

ALLEGATI

DENSITÀ EXTRAURBANA

RETE STRADALE EXTRAURBANA PRINCIPALE

Le analisi dell'incidentalità extraurbana nel presente rapporto ha riguardato l'insieme della viabilità extraurbana principale del FVG. Tale viabilità è composta dalla rete autostradale e dei raccordi autostradali, dalle strade statali e regionali in ambito extraurbano e dalle ex strade provinciali (oggi regionali) in ambito extraurbano; per le finalità dello studio vengono inoltre ricompresi quei tratti urbani

di strade statali e regionali - siano essi traverse interne o strade comunali ai sensi del Codice della strada - rilevanti in quanto tratti in continuità di importanti itinerari che attraversano centri abitati (come ad es. la SS 13 nel pordenonese o ancora la SS 14 nella bassa friulana). Le caratteristiche di sintesi di tale rete, definita come «extraurbana principale» sono le seguenti.

Tipologia strada	Km rete	Km con incidenti	Incidenti	Morti	Feriti	DALY
Autostrade e RA autostradali	262	210	1.512	55	1.837	2.152
SS e SR	1.089	851	5.366	171	6.764	5.716
Ex SSPP	2.197	1.333	4.873	164	5.994	5.993
Totale	3.547	2.394	11.751	390	14.595	13.860

Tabella A.1
Ripartizione incidenti, morti, feriti e DALY sulla rete extraurbana principale del FVG.
Anni 2010-2016

Fonte: MITRIS, SISR

DENSITÀ CHILOMETRICA INCIDENTI

Nelle mappe di seguito allegate sulla densità chilometrica degli incidenti lungo la rete stradale extraurbana principale è riportata, con gradualità di colore e spessore diversi, l'entità degli incidenti stradali sulle tratte chilometriche nel periodo complessivo 2010-2016.

Per chiarezza di esposizione le mappe vengono inquadrare sulle quattro aree provinciali del FVG

DALY ACCUMULATI

Nelle mappe più avanti allegate sui DALY accumulati per incidente stradale e per km lungo la rete stradale extraurbana principale è riportata, con gradualità di colore e spessore diversi, l'entità degli anni di vita sana complessivamente persi a causa degli incidenti stradali su ciascuna tratta chilometriche nel periodo 2010-2016.

La rappresentazione del DALY accumulato nel FVG viene inquadrata sull'intero territorio regionale ma distinguendo tra le tre reti funzionali diverse:

e le entità sono rappresentate per valori pari ad almeno 7 incidenti, cioè unicamente lungo quei tratti stradali su cui mediamente, nel periodo di analisi, è accaduto almeno un incidente all'anno.

quella delle autostrade e raccordi autostradali, quella delle strade statali e regionali e quella, infine, delle ex strade provinciali.

Si precisa inoltre che vengono evidenziate solo le tratte per le quali il link tra la banca dati Mitris e quella Sanitaria ha avuto esito positivo in almeno un caso degli incidenti accaduti sulla tratta stessa, condizione questa avvenuta per la rete extraurbana principale in esame nel 93% circa dei casi.

PORDENONE

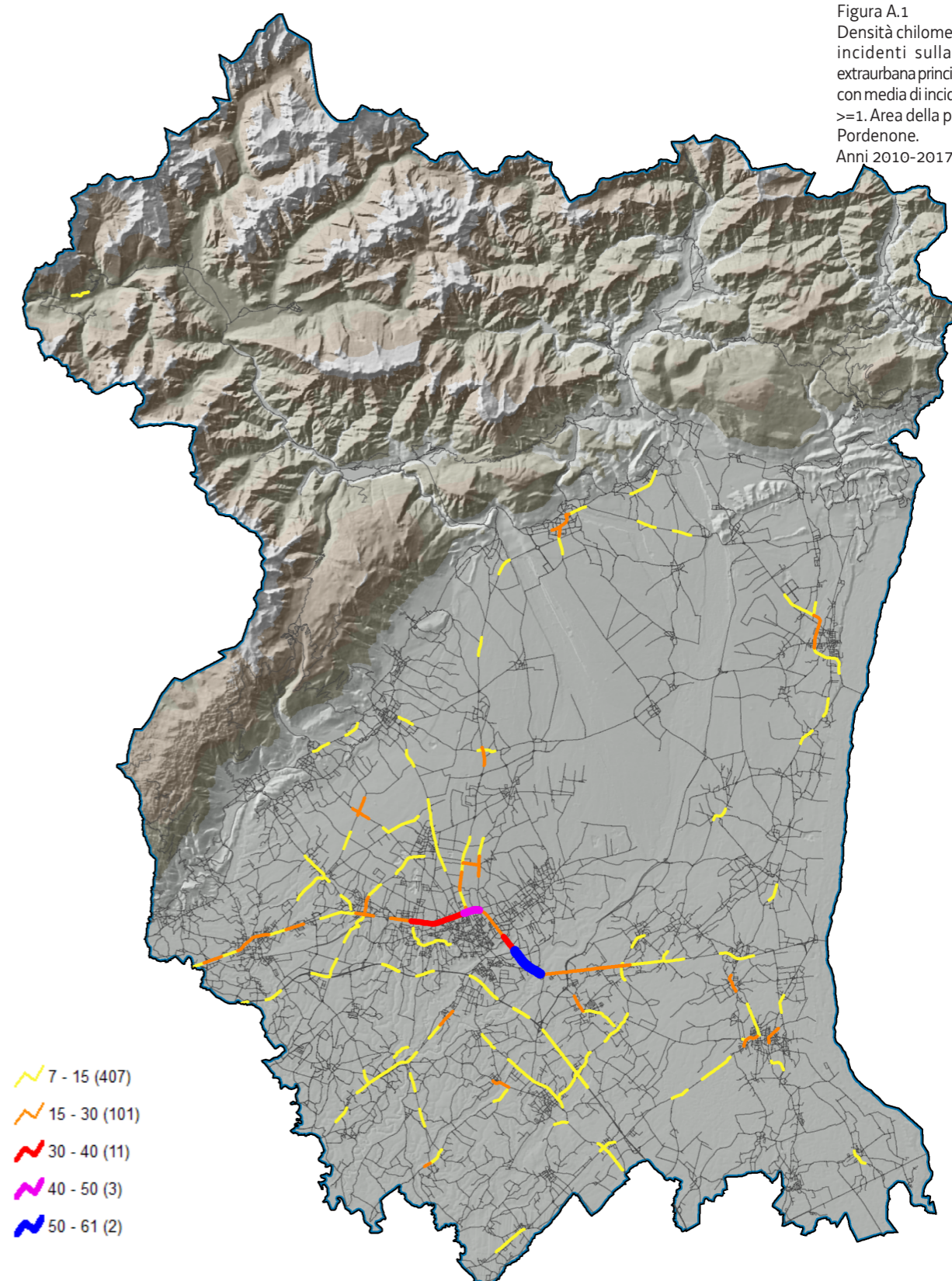
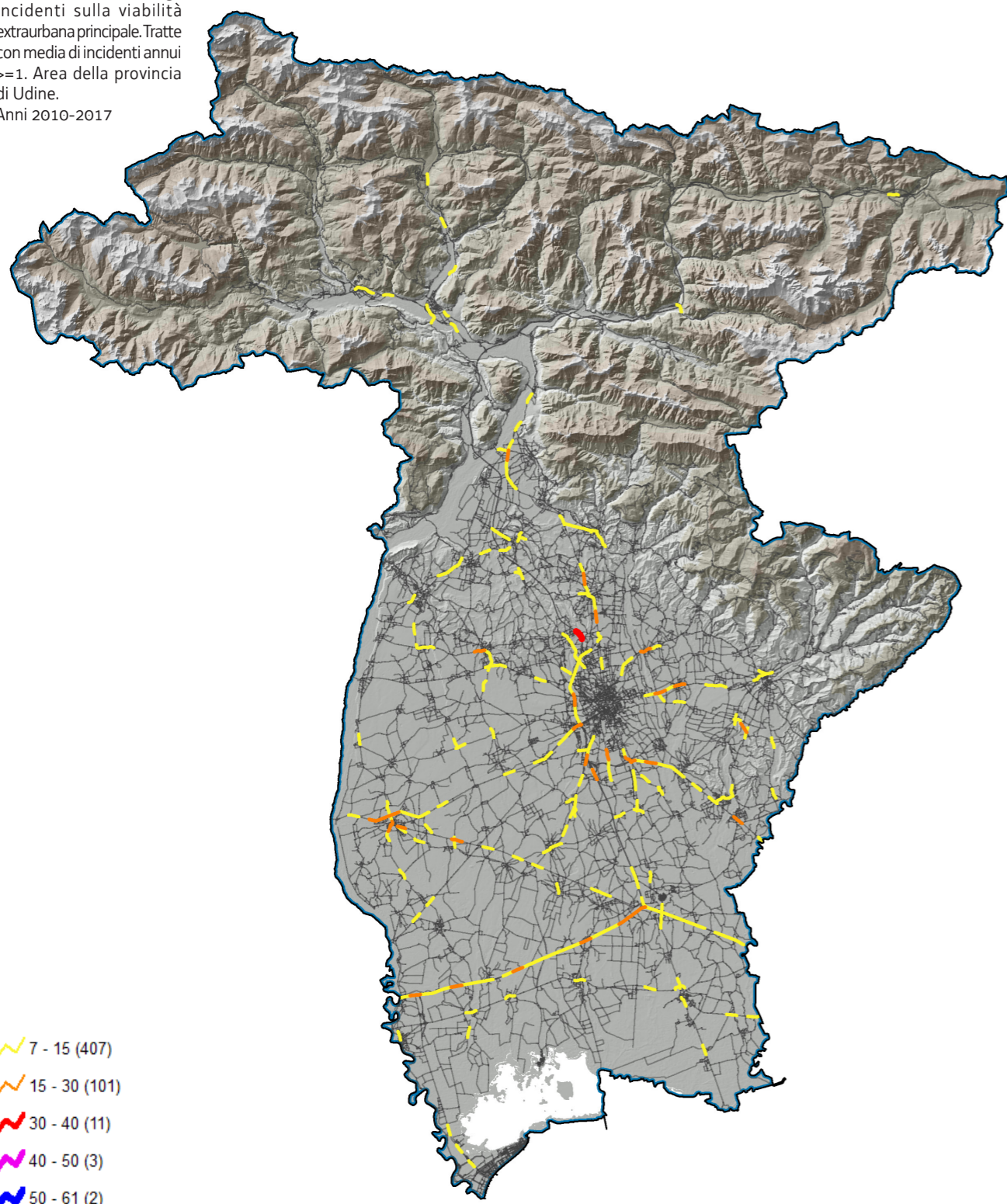


Figura A.1
Densità chilometrica degli incidenti sulla viabilità extraurbana principale. Tratte con media di incidenti annui ≥ 1 . Area della provincia di Pordenone.
Anni 2010-2017

Fonte: MITRIS

UDINE

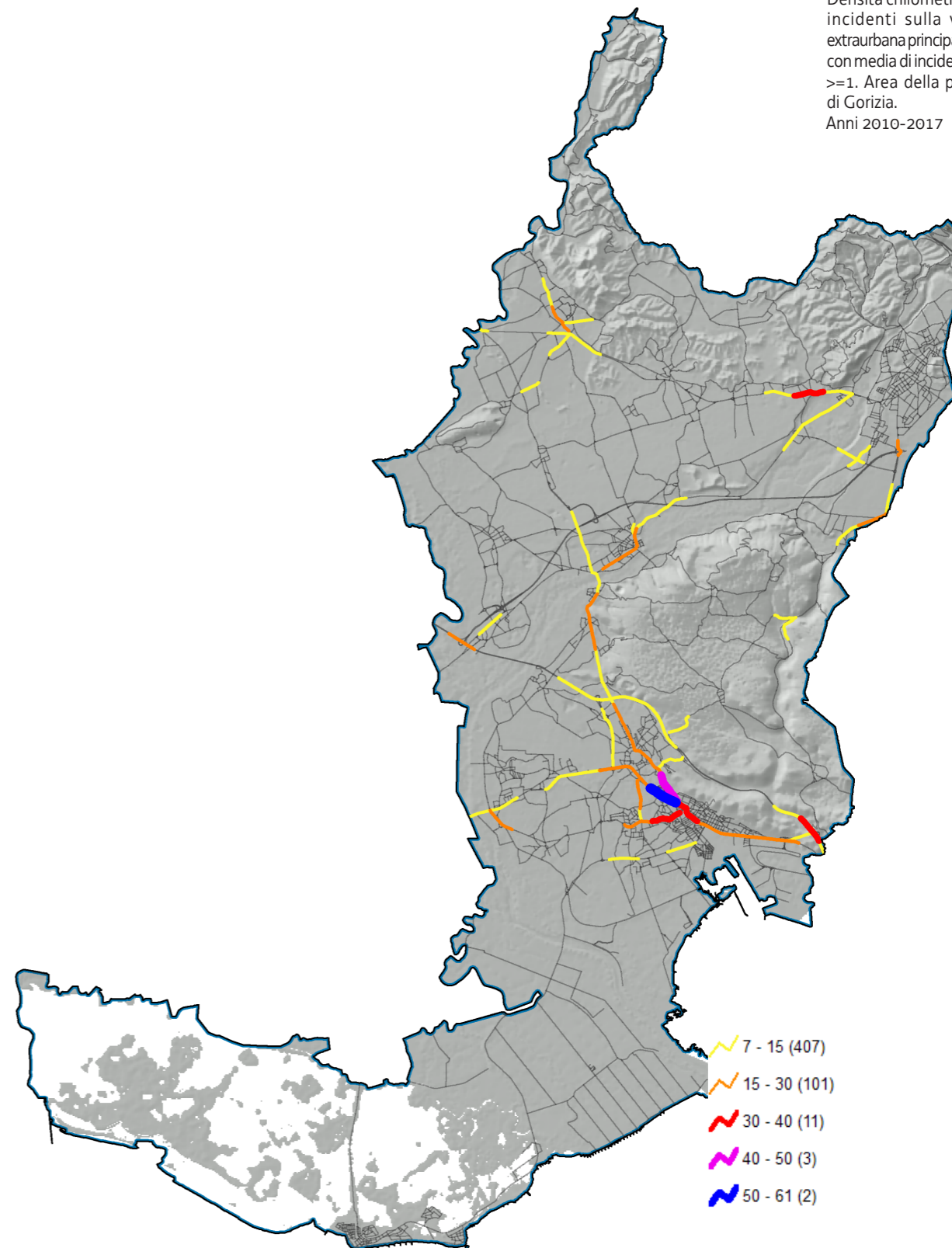
Figura A.2
Densità chilometrica degli incidenti sulla viabilità extraurbana principale. Tratte con media di incidenti annui ≥ 1 . Area della provincia di Udine. Anni 2010-2017



Fonte: MITRIS

GORIZIA

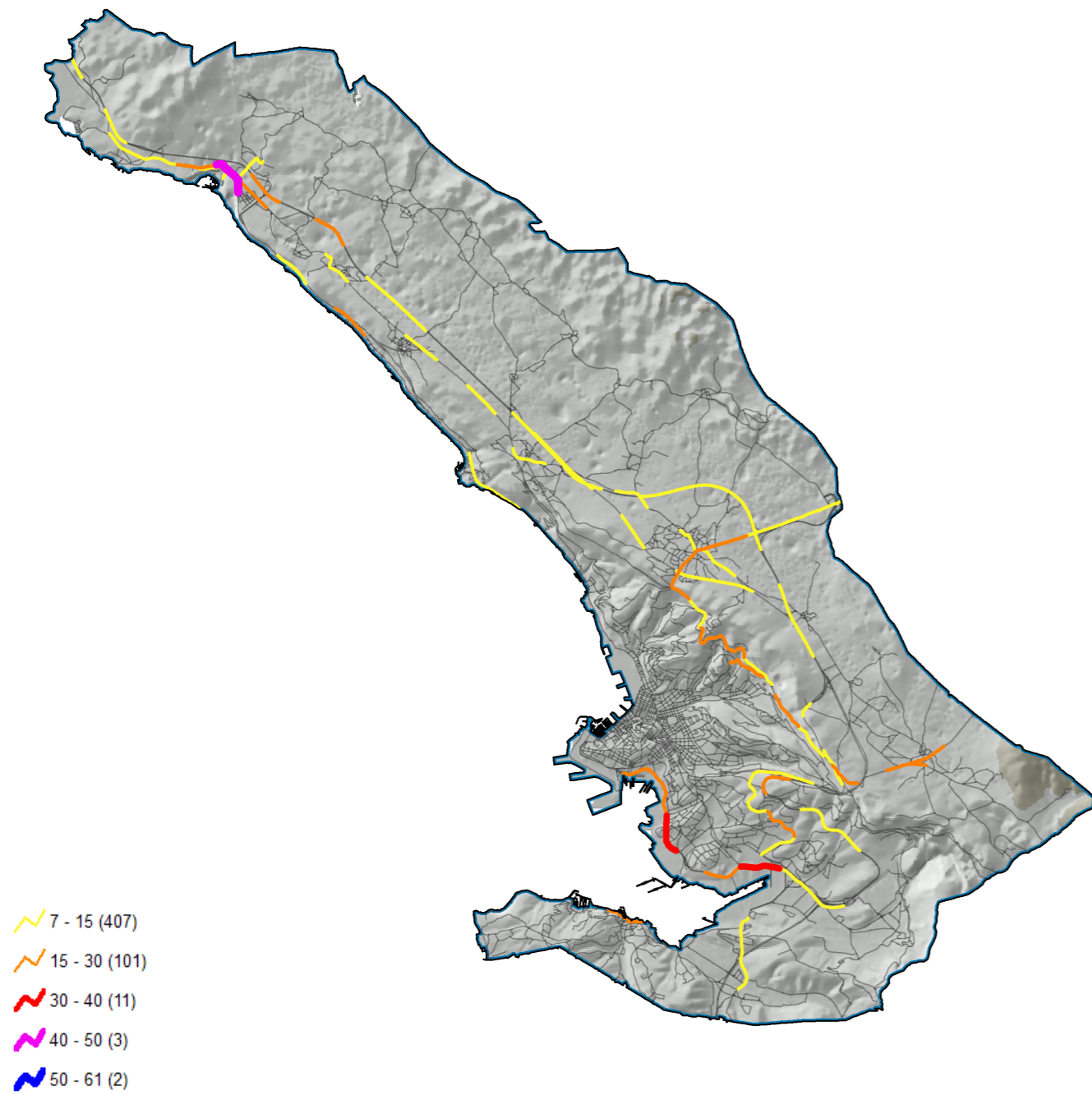
Figura A.3
Densità chilometrica degli incidenti sulla viabilità extraurbana principale. Tratte con media di incidenti annui ≥ 1 . Area della provincia di Gorizia. Anni 2010-2017



Fonte: MITRIS

TRIESTE

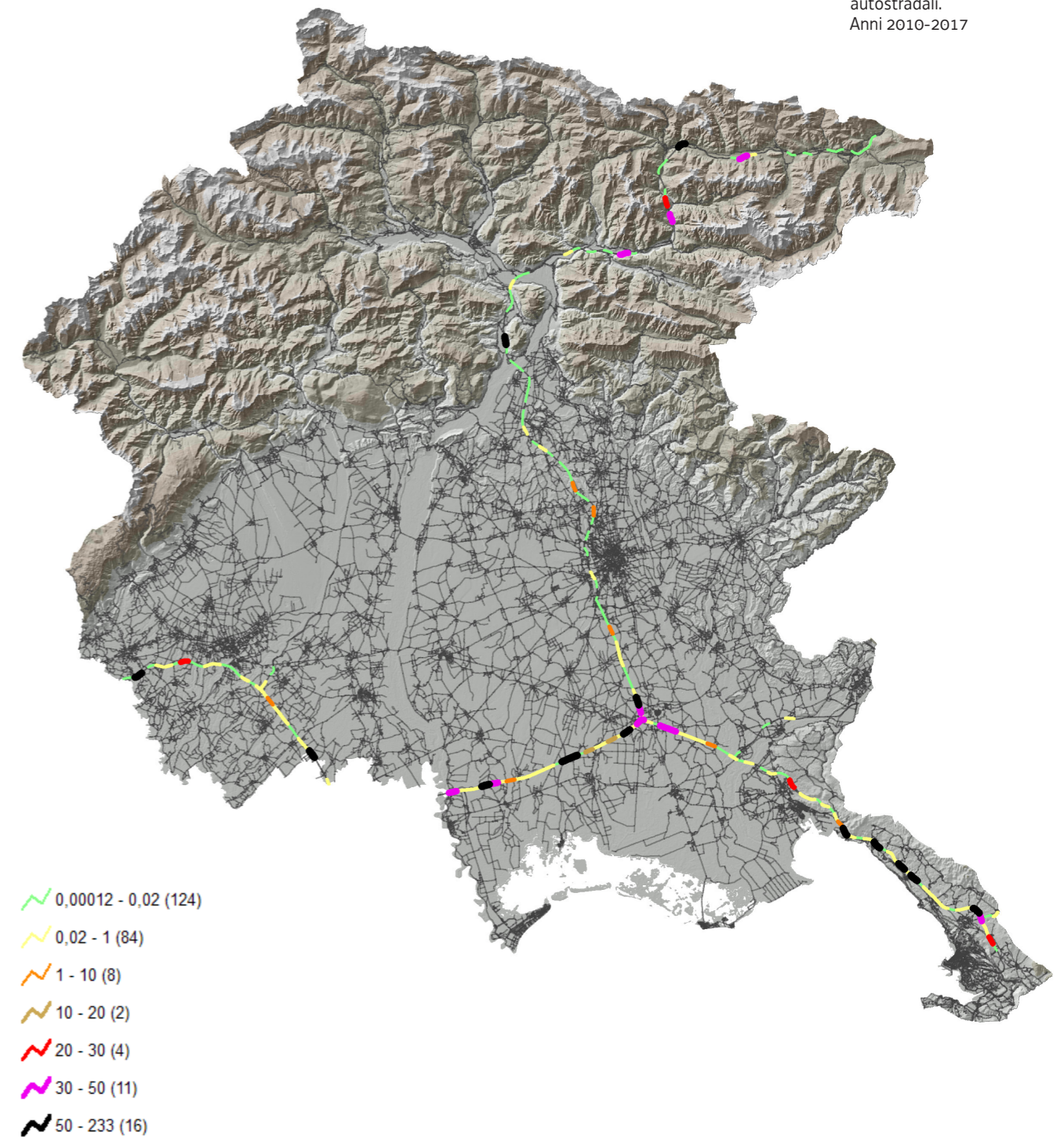
Figura A.4
Densità chilometrica degli incidenti sulla viabilità extraurbana principale. Tratte con media di incidenti annui ≥ 1 . Area della provincia di Trieste.
Anni 2010-2017



Fonte: MITRIS

DALY ACCUMULATI AUTOSTRADE E RACCORDI

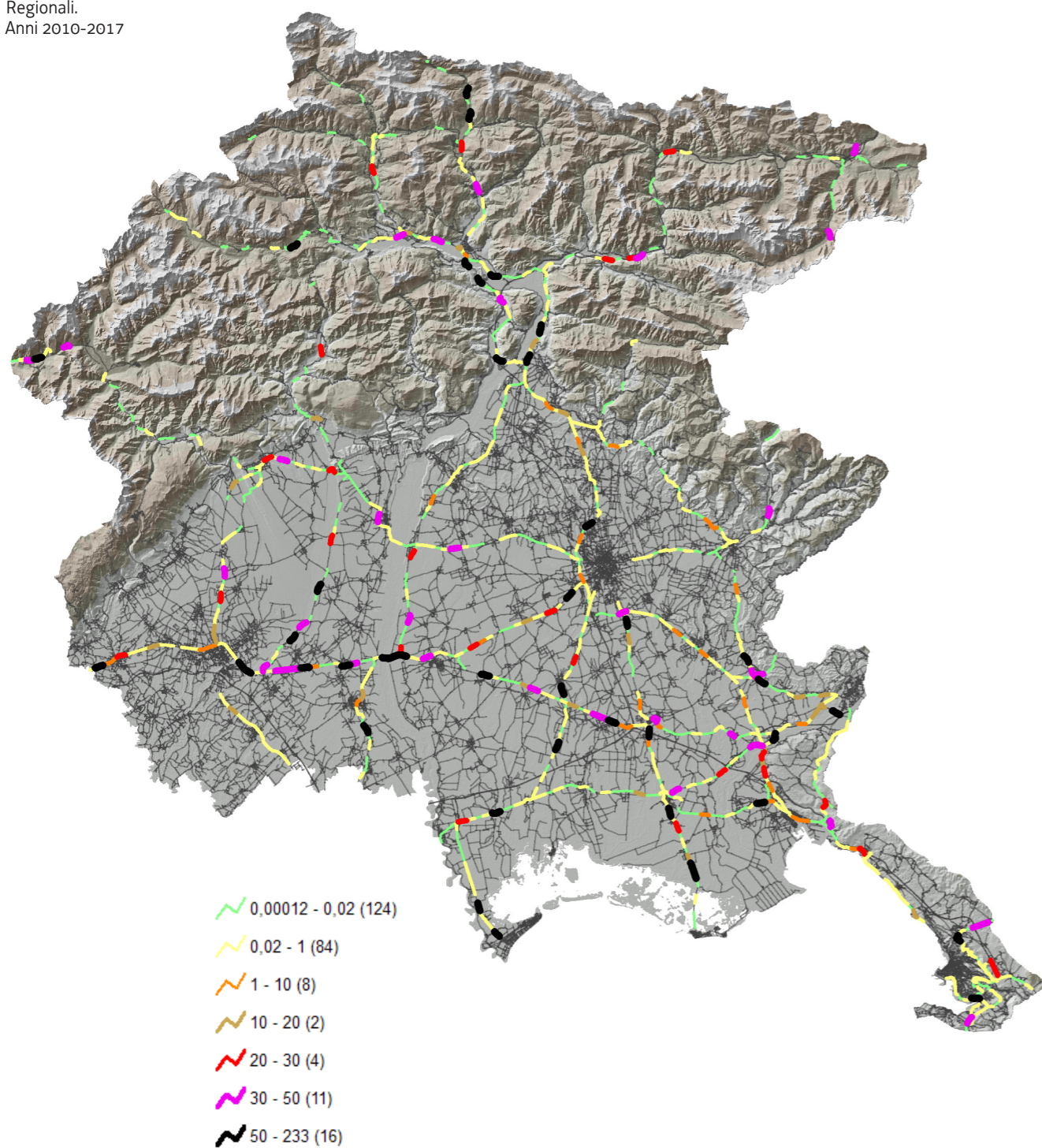
Figura A5
DALY accumulato per tratta chilometrica sulla viabilità extraurbana principale. Autostrade e Raccordi autostradali.
Anni 2010-2017



Fonte: MITRIS

STRADE STATALI E REGIONALI

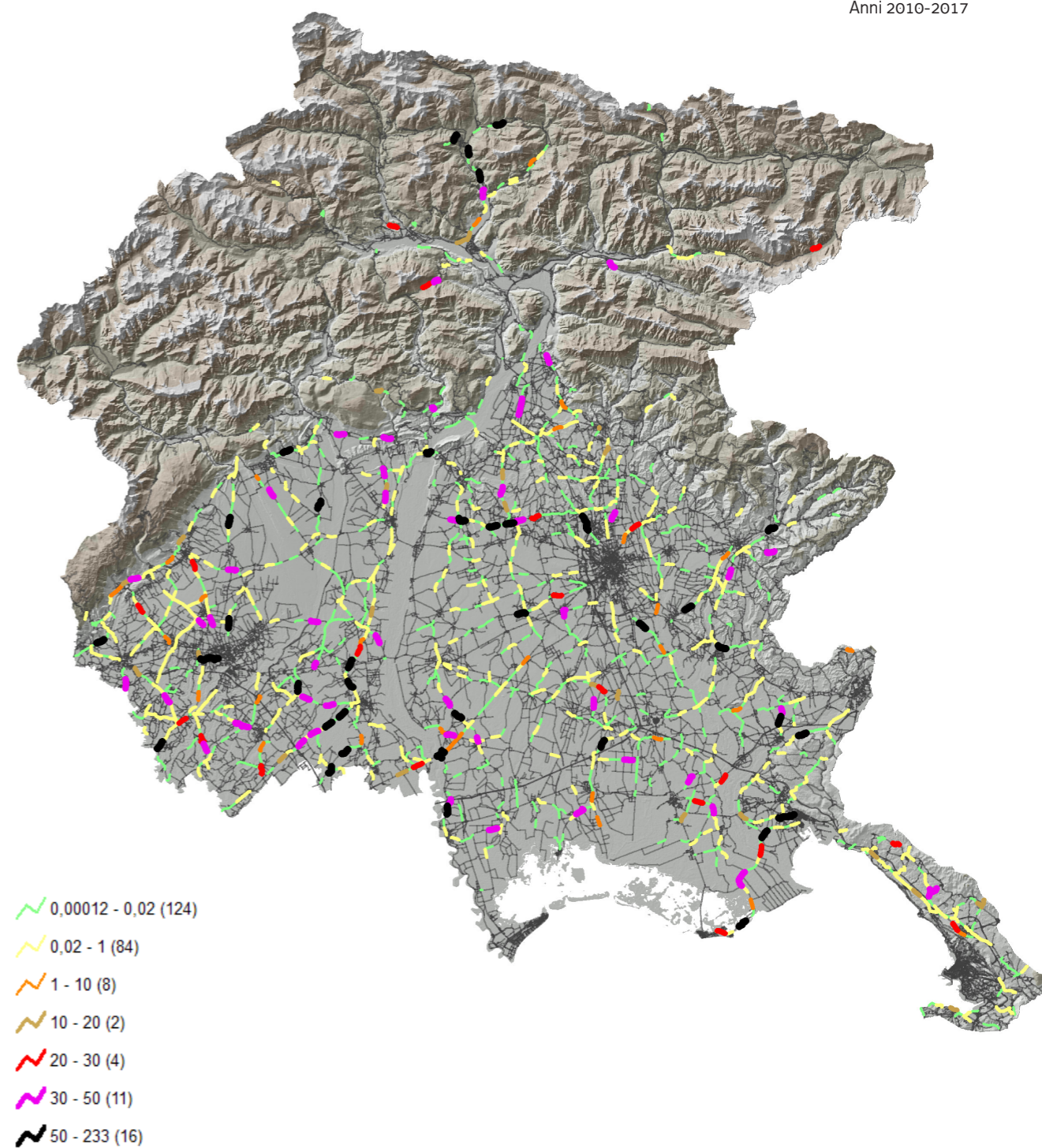
Figura A.6
DALY accumulato per tratta
chilometrica sulla viabilità
extraurbana principale.
Strade Statali e Strade
Regionali.
Anni 2010-2017



Fonte: MITRIS

EX STRADE PROVINCIALI

Figura A.7
DALY accumulato per tratta
chilometrica sulla viabilità
extraurbana principale. Ex
Strade Provinciali.
Anni 2010-2017



Fonte: MITRIS

CLUSTER ANALYSIS

Basi dati ampie, sia in termini di unità che in termini di variabili, sono difficili da visualizzare e da riassumere. La complessità dei dati richiede una sintesi sia a livello di unità che di variabili. A livello di relazioni tra unità ci si interroga su quali incidenti siano tra di loro simili, quali caratteristiche tendano a ripetersi, e, con incidenti georiferiti, dove si ripetono. A livello di relazioni tra variabili, ci si chiede se esistono legami tra variabili, e di che tipo siano questi legami. Gli incidenti nel weekend accadono più spesso di notte o viceversa? Quali sono i legami più rilevanti?

La cluster analysis, o analisi dei gruppi, è un'analisi che si propone di semplificare l'interpretazione di un fenomeno raggruppando più unità statistiche in base alle loro caratteristiche in gruppi omogenei (o cluster). Ciò permette sia di semplificare le relazioni tra unità, riassunte in un numero di gruppi

limitato, sia le relazioni tra variabili, evidenziando le variabili in base ai quali i gruppi sono costituiti, e che quindi sono quelle con maggiore variabilità, che meglio rappresentano la varietà del fenomeno. La localizzazione dei dati permette di rappresentarli su mappa permettendo l'evidenziazione di pattern spaziali.

Una caratteristica fondamentale della cluster analysis è di non sapere a priori se le unità oggetto dell'analisi siano effettivamente raggruppabili in modo sensato, in quanti gruppi e con quali caratteristiche. Per fenomeni così complessi come gli incidenti stradali, in cui interagiscono numerose variabili, è necessario catturare le interazioni tra variabili e le similitudini tra unità senza schemi predefiniti e considerando le variabili nella loro totalità, passando dall'analisi univariata all'analisi multivariata.

Nome variabile	Tipo variabile	Descrizione
Notte	sì/no	Sì se l'incidente è accaduto tra le 22.00 e le 6.00
Weekend	sì/no	Sì se l'incidente è accaduto di sabato o domenica
Urbana	sì/no	Sì se l'incidente è accaduto su una strada entro l'abitato
Intersezione	sì/no	Sì se l'incidente è accaduto presso un'intersezione
DALY grave	sì/no	Sì se i DALY persi nell'incidente sono pari almeno ad un anno intero
Veicoli	numero intero	Numero di veicoli coinvolti nell'incidente
Feriti	numero intero	Numero di persone rimaste feriti nell'incidente
Morti	numero intero	Numero di persone morte entro 30 giorni dall'incidente
Pedoni	numero intero	Numero di pedoni coinvolti nell'incidente
Auto	numero intero	Numero di automobili coinvolti nell'incidente
Bici	numero intero	Numero di biciclette coinvolti nell'incidente
Moto	numero intero	Numero di motoveicoli (inclusi ciclomotori coinvolti nell'incidente)
Camion	numero intero	Numero di mezzi pesanti (inclusi autobus) coinvolti nell'incidente

Nel selezionare le variabili in base alle quali eseguire la cluster analysis si sono considerate varie caratteristiche delle variabili stesse. In particolare, sono state escluse le variabili con un'alta percentuale di dati mancanti, quelle con distribuzioni fortemente sbilanciate verso una modalità sola (ad esclusione della variabile "Morti"), variabili non legate alla gravità dell'incidente (es. organo rilevatore).

Le variabili sono rappresentate come percentuali di frequenza della modalità "sì" nel caso di variabili binarie e come medie nel caso di variabili numeriche.

La cluster analysis è un insieme di tecniche che permette di raggruppare le unità di un insieme di dati in gruppi omogenei sulla base delle caratteristiche delle unità stesse, senza una classificazione a priori che potrebbe essere basata su schemi concettuali non necessariamente aderenti alla realtà. La possibilità di analizzare i dati senza ricondursi a categorie specificate a priori permette maggiore flessibilità e una migliore analisi di come il contesto impatti sui dati - ad esempio, variabili importanti per la classificazione in un'area urbana possono essere di scarso interesse in un'altra area urbana. Le unità vengono raggruppate in base ad un criterio matematico di distanza tra le unità. La funzione che misura la distanza tra unità viene scelta in base alle caratteristiche della base dati, in questo caso, trattandosi di un mix di variabili numeriche e di variabili binarie, è stata scelta la distanza di Gower. Le analisi svolte si sono avvalse di algoritmi di clustering non gerarchico (Partitioning around medoids), cioè di metodi che suddividono l'insieme degli incidenti in un numero predeterminato k di gruppi. Il numero di

gruppi in cui suddividere l'insieme delle unità è stato individuato tramite opportuni indici di qualità (indice di Dunn e larghezza silhouette). L'analisi è stata svolta con l'ausilio dell'ambiente di sviluppo statistico R, che offre grande varietà e flessibilità di soluzioni.

Nella seguente sezione si presentano i risultati della cluster analysis nelle quattro aree urbane corrispondenti ai comuni di Pordenone, Udine, Gorizia e Trieste,, 6.818 incidenti georiferiti corrispondenti ai quattro comuni con più incidenti presenti nel sistema Mitris.

La cluster analysis è stata svolta sulle sole caratteristiche dell'incidente, proiettando i risultati nello spazio, in quanto a causa della grande eterogeneità delle città si è ritenuto poco sensato ritenere presente una correlazione spaziale tra unità (cioè una similitudine tra incidenti accaduti a poca distanza). Un incidente accaduto su una grande arteria cittadina e un incidente localizzato in una strada secondaria a 200 metri di distanza sono, infatti, notevolmente diversi.

Tabella A.2
Variabili utilizzate nella cluster analysis degli incidenti accaduti nelle principali aree urbane del FVG.
Anni 2010-2016

Fonte: MITRIS

PORDENONE

PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEI CLUSTER

Tabella A.3
Principali caratteristiche dei cluster individuati relativamente agli incidenti georiferiti accaduti nel comune di Pordenone. Anni 2010-2016

Cluster	Notte	Weekend	Urbana	Intersezioni	DALY grave	Veicoli	Feriti	Morti	Pedoni	Auto	Bici	Moto	Camion
1	9,85	25,76	85,61	65,15	1,52	1,91	1,08	0,01	0,01	0,83	0,02	1,00	0,06
2	6,90	22,76	82,07	100,00	0,00	2,06	1,60	0,00	0,01	1,89	0,00	0,00	0,17
3	5,35	17,70	81,48	0,00	0,41	2,20	1,53	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,20
4	2,63	13,16	88,60	100,00	0,00	2,01	1,00	0,01	0,00	0,95	1,03	0,00	0,04
5	0,00	18,18	87,88	22,22	1,01	1,00	1,06	0,01	1,07	0,86	0,04	0,02	0,08
6	2,02	13,13	84,85	0,00	1,01	1,86	1,09	0,02	0,00	0,70	1,09	0,06	0,01

Fonte: MITRIS

Nota: dati espressi in percentuale dei valori positivi per le variabili Notte, Weekend, Urbana, Intersezione, DALY grave, valori medi per le altre.

LEGENDA

Cluster	Num.	Descrizione
●	1	132 Incidenti con motoveicoli
◆	2	145 Incidenti senza biciclette né motoveicoli presso intersezioni
■	3	243 Incidenti senza biciclette né motoveicoli lontano da intersezioni
★	4	114 Incidenti con biciclette presso intersezioni
▼	5	99 Investimenti di pedoni
◆	6	99 Incidenti con biciclette lontano da intersezioni

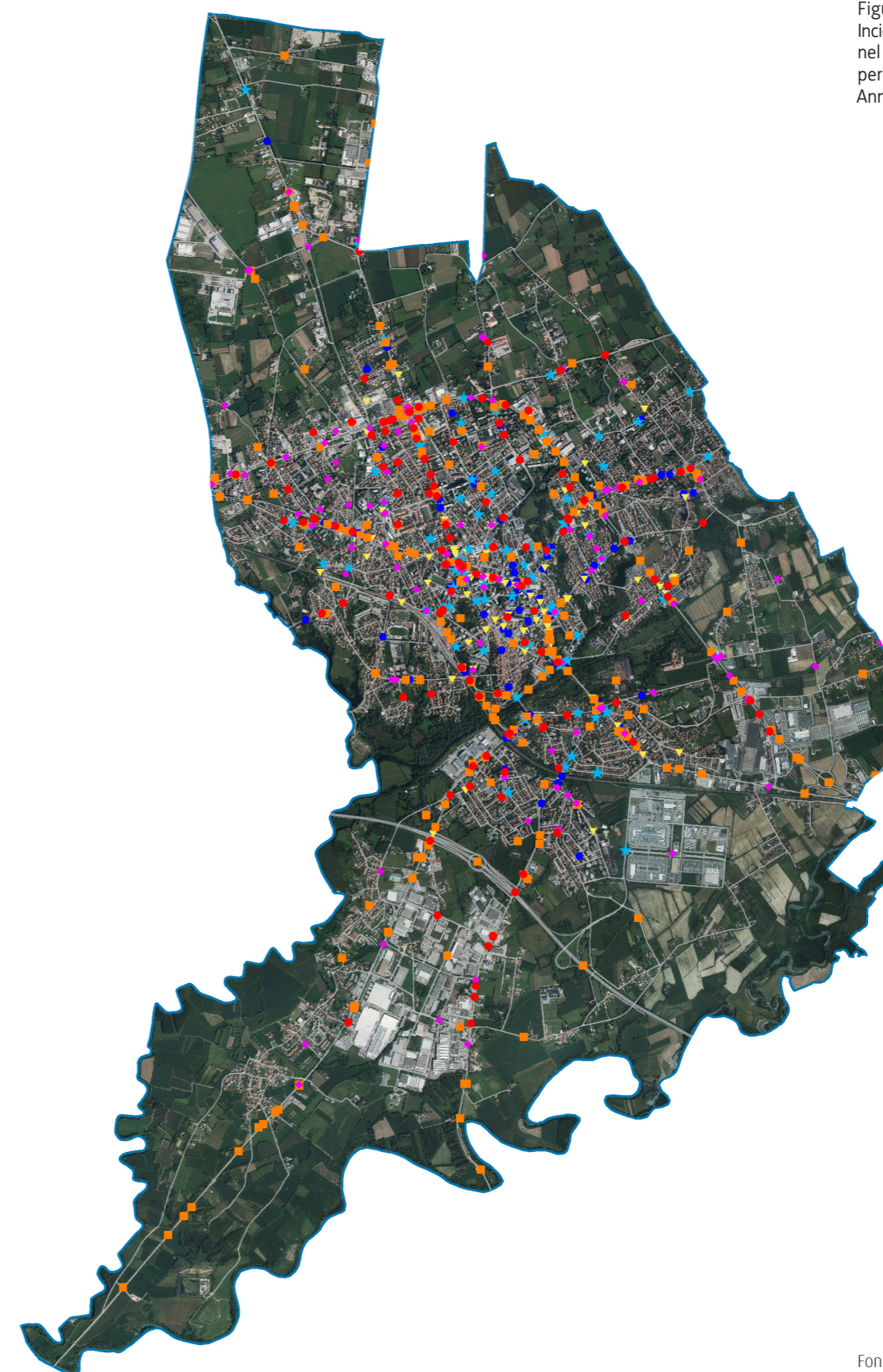


Figura A.8
Incidenti georiferiti accaduti nel comune di Pordenone, per cluster. Anni 2010-2016

Fonte: MITRIS

UDINE

PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEI CLUSTER

Tabella A.4
Principali caratteristiche dei cluster individuati relativamente agli incidenti georiferiti accaduti nel comune di Udine. Anni 2010-2016

Cluster	Notte	Weekend	Urbana	Intersezioni	DALY grave	Veicoli	Feriti	Morti	Pedoni	Auto	Bici	Moto	Camion
1	1,88	0,00	97,37	0,00	0,75	1,06	1,08	0,01	1,08	0,81	0,02	0,03	0,10
2	13,20	100,00	96,40	100,00	0,40	1,88	1,56	0,01	0,09	1,43	0,15	0,20	0,08
3	4,93	0,00	93,46	100,00	0,25	1,90	1,35	0,00	0,14	1,51	0,00	0,24	0,13
4	3,76	0,00	96,71	0,00	0,47	1,91	1,05	0,01	0,00	0,71	1,04	0,04	0,09
5	6,76	0,00	91,16	0,00	1,04	2,05	1,33	0,01	0,00	1,62	0,00	0,26	0,14
6	9,09	100,00	92,66	0,00	1,40	1,67	1,36	0,02	0,24	1,17	0,17	0,19	0,08
7	1,26	0,00	97,49	100,00	0,42	1,97	1,03	0,01	0,01	0,82	1,03	0,03	0,08

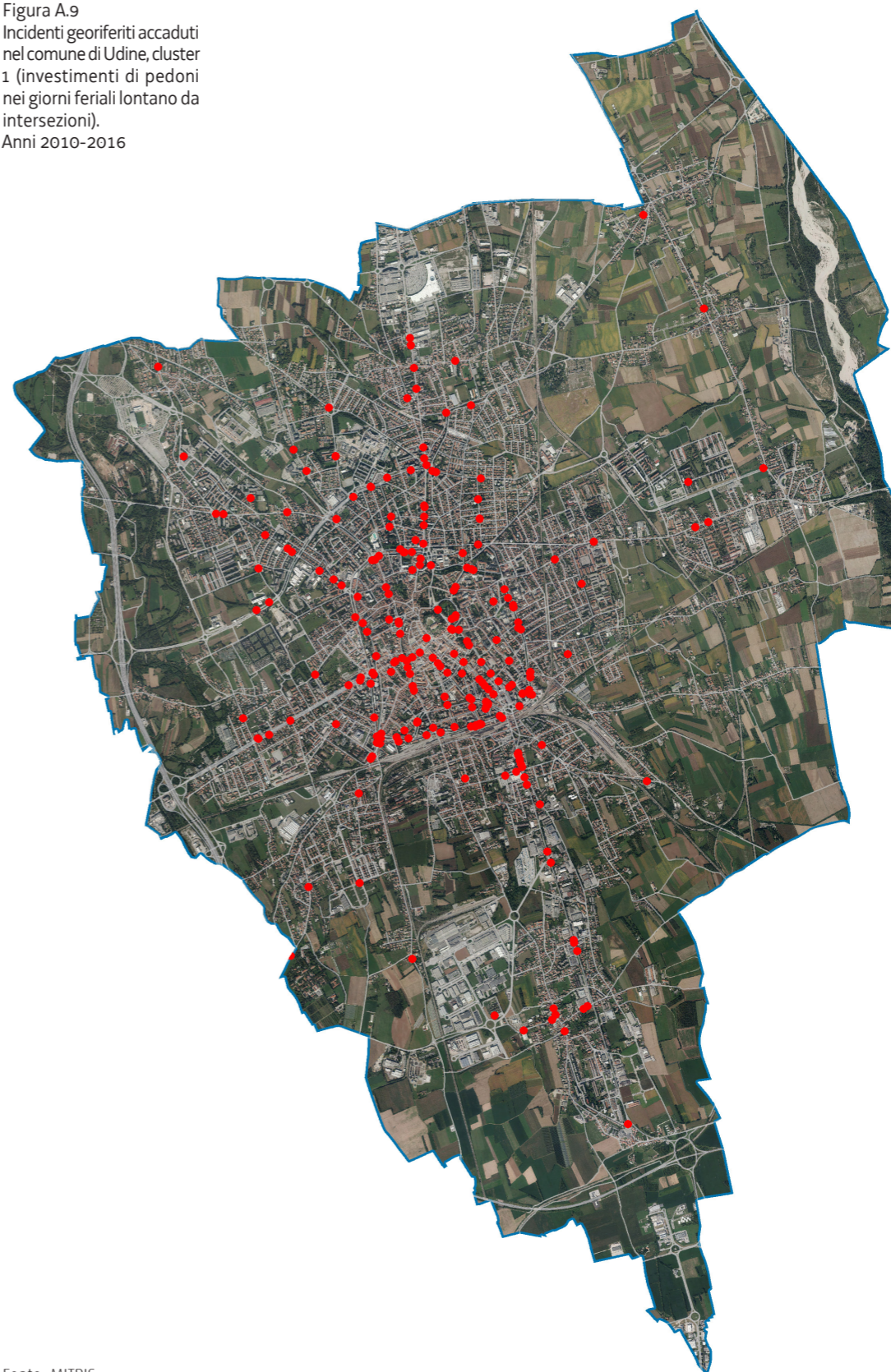
Fonte: MITRIS

Nota: dati espressi in percentuale dei valori positivi per le variabili Notte, Weekend, Urbana, Intersezione, DALY grave, valori medi per le altre.

LEGENDA

Cluster	Num.	Descrizione
●	1	266 Investimenti di pedoni nei giorni feriali lontano da intersezioni
◆	2	250 Incidenti nel weekend presso intersezioni
■	3	811 Incidenti senza biciclette nei giorni feriali presso intersezioni
★	4	213 Incidenti con biciclette nei giorni feriali lontano da intersezioni
▼	5	577 Scontri tra veicoli nei giorni feriali lontano da intersezioni
◆	6	286 Incidenti nel weekend lontano da intersezioni
▲	7	239 Incidenti con biciclette nei giorni feriali presso intersezioni

Figura A.9
Incidenti georiferiti accaduti nel comune di Udine, cluster 1 (investimenti di pedoni nei giorni feriali lontano da intersezioni). Anni 2010-2016



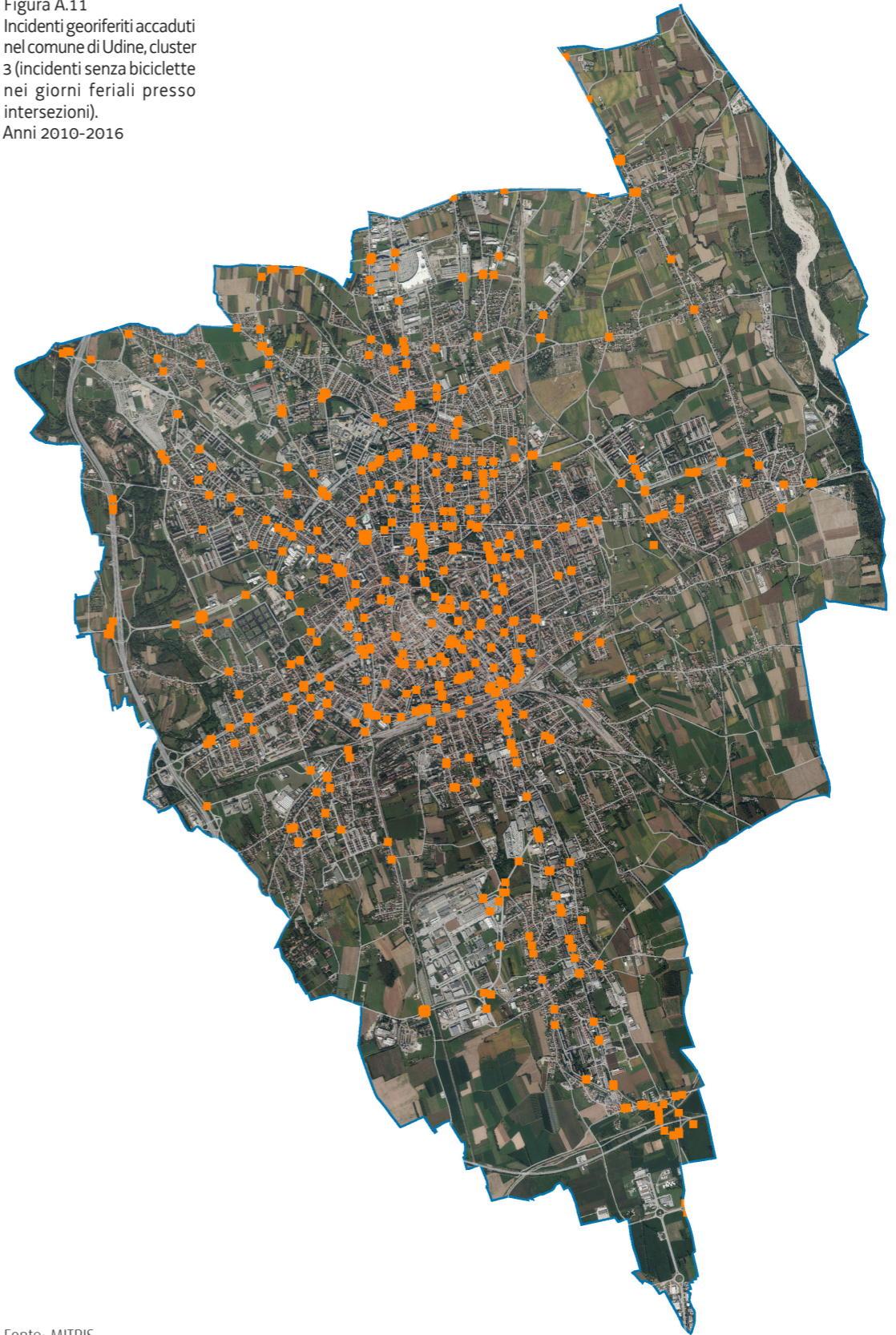
Fonte: MITRIS

Figura A.10
Incidenti georiferiti accaduti
nel comune di Udine, cluster
2 (incidenti nel weekend
presso intersezioni).
Anni 2010-2016



Fonte: MITRIS

Figura A.11
Incidenti georiferiti accaduti
nel comune di Udine, cluster
3 (incidenti senza biciclette
nei giorni feriali presso
intersezioni).
Anni 2010-2016



Fonte: MITRIS

Figura A.12
Incidenti georiferiti accaduti
nel comune di Udine, cluster
4 (incidenti con biciclette
nei giorni feriali lontano da
intersezioni).
Anni 2010-2016



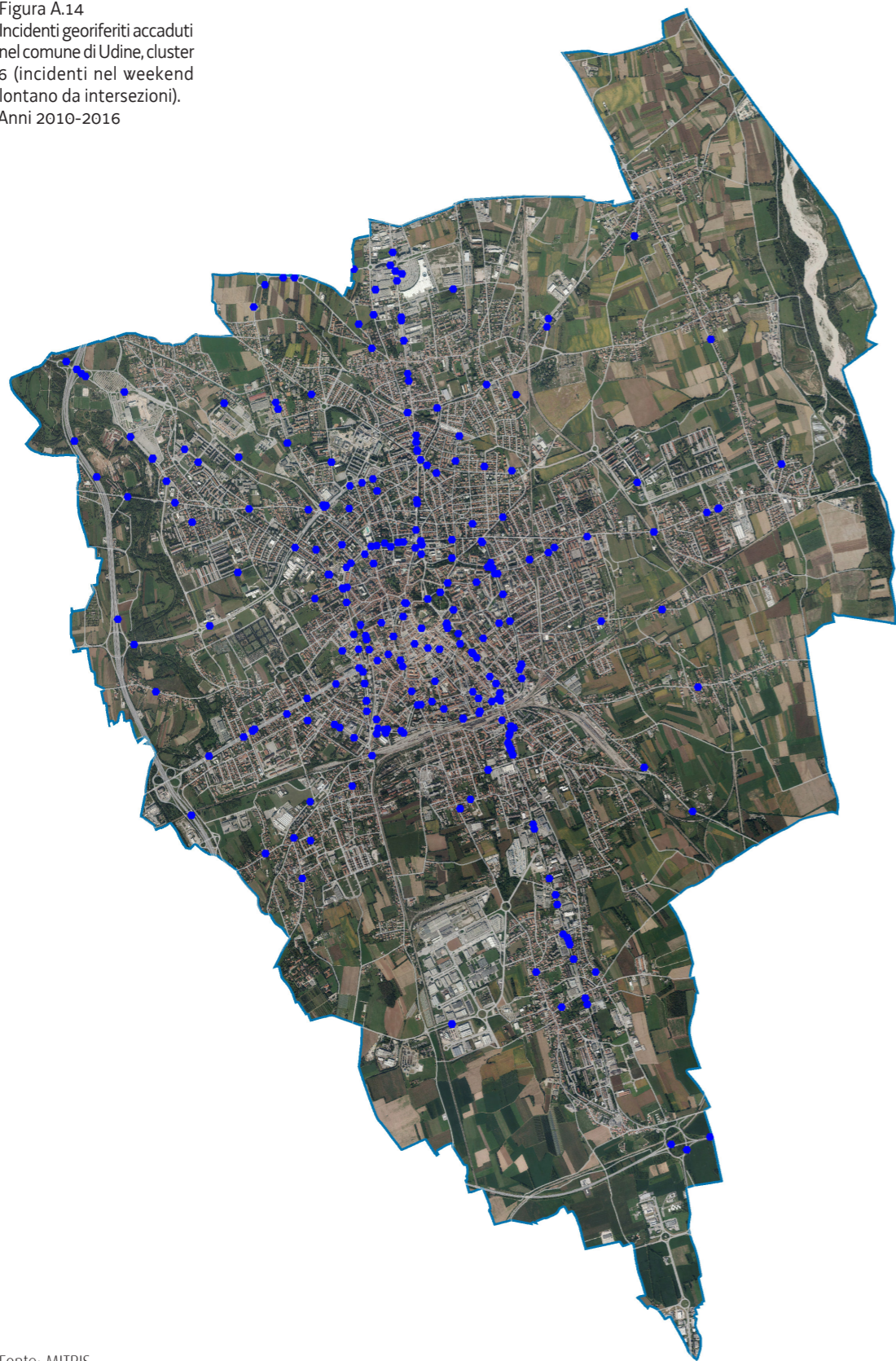
Fonte: MITRIS

Figura A.13
Incidenti georiferiti accaduti
nel comune di Udine, cluster
5 (scontri tra veicoli nei
giorni feriali lontano da
intersezioni).
Anni 2010-2016



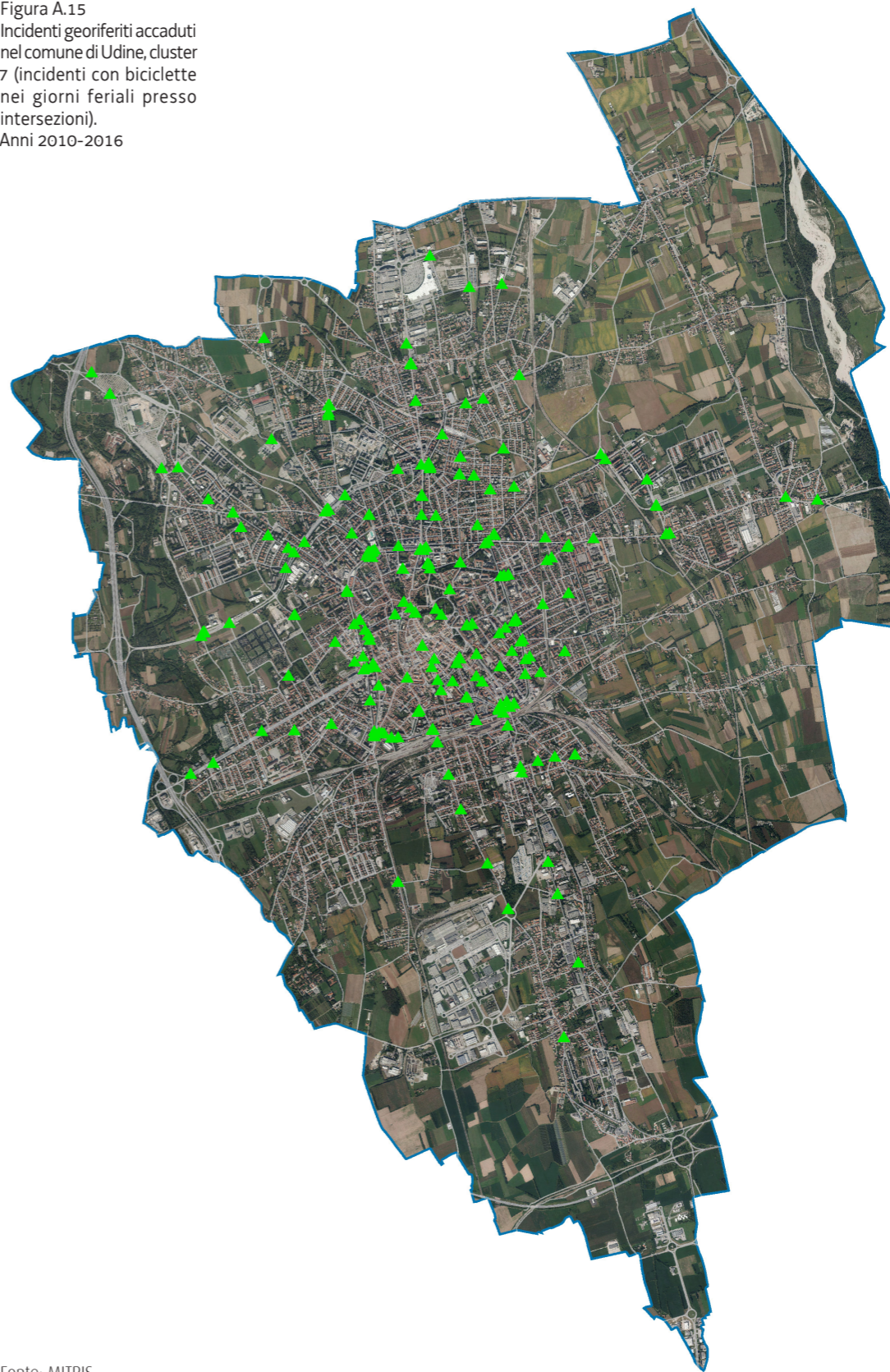
Fonte: MITRIS

Figura A.14
Incidenti georiferiti accaduti
nel comune di Udine, cluster
6 (incidenti nel weekend
lontano da intersezioni).
Anni 2010-2016



Fonte: MITRIS

Figura A.15
Incidenti georiferiti accaduti
nel comune di Udine, cluster
7 (incidenti con biciclette
nei giorni feriali presso
intersezioni).
Anni 2010-2016



Fonte: MITRIS

GORIZIA

PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEI CLUSTER

Tabella A.5
Principali caratteristiche dei cluster individuati relativamente agli incidenti georiferiti accaduti nel comune di Gorizia. Anni 2010-2016

Cluster	Notte	Weekend	Urbana	Intersezioni	DALY grave	Veicoli	Feriti	Morti	Pedoni	Auto	Bici	Moto	Camion
1	5,36	100,00	92,86	100,00	1,79	1,93	1,39	0,02	0,18	1,43	0,13	0,29	0,07
2	7,22	0,00	87,63	100,00	1,03	2,04	1,52	0,02	0,00	1,97	0,00	0,00	0,07
3	7,81	17,19	89,06	25,00	1,56	1,00	1,02	0,02	1,02	0,92	0,02	0,00	0,05
4	0,00	0,00	91,49	100,00	0,00	2,02	1,13	0,00	0,00	0,94	1,02	0,06	0,00
5	0,00	0,00	84,62	100,00	0,00	2,02	1,13	0,00	0,00	0,88	0,00	1,02	0,12
6	31,43	100,00	82,86	0,00	0,00	1,86	1,49	0,00	0,00	1,60	0,06	0,14	0,06
7	0,00	0,00	92,50	0,00	0,00	1,83	1,03	0,00	0,00	0,73	0,03	1,00	0,05
8	6,50	0,00	84,55	0,00	1,63	2,15	1,34	0,02	0,00	1,76	0,25	0,00	0,13

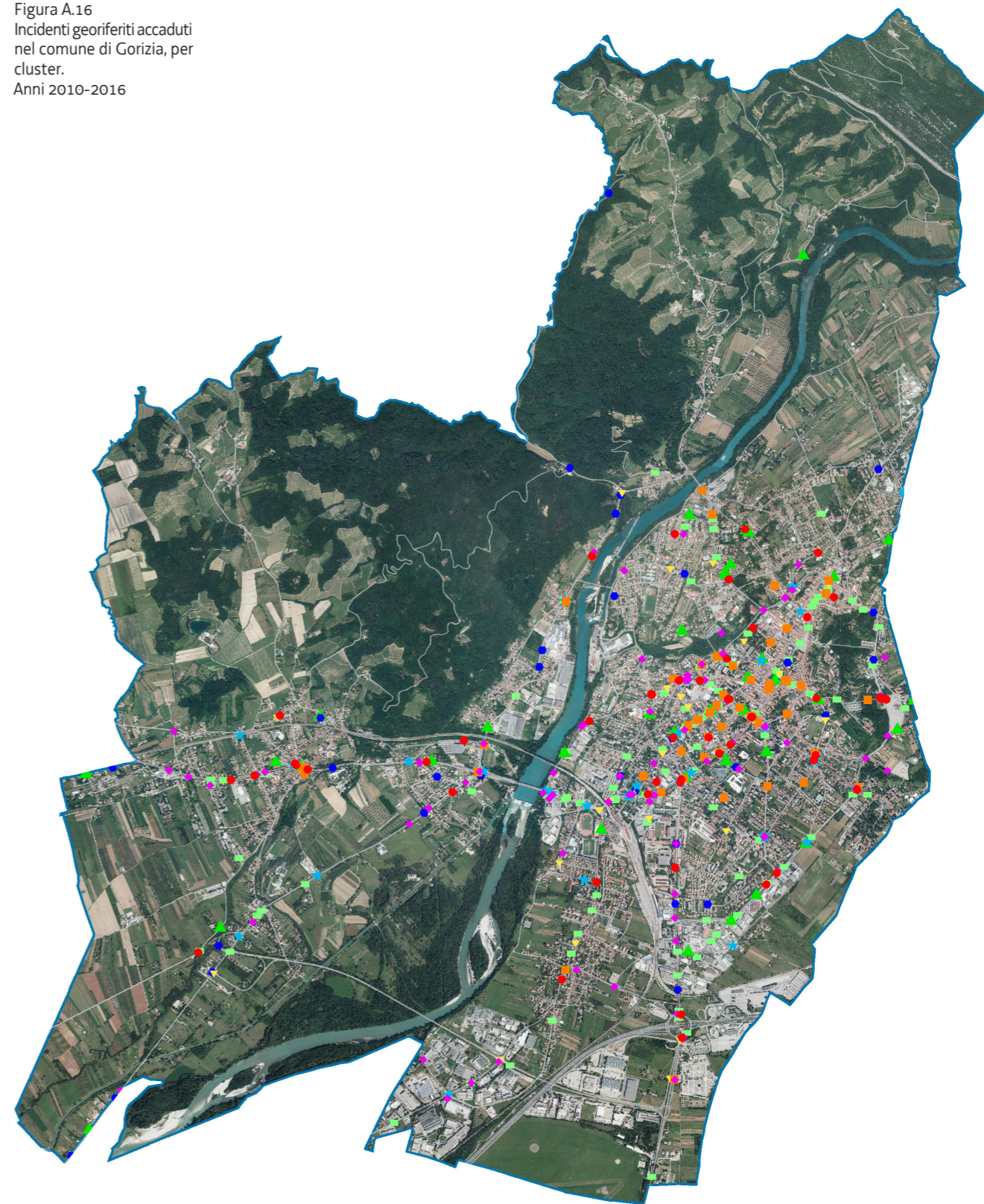
Fonte: MITRIS

Nota: dati espressi in percentuale dei valori positivi per le variabili Notte, Weekend, Urbana, Intersezione, DALY grave, valori medi per le altre.

LEGENDA

Cluster	Num.	Descrizione
●	1	56 Incidenti nel weekend presso intersezioni
◆	2	97 Incidenti senza biciclette né motoveicoli nei giorni feriali presso intersezioni
■	3	64 Investimenti di pedoni
★	4	47 Incidenti con biciclette nei giorni feriali presso intersezioni
▼	5	52 Incidenti con motoveicoli nei giorni feriali presso intersezioni
◆	6	35 Incidenti nel weekend lontano da intersezioni
▲	7	40 Incidenti con motoveicoli nei giorni feriali lontano da intersezioni
■	8	123 Incidenti senza motoveicoli nei giorni feriali lontano da intersezioni

Figura A.16
Incidenti georiferiti accaduti nel comune di Gorizia, per cluster. Anni 2010-2016



Fonte: MITRIS

TRIESTE

PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEI CLUSTER

Tabella A.6
Principali caratteristiche dei cluster individuati relativamente agli incidenti georiferiti accaduti nel comune di Trieste. Anni 2010-2016

Cluster	Notte	Weekend	Urbana	Intersezioni	DALY grave	Veicoli	Feriti	Morti	Pedoni	Auto	Bici	Moto	Camion
1	14,75	100,00	94,67	100,00	1,23	2,07	1,24	0,00	0,12	1,20	0,03	0,68	0,05
2	10,53	0,00	86,22	0,00	0,25	2,11	1,45	0,02	0,00	1,75	0,07	0,00	0,22
3	6,36	0,00	97,66	100,00	0,26	2,05	1,19	0,00	0,04	1,09	0,03	0,75	0,13
4	4,03	0,00	97,58	25,40	2,22	1,02	1,06	0,02	1,03	0,73	0,01	0,14	0,10
5	16,56	100,00	85,94	0,00	1,25	1,75	1,30	0,01	0,24	1,13	0,06	0,46	0,05
6	7,49	0,00	95,17	0,00	1,00	1,91	1,12	0,01	0,02	0,69	0,00	1,08	0,09

Fonte: MITRIS

Nota: dati espressi in percentuale dei valori positivi per le variabili Notte, Weekend, Urbana, Intersezione, DALY grave, valori medi per le altre.

LEGENDA

Cluster	Num.	Descrizione
●	1	244 Incidenti nel weekend presso intersezioni
◆	2	399 Incidenti senza motoveicoli nei giorni feriali lontano da intersezioni
■	3	770 Incidenti nei giorni feriali presso intersezioni
★	4	496 Investimenti di pedoni nei giorni feriali
▼	5	320 Incidenti nel weekend lontano da intersezioni
◆	6	601 Incidenti con motoveicoli nei giorni feriali lontano da intersezioni



Figura A.17
Incidenti georiferiti accaduti nel comune di Trieste, cluster 1 (incidenti nel weekend presso intersezioni). Anni 2010-2016

Fonte: MITRIS

Figura A.18
Incidenti georiferiti accaduti
nel comune di Trieste, cluster
2 (incidenti senza motoveicoli
nei giorni feriali lontano da
intersezioni).
Anni 2010-2016



Fonte: MITRIS

Figura A.19
Incidenti georiferiti accaduti
nel comune di Trieste, cluster
3 (incidenti nei giorni feriali
presso intersezioni).
Anni 2010-2016



Fonte: MITRIS

Figura A.20
Incidenti georiferiti accaduti
nel comune di Trieste, cluster
4 (investimenti di pedoni nei
giorni feriali).
Anni 2010-2016



Fonte: MITRIS

Figura A.21
Incidenti georiferiti accaduti
nel comune di Trieste, cluster
5 (incidenti nel weekend
lontano da intersezioni).
Anni 2010-2016



Fonte: MITRIS

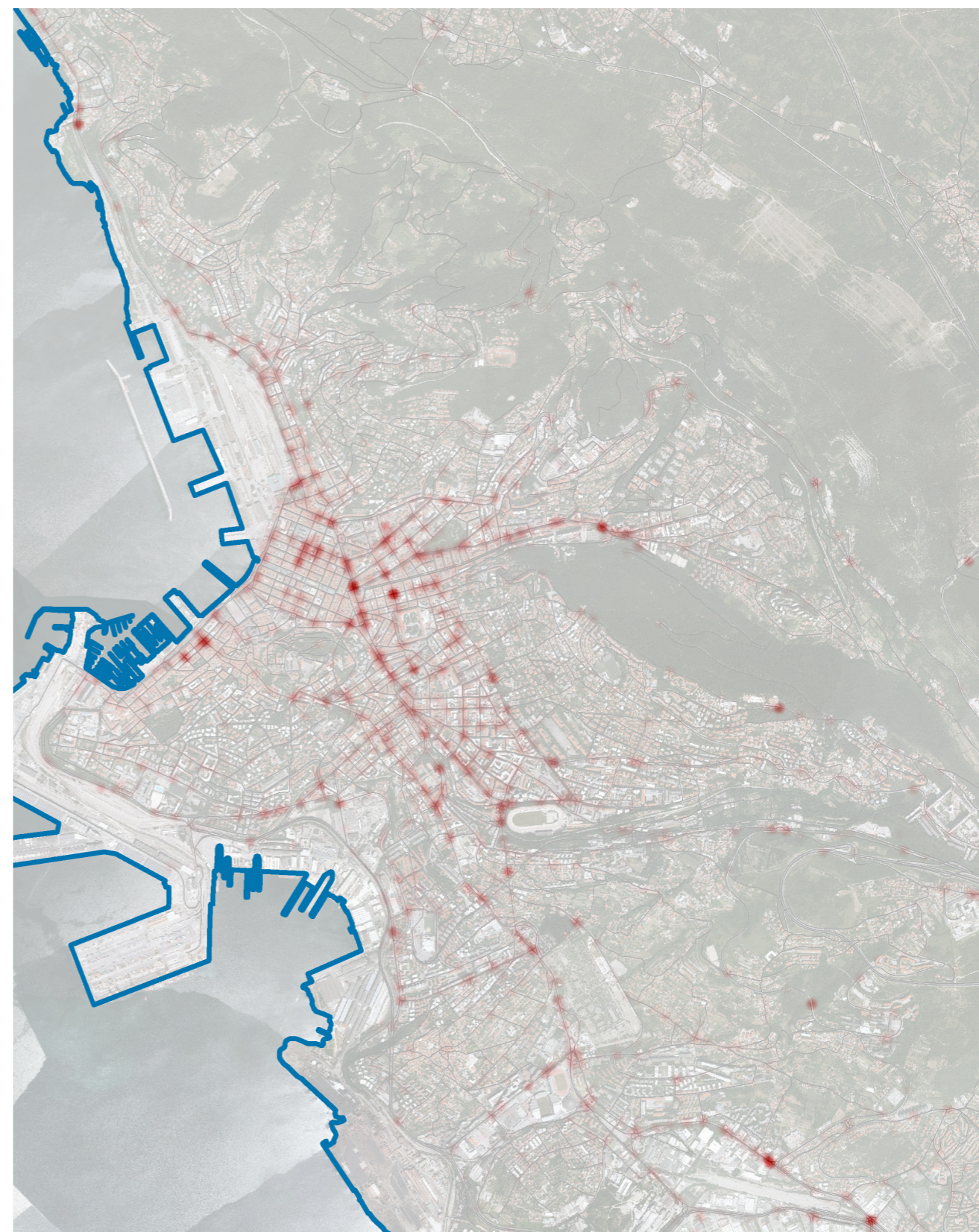
Figura A.22
Incidenti georiferiti accaduti
nel comune di Trieste, cluster 6
(Incidenti con motoveicoli
nei giorni feriali lontano da
intersezioni).
Anni 2010-2016



Fonte: MITRIS

HEAT MAP - TRIESTE

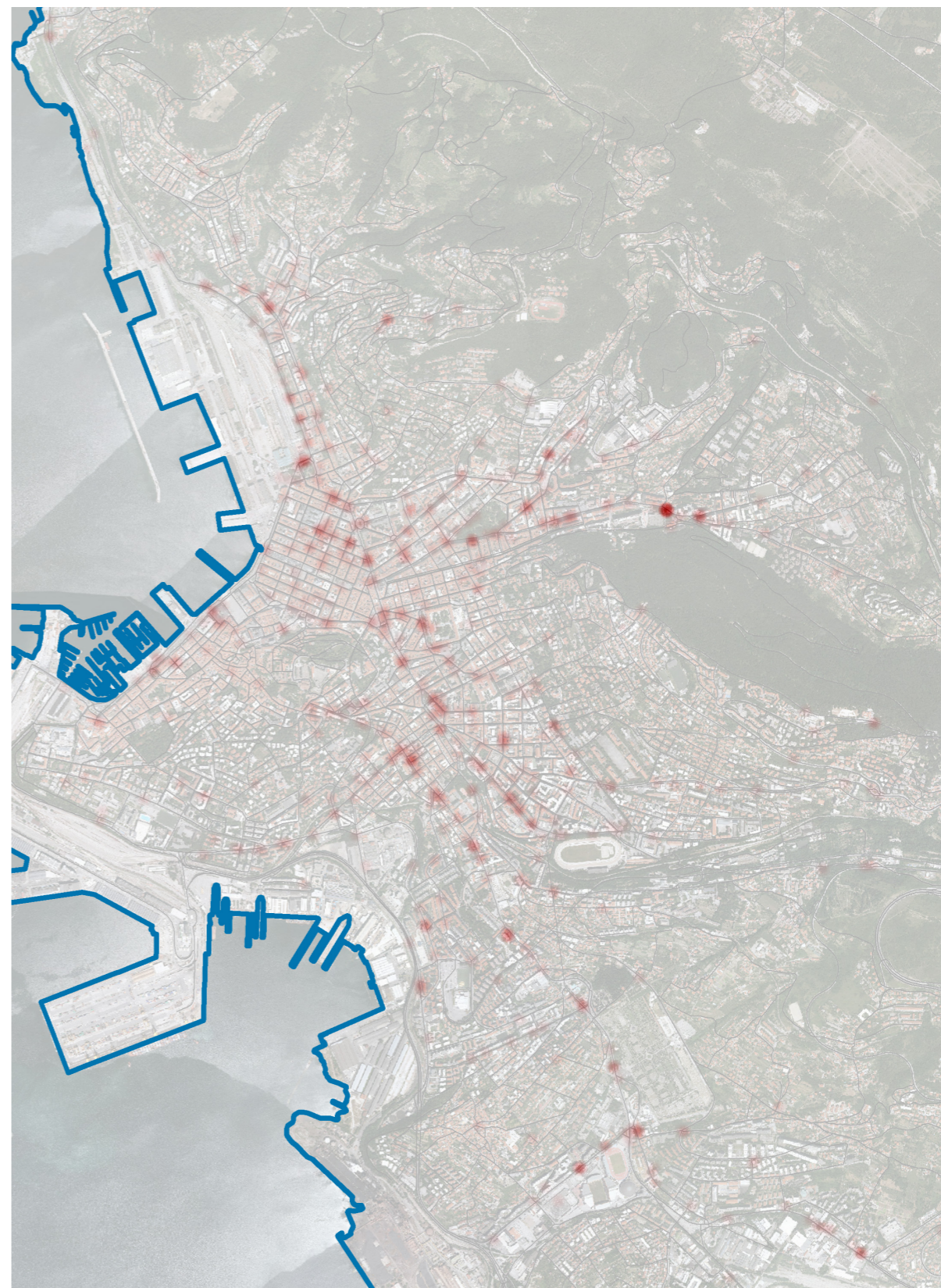
INCIDENTI COMPLESSIVI



INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI BICICLETTE

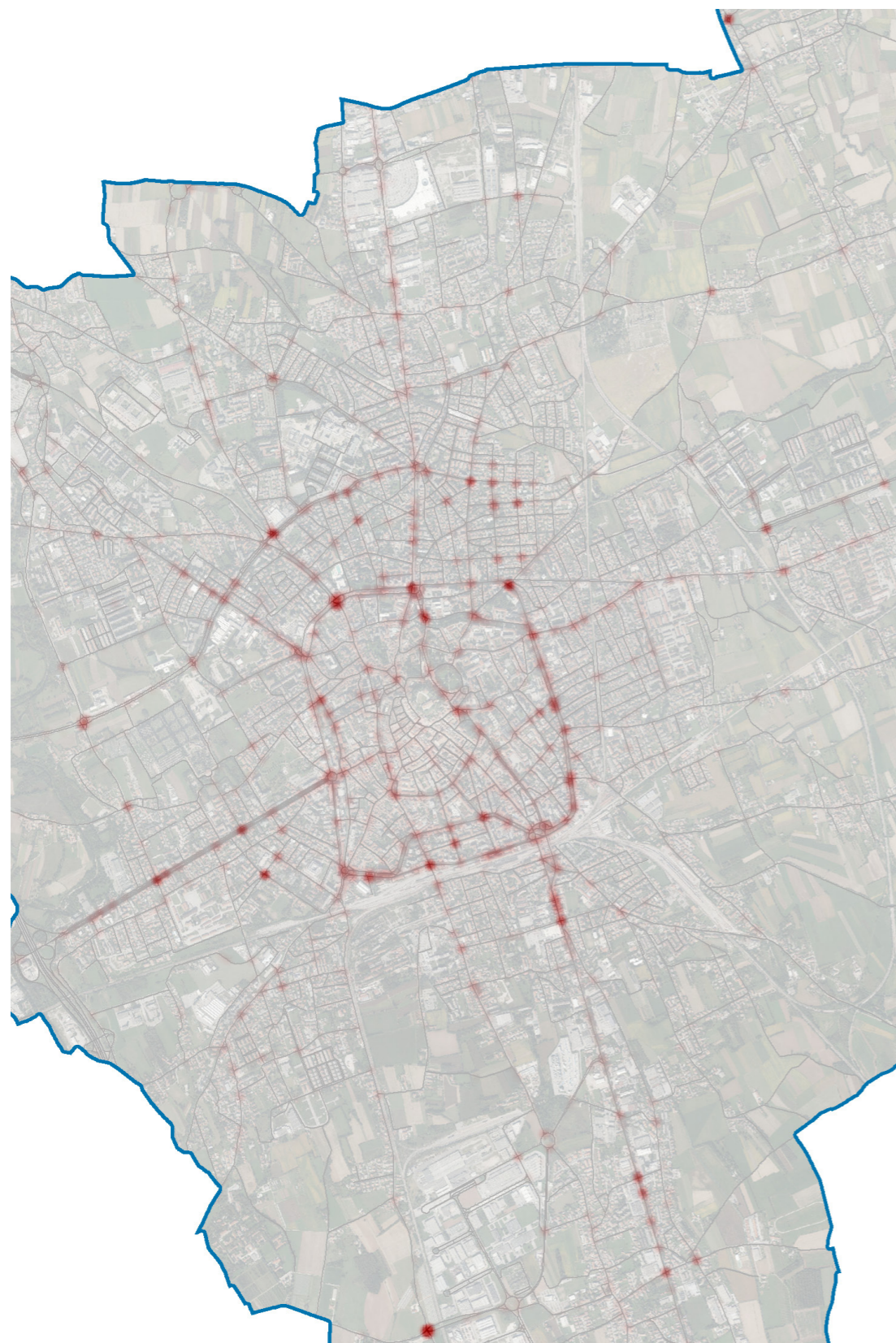


INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI PEDONI

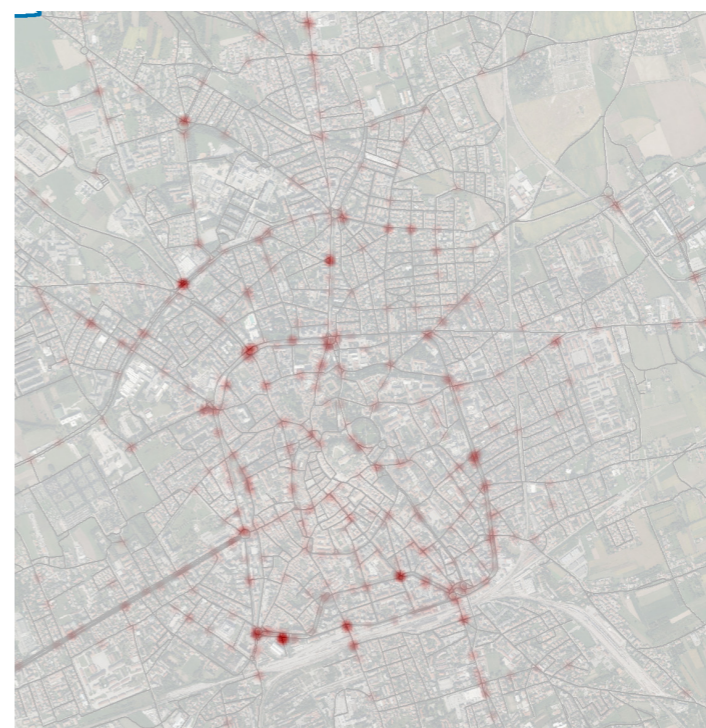


UDINE

INCIDENTI COMPLESSIVI



INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI BICICLETTE

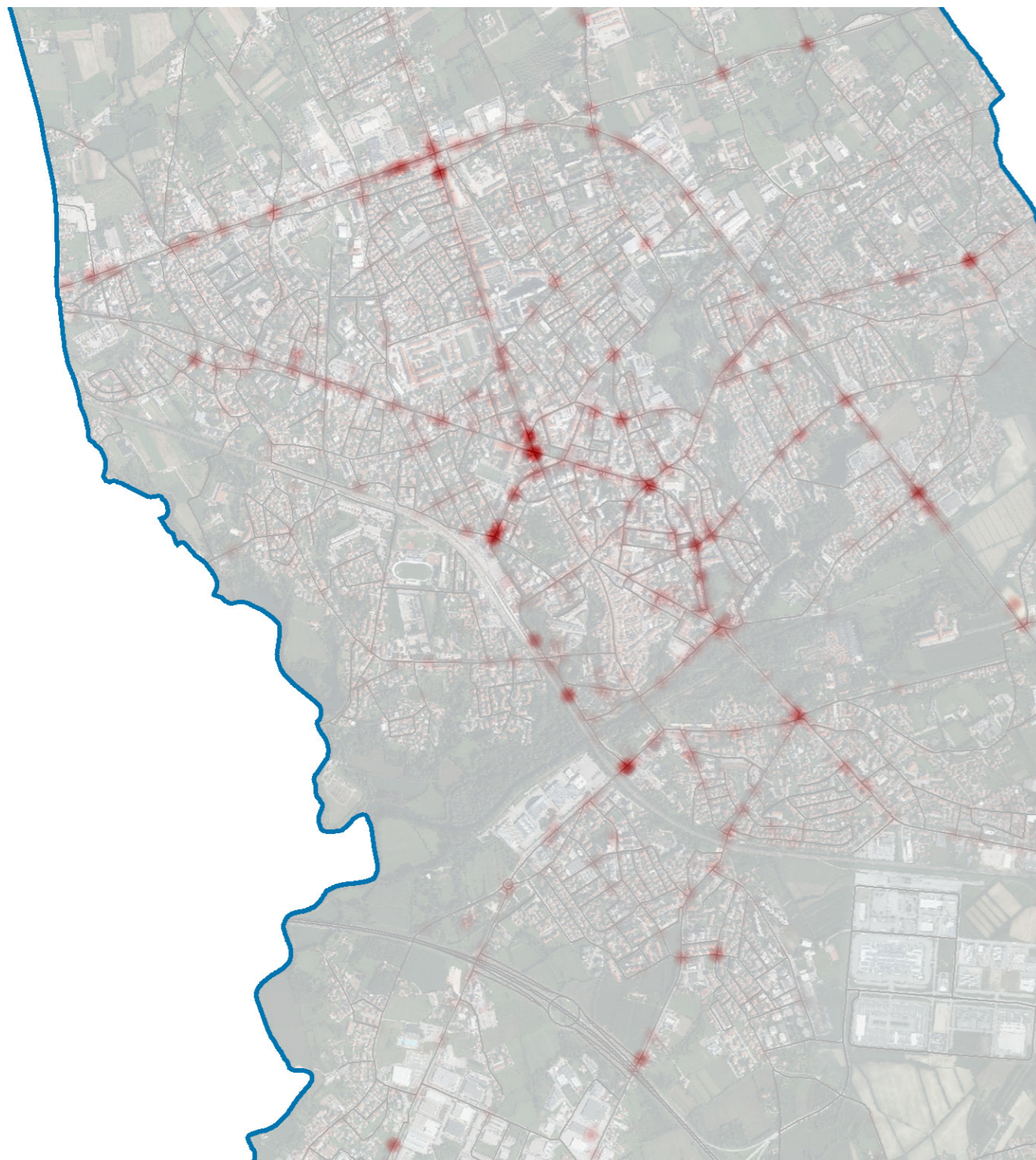


INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI PEDONI



PORDENONE

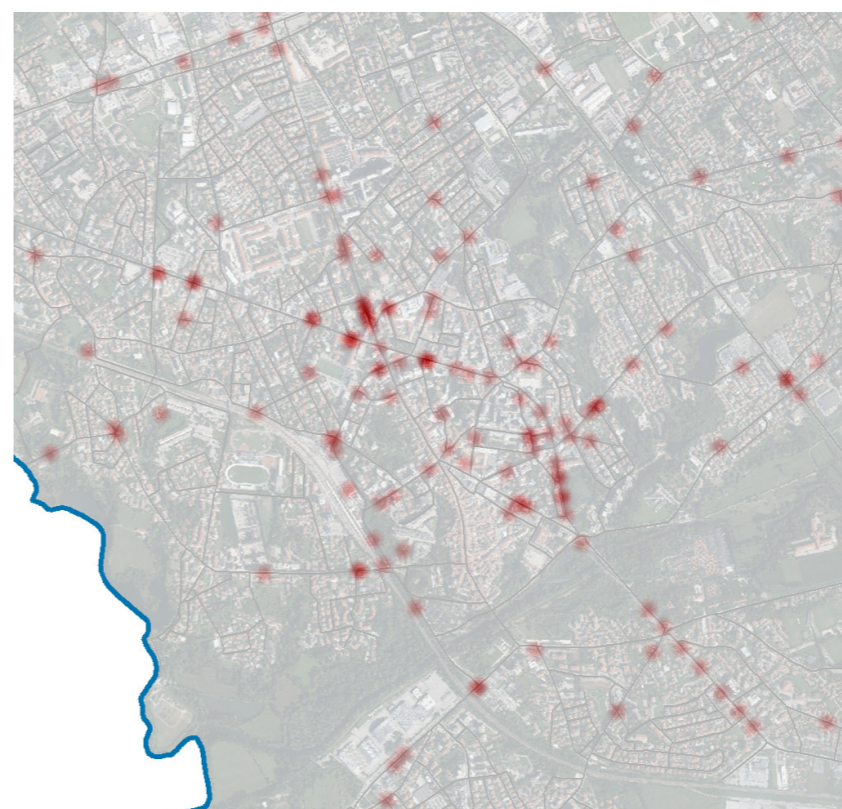
INCIDENTI COMPLESSIVI



INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI BICICLETTE

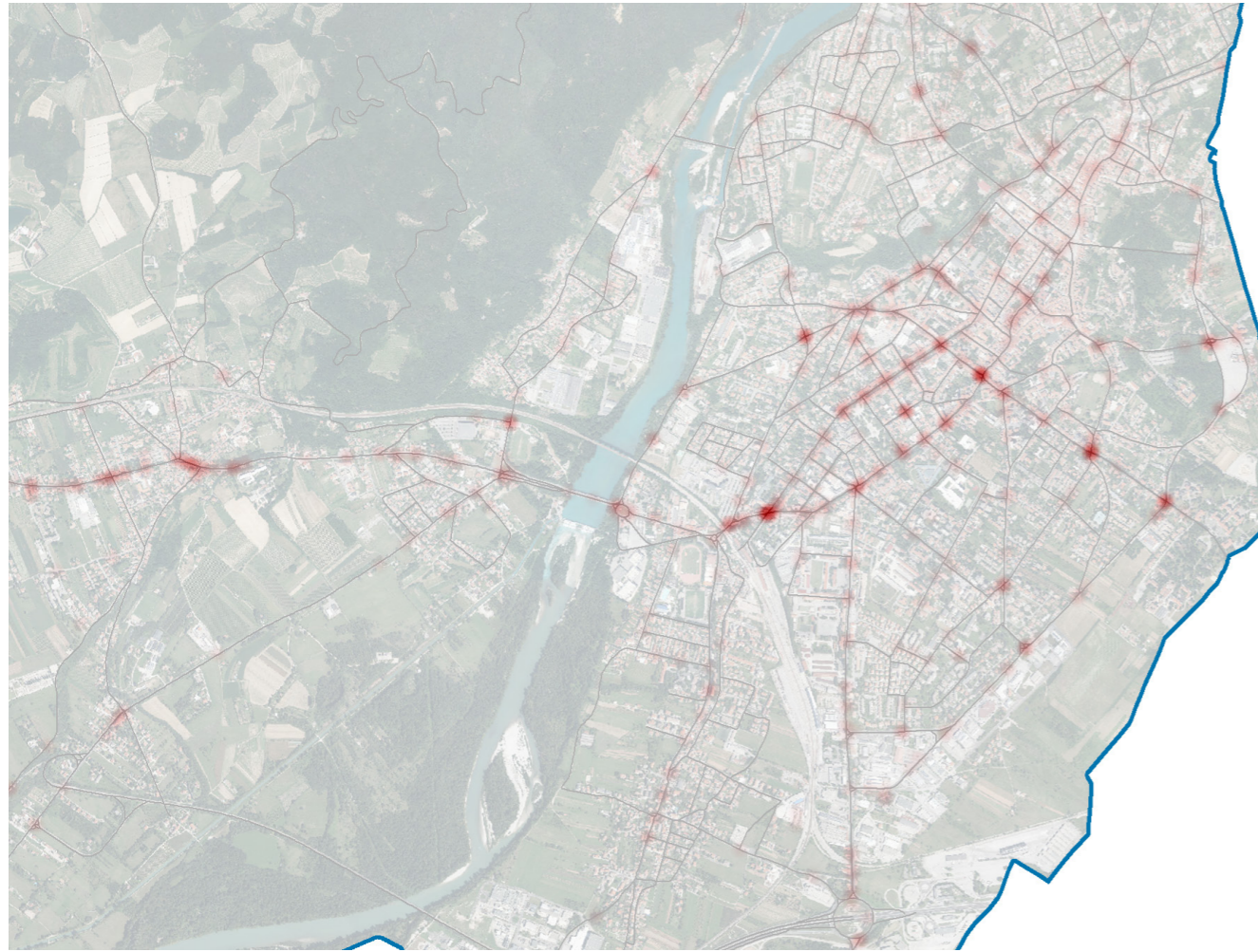


INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI PEDONI

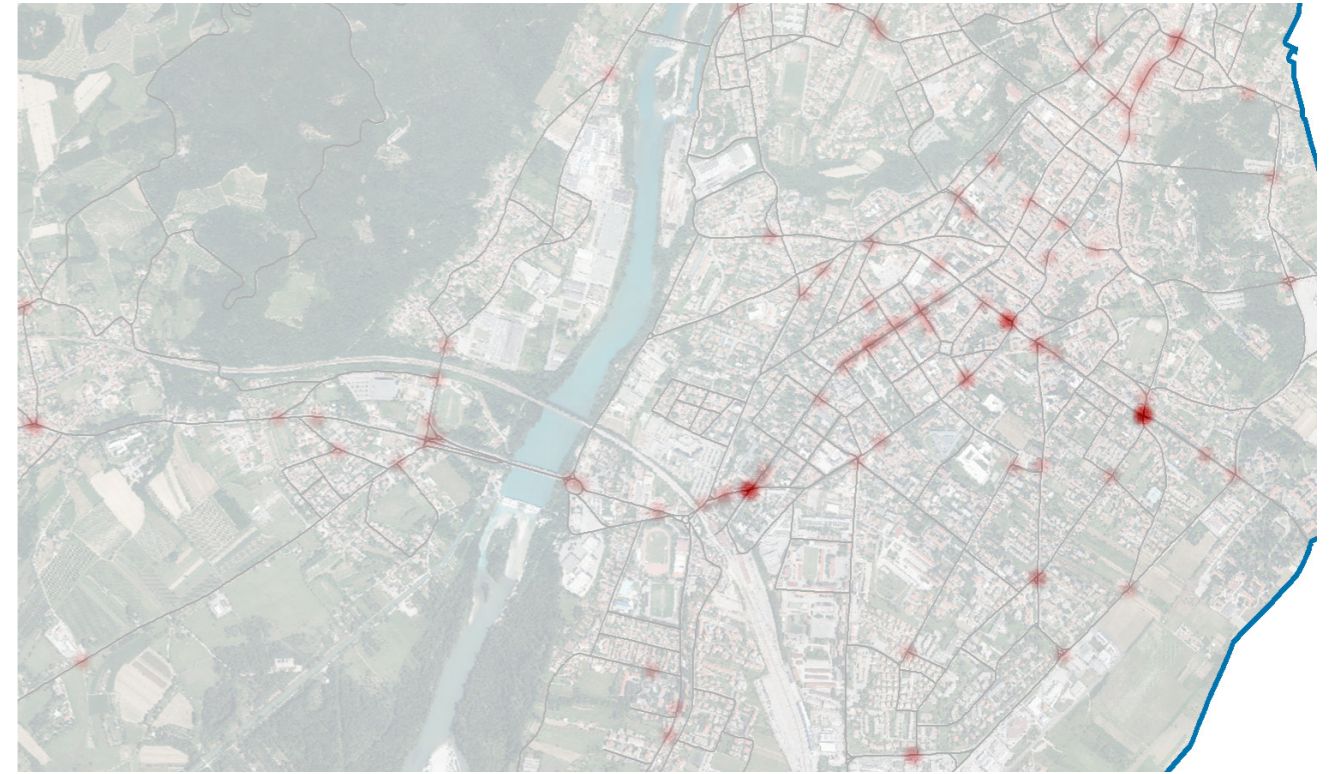


GORIZIA

INCIDENTI COMPLESSIVI



INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI BICICLETTE

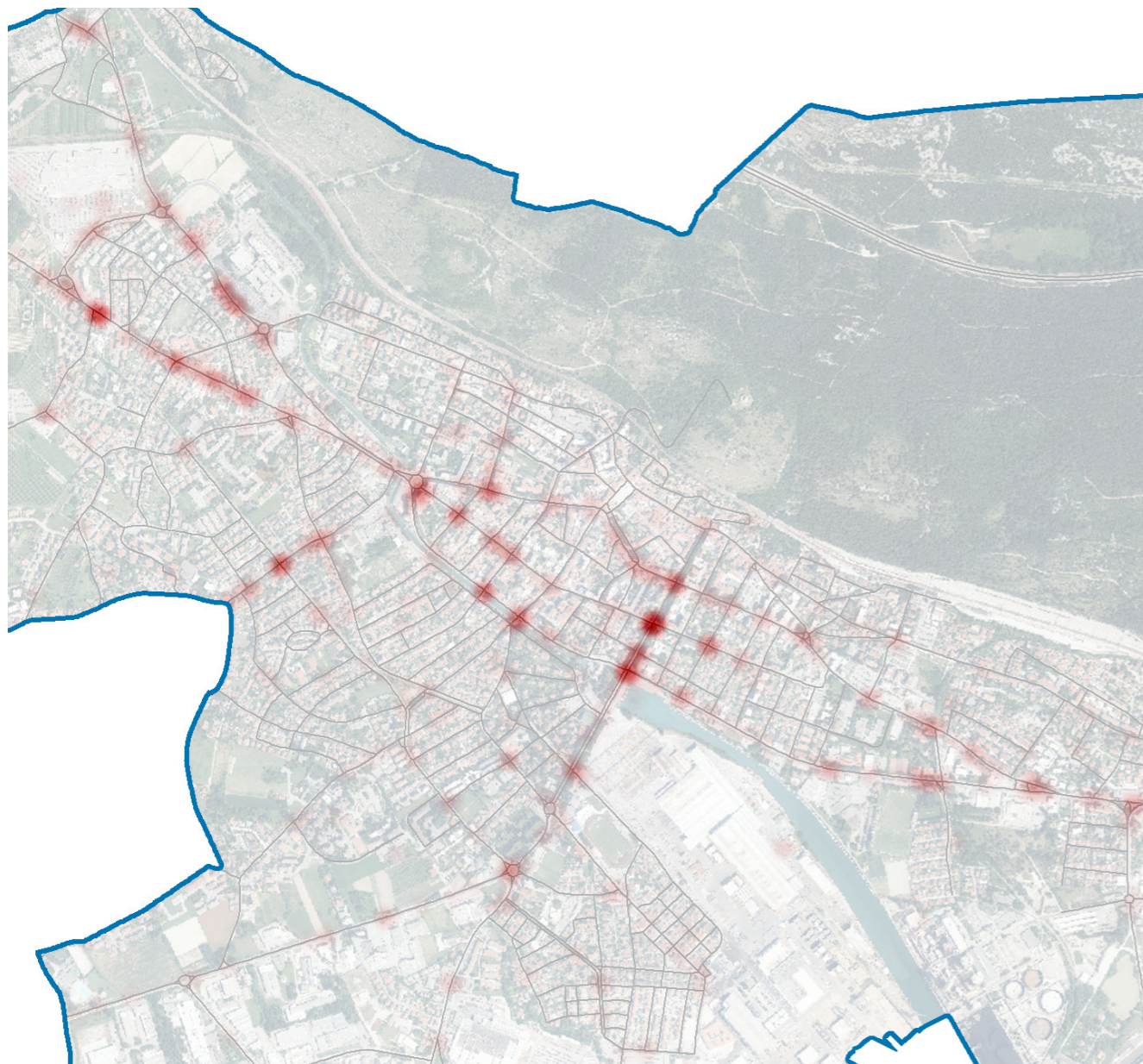


INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI PEDONI

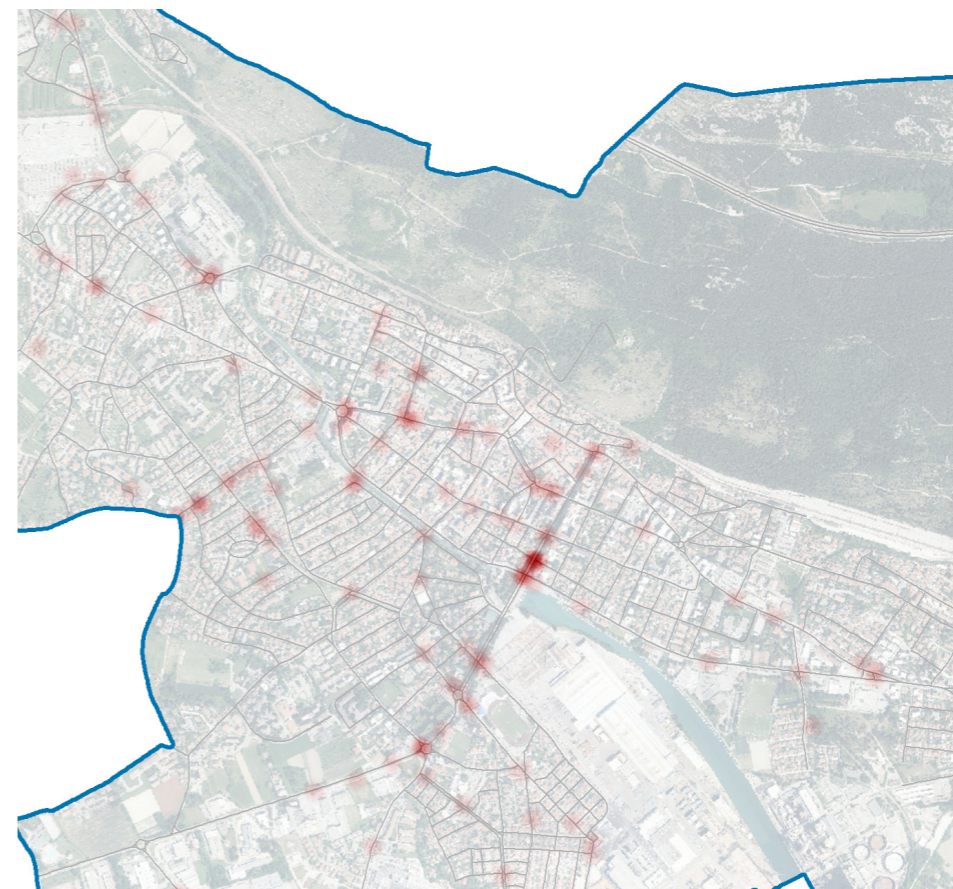


MONFALCONE

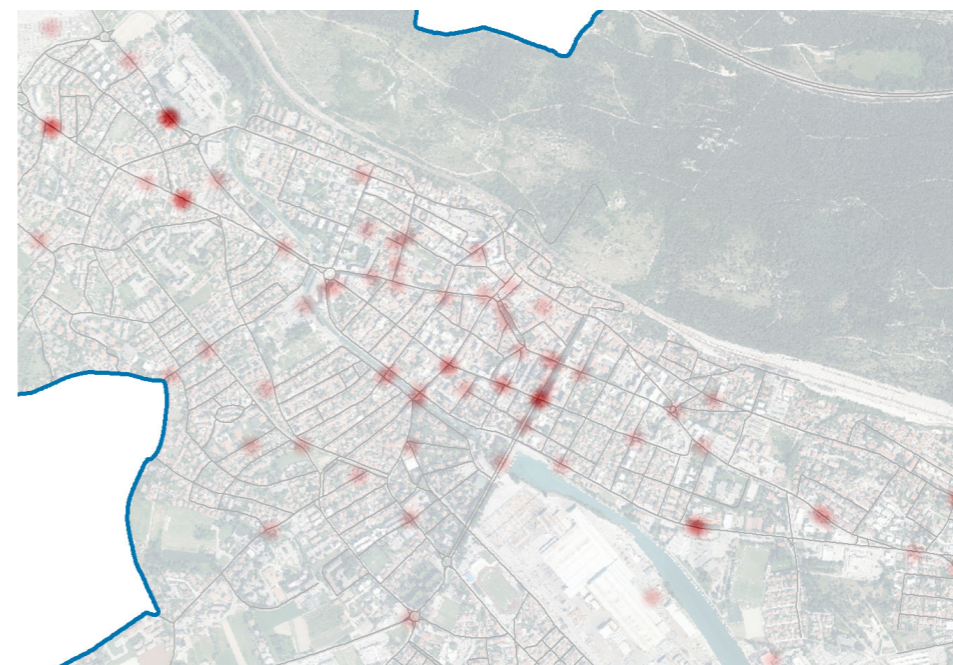
INCIDENTI COMPLESSIVI



INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI BICICLETTE

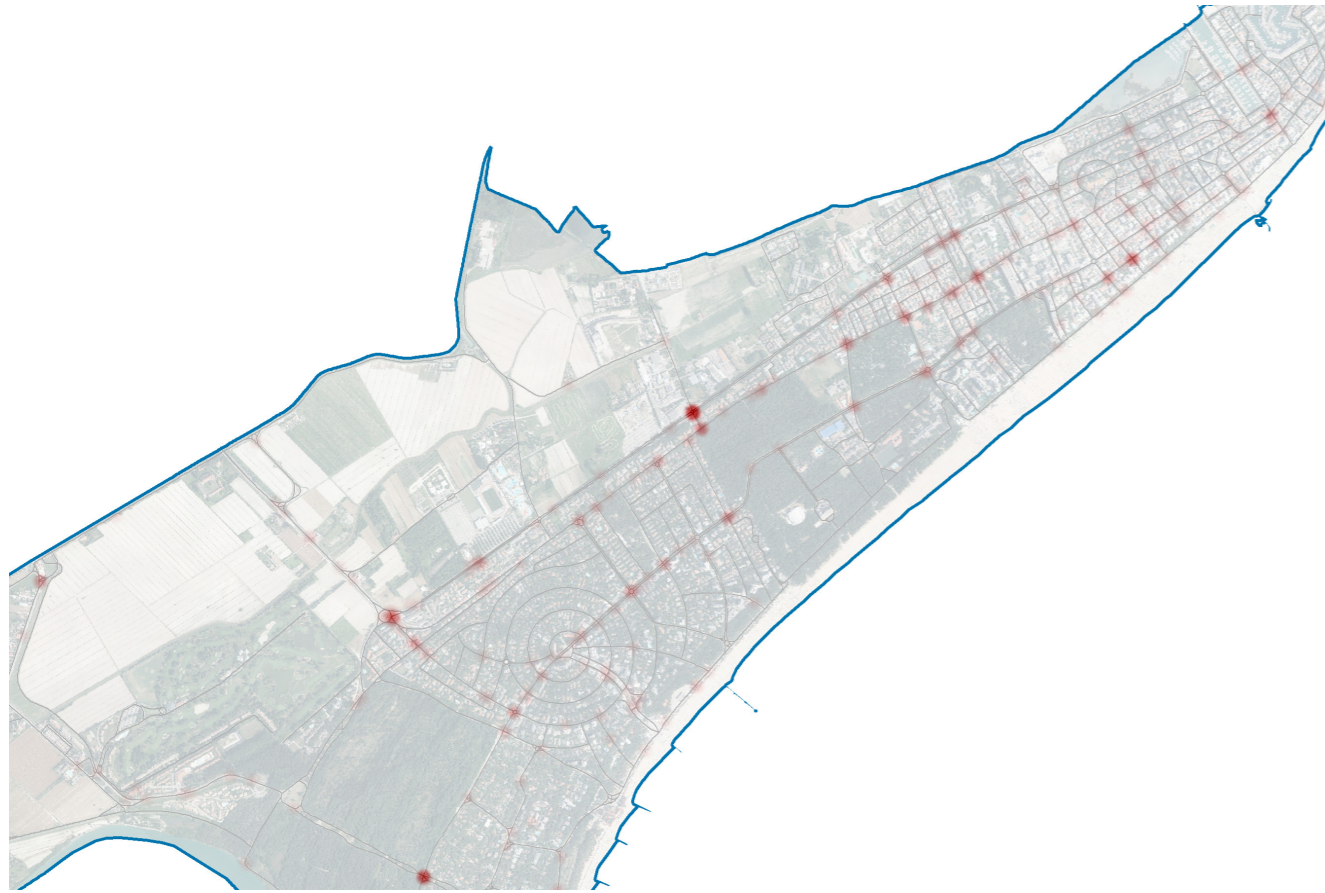


INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI PEDONI



LIGNANO SABBIAADORO

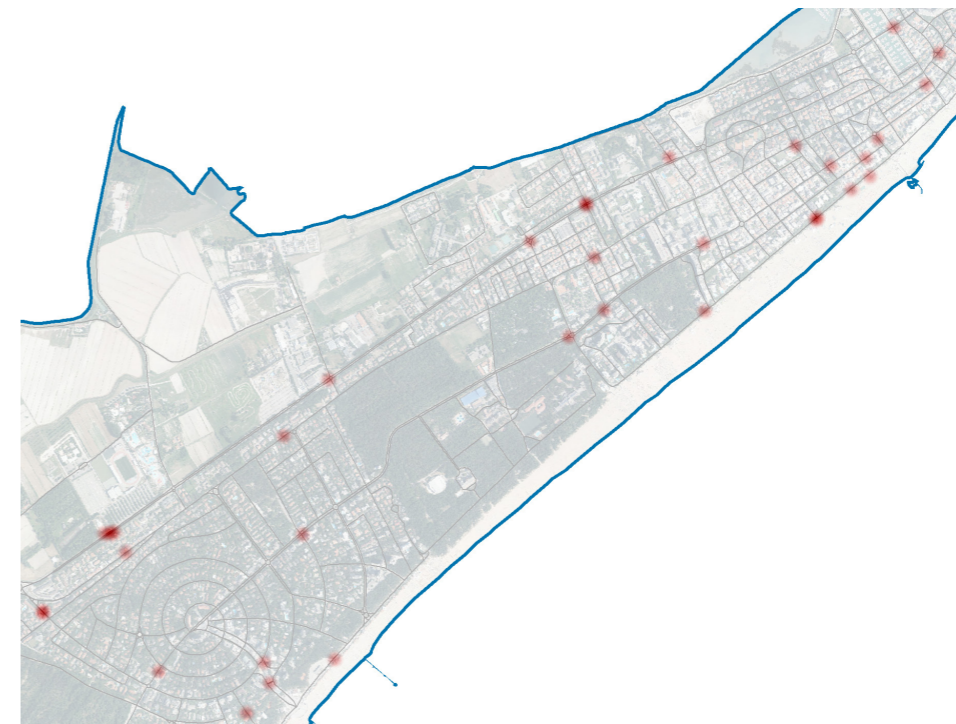
INCIDENTI COMPLESSIVI



INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI BICICLETTE



INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI PEDONI



SACILE

INCIDENTI COMPLESSIVI



INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI BICICLETTE



INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI PEDONI



CORDENONS

INCIDENTI COMPLESSIVI



INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI BICICLETTE

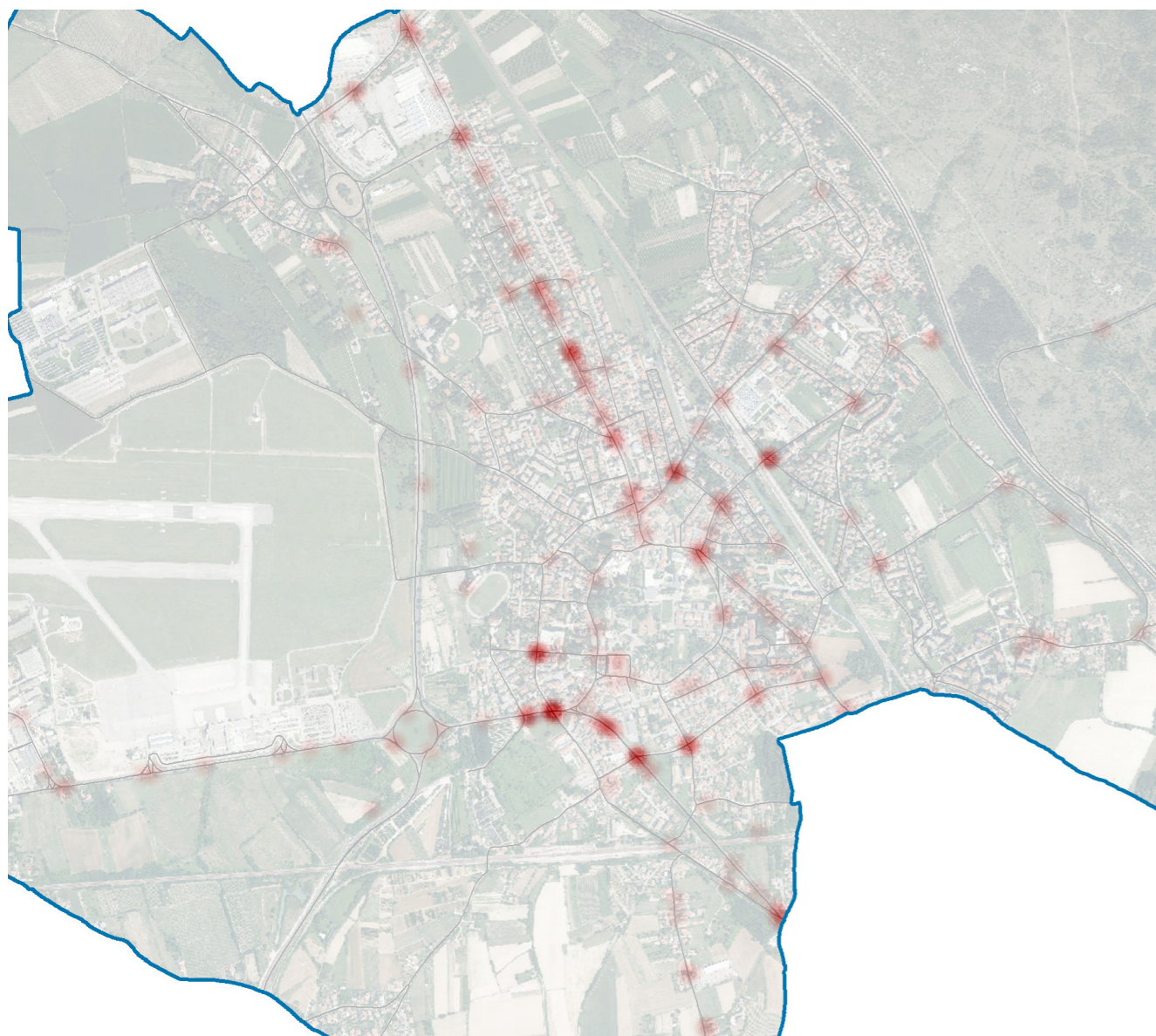


INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI PEDONI

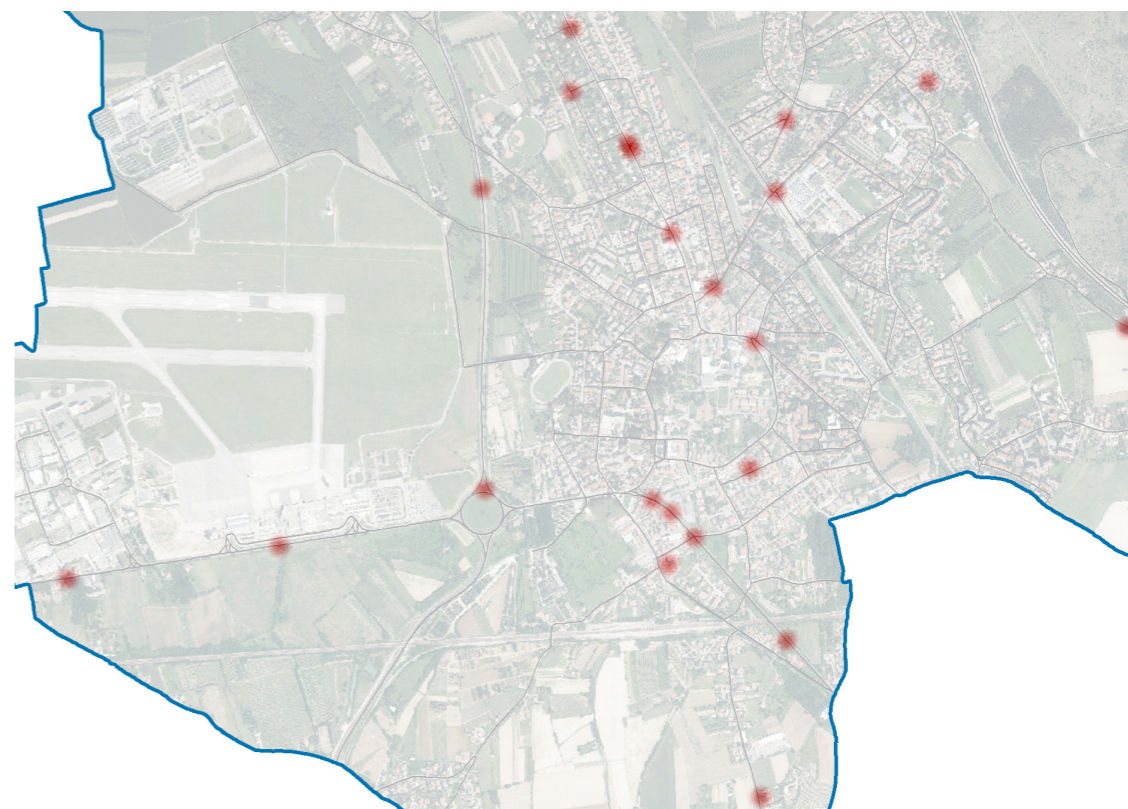


RONCHI DEI LEGIONARI

INCIDENTI COMPLESSIVI



INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI BICICLETTE



INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI PEDONI



CODROIPO

INCIDENTI COMPLESSIVI



INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI BICICLETTE

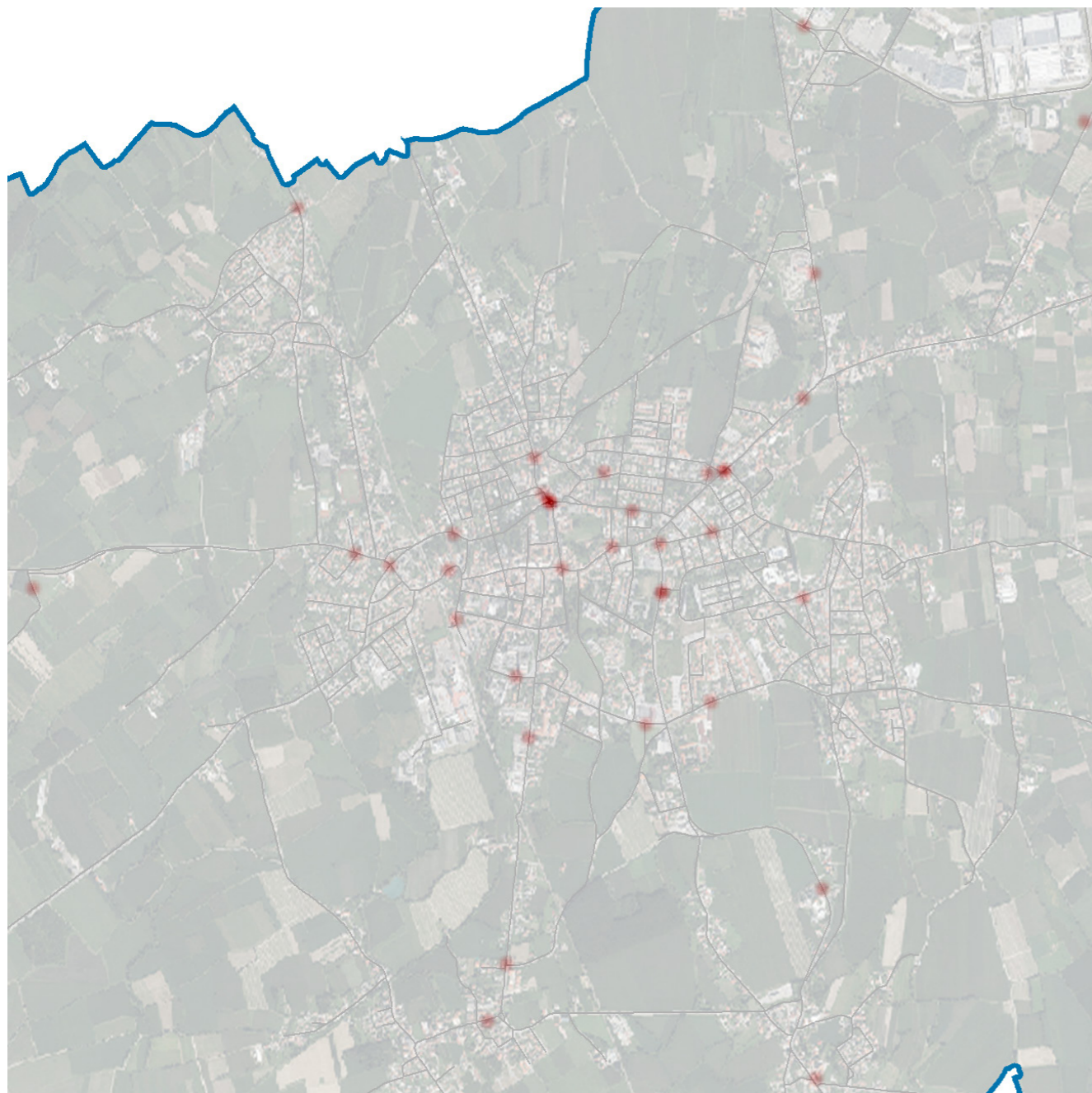


INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI PEDONI

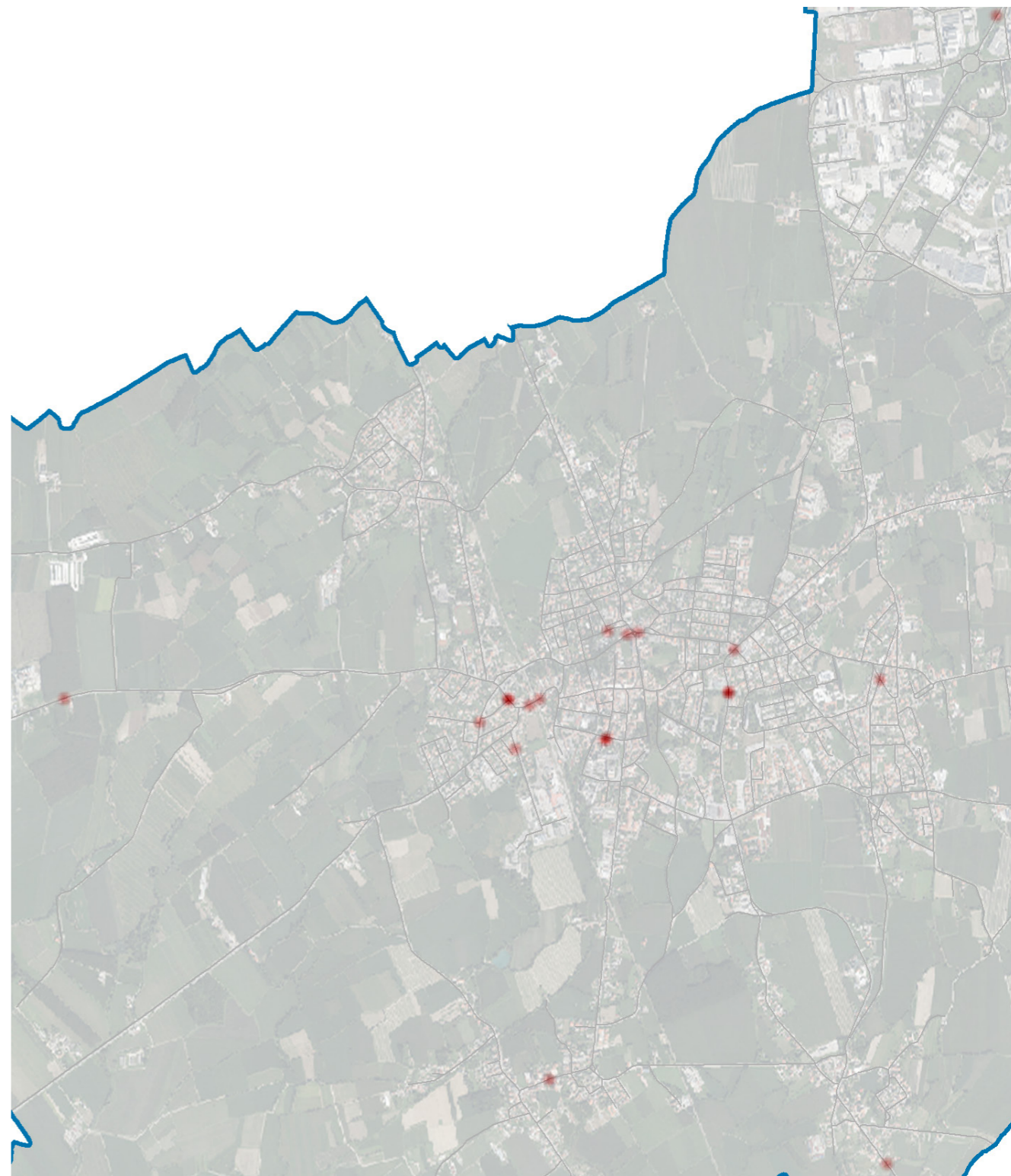


SAN VITO AL TAGLIAMENTO

INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI BICICLETTE

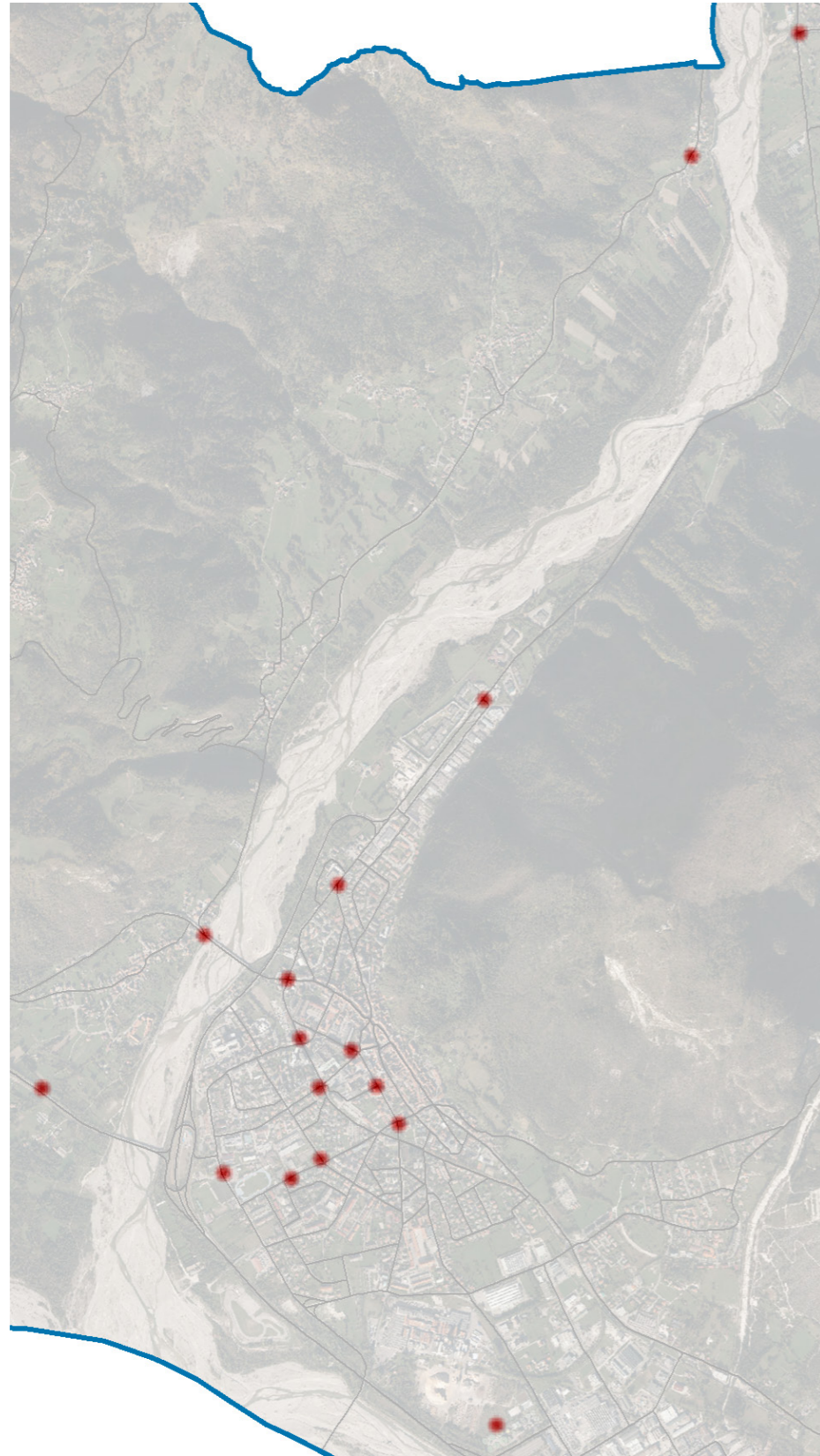


INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI PEDONI

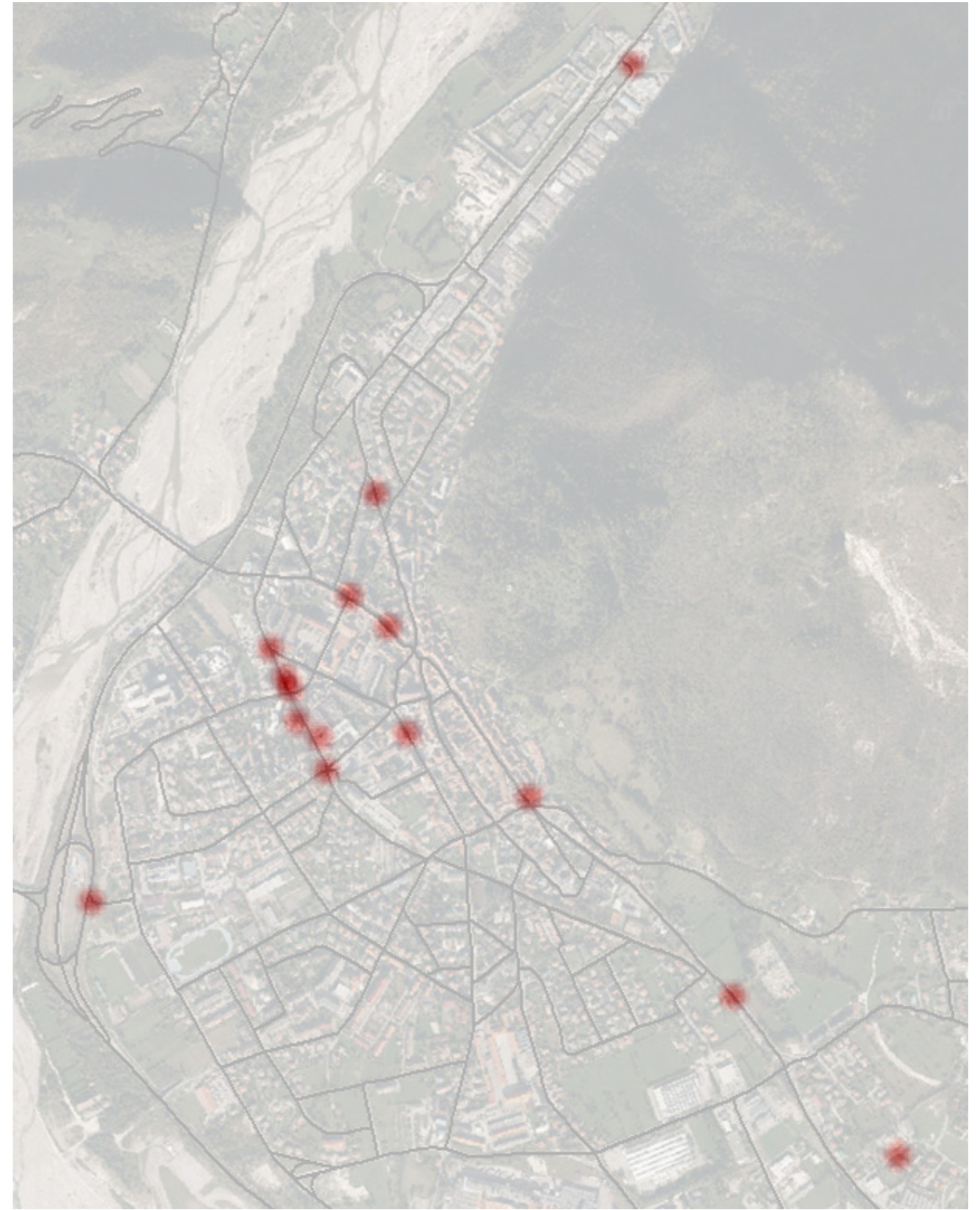


TOLMEZZO

INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI BICICLETTE



INCIDENTI CON COINVOLGIMENTO DI PEDONI





INCIDENTALITÀ STRADALE SULLA RETE DI COMPETENZA DI FVG STRADE – ANALISI AGGREGATA E MODELLAZIONE PREDITTIVA

PROF. AGGR. ING. NICOLA BALDO

DOTT. ING. MARCO STEFANUTTI

DOTT. ANDREA GHIGLIANOVICH

Sommario

La sicurezza in campo stradale risulta tutt'oggi un argomento di grande interesse, sia dal punto di vista tecnico-scientifico, che da quello socio-economico. Negli ultimi trent'anni l'Europa ha intrapreso in tale ambito un percorso di miglioramento, articolato in una serie di programmi decennali, con cui si è impegnata a diminuire significativamente l'incidentalità stradale, con particolare riguardo al numero di vittime sulla strada. In questo contesto la società FVG Strade, fin dalla sua costituzione (ovvero dal 2008), ha inserito nella programmazione delle sue opere la trasformazione di diverse intersezioni a raso, semaforizzate e non, in intersezioni a rotatoria.

In questo studio si è voluta comparare l'incidentalità ante e post operam rilevata in una serie di intersezioni localizzate nel territorio regionale, mediante un'analisi aggregata basata su alcuni specifici indicatori incidentali. Sono stati inoltre elaborati dei modelli predittivi dell'incidentalità per le intersezioni considerate, mediante l'approccio matematico delle reti neurali artificiali; tali modelli sono risultati più flessibili ed accurati di quelli implementati nell'Highway Safety Manual (HSM - manuale statunitense sulla sicurezza stradale). Infine, sempre per mezzo delle reti neurali artificiali, è stata sviluppata un'ulteriore famiglia di modelli predittivi dell'incidentalità per le intersezioni trasformate in rotatoria.

Tali modelli potranno essere utilizzati dal progettista come razionale strumento di supporto delle decisioni, al fine di ottimizzare le scelte progettuali in funzione delle priorità e delle risorse economiche a disposizione, con lo scopo ultimo di diminuire il più possibile il costo sociale legato all'evento incidentale.

Introduzione

L'infrastruttura stradale costituisce un sistema notevolmente complesso, progettato per soddisfare la domanda di trasporto degli utenti in una ideale condizione di equilibrio, caratterizzata dal minimo rischio. Qualora i diversi elementi che costituiscono tale infrastruttura dovessero interagire in un modo anomalo e tale da compromettere la condizione di equilibrio, si potrebbe verificare, in casi limite, una situazione incidentale. Per comprendere l'origine della sinistrosità stradale risulta quindi necessario analizzare attentamente l'insieme di fattori "uomo-veicolo-strada-ambiente", che interagiscono mutuamente come illustrato in Figura 1.

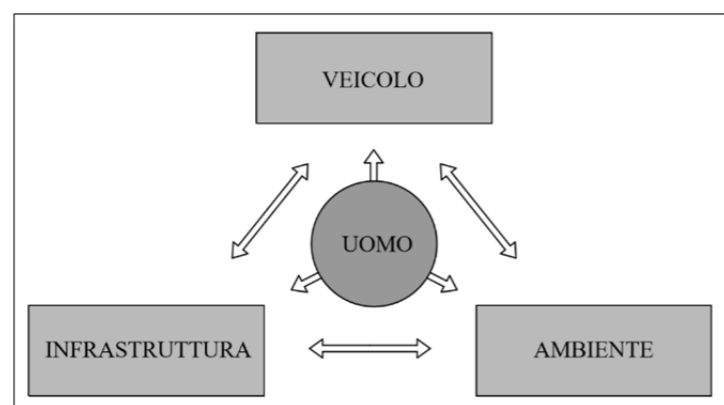


Figura 1 - Interazione uomo, veicolo, strada ed ambiente [1]

Il comportamento di guida dell'uomo, ossia dell'utente della strada, rappresenta una delle più rilevanti cause di sinistrosità. Il veicolo invece concorre a garantire la salvaguardia dei passeggeri, principalmente in termini di sicurezza passiva. L'infrastruttura stradale ha un ruolo di primo piano,

poiché può influire in misura anche determinante sul comportamento di guida. L'ambiente, inteso come l'insieme degli elementi morfologici, paesaggistici e meteo-climatici in cui è inserita l'infrastruttura stradale, può incidere sulla percezione del tracciato, sia in modo positivo (favorevoli condizioni morfologiche del terreno), che negativo (avverse condizioni meteorologiche).

La corretta valutazione del livello di sicurezza di una infrastruttura stradale risulta quanto mai difficile, a causa della evidente imprevedibilità di variabili strategiche, come quelle comportamentali ed ambientali, che rendono estremamente complessa la modellazione del fenomeno incidentale.

Nello studio della sinistrosità quindi, per ovviare a tale problematica, l'approccio più comune prevede una classificazione della sicurezza in relazione al numero ed alla gravità degli incidenti. Tale approccio, peraltro affetto da un sensibile grado di incertezza, si limita tuttavia all'identificazione dei cosiddetti "punti neri" della rete stradale, ossia dei siti caratterizzati da spiccate criticità incidentali. Risulta invece necessaria una metodologia che vada oltre la mera identificazione dei punti neri e che consenta una analisi quantitativa, di natura predittiva, del fenomeno incidentale, in modo da poter formulare preventivamente una attendibile valutazione della sicurezza dell'infrastruttura stradale in esame, come peraltro suggeriscono le "Linee guida per l'analisi di sicurezza delle strade" del 2001 [2]:

"Considerato che l'infrastruttura stradale è, insieme all'uomo ed al veicolo, uno dei tre elementi della circolazione stradale e che le carenze che la stessa può presentare, sia per difetti di progettazione sia per difetti di esercizio, possono essere causa o concausa dell'incidentalità stradale, è necessario che l'azione di prevenzione sia svolta, con attenzione e tempestività, da parte di tutti gli enti proprietari e gestori di strade. Non è infatti sufficiente limitarsi ad una rilevazione a posteriori dei cosiddetti "punti neri", intervenendo per la loro eliminazione solo dopo che in quei punti si sono verificati e ripetuti incidenti stradali con perdite di vite umane. È necessaria una verifica preventiva della sicurezza stradale, riconoscendo e valutando le condizioni di rischio potenziale per la circolazione stradale con particolare attenzione al punto di vista dell'utente della strada."

Nel presente studio si sono analizzati gli eventi incidentali verificatisi nei siti in cui vi è stata la trasformazione dell'intersezione a raso, in rotatoria, considerando sia la frequenza che la severità incidentale, in modo da poter valutare i benefici ottenuti dall'intervento infrastrutturale. Sono stati inoltre elaborati dei modelli predittivi di incidentalità, avvalendosi di un approccio computazionale avanzato, basato sulle reti neurali artificiali.

1. I dati di incidentalità nella regione FVG – Il sistema MITRIS

La regione Friuli Venezia Giulia con la LR 25/2004 ha istituito il Centro di Monitoraggio della Sicurezza Stradale (CRMSS) e ha elaborato il sistema MITRIS, nel cui database confluiscono tutti i dati inerenti gli incidenti stradali rilevati dalle forze dell'ordine e dalle polizie municipali. Attraverso la piattaforma GeoMedia Smart Client è poi possibile individuare sulla mappa regionale gli incidenti che sono stati caricati nel sistema MITRIS.

È doveroso precisare come gli eventi incidentali registrati e presenti nel sistema siano esclusivamente quelli in cui, a seguito del sinistro, sono sopraggiunte le Forze dell'Ordine. Pertanto non vi è alcuna traccia di tutti quegli episodi incidentali di piccola entità, spesso risolti tramite "constatazione amichevole", per i quali le FF. dell'OO. solitamente non intervengono. Inoltre va precisato che, per l'assenza o l'incongruenza di dati fondamentali nei verbali riguardanti la localizzazione dell'evento incidentale, ci sono incidenti non georeferenziabili e quindi non consultabili attraverso il sistema MITRIS nella piattaforma Geomedia Smart Client.

Una volta individuato sulla mappa un evento incidentale, è possibile disporre di una serie di informazioni, quali:

- tipo di incidente;
- data e ora dell'incidente;
- condizioni del manto stradale al momento dell'incidente;
- numero di feriti, di morti e di veicoli coinvolti.

Nella Figura 2 è rappresentata, a titolo esemplificativo, l'interfaccia del sistema MITRIS; gli incidenti sono rappresentati con cerchi rossi. Vi sono comandi che consentono la rapida consultazione dei singoli eventi incidentali e l'estrazione di dati in forma tabellare secondo opportuni criteri di ricerca.

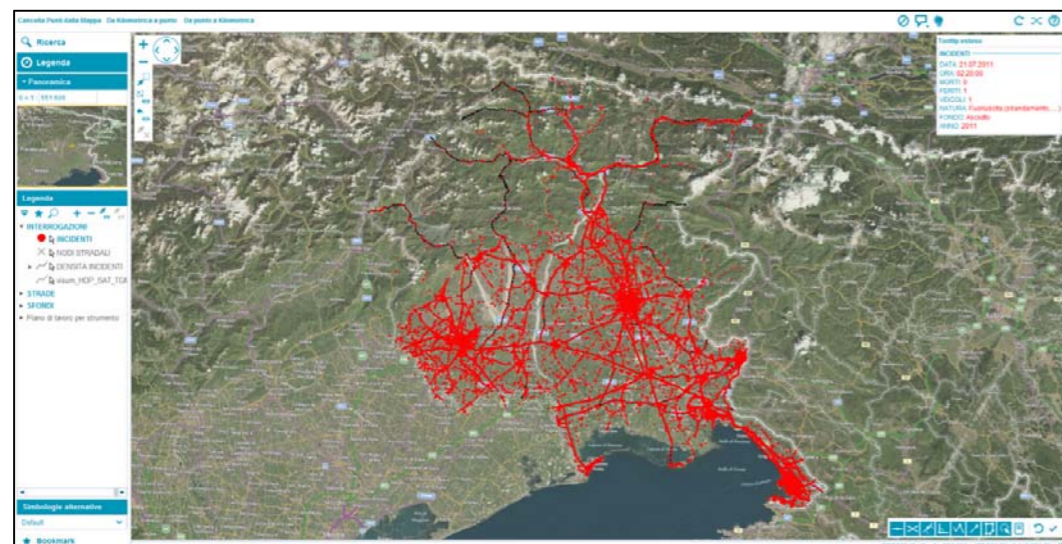


Figura 2 – Il sistema MITRIS in Geomedia Smart Client.

L'analisi di incidentalità è stata condotta ipotizzando che tutti gli incidenti verificatisi entro 150 m dal centro dell'area dell'intersezione, siano correlabili alla presenza dell'intersezione stessa (Figura 3).



Figura 3 – Identificazione dell'area di influenza di un'intersezione

Al momento della redazione dello studio il sistema MITRIS, che viene periodicamente aggiornato, conteneva tutti i dati di incidente dal 2006 fino al 2016 e dati parziali relativi al 2017.

La disponibilità dei dati di incidentalità costituisce una condizione preliminare nello studio della sicurezza stradale; tuttavia, per lo sviluppo di analisi più accurate sul fenomeno incidentale, risulta fondamentale reperire anche i dati relativi al flusso di traffico. Il parametro di riferimento per stimare efficacemente tale flusso veicolare prende il nome di traffico giornaliero medio (TGM); esso rappresenta il rapporto tra il numero di veicoli transitati in una data sezione stradale ed i giorni di osservazione.

In Italia sono presenti diversi sistemi di monitoraggio del traffico, prevalentemente sulla rete autostradale, costituiti da stazioni permanenti di rilevamento che acquisiscono dati 24 ore su 24. Per quanto riguarda le strade regionali del Friuli Venezia Giulia, la situazione risulta più complessa. Dal 2007 è possibile consultare il Piano Regionale per la Sicurezza Stradale (PRSS), elaborato per consentire di sviluppare un articolato sistema di indirizzi, misure e interventi finalizzati al miglioramento della sicurezza stradale; ancora oggi il PRSS è considerato come la fonte regionale più accreditata in materia di flussi di traffico. Tale piano infatti riporta in una serie di grafi i flussi veicolari dell'ora di punta e il TGM sulle principali strade della regione; tali flussi sono stati ottenuti attraverso una elaborazione di rilievi eseguiti nel 2005. La Figura 4 rappresenta un estratto di una tavola grafica del PRSS, in cui si possono osservare i valori di TGM ottenuti da rilievi ed elaborazioni matematiche, per le principali strade del FVG.



Figura 4 - Estratto del grafo stradale del PRSS [3] e del software VISUM

Dopo l'elaborazione del PRSS, sono stati assunti come riferimento per valutare il TGM, i dati di flusso veicolare rielaborati nel 2012 con il software Visum, inseriti successivamente nella piattaforma Geomedia Smart Client e pertanto facilmente consultabili in modo interattivo. Tale rielaborazione si basa sui rilievi dei flussi veicolari del 2005 già inseriti nel PRSS, con ulteriori calibrazioni attinenti alle misure di traffico eseguite automaticamente da 12 portali installati nel 2011 sulla rete di competenza di FVG Strade, nel quadrilatero Udine – Gorizia – Monfalcone – Cervignano; tali portali rilevano dal 2011, 24 ore su 24 e 7 giorni su 7, flussi e velocità veicolari.

Attualmente né la Regione, né Friuli Venezia Giulia Strade dispongono di una banca dati di flussi di traffico aggiornata annualmente; FVG Strade in particolare dispone solo di rilievi del flusso delle ore di punta in circa 170 postazioni per il 2012 e in circa 25 postazioni per il 2017. Tali rilevazioni, benché puntuali e riguardanti solo porzioni della rete di competenza, mostrano come i volumi di traffico, rispetto ai dati rilevati negli anni precedenti, non siano variati in misura considerevole. Nel presente studio si è fatto uso dei flussi di traffico disponibili in GeoMedia Smart Client e relativi quindi alle rielaborazioni del 2012. I valori del TGM impiegati sono stati quindi ipotizzati come costanti negli anni.

Dalle programmazioni dei lavori di FVG Strade, dal 2008 ad oggi, sono stati estratti gli interventi finalizzati al miglioramento della sicurezza stradale; in particolare è stata posta l'attenzione su 51 interventi infrastrutturali di trasformazione di intersezioni lineari a raso esistenti (semaforizzate e non) in intersezioni a rotatoria, osservando gli eventi incidentali dal 2006 al 2016. Lo studio in primo luogo ha inteso ricercare se vi è stata una variazione della frequenza e della gravità incidentale, in secondo luogo ha voluto elaborare dei modelli predittivi della sinistrosità nelle intersezioni oggetto di studio, sulla base dei dati incidentali a disposizione, verificando inoltre corrispondenze o differenze con i modelli proposti dall'HSM [4].

2. Analisi degli incidenti

Per poter procedere efficacemente nel confronto fra i vari siti è necessario esaminare i dati raccolti attraverso un'analisi aggregata. Tale approccio costituisce una tipologia di analisi a scala macroscopica, con cui è possibile identificare i siti con rischio di incidentalità più elevato; successivamente, nei casi caratterizzati da particolari criticità, risulta opportuna un'analisi puntuale, di tipo disaggregato. Gli indicatori di riferimento sono quattro:

- Frequenza incidentale (f);
- Tasso di incidentalità (R);
- Indice di danno equivalente (IDE);
- Indice di severità equivalente (ISR).

2.1. Gli indicatori incidentali

Frequenza incidentale

La frequenza incidentale è definita come il numero medio di incidenti che si sono verificati nel periodo di riferimento, in termini di incidenti/anno, calcolata con l'espressione seguente:

$$f_j = \frac{N}{n} \text{ (incidenti/anno)}$$

dove:

- f_j è la frequenza incidentale del sito j -esimo (incidenti/anno);
- N è il numero di incidenti che si sono verificati nel periodo n ;
- n è il periodo di osservazione (anni), che dovrebbe essere almeno pari a 3 anni.

Un sito viene ritenuto critico se $f_j > f_{crp}$, dove f_{crp} è la frequenza incidentale critica della popolazione di riferimento, che si determina assumendo una distribuzione di probabilità di Poisson (definizioni e passaggi omissi per brevità).

Tasso di incidentalità

L'indicatore che mette in relazione il numero di eventi incidentali con il volume di traffico, è il tasso di incidentalità R_j , definito per un'intersezione come:

$$R_j = \frac{f_j 10^6}{365.25 n TGM_{inters j}} \text{ (incidenti/milioni di veicoli)}$$

dove:

- f_j è la frequenza incidentale del sito j -esimo (incidenti/anno);
- n è il periodo di anni di osservazione (anni);
- $TGM_{inters j}$ è il valore del traffico giornaliero medio in entrata nell'intersezione del sito j -esimo.

Un sito sarà ritenuto critico se $R_j > R_{crp}$, dove R_{crp} è il tasso di incidentalità critica della popolazione di riferimento, che si determina assumendo una distribuzione di probabilità di Poisson (definizioni e passaggi omissi per brevità).

Indice di danno equivalente (IDE)

Un indicatore che mette in relazione l'entità del danno e l'evento incidentale è l'IDE, il quale esprime una ponderazione del danno in funzione delle conseguenze dell'evento. I pesi da assegnare variano in funzione dell'importanza del sinistro; si è scelto di adottare i seguenti coefficienti in linea con la letteratura di riferimento [1]:

- per un sinistro con solo danni materiali: 1,0;
- per un sinistro con feriti (sia lievi che gravi): 4,5;
- per un sinistro con decessi: 9,0.

Tramite tale sistema di pesi si identificano gli IDE dei siti considerati come segue:

$$IDE_j = \frac{\sum_{i=1}^g (w_i f_{ij})}{f_j}$$

dove:

- IDE_j è l'indice di danno equivalente del sito j-esimo;
- w_i è il peso associato all'incidente di gravità i;
- f_{ij} è la frequenza incidentale nel sito j di gravità i (incidenti/anno);
- f_j è la frequenza incidentale del sito j-esimo (incidenti/anno);
- g è il numero di varietà di conseguenze di sinistro per il sito j-esimo ($g = cost = 3$).

Un sito sarà ritenuto critico se: $IDE_j > IDE_{crp}$, dove IDE_{crp} è l'indice di danno equivalente critico della popolazione di riferimento, che si determina assumendo una distribuzione di probabilità di Poisson (definizioni e passaggi omissi per brevità).

Indice di severità relativo (ISR)

L'ultimo parametro utilizzato per l'analisi aggregata è l'indice di severità relativo. Rispetto al precedente (IDE), l'ISR lega la frequenza incidentale al costo medio per incidente; tale indicatore permette di avere una risposta molto significativa in termini di costo sociale dell'incidente. Il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti tramite lo "Studio di valutazione dei costi sociali dell'incidentalità stradale" [5] ha effettuato una stima del danno economico subito dalla società a causa degli incidenti stradali. Il danno economico non è rappresentato da una spesa diretta sostenuta dalla società, ma è la quantificazione economica degli oneri che incombono sulla stessa a causa dell'evento incidentale. Il Ministero attribuisce i seguenti costi ai diversi tipi di incidente:

- Costo medio per incidente mortale = 1.503.990 €;
- Costo medio per incidente con feriti = 42.219 €;
- Costo medio per incidente con danni materiali = 10.986 €.

Similmente ai precedenti indicatori la relazione per calcolare l'ISR è:

$$ISR_j = \frac{\sum_{i=1}^g (C_i f_{ij})}{f_j}$$

dove:

- ISR_j è l'indice di severità relativo del sito j-esimo;
- C_i è il costo sociale medio associato all'incidente di gravità i;
- f_{ij} è la frequenza incidentale nel sito j di gravità i (incidenti/anno);
- f_j è la frequenza incidentale del sito j-esimo (incidenti/anno);
- g è il numero di varietà di conseguenze di sinistro per il sito j-esimo ($g = cost = 3$).

Un sito sarà ritenuto critico se $ISR_j > ISR_{crp}$, dove ISR_{crp} è l'indice di severità relativo della popolazione di riferimento, che si determina assumendo una distribuzione di probabilità di Poisson (definizioni e passaggi omissi per brevità).

2.2. I risultati dell'analisi aggregata

Per avere una stima complessiva degli incidenti analizzati, si riportano i valori totali, relativi ai 51 siti oggetto di studio, sempre distinguendo fra incidenti avvenuti prima, durante e dopo l'intervento di trasformazione in rotonda.

PERIODO OSSERVAZIONE	Incidenti totali	Veicoli coinvolti	Feriti	Morti
ANTE INTERVENTO	352	712	401	11
DURANTE INTERVENTO	29	51	23	4
POST INTERVENTO	76	136	87	0
TOTALE	457	899	511	15

Tabella 1 - Riepilogo complessivo degli incidenti.

Dalla Tabella 1 è possibile notare che nei 51 siti analizzati sono avvenuti, negli ultimi 11 anni, 457 incidenti, di cui 352 ante operam, 29 a lavori in corso e 76 post operam; si evidenzia inoltre, come vi sia una quantità non trascurabile di incidenti nel corso dei lavori. Inoltre, da una rapida lettura della stessa tabella, si evince come il numero di morti, dal momento in cui sono state realizzate le rotonde, si sia azzerato; pur considerando che il numero di anni di osservazione post operam (in media 4,4 anni) è inferiore rispetto a quello ante operam (in media 7,2 anni), tale dato fornisce un ordine di grandezza importante in merito alla diminuzione dei decessi su strada.

In Tabella 2 sono riportati i risultati dell'analisi aggregata. Si può osservare quanto segue:

- la frequenza incidentale è globalmente diminuita del 42%, così come desumibile dalla variazione ante e post operam della frequenza incidentale critica $f_{crp} = (1,24 - 0,71) / 1,24$;
- il tasso di incidentalità è globalmente diminuito dell'8%, così come desumibile dalla variazione ante e post operam del tasso di incidentalità critico $R_{crp} = (0,112 - 0,104) / 0,112$;
- l'indice di danno equivalente è globalmente diminuito del 30%, così come desumibile dalla variazione ante e post operam dell'indice di danno equivalente critico $IDE_{crp} = (3,98 - 2,78) / 3,98$;
- l'indice di severità relativo è globalmente diminuito del 77%, così come desumibile dalla variazione ante e post operam dell'indice di severità relativo critico $ISR_{crp} = (98242 - 22933) / 98242$.

È importante evidenziare che la frequenza incidentale si è quasi dimezzata; questo risultato può ritenersi soddisfacente dal punto di vista del miglioramento della sicurezza stradale. Si noti inoltre, come tale valore sia in linea con quello fornito dall'HSM, che stima una diminuzione della frequenza incidentale per lo stesso tipo di intervento compresa tra il 44 e il 48%. Per quanto riguarda l'analisi dei singoli siti, si è scelto di classificare gli stessi come critici quando i valori di almeno tre degli indicatori di incidentalità hanno superato la soglia critica.

Un particolare cenno va dato al sito n°6 - Gradisca d'Isonzo (località Mercaduzzo), il quale si distingue positivamente poiché, se nella configurazione ante operam, ad intersezione semaforizzata, ha fatto registrare quattro indici critici su quattro (unico caso su 51), grazie alla trasformazione in rotonda, è

passato a due indici critici su quattro, con una diminuzione della frequenza incidentale del 59% ed una diminuzione di severità degli incidenti del 79%.

Un altro esempio molto positivo è rappresentato dal sito n°25 - Codroipo (bivio Coseat), in quanto la trasformazione in rotatoria ha azzerato gli indici di incidentalità, portando la frequenza incidentale da 2,00 a 0,00 incidenti/anno.

Vi sono viceversa alcuni siti che dopo la trasformazione in rotatoria risultano classificabili come "critici". Per essi si rende raccomandabile un'attività di monitoraggio più prolungata e l'analisi dettagliata delle possibili e probabili cause della sinistrosità.

PROGR.	N.	ID. INTERVENTO	DATA INTERVENTO		ANNI OSSERV. B/A	CRITERI DI ANALISI DATI						TEST CRITICI	SITO CRITICO (7 (e3))
			INTERVENTO INIZIO/FINE			FREQUENZA INCIDENTALE f _j	TASSO DI INCIDENTALITÀ R _j	INDICE DI DANNO EQUIVALENTE IDE	INDICE SVIRITITÀ RELATIVO ISRI				
2010	1	01.UD.LATISANA (loc. Picchi)	I 15/03/11	BEFORE	5	0,80	0,030	2,75	26603	0	NO		
			F 22/07/11	AFTER	5	0,80	0,030	3,63	34411	3	SI		
	2	02.UD.COSEANO (loc. Cistera)	I 04/10/10	BEFORE	4,5	0,00	0,000	0,00	0	0	NO		
			F 20/05/11	AFTER	5,5	0,18	0,008	4,50	42219	2	NO		
	3	03.UD.OSOPPO (loc. Rivoli)	I 23/12/10	BEFORE	4,5	0,22	0,014	1,00	10986	0	NO		
			F 17/05/11	AFTER	5,5	0,73	0,036	4,50	42219	3	SI		
4	04.UD.DIGNANO (loc. Carpaeco)	I 18/04/11	BEFORE	7	0,14	0,006	4,50	42219	1	NO			
		F 12/08/11	AFTER	5	0,00	0,000	0,00	0	0	NO			
5	05.UD.CERVIGNANO DEL FRIULI (loc. Scodavacca)	I 01/04/11	BEFORE	5	1,40	0,078	3,50	33295	1	NO			
		F 15/07/11	AFTER	5	0,00	0,000	0,00	0	0	NO			
6	06.GO.GRADISCA DISONZO (loc. Mercaduzzo)	I 22/09/11	BEFORE	5,5	1,64	0,193	4,28	19767	4	SI			
		F 12/05/12	AFTER	4,5	0,67	0,096	4,50	42219	2	NO			
7	07.PN.CORDOVAO (SR463 km54+550)	I 05/09/11	BEFORE	5,5	0,00	0,000	0,00	0	0	NO			
		F 13/03/12	AFTER	4,5	0,00	0,000	0,00	0	0	NO			
8	08.UD.AMARO OVEST (SS52 km3+800)	I 28/05/12	BEFORE	5	0,00	0,000	0,00	0	0	NO			
		F 01/11/12	AFTER	4	1,50	0,149	4,50	42219	4	SI			
9	09.UD.BASILIANO (SS13 km18+950)	I 01/09/12	BEFORE	6	0,00	0,000	0,00	0	0	NO			
		F 01/09/12	AFTER	4	0,00	0,000	0,00	0	0	NO			
10	10.GO.CORMONS (SR56 km23+750)	I 22/10/12	BEFORE	6,5	0,46	0,012	4,50	42219	1	NO			
		F 22/04/13	AFTER	3,5	1,14	0,056	3,63	34411	3	SI			
11	11.UD.BASILIANO (SR13 km18+020)	I 29/06/12	BEFORE	6,5	2,92	0,062	3,76	35644	1	NO			
		F 24/05/13	AFTER	3,5	0,00	0,000	0,00	0	0	NO			
12	12.UD.TALMASSONS (SR252 km10+200)	I 01/06/15	BEFORE	9	1,56	0,064	5,07	35994	3	SI			
		F 01/06/15	AFTER	1,5	/	/	/	/	/	/	/		
13	13.UD.LATISANA (loc. Aprila)	I 07/01/15	BEFORE	9	0,89	0,018	3,63	34411	0	NO			
		F 15/07/15	AFTER	1,5	/	/	/	/	/	/	/		
14	14.PN.PORDENONE (SS13-Viale Libertà)	I 01/10/11	BEFORE	6	3,50	0,134	2,50	24372	2	NO			
		F 01/04/12	AFTER	4	1,25	0,072	4,50	42219	3	SI			
15	15.PN.PORDENONE (SS13-Via Revedole)	I 01/10/12	BEFORE	6	2,67	0,081	3,19	30507	1	NO			
		F 01/04/12	AFTER	4	2,00	0,091	4,50	42219	3	SI			
16	16.UD.S.MARIA LA LONGA (loc. Crosada)	I 26/03/15	BEFORE	9	1,00	0,023	3,72	35278	0	NO			
		F 30/09/16	AFTER	0,5	/	/	/	/	/	/	/		
17	17.GO.RONCHI DEI LEGONARI (aerop.)	I 10/12/15	BEFORE	10	0,90	0,024	3,33	31808	0	NO			
		F 08/06/16	AFTER	0,5	/	/	/	/	/	/	/		
18	18.GO.MONFALCONE (R5-zona ospedale)	I 01/01/10	BEFORE	4	4,25	0,183	3,26	31196	2	NO			
		F 01/12/10	AFTER	6	2,33	0,067	3,75	35526	3	SI			
19	19.GO.MONFALCONE (R2-via Portosoglia)	I 07/04/15	BEFORE	9	1,44	0,051	4,88	154663	3	SI			
		F 28/12/15	AFTER	1	/	/	/	/	/	/	/		
20	20.GO.MONFALCONE (R3-via Tinavo)	I 22/10/15	BEFORE	9,5	0,95	0,020	3,72	35278	0	NO			
		F 21/07/16	AFTER	0,5	/	/	/	/	/	/	/		
21	21.PN.ZOPPOLA (SS13 km 87+365)	I 01/04/15	BEFORE	9	1,11	0,032	4,50	42219	1	NO			
		F 01/11/15	AFTER	1	/	/	/	/	/	/	/		
22	22.PN.ZOPPOLA (SS13 km 88+550)	I 01/10/12	BEFORE	6,5	0,62	0,020	4,50	42219	1	NO			
		F 01/09/13	AFTER	3	1,33	0,096	4,50	42219	3	SI			
23	23.PN.CASARSA (SS13 km 97+200)	I 30/01/13	BEFORE	7	0,86	0,053	2,17	21397	0	NO			
		F 12/10/13	AFTER	3	0,00	0,000	0,00	0	0	NO			
24	24.PN.CASARSA (SS13 km 97+580)	I 21/05/12	BEFORE	6,5	0,15	0,010	1,00	10986	0	NO			
		F 24/10/12	AFTER	4	0,00	0,000	0,00	0	0	NO			
25	25.UD.CODROIPO (SS13 bivio Coseat)	I 04/06/12	BEFORE	6,5	2,00	0,097	4,62	152260	3	SI			
		F 24/11/12	AFTER	4	0,00	0,000	0,00	0	0	NO			
26	26.UD.CODROIPO (SS13 km 106+129)	I 01/04/15	BEFORE	9	1,33	0,051	4,21	39616	2	NO			
		F 01/11/15	AFTER	1	/	/	/	/	/	/	/		
27	27.UD.CODROIPO (SS13 km 106+980)	I 06/06/12	BEFORE	6,5	1,08	0,068	4,00	37757	1	NO			
		F 13/05/13	AFTER	3,5	0,57	0,067	1,00	10986	0	NO			
28	28.UD.PRADAMANO (SR56 loc. Lovaria)	I 20/08/12	BEFORE	6,5	0,77	0,027	4,80	328327	2	NO			
		F 17/05/13	AFTER	3,5	0,29	0,019	4,50	42219	2	NO			
29	29.UD.BUTTRIO (SR56 km 9+750)	I 02/04/12	BEFORE	6	1,33	0,054	4,06	38315	2	NO			
		F 31/07/12	AFTER	4,5	0,00	0,000	0,00	0	0	NO			
30	30.UD.MANZANO (SR56 km 14+830)	I 18/06/12	BEFORE	6,5	0,77	0,028	3,10	29726	0	NO			
		F 24/04/13	AFTER	3,5	0,86	0,058	4,50	42219	3	SI			
31	31.UD.SAN GIOVANNI AL NAT. (SR56 km 16+900)	I 03/07/12	BEFORE	6,5	1,69	0,068	2,59	25183	1	NO			
		F 10/05/13	AFTER	3,5	0,29	0,021	4,50	42219	2	NO			
32	32.UD.SAN GIOVANNI AL NAT. (SR56 km 17+300)	I 12/10/11	BEFORE	5,5	0,36	0,020	4,50	42219	1	NO			
		F 20/03/12	AFTER	4,5	0,67	0,044	4,50	42219	2	NO			
33	33.UD.SAN GIOVANNI AL NAT. (SR56 km 17+700)	I 01/04/15	BEFORE	9	0,44	0,022	4,88	399854	2	NO			
		F 01/11/15	AFTER	1	/	/	/	/	/	/	/		
34	34.UD.CODROIPO (SR252 km 2+300 Rivoletto)	I 01/01/15	BEFORE	9	0,22	0,013	2,75	26603	0	NO			
		F 01/07/15	AFTER	1,5	/	/	/	/	/	/	/		
35	35.UD.CASTIONS DI STRADA (SR252)	I 31/12/14	BEFORE	9	1,11	0,060	2,75	26603	0	NO			
		F 09/07/15	AFTER	1,5	/	/	/	/	/	/	/		
36	36.UD.GONARS (SR252 km 18+750)	I 01/11/14	BEFORE	8,5	1,06	0,055	3,72	35278	0	NO			
		F 30/09/15	AFTER	1	/	/	/	/	/	/	/		
37	37.UD.MUZZANA DEL T. (SS14 Muzzana ovest)	I 27/02/10	BEFORE	4	0,25	0,043	4,50	42219	1	NO			
		F 01/06/10	AFTER	6,5	0,00	0,000	0,00	0	0	NO			
38	38.UD.MUZZANA DEL T. (SS14 km 92+200)	I 01/04/15	BEFORE	9	0,67	0,044	4,50	42219	1	NO			
		F 12/04/16	AFTER	0,5	/	/	/	/	/	/	/		
39	39.UD.SAN GIORGIO DI N. (SS14 km 98+700)	I 01/02/15	BEFORE	9	0,11	0,006	9,50	150390	2	NO			
		F 01/08/15	AFTER	1,5	/	/	/	/	/	/	/		
40	40.UD.TORVISCOSA (SS14 km 104+250)	I 01/01/17	BEFORE	11	0,82	0,038	4,11	38749	1	NO			
		F in corso	AFTER	0	/	/	/	/	/	/	/		
41	41.UD.TORVISCOSA (SS14 km 106+000)	I 01/01/17	BEFORE	11	0,36	0,021	5,75	407662	2	NO			
		F in corso	AFTER	0	/	/	/	/	/	/	/		
42	42.UD.CERVIGNANO (SS14 km 108+430)	I 01/09/14	BEFORE	8,5	0,82	0,028	3,50	33295	0	NO			
		F 01/03/15	AFTER	1,5	/	/	/	/	/	/	/		
43	43.UD.CERVIGNANO (SS14 km 109+300)	I 01/09/14	BEFORE	8,5	0,35	0,016	3,33	31808	0	NO			
		F 01/03/15	AFTER	1,5	/	/	/	/	/	/	/		
44	44.UD.CERVIGNANO (SS14 km 112+550)	I 01/09/14	BEFORE	8,5	0,47	0,054	3,63	34411	0	NO			
		F 01/03/15	AFTER	1,5	/	/	/	/	/	/	/		
45	45.UD.VILLA VICENTINA (SS14 km 115+230)	I 01/09/14	BEFORE	8,5	1,06	0,062	4,11	38749	1	NO			
		F 01/03/15	AFTER	1,5	/	/	/	/	/	/	/		
46	46.UD.FIUMICELLO (SS14 km 115+750)	I 01/09/14	BEFORE	8,5	0,59	0,030	4,50	42219	1	NO			
		F 01/03/15	AFTER	1,5	/	/	/	/	/	/	/		
47	47.UD.SAN CANZIAN DIS. (SS14 km 118+980)	I 01/09/14	BEFORE	8,5	0,82	0,038	4,71	246582	2	NO			
		F 01/03/15	AFTER	1,5	/	/	/	/	/	/	/		
48	48.UD.BUTTRIO (SR56-SP14)	I 01/12/10	BEFORE	5	0,80	0,036	1,88	18794	0	NO			
		F 01/04/11	AFTER	5,5	0,18	0,008	4,50	42219	2	NO			
49	49.GO.GRADISCA DIS. (SR351-SR305)	I 01/09/10	BEFORE	4,5	2,67	0,198	3,33	31808	2	NO			
		F 01/03/11	AFTER	5,5	0,91	0,055	4,50	42219	3	SI			
50	50.UD.FOGLIANO DI R. (SR351-SP1)	I 01/09/11											

3. I modelli predittivi dell'incidentalità

3.1. Reti neurali artificiali

Nel presente studio si sono voluti sviluppare dei modelli predittivi di incidentalità, specificatamente calibrati e validati per le intersezioni di competenza di FVG Strade, seguendo tuttavia un metodo matematico del tutto generale ed estremamente efficiente, come quello delle reti neurali artificiali (Artificial Neural Networks, ANN).

Tale approccio computazionale è in grado di identificare correlazioni robuste tra grandi moli di dati, fino a giungere alla formulazione di modelli matematici per la previsione dell'evoluzione del fenomeno osservato, facendo uso di un meccanismo di "apprendimento", da cui il termine frequentemente usato in letteratura di "machine learning". Sostanzialmente, da un punto di vista puramente descrittivo e qualitativo, le ANN simulano numericamente il funzionamento del sistema nervoso biologico e della sua unità fondamentale, ossia il neurone biologico (Figura 5).

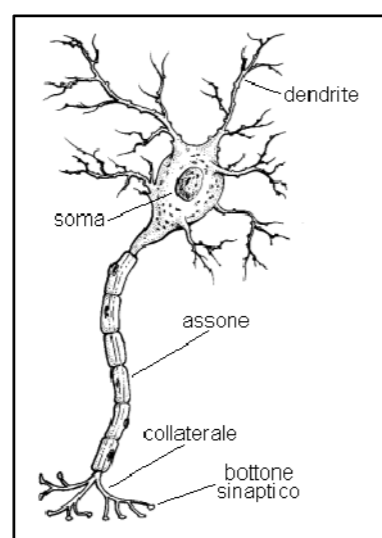


Figura 5 - Struttura di un neurone biologico [6]

Pertanto, in similitudine con il sistema nervoso biologico, le ANN sono costituite dall'interconnessione di neuroni artificiali, o unità di calcolo fondamentali, che elaborano i dati di input per giungere alla soluzione del problema per mezzo di un processo "adattivo" di apprendimento. Generalmente si utilizzano reti neurali di tipo multilayer, in quanto capaci di creare un meccanismo di apprendimento più efficace (Figura 6).

In questa tipologia di rete, i neuroni sono organizzati solitamente su tre livelli:

- layer di input;
- uno o più layer nascosti;
- layer di output.

Le unità del layer di input, generalmente sono organizzate in un vettore, servono per trasmettere al layer nascosto i dati di ingresso, mentre le unità nascoste costituiscono l'ingresso per il layer di output, anch'esso organizzato in un vettore.

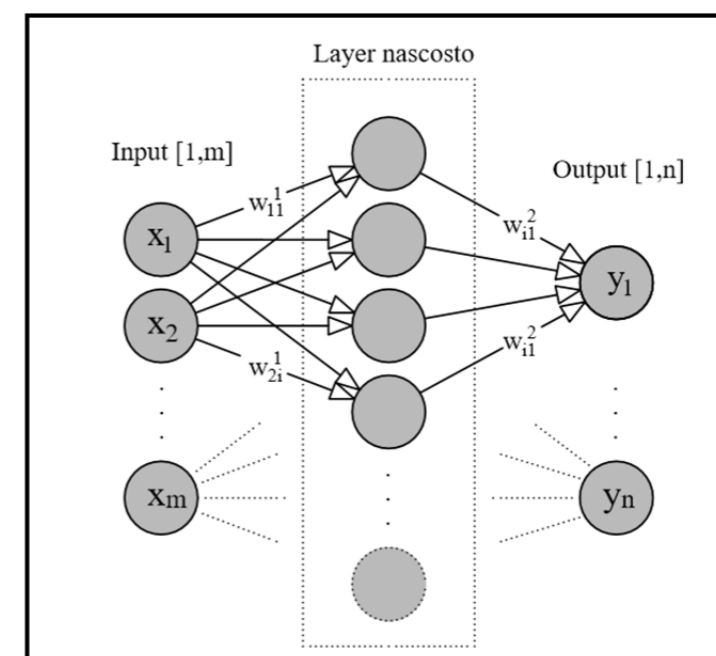


Figura 6 - Esempio di rete multilayer con un layer nascosto

Vi sono varie tipologie di funzioni matematiche, di varia complessità, associabili alle unità di calcolo elementari delle ANN; nel presente lavoro si è fatto uso della funzione sigmoidea, tra le più efficaci per l'analisi di dati caratterizzati da una elevata non linearità.

Da un punto di vista metodologico, in analogia a quanto proposto nell'HSM (§ 6.2, capitolo 12), i modelli predittivi della frequenza incidentale per le intersezioni a raso, sono stati elaborati in funzione dei seguenti elementi:

- tipologia di intersezione, con riferimento a 4 categorie:
 - intersezione a 3 rami con segnale di stop sul ramo secondario (3ST);
 - intersezione a 4 rami con segnale di stop sui rami secondari (4ST);
 - intersezione a 3 rami semaforizzata (3SG);
 - intersezione a 4 rami semaforizzata (4SG);
- traffico, distinguendo il volume di traffico sul ramo principale (chiamato TGM_{ma}) e sul ramo secondario (TGM_{min});
- tipo di incidente, considerando se è stato coinvolto un solo veicolo (single vehicle) o se si è verificato uno scontro multiplo (multiple vehicle).

3.2. I Modelli predittivi dell'HSM

I metodi previsionali dell'Highway Safety Manual sono stati sviluppati per mezzo di regressioni statistiche di dati d'incidentalità, raccolti con studi su larga scala condotti negli Stati Uniti; i modelli e i concetti contenuti nell'HSM sono considerati come un punto di riferimento di livello internazionale per l'analisi della sicurezza stradale. Per questo motivo si è ritenuta fondamentale la ricerca di una possibile corrispondenza tra i modelli predittivi descritti in tale manuale e i modelli elaborati nel presente studio con le reti neurali artificiali, sulla base dei dati relativi ai siti in cui FVG Strade ha trasformato l'intersezione a raso esistente, in una rotonda.

Si consideri comunque che i modelli dell'HSM sono stati sviluppati avendo come base di riferimento una serie di fattori non replicabili nella Regione FVG (geometria stradale, tipo di veicolo, comportamenti di guida, etc.); è quindi ragionevole ipotizzare preliminarmente che gli indicatori di incidentalità valutati con riferimento alla rete regionale assumano valori non esattamente corrispondenti a quelli determinabili seguendo gli approcci americani.

3.3. Confronto fra i modelli predittivi delle reti neurali e dell'HSM

Nel seguito verranno presentati dei grafici (Figure 7-10), che rappresentano in modo semplice ed immediato alcuni risultati notevoli ottenuti con la modellazione neurale, in termini di frequenza incidentale, al variare del flusso di traffico. Inoltre ciascun grafico propone anche il confronto diretto tra i risultati della modellazione ANN e quelli dell'HSM.

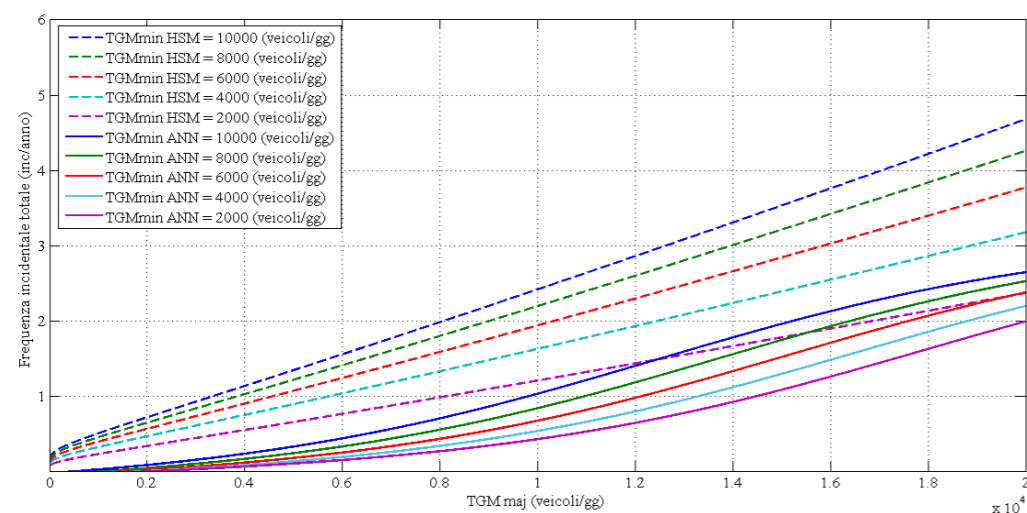


Figura 7 - Confronto modelli HSM/ANN per 3ST

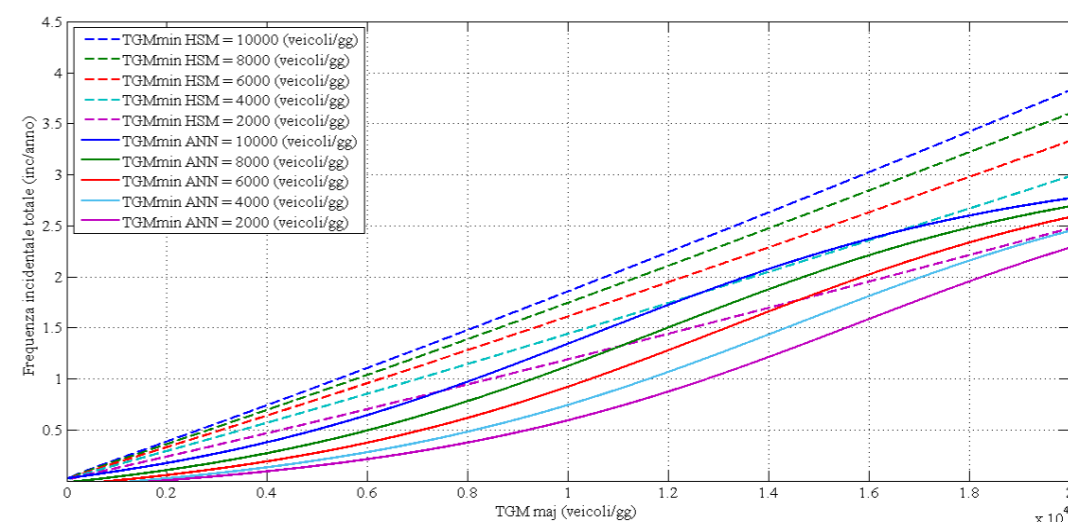


Figura 8 - Confronto modelli HSM/ANN per 3SG

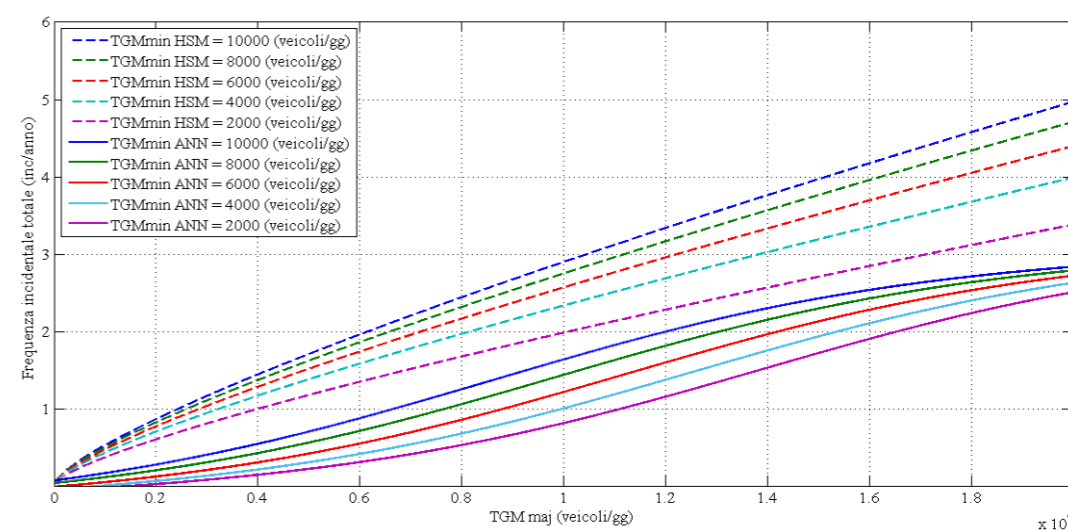


Figura 9 - Confronto modelli HSM/ANN per 4ST

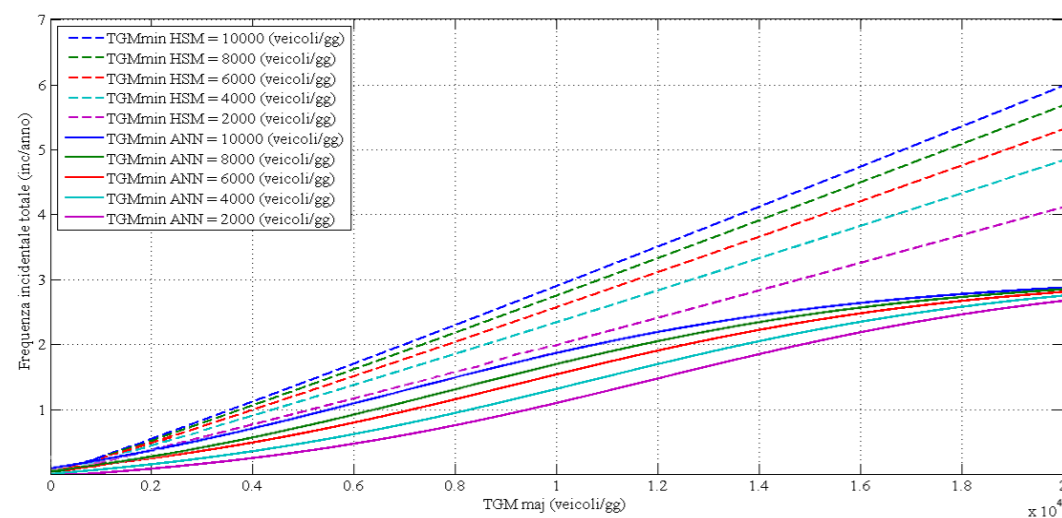


Figura 10 - Confronto modelli HSM/ANN per 4SG

Complessivamente, per le intersezioni considerate, la frequenza incidentale determinata con le ANN risulta inferiore rispetto a quanto stimato dai modelli statunitensi. In particolare si nota come le curve elaborate con le reti neurali si discostino dalle curve HSM, caratterizzandosi con un andamento ad "S", a pendenza decrescente per elevati livelli di TGM. Si ipotizza che tale risultato possa dipendere da una insufficiente capacità dell'intersezione di smaltire notevoli volumi di traffico, giungendo ad una condizione di congestionamento connotata da una incidentalità stazionaria; tale fenomeno non viene colto dai modelli HSM, che prevedono invece un aumento lineare della frequenza incidentale, al crescere del TGM.

A titolo d'esempio si riporta nella Tabella 3 il confronto tra i risultati dei modelli HSM e delle reti neurali di FVG Strade (FVGS) per le quattro tipologie di intersezione analizzate, nell'ipotesi di un traffico giornaliero medio per il ramo principale (TGMmaj) pari a 12.000 veicoli/giorno.

Tipologia intersezione	HSM	FVGS	Variazione MIN/MAX%
3ST	1,3 - 2,9	0,7 - 1,3	46% - 55%
3SG	1,4 - 2,3	0,8 - 1,7	42% - 26%
4ST	2,3 - 3,3	1,2 - 2,0	48% - 39%
4SG	2,4 - 3,5	1,5 - 2,3	38% - 34%

Tabella 3 – Valori della frequenza incidentale per $TGM_{maj} = 12'000$ veicoli/giorno.

3.4. Modelli predittivi per le rotatorie della rete regionale

In questo paragrafo si presentano i risultati dei modelli predittivi dell'incidentalità relativi alla fase post operam, ovvero dopo che i lavori di trasformazione dell'intersezione in rotatoria sono ultimati.

Dei 51 interventi considerati nello studio, solo 29 sono stati selezionati per la creazione di una seconda famiglia di modelli predittivi, in quanto i restanti non garantivano un intervallo temporale di

osservazione sufficiente. In particolare sono stati scartati tutti gli interventi che avevano un periodo di osservazione post operam minore di 3 anni.

I modelli predittivi sono stati suddivisi nelle seguenti tre grandi classi, in funzione del diametro esterno della rotatoria:

- classe 1: per rotatorie con diametro $\varnothing \leq 40m$;
- classe 2: per rotatorie con diametro compreso tra $40m < \varnothing < 60m$;
- classe 3: per rotatorie con diametro $\varnothing \geq 60m$.

Analogamente a quanto già esposto per i modelli d'incidentalità al paragrafo precedente, sono stati messi a punto dei nuovi modelli predittivi specifici per le rotatorie. Si ribadisce anche in questo caso che i modelli esposti successivamente sono stati calibrati e validati per le rotatorie appartenenti alla rete regionale del FVG.

I risultati sono riportati nelle Figure 11, 12, 13.

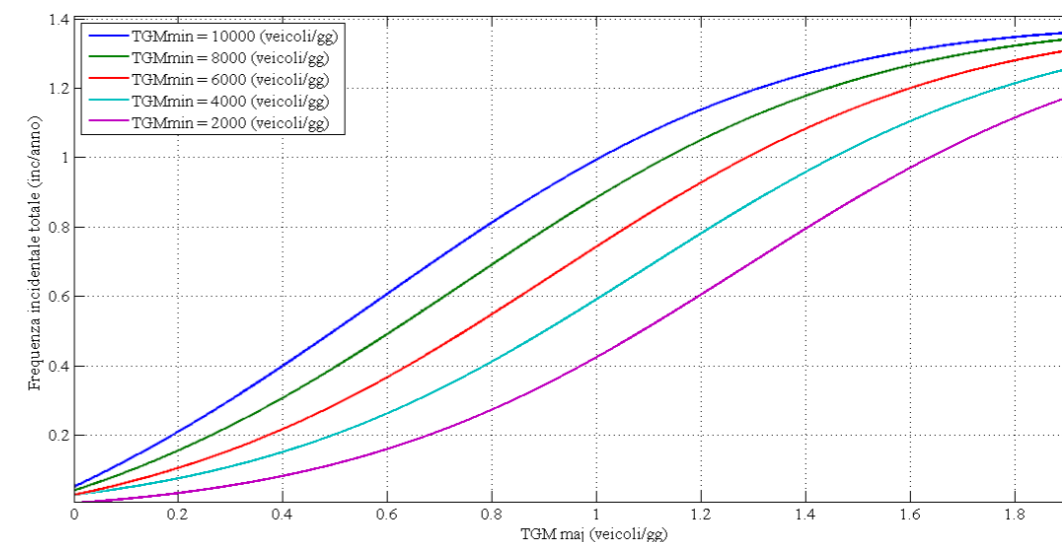


Figura 11 - Modello previsionale ANN rotatorie classe 1

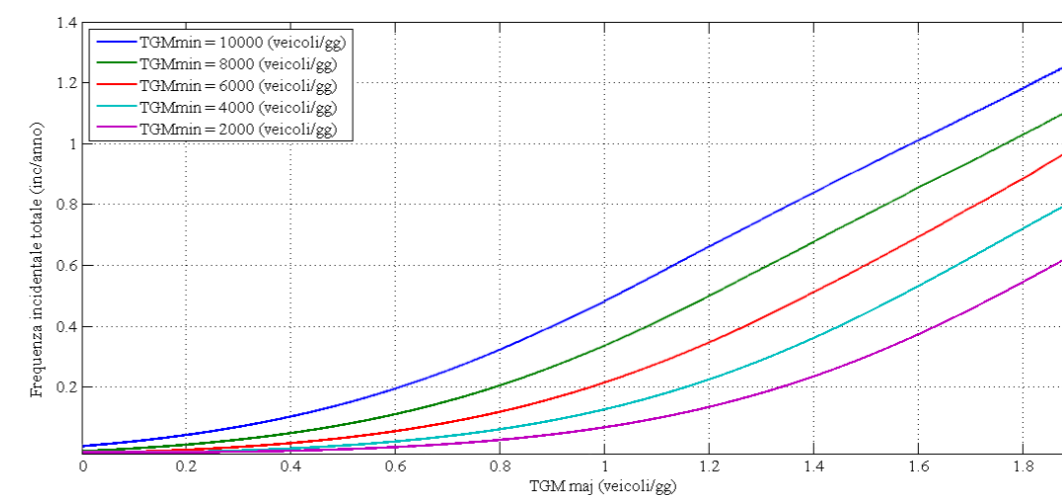


Figura 12 - Modello previsionale ANN rotatorie classe 2

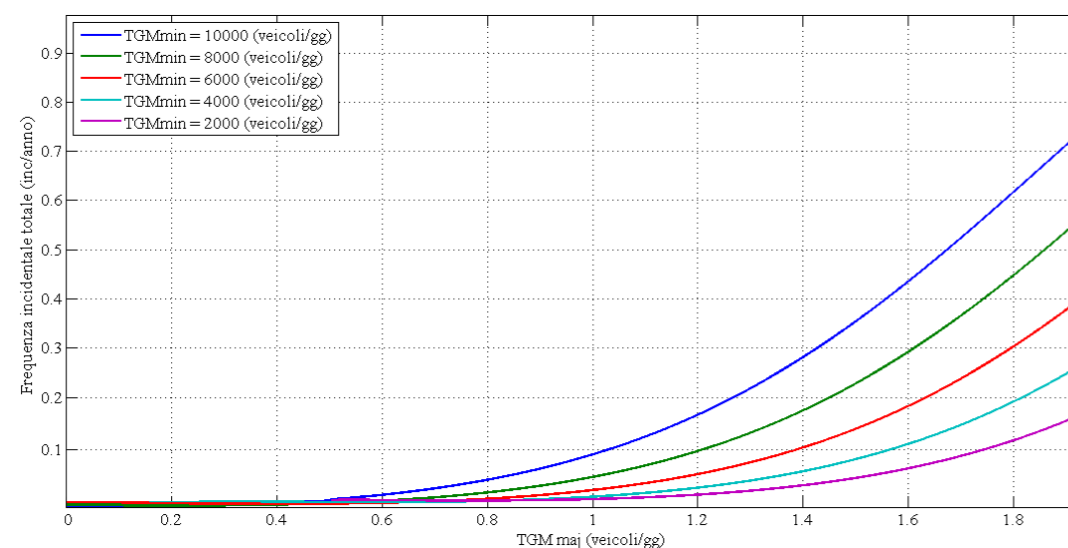


Figura 13 - Modello previsionale ANN rotatorie classe 3

In Figura 11 si osserva un andamento ad "S" delle curve della frequenza incidentale al variare del TGM_{maj} ; tale forma, in accordo con l'ipotesi già discussa precedentemente, denota come, per flussi di traffico così elevati da portare a saturazione la rotatoria, la frequenza incidentale rimanga pressoché costante.

Nei modelli previsionali di Figura 12 e di Figura 13 è evidente invece un andamento crescente in misura più che lineare; in questo tipo di rotatoria quindi, diversamente da quanto osservato per la classe 1, la frequenza incidentale aumenta più che linearmente con il flusso di traffico della strada principale. Tali risultati possono trovare giustificazione nella maggiore riserva di capacità delle rotatorie più ampie, che raggiungono solo per flussi particolarmente elevati un basso livello di servizio, ovvero una condizione di circolazione congestionata.

A titolo d'esempio la Tabella 4 riporta le frequenze incidentali calcolate per una rotatoria avente traffico giornaliero medio nel ramo principale TGM_{maj} pari a 12.000 veicoli/giorno.

Classe rotatoria	FVGS
Classe 1	0,6 - 1,15
Classe 2	0,1 - 0,7
Classe 3	0,05 - 0,2

Tabella 4 – Frequenze incidentali per rotatorie con $TGM_{maj} = 12000$ veicoli / giorno.

I risultati riportati in Tabella 4 mostrano con chiarezza che la frequenza incidentale nelle rotatorie è inferiore a quella degli altri tipi di intersezione a raso (Tabella 3). Inoltre si desume che la frequenza incidentale è molto più bassa nelle rotatorie di diametro esterno maggiore di 40 m. Quasi tutte le rotatorie analizzate nello studio sono state realizzate secondo le "Linee guida per la progettazione delle rotatorie sulla rete di competenza di FVG Strade" del 2009, le quali comprendono, oltre all'indicazione del diametro, che deve risultare compreso tra 40 e 60 m, anche un insieme di accorgimenti riguardanti la segnaletica orizzontale, verticale e luminosa, nonché indicazioni

geometriche di dettaglio; tutti questi elementi hanno portato a una marcata riduzione dell'incidentalità.

Tale risultato può essere interpretato come segue: la combinazione di criteri relativi alla geometria stradale e alla segnaletica orizzontale, verticale e luminosa adottati nelle rotatorie costruite sulla rete di competenza di Friuli Venezia Giulia Strade, hanno favorito la corretta percezione dell'intersezione da parte dell'utenza e quindi un appropriato comportamento di guida.

3.5. Formulazione analitica del modello predittivo per rotatorie

Si riporta di seguito l'espressione analitica del modello predittivo dell'incidentalità per le rotatorie, elaborato con le reti neurali:

$$f_j(inc/anno) = \left\{ \left\{ 0,300 \left[\frac{2}{1 + e^{-2[0,158(\alpha-2) + (-0,211(0,00009\beta-1)) + (-0,117(0,00024(\gamma-1786)-1)) - 0,036]}} \right] + \right. \right. \\ \left. \left. -1,183 \left[\frac{2}{1 + e^{-2[0,844(\alpha-2) + (-1,343(0,00009\beta-1)) + (-0,499(0,00024(\gamma-1786)-1)) + 0,641]}} - 1 \right] + 0,061 \right\} \right\} / 1,500$$

dove:

- α corrisponde alla classe della rotatoria (1,2,3);
- β corrisponde al TGM del ramo principale (veicoli/gg);
- γ corrisponde al TGM del ramo secondario (veicoli/gg).

Con tale modello il progettista stradale potrà calcolare la frequenza incidentale nella rotatoria che sta studiando, in funzione dei flussi di traffico e della dimensione della rotatoria stessa.

4. Conclusioni

Lo studio ha inteso valutare quantitativamente gli effetti sull'incidentalità prodotti dalla trasformazione di intersezioni a raso esistenti, in rotatorie sulla rete di competenza di FVG Strade.

Si è verificato come, in linea generale, tali interventi abbiano dato luogo a un incremento delle condizioni di sicurezza, ovvero ad una netta riduzione della frequenza e della severità incidentali, oltre che a una maggiore fluidità della circolazione.

L'analisi quantitativa dell'incidentalità ante operam e post operam ha consentito, per mezzo delle reti neurali, di elaborare modelli predittivi della frequenza incidentale nelle intersezioni a raso a 3 o a 4 braccia, regolate da precedenza o semaforizzate, lineari a raso o rotatorie. I modelli sono stati calibrati e validati per strade extraurbane secondarie aventi caratteristiche geometriche e funzionali paragonabili a quelle delle strade di competenza di FVG strade, ovvero infrastrutture classificate ai sensi del codice della strada come strade regionali e statali.

I risultati della modellazione neurale, sulla base dei dati a disposizione, hanno evidenziato come la trasformazione di un'intersezione a raso in rotatoria dia luogo ad una netta diminuzione della frequenza incidentale, ed inoltre, come questa risulti sensibilmente diversa per le rotatorie di piccolo diametro rispetto a quelle di medio e grande diametro. In particolare emerge l'attitudine delle rotatorie di medio-grande diametro a ridurre fortemente il numero di incidenti, rispetto alle rotatorie di piccolo diametro.

Il punto d'arrivo dello studio può essere interpretato come il punto di partenza per la prosecuzione e per l'affinamento dell'attività di modellazione neurale condotta. Un possibile sviluppo potrebbe riguardare l'ampliamento della banca dati incidentale del FVG, sia per quanto riguarda le intersezioni a raso esistenti, che per le nuove realizzazioni di rotatorie (specialmente quelle scartate nel presente studio in quanto si disponevano di pochi anni di osservazione). Muovendosi in tal senso, sarà possibile validare o ricalibrare i modelli predittivi già messi a punto, come pure cercare un riscontro con quelli che nei prossimi anni saranno implementati nella seconda edizione dell'Highway Safety Manual. Compatibilmente con la completezza informativa della banca dati, si potrà ampliare la gamma dei modelli predittivi al fine, ad esempio, di correlare la frequenza incidentale esclusivamente con il numero di morti, piuttosto che di feriti gravi o lievi, o solamente con i danni materiali. Oltre all'utilizzo delle reti neurali artificiali, si segnala inoltre la possibilità di utilizzare la logica Fuzzy come strumento computazionale per modellare i dati di incidentalità.

Un ulteriore approfondimento può riguardare gli incidenti avvenuti durante la costruzione della rotatoria. Nell'analisi condotta in questo studio essi sono stati esclusi in quanto, nel corso dei lavori, la configurazione dell'intersezione non può essere considerata ed attribuita né alla precedente intersezione né alla rotatoria in costruzione; infatti, nella maggior parte dei casi il layout di cantiere e le deviazioni del traffico realizzate creano delle condizioni tali da non configurare nessuno dei due casi. Oltre a queste tipologie di analisi incidentale relative alle trasformazioni in rotatoria, si segnala che si sono registrate notevoli riduzioni della frequenza incidentale nei casi di recenti installazioni di autovelox fissi; gli effetti di tali provvedimenti potrebbero essere esaminati e studiati nei prossimi anni nella loro evoluzione temporale.

Lo studio dell'incidentalità può essere anche intrapreso con un'ottica diversa: valutare gli interventi di prevenzione sulla base delle risposte psicofisiche del conducente, dal momento che il fattore umano è la causa principale dei sinistri stradali; risulta quindi utile approfondire e completare lo studio del fenomeno dell'incidentalità attraverso un approccio innovativo, costituito dai simulatori di guida in ambiente virtuale.

Bibliografia

- [1] Sascia Canale, Natalia M. Distefano, Salvatore Leonardi, *Progettare la sicurezza stradale*, EPC, 2009.
- [2] Linee guida per l'analisi di sicurezza delle strade, Ministero dei Lavori Pubblici, 2001.
- [3] PNSS, Piano Regionale Sicurezza Stradale, Tavole grafiche, 2005.
- [4] Highway Safety Manual, 2010.
- [5] Studio di valutazione dei Costi Sociali dell'incidentalità stradale, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2010.
- [6] N. R. Carlson, *Psychology of behavior*, 2nd edition, Allyn & Bacon, 1981.