la durata della campagna sperimentale, dalle fasi di installazione della strumentazione alla disinstallazione.

Per la ricostruzione tridimensionale del pennacchio si è utilizzato un MINI-LIDAR. Questo sensore permette di ottenere informazioni sulla struttura 3D dei fumi emessi dall'impianto attraverso la misura del tempo di volo di impulsi luminosi (emissione/ricezione di un fascio laser) che sono retro diffusi dalle polveri presenti nei fumi. Il sensore utilizzato, in particolare, è stato progettato per emettere fasci laser sia nel visibile (luce verde) sia nell'ultravioletto, in modo da poter osservare anche le particelle con pezzatura superiore a 102 nm (Figura C.1). La misura delle concentrazioni di SO₂ e di NO_x nei fumi emessi dall'impianto è invece stata effettuata con uno spettro-radiometro. Questo sensore esegue misure dello spesso-



Figura C.1: Sito sperimentale e installazione della strumentazione per l'esecuzione delle campagne di misura (a sinistra). Dettaglio della strumentazione utilizzata (a destra). Nel cerchio rosso lo spettro-radiometro, nel rettangolo azzurro il LIDAR

re ottico restituendo lo spettro della radiazione globale. La concentrazione della specie chimica è ottenuta valutando le variazioni del valore assunto dallo spettro in corrispondenza del canale di assorbimento della specie chimica in esame (Figura C.1).

La campagna di misure ha avuto inizio la mattina dell'8 novembre ed è terminata nella serata del'11 novembre. Le misurazioni sono state condotte in corrispondenza di tutte le giornate dalle ore 8 alle ore 17.

In Figura C.2 si riportano alcune fotografie effettuate durante la campagna di misure. In corrispondenza di questi istanti le condizioni atmosferiche erano tali da consentire la condensazione dei fumi e quindi è stato possibile avere un'informazione diretta della struttura del pennacchio, o più precisamente della struttura del pennacchio in grado di condensare.

Nonostante l'accuratezza della sensoristica adottata, le concentrazioni eccessivamente basse di polveri e di inquinanti presenti nei fumi del termovalorizzatore non hanno permesso di individuare chiaramente un segnale adeguatamente diverso dal fondo ambientale.



Figura C.2: Forme assunte dal pennacchio del termovalorizzatore durante la campagna

APPENDICE D

Collaborazioni di ricerca e comunicazione dei risultati

Sin dalle sue fasi iniziali, lo studio ha evidenziato sempre più la complessità e la valenza scientifica dei processi atmosferici che si realizzano in diverse condizioni meteorologiche nella conca di Bolzano. Pertanto è emerso sempre più chiaramente che lo studio presenta un'elevata valenza scientifica, enfatizzata dalla complessa topografia dell'area in esame. Tra i particolari punti di forza vi è la caratterizzazione delle circolazioni locali e la loro influenza nei processi di dispersione degli inquinanti in atmosfera. L'attività sperimentale (monitoraggio meteorologico e campionamento durante i rilasci) e modellistica (*forecasting* e *nowcasting* per i rilasci e in post-processing per la rianalisi) non sono state replicate da precedenti esperienze in letteratura, ma sono state pressoché ideate appositamente per lo studio. Infatti, i risultati degli esperimenti rappresentano un prezioso database informativo per studi di dispersione di inquinanti su terreno complesso, di interesse scientifico internazionale in ragione della loro unicità e della ricchezza di dati contestualmente raccolti (misure meteorologiche e di concentrazioni).

Nell'ambito dello studio è stato possibile stipulare diverse tipologie di collaborazioni:

1. presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento si è stipulato un contratto per la collaborazione triennale a tempo pieno di ricerca dal titolo: "Caratterizzazione dei processi atmosferici a supporto di azioni di monitoraggio della dispersione delle emissioni dal termovalorizzatore di Bolzano".
2. per la modellazione numerica dei processi di dispersione degli inquinanti in atmosfera, è stata coinvolta la Società CISMA S.r.l. (Centro di Ingegneria e Sviluppo di Modelli per l'Ambiente), in quanto esperta di modellistica am-

bientale e con particolare riferimento ai processi atmosferici che caratterizzano l'area di Bolzano.

3. per le analisi di laboratorio necessarie a determinare le concentrazioni di traccianti contenute nei campioni raccolti durante le campagne sperimentali, ci si è avvalsi della collaborazione con l'Istituto di Ricerche Farmacologiche "Mario Negri".

Inoltre, i risultati preliminari dello studio sono stati posti all'attenzione della comunità scientifica internazionale. Attraverso presentazioni in sede di convegni nazionali ed internazionali, sia focalizzati sulla modellazione dei processi meteorologici in ambiente a terreno complesso sia specialistici per la modellazione dei processi di dispersione degli inquinanti, si sono potuti avere riscontri costruttivi circa l'adeguatezza delle metodologie e delle analisi implementate durante lo studio. In particolare, si sono strette proficue collaborazioni con qualificati gruppi di ricerca ed in particolare con:

1. il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Avanzate dell'Università del Piemonte Orientale;
2. l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-ISAC);
3. il *National Security Applications Program* NSAP-NCAR presso Boulder, Colorado (US).

Nell'ambito di queste collaborazioni si è permesso ad uno dei membri dell'Unità dell'Università degli Studi di Trento di svolgere un periodo formativo semestrale durante la propria attività di Dottorato di Ricerca presso il *National Security Applications Program* del *National Center for Atmospheric Research* (NSAP-NCAR) a Boulder (Colorado, US). Presso questa sede si è approfondito lo studio dei processi meteorologici e di dispersione degli inquinanti in ambiente a terreno complesso per una loro migliore modellazione, con particolare riferimento al caso studio della Conca di Bolzano. Qui, grazie alle potenti risorse di calcolo messe a disposizione da NCAR, si è effettuata la simulazione meteorologica ad altissima risoluzione relativa al giorno del rilascio del 14 febbraio 2017 (Sezione 4.1).

Contributi presentati in sede di convegno nazionale ed internazionale

1. **Preliminary pollutant dispersion modeling with CALMET and CALPUFF over complex terrain in the Bolzano Basin (IT)**. Tomasi E., Giovannini L., Falocchi M., Zardi D., Antonacci G.. *17th International Conferen-*

- ce on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes* (9-12 maggio 2016, Budapest, Ungheria).
2. **High-resolution WRF simulations with data assimilation to improve the evaluation of meteorological fields over complex terrain in the Bolzano Basin (IT)**. Giovannini L., Tomasi E., Falocchi M., Zardi D. *17th Conference on Mountain Meteorology* (27 giugno-1 luglio 2016, Burlington, Vermont US).
 3. **Dispersion modeling over complex terrain in the Bolzano basin (IT): preliminary results from a WRF-CALPUFF modeling system**. Tomasi E., Giovannini L., Falocchi M., Zardi D., Antonacci G., Ferrero E., Bisignano A., Alessandrini S., Mortarini L. *Proceedings of the 35th International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application* (3-7 ottobre 2016, Chania, Creta, Grecia).
 4. **Lidar observations and high-resolution modelling of a wind jet at the exit of the Isarco Valley (Italy)**. Falocchi M., Giovannini L., Tomasi E., Antonacci G., Pallaveri T., Zardi D. *35th International Conference on Alpine Meteorology* (18-23 giugno 2017, Reykjavik, Islanda).
 5. **Experimental validation of a modelling chain for the dispersion of pollutants from the incinerator of Bolzano (Italy)**. Zardi D., Alessandrini S., Antonacci G., Bisignano A., Falocchi M., Ferrero E., Giovannini L., Guariento M., Lodi M., Mortarini L., Palmitano M., Tirler W., Tomasi E., Verdi L. *35th International Conference on Alpine Meteorology* (18-23 giugno 2017, Reykjavik, Islanda).
 6. **Wind-LIDAR observations and high-resolution modelling of a wind jet at the exit of the Isarco Valley (Italy)**. Falocchi M., Giovannini L., Tomasi E., Antonacci G., Zardi D. *CIII Congresso Nazionale della Società di Fisica Italiana* (11-15 settembre 2017, Povo, Trento).
 7. **The Bolzano Tracer EXperiment (BTEX): an experiment on tracer gas dispersion from an incinerator stack and on its real-time modelling**. Tomasi E., Antonacci G., Giovannini L., Falocchi M., Alessandrini S., Ferrero E., Zardi D. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes* (9-12 ottobre 2017, Bologna, Italia).
 8. **A 3D Planet Boundary Layer scheme for the representation of dispersion processes in sub-kilometer horizontally non-homogeneous**

flows. Tomasi E., Giovannini L., Jimenez P., Kosovic B., Alessandrini S., Ferrero E., Falocchi M., Zardi D., Delle Monache L. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes* (9-12 ottobre 2017, Bologna, Italia).

9. **Measurement and Modeling of Local Circulation Patterns and Pollutant Dispersion from a Waste Incinerator in the Basin of Bolzano in the Italian Alps.** Tomasi E., Alessandrini S., Antonacci G., Delle Monache L., Falocchi M., Ferrero E., Giovannini L., Jimenez P. A., Kosovic B., Zardi D. *98th Annual Meeting of the American Meteorological Society* (6-11 gennaio 2018, Austin, Texas).
10. **Wind-LIDAR observations and high-resolution modeling of a thermally-driven valley-exit jet at the outlet of the Isarco Valley (Italy).** Falocchi M., Giovannini L., Tomasi E., Antonacci G., Zardi D. *23rd Symposium on Boundary Layers and Turbulence and 21st Conference on Air-Sea Interaction* (11-15 giugno, Oklahoma City, Oklahoma). Sottomesso.
11. **Measurement and Modeling of Local Circulation Patterns and Pollutant Dispersion from a Waste Incinerator in the Basin of Bolzano in the Italian Alps.** Tomasi E., Alessandrini S., Antonacci G., Delle Monache L., Falocchi M., Ferrero E., Giovannini L., Jimenez P. A., Kosovic B., Zardi D. *18th Conference on Mountain Meteorology* (25-29 June 2018, Santa Fe, New Mexico). Sottomesso.
12. **High-resolution simulations of the thermally-driven valley-exit-jet of the Isarco Valley (Italy) and comparisons with Wind-LIDAR observations.** Giovannini L., Falocchi M., Tomasi E., Antonacci G., Gucci F., Zardi D. *18th Conference on Mountain Meteorology* (25-29 June 2018, Santa Fe, New Mexico). Sottomesso.

Tesi di Laurea

L'analisi dei dati meteorologici misurati dalla sensoristica presente nella conca di Bolzano e utilizzata nello studio, ha un forte carattere formativo e didattico. La valorizzazione del dataset raccolto è stata perseguita anche attraverso tesi di laurea inerenti questi aspetti.

Ad ora, sono state discusse tre tesi di Laurea Triennale in Fisica che hanno rispettivamente avuto come oggetto l'analisi dei profili di temperatura misurati dal profilatore termico per l'anno 2016, l'analisi dei profili di vento misurati dal Doppler Wind-LIDAR nel periodo gennaio-febbraio 2017 e misurati dal SODAR installato

sul tetto del termovalorizzatore da fine agosto 2016 a maggio 2018. Di seguito i dettagli dei lavori di tesi:

1. **Characterization of the atmospheric stability over the city of Bolzano.** Riccardo Montalvo Alvarez, Corso di Laurea in Fisica, Università degli Studi di Trento, A.A. 2015/2016. Relatore: Prof. Zardi D., Correlatore: Dott. Giovannini L.
2. **Doppler LIDAR observations of a wind jet at the exit of the Isarco Valley (Italy).** Tommaso Pallaveri, Corso di Laurea in Fisica, Università degli Studi di Trento, A.A. 2015/2016. Relatore: Prof. Zardi D., Correlatori: Dott. Falocchi M., Dott. Giovannini L.
3. **Observation of wintertime air circulation patterns in the Bolzano Basin by means of SODAR measurements.** Lavio A., Corso di Laurea in Fisica, Università degli Studi di Trento, A.A. 2016/2017. Relatore: Prof. Zardi D., Correlatori: Dott. Falocchi M., Dott. Giovannini L.

Recentemente, è stata avviata una tesi di Laurea Magistrale in Fisica relativa all'analisi di dettaglio del *valley-exit jet* della Val d'Isarco. La tesi verterà sia sull'analisi dei dati forniti dal Wind-LIDAR sia sulla modellazione di questo fenomeno attraverso l'esecuzione di simulazioni numeriche ad altissima risoluzione in corrispondenza di alcuni casi studio.

Tesi di Dottorato di Ricerca

Lo studio del termovalorizzatore di Bolzano ha costituito parte della seguente tesi di Dottorato di Ricerca:

Improving air quality assessment over complex terrain by optimizing meteorological and pollutant transport modeling, Elena Tomasi, XXIX Ciclo, Scuola di Dottorato in Civil, Environmental and Mechanical Engineering, Università degli Studi di Trento. Discussione: 14 dicembre 2016.

Divulgazione dei risultati

Relativamente alla comunicazione delle attività svolte e dei risultati, si è data la disponibilità ad interagire con:

1. operatori della comunicazione incaricati da EcoCenter di realizzare audiovisivi per la comunicazione al pubblico delle attività svolte nell'ambito dello studio anche mediante un'intervista rilasciata dal Prof. Zardi in data 8 febbraio 2017 e 25 gennaio 2018.

2. il Prof. Paolo Prati del Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova e il Dott. Paolo Brotti della società PM_TEN s.r.l., nominati dal Comune di Bolzano come Supervisor esterni dello studio. In particolare sono state fornite tutte le informazioni richieste relative alle modalità di svolgimento dello studio, l'accesso alle campagne sperimentali. Si è inoltre assicurata loro la massima disponibilità a fornire ogni ulteriore informazione utile ad approfondire gli sviluppi dello studio.

I risultati dello studio tecnico sono stati presentati a dei rappresentanti del Ministero dell'Ambiente, del Ministero dello Sviluppo Economico e dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) durante un incontro tenutosi a Roma il 22 gennaio 2018.

Bibliografia

- Addis, R., Fraser, G., Girardi, F., Graziani, G., Inoue, Y., Kelly, N., Klug, W., Kulmala, A., Nodop, K., Pretel, J., et al. (1998). ETEX: a European tracer experiment; observations, dispersion modelling and emergency response. *Atmospheric Environment*, *32*(24), 4089–4094.
- Allwine, K. J., & Flaherty, J. E. (2006). Joint Urban 2003: Study overview and instrument locations. Tech. rep., Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (US).
- An, J., Xiang, W., Han, Z., Xiao, K., Wang, Z., Wang, X., Wu, J., Yan, P., Li, J., Chen, Y., et al. (2013). Validation of the Institute of Atmospheric Physics emergency response model with the meteorological towers measurements and SF₆ diffusion and pool fire experiments. *Atmospheric environment*, *81*, 60–67.
- Banta, R., Newsom, R., Lundquist, J., Pichugina, Y., Coulter, R., & Mahrt, L. (2002). Nocturnal low-level jet characteristics over Kansas during CASES-99. *Boundary-Layer Meteorology*, *105*(2), 221–252.
- Banta, R. M., Olivier, L. D., Neff, W. D., Levinson, D. H., & Ruffieux, D. (1995). Influence of canyon-induced flows on flow and dispersion over adjacent plains. *Theoretical and applied climatology*, *52*(1-2), 27–42.
- Barthelmie, R. J., Wang, H., Doubrawa, P., & Pryor, S. (2016). Best practice for measuring wind speeds and turbulence offshore through in-situ and remote sensing technologies. Tech. rep., Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering, College of Engineering, Cornell University, Upson Hall, Ithaca NY 14853.
- Bolzano, A. (2017). Rapporto annuale qualità dell’aria. Tech. rep., Agenzia Provinciale per l’Ambiente della Provincia Autonoma di Bolzano.
- Britter, R. E., Di Sabatino, S., Caton, F., Cooke, K. M., Simmonds, P. G., & Nickless, G. (2002). Results from three field tracer experiments on the neighbourhood scale in the city of Birmingham UK. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, *2*(5-6), 79–90.
- Camuffo, D., De Bortoli, M., & Gaglione, P. (1979). Tests on atmospheric diffusion with tracers in an urban area. Tech. Rep. 108, NATO CC MS.

- Caumont, O., Cimini, D., Löhnert, U., Alados Arboledas, L., Bleisch, R., Buffa, F., Ferrario, M. E., Haeferle, A., Huet, T., Madonna, F., et al. (2016). Assimilation of humidity and temperature observations retrieved from ground-based microwave radiometers into a convective-scale NWP model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *142*(700), 2692–2704.
- Caya, D., & Zawadzki, I. (1992). VAD analysis of nonlinear wind fields. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, *9*(5), 575–587.
- Chang, C. M., Chang, L. N., Hsiao, H. C., Lu, F. C., Shieh, P. F., Chen, C. N., & Lu, S. C. (2006). A further study of high air pollution episodes in Taiwan using the microwave temperature profiler (MTP-5HE). *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, *49*(1), 60–64.
- Chang, J. C., & Hanna, S. R. (2004). Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, *87*(1-3), 167–196.
- Chemel, C., Arduini, G., Staquet, C., Largeron, Y., Legain, D., Tzanos, D., & Paci, A. (2016). Valley heat deficit as a bulk measure of wintertime particulate air pollution in the Arve River Valley. *Atmospheric Environment*, *128*, 208–215.
- Choukulkar, A., Calhoun, R., Billings, B., & Doyle, J. (2012). Investigation of a complex nocturnal flow in Owens Valley, California using coherent Doppler lidar. *Boundary-layer meteorology*, *144*(3), 359–378.
- Chrust, M. F., Whiteman, C. D., & Hoch, S. W. (2013). Observations of thermally driven wind jets at the exit of Weber Canyon, Utah. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *52*(5), 1187–1200.
- Darby, L. S., Allwine, K. J., & Banta, R. M. (2006). Nocturnal low-level jet in a mountain basin complex. Part II: Transport and diffusion of tracer under stable conditions. *Journal of applied meteorology and climatology*, *45*(5), 740–753.
- de Ferranti, J. (2013). 30-m topography dataset. <http://www.viewfinderpanoramas.org/>. Consultato il giorno 15-03-2015.
- Doran, J. C., Allwine, K. J., Flaherty, J. E., Clawson, K. L., & Carter, R. G. (2007). Characteristics of puff dispersion in an urban environment. *Atmospheric Environment*, *41*(16), 3440–3452.
- Draxler, R. R., Heffter, J. L., & Rolph, G. D. (2001). 1DATEM Data Archive of Tracer Experiments and Meteorology.
- Drobinski, P., Bastin, S., Guénard, V., Caccia, J. L., Dabas, A. M., Delville, P., Protat, A., Reitebuch, O., & Werner, C. (2005). Summer mistral at the exit of the Rhône valley. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *131*(605), 353–375.

- EEA (2006). 100-m land use cover data. <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2006/view>.
- Emberlin, J. C. (1981). A sulphur hexafluoride tracer experiment from a tall stack over complex topography in a coastal area of Southern England. *Atmospheric Environment (1967)*, *15*(9), 1523–1530.
- Ezau, I. N., Wolf, T., Miller, E. A., Repina, I. A., Troitskaya, Y. I., & Zilitinkevich, S. S. (2013). The analysis of results of remote sensing monitoring of the temperature profile in lower atmosphere in Bergen (Norway). *Russian Meteorology and Hydrology*, *38*(10), 715–722.
- Ferrario, M. E., Rossa, A. M., Pernigotti, D., Sansone, M., & Benassi, A. (2006). Presentation and first assessment of a radiometer network in the Italian region Veneto. In *Proceedings of the 6th ICUC, Göteborg, Sweden*.
- Giovannini, L., Antonacci, G., Zardi, D., Laiti, L., & Panziera, L. (2014b). Sensitivity of simulated wind speed to spatial resolution over complex terrain. *Energy Procedia*, *59*, 323–329.
- Giovannini, L., Laiti, L., Serafin, S., & Zardi, D. (2017). The thermally driven diurnal wind system of the Adige Valley in the Italian Alps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- Giovannini, L., Zardi, D., de Franceschi, M., & Chen, F. (2014a). Numerical simulations of boundary-layer processes and urban-induced alterations in an Alpine valley. *International Journal of Climatology*, *34*(4), 1111–1131.
- Gromke, C., Buccolieri, R., Di Sabatino, S., & Ruck, B. (2008). Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations—evaluation of CFD data with experimental data. *Atmospheric Environment*, *42*(37), 8640–8650.
- Gryning, S. E., & Lyck, E. (1980). Elevated source SF₆-tracer dispersion experiments in the Copenhagen area. Preliminary results II. In *Proceedings of the seminar on radioactive releases and their dispersion in the atmosphere following a hypothetical reactor accident, Risoe, 22-25 April 1980*.
- Hall, B. D., Dutton, G. S., Mondeel, D. J., Nance, J. D., Rigby, M., Butler, J. H., Moore, F. L., Hurst, D. F., & Elkins, J. W. (2011). Improving measurements of SF₆ for the study of atmospheric transport and emissions. *Atmospheric Measurement Techniques*, *4*(11), 2441–2451.
- Kadygrov, E. N., Viazankin, A. S., Westwater, E. R., & Widener, K. B. (1999). Characteristics of the low-level temperature inversion at the North Slope of Alaska on the base

- of microwave remote sensing data. In *Proc. Ninth ARM Science Team Meeting*, (pp. 1–7).
- Kalthoff, N., Horlacher, V., Corsmeier, U., Volz Thomas, A., Kolahgar, B., Geiß, H., Möllmann-Coers, M., & Knaps, A. (2000). Influence of valley winds on transport and dispersion of airborne pollutants in the Freiburg-Schauinsland area. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D1), 1585–1597.
- Lopez, M., Schmidt, M., Ramonet, M., Bonne, J. L., Colomb, A., Kazan, V., Laj, P., & Pichon, J. M. (2015). A gas chromatograph system for semi-continuous greenhouse gas measurements at Puy de dôme station, Central France. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 8(3).
- Manca, G. (2017). Greenhouse gases concentration-2017. Tech. rep., European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset] PID: <http://data.europa.eu/89h/jrc-abcis-ghg-2017>.
- Martin, D., Petersson, K. F., & Shallcross, D. E. (2011). The use of cyclic perfluoroalkanes and SF6 in atmospheric dispersion experiments. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(661), 2047–2063.
- Martinet, P., Cimini, D., De Angelis, F., Canut, G., Unger, V., Guillot, R., Tzanos, D., & Paci, A. (2017). Combining ground-based microwave radiometer and the AROME convective scale model through 1DVAR retrievals in complex terrain: an Alpine valley case study. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(9), 3385.
- Massaro, G., Stiperski, I., Pospichal, B., & Rotach, M. W. (2015). Accuracy of retrieving temperature and humidity profiles by ground-based microwave radiometry in truly complex terrain. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(8), 3355.
- Min, I. A., Abernathy, R. N., & Lundblad, H. L. (2002). Measurement and analysis of puff dispersion above the atmospheric boundary layer using quantitative imagery. *Journal of Applied Meteorology*, 41(10), 1027–1041.
- Neff, W. D. (1990). Remote sensing of atmospheric processes over complex terrain. In *Atmospheric processes over complex terrain*, (pp. 173–228). Springer.
- O’ Connor, E. J., Illingworth, A. J., Brooks, I. M., Westbrook, C. D., Hogan, R. J., Davies, F., & Brooks, B. J. (2010). A method for estimating the turbulent kinetic energy dissipation rate from a vertically pointing Doppler lidar, and independent evaluation from balloon-borne in situ measurements. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 27(10), 1652–1664.
- Proctor, C. L., Berger, M. C., Fournier, D. L., & Roychoudhury, S. (1987). Sulfur hexafluoride as a tracer for the verification of waste-destruction levels in an incineration process. Tech. rep., Florida Univ., Gainesville (USA). Dept. of Mechanical Engineering.

- Romeberg, E., Bösinger, R., Lohmeyer, A., Ruhnke, R., & Röth, R. (1996). No-no₂ Umwandlung für die Anwendung bei Immissionsprognosen für Kfz-Abgase. Tech. Rep. 56, Gefahrstoffe. Reinhaltung der Luft.
- Rucker, M., Banta, R. M., & Steyn, D. G. (2008). Along-valley structure of daytime thermally driven flows in the Wipp Valley. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(3), 733–751.
- Scintec (2006). *Scintec Flat Array Sodars - Hardware Manual*. Scintec AG.
- Scire, J. S., Robe, F. R., Fernau, M. E., & Yamartino, R. J. (2000). A user's guide for the CALMET meteorological model. *Earth Tech, USA*, 37.
- Scire, J. S., Strimaitis, D. G., Yamartino, R. J., et al. (2000b). A user's guide for the CALPUFF dispersion model. *Earth Tech, Inc. Concord, MA*, 10.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2005). A description of the advanced research WRF version 2. Tech. rep., National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div.
- Sozzi, R., Georgiadis, T., & Valentini, M. (2002). *Introduzione alla turbolenza atmosferica: concetti, stime e misure..* Pitagora Ed., Bologna.
- Suomi, I., Gryning, S. E., O'Connor, E. J., & Vihma, T. (2017). Methodology for obtaining wind gusts using Doppler lidar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(706), 2061–2072.
- Tatarskiĭ, V. I. (1967). *Wave propagation in a turbulent atmosphere*. Nauka.
- Tirabassi, T., & Nassetti, S. (1999). The representative day. *Atmospheric environment*, 33(15), 2427–2434.
- Tomasi, E., Giovannini, L., Zardi, D., & de Franceschi, M. (2017). Optimization of Noah and Noah_MP WRF Land Surface Schemes in Snow-Melting Conditions over Complex Terrain. *Monthly Weather Review*, 145(12), 4727–4745.
- Wang, H., Barthelmie, R. J., Clifton, A., & Pryor, S. C. (2015). Wind measurements from arc scans with Doppler wind lidar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32(11), 2024–2040.
- Wang, H., Barthelmie, R. J., Pryor, S. C., & Brown, G. (2016). Lidar arc scan uncertainty reduction through scanning geometry optimization. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(4), 1653–1669.
- Whiteman, C. D. (1989). Morning transition tracer experiments in a deep narrow valley. *Journal of applied Meteorology*, 28(7), 626–635.

- Whiteman, C. D. (2000). *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. New York: Oxford University Press.
- Wolf, T., Esau, I., & Reuder, J. (2014). Analysis of the vertical temperature structure in the Bergen valley, Norway, and its connection to pollution episodes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(18).
- Wood, C. R., Arnold, S. J., Balogun, A. A., Barlow, J. F., Belcher, S. E., Britter, R. E., Cheng, H., Dobre, A., Lingard, J. J. N., Martin, D., et al. (2009). Dispersion experiments in central London: the 2007 DAPPLE project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(7), 955–970.
- Zannetti, P., Carboni, G., & Ceriani, A. (1986). *Avacta II Model Simulations of Worst-Case Air Pollution Scenarios in Northern Italy*, (pp. 113–121). Boston, MA: Springer US.

0 1 2 3 4 5 km



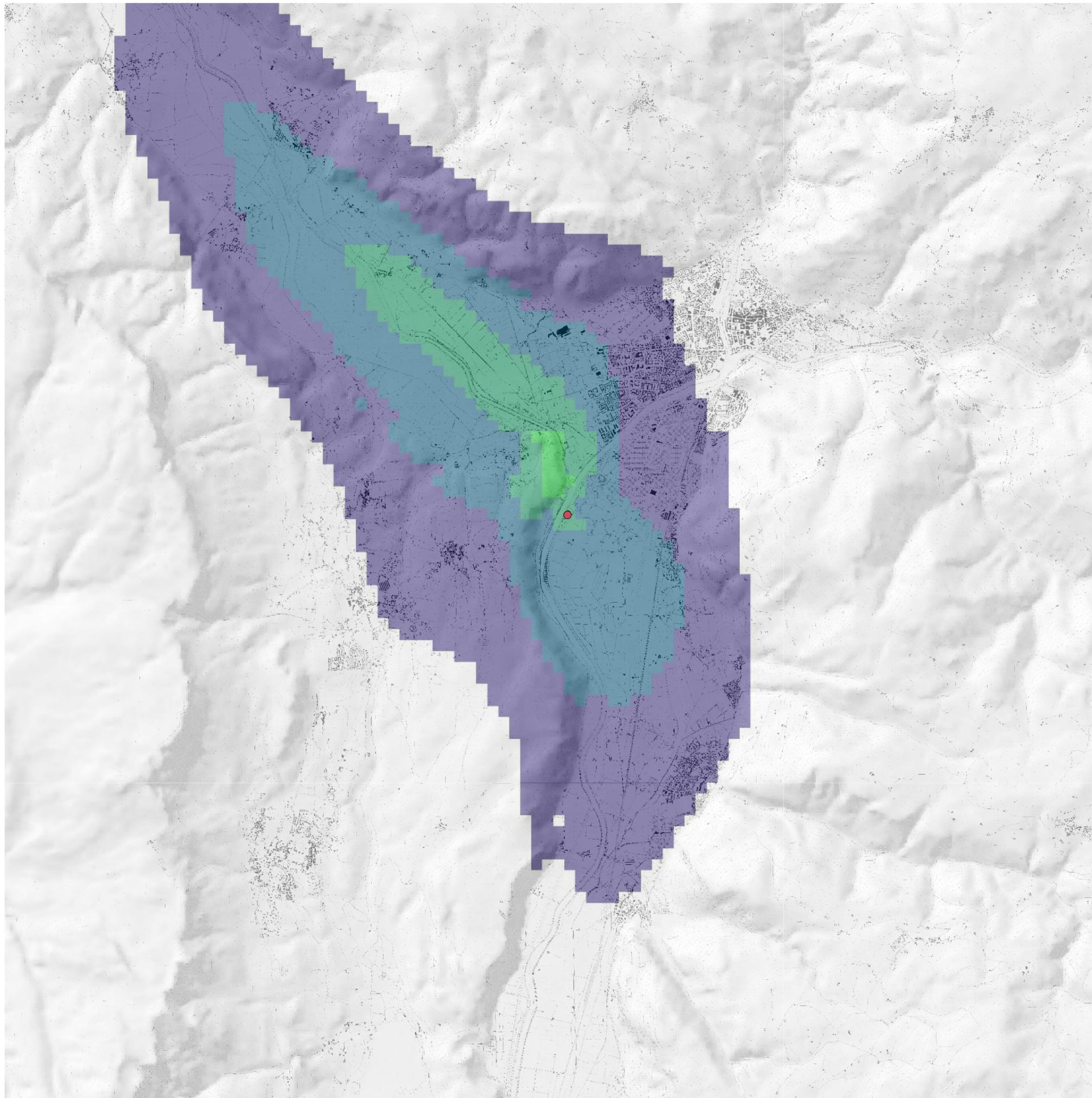
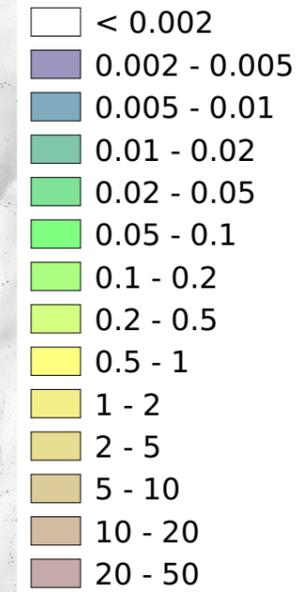
Scala 1:70000

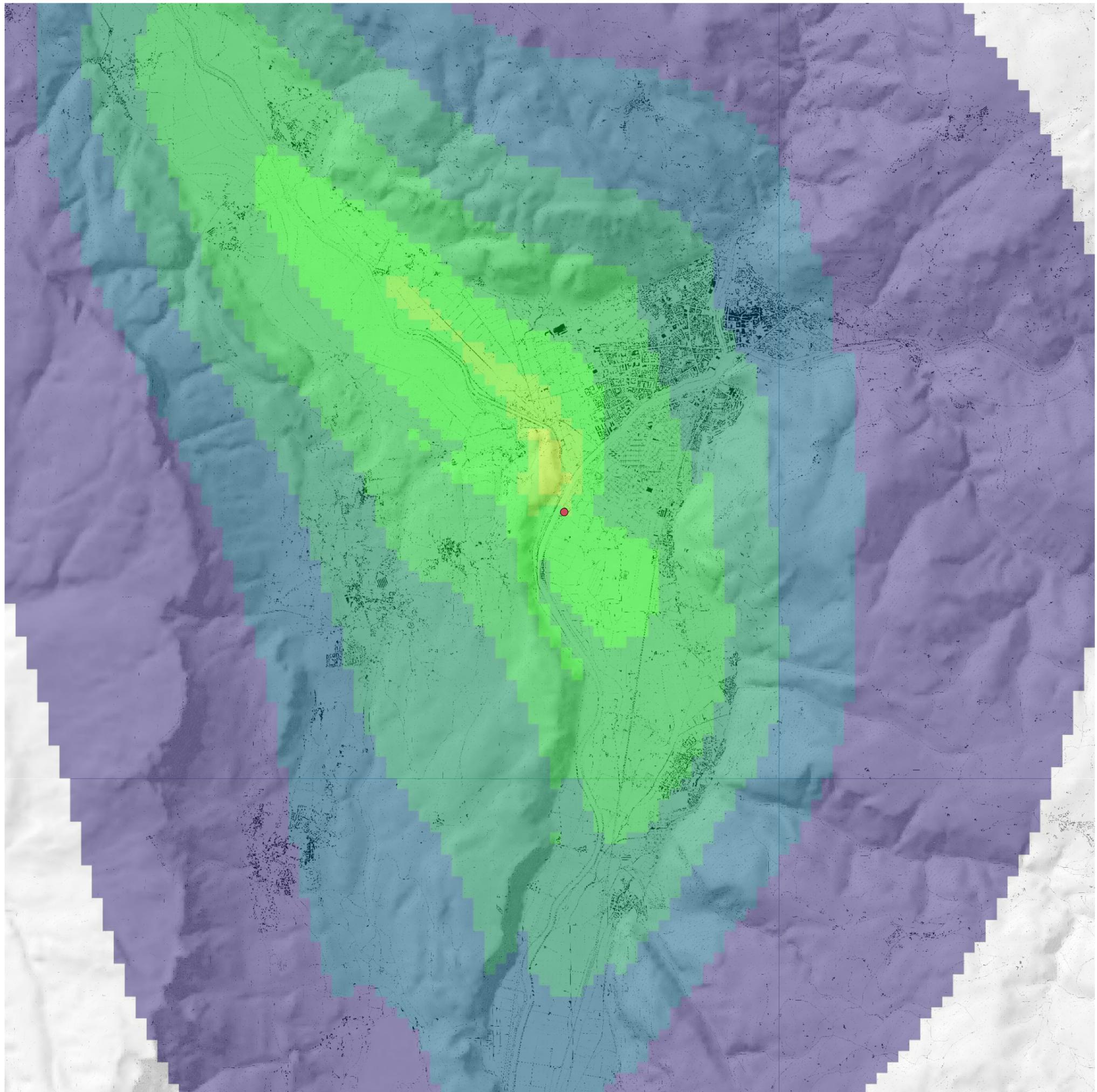
Emissione PTS a camino = 40 g/h

Concentrazione media annuale
PM10 nel punto di massimo = 0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Legenda

Concentrazione PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]





0 1 2 3 4 5 km



Scala 1:70000

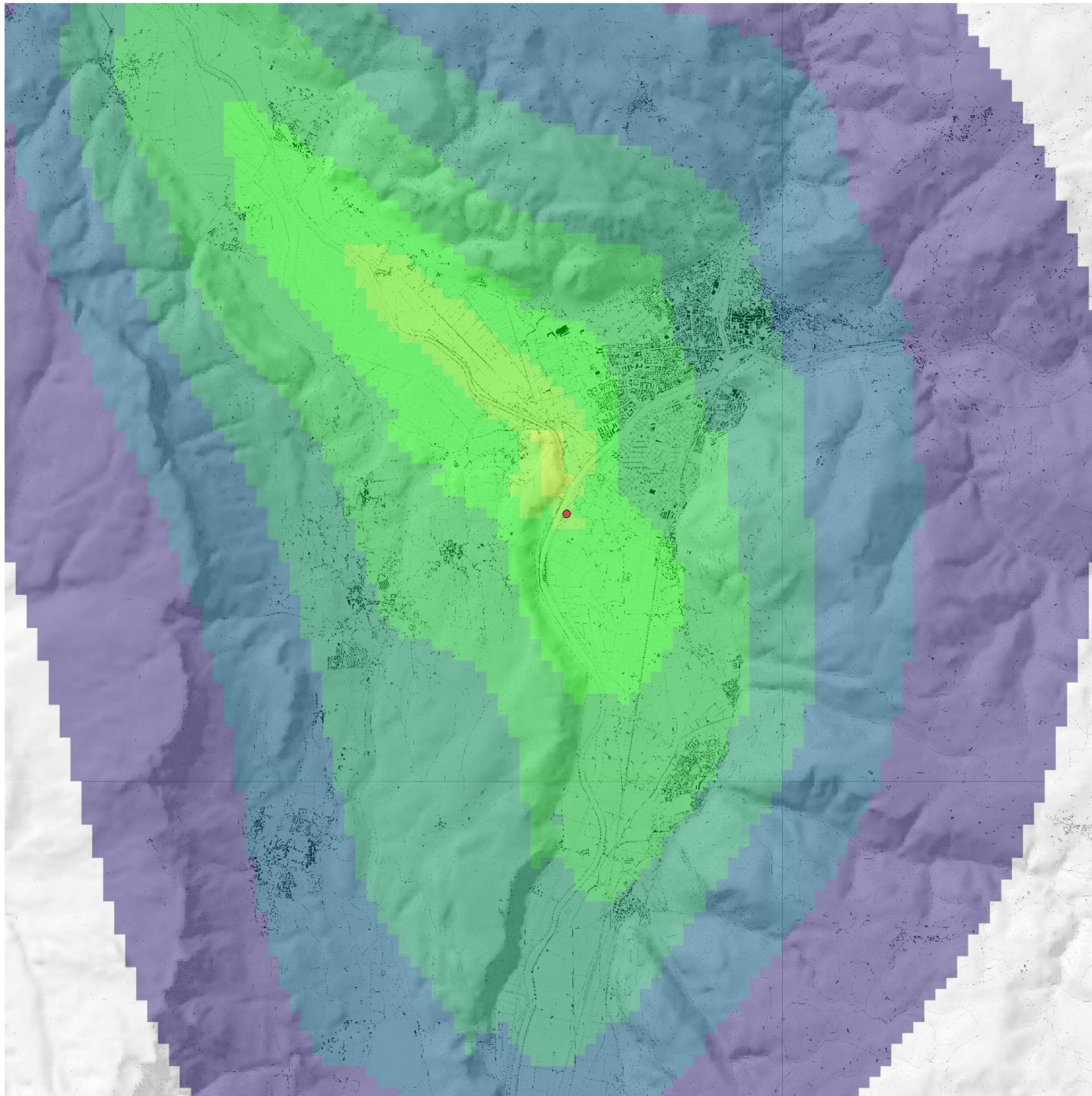
Emissione NOx a camino = 2833 g/h

Concentrazione media annuale
NO2 nel punto di massimo = 0.36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Legenda

Concentrazione NO2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

-  < 0.002
-  0.002 - 0.005
-  0.005 - 0.01
-  0.01 - 0.02
-  0.02 - 0.05
-  0.05 - 0.1
-  0.1 - 0.2
-  0.2 - 0.5
-  0.5 - 1
-  1 - 2
-  2 - 5
-  5 - 10
-  10 - 20
-  20 - 50



0 1 2 3 4 5 km

Scala 1:70000

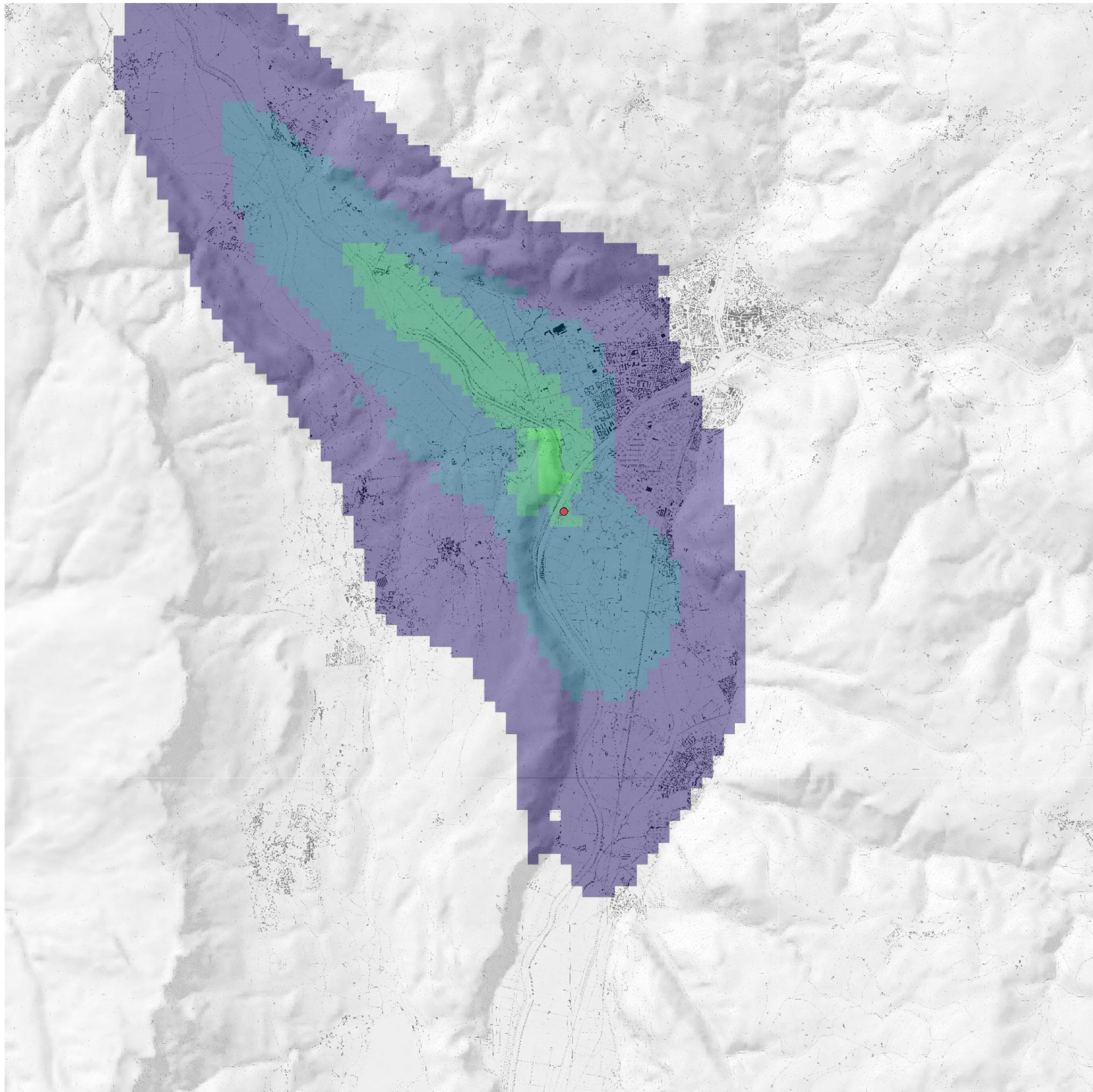
Emissione NOx a camino = 2833 g/h

Concentrazione media annuale
NOx nel punto di massimo = 0.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Legenda

Concentrazione NOx [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

-  < 0.002
-  0.002 - 0.005
-  0.005 - 0.01
-  0.01 - 0.02
-  0.02 - 0.05
-  0.05 - 0.1
-  0.1 - 0.2
-  0.2 - 0.5
-  0.5 - 1
-  1 - 2
-  2 - 5
-  5 - 10
-  10 - 20
-  20 - 50



0 1 2 3 4 5 km



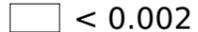
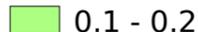
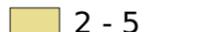
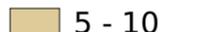
Scala 1:70000

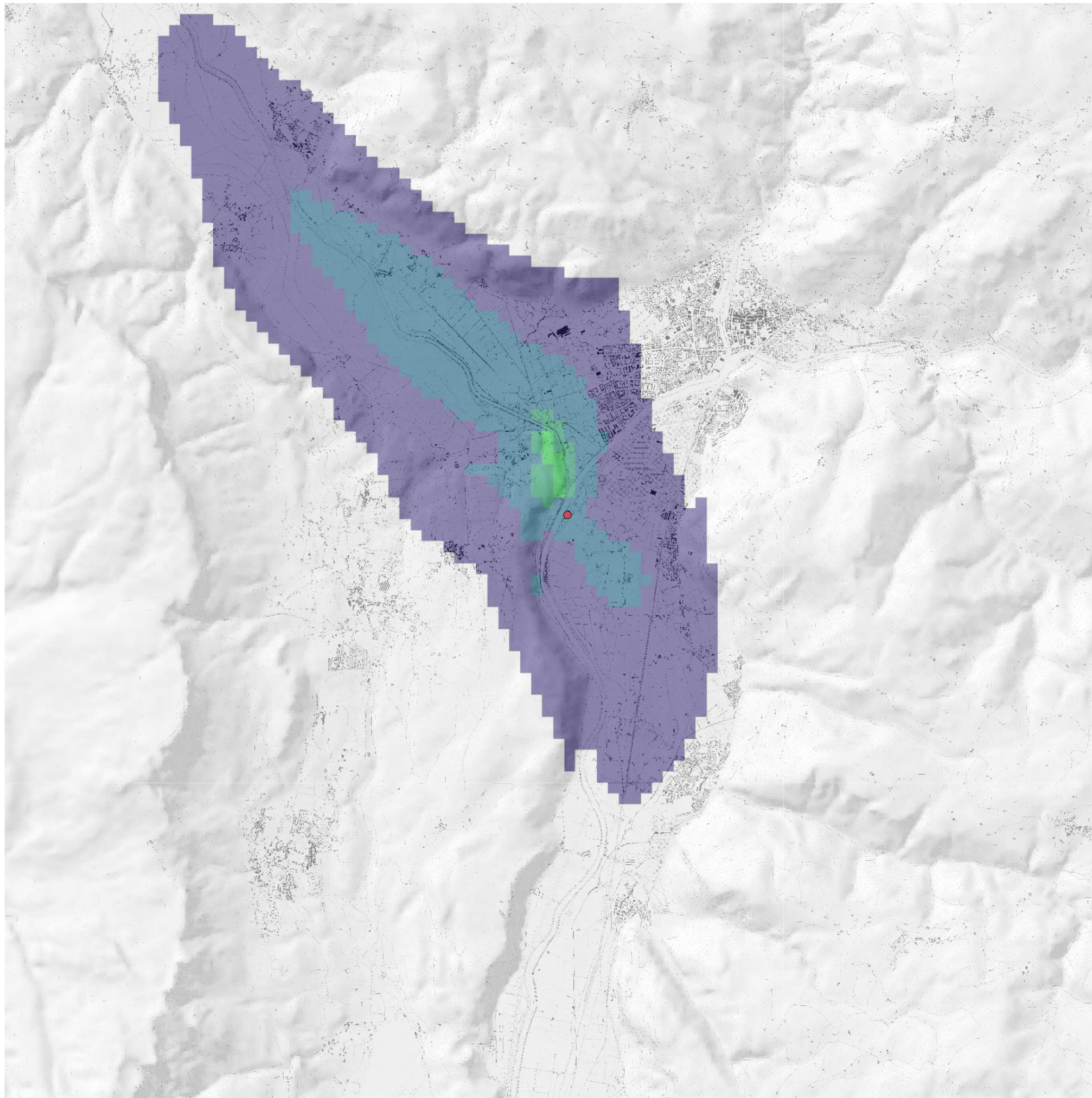
Emissione SO2 a camino = 283 g/h

Concentrazione media annuale
SO2 nel punto di massimo = 0.04 µg/m³

Legenda

Concentrazione SO2 [µg/m³]

-  < 0.002
-  0.002 - 0.005
-  0.005 - 0.01
-  0.01 - 0.02
-  0.02 - 0.05
-  0.05 - 0.1
-  0.1 - 0.2
-  0.2 - 0.5
-  0.5 - 1
-  1 - 2
-  2 - 5
-  5 - 10
-  10 - 20
-  20 - 50



0 1 2 3 4 5 km

Scala 1:70000

Emissione CO a camino = 179 g/s

Concentrazione media annuale
CO punto di massimo = 0.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Legenda

Concentrazione CO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

-  < 0.002
-  0.002 - 0.005
-  0.005 - 0.01
-  0.01 - 0.02
-  0.02 - 0.05
-  0.05 - 0.1
-  0.1 - 0.2
-  0.2 - 0.5
-  0.5 - 1
-  1 - 2
-  2 - 5
-  5 - 10
-  10 - 20
-  20 - 50

0 1 2 3 4 5 km

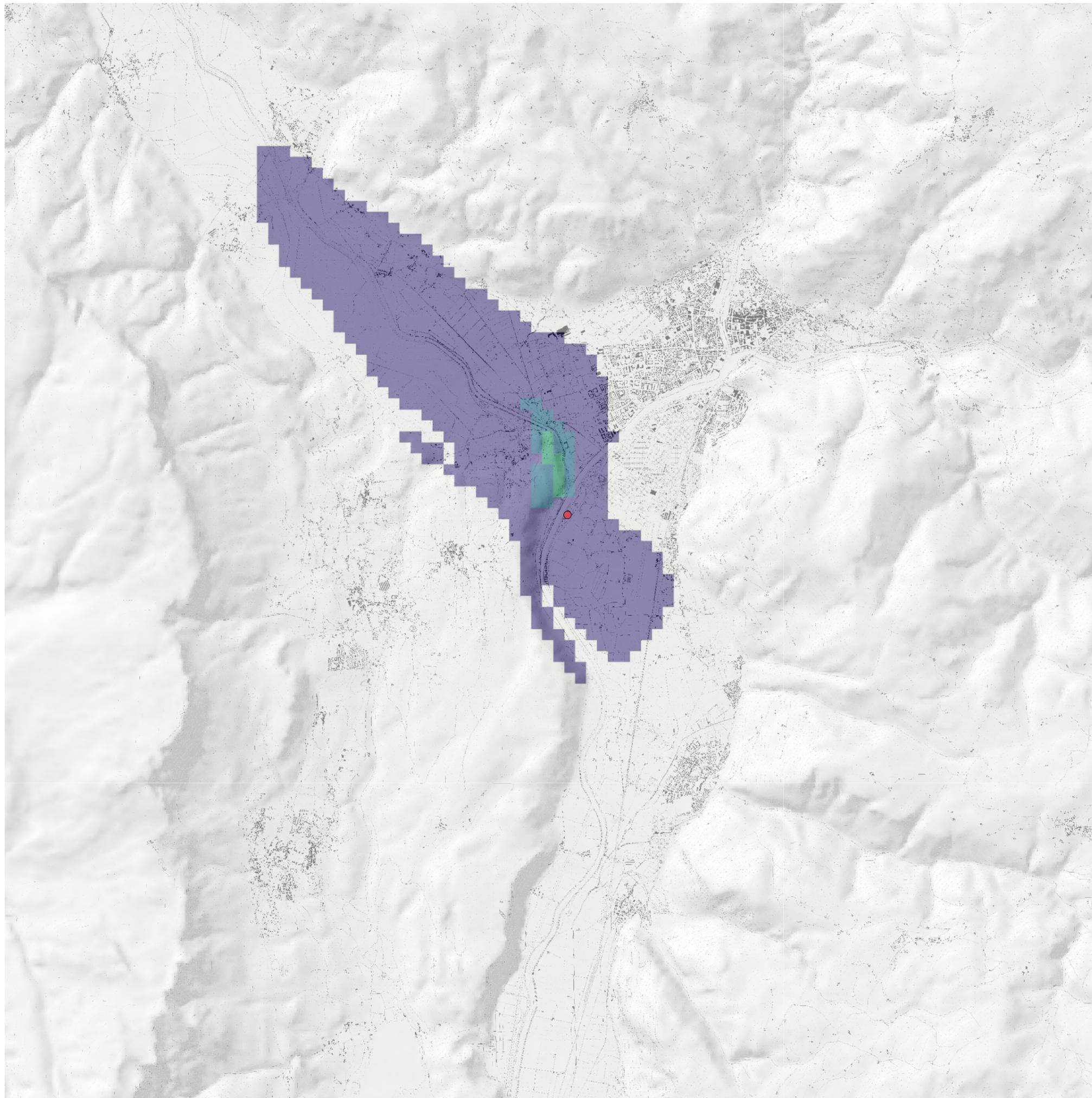
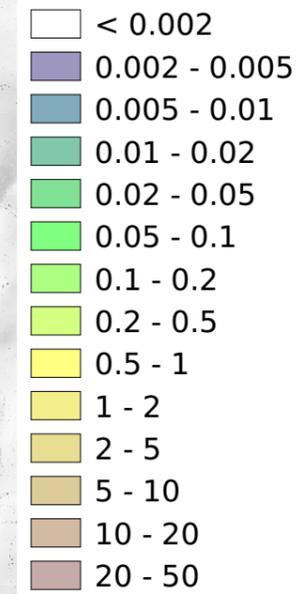
Scala 1:70000

Emissione COT a camino = 95 g/h

Concentrazione media annuale
COT nel punto di massimo = 0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Legenda

Concentrazione COT [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



0 1 2 3 4 5 km

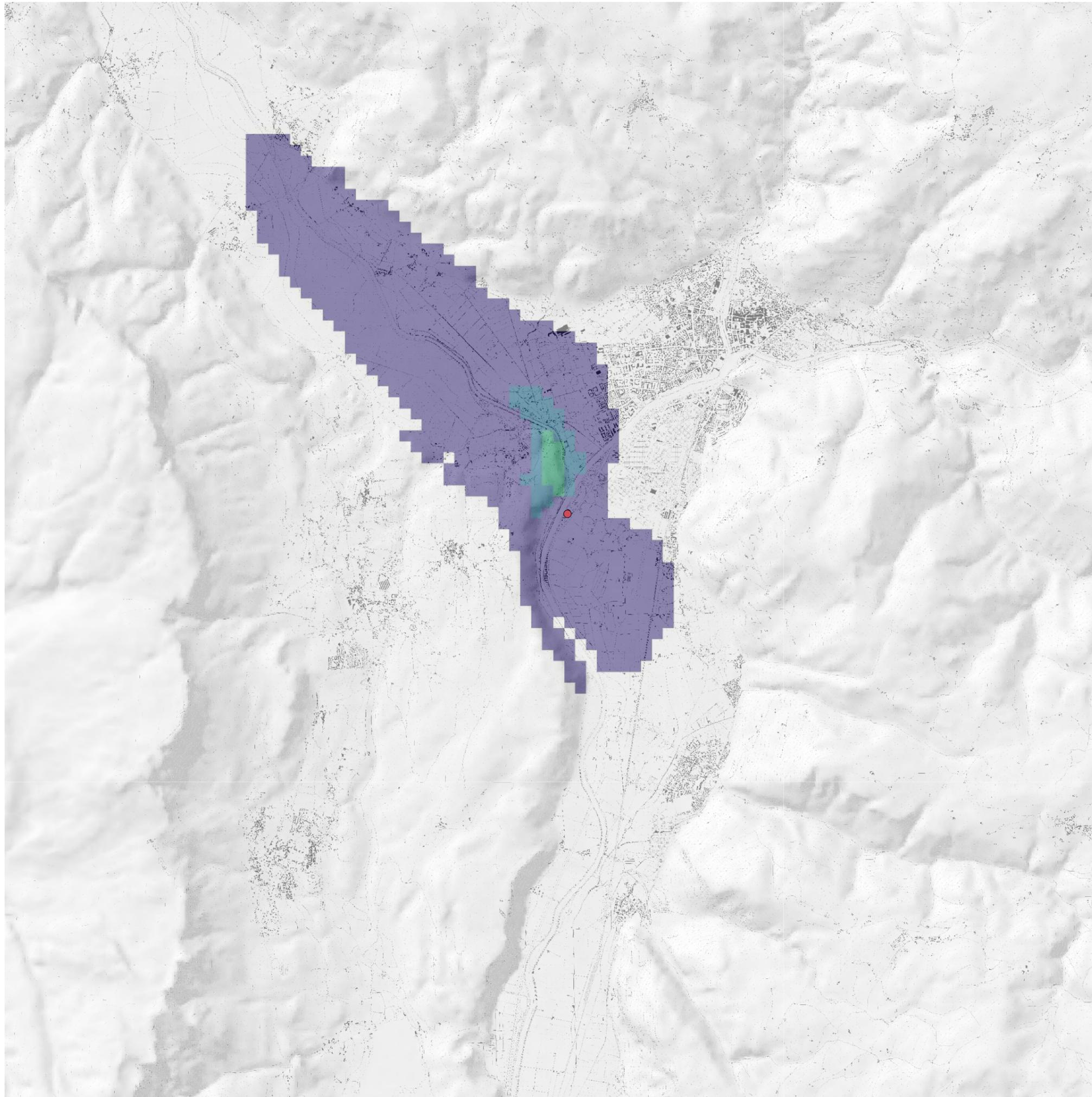
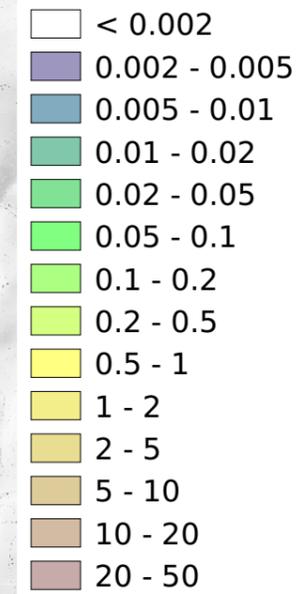
Scala 1:70000

Emissione HCl a camino = 102 g/h

Concentrazione media annuale
HCl nel punto di massimo = 0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Legenda

Concentrazione HCl [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



0 1 2 3 4 5 km

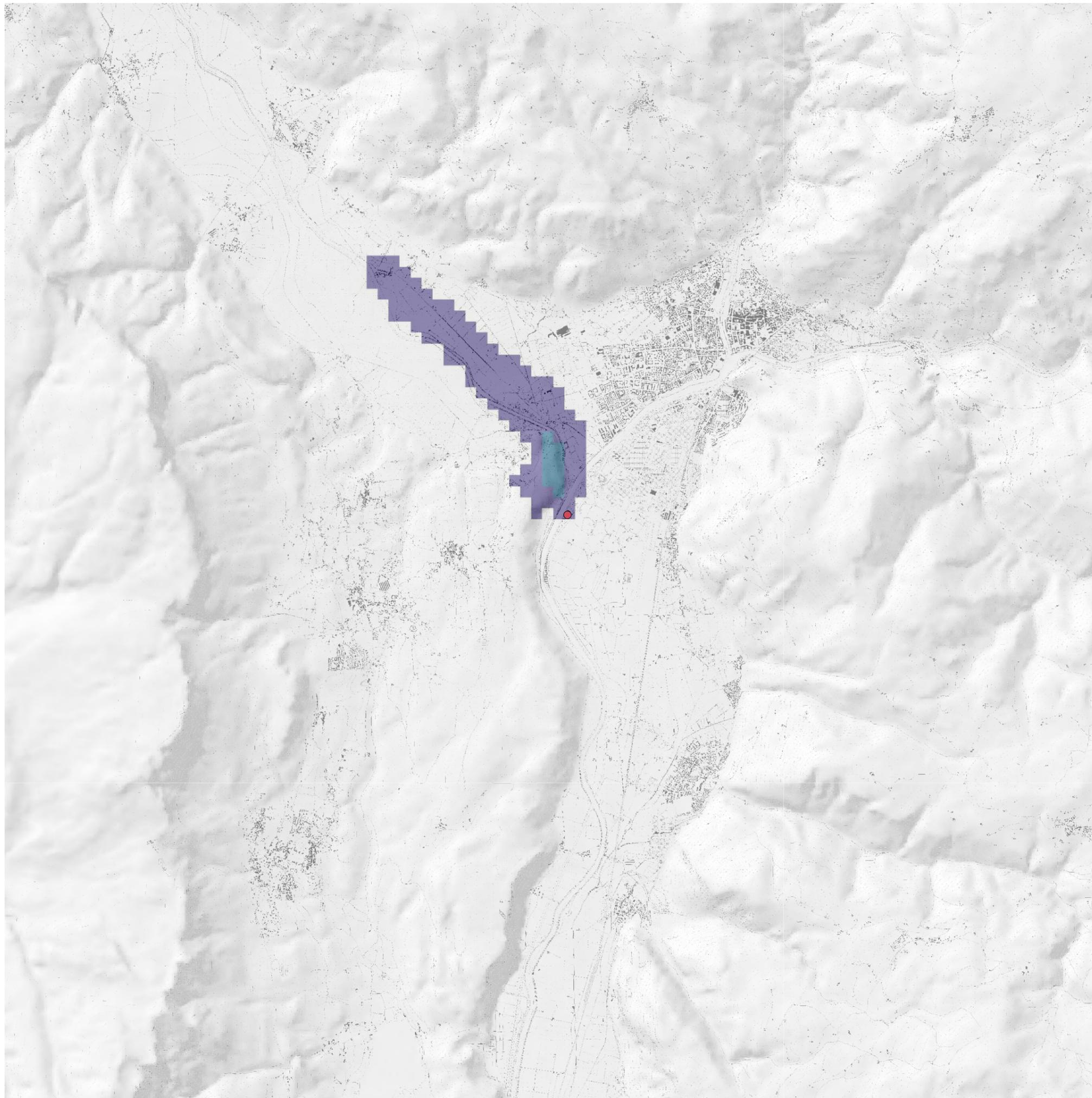
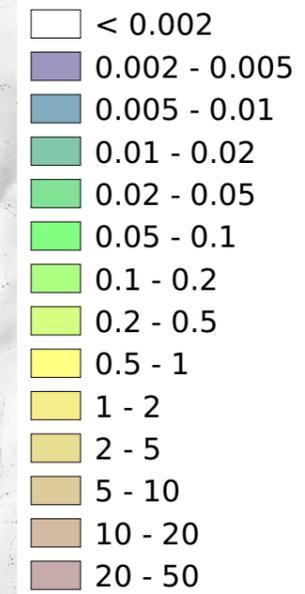
Scala 1:70000

Emissione Hg a camino = 49 mg/h

Concentrazione media annuale
Hg nel punto di massimo = 0.01 ng/m³

Legenda

Concentrazione Hg [ng/m³]



0 1 2 3 4 5 km

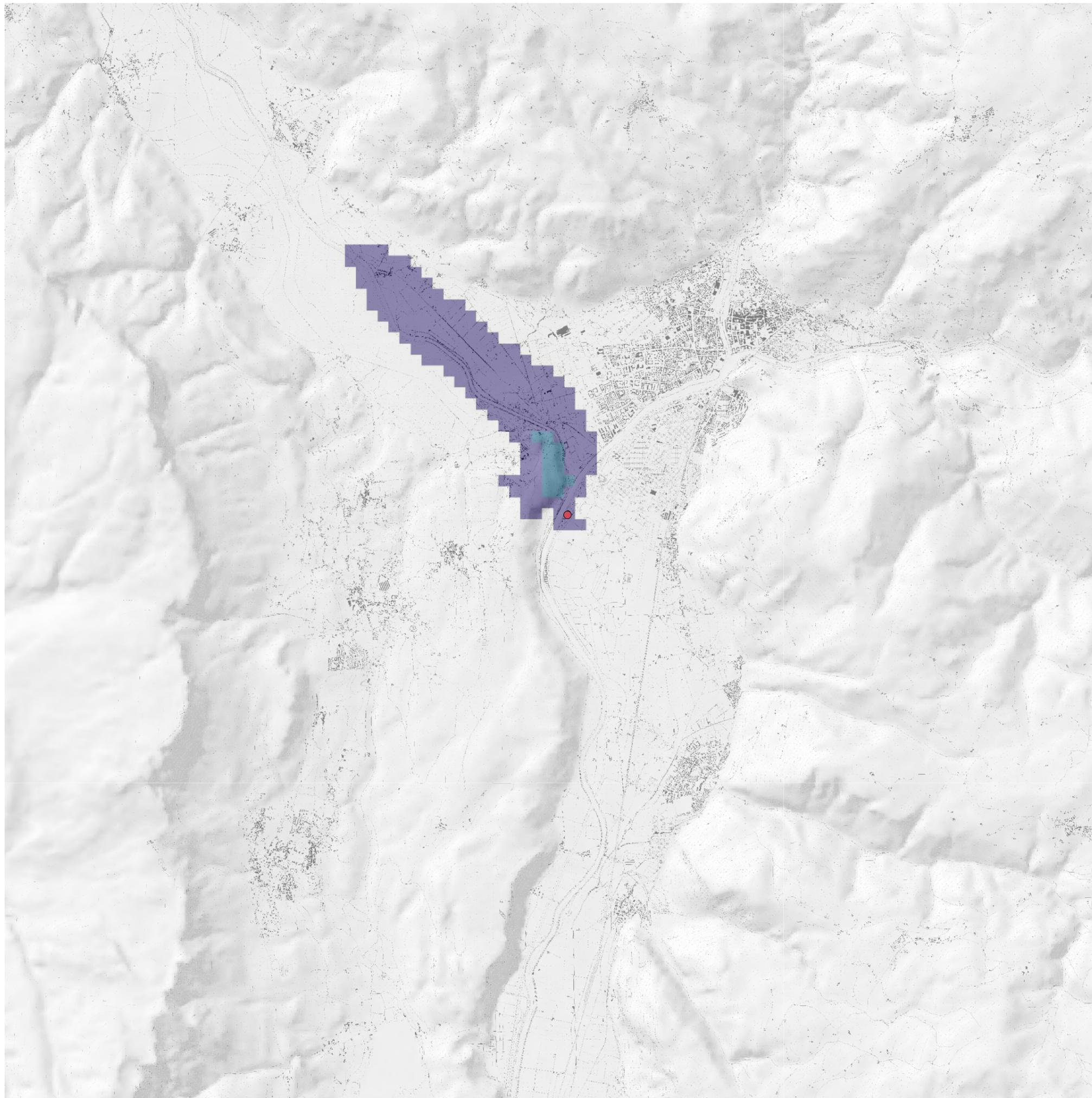
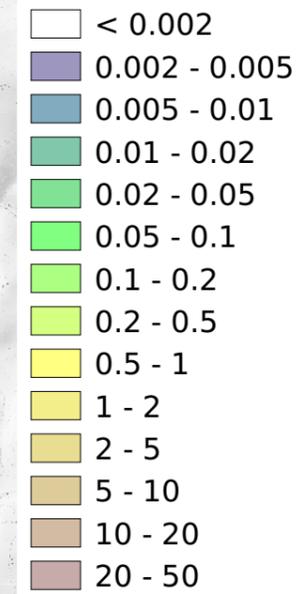
Scala 1:70000

Emissione NH3 a camino = 58 g/h

Concentrazione media annuale
NH3 nel punto di massimo = 0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Legenda

Concentrazione NH3 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



0 1 2 3 4 5 km

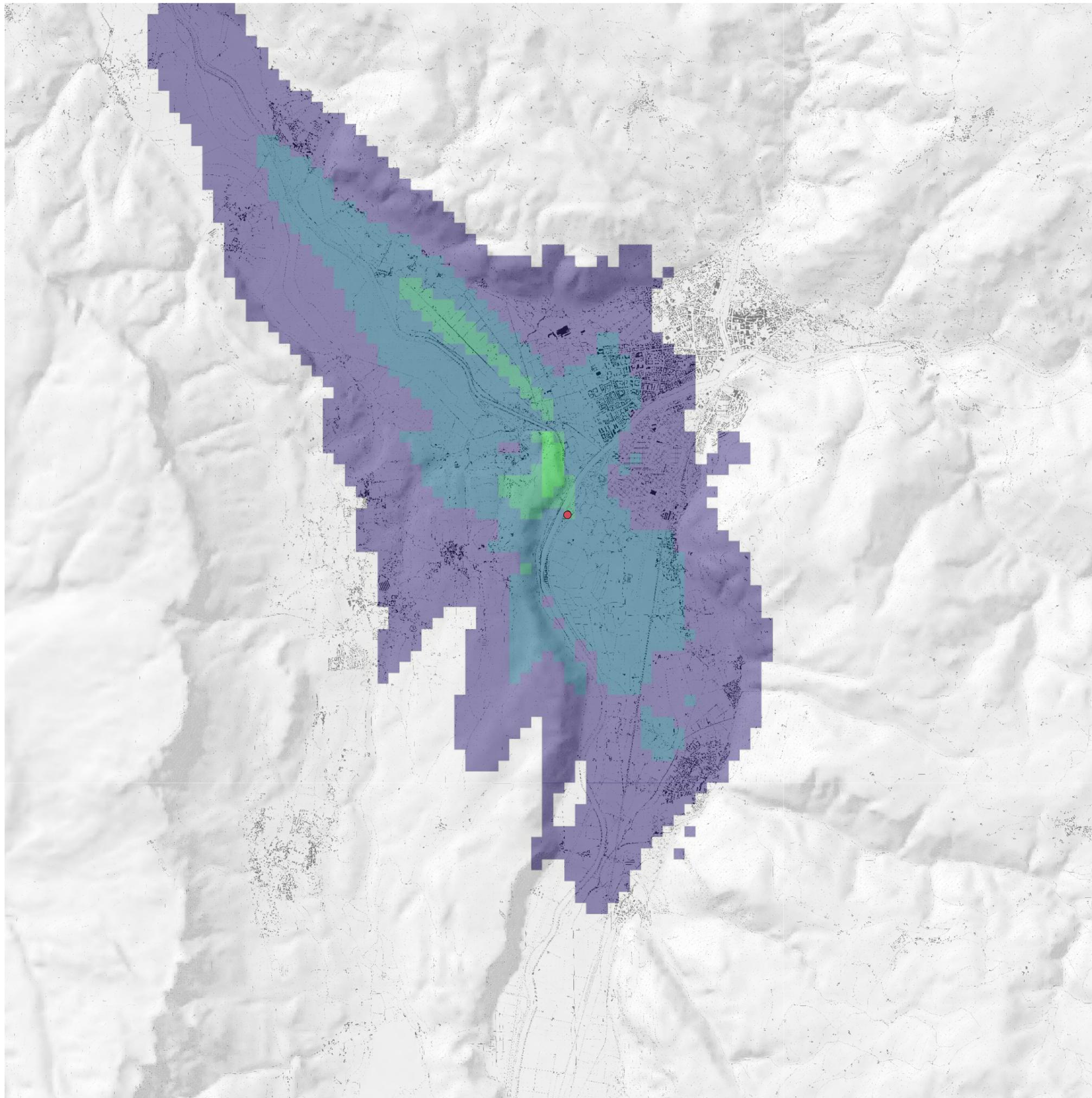
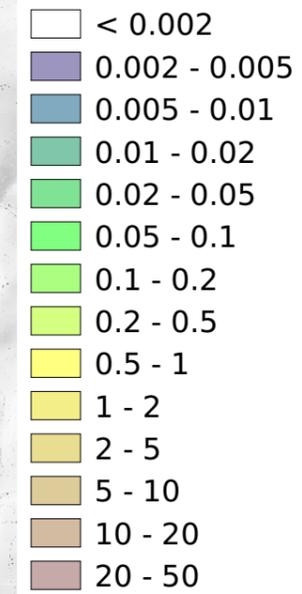
Scala 1:70000

Emissione PTS a camino = 40 g/h

Concentrazione massima giornaliera
PM10 nel punto di massimo = 0.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Legenda

Concentrazione PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



0 1 2 3 4 5 km

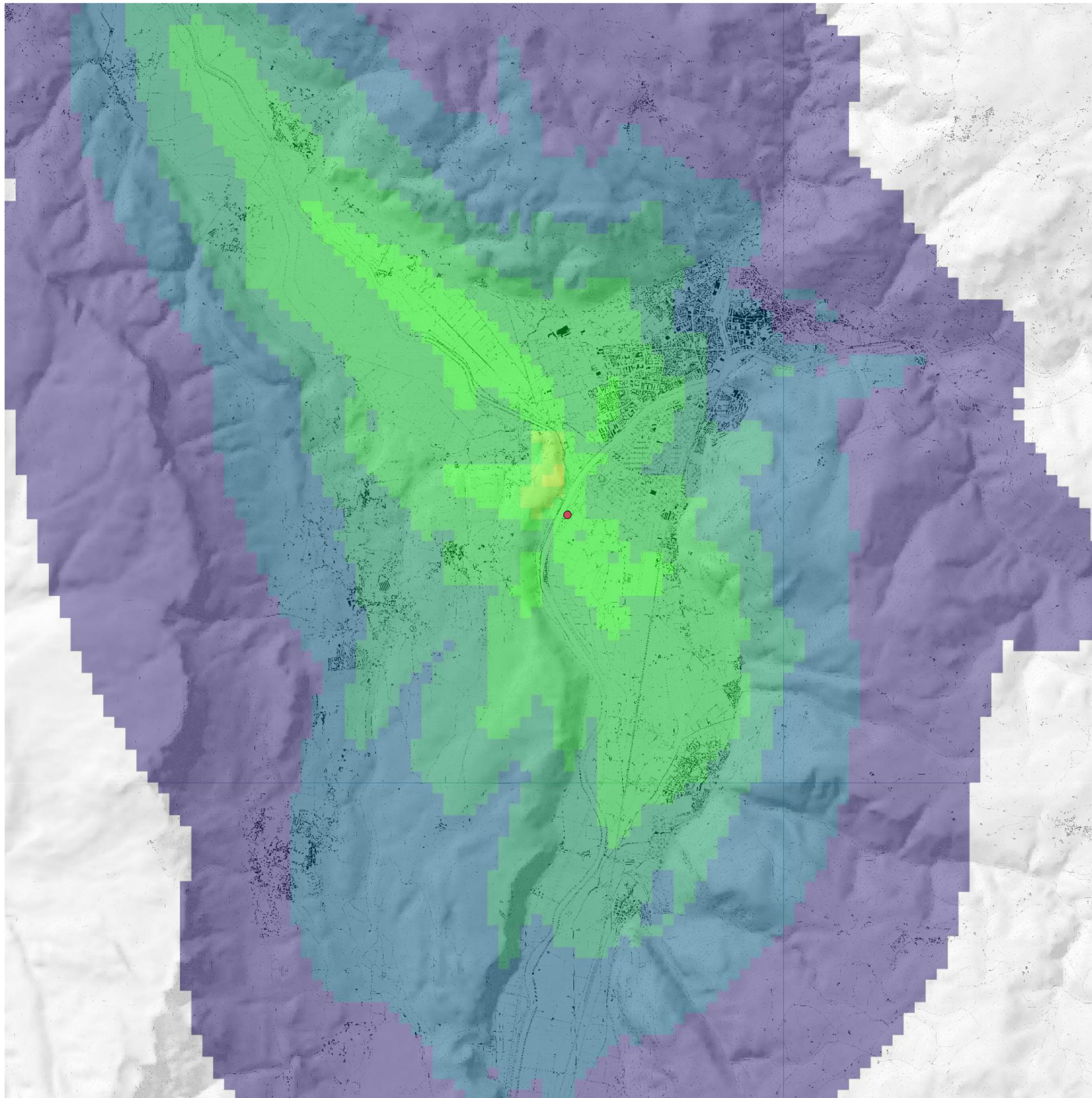
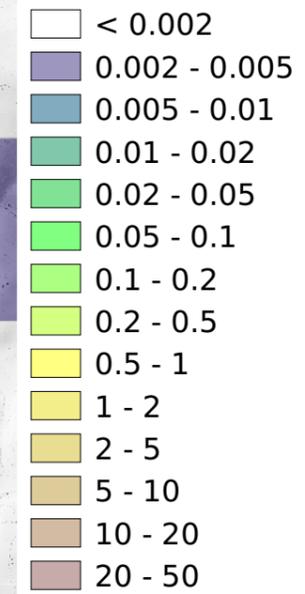
Scala 1:70000

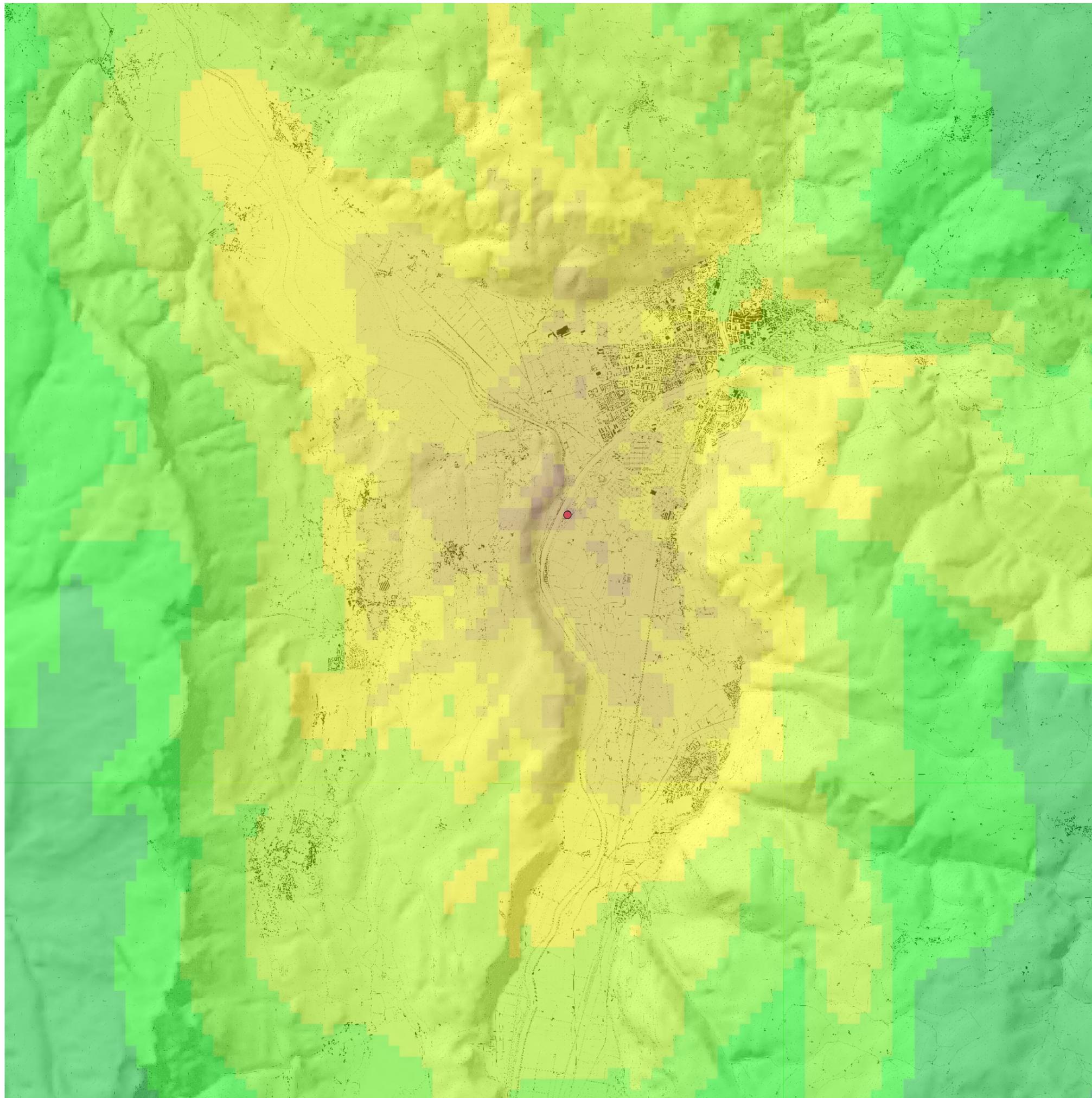
Emissione SO2 a camino = 283 g/h

Concentrazione massima giornaliera
SO2 nel punto di massimo = 0.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Legenda

Concentrazione SO2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]





0 1 2 3 4 5 km



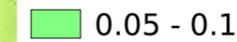
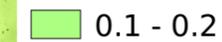
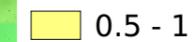
Scala 1:70000

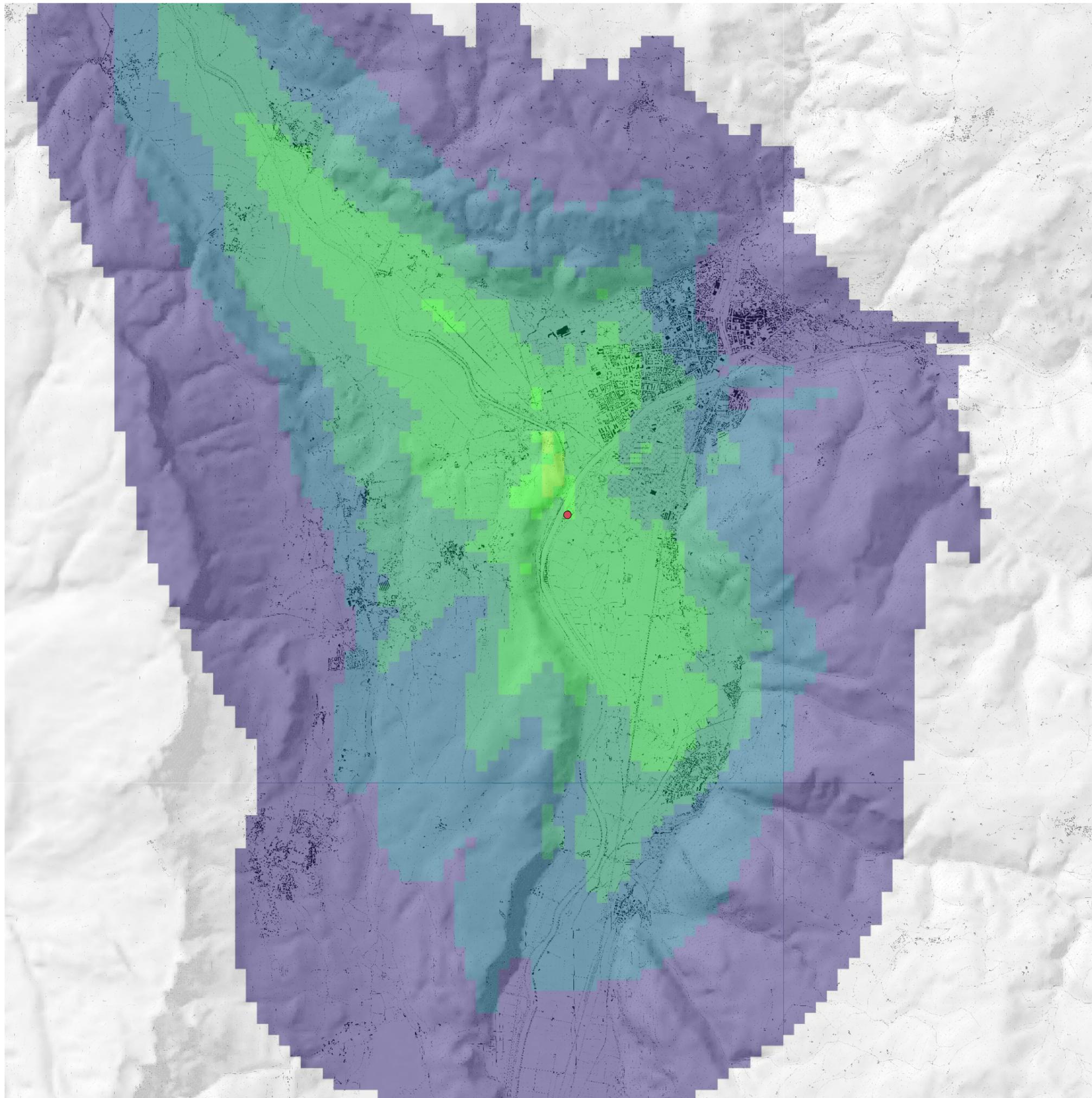
Emissione NOx a camino = 2833 g/h

Concentrazione massima oraria
NO2 nel punto di massimo = 19.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Legenda

Concentrazione NO2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

-  < 0.002
-  0.002 - 0.005
-  0.005 - 0.01
-  0.01 - 0.02
-  0.02 - 0.05
-  0.05 - 0.1
-  0.1 - 0.2
-  0.2 - 0.5
-  0.5 - 1
-  1 - 2
-  2 - 5
-  5 - 10
-  10 - 20
-  20 - 50



0 1 2 3 4 5 km



Scala 1:70000

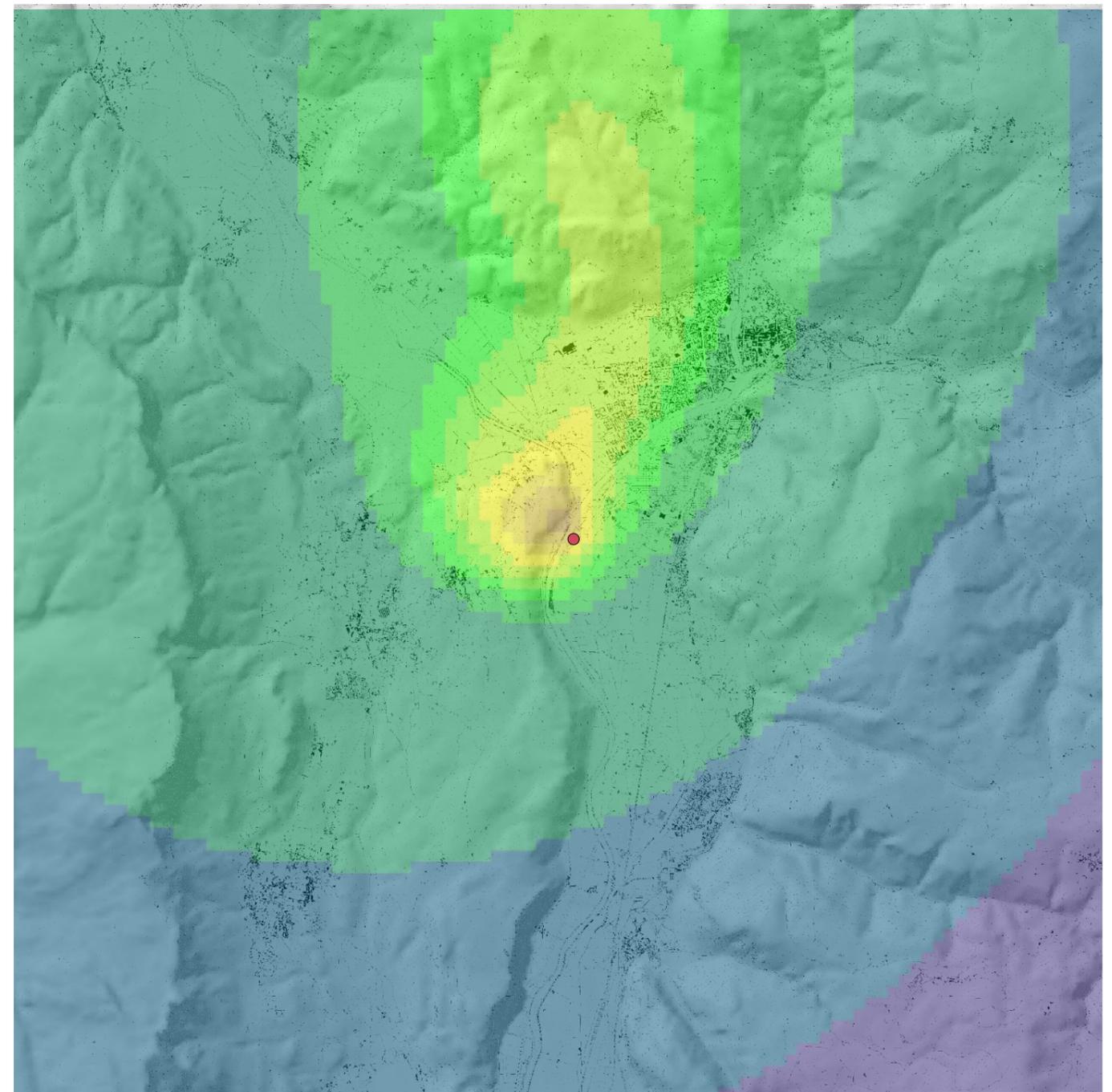
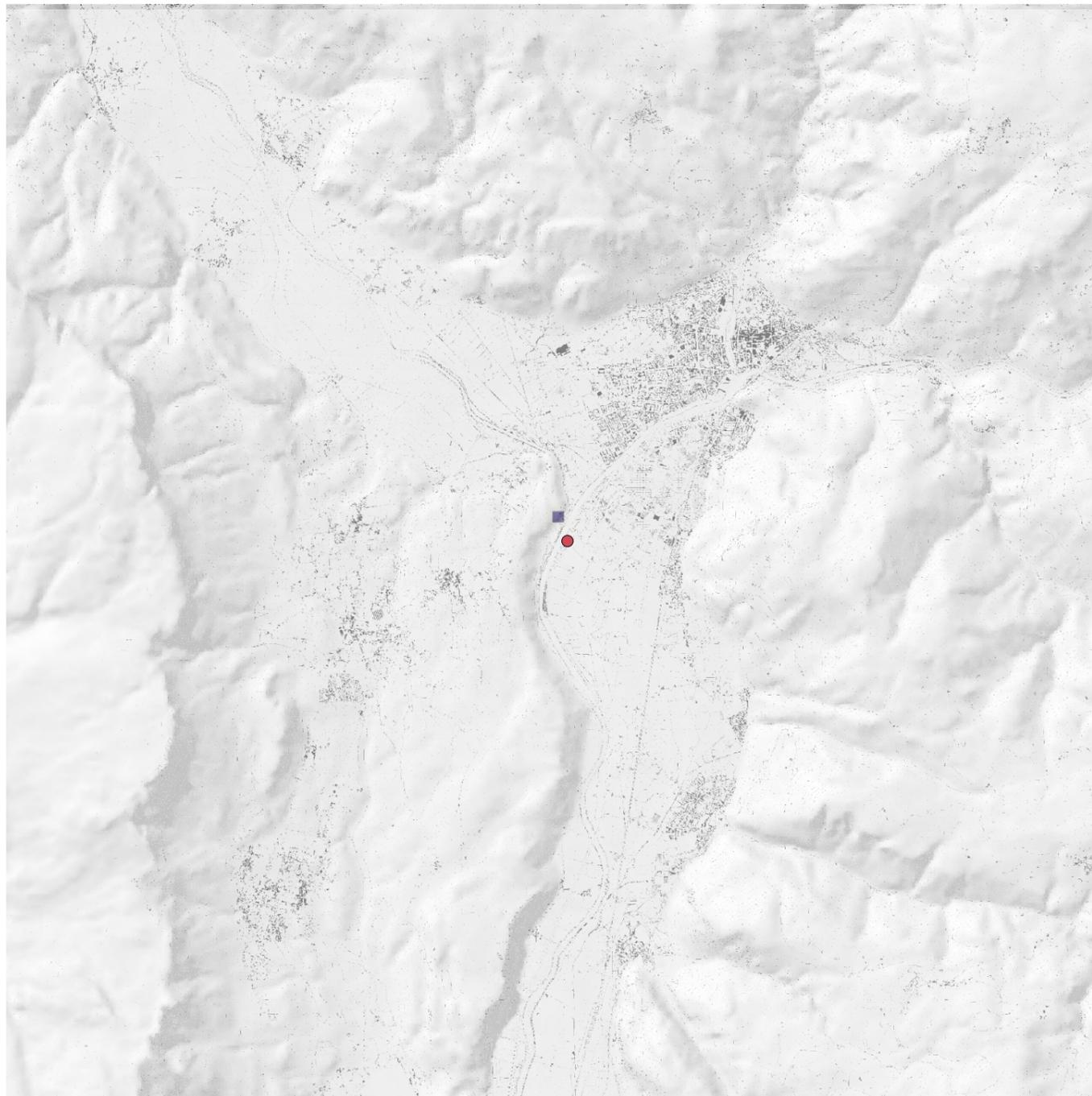
Emissione SO2 a camino = 283 g/h

Concentrazione massima oraria
SO2 nel punto di massimo = 1.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Legenda

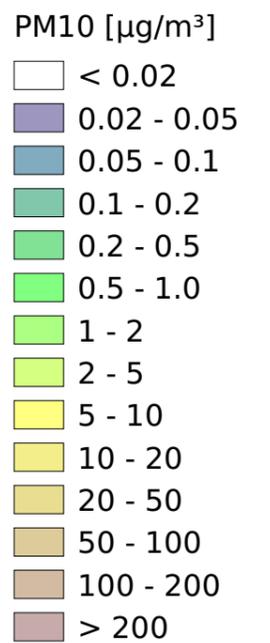
Concentrazione SO2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

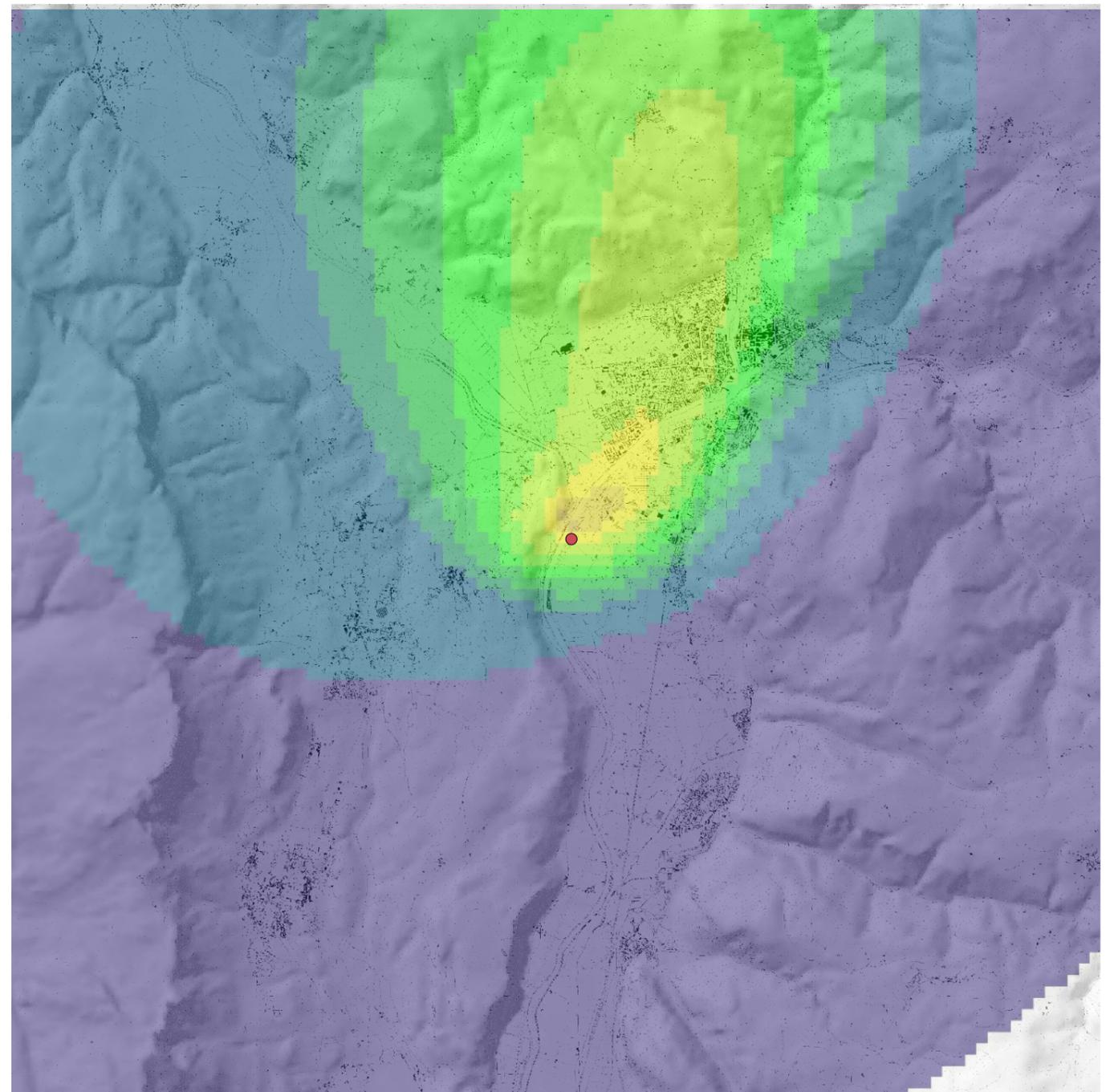
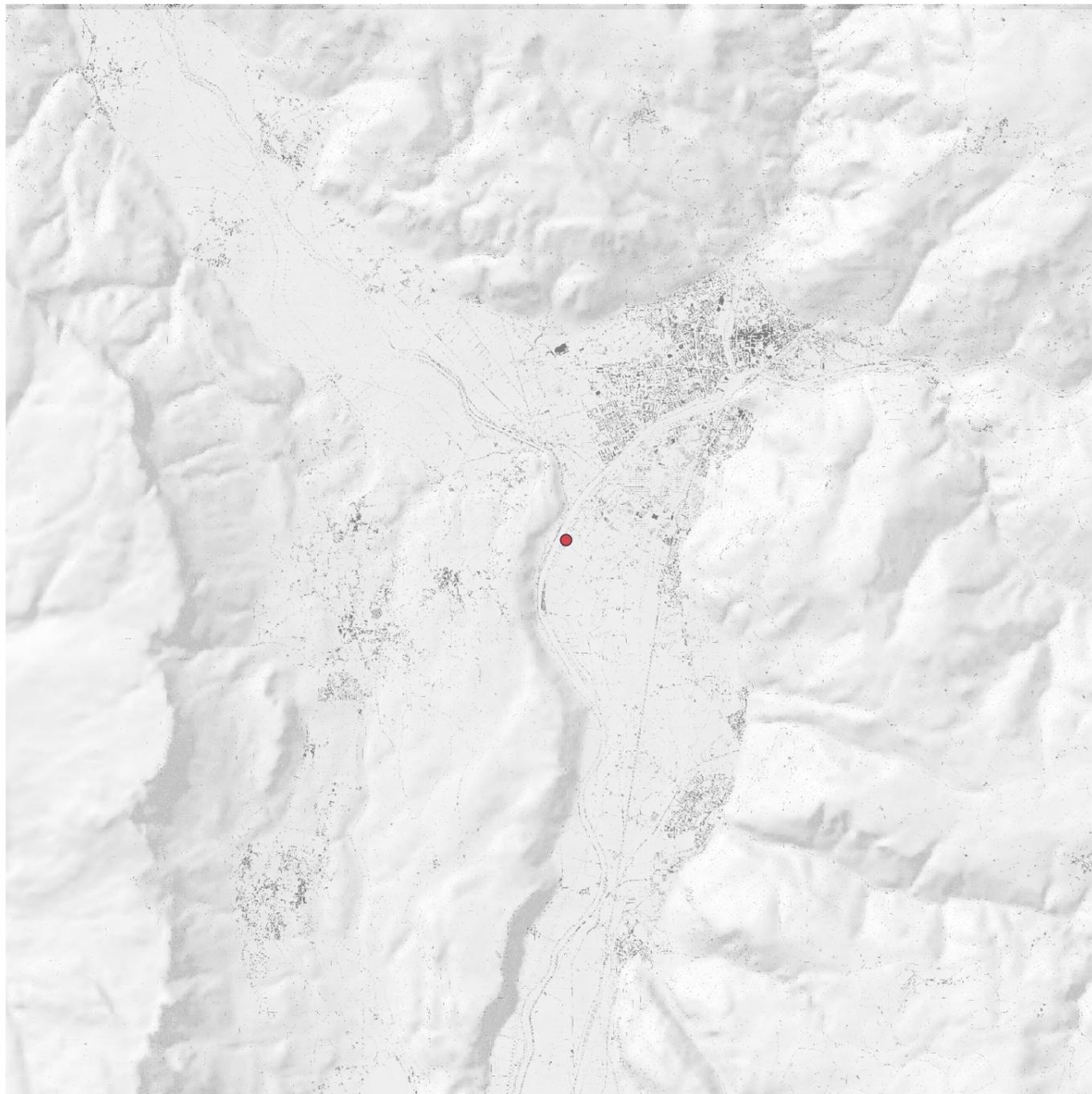
-  < 0.002
-  0.002 - 0.005
-  0.005 - 0.01
-  0.01 - 0.02
-  0.02 - 0.05
-  0.05 - 0.1
-  0.1 - 0.2
-  0.2 - 0.5
-  0.5 - 1
-  1 - 2
-  2 - 5
-  5 - 10
-  10 - 20
-  20 - 50



Emissione PTS a camino 26/02/2016 - h 11
Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

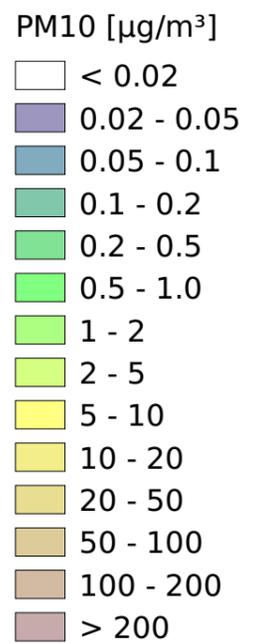
Concentrazione PM10 nel punto di massimo
Normale = 0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 74.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

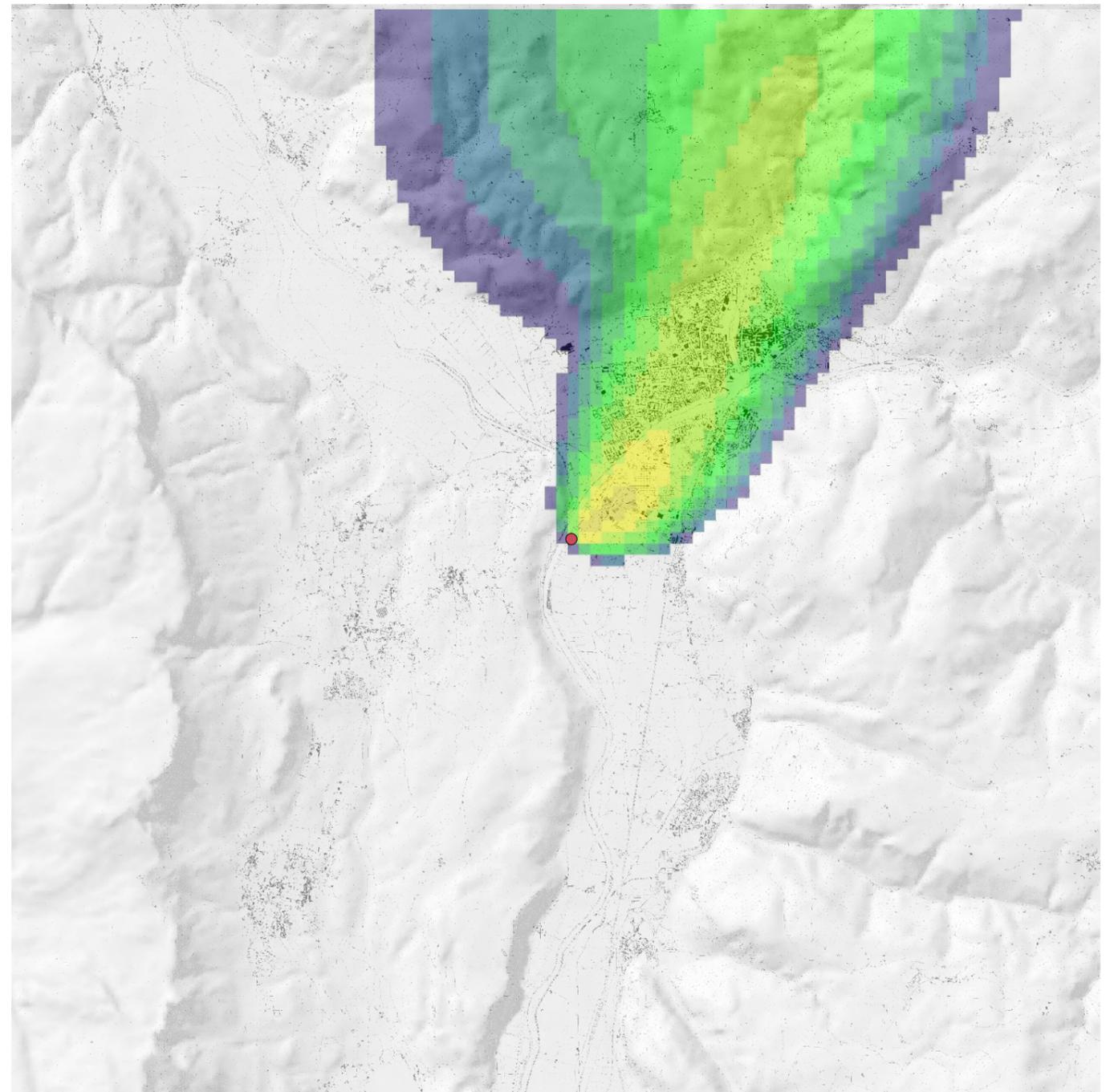
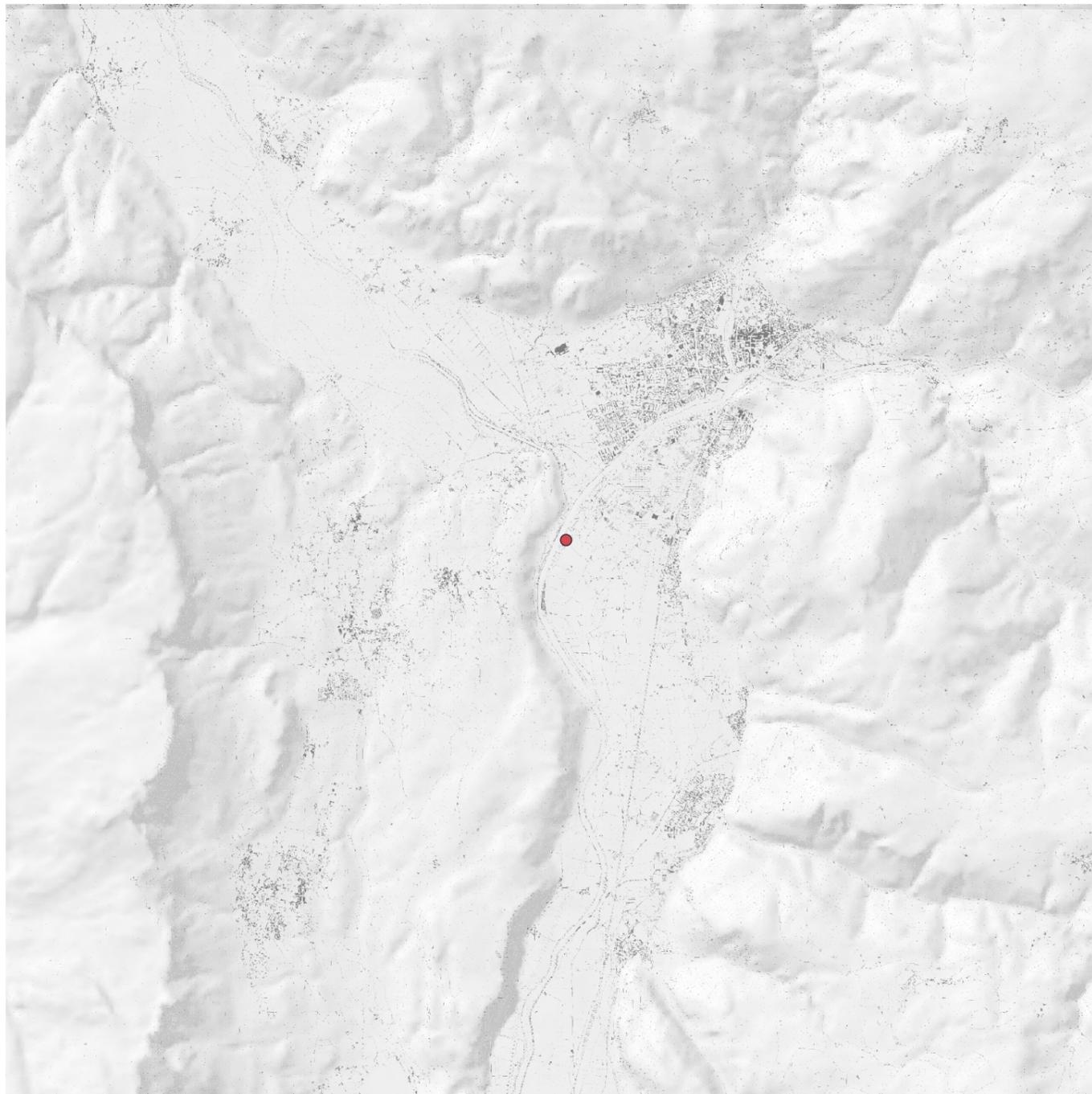




Emissione PTS a camino 26/02/2016 - h 12
Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

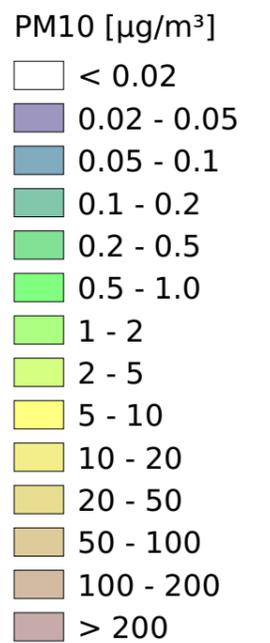
Concentrazione PM10 nel punto di massimo
Normale = 0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 24.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

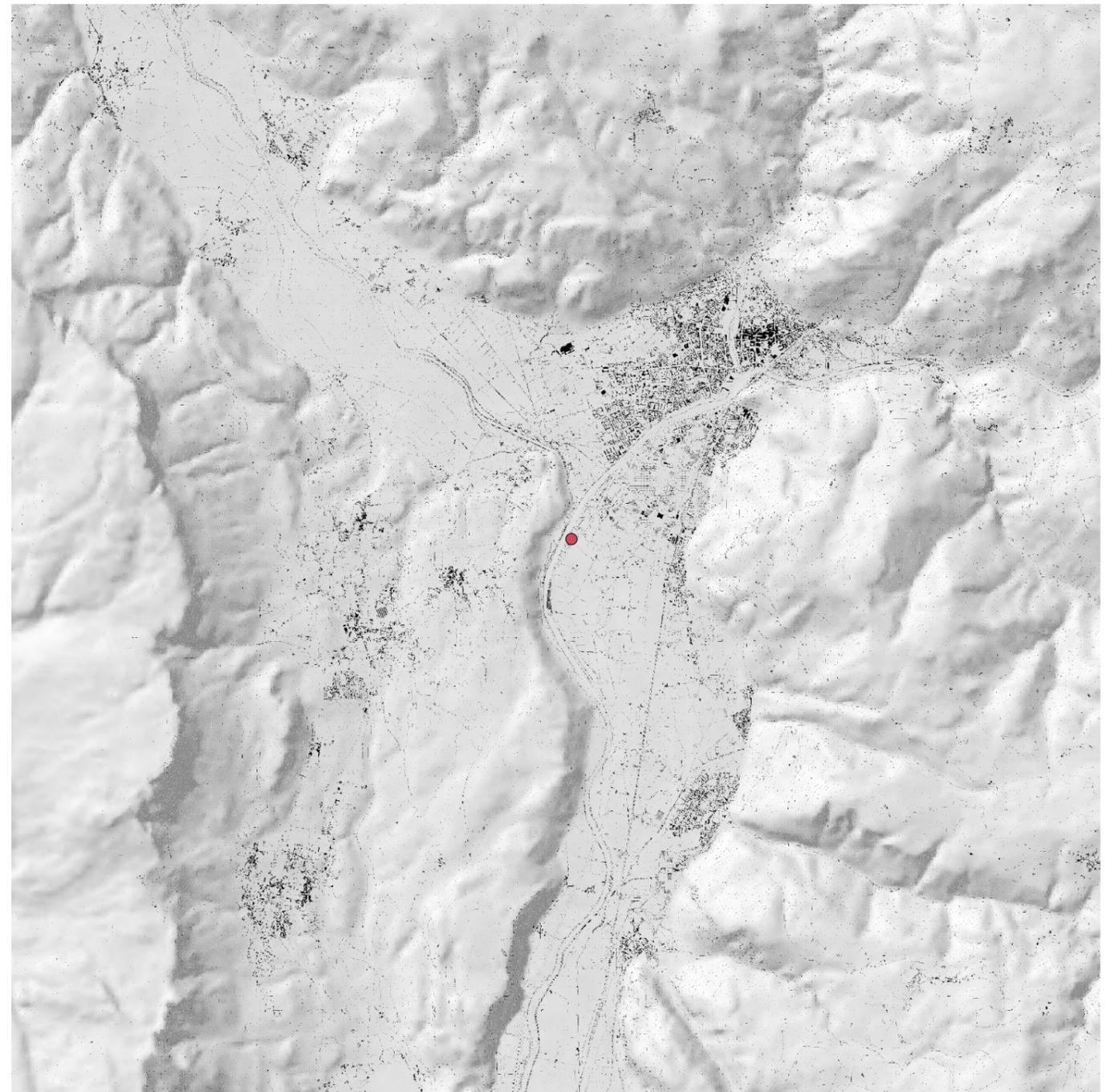
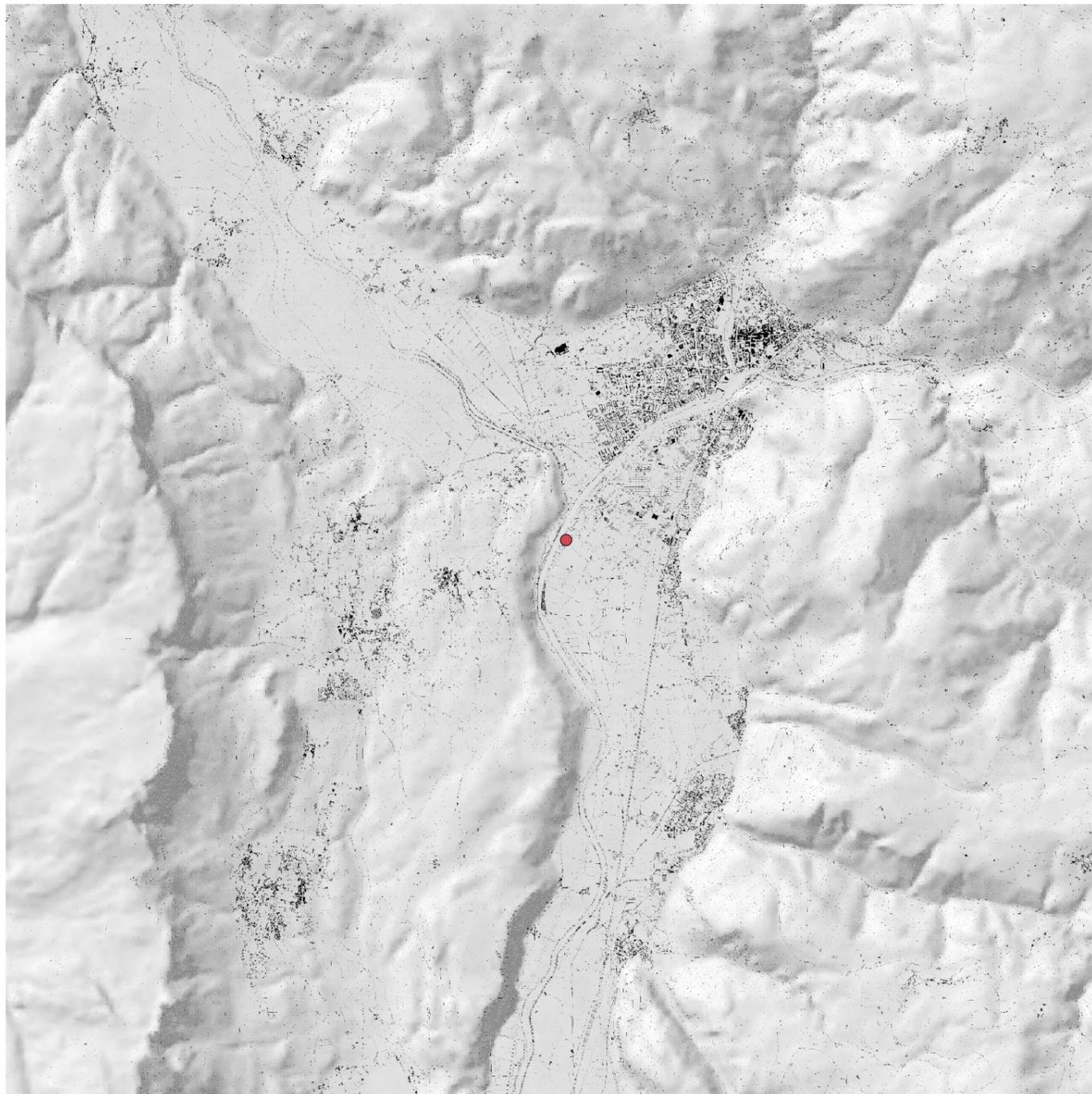




Emissione PTS a camino 26/02/2016 - h 13
Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

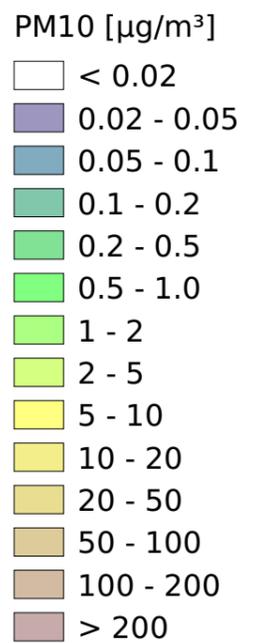
Concentrazione PM10 nel punto di massimo
Normale = 0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 17.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

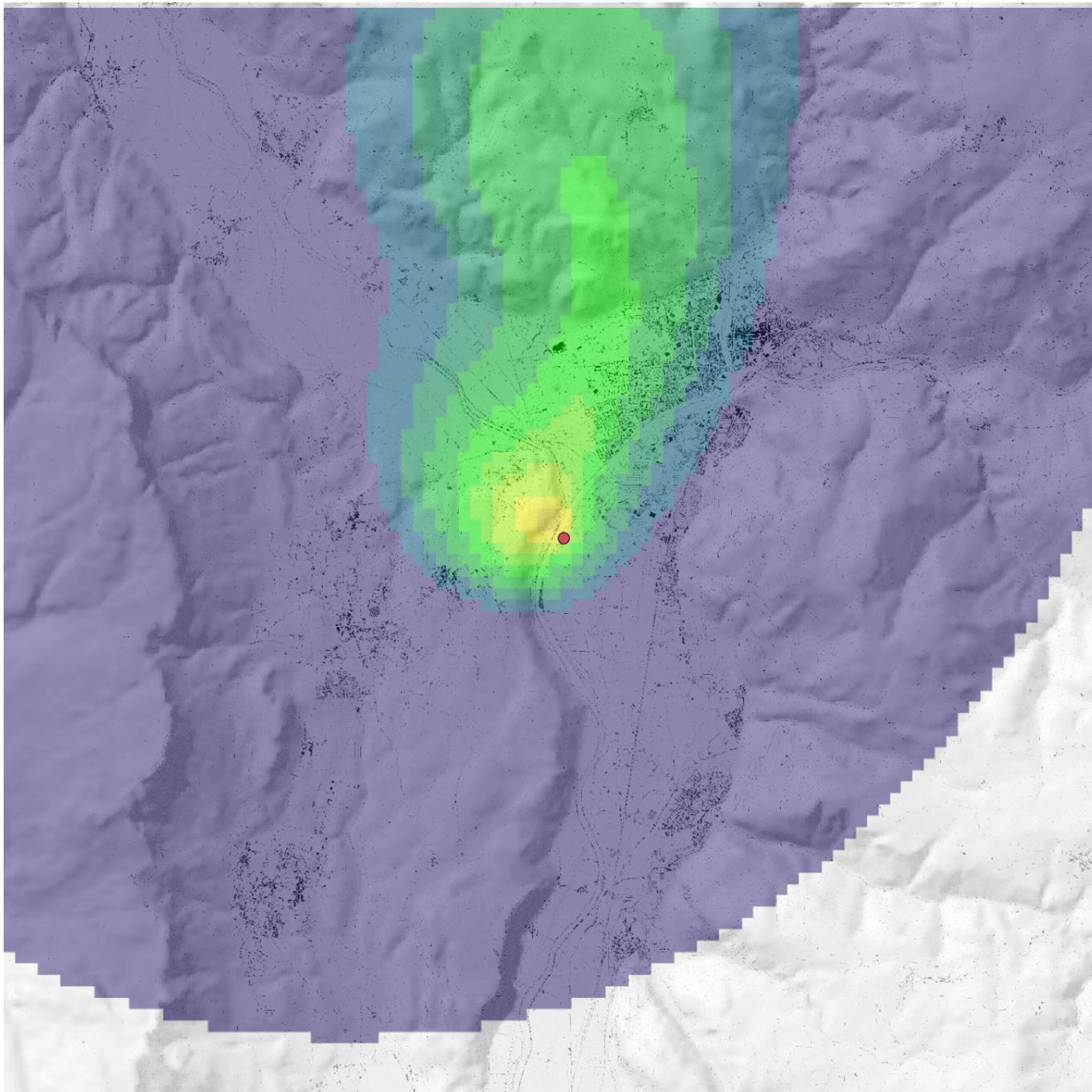




Emissione PTS a camino 26/02/2016 - h 14
Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

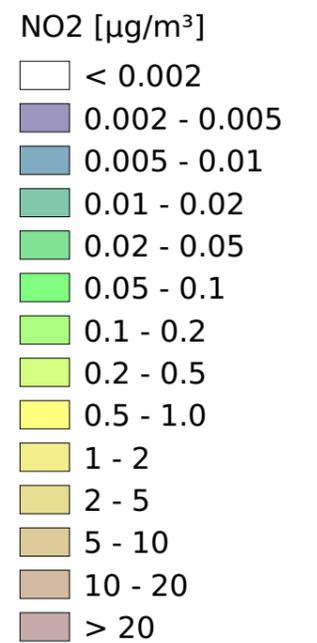
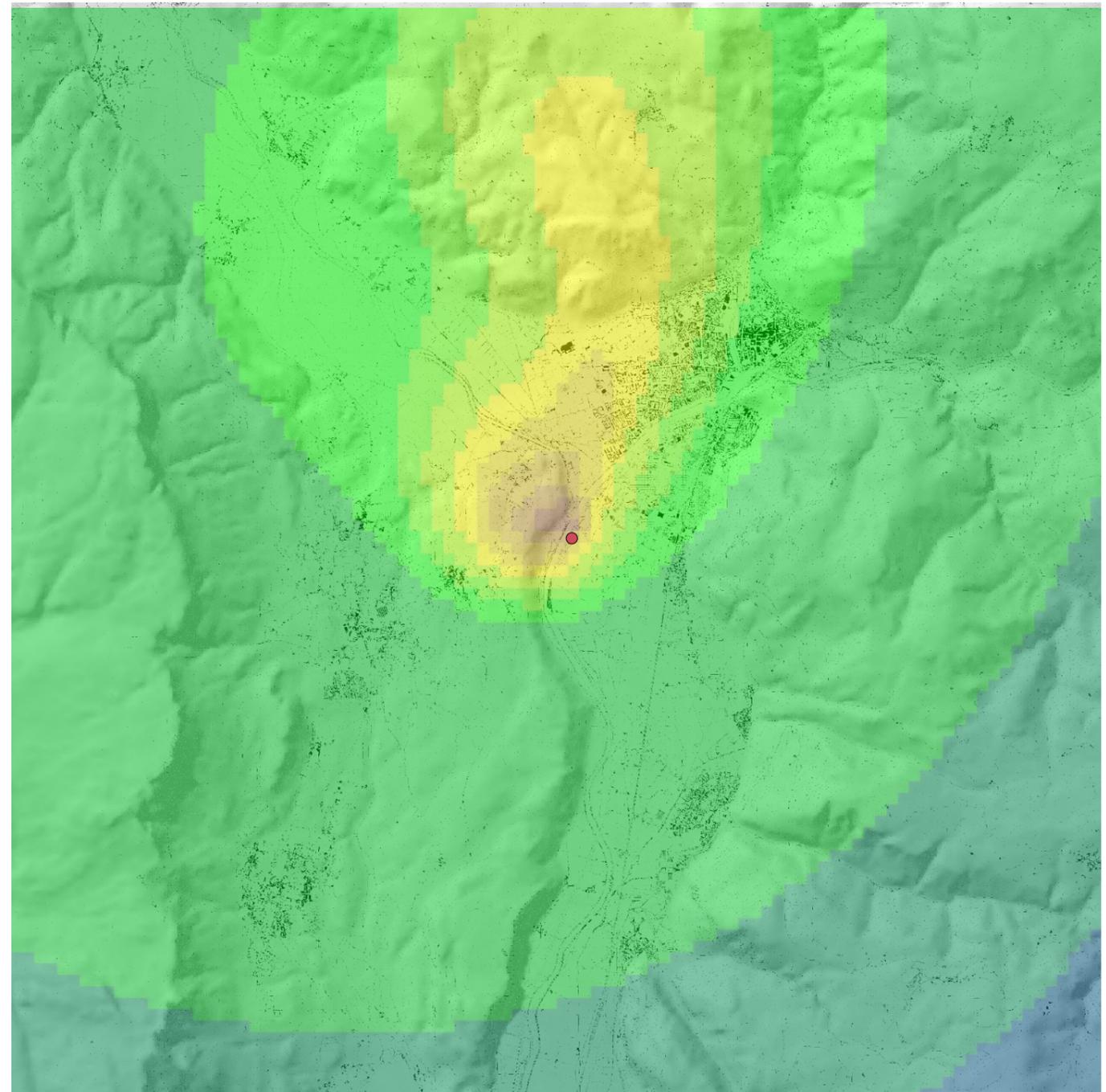
Concentrazione PM10 nel punto di massimo
Normale = 0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 34.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

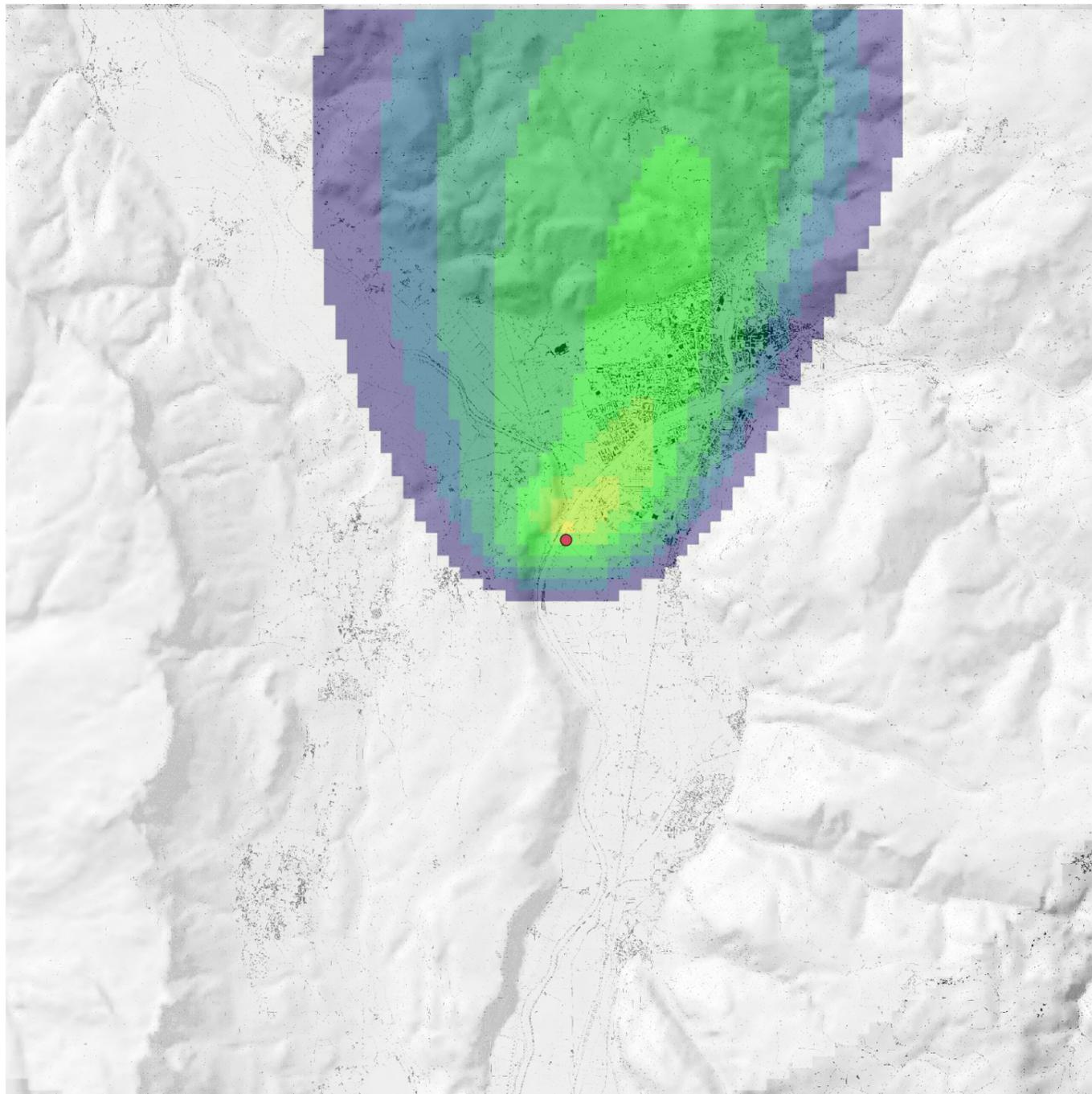




Emissione NOx a camino 26/02/2016 - h 11
 Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

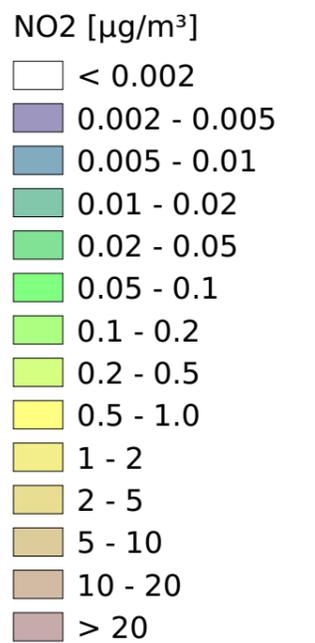
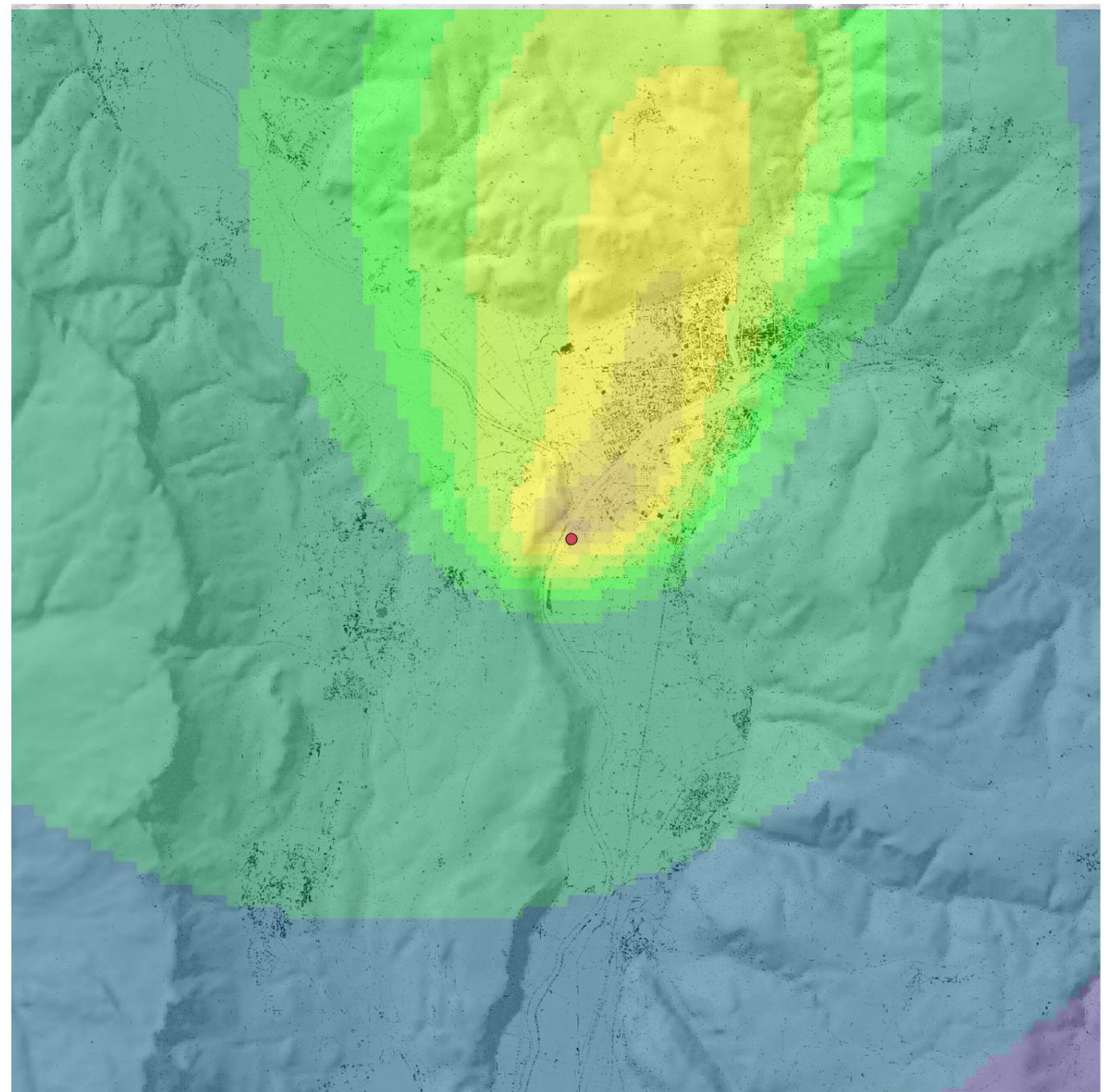
Concentrazione NO2 nel punto di massimo
 Normale = 1.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 18.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

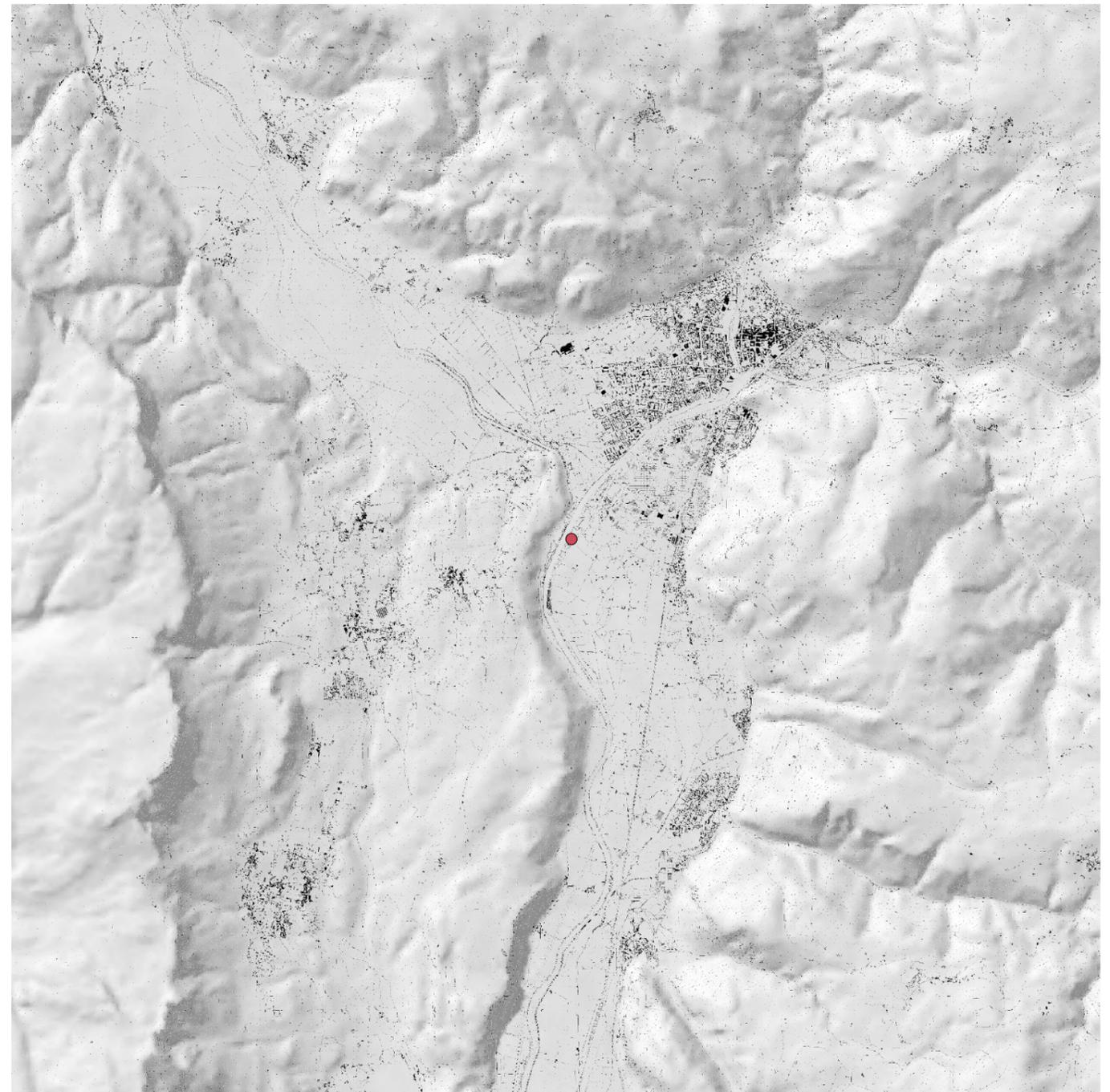
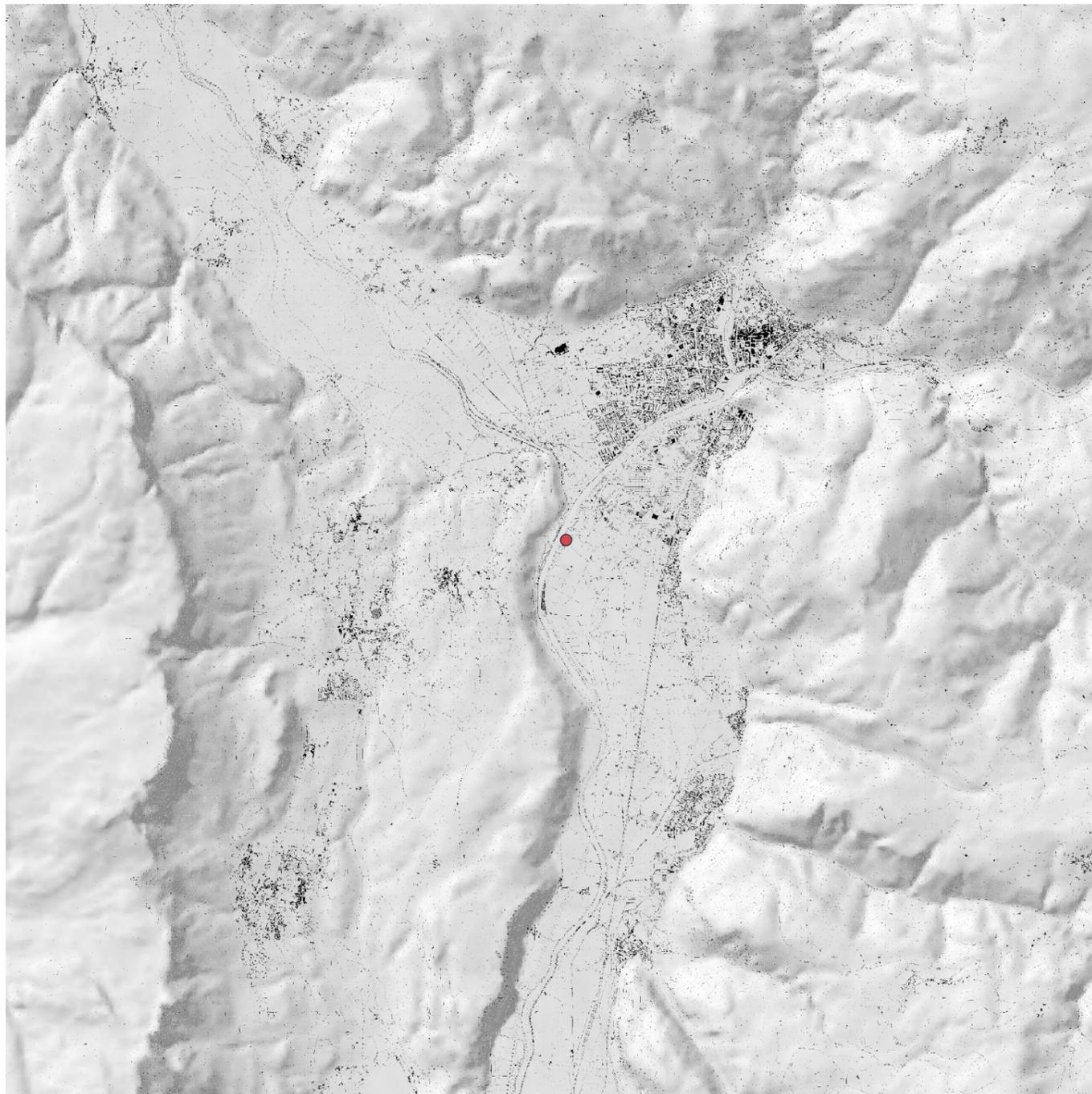




Emissione NOx a camino 26/02/2016 - h 12
 Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

Concentrazione NO2 nel punto di massimo
 Normale = 0.5 µg/m³, Incidente = 6.6 µg/m³

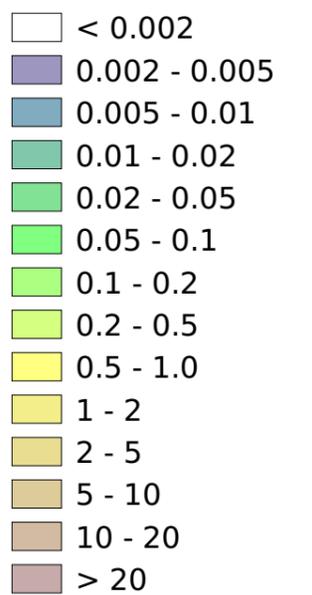


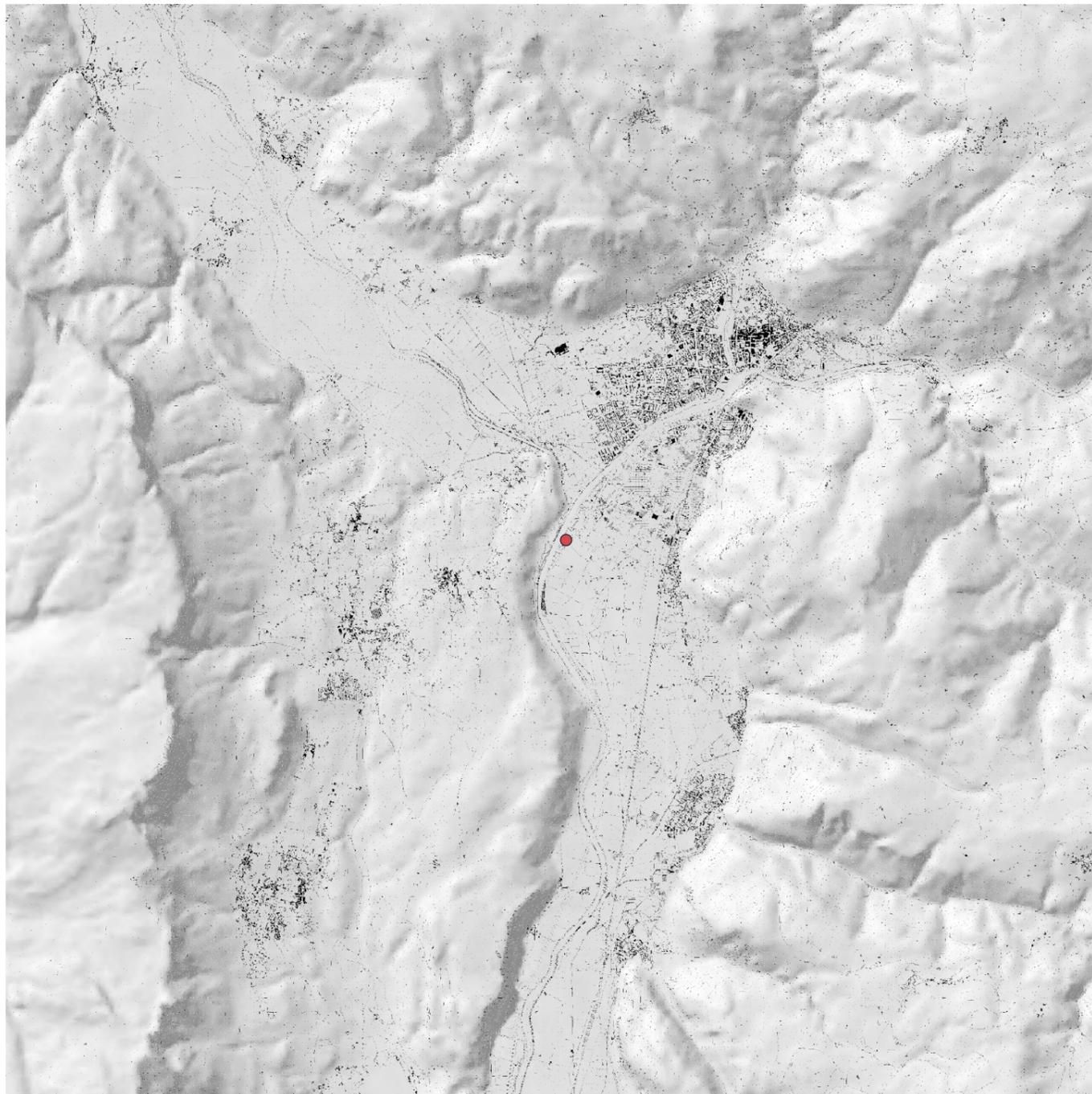


Emissione NOx a camino 26/02/2016 - h 13
Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

Concentrazione NO2 nel punto di massimo
Normale = 0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 4.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

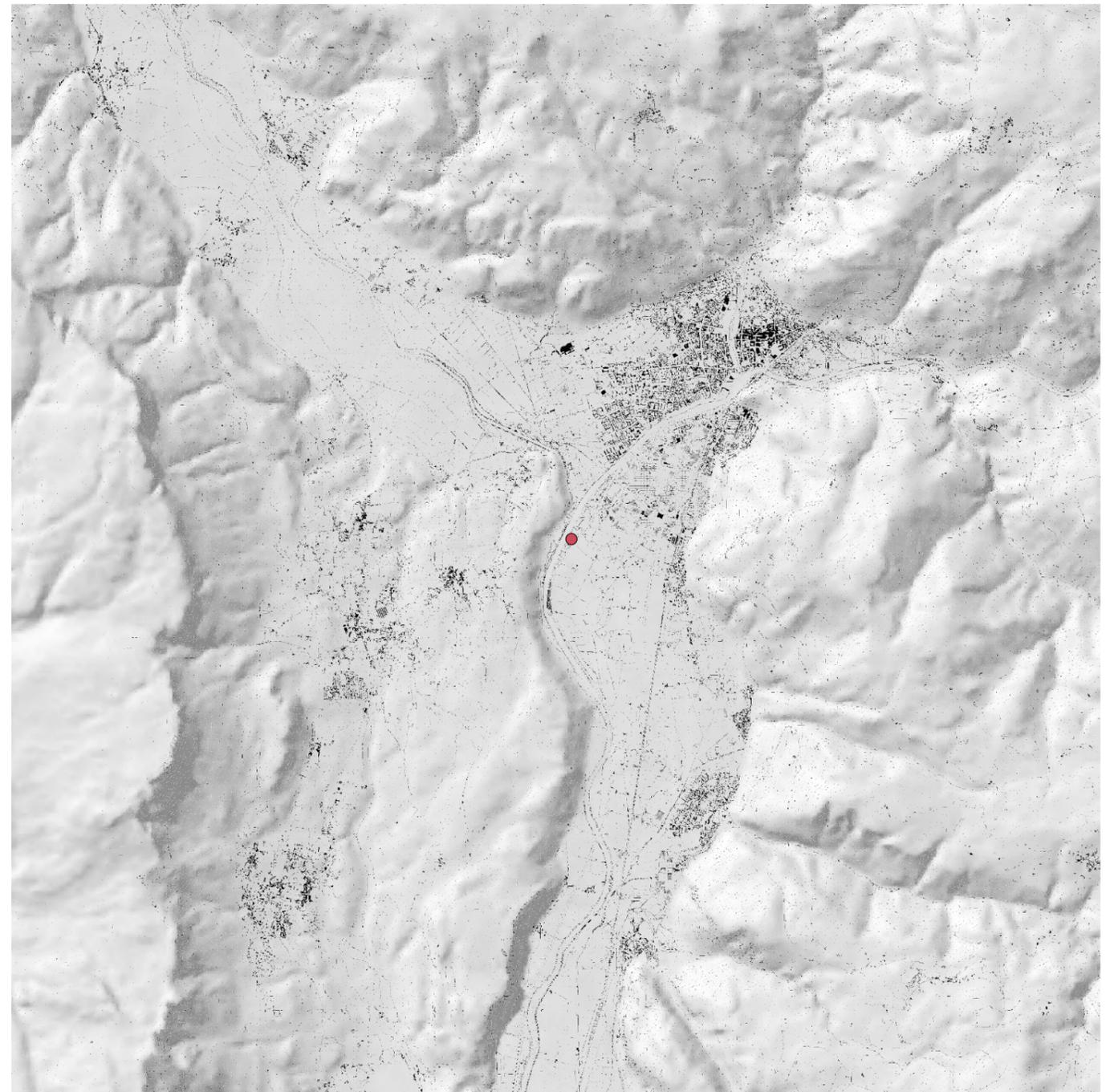
NO2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



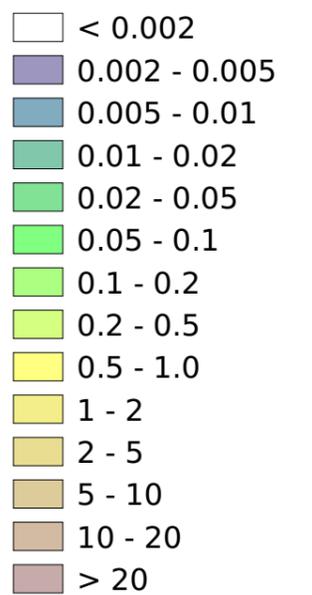


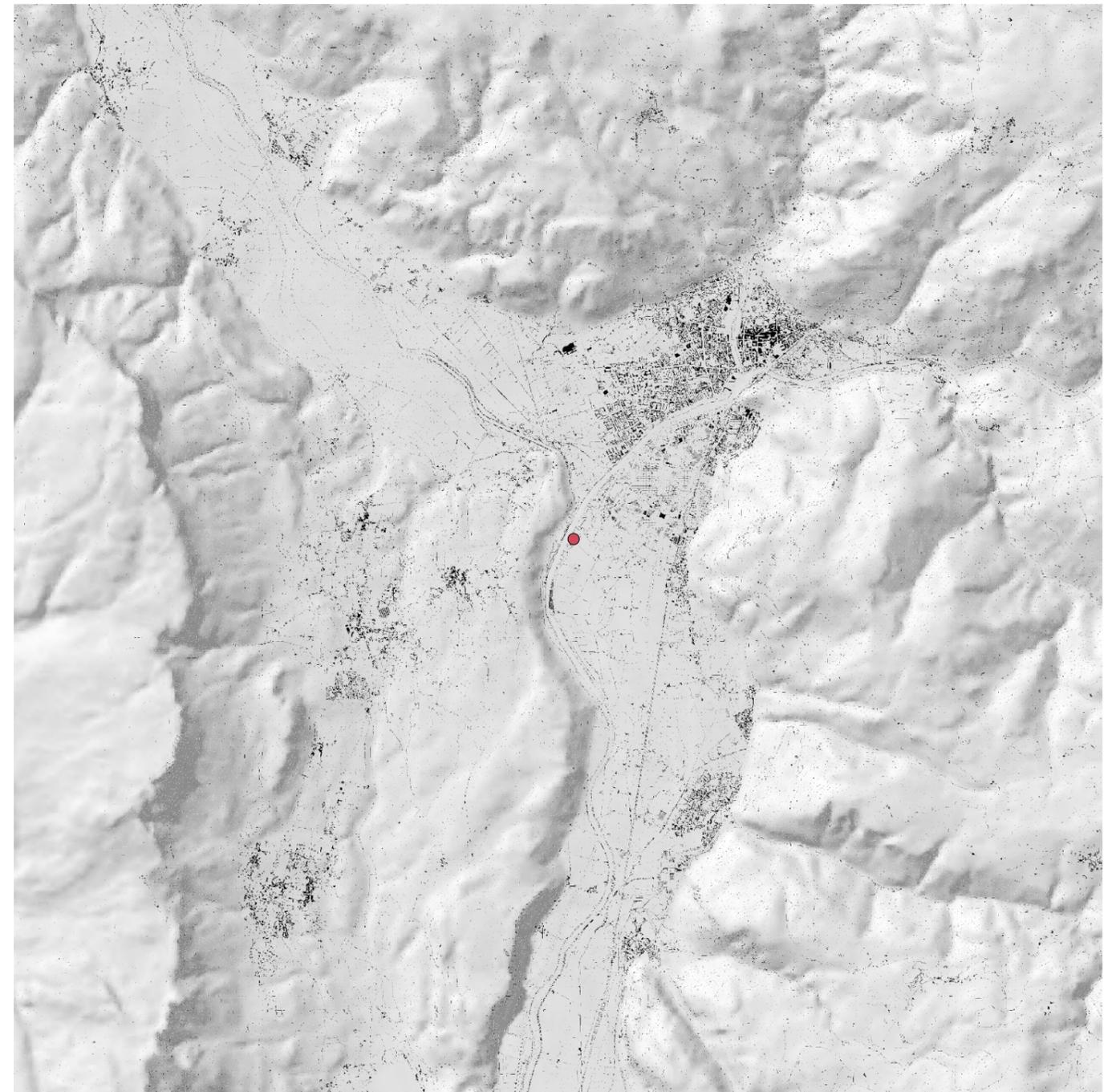
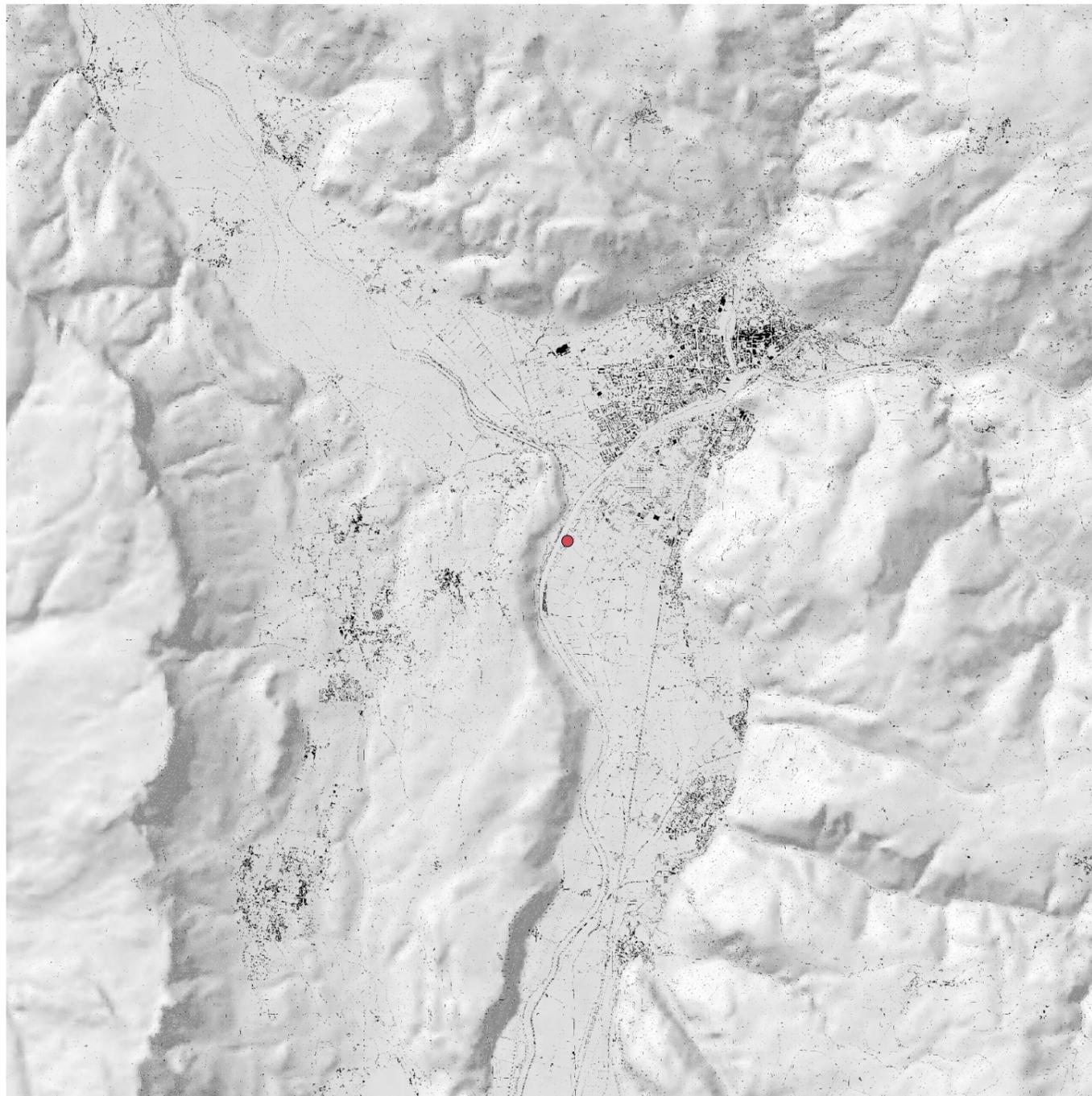
Emissione NOx a camino 26/02/2016 - h 14
Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

Concentrazione NO2 nel punto di massimo
Normale = 0.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 9.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



NO2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

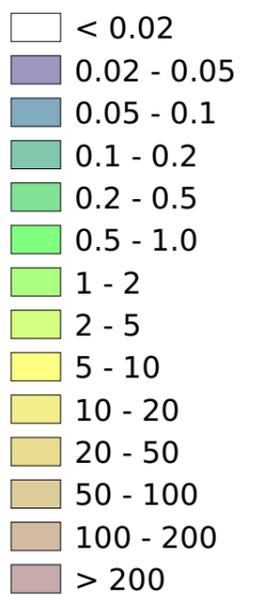


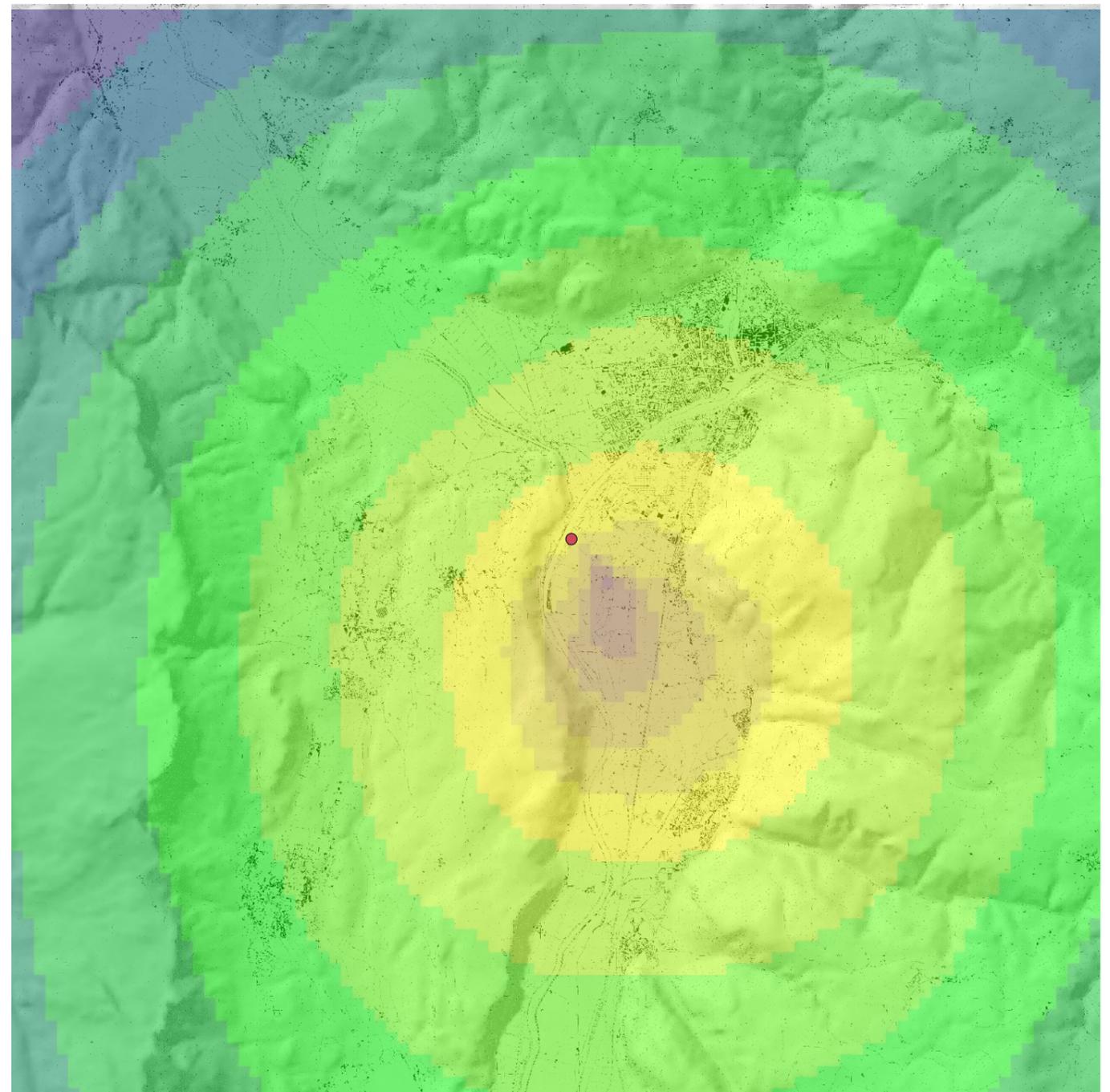
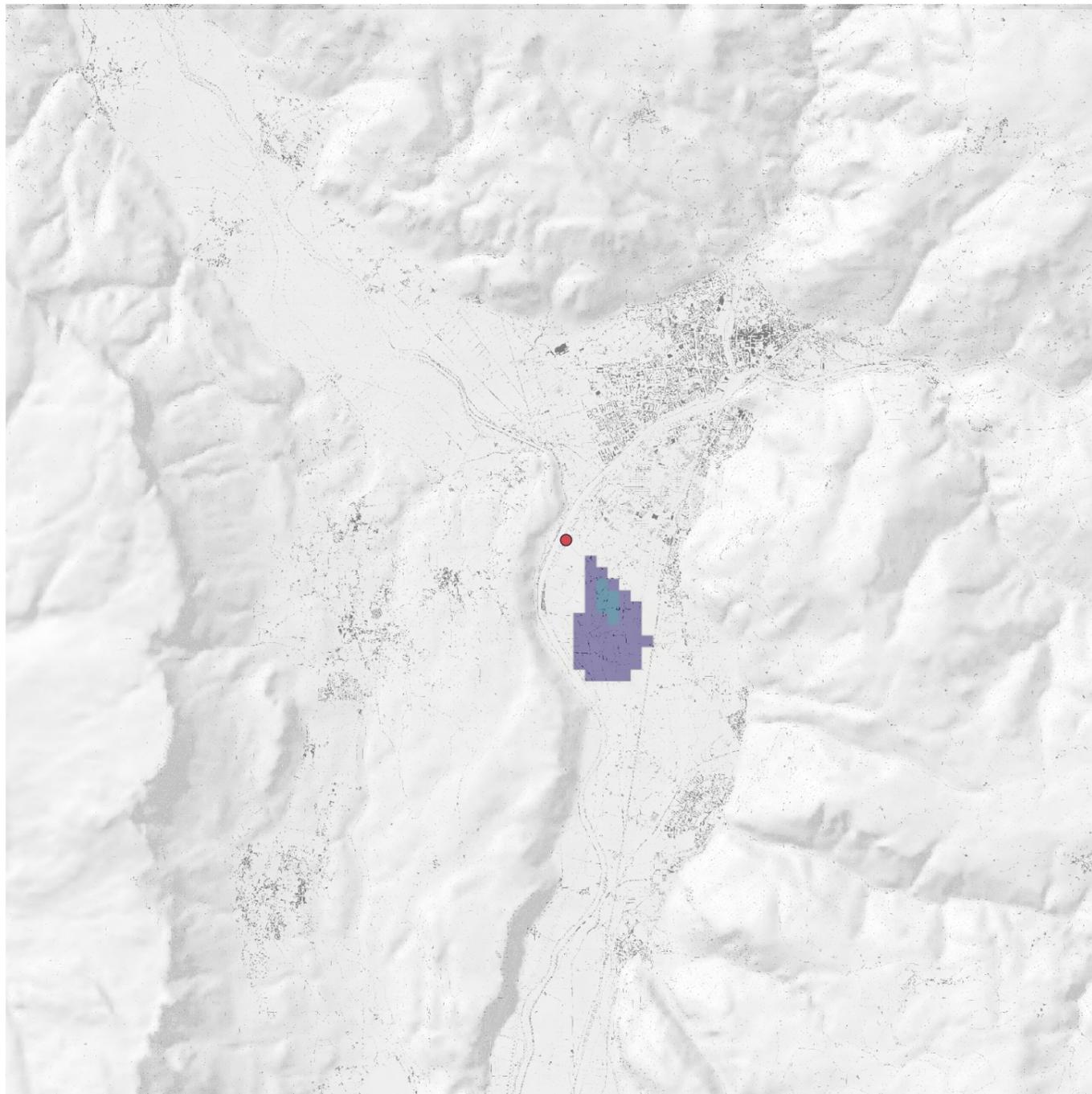


Emissione PTS a camino 03/11/2016 - h 08
Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

Concentrazione PM10 nel punto di massimo
Normale = 0.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 192.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

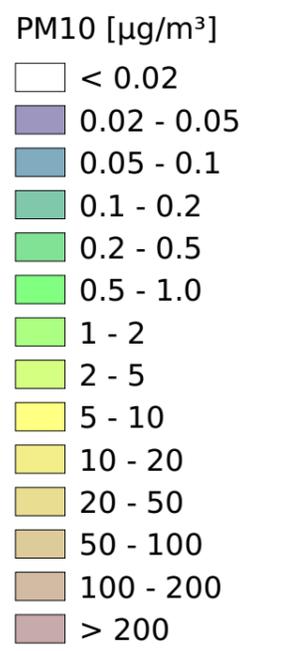
PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

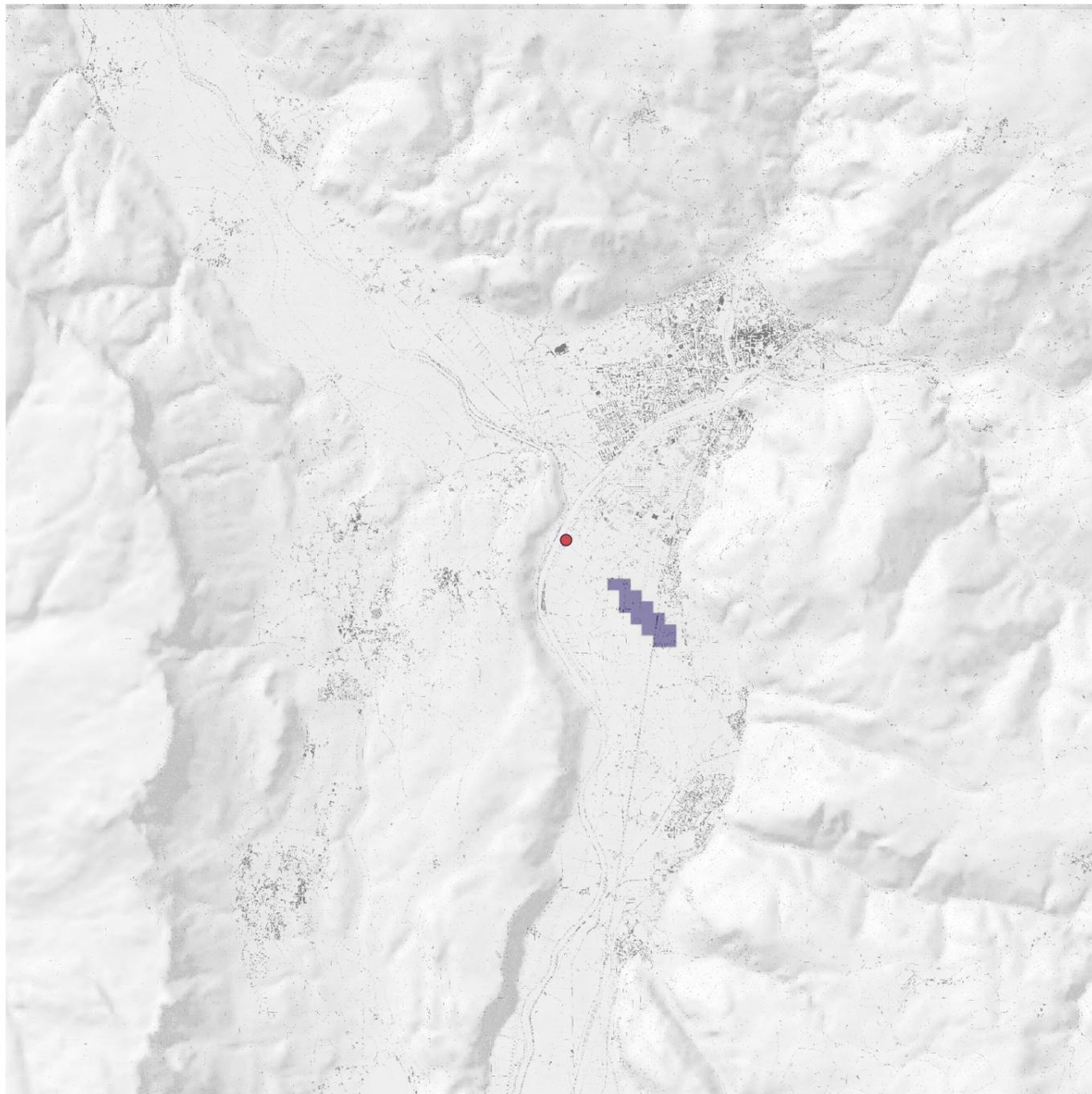




Emissione PTS a camino 03/11/2016 - h 09
 Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

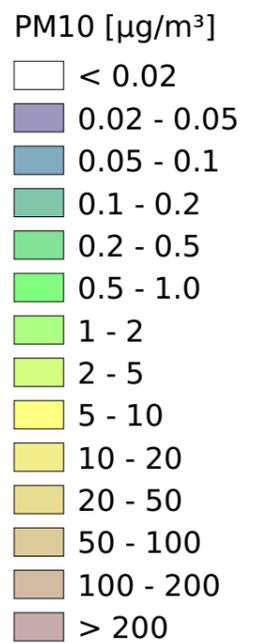
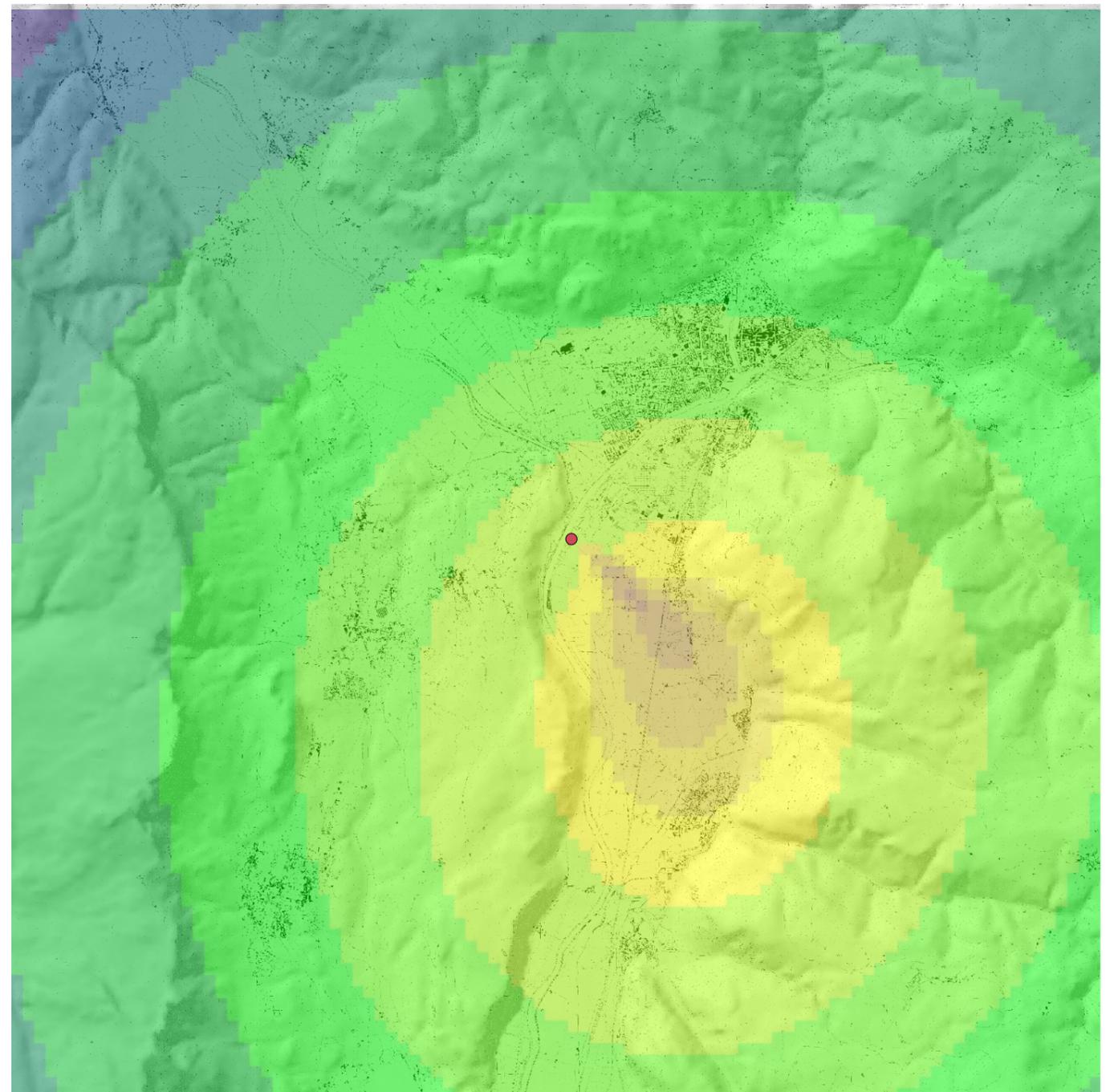
Concentrazione PM10 nel punto di massimo
 Normale = 0.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 210.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

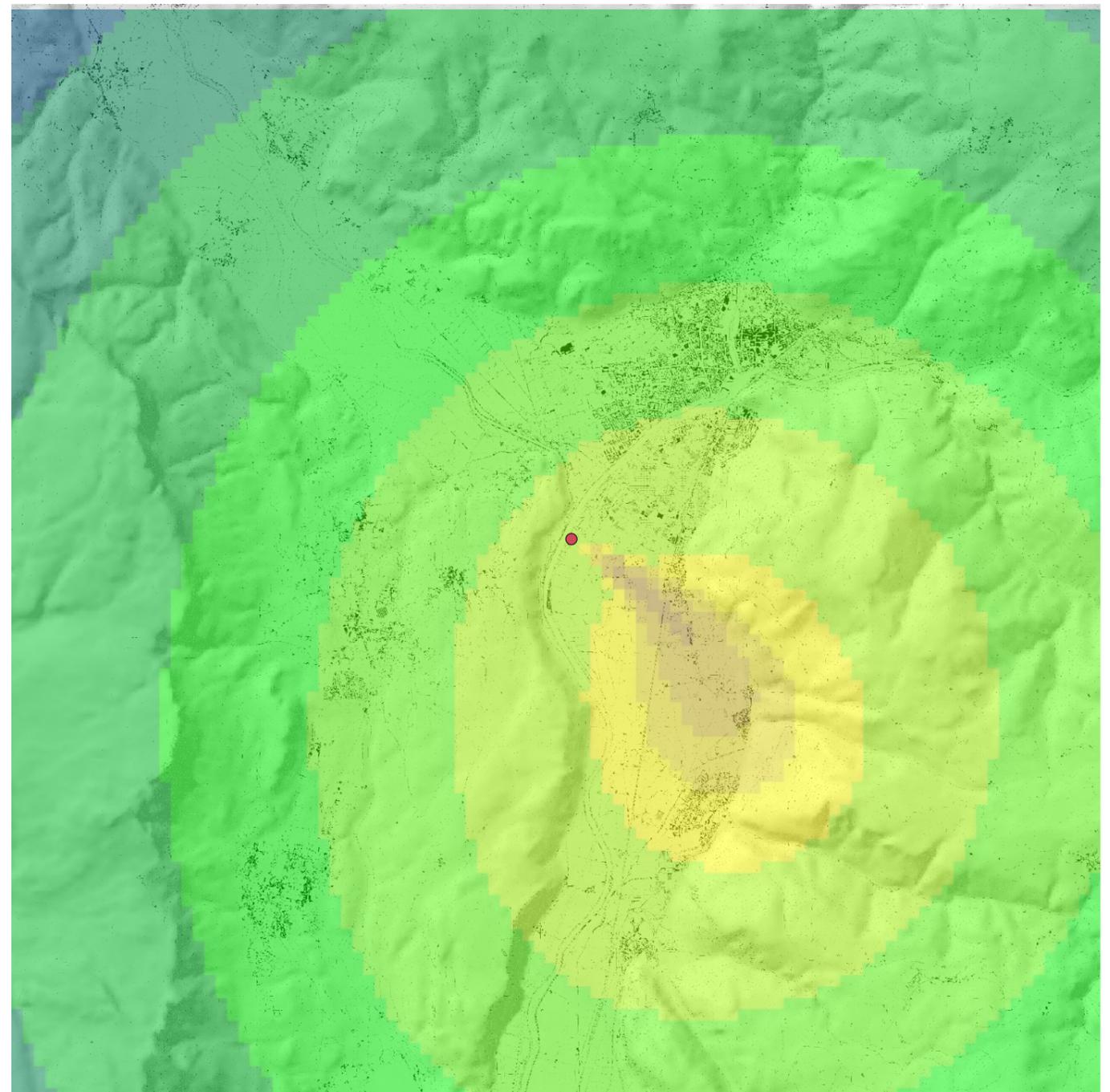
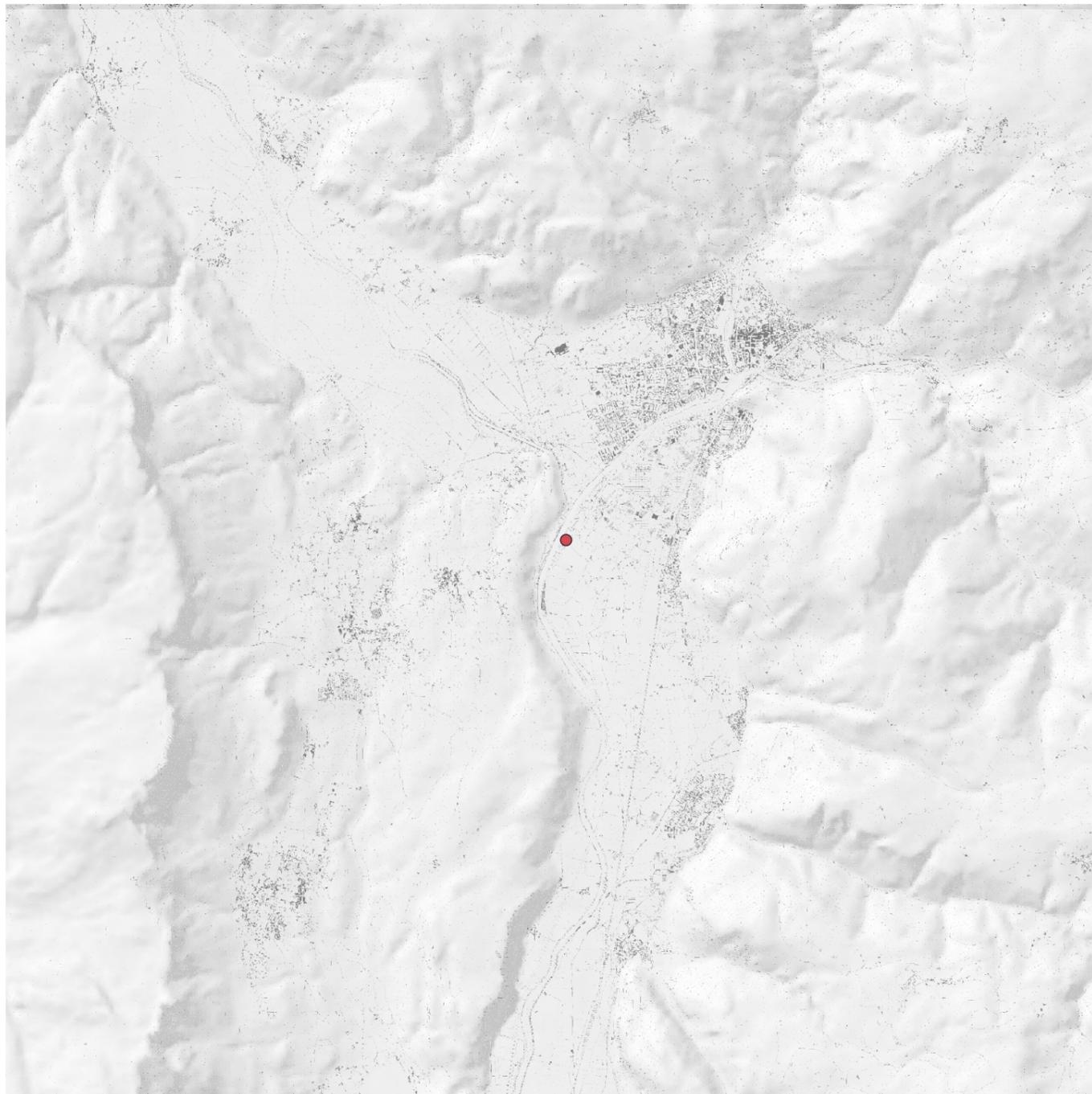




Emissione PTS a camino 03/11/2016 - h 10
Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

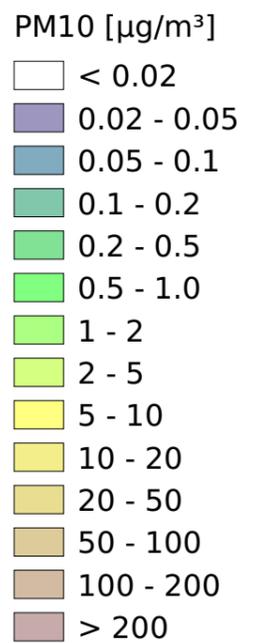
Concentrazione PM10 nel punto di massimo
Normale = 0.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 106.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

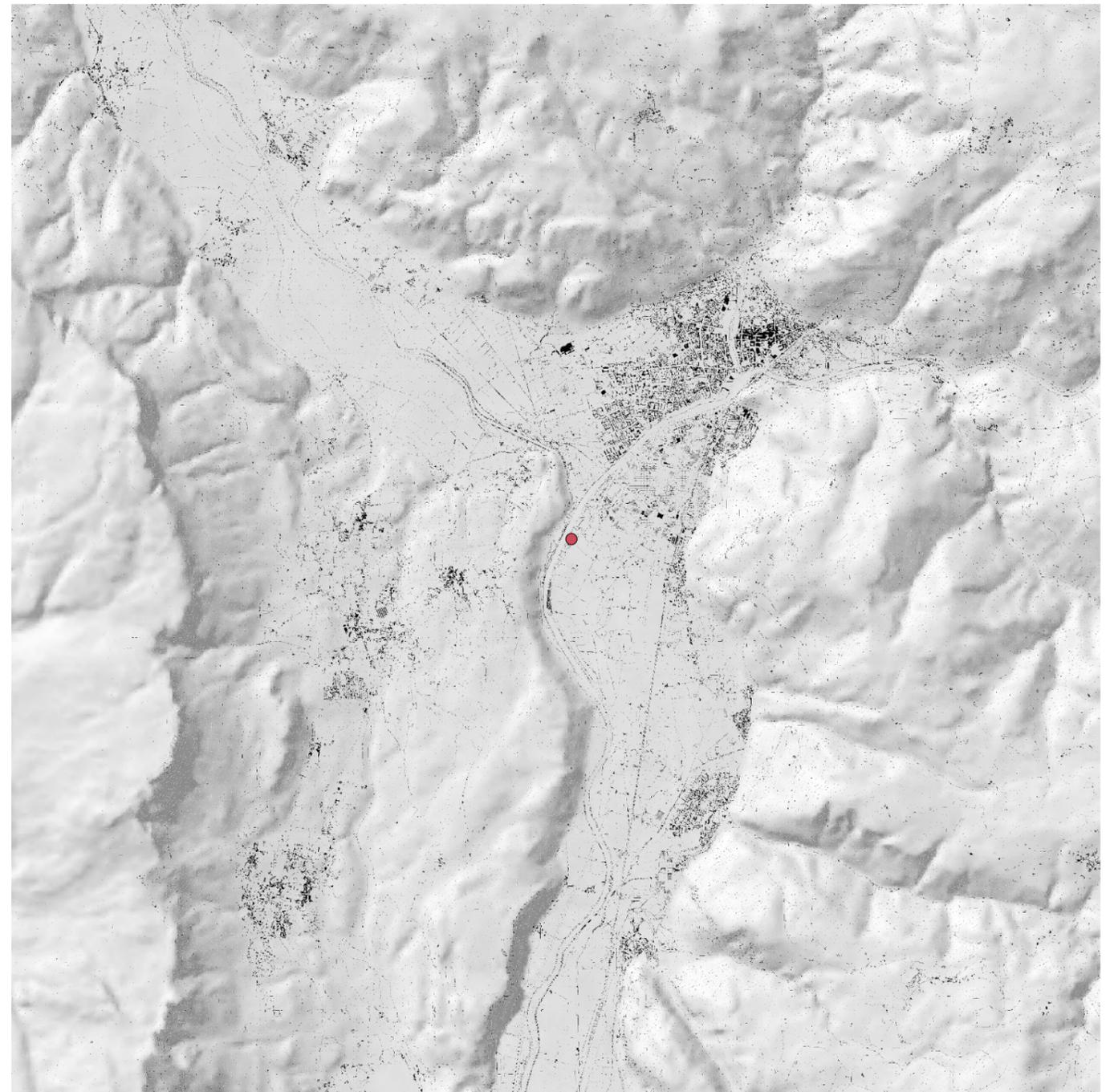
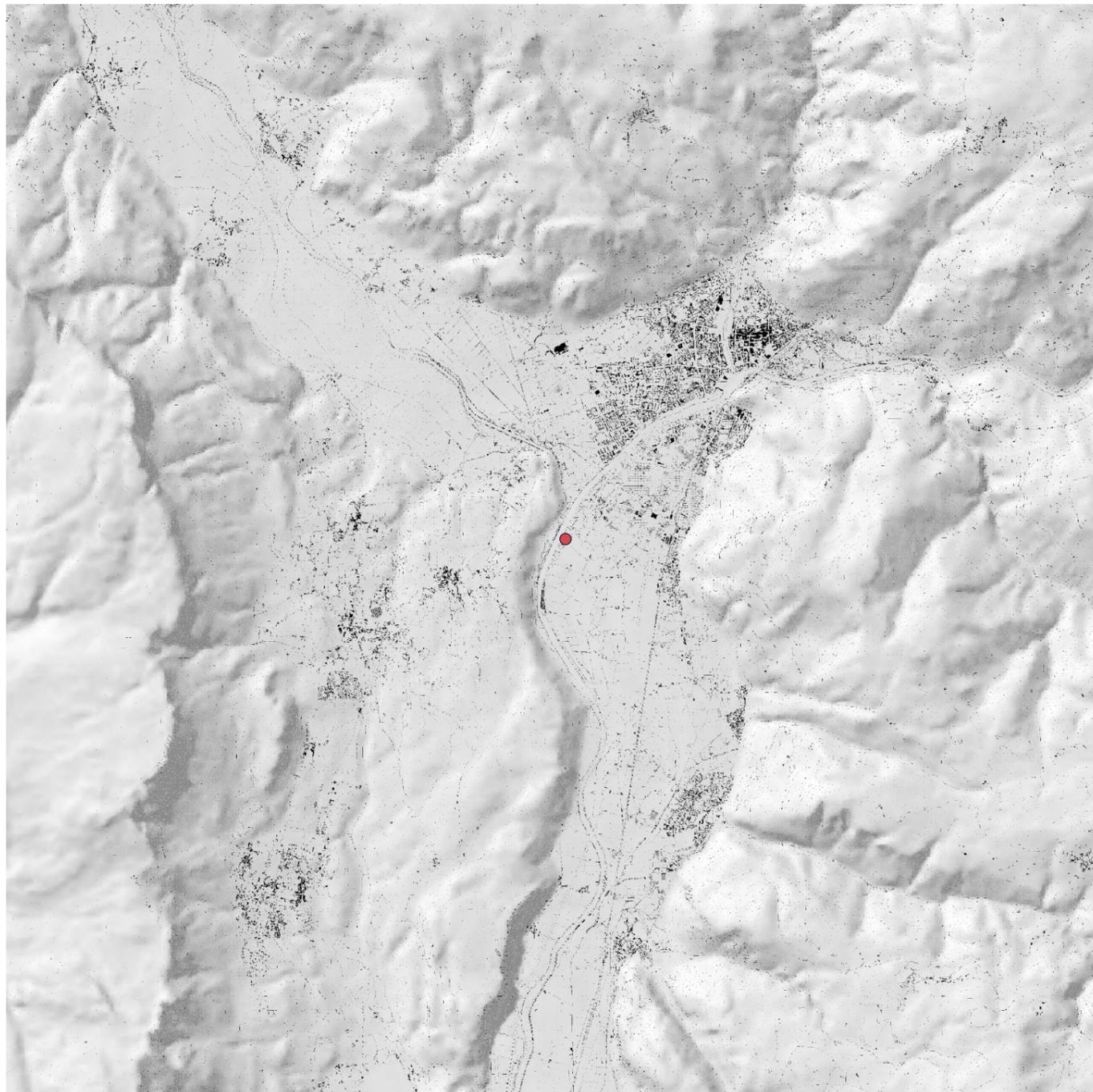




Emissione PTS a camino 03/11/2016 - h 11
Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

Concentrazione PM10 nel punto di massimo
Normale = 0.02 µg/m³, Incidente = 61.6 µg/m³

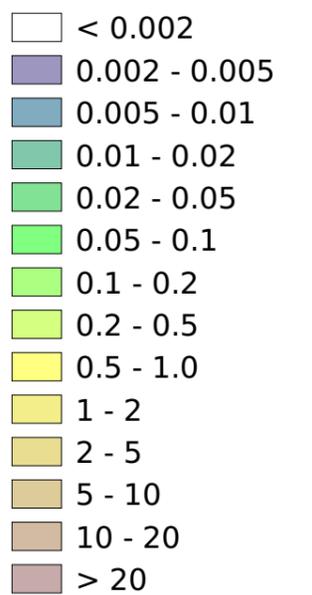


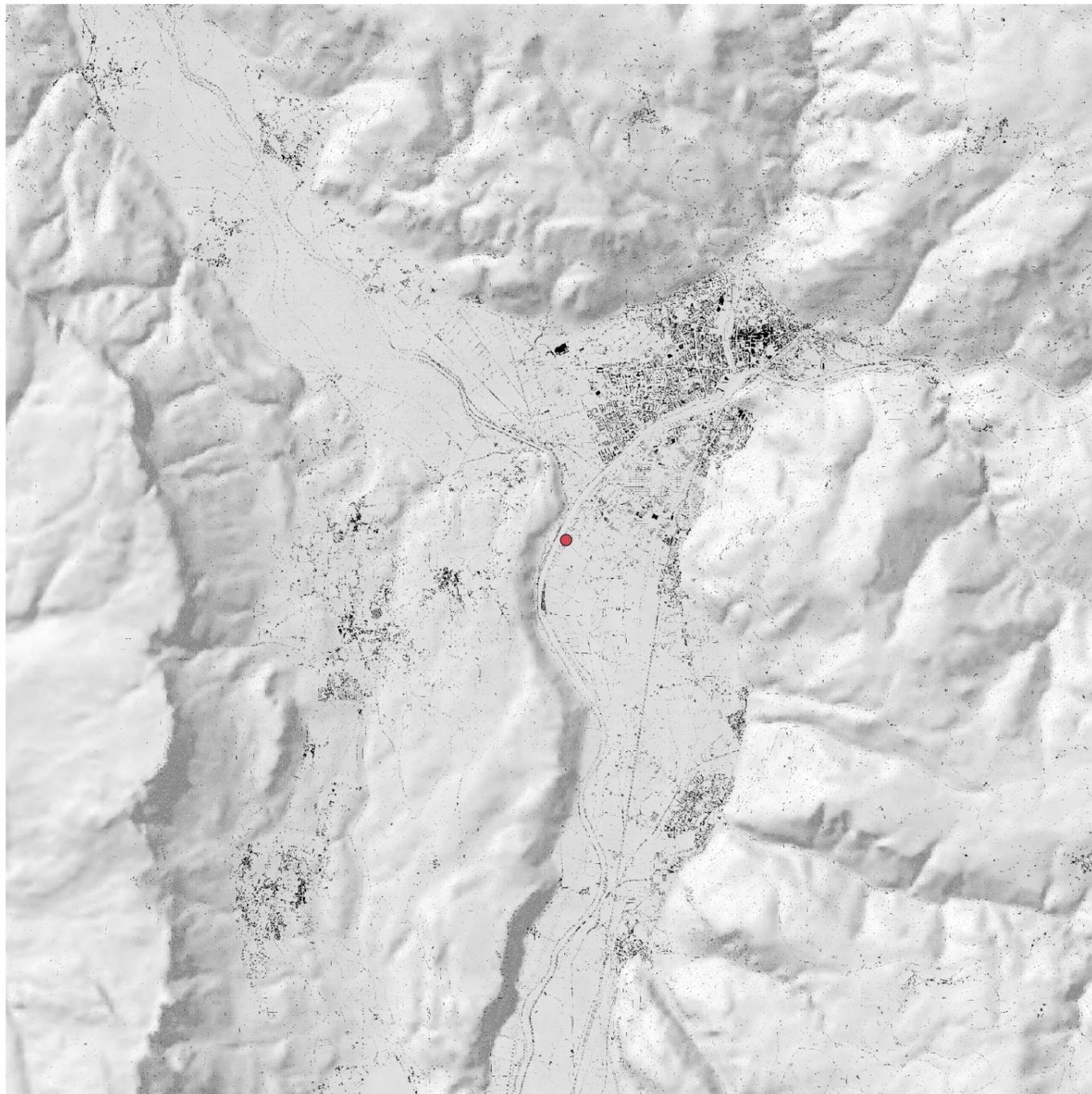


Emissione NOx a camino 03/01/2016 - h 08
Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

Concentrazione NO2 nel punto di massimo
Normale = 4.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 38.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

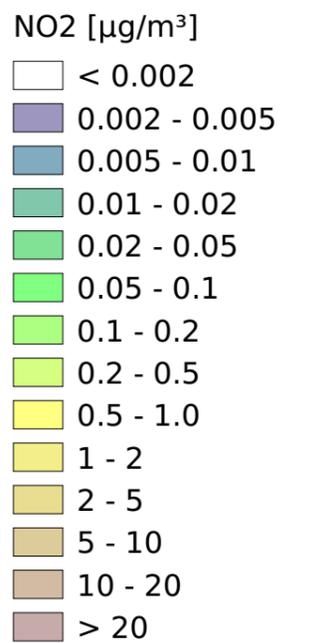
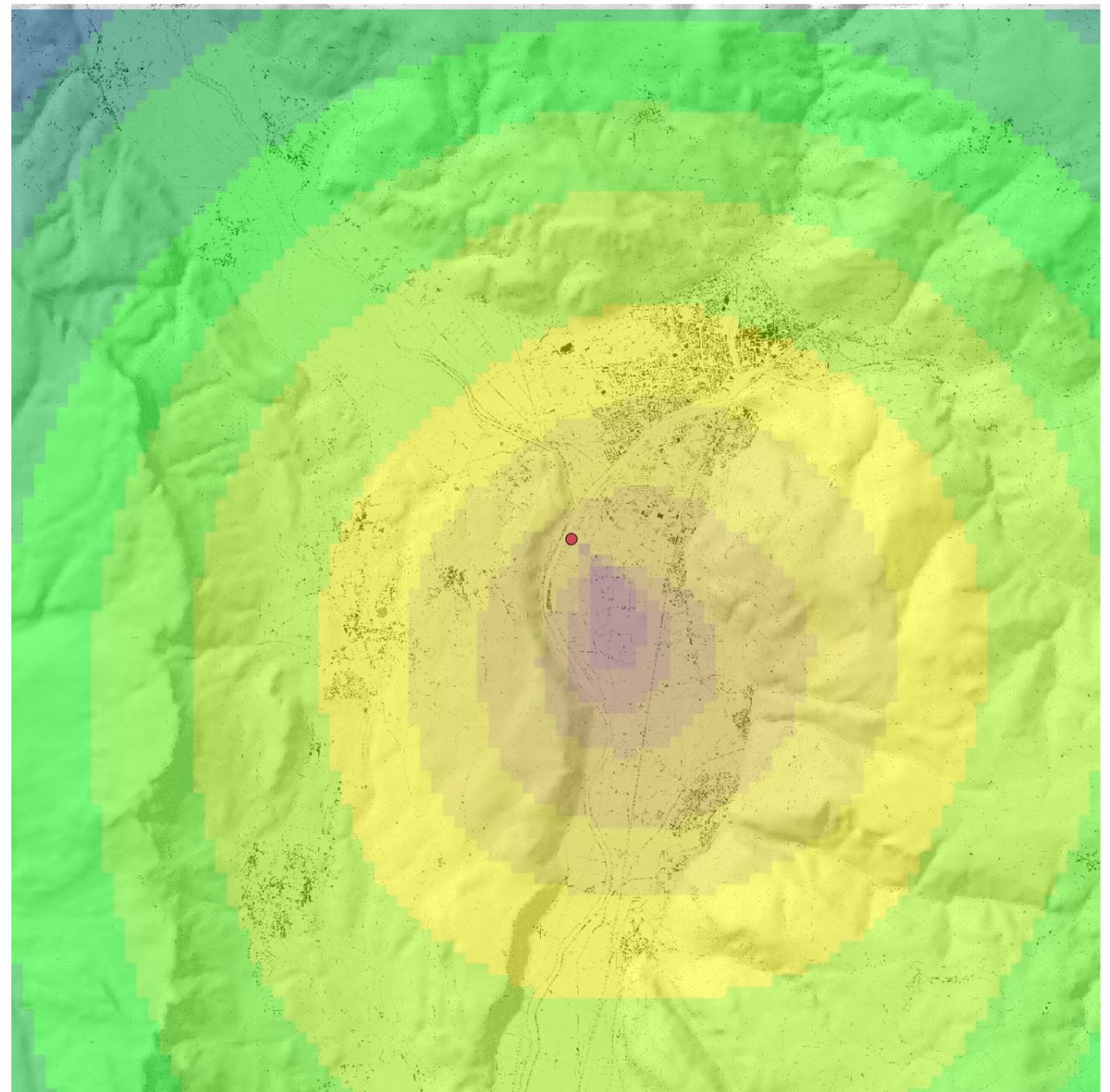
NO2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

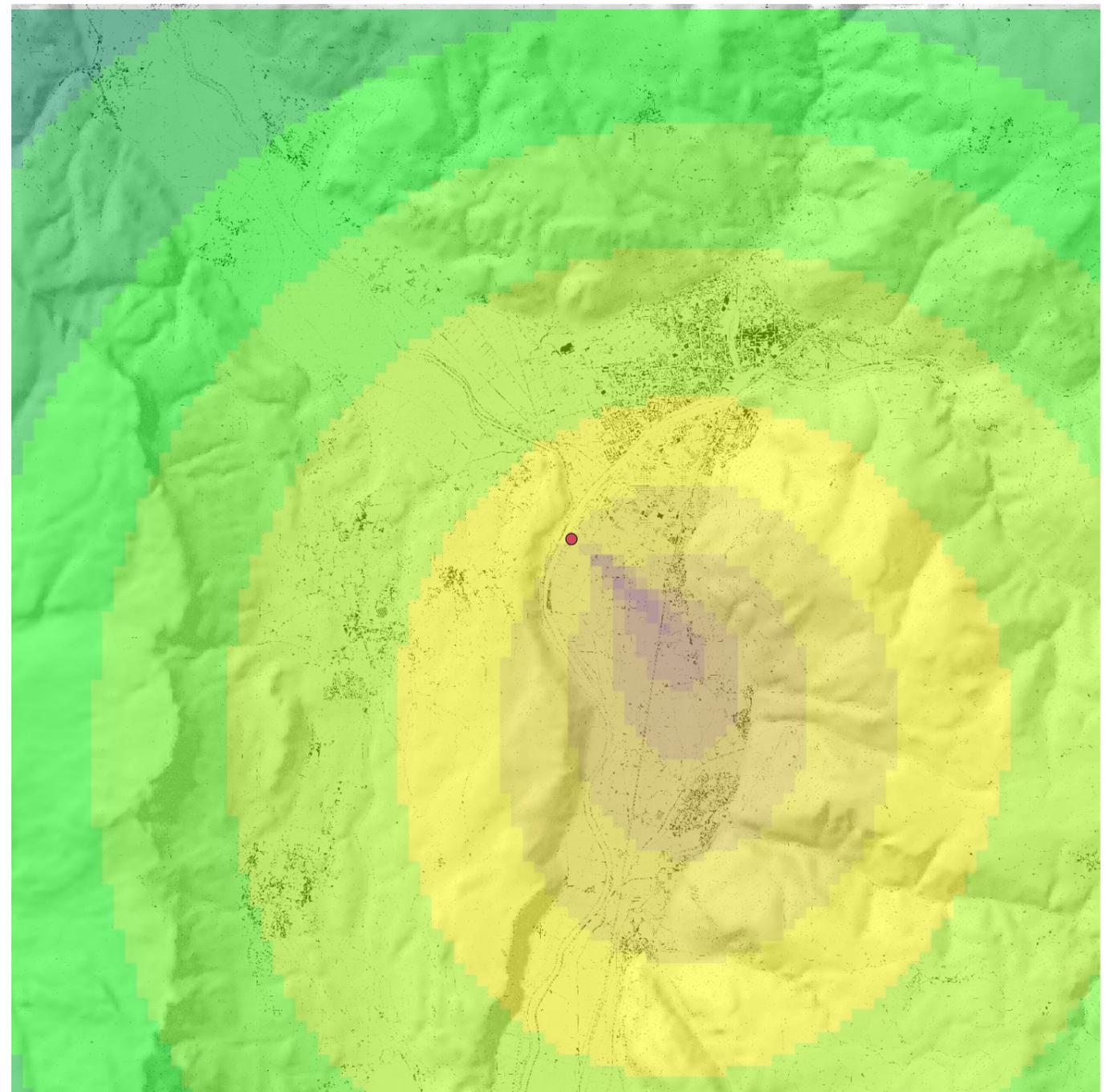
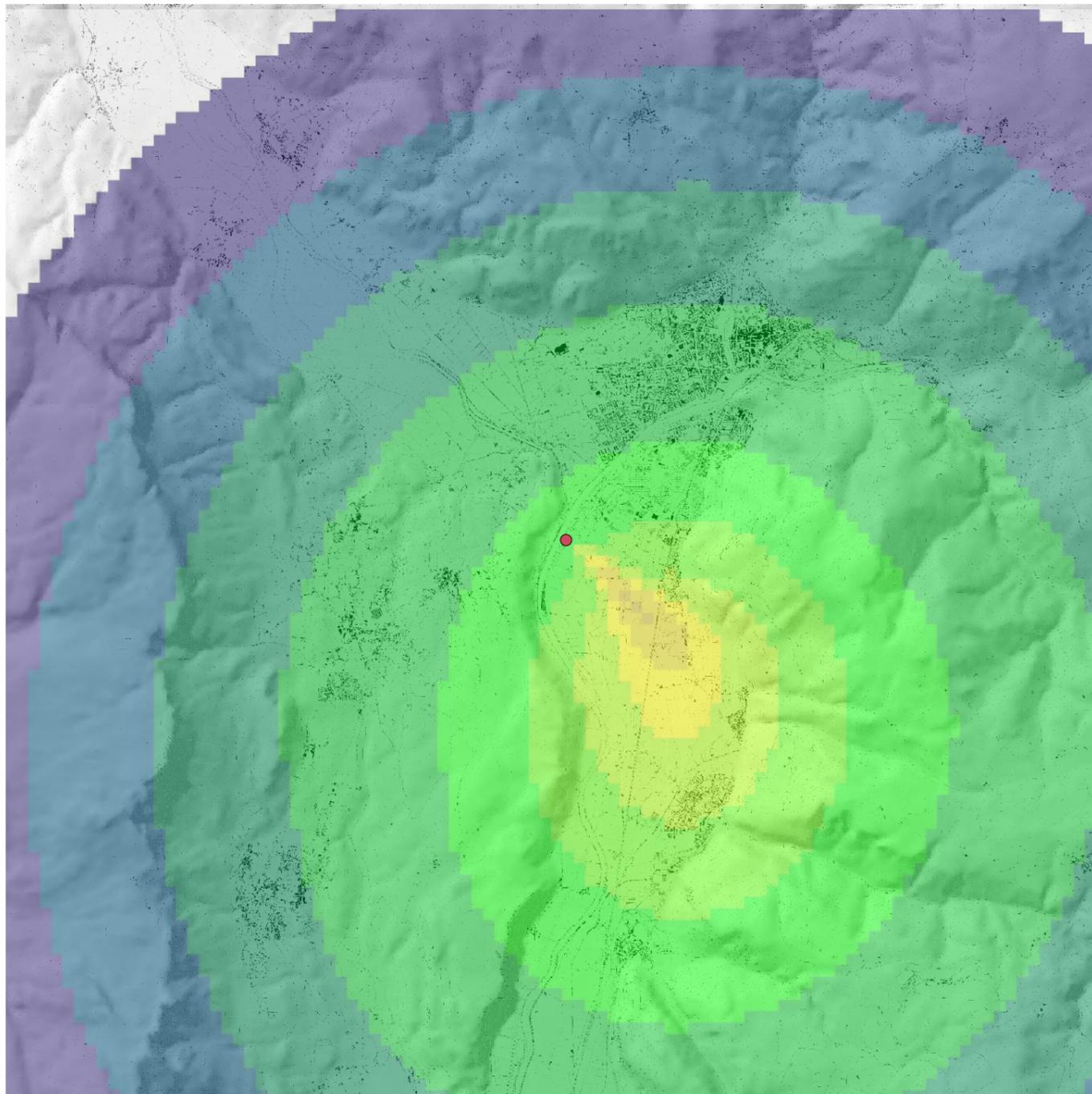




Emissione NOx a camino 03/11/2016 - h 09
Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

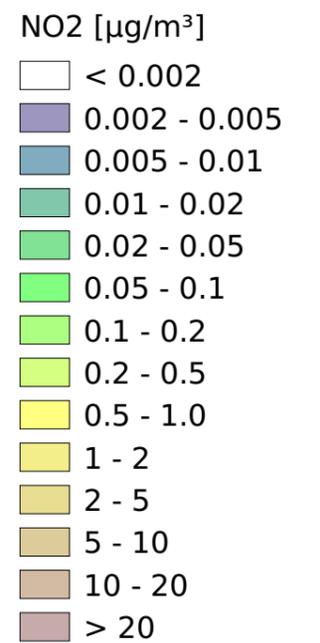
Concentrazione NO2 nel punto di massimo
Normale = 4.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 40.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

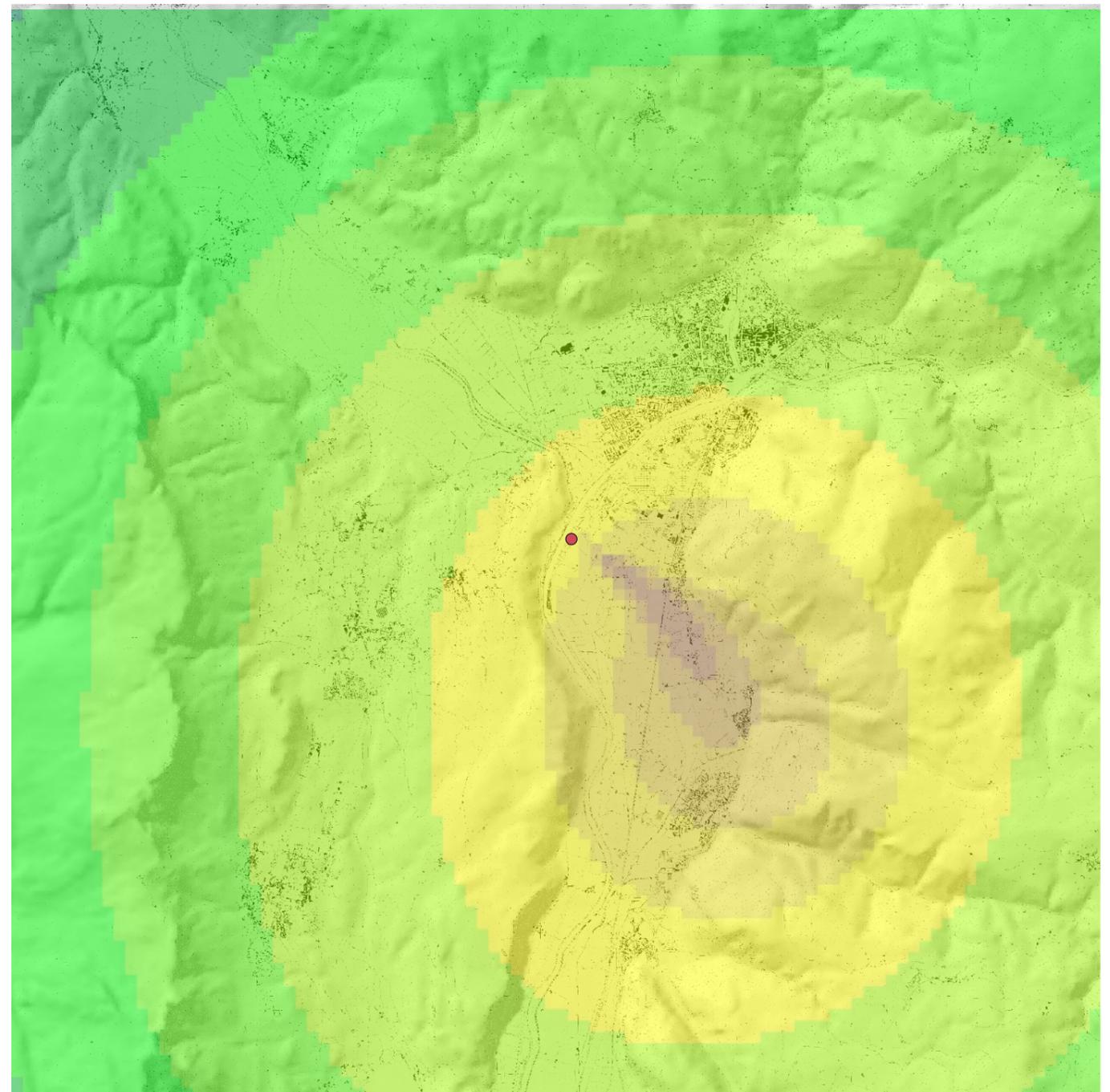
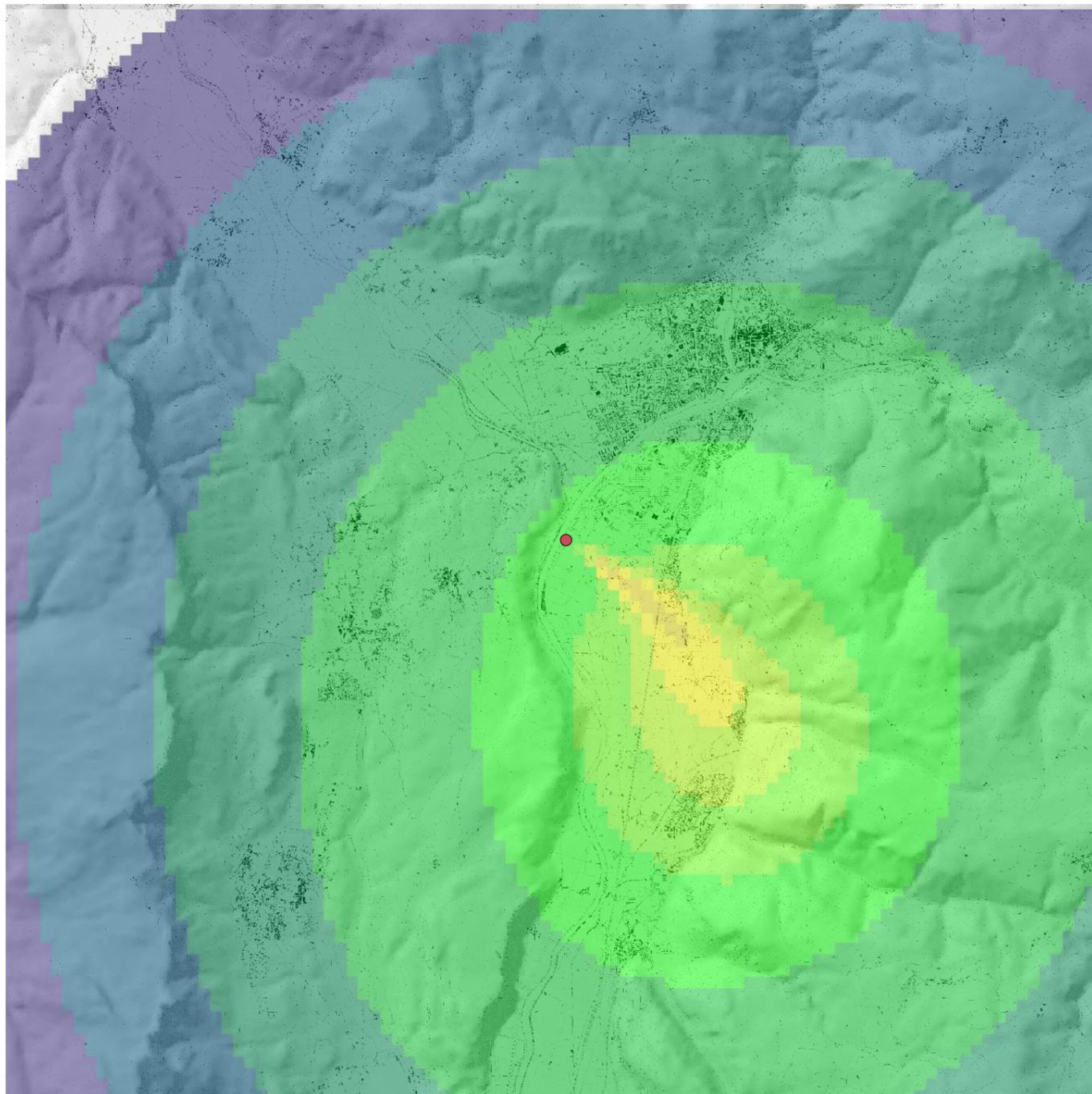




Emissione NOx a camino 03/11/2016 - h 10
 Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

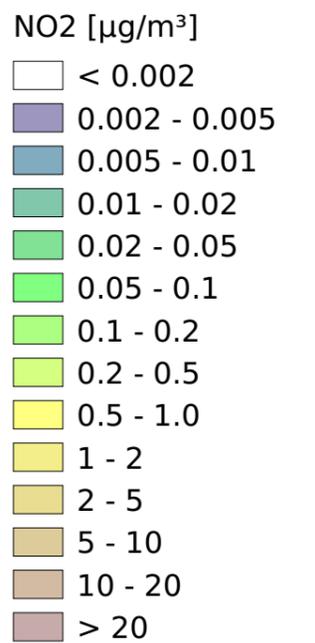
Concentrazione NO2 nel punto di massimo
 Normale = 2.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 24.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

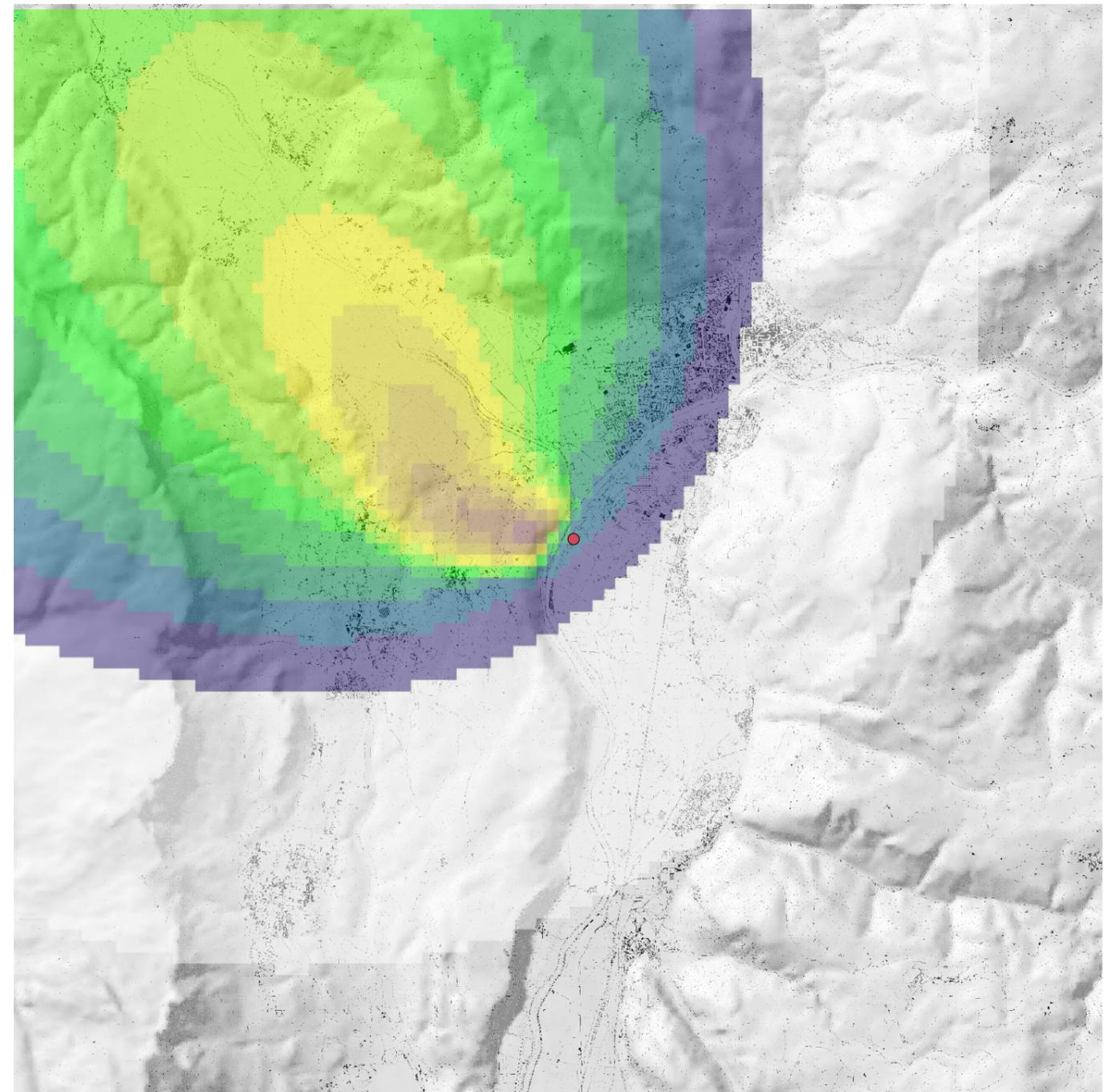
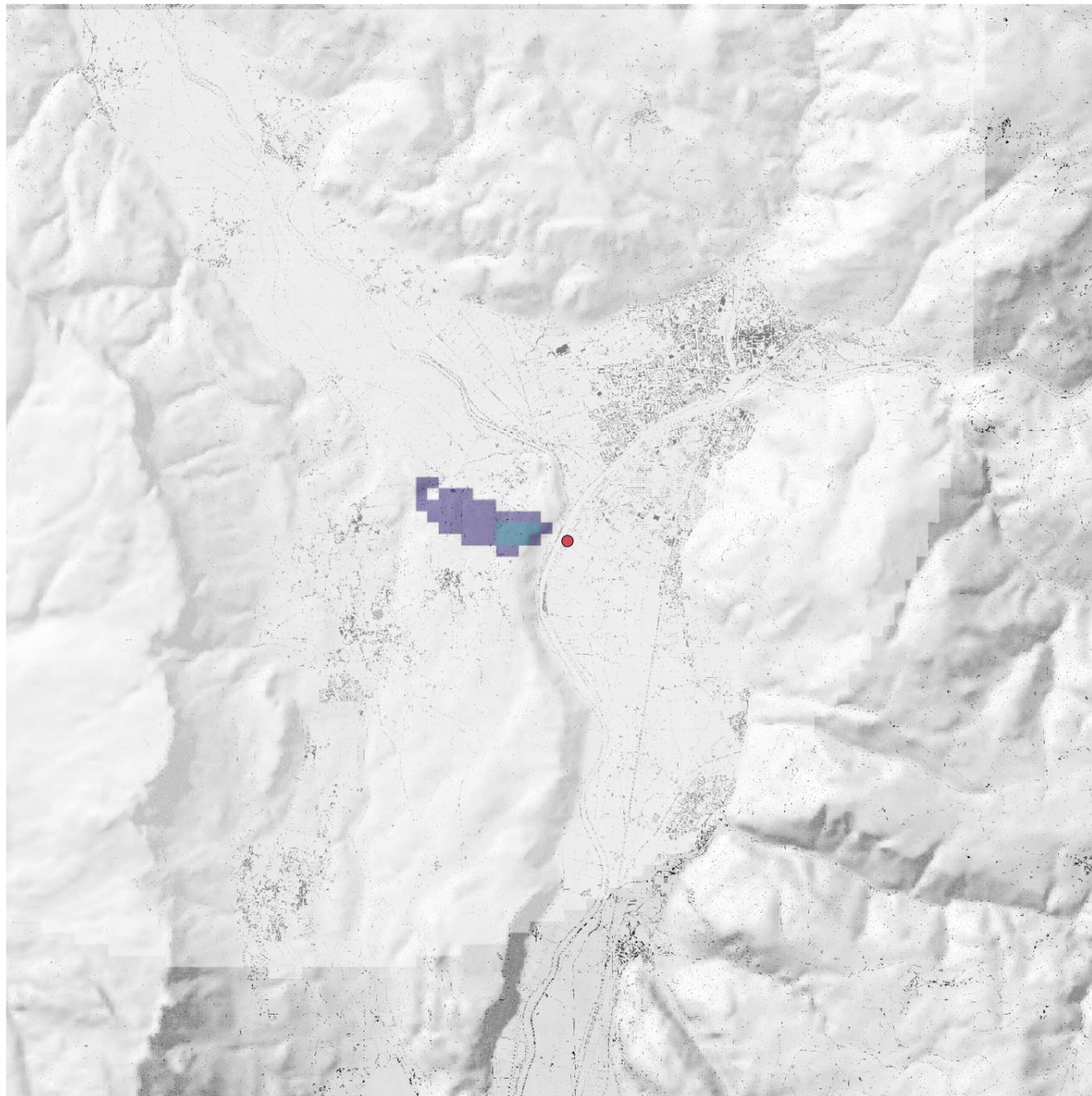




Emissione NOx a camino 03/11/2016 - h 11
 Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

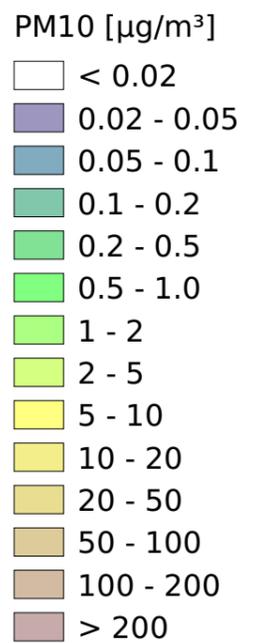
Concentrazione NO2 nel punto di massimo
 Normale = 1.3 µg/m³, Incidente = 15.4 µg/m³

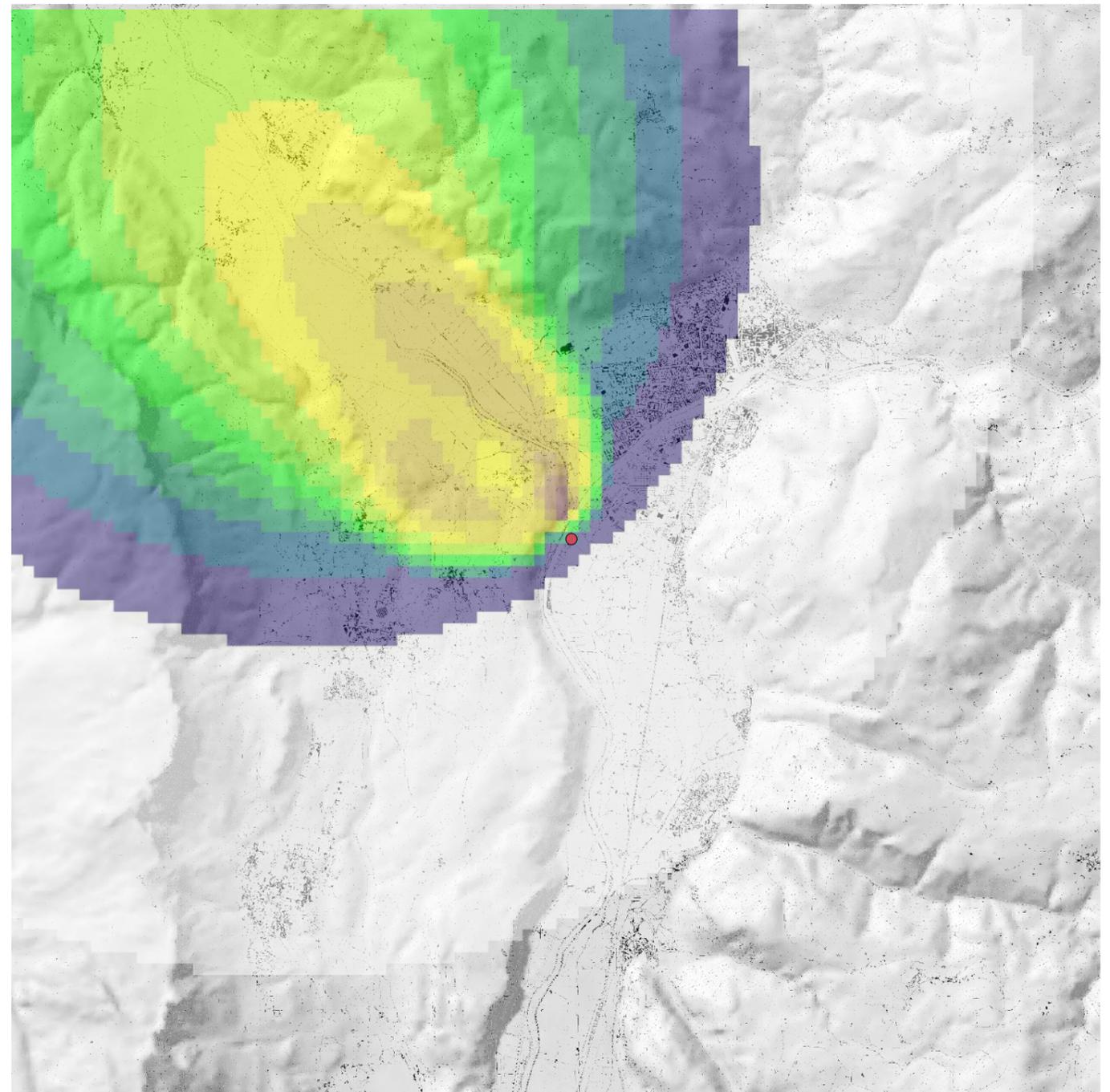
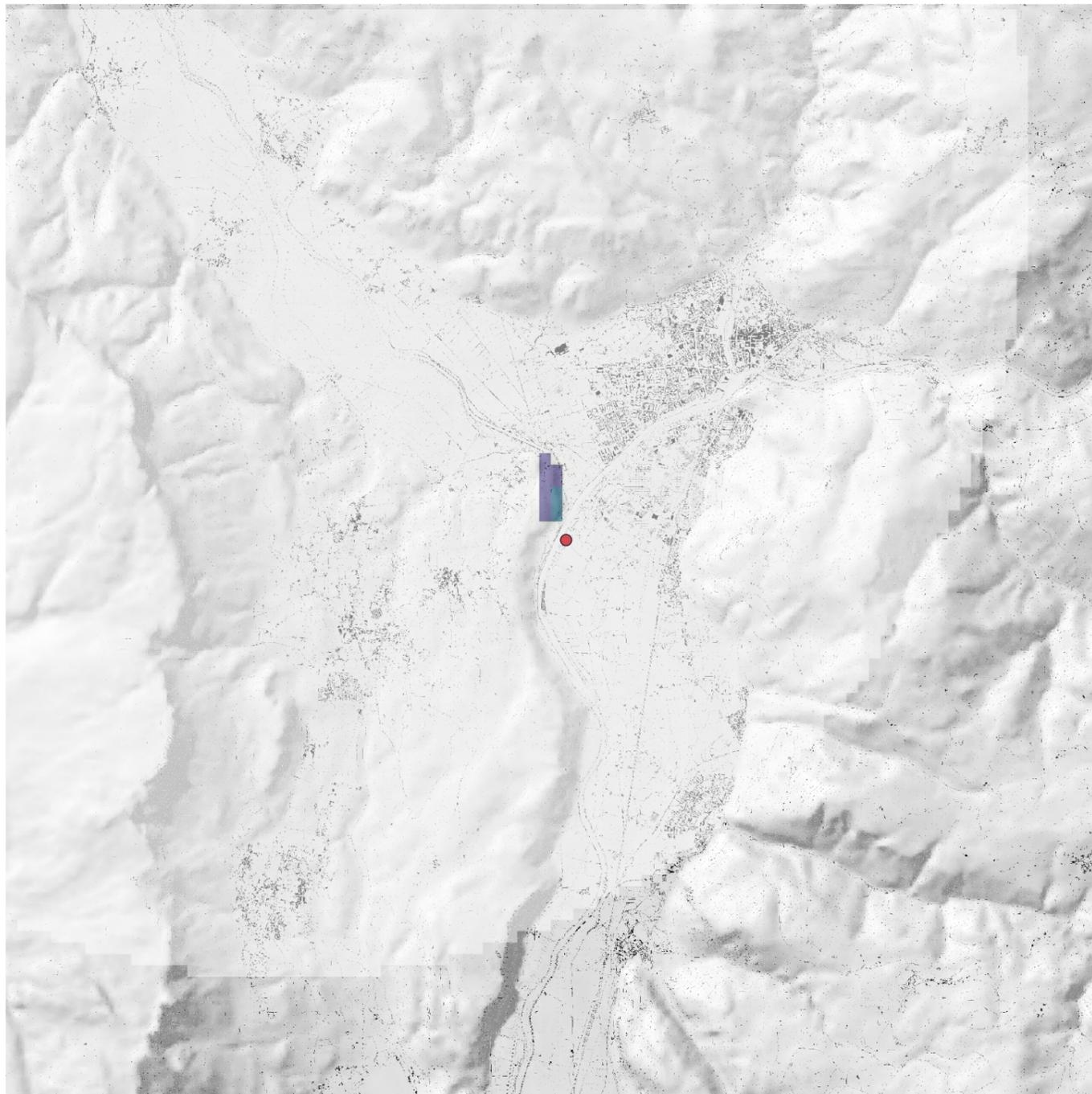




Emissione PTS a camino 01/12/2016 - h 03
Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

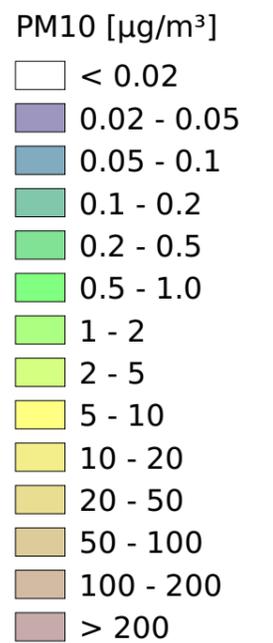
Concentrazione PM10 nel punto di massimo
Normale = 0.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 213.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

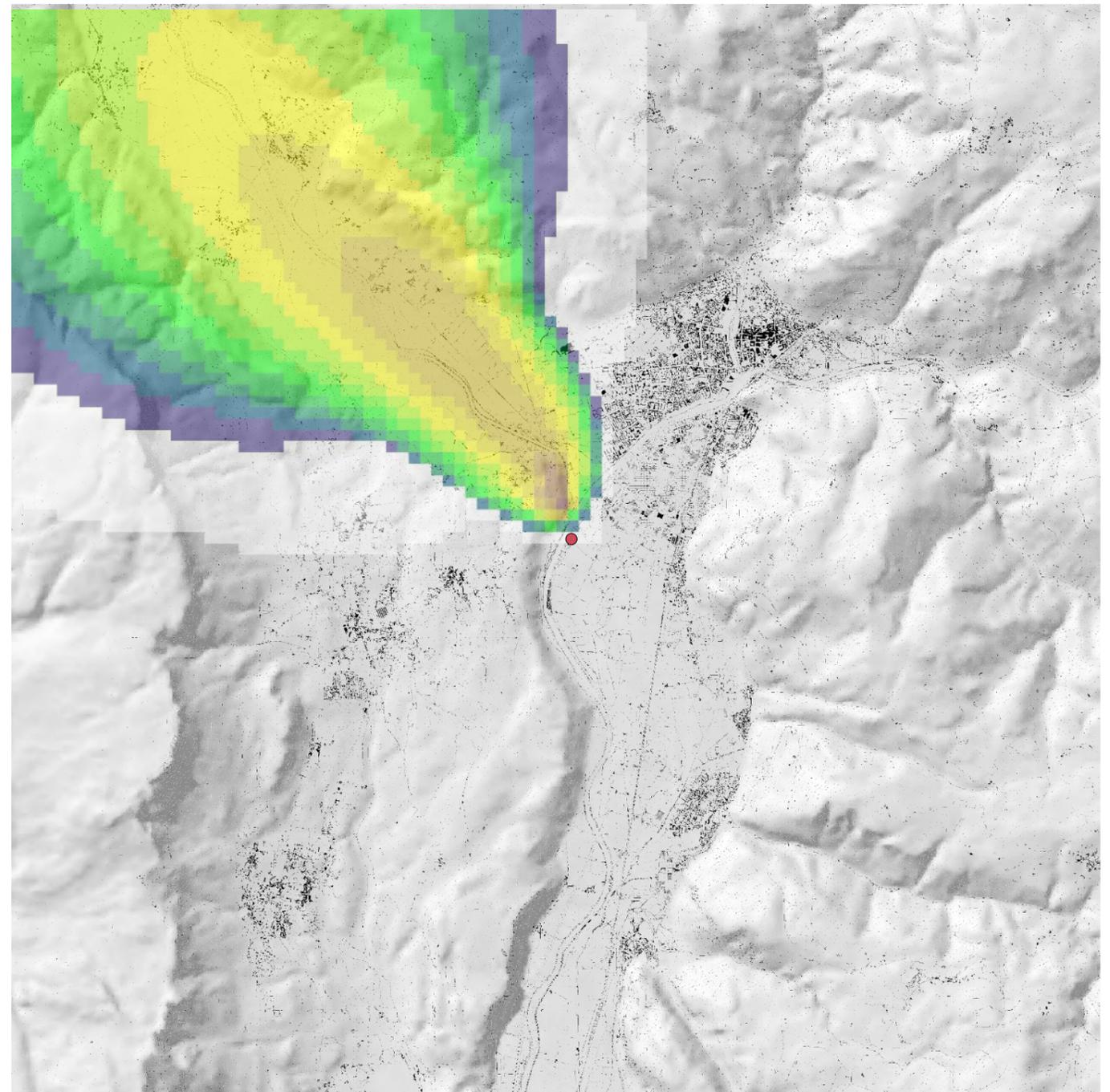
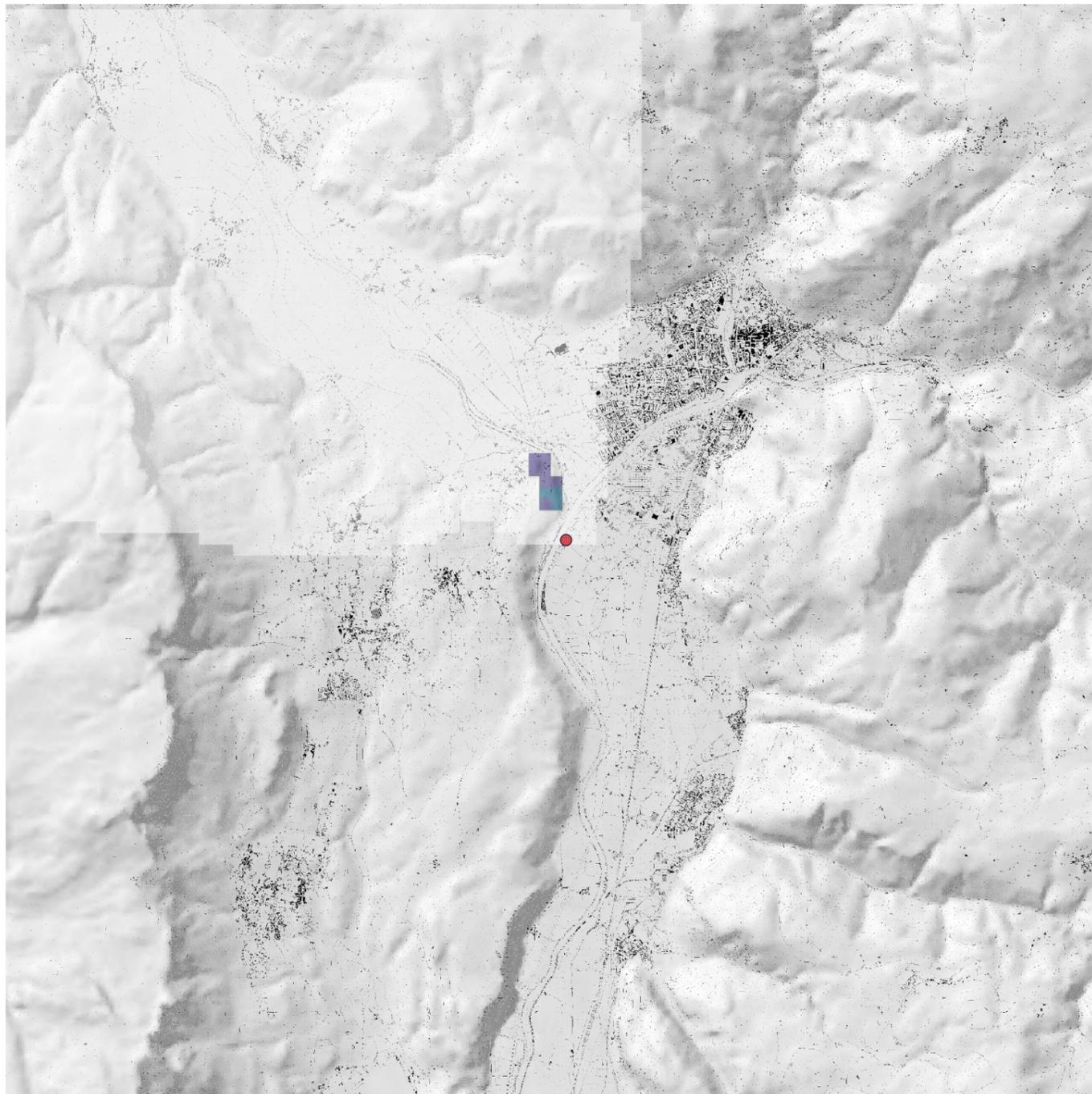




Emissione PTS a camino 01/12/2016 - h 04
Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

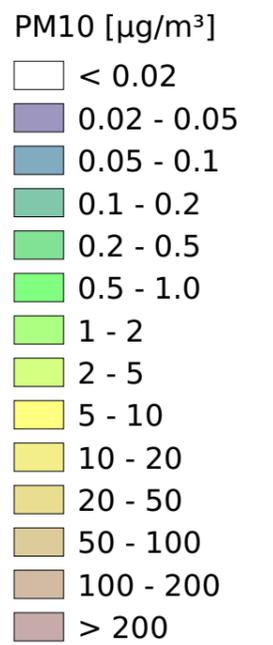
Concentrazione PM10 nel punto di massimo
Normale = 0.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 297.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

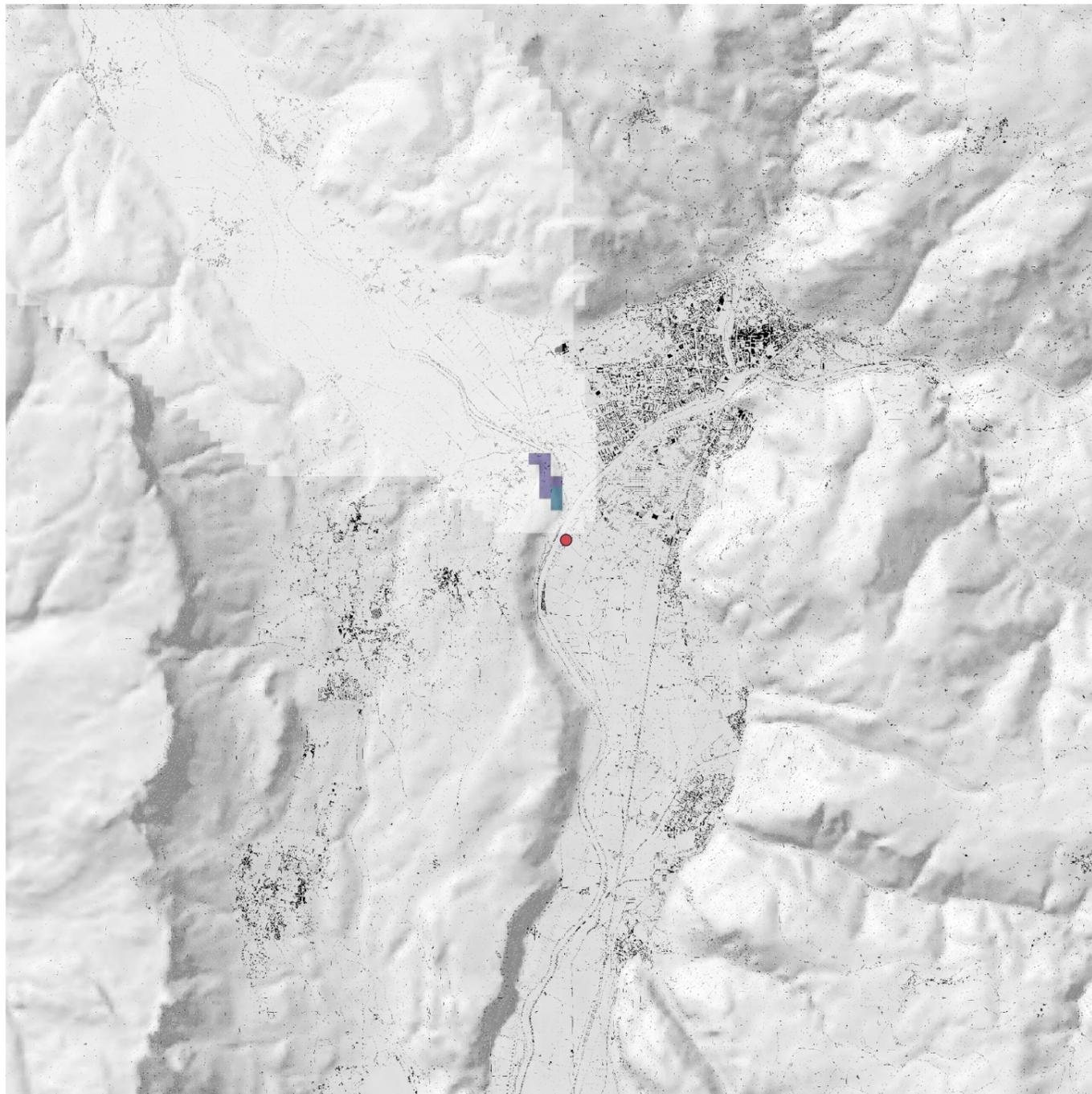




Emissione PTS a camino 01/12/2016 - h 05
Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

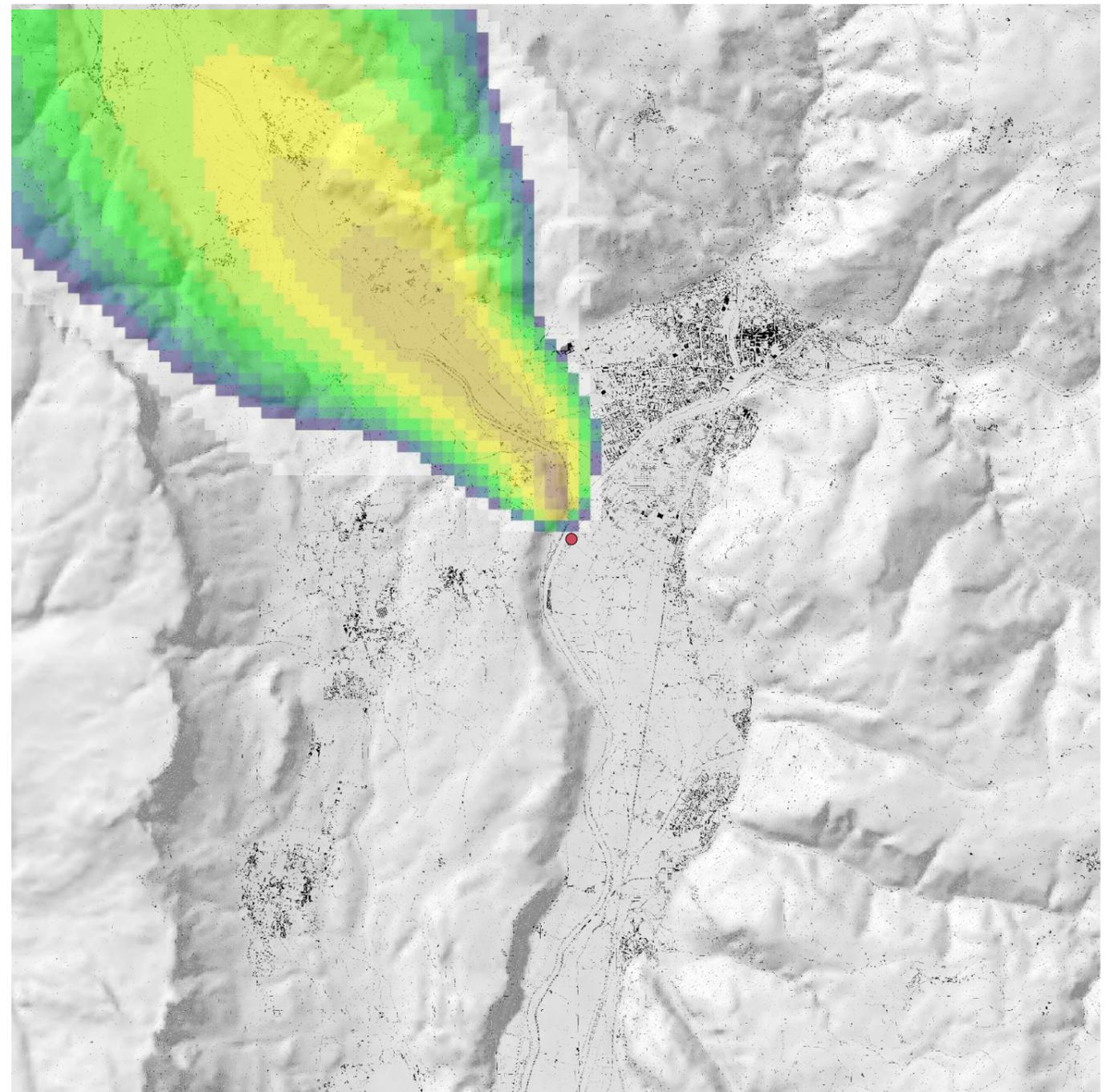
Concentrazione PM10 nel punto di massimo
Normale = 0.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 204.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



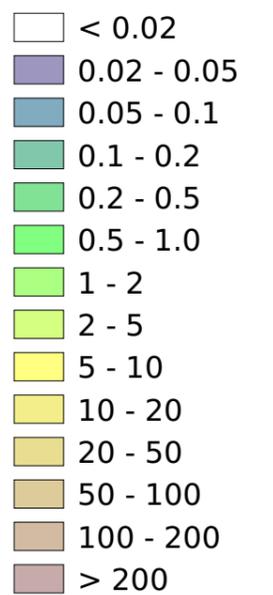


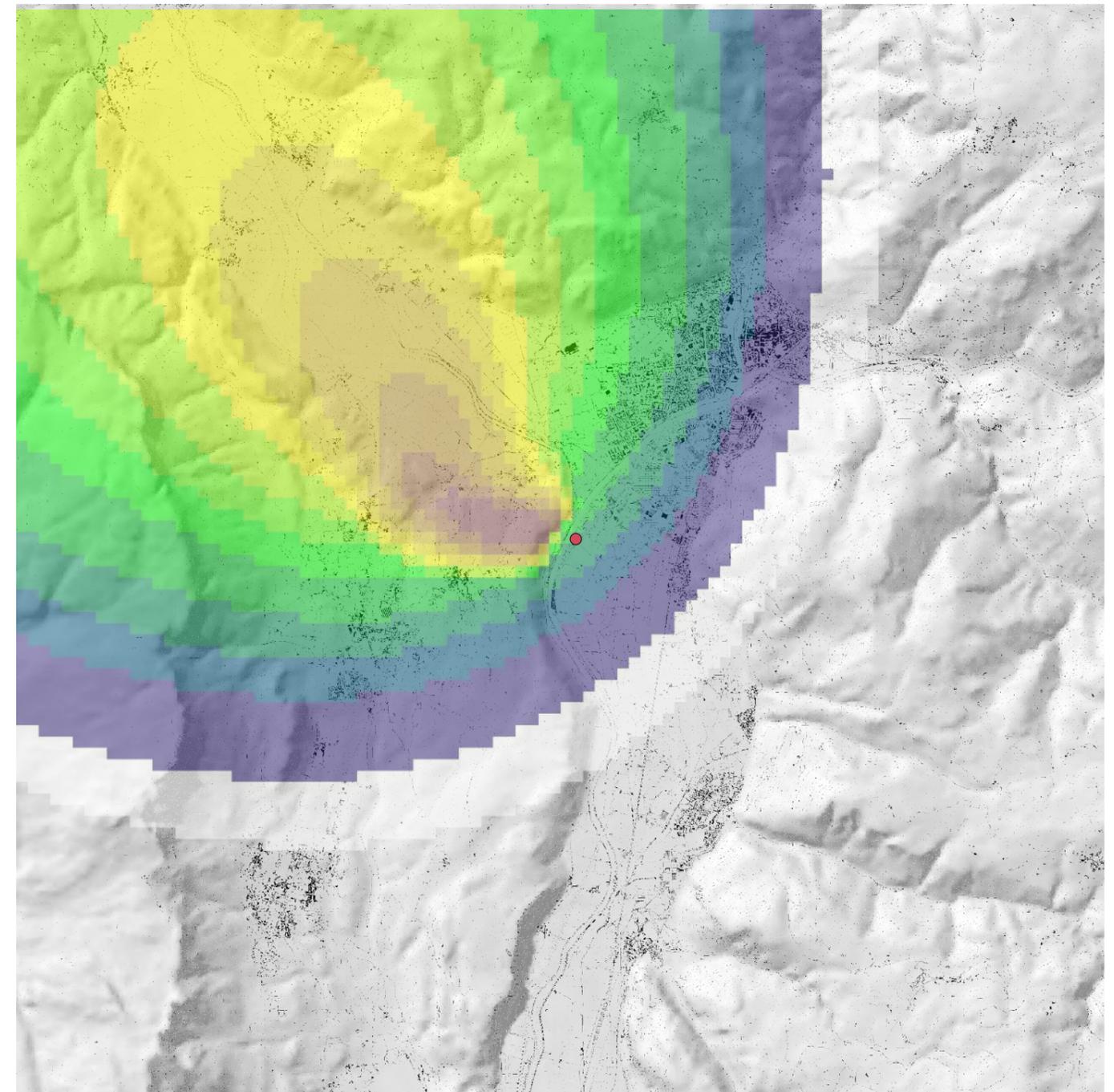
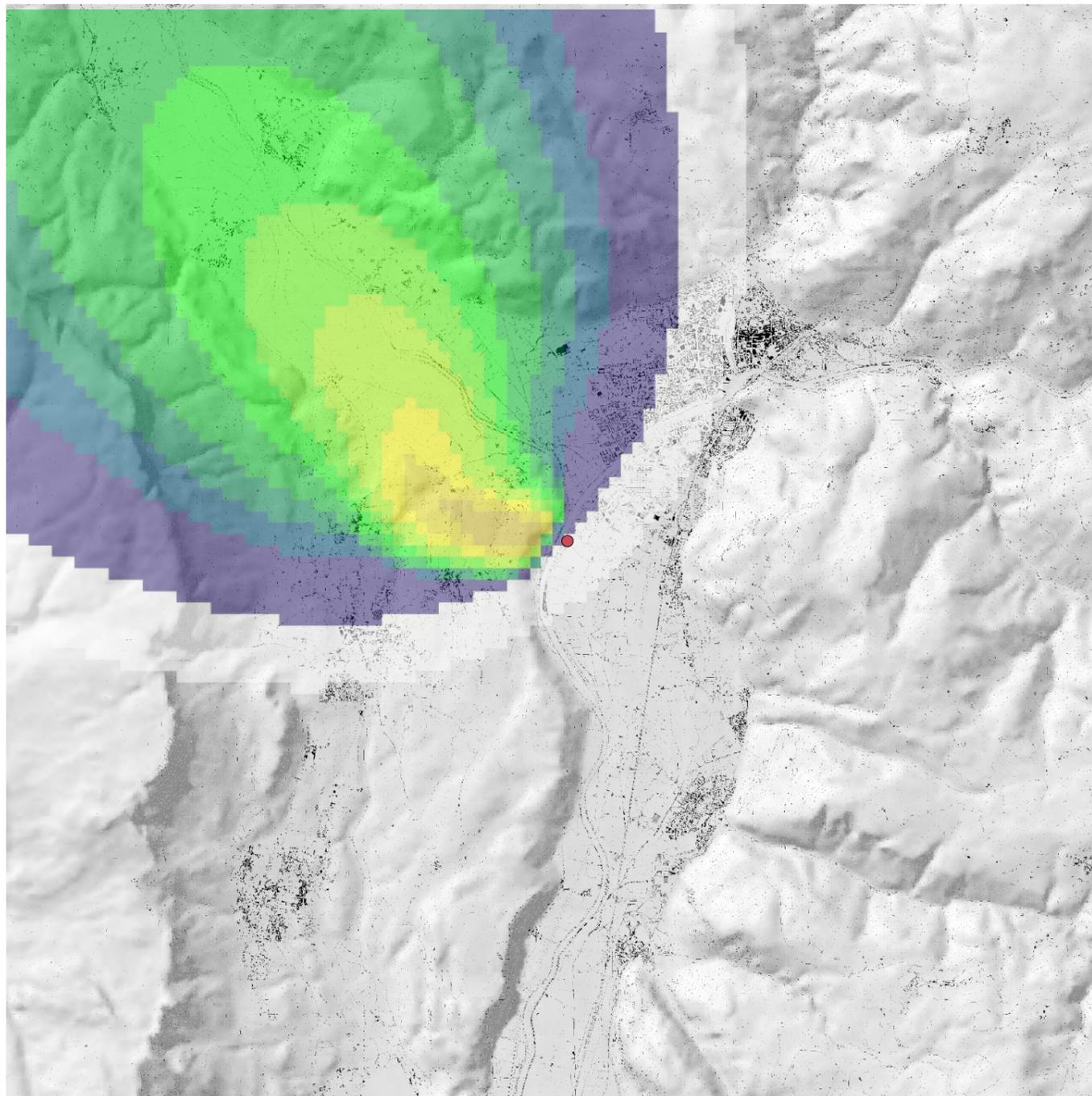
Emissione PTS a camino 01/12/2016 - h 06
Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

Concentrazione PM10 nel punto di massimo
Normale = 0.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 182.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



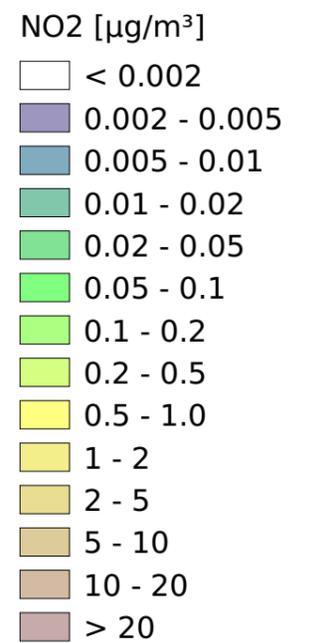
PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

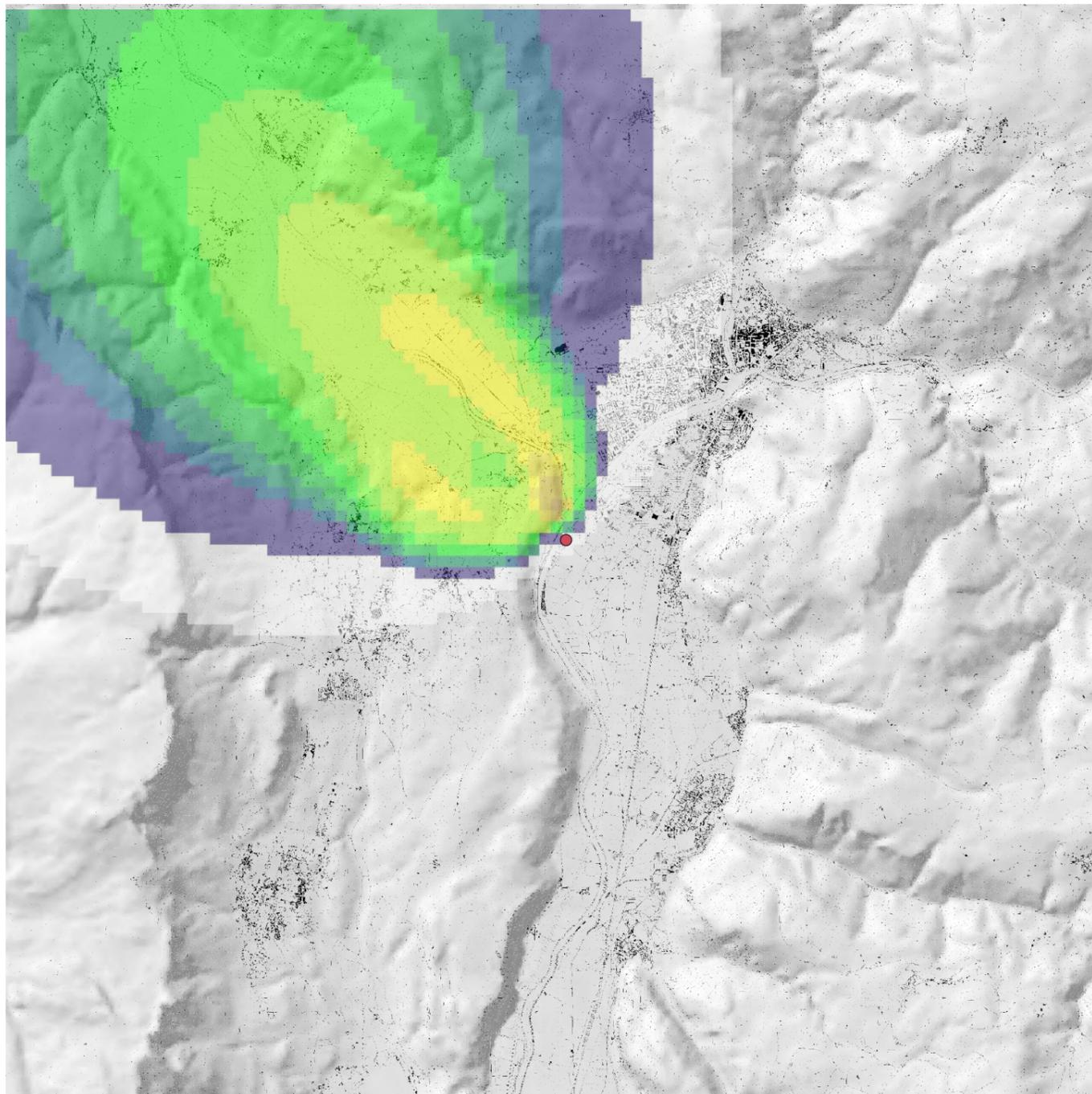




Emissione NOx a camino 01/12/2016 - h 03
 Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

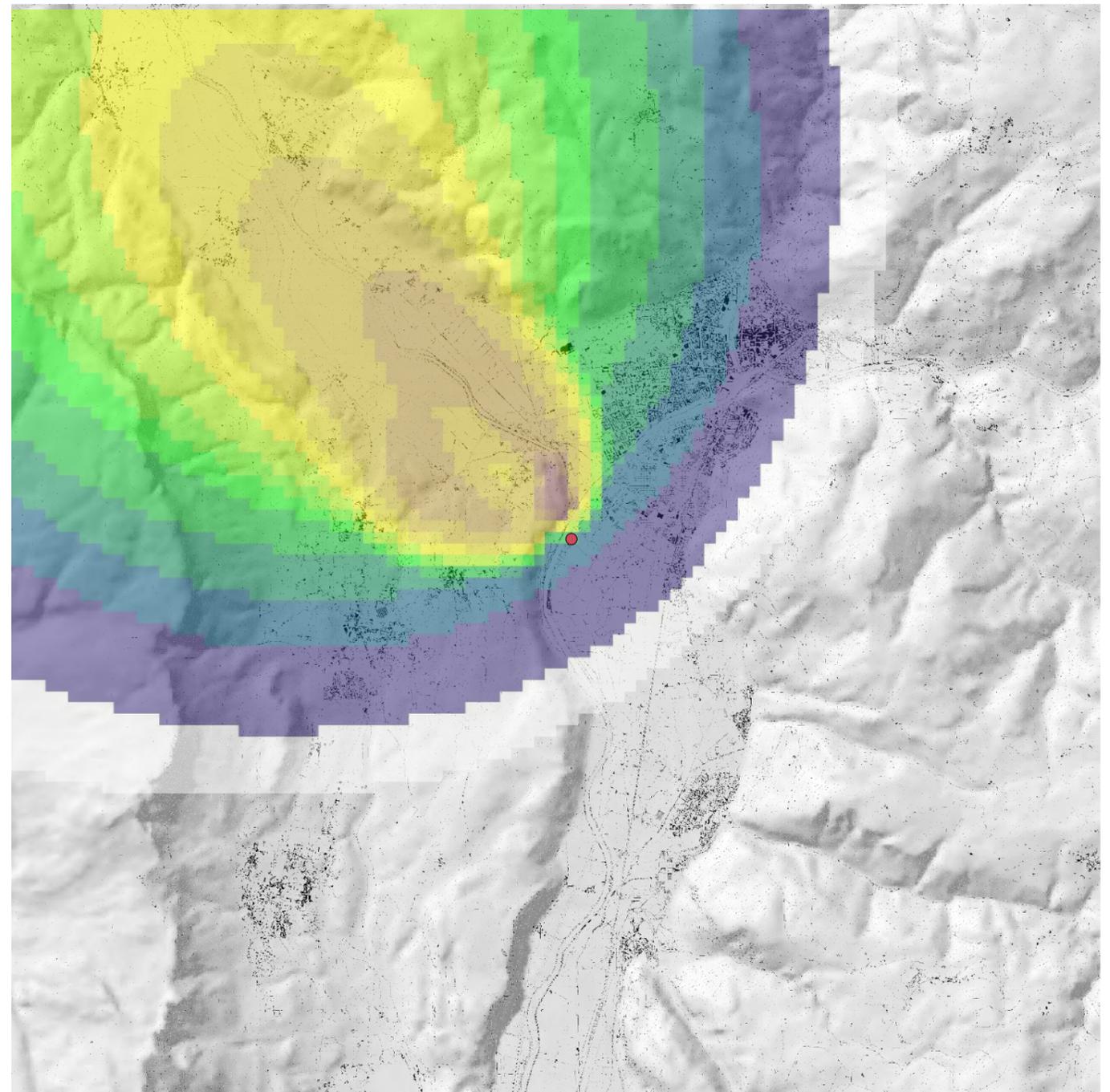
Concentrazione NO2 nel punto di massimo
 Normale = 4.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 40.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



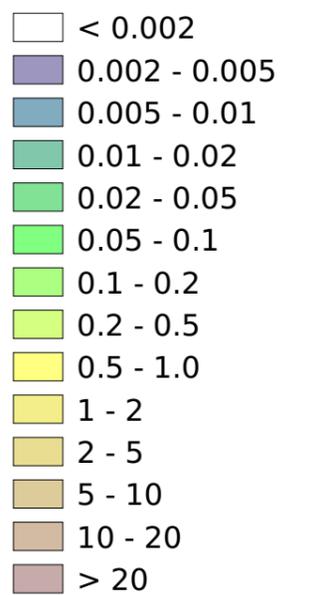


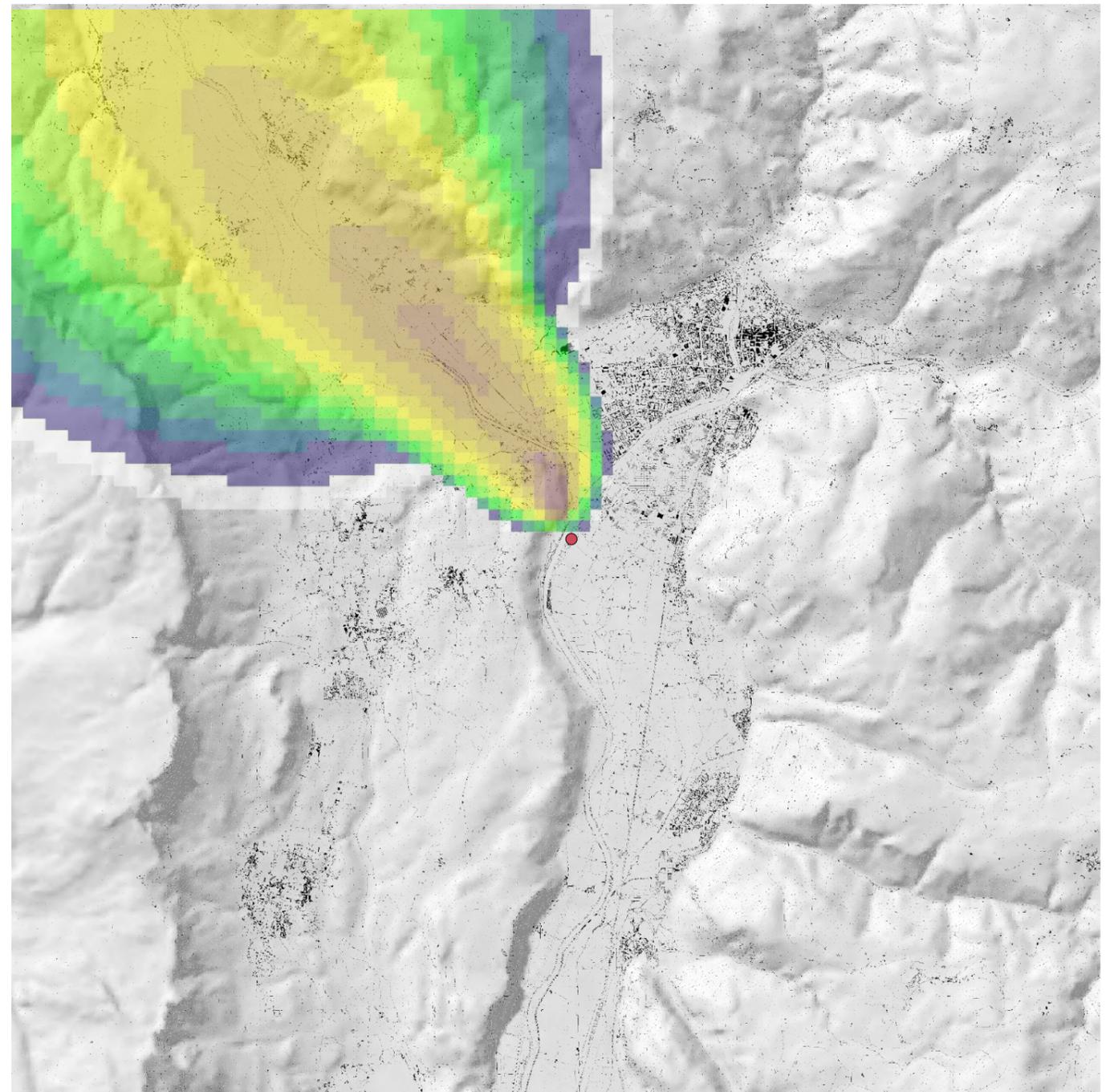
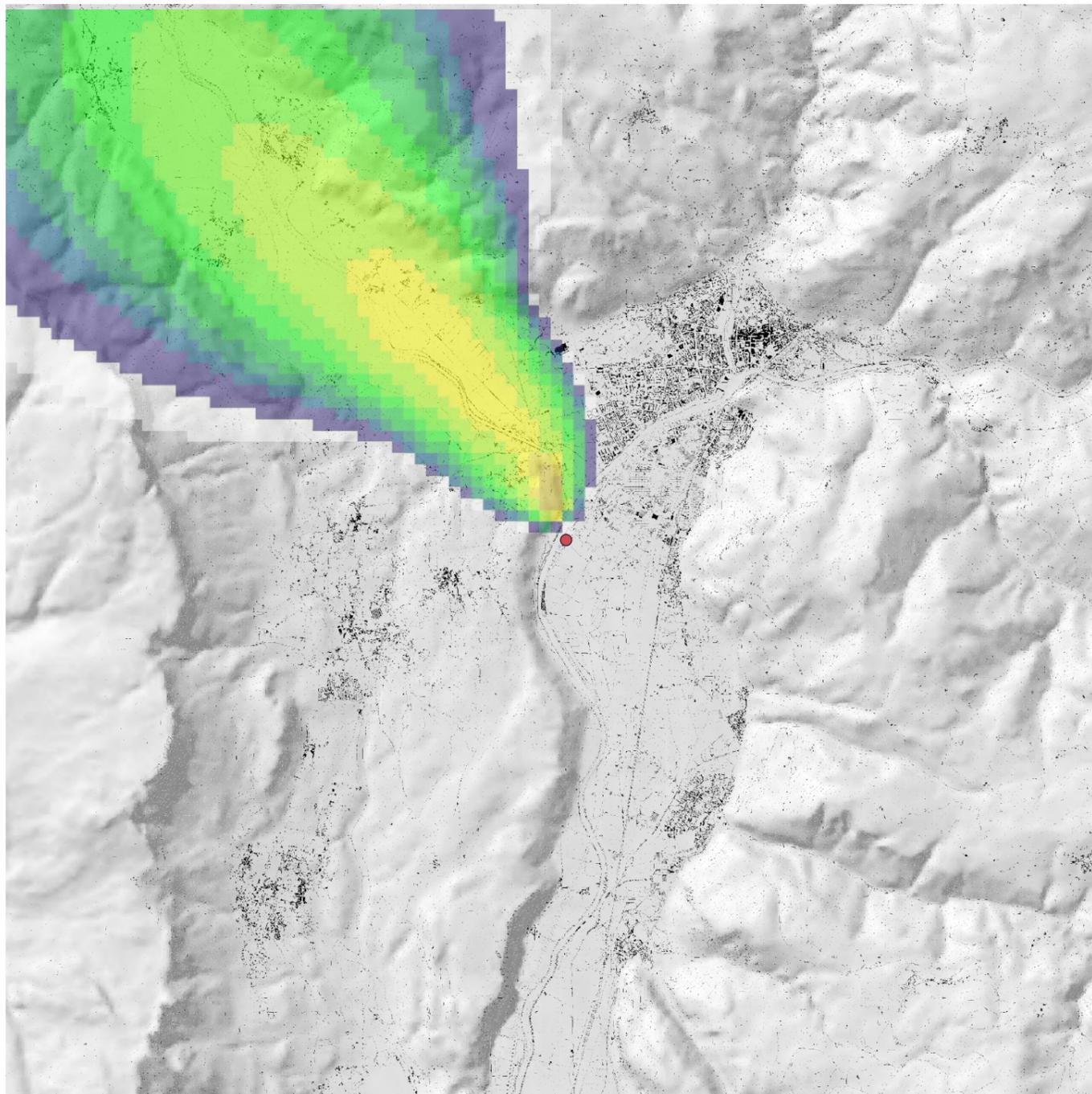
Emissione NOx a camino 01/12/2016 - h 04
 Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

Concentrazione NO2 nel punto di massimo
 Normale = 6.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 50.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



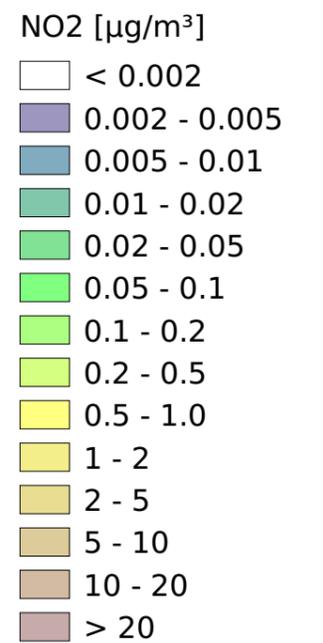
NO2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

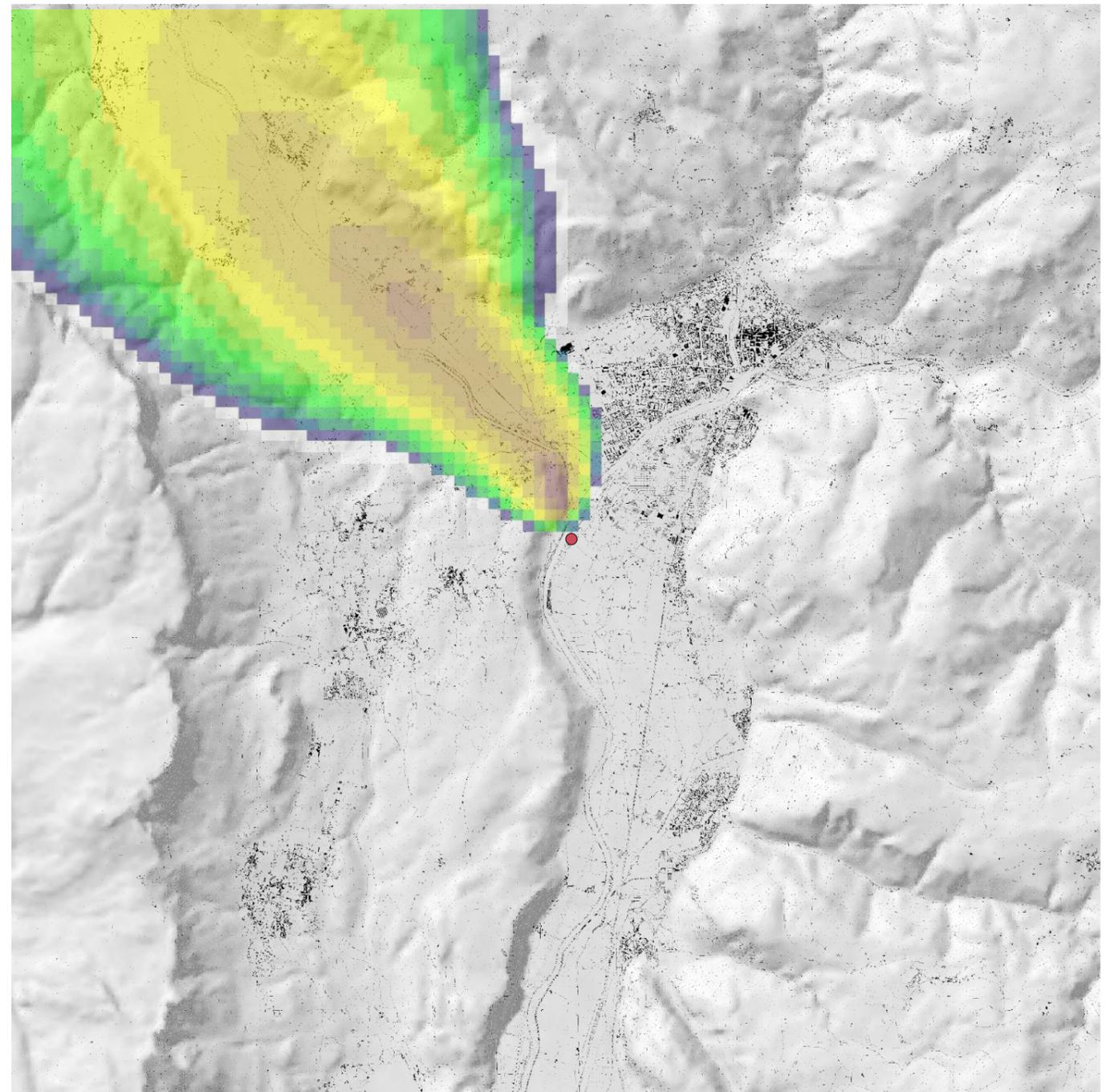
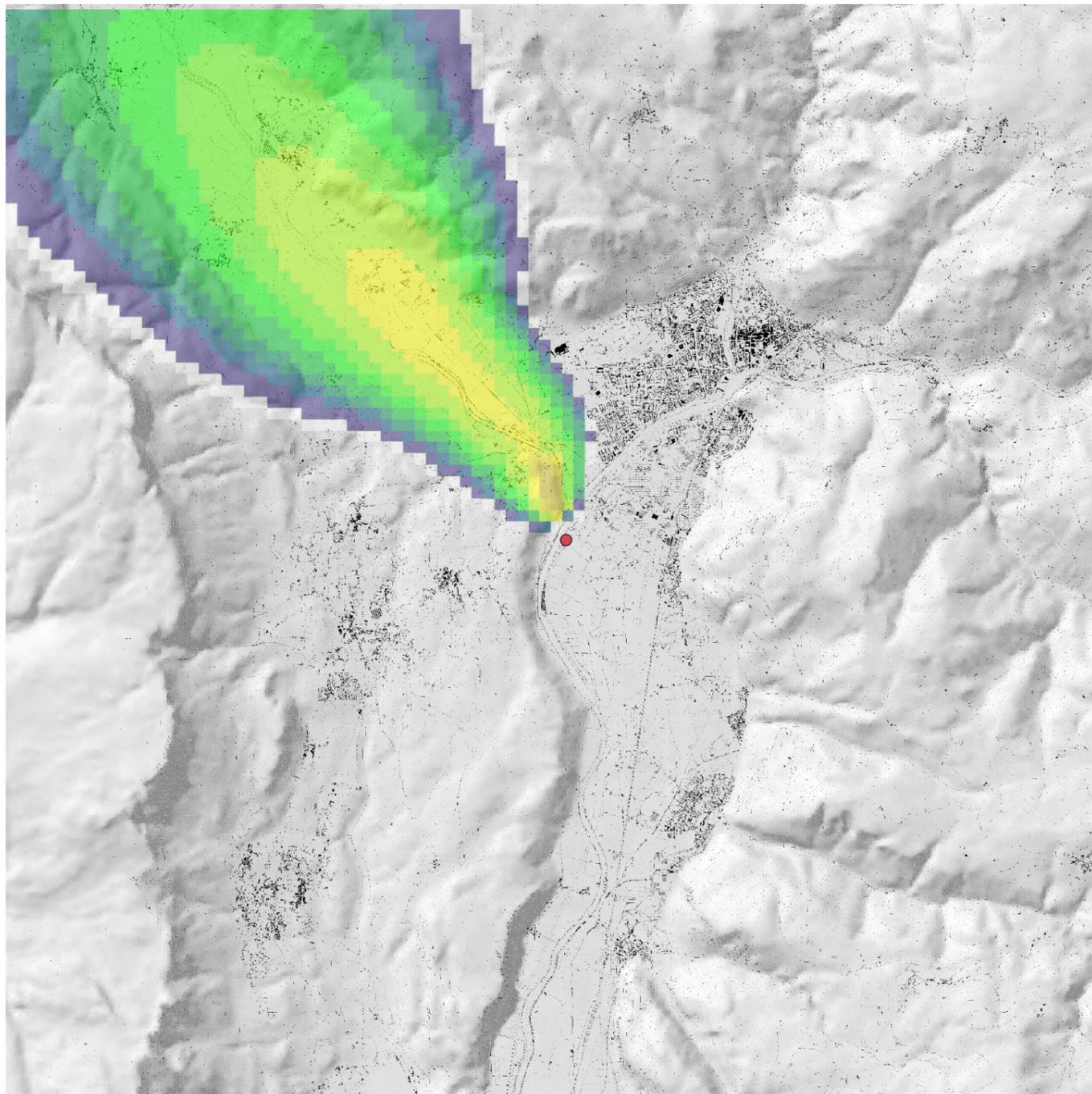




Emissione NOx a camino 01/12/2016 - h 05
 Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

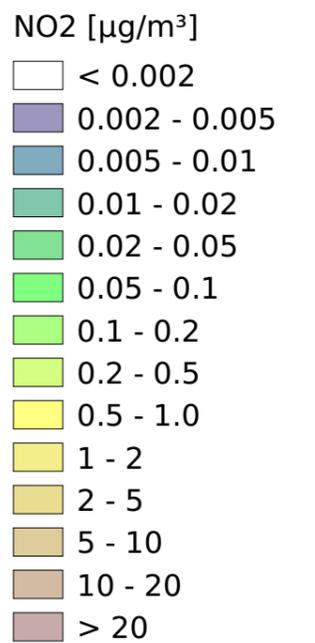
Concentrazione NO2 nel punto di massimo
 Normale = 4.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 39.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

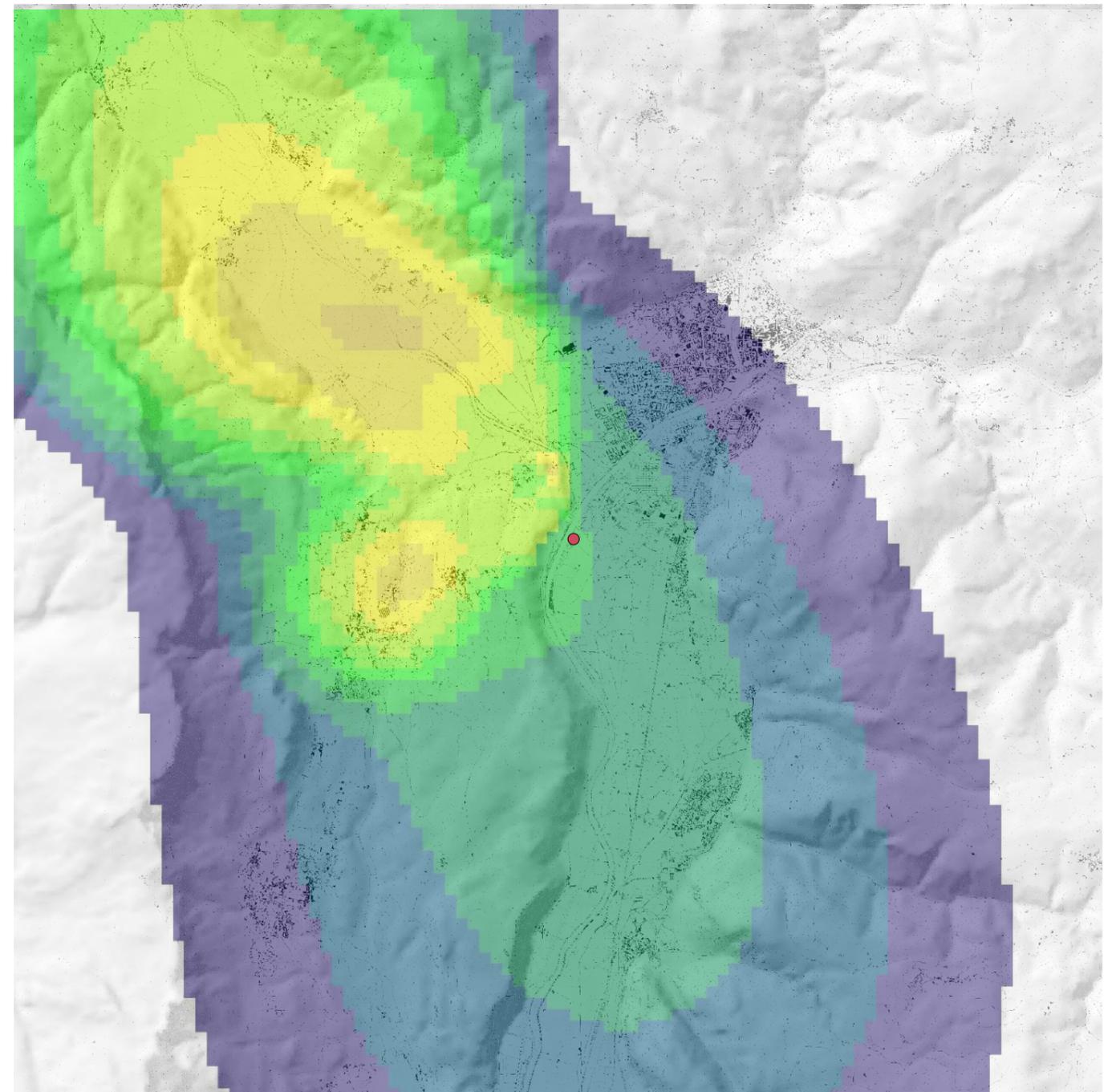
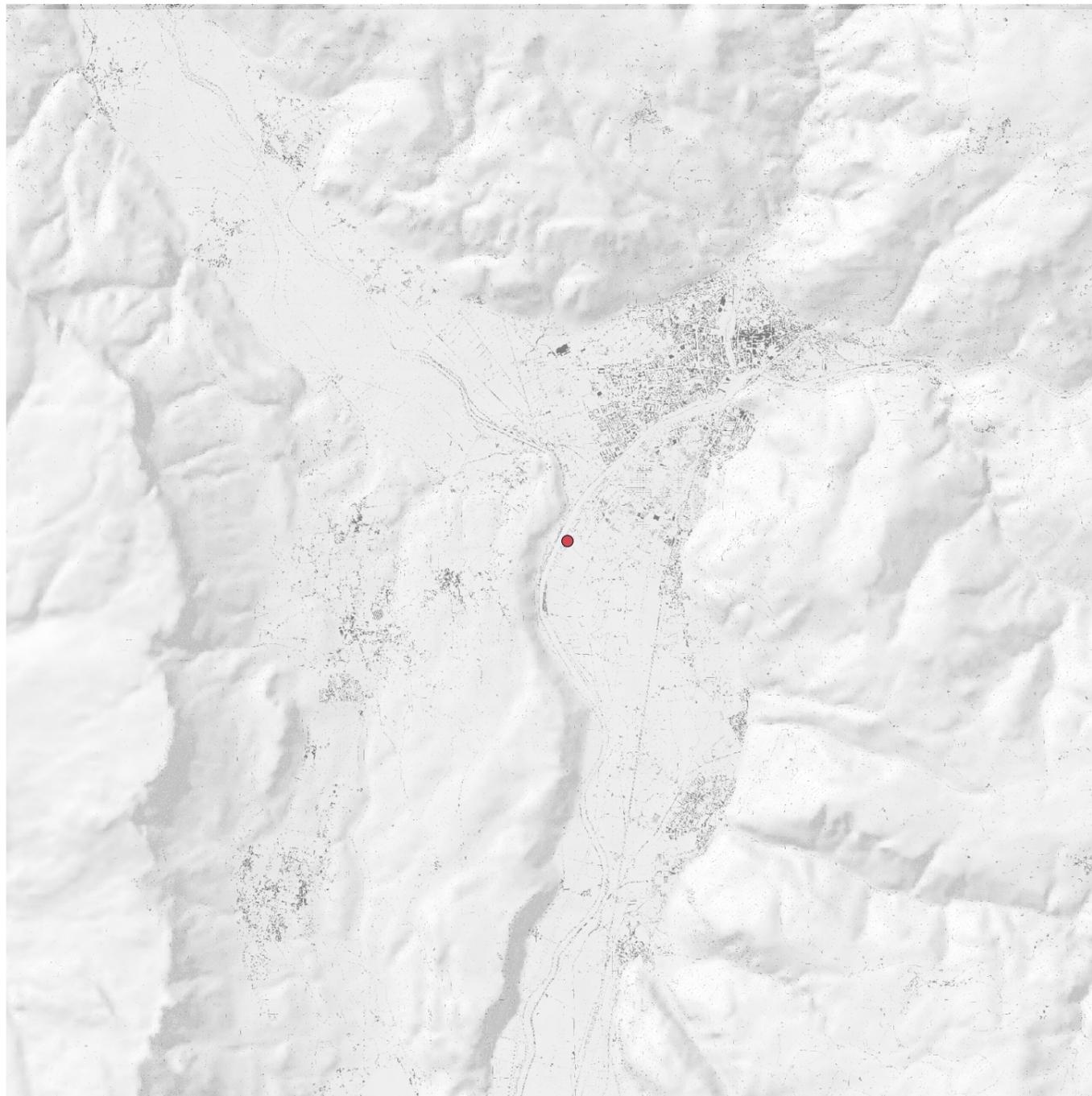




Emissione NOx a camino 01/12/2016 - h 06
 Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

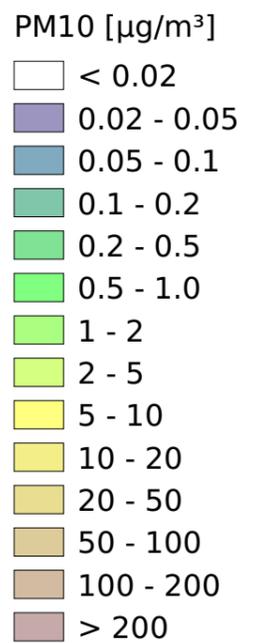
Concentrazione NO2 nel punto di massimo
 Normale = 3.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 36.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

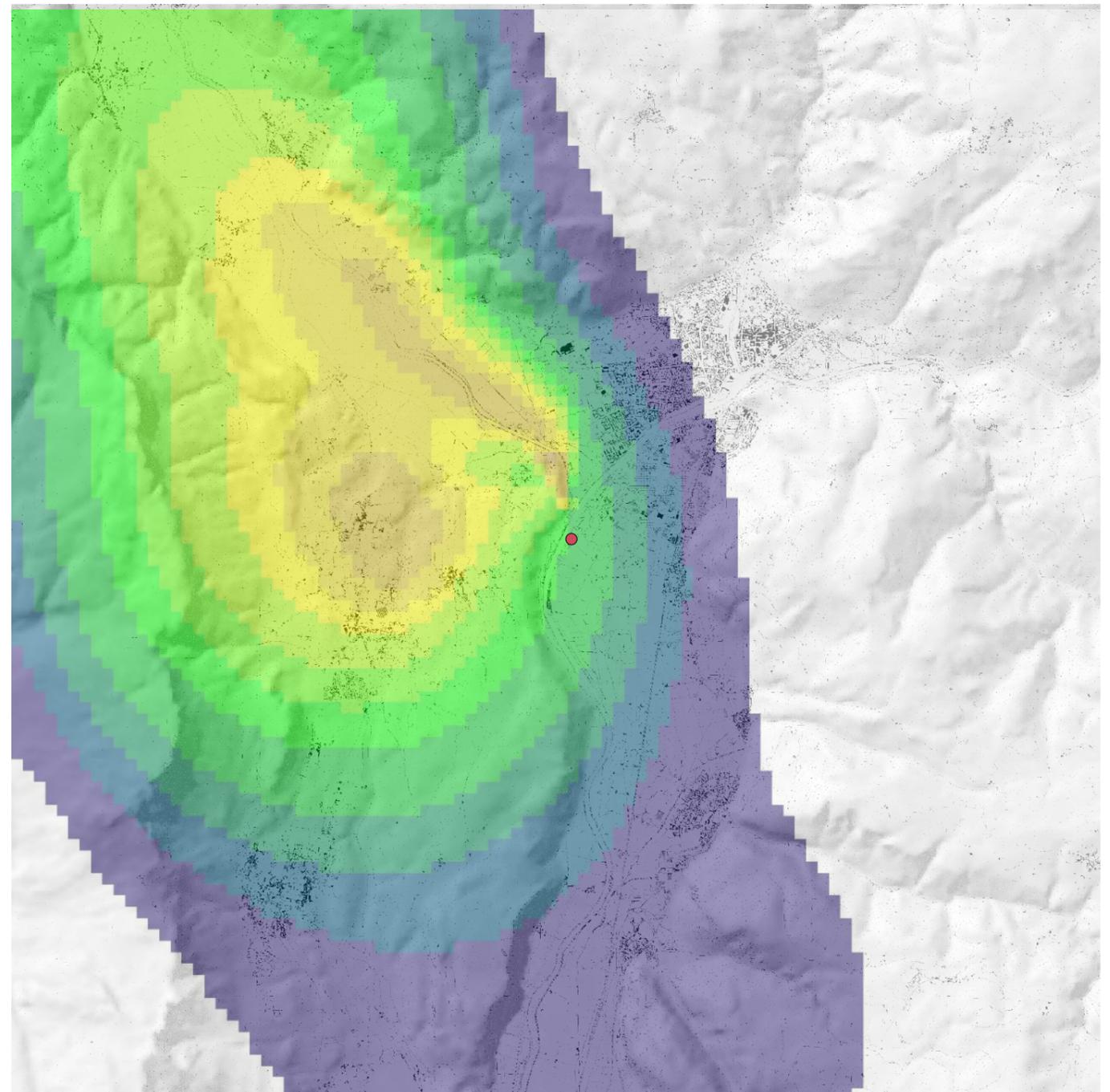
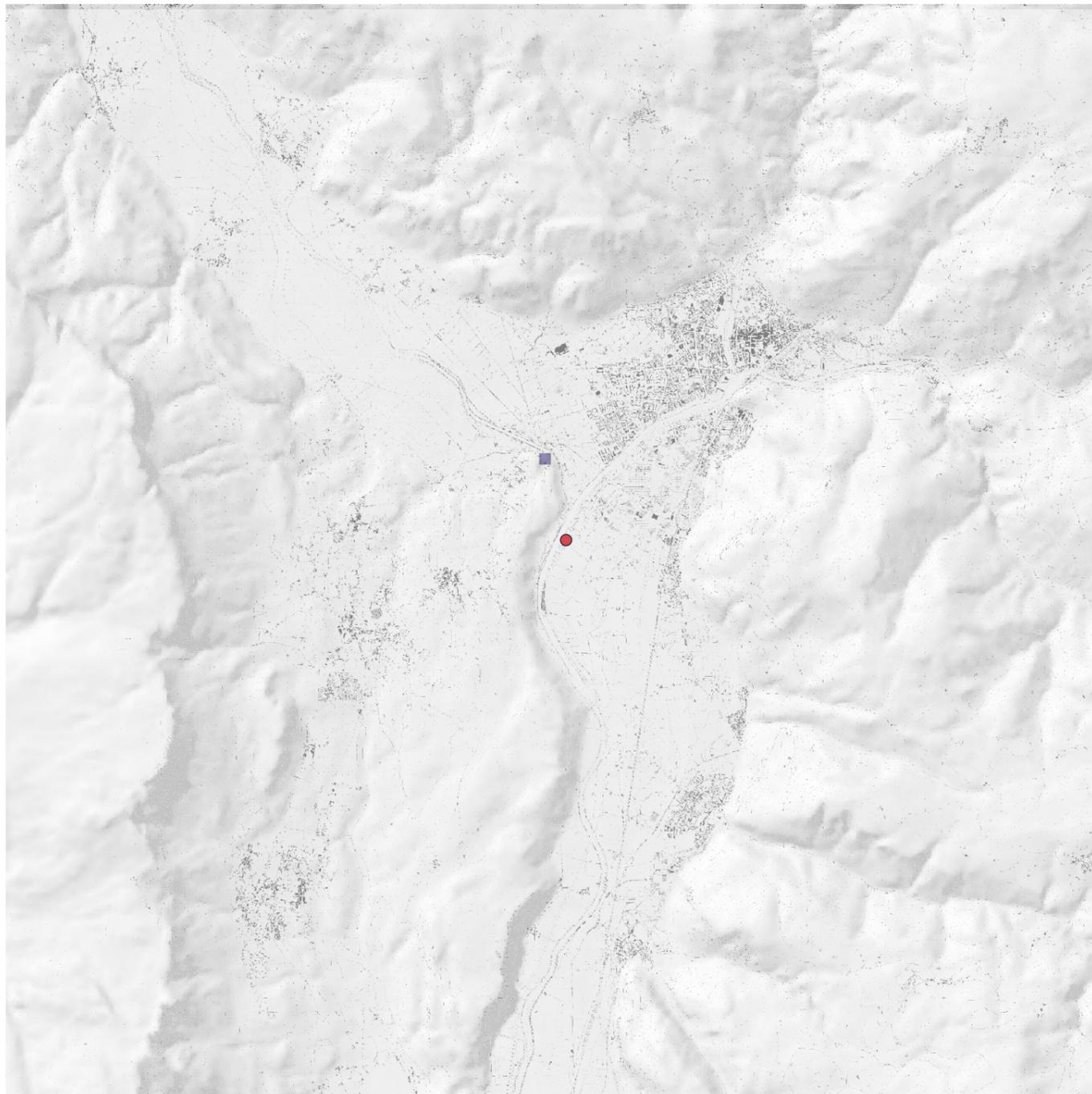




Emissione PTS a camino 11/02/2016 - h 06
Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

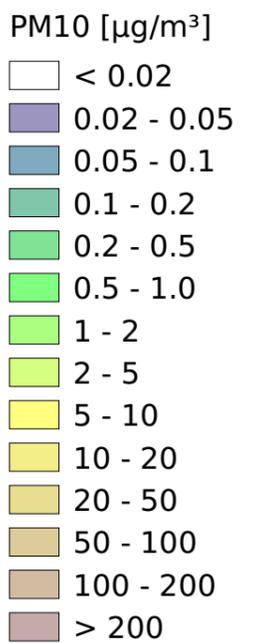
Concentrazione PM10 nel punto di massimo
Normale = 0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 23.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

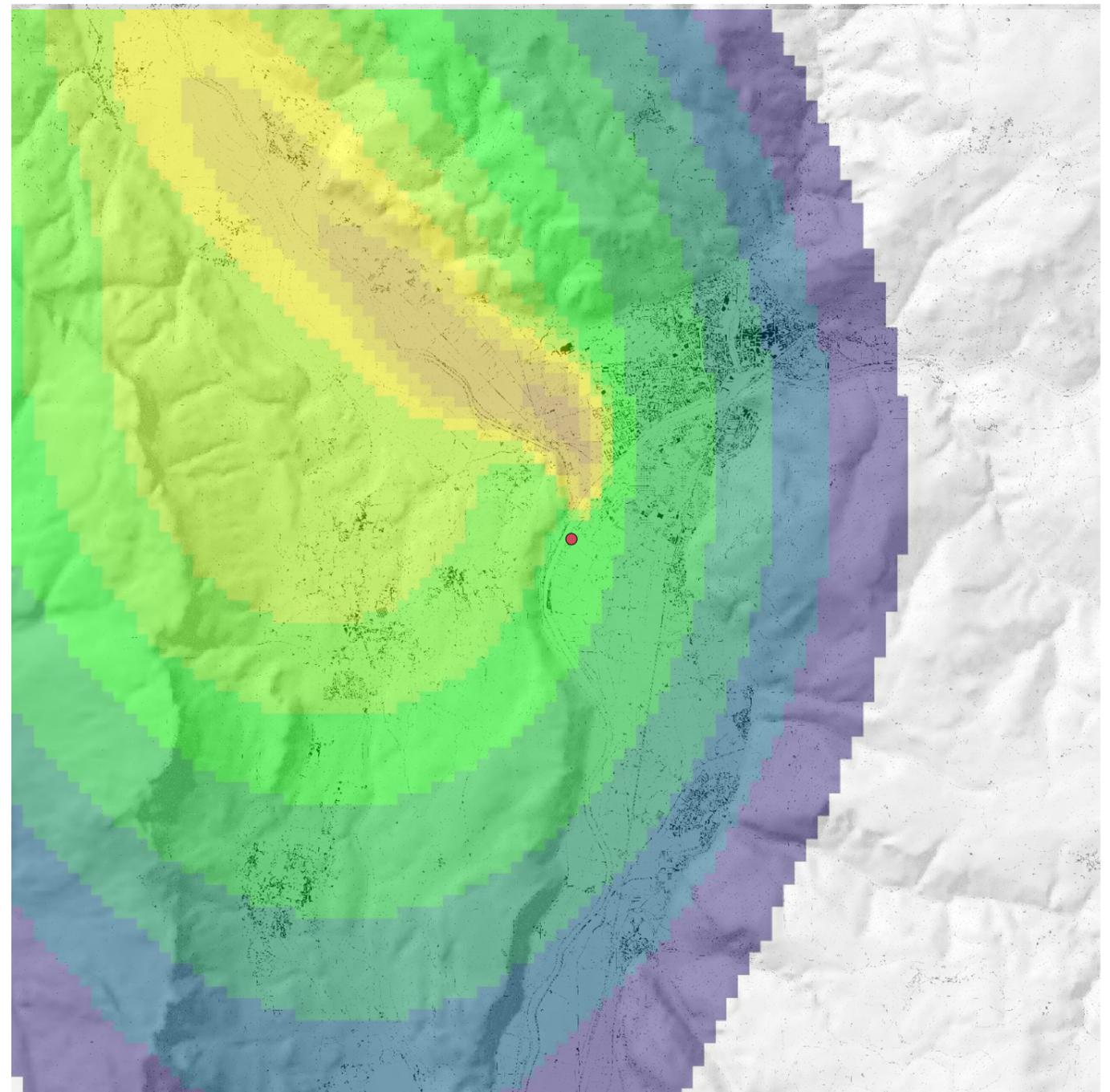
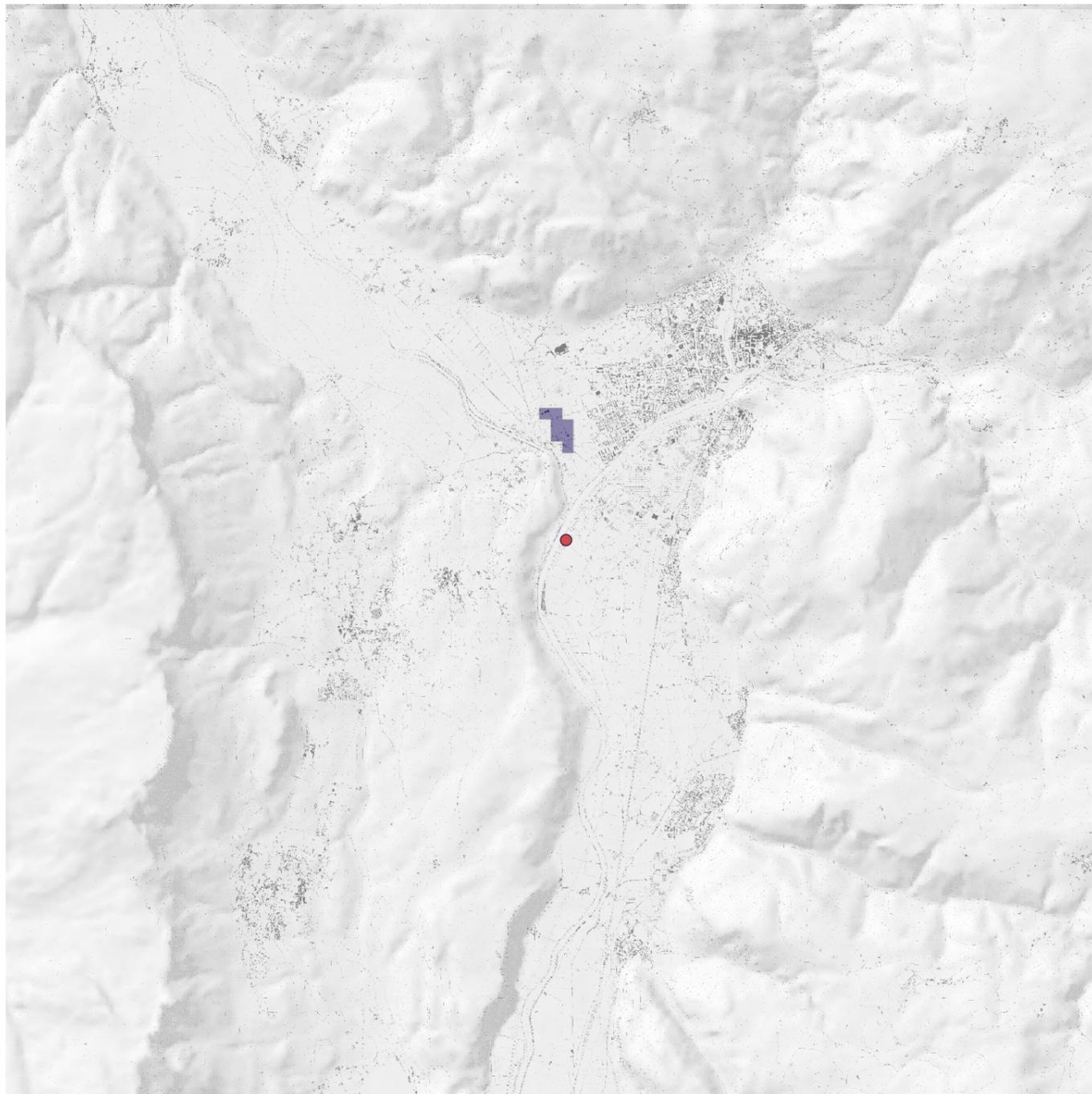




Emissione PTS a camino 11/02/2016 - h 07
Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

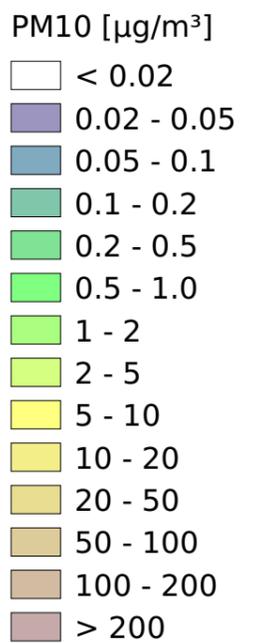
Concentrazione PM10 nel punto di massimo
Normale = 0.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 90.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

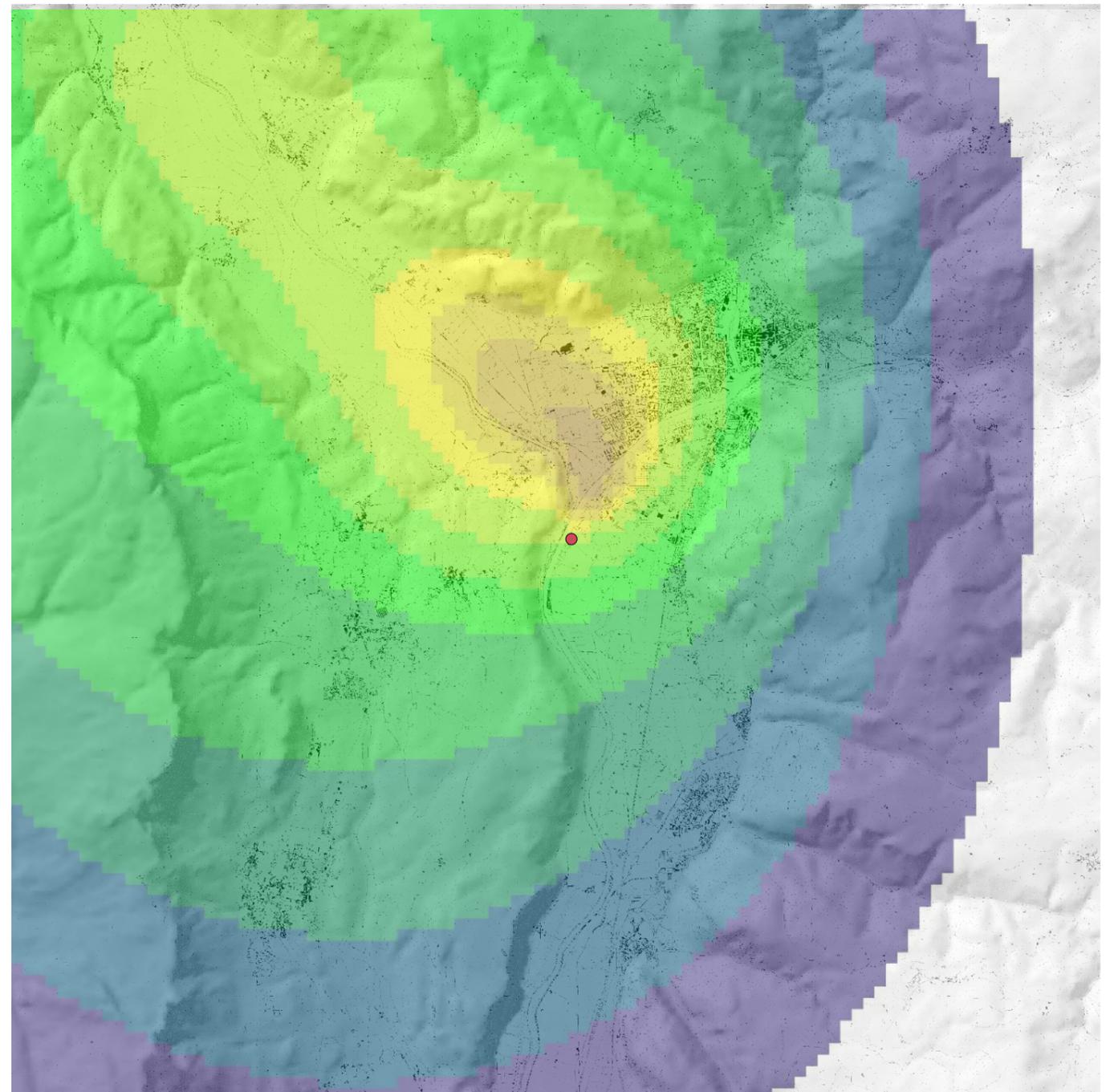
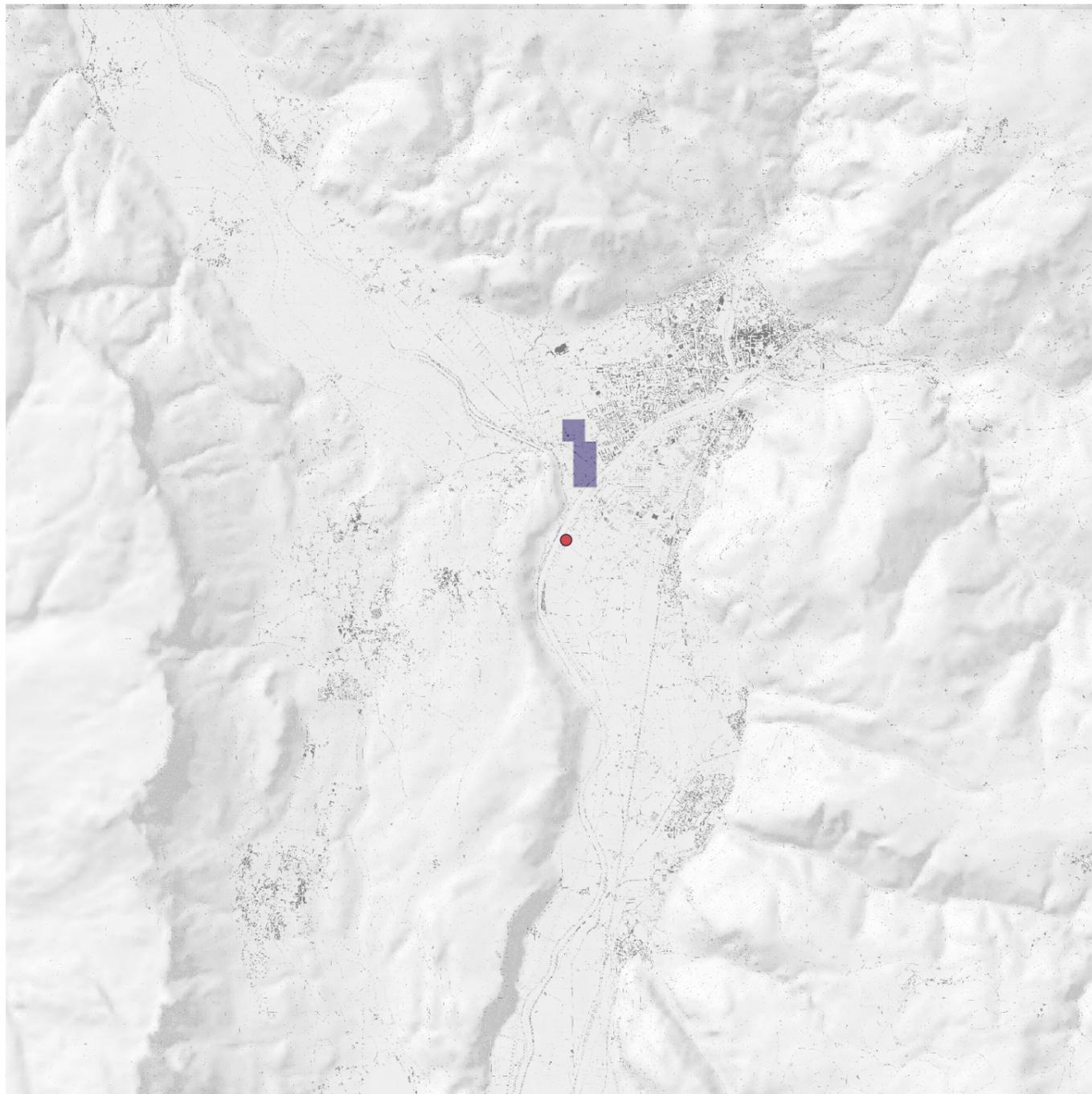




Emissione PTS a camino 11/02/2016 - h 08
Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

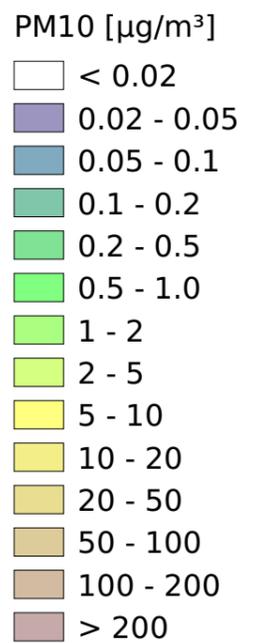
Concentrazione PM10 nel punto di massimo
Normale = 0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 76.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

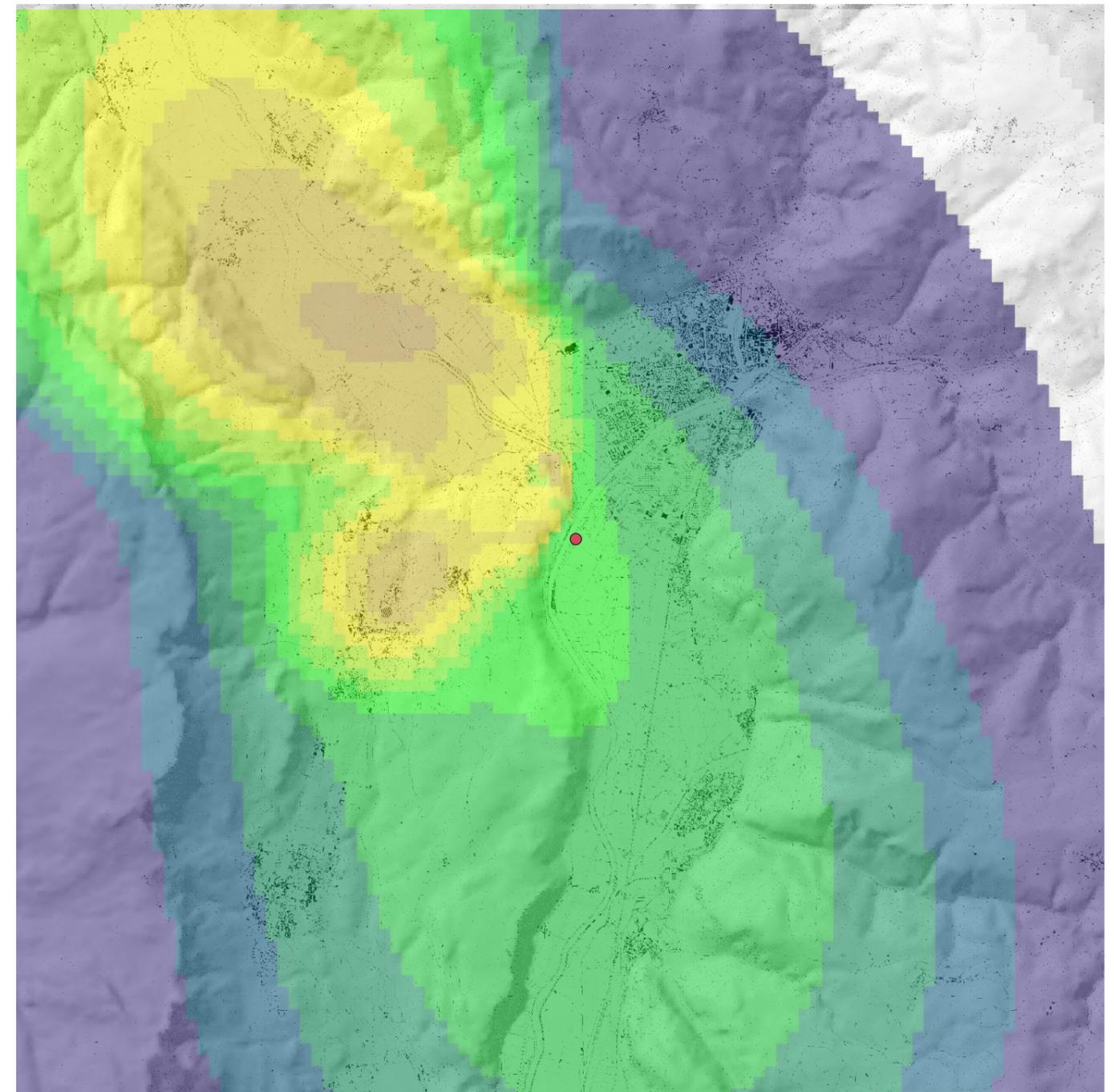
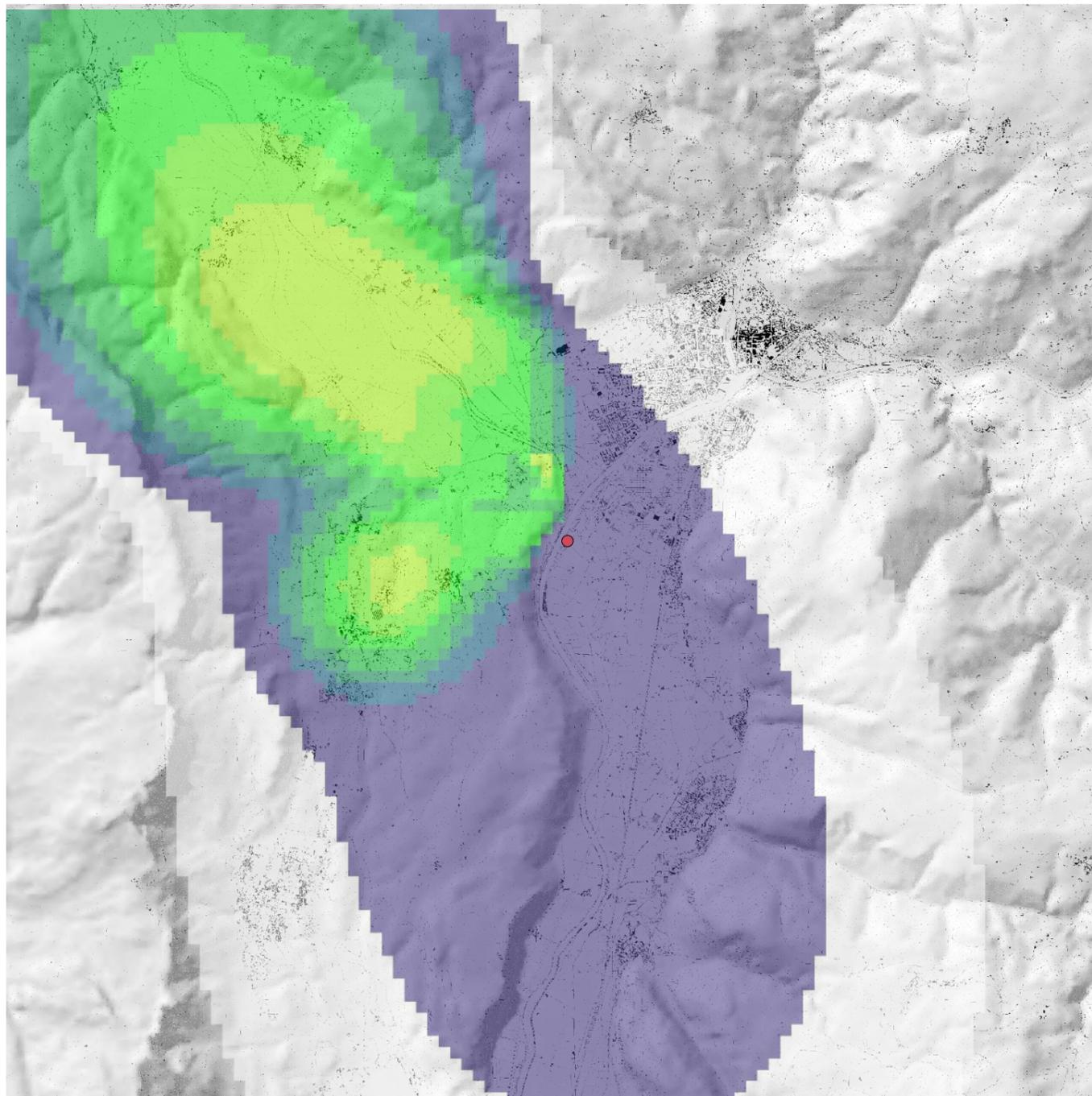




Emissione PTS a camino 11/02/2016 - h 09
Normale = 40 g/h, Incidente = 130000 g/h

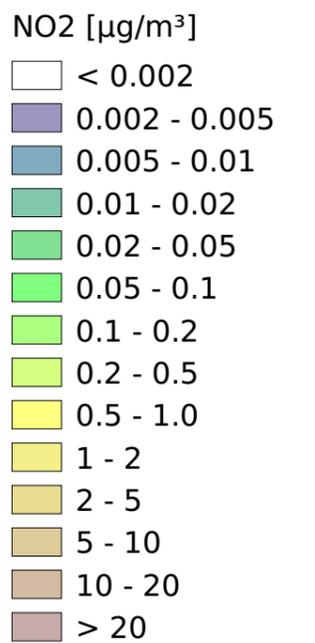
Concentrazione PM10 nel punto di massimo
Normale = 0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 74.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

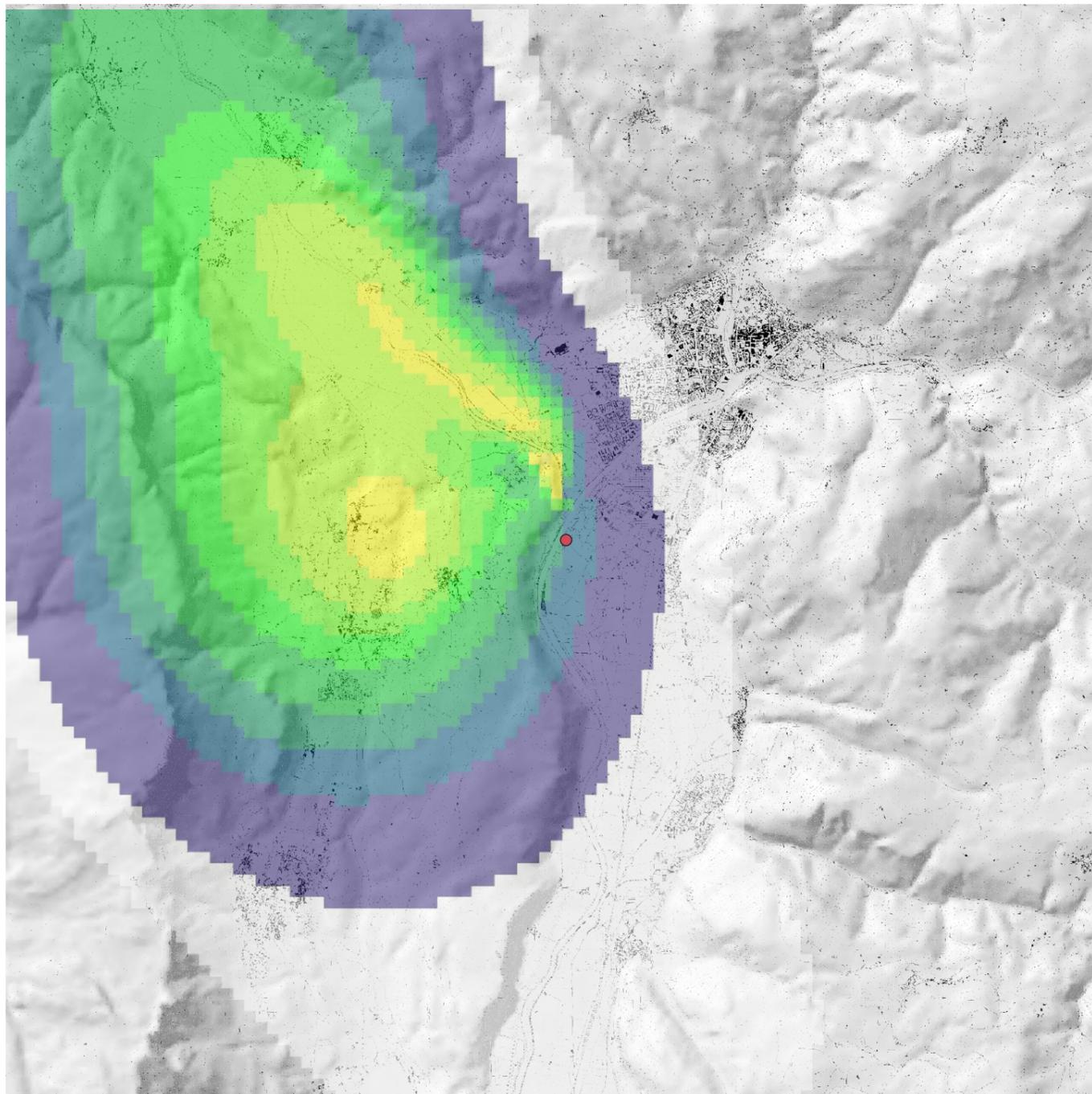




Emissione NOx a camino 11/02/2016 - h 06
 Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

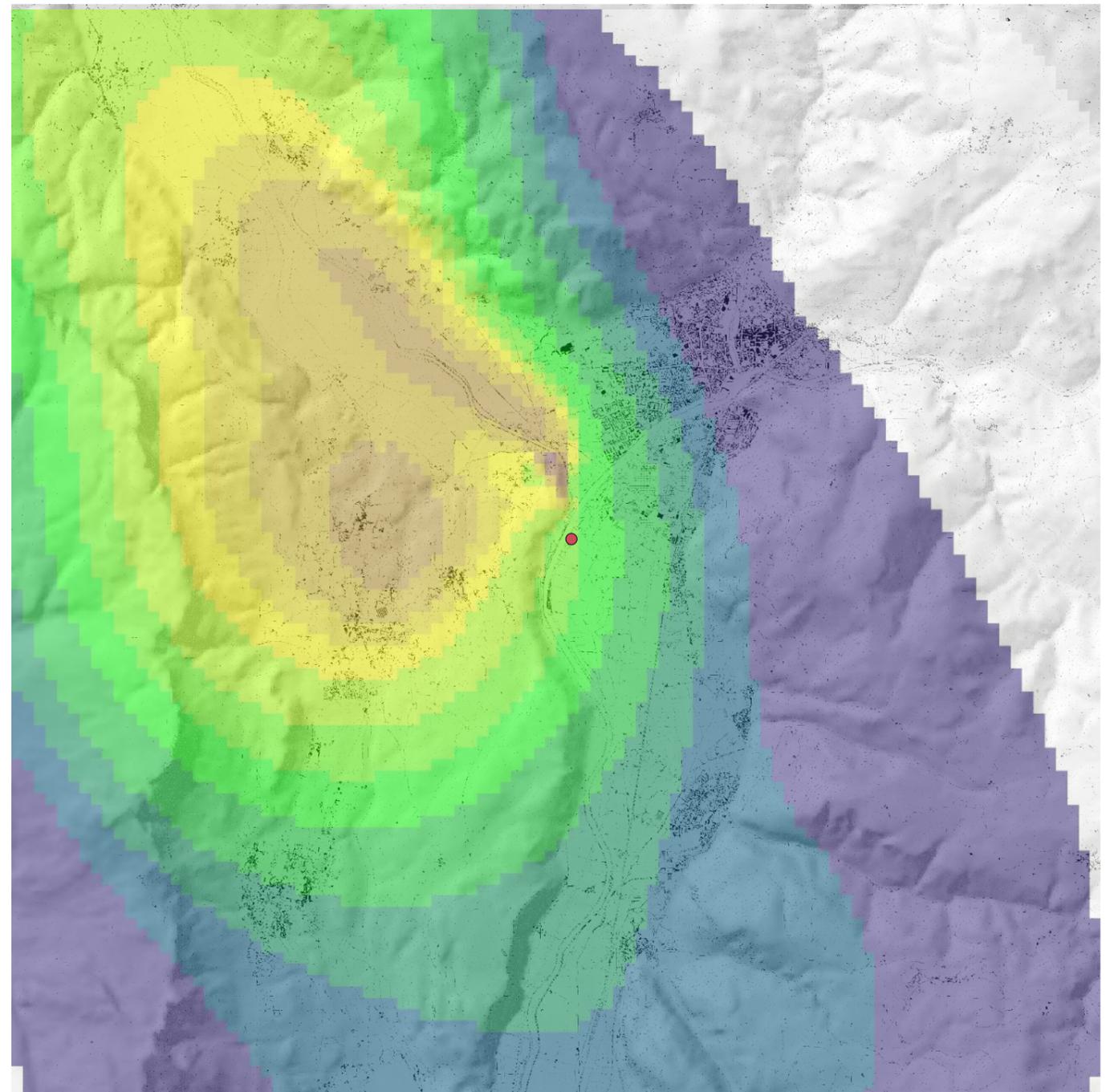
Concentrazione NO2 nel punto di massimo
 Normale = 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 6.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



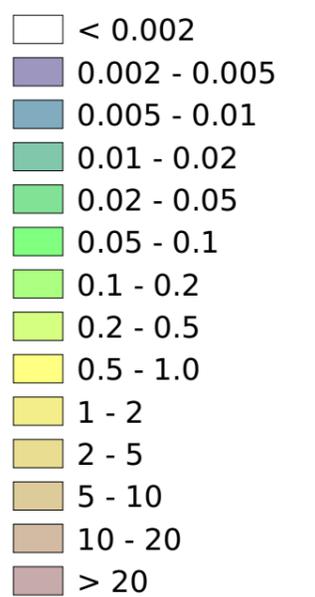


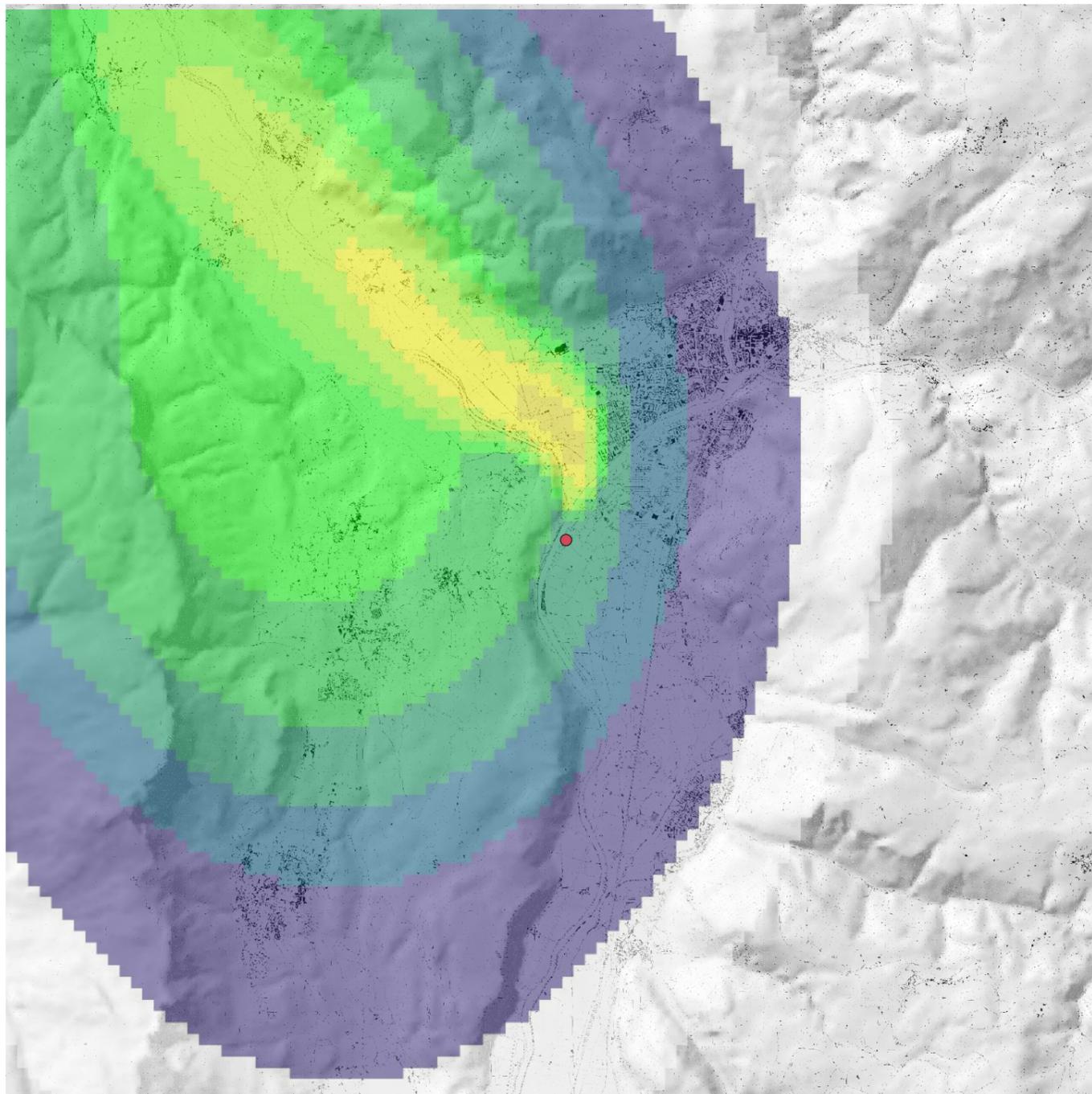
Emissione NOx a camino 11/02/2016 - h 07
 Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

Concentrazione NO2 nel punto di massimo
 Normale = 1.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 21.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



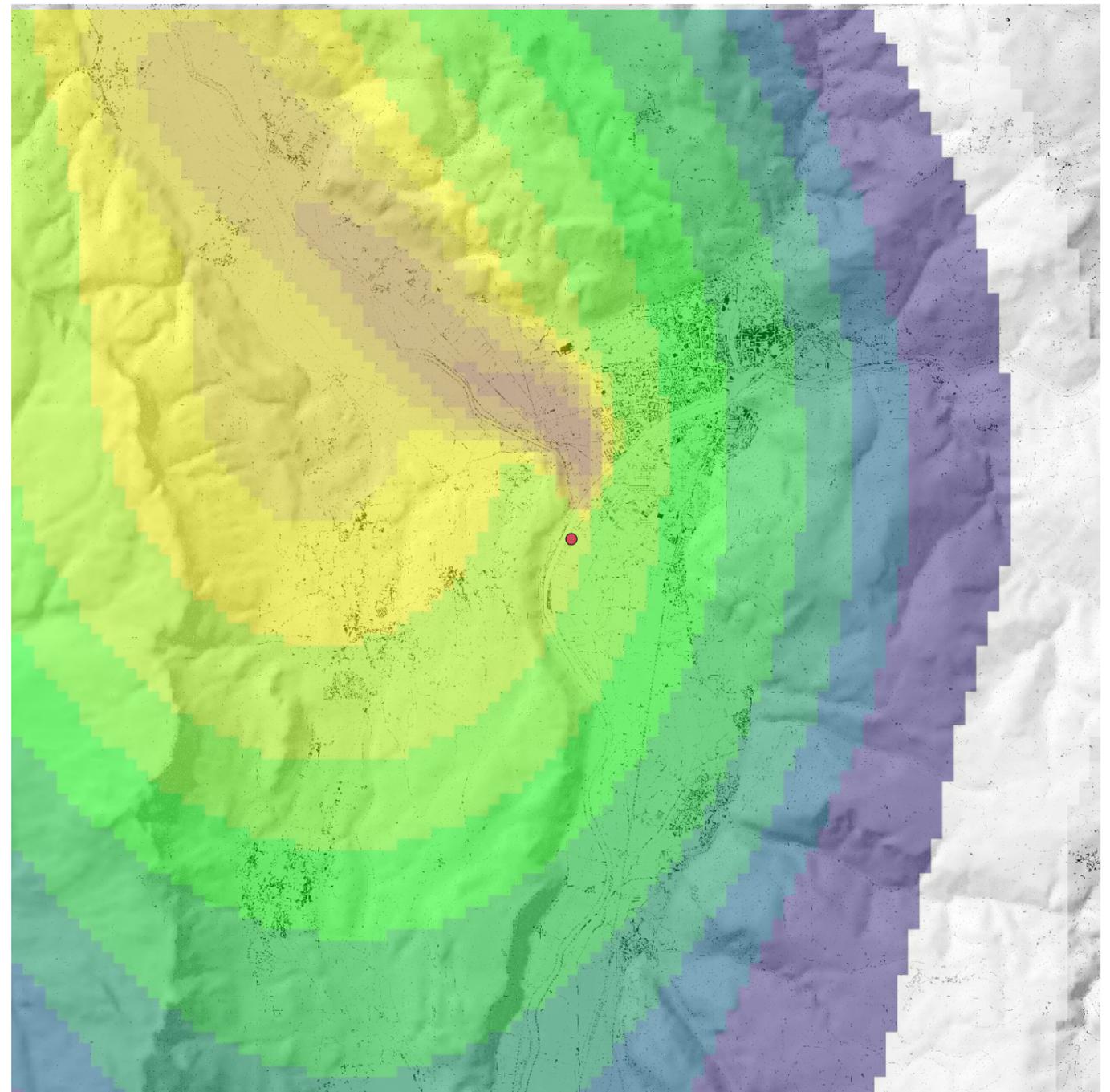
NO2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



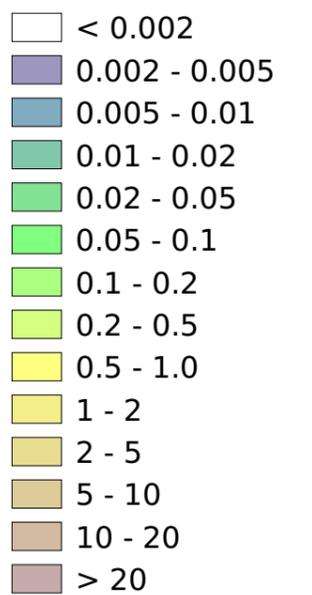


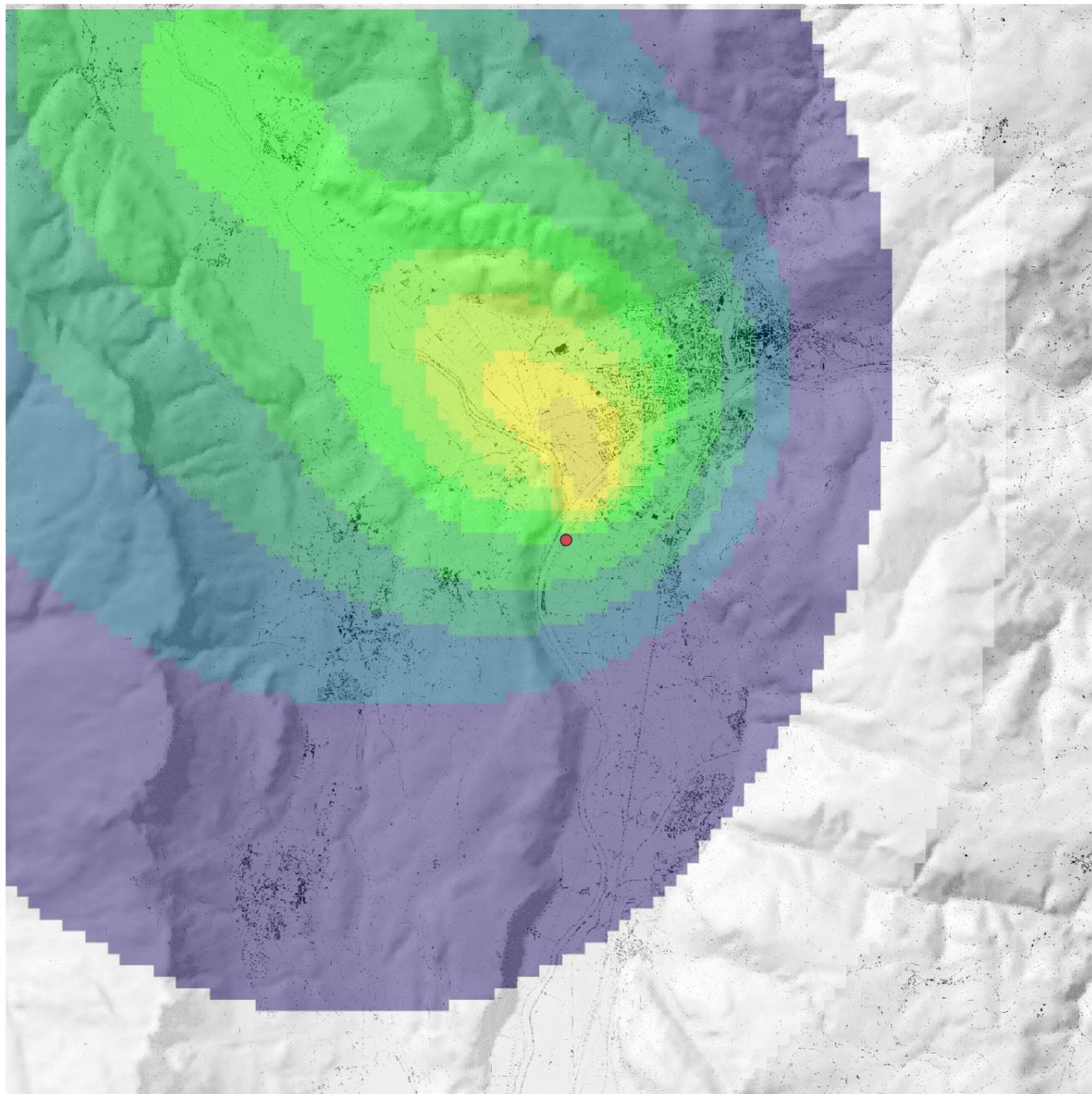
Emissione NOx a camino 11/02/2016 - h 08
 Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

Concentrazione NO2 nel punto di massimo
 Normale = 1.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Incidente = 18.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



NO2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]





Emissione NOx a camino 11/02/2016 - h 09
 Normale = 2833 g/h, Incidente = 38300 g/h

Concentrazione NO2 nel punto di massimo
 Normale = 1.6 µg/m³, Incidente = 18.1 µg/m³

