



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE STATISTICHE**

**“PAOLO FORTUNATI”**

**Corso di Laurea in Scienze Statistiche**

**IMPATTO DELLA RIDUZIONE DI VELOCITÀ NELLE AREE  
URBANE: ANALISI E SIMULAZIONI**

**Presentata da:**

Jacopo Cesari

**Relatore:**

Prof. ssa Anna Vesely

**APPELLO II**

**ANNO ACCADEMICO 2023 / 2024**

# **ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

---

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE STATISTICHE**

**“PAOLO FORTUNATI”**

**Corso di Laurea in Scienze Statistiche**

## **IMPATTO DELLA RIDUZIONE DI VELOCITÀ NELLE AREE URBANE: ANALISI E SIMULAZIONI**

**(Laboratorio di Analisi dei Dati)**

**Presentata da:**

Jacopo Cesari

Matricola n. 0001032434

**Relatore:**

Prof. ssa Anna Vesely

**APPELLO II**

**ANNO ACCADEMICO 2023 / 2024**

## **Sommario**

La ricerca ha lo scopo di analizzare l'impatto dell'introduzione del limite di velocità di 30 km/h nelle zone urbane delle città. L'adozione di questa normativa si inserisce in un più ampio contesto internazionale, sostenuto dalle Nazioni Unite e dalla World Health Organization, con l'obiettivo di migliorare la sicurezza stradale e ridurre il numero di morti e feriti per incidenti stradali.

Il lavoro si sviluppa in due analisi distinte, la prima riguarda l'analisi di una raccolta dati di incidenti stradali verificatisi a Toronto, in Canada, e la costruzione di un modello logit, ponendo attenzione sugli andamenti temporali e sugli aspetti più influenti nella gravità degli incidenti. La seconda parte prevede la realizzazione di un modello di simulazione della viabilità stradale su NetLogo. L'obiettivo è valutare l'efficacia del limite di 30 km/h nel migliorare la sicurezza stradale e analizzare il suo impatto sulla viabilità.

# INDICE

1 Introduzione	1
2 Analisi dell'incidentalità	3
2.1 Presentazione del dataset	3
2.2 Serie temporale	5
2.3 Utenti coinvolti	6
2.4 Variabili relative al conducente e alle condizioni esterne	7
2.5 Costruzione del modello	10
2.6 Commento riassuntivo sull'incidentalità	16
3 Simulazione di viabilità stradale	18
3.1 NetLogo	18
3.2 Descrizione del modello	18
3.3 Presentazione dei risultati	20
3.3a Traffico congestionato	20
3.3b Traffico scorrevole	22
3.4 Commento riassuntivo sulla viabilità	23
4 Conclusione	25
5 Bibliografia	27

## 1 Introduzione

Dal 1° gennaio 2024, a Bologna è stato imposto nella maggior parte delle strade urbane il limite di 30 km/h, dove prima era di 50 km/h. Questa legge ha suscitato un diffuso malcontento tra i residenti, che si sono lamentati in particolare, e spesso anche aprioristicamente, dei maggiori tempi di percorrenza e dell'inutilità di questo cambiamento. Tuttavia, in alcuni Paesi, per la maggior parte europei, le cosiddette "Città 30" sono un fenomeno diffuso da molti anni, anche se solo recentemente in larga espansione, e vengono dichiarati risultati molto positivi, soprattutto per quanto riguarda la diminuzione dei morti e dei feriti per incidenti stradali. Pertanto, senza soffermarsi specificamente su Bologna, sulla quale non si hanno ancora dati sufficienti, l'obiettivo è quello di analizzare l'impatto che questa normativa può avere sulle città, concentrandosi sulla sicurezza stradale e sulla viabilità.

Prima di mostrare le analisi, però, è doveroso fare un passo indietro, per capire da dove si sviluppa il concetto di città con limite di velocità a 30 km/h. Nel 2015 l'organizzazione delle Nazioni Unite, con la partecipazione di tutti i suoi Stati membri, ha adottato *The 2030 Agenda for Sustainable Development* [6], un progetto condiviso per fornire la pace e la prosperità delle persone e del pianeta. L'agenda include 17 obiettivi (*Sustainable Development Goals*, SDGs) e 169 punti, di argomenti di tipo economico, sociale ed ambientale. Nell'ambito sociale uno degli aspetti rilevanti è proprio la sicurezza stradale, tanto che questa viene nominata esplicitamente in due dei diciassette SDGs (questa di seguito è la traduzione ufficiale pubblicata dal governo italiano):

- GOAL 3: SALUTE E BENESSERE, Assicurare la salute e il benessere per tutti e tutte le età
  - 3.6 Entro il 2030, dimezzare il numero di decessi a livello mondiale e le lesioni da incidenti stradali.
- GOAL 11: CITTÀ E COMUNITÀ SOSTENIBILI, Rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, duraturi e sostenibili
  - 11.2 Entro il 2030, fornire l'accesso a sistemi di trasporto sicuri, sostenibili, e convenienti per tutti, migliorare la sicurezza stradale, in particolare ampliando i mezzi pubblici, con particolare attenzione alle esigenze di chi è in situazioni vulnerabili, alle donne, ai bambini, alle persone con disabilità e agli anziani.

In accompagnamento a ciò, la World Health Organization, in cooperazione sempre con le Nazioni Unite, ha pubblicato *Global Plan, Decade of Action for Road Safety 2021-2030* [9], una guida di supporto in attività dal 2010 che ha l'obiettivo di indirizzare i Paesi ad azzerare i morti su strada entro il 2050. In questo documento vengono promosse azioni che danno la priorità alle esigenze di pedoni, ciclisti e utenti del trasporto pubblico e scoraggiano l'uso di veicoli privati, soprattutto nelle aree urbane ad alta densità. Riguardo al limite di velocità, viene riportato un paragrafo del documento tradotto in italiano:

« Nelle aree urbane densamente popolate, è ampiamente dimostrato che anche le migliori caratteristiche di progettazione delle strade e dei veicoli non sono in grado di garantire adeguatamente la sicurezza di tutti gli utenti della strada quando la velocità supera il livello di sicurezza conosciuto di 30 km/h. Per questo motivo, nelle aree urbane in cui è presente un mix tipico e prevedibile di utenti della strada (auto, ciclisti, motociclisti e pedoni), si dovrebbe stabilire un limite massimo di velocità di 30 km/h (20 mph), a meno che non esistano prove solide a sostegno di limiti più elevati».

L'intento della ricerca è quello di analizzare l'impatto della velocità sugli incidenti stradali e sulla viabilità. Per fare ciò seguiranno due diverse analisi distaccate tra loro:

- la prima parte, svolta sul software R, consiste nell'analisi di un dataset sugli incidenti stradali avvenuti nella città di Toronto dal 2006 fino al 2023, e nella creazione di un modello logit volto ad analizzare quali sono i fattori più influenti nella gravità di un incidente;
- la seconda tratta della costruzione di un modello di simulazione di viabilità stradale su NetLogo, un ambiente di programmazione, per analizzare aspetti come il tempo di percorso e l'andamento della velocità.

## **2 Analisi dell'incidentalità**

Il primo obiettivo della ricerca è quello di analizzare i dati relativi all'incidentalità in una città che ha ridotto il limite di velocità nelle strade urbane a 30 km/h. In particolare, si esegue un confronto esplorativo dell'andamento degli incidenti prima e dopo l'introduzione del nuovo limite, con l'intento di studiare successivamente i principali fattori, inclusa la velocità, che possono potenzialmente influenzare la gravità degli incidenti stradali. In seguito viene esaminata la frequenza degli incidenti nel tempo, e vengono analizzate le distribuzioni delle altre variabili in relazione ai diversi livelli di gravità degli incidenti; il modello presentato a fine capitolo mostra i fattori a cui è dovuto principalmente il pericolo che un incidente porti a lesioni gravi o addirittura fatali.

### **2.1 Presentazione del dataset**

La ricerca di un dataset completo sull'incidentalità ha incontrato diverse difficoltà: molti dati disponibili sono scarsamente informativi, altri risultano confusionari o difficili da interpretare, e numerosi dataset non sono accessibili per motivi legali e di privacy. Si è pertanto deciso di utilizzare i dati forniti dal Comune di Toronto [2], contenenti l'elenco completo degli incidenti dal 2006 all'inizio del 2023, corredati da un'ampia serie di variabili. Molte osservazioni, tuttavia, non sono state considerate a causa di valori mancanti, e si è arrivati ad analizzare un dataset di 2.339 elementi, ridotto rispetto all'iniziale dataset di 18.957 segnalazioni di incidenti stradali.

Nella Tabella 1 vengono riportate le variabili più rilevanti; la maggior parte delle variabili sono state trasformate per facilitarne lo studio e la comprensione, raggruppando tra loro alcune modalità oppure trasformandole in variabili binarie, dove 0 indica l'assenza della segnalazione nel dataset e 1 ne conferma la presenza.

Tabella 1: Elenco variabili considerate nell'analisi

VARIABILE	DESCRIZIONE	TIPO	VALORI
ROAD_CLASS	Tipo di strada	categoriale nominale	"Collector", "Laneway", "Local", "Minor Arterial"
INVTYPE	Tipo di utente colpito	categoriale nominale	"Car", "Bicycle", "Truck", "Motorcycle", "Pedestrian", "Other"
INJURY	Gravità dell'infortunio	categoriale ordinale	"None" < "Minor" < "Minimal" < "Major" < "Fatal"
VEHTYPE	Tipo di veicolo autore dell'incidente	categoriale nominale	"Car", "Bicycle", "Bus", "Truck/Lorry", "Motorcycle"
DRIVACT	Comportamento scorretto	dicotomica	0-1
DRIVCOND	Condizione alterata	dicotomica	0-1
SPEEDING	Eccesso di velocità	dicotomica	0-1
WRONGDRIV	Guida imprudente e distratta	dicotomica	0-1
REDLIGHT	Passaggio al semaforo rosso	dicotomica	0-1
ALCOHOL	Stato di ebrezza	dicotomica	0-1
DISABILITY	Presenza di disabilità	dicotomica	0-1
TRAFFCTL	Controllo stradale	dicotomica	0-1
BADWEATHER	Maltempo	dicotomica	0-1
DARKNESS	Notte	dicotomica	0-1
RDSFDANGER	Strada pericolosa	dicotomica	0-1



## 2.2 Serie temporale

Toronto nel 2016 ha iniziato un processo graduale di riduzione del limite di velocità nelle zone urbane da 40 a 30 km/h, completato nel 2019, con l'obiettivo dichiarato di aumentare la sicurezza stradale.

In primo luogo, dunque l'intento è quello di analizzare l'andamento degli incidenti lungo gli anni, per verificare se ci sia stato un impatto positivo sul numero degli incidenti. Guardando la Figura 1, che riporta gli incidenti totali e quelli gravi o fatali, tra il 2006 e il 2022 sembra che si segua un trend decrescente costante lungo l'intero asse temporale, senza notare un particolare cambiamento di direzione dal 2016, considerando anche che i valori minimi del 2020 e 2021 sono dovuti alle restrizioni imposte dal COVID-19. È quindi visibile un costante miglioramento, che però è comune a tutti i Paesi sviluppati, come emerge dalla Figura 2, relativa alle morti per incidenti stradali in Europa tra il 2012 e il 2022 [4]. Dunque da questi dati non si può dare merito alla riduzione del limite di velocità per quanto riguarda la riduzione del numero degli incidenti stradali e dei morti.

Figura 1: Numero di incidenti totali e di incidenti stradali gravi o fatali a Toronto dal 2006 al 2022

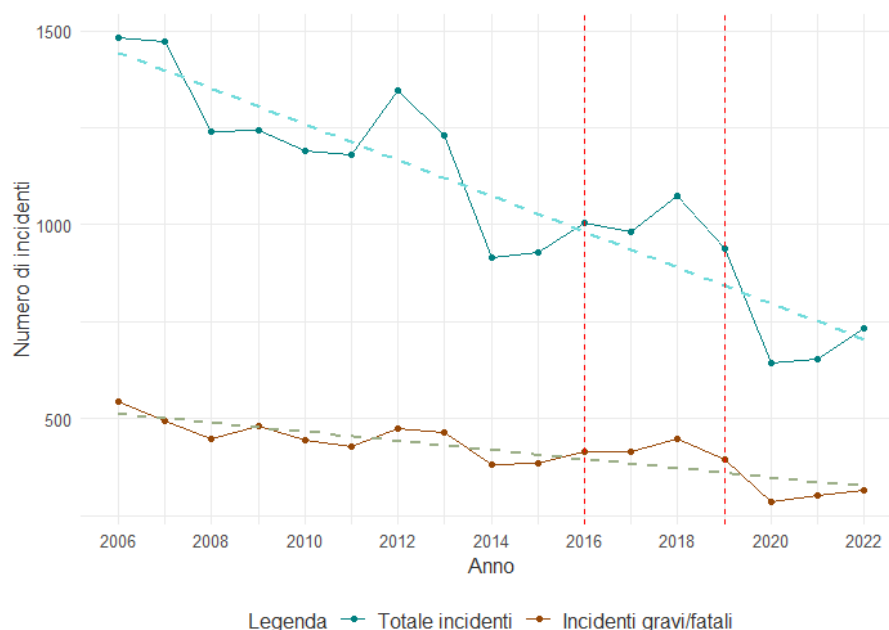
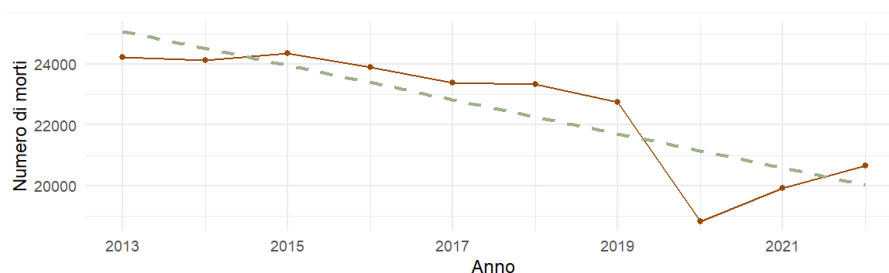
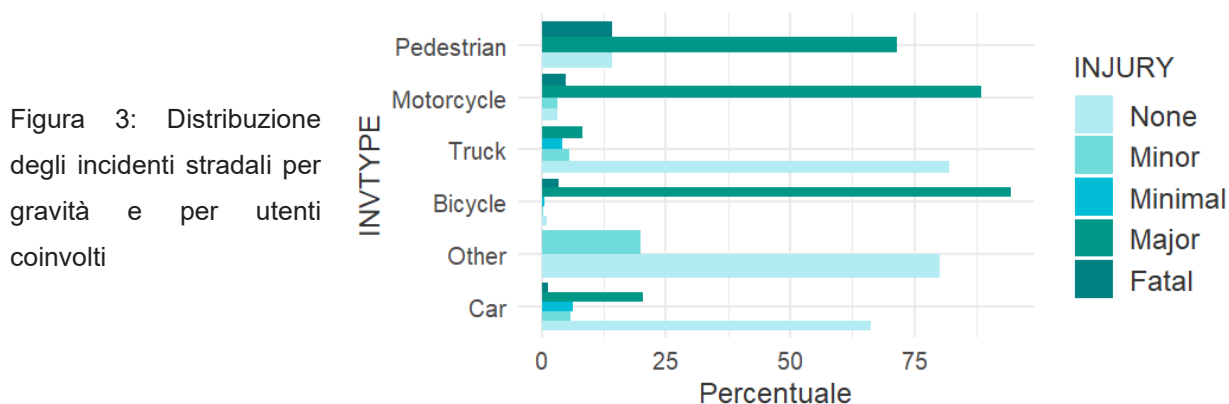


Figura 2: Numero di morti a causa di incidenti stradali in Europa dal 2012 al 2022



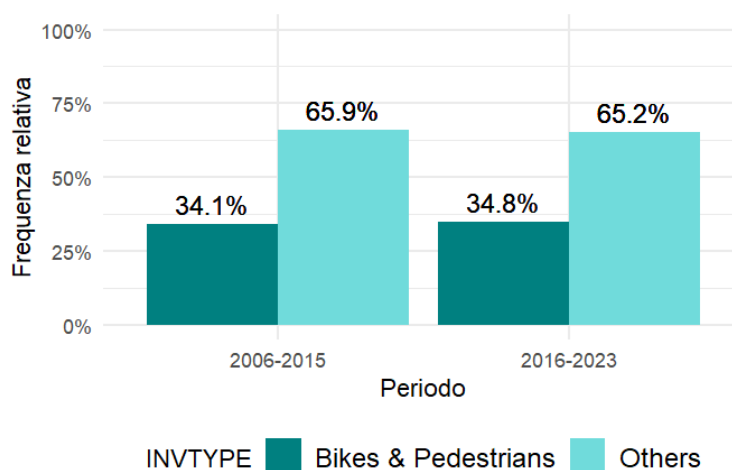
## 2.3 Utenti coinvolti

Altri aspetti interessanti sono stati rilevati durante l'esplorazione dei dati. Innanzitutto, quando si parla di sicurezza stradale, particolare attenzione viene rivolta agli utenti più a rischio in caso di impatto, ovvero i pedoni e i ciclisti. Nella Figura 3 si può notare chiaramente come la quasi totalità degli incidenti che coinvolgono questo tipo di utenti, porti a lesioni gravi (*Major*) o fatali (*Fatal*), in modo opposto a quanto accade per auto, camion o veicoli di altro tipo. Questo evidenzia l'importanza di adottare misure di protezione per gli utenti della strada più vulnerabili, soprattutto perché, in un contesto orientato verso la sostenibilità ambientale, è essenziale incentivare e promuovere modalità di spostamento a emissioni zero.



Successivamente, nel cercare un eventuale miglioramento per quanto riguarda gli incidenti “Major” e “Fatal” per gli utenti più fragili della strada dal 2016 in poi, si nota come le proporzioni di coinvolgimento tra ciclisti e pedoni rispetto agli altri veicoli, anche dopo la riduzione del limite di velocità, siano rimaste circa le stesse, come si può notare dalla Figura 4, evidenziando come il calo degli incidenti appartenga a tutti gli utenti della strada, e che la riduzione del limite di velocità non favorisce alcuni individui nello specifico.

Figura 4: Frequenza relativa dei ciclisti e pedoni con lesioni gravi o fatali prima e dopo la riduzione del limite di velocità

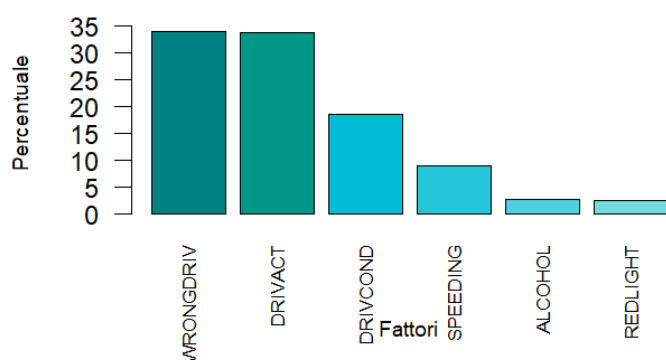


## 2.4 Variabili relative al conducente e alle condizioni esterne

Prima di discutere del modello, infine, è necessario svolgere un'analisi preliminare sulle variabili che fungeranno da regressori, e più precisamente sui fattori relativi al comportamento adottato durante la guida dal conducente e sui fattori relativi alle condizioni esterne, metereologiche e stradali.

Facendo riferimento alla Figura 5, che mostra quante volte le variabili, riguardanti i comportamenti del conducente, sono state segnalate durante la denuncia degli incidenti, si nota come logicamente sono più frequenti le violazioni più ovvie e comuni, che indicano un comportamento scorretto nella guida: WRONGDRIV ("Guida imprudente e distratta") e DRIVACT (es. "sorpasso inappropriato", "mancata distanza di sicurezza"). Segue DRIVCOND, che indica quando la condizione mentale del conducente è in qualche modo alterata (es. "stanco", "distratto", "sotto effetto di droghe"). In aggiunta, è abbastanza frequente anche la variabile SPEEDING, mentre le altre condizioni, REDLIGHT e ALCOHOL, si presentano più raramente. È doveroso precisare che non è stata considerata in questa analisi la presenza di DISABILITY, perché non riguarda un comportamento adottato ma una caratteristica propria dell'interessato, quindi non mutabile.

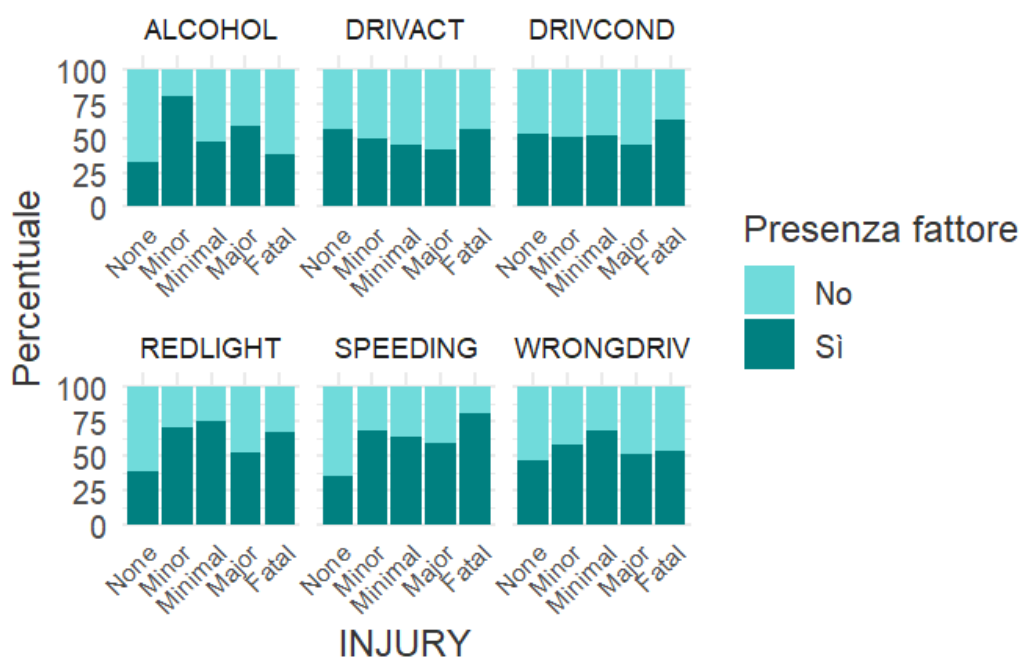
Figura 5: Frequenza relativa delle variabili relative al comportamento del conducente nella totalità degli incidenti



Quello che si vede in Figura 6 è una simile analisi per frequenze relative, rispetto però alle diverse gravità degli incidenti. Dalla distribuzione dei grafici è visibile come SPEEDING sia l'unica variabile, insieme a REDLIGHT, dove si denota un trend approssimativamente lineare per cui, all'aumentare della gravità dell'incidente,

aumenta la percentuale di casi in cui non è stato rispettato il limite di velocità (o il rosso semaforico). Per le altre variabili invece il pattern è abbastanza casuale. Da questa analisi già si capisce come, pur trattandosi di eventi più rari rispetto ad altri, questi due comportamenti assunti alla guida siano estremamente pericolosi poiché influenzano in modo direttamente proporzionale la probabilità che il danno sia più elevato in caso di impatto con un altro utente della strada.

Figura 6: Grafici a colonne in pila sulla gravità della lesione rispetto alla presenza o meno dei fattori relativi alla guida del conducente

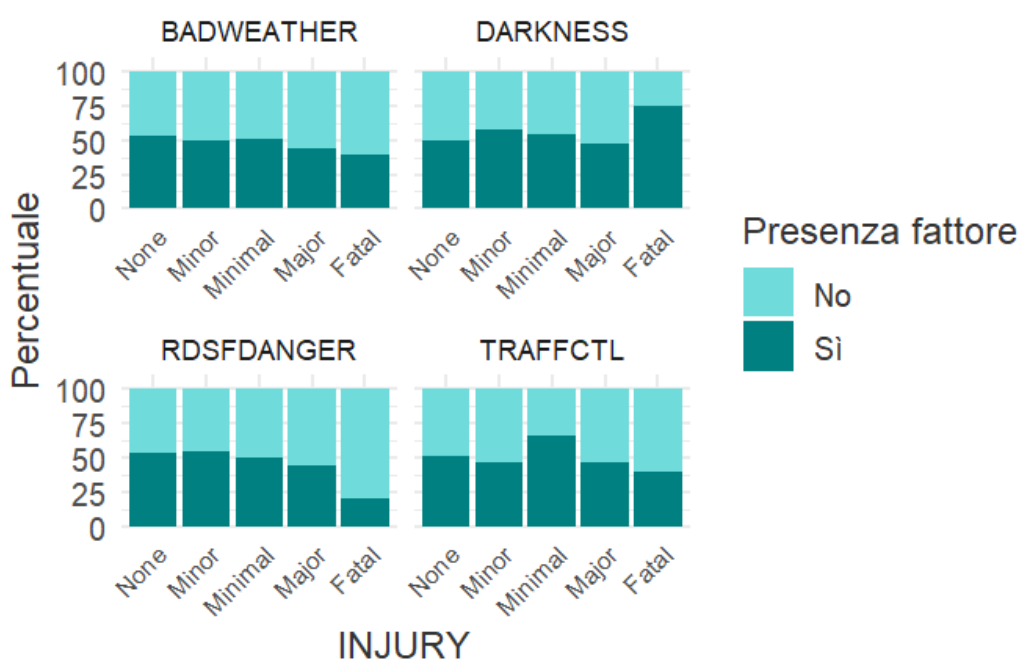


Per quanto riguarda l'analisi relativa alle variabili che non dipendono dal comportamento del conducente, come condizioni della strada e del meteo, non ci soffermiamo sulla frequenza di ogni fattore sul totale degli incidenti, perché di scarso contenuto informativo nel rilevare se qualche caratteristica sia più influente delle altre, poiché si presentano tutti e quattro circa con la stessa frequenza, attorno al 30%.

Invece, è interessante notare dalla Figura 7 come, in linea con quanto si può logicamente prevedere per quanto riguarda il fattore DARKNESS, la correlazione tra gravità e presenza del buio è visibile e positiva; in modo molto meno marcato anche per TRAFFCTL (ovvero la presenza di un incrocio regolamentato da segnaletica di qualche tipo) si rileva coerentemente che più il traffico è gestito e controllato, minore è la severità dell'incidente. Al contrario di come si potrebbe intuitivamente pensare, però,

all'aumentare della criticità dell'incidente si riducono le probabilità che siano presenti segnalazioni di BADWEATHER (ex. "pioggia", "nebbia", "neve") e RDSFDANGER ("strada ghiacciata", "strada bagnata"). Una possibile interpretazione di ciò può essere data dal fatto che in condizioni di pericolo e di scarsa visibilità i conducenti tendano ad avere un comportamento alla guida più cauto e prudente, condizione che però non è valida nelle ore notturne, data forse anche dal fatto che, nonostante la minore visibilità, le strade sono meno trafficate e quindi si pone meno attenzione ai pericoli circostanti.

Figura 7: Grafici a colonne in pila sulla gravità della lesione rispetto alla presenza o meno dei fattori naturali o di caratteristiche stradali



## 2.5 Costruzione del modello

In questo studio, si esamina l'influenza di vari fattori sulla gravità degli incidenti stradali. La variabile d'interesse in questa analisi è INJURY, che classifica la gravità delle lesioni in cinque categorie ordinate: "None", "Minimal", "Minor", "Major" e "Fatal". Queste categorie spaziano dall'assenza di danni fisici fino a lesioni gravi e poi fatali entro 30 giorni dall'incidente.

Dopo un'analisi esplorativa approfondita, il modello logit binomiale [1] è stato identificato come il più adeguato a comprendere l'effetto delle variabili indipendenti sulla probabilità di incidenti gravi.

Per l'analisi, INJURY viene trasformata in una variabile dicotomica Y: le categorie "None", "Minimal" e "Minor" sono codificate come 0, mentre "Major" e "Fatal" come 1. Questa ricodifica permette di focalizzare l'analisi sui fattori che influenzano il verificarsi di incidenti gravi o fatali. Il modello assume che Y segua una distribuzione di Bernoulli, appropriata per variabili binarie. La relazione tra la probabilità dell'evento e le variabili indipendenti è modellata attraverso la funzione logit. Tutte le variabili precedentemente citate sono incluse nell'analisi come predittori, ad eccezione di WRONGDRIV, che risulta non significativa e la cui esclusione migliora la bontà del modello. Questo approccio metodologico consente di esaminare sistematicamente l'impatto di vari fattori sulla gravità degli incidenti stradali, fornendo preziosi spunti per la sicurezza stradale e la prevenzione degli incidenti.

Formalmente, il modello può essere descritto come segue. Gli incidenti registrati nel dataset vengono considerati come osservazioni indipendenti, dove ogni incidente è caratterizzato dalla variabile dipendente  $Y_i$  e dal vettore  $X_i = (X_{i1}, \dots, X_{im})^T$ , che rappresenta le variabili indipendenti precedentemente introdotte. Si suppone che  $Y_i | X_i \sim \text{Bernoulli}(p_i)$ ; ciò significa che  $Y_i = 1$  (incidente grave) con probabilità  $p_i$ , e  $Y_i = 0$  (incidente non grave) con probabilità  $1 - p_i$ .

Il valore atteso condizionato della distribuzione è  $E[Y_i | X_i] = p_i$ , che rappresenta la probabilità che un incidente sia grave, dato il vettore delle variabili indipendenti  $X_i$ . Si assume inoltre che questo valore dipenda dalle variabili indipendenti secondo la relazione:  $\text{logit}(p_i) = \log\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = X_i^T \beta$ , dove  $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_m)^T$  è un vettore di coefficienti non noti. In particolare, la funzione di collegamento (link) logit trasforma il rapporto tra la probabilità che l'evento si verifichi e la probabilità che non si verifichi in

una scala logaritmica. Questa trasformazione consente di modellare il logaritmo del rapporto di probabilità come una combinazione lineare dei regressori.

Il modello è implementato utilizzando la funzione `glm()` in R, specificando `family = binomial(link = "logit")`. Le variabili categoriali `ROADCLASS` e `INVTYPE` sono automaticamente convertite in variabili dummy, fissando rispettivamente “Local” e “Car” come categorie di riferimento. Questo approccio fornisce stime dei parametri che quantificano il contributo di ciascuna variabile indipendente alla probabilità di incidenti gravi.

La funzione `summary()`, di cui l'output è mostrato in Tabella 2, ci fornisce un riepilogo dettagliato del modello di regressione logistica costruito. Dai risultati ottenuti nell'output, si può affermare che i fattori come passare con il semaforo rosso, l'eccesso di velocità, l'alcol e la disabilità del conducente, sono i principali predittori di incidenti gravi o fatali, insieme al tipo di utente che ne è vittima, che evidenzia come il coinvolgimento di utenti come ciclisti, pedoni o anche motociclisti sia alquanto pericoloso per questi ultimi. Sembra chiaro, dunque, come ad incidere maggiormente nella criticità degli incidenti siano i comportamenti e le caratteristiche proprie del conducente. Il meteo avverso, invece, non sembra avere un effetto significativo; mentre la variabile `TRAFFCTL`, ovvero la gestione del traffico, risulta significativa e ha un ruolo protettivo nella prevenzione di incidenti gravi.

Sottolineiamo, tuttavia, che i p-value considerati non sono corretti per molteplicità, e dunque i risultati vanno intesi in un contesto esplorativo.

Tabella 2: Stime dei coefficienti del modello, p-value relativo all'ipotesi nulla che il coefficiente sia uguale a zero ( $<0,001$  ‘\*\*\*’;  $<0,01$  ‘\*\*’;  $<0,05$  ‘\*’) e odds ratio

VARIABILE	STIMA	P-VALUE	ODDS RATIO
REDLIGHT	1,075	8,51e-05 ***	2,930
BADWEATHER	-0,143	0,602	0,867
DRIVCOND	0,204	0,193	1,226
ROADCLASSCollector	-0,105	0,591	0,900
ROAD_CLASSLaneway	1,900	0,189	6,687
ROAD_CLASSMinor Arterial	-0,187	0,269	0,829
TRAFFCTL	-0,276	0,035 *	0,759
RDSFDANGER	0,242	0,285	1,274
INVTYPEOther	-14,237	0,968	0,000

VARIABILE	STIMA	P-VALUE	ODDS RATIO
INVTYPEBicycle	5,830	< 2e-16 ***	340,495
INVTYPETruck	-0,887	0,049 *	0,412
INVTYPEMotorcycle	4,277	< 2e-16 ***	72,049
INVTYPEPedestrian	3,547	0,001 **	34,707
DRIVACT	0,249	0,105	1,283
SPEEDING	1,142	1,47e-13 ***	3,133
ALCOHOL	1,117	7,54e-06 ***	3,055
DISABILITY	2,162	6,36e-14 ***	8,686
DARKNESS	-0,176	0,184	0,839

Gli odds ratio, ottenuti a partire dalle stime dei coefficienti, offrono una prospettiva sulle relazioni tra le variabili indipendenti e la probabilità di un evento. Per spiegare l'interpretabilità degli odds ratio, consideriamo la variabile DISABILITY, che può saltare all'attenzione per il suo valore particolarmente elevato di 8,686. Questo significa che le persone con disabilità hanno circa 8,69 volte più probabilità che l'incidente causato sia grave o fatale rispetto a chi non ha disabilità. Questo riflette una maggiore difficoltà che certe persone possono affrontare in situazioni di rischio. Tuttavia, è importante notare che questo alto valore è probabilmente influenzato dalla frequenza molto bassa con cui le persone con disabilità sono coinvolte in incidenti.

Anche altri fattori mostrano alti odds ratio: REDLIGHT ha un valore di 2,930, ALCOHOL di 3,055 e SPEEDING di 3,133. La notevole incidenza di rischio associata a questi comportamenti sottolinea l'importanza di rispettare i segnali e le regole stradali per prevenire incidenti. Per quanto riguarda invece TRAFFCTL, si ottiene un odds ratio di 0,759, che indica come alla presenza di un controllo segnaletico del traffico è associata una riduzione della probabilità di incidenti gravi. Questo valore suggerisce che le misure di controllo del traffico, come semafori, segnali di stop e rotatorie, contribuiscono a diminuire la gravità degli incidenti, riducendo il rischio di conseguenze gravi per gli utenti della strada.

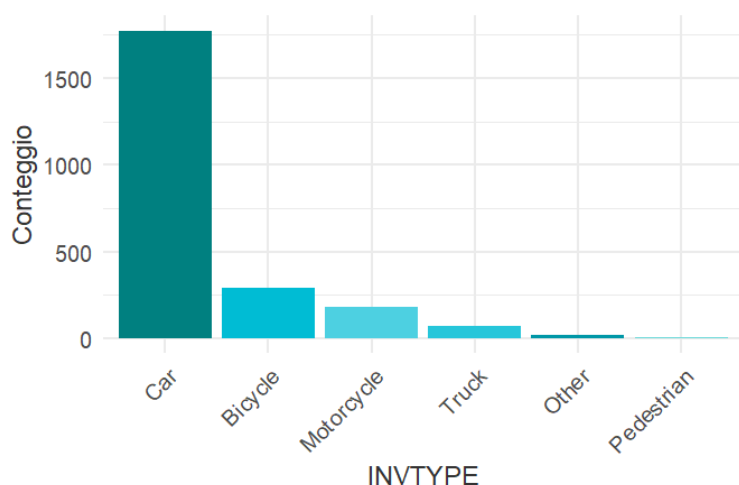
Infine, il modo di muoversi in città (INVTYPE="Motorcycle", "Truck", "Bicycle", ecc.) mostra notevoli variazioni negli odds ratio rispetto alle varie modalità, che hanno "Car" come modalità di riferimento. "Motorcycle" ha un valore di 72,049, indicando che i motociclisti sono significativamente più a rischio rispetto a chi guida auto o veicoli più grandi. "Pedestrians" presenta un odds ratio di 34,707, segnalando anche questa



come categoria ad elevato rischio. Tuttavia, l'odds ratio più elevato corrisponde a "Bicycle", con un valore di 340,495, suggerendo che le biciclette sono estremamente più a rischio di riportare lesioni gravi se coinvolte in un incidente rispetto agli altri utenti della strada.

Questo valore è particolarmente significativo considerando che i ciclisti sono secondi solo alle auto per coinvolgimento negli incidenti stradali, come illustrato in Figura 8.

Figura 8: Distribuzione degli incidenti per utente coinvolto



Dopo un'analisi approfondita dei coefficienti dei regressori e della loro significatività, è fondamentale confermare che il modello possieda caratteristiche rappresentative. Per tale scopo, sono stati effettuati diversi test, tra cui il calcolo del Variance Inflation Factor (VIF) e dell'indice di McFadden.

I risultati del VIF, mostrati in Tabella 3, indicano che i valori per le variabili del modello sono generalmente contenuti, con alcune eccezioni lievemente superiori a 2 per BADWEATHER e RDSFDANGER. Questo suggerisce che, sebbene esistano alcune correlazioni tra le variabili, non vi sono segni significativi di multicollinearità.

Tabella 3: Calcolo dei VIF (Variance Inflation Factor)

VARIABILE	VIF
REDLIGHT	1.136
BADWEATHER	2.205
DRIVCOND	1.629
ROAD_CLASS	1.113
TRAFFCTL	1.164

VARIABILE	VIF
RDSFDANGER	2.254
INVTYPE	1.112
DRIVACT	1.589
SPEEDING	1.093
ALCOHOL	1.164
DISABILITY	1.054
DARKNESS	1.142

Per quanto riguarda lo pseudo R-quadro di McFadden, esso misura la qualità del modello logit in modo analogo al R-quadro nella regressione lineare. Il valore ottenuto è 0,399 ed implica che il modello spiega circa il 40% della variabilità nei dati rispetto al modello nullo. Questo valore è generalmente considerato buono e indica una solida capacità predittiva del modello.

In aggiunta, il test di Hosmer-Lemeshow, valuta quanto bene il modello si adatta ai dati osservati; con un p-value di 0,827 ( $>0,05$ ) il test conferma che non ci sono evidenze di una cattiva adattabilità del modello, suggerendo che il modello è ben calibrato e rappresentativo.

In sintesi, il modello dimostra buone proprietà in termini di multicollinearità, adattamento e capacità predittiva, risultando complessivamente affidabile e ben tarato sui dati.

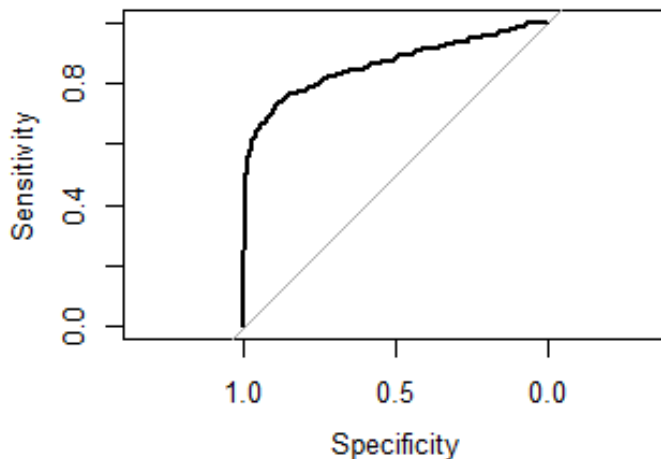
Le analisi successive approfondiscono la capacità descrittiva del modello logit binomiale e il ruolo delle variabili incluse. Per la valutazione si utilizzano diverse metriche chiave, ognuna delle quali contribuisce a chiarire l'efficacia del modello nella classificazione e ad interpretare meglio i risultati.

Innanzitutto, la capacità discriminativa del modello viene esaminata attraverso l'AUC (Area Under the Curve), che ha un valore di 0,861. Questo indicatore suggerisce una capacità discriminativa moderatamente alta, indicando che il modello è piuttosto efficace nel distinguere tra le due classi, 0 e 1. L'alta AUC dimostra che il modello è in grado di assegnare punteggi più elevati ai casi che effettivamente appartengono alla classe positiva rispetto a quelli della classe nulla, mostrando una solida prestazione nella classificazione degli eventi.

Per una comprensione visiva della performance del modello viene tracciata la curva Receiver Operating Characteristic (ROC), visibile in Figura 9. Questa curva illustra il

trade-off tra il tasso di veri positivi e il tasso di falsi positivi a diverse soglie di classificazione. La curva ROC conferma la robustezza del modello, dimostrando visivamente che mantiene un buon equilibrio tra sensibilità e specificità. Questo equilibrio è cruciale per garantire che il modello non solo identifichi correttamente i casi positivi, ma riduca anche al minimo i falsi positivi.

Figura 9: Curva ROC (Receiver Operating Characteristic)



Approfondendo l'analisi, la matrice di confusione fornisce dettagli sui risultati delle previsioni del modello rispetto ai dati reali. Il modello classifica correttamente 1.426 osservazioni come “non grave” e 534 come “grave/fatale”, ma genera anche 64 falsi positivi e 315 falsi negativi. Questi numeri sono fondamentali per calcolare ulteriori metriche di performance e per comprendere meglio il modello. L'accuratezza del modello, pari a 0,838, indica che sono classificate correttamente circa l'84% delle osservazioni, suggerendo una buona prestazione complessiva. La precisione, uguale a 0,893, rappresenta la proporzione di veri positivi tra tutte le previsioni positive fatte dal modello; dunque, se il modello prevede un evento positivo (un incidente grave o fatale), è corretto nel 89% dei casi, ottenendo quindi una bassa incidenza di falsi positivi. Invece il richiamo è pari a 0,629 e riflette la proporzione di veri positivi correttamente identificati tra tutti i casi positivi reali; questo valore indica che il modello riesce a identificare circa il 63% dei casi positivi. Infine, l'F1-score, pari a 0,738, rappresenta un buon equilibrio tra precisione e richiamo e dimostra che il modello mantiene un compromesso efficace tra la capacità di identificare correttamente i casi positivi e la minimizzazione dei falsi positivi, fornendo così una sintesi robusta delle sue prestazioni.

## **2.6 Commento riassuntivo sull'incidentalità**

Lo studio si focalizza sull'analisi di un dataset relativo all'incidentalità stradale e sulla costruzione di un modello logit per identificare i fattori che influenzano maggiormente la gravità degli incidenti.

I risultati in Figura 1 indicano un calo significativo degli incidenti gravi o mortali a Toronto, sebbene questo non possa essere attribuito unicamente alla riduzione del limite di velocità. Tale tendenza sembra, infatti, essere comune alla maggioranza dei Paesi sviluppati, come evidenziato dai dati europei in Figura 2. Inoltre, nella città di Toronto, le analisi temporali rispetto alla distribuzione degli utenti coinvolti, ponendo l'attenzione su pedoni e ciclisti (Figura 4), non mostrano miglioramenti rilevanti direttamente collegati all'abbassamento del limite di velocità dal 2016 in poi.

L'analisi preliminare delle variabili relative al comportamento dei conducenti ha rivelato che fattori come l'eccesso di velocità, il passaggio col semaforo rosso e il consumo di alcol giocano un ruolo predominante negli incidenti più gravi. Inoltre, emerge che la presenza di regolamentazioni del traffico aumenta la sicurezza stradale. Questa conclusione è ulteriormente confermata dal modello logit binomiale, che evidenzia come il comportamento alla guida e le condizioni della strada siano determinanti nella gravità degli incidenti (Tabella 2).

Un altro punto di riflessione riguarda il tipo di mezzo utilizzato sulle strade. I risultati del modello indicano che, nonostante le Nazioni Unite promuovano l'uso di mezzi ecologici, l'uso delle biciclette sulle stesse strade dei veicoli a motore risulta estremamente pericoloso.

Questi elementi sottolineano l'importanza dell'implementazione dei limiti di velocità di 30 km/h nelle aree urbane. Infatti, sebbene la riduzione del limite di velocità, da sola, non garantisca un miglioramento significativo della sicurezza stradale, rimane uno dei pochi fattori su cui i governi possono intervenire direttamente, insieme alla struttura e alla progettazione delle strade. La rimodellazione urbana è un processo lungo e complesso, ma comunque necessario per il successo delle politiche di sicurezza stradale. Questo include la riconfigurazione delle strade (ad esempio interventi di traffic calming) come strumento per la riduzione della velocità, e la creazione di spazi dedicati ai mezzi di trasporto favoriti (ad esempio a Bologna le ferrovie per i tram, le corsie preferenziali per gli autobus e le piste ciclabili). Minori interferenze tra mezzi di tipologia diversi favoriscono una riduzione del rischio, insieme all'aumento della disponibilità e

dell'efficienza dei mezzi di trasporto pubblici, per garantire una migliore sostenibilità della circolazione urbana.

In conclusione, sebbene la velocità ridotta aumenti in parte la sicurezza stradale, l'introduzione del limite di 30 km/h, è solo uno dei cambiamenti che si dovrebbero attuare gradualmente in tutti i comuni e paesi, con l'obiettivo di ripensare gli spazi urbani per renderli più vivibili, sicuri, meno inquinati e meno rumorosi.

### **3 Simulazione di viabilità stradale**

Come anticipato nell'introduzione, il principale motivo di lamentele rispetto alla riduzione del limite di velocità è il presunto allungamento del tempo di percorrenza delle strade. In questa sezione con un programma di simulazione viene costruito un modello composto da strade con semafori e sensi di marcia, su cui far muovere delle macchine virtuali, per studiarne l'andamento.

#### **3.1 NetLogo**

Per implementare il modello viene utilizzato NetLogo, un ambiente di programmazione e simulazione ideale per lo studio di sistemi complessi basati su agenti autonomi. Questo software consente di visualizzare i risultati delle simulazioni in tempo reale e di sperimentare diversi scenari. Tra i modelli predefiniti disponibili sulla piattaforma, "Traffic Grid" ha fornito un valido punto di partenza per lo sviluppo della simulazione oggetto di questo studio.

#### **3.2 Descrizione del modello**

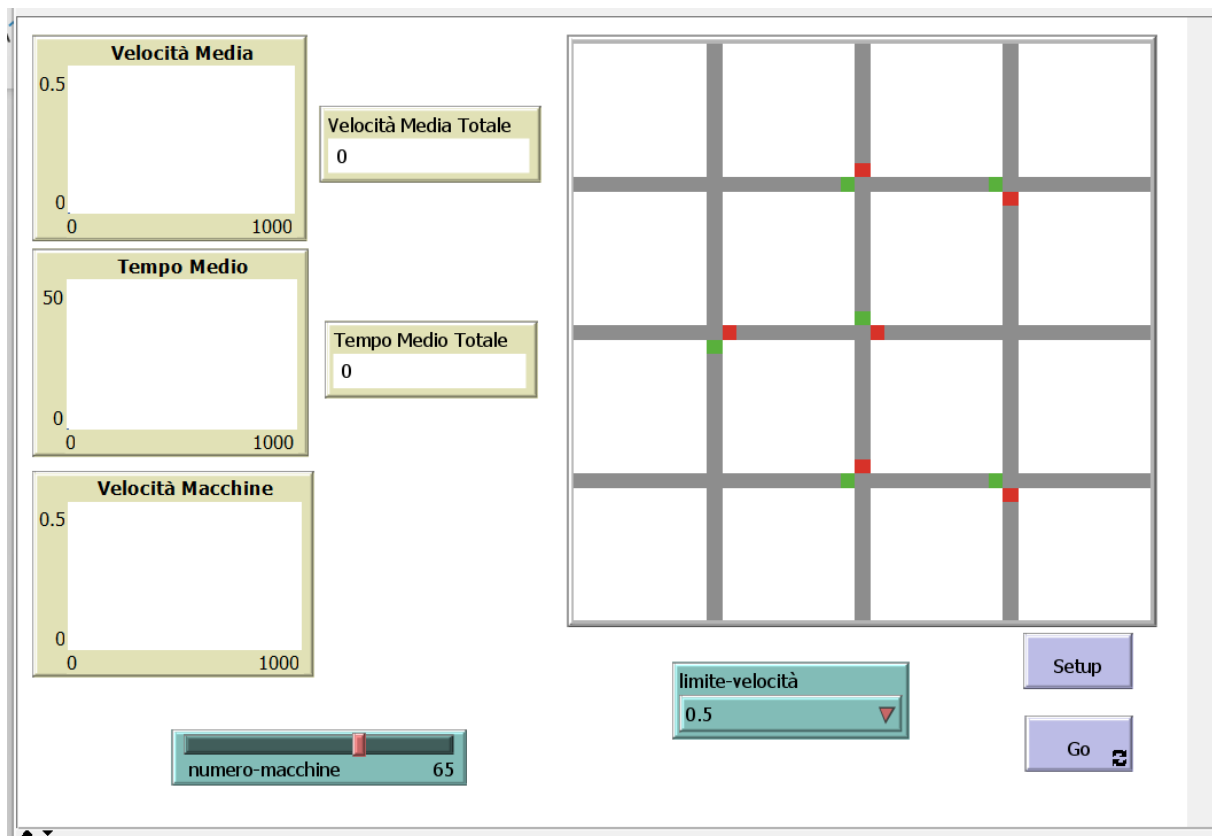
Il modello implementato riproduce una rete stradale urbana semplificata, costituita da una griglia di strade intersecantisi con incroci, alcuni dei quali regolati da semafori. Le automobili, generate casualmente ai margini della mappa o lungo le strade, si muovono attraverso questo reticolo seguendo regole predefinite che rispecchiano il comportamento reale dei conducenti.

Il movimento delle auto è governato da regole che mimano il comportamento reale dei conducenti. Le vetture accelerano fino a raggiungere un limite di velocità prestabilito, rallentano in prossimità di altre auto o semafori rossi, e possono svoltare agli incroci con una certa probabilità. Questo sistema di regole crea un flusso di traffico dinamico e realistico, particolarmente utile per studiare come si formano e si dissolvono le code nel traffico urbano.

Nell'interfaccia principale della piattaforma, mostrata in Figura 10, viene tenuta traccia di varie metriche, come la velocità media e il tempo medio di permanenza nel display. Inoltre, il modello include una funzione per selezionare casualmente un'auto e seguirne il percorso, permettendo un'analisi più dettagliata del comportamento individuale dei veicoli e dell'andamento della velocità avuta nel tragitto; "Velocità macchine" riporta la velocità dell'auto selezionata. Queste statistiche forniscono una visione d'insieme dell'efficienza del sistema stradale simulato.

I selettori del limite di velocità e del numero di macchine servono infine a gestire le condizioni volute durante le molteplici simulazioni, per poi confrontare le metriche tra di loro. Vengono utilizzate due velocità limite di 0,3 e 0,5, che rispettano la proporzione tra le velocità oggetto di studio di 30 e 50 km/h (per rendere la spiegazione più intuitiva e comprensibile, ci si riferirà d'ora in poi ai valori di velocità in km/h). La seconda variabile rispecchia la densità del traffico e rappresenta il numero di macchine massimo che possono essere sulla strada allo stesso momento, con due possibili valori di 30 e 70 (traffico scorrevole e congestionato, rispettivamente). Questi valori sono stati scelti con criterio logico, ma non si basano su un fondamento teorico specifico. La frequenza di comparizione di nuove auto segue un andamento inversamente proporzionale al numero di macchine già presenti, così da ottenere un'affluenza sempre vicina al limite massimo.

Figura 10: Interfaccia del modello su NetLogo



### **3.3 Presentazione dei risultati**

Nella simulazione vengono eseguite 1500 tick, dove ogni tick rappresenta un'unità di tempo che avanza nel modello. Questo numero è sufficiente a stabilizzare i valori delle metriche, in modo tale da consentire un confronto affidabile. È importante precisare che, trattandosi di una simulazione basata su strade con regole e caratteristiche definite in modo arbitrario e casuale, i valori ottenuti sono fittizi e utili solo a scopo comparativo. I modelli analizzati sono quattro e vengono confrontati a coppie, mantenendo costante la densità del traffico e variando i due diversi limiti di velocità.

#### **3.3a Traffico congestionato**

L'analisi comparativa delle Figure 11 e 12 offre spunti interessanti riguardo all'impatto dei limiti di velocità sul flusso del traffico in una strada ad alta densità veicolare. Con un limite di 30 km/h (Figura 12), si registra una velocità media di scorrimento di 13 km/h, inferiore del 19% circa rispetto ai 16 km/h osservati con il limite di 50 km/h (Figura 11).

Il grafico relativo al tempo medio di permanenza nell'interfaccia virtuale rivela un dato più drastico rispetto al precedente: si osservano valori oscillanti intorno ai 47 tick (o iterazioni) per il limite di 30 km/h, contro i 37 tick per il limite di 50 km/h. Questo rappresenta un incremento del 27% del tempo di permanenza quando si riduce il limite di velocità. La discrepanza tra la riduzione percentuale della velocità media e l'aumento percentuale del tempo di permanenza, nonostante la loro evidente correlazione, può essere attribuita alla natura variabile e casuale dei percorsi veicolari all'interno del sistema simulato.

Osservando i grafici relativi a "Velocità Macchine", il limite di velocità più elevato è associato a uno stile di guida marcatamente discontinuo, caratterizzato da frequenti accelerazioni e decelerazioni. Questo pattern si contrappone nettamente all'andamento più costante osservato con il limite di 30 km/h, che mostra una minore frequenza di accelerazioni e frenate, principale fattore di inquinamento relativo alla mobilità urbana.



Figura 11: Limite velocità = 50 km/h, Traffico = congestionato

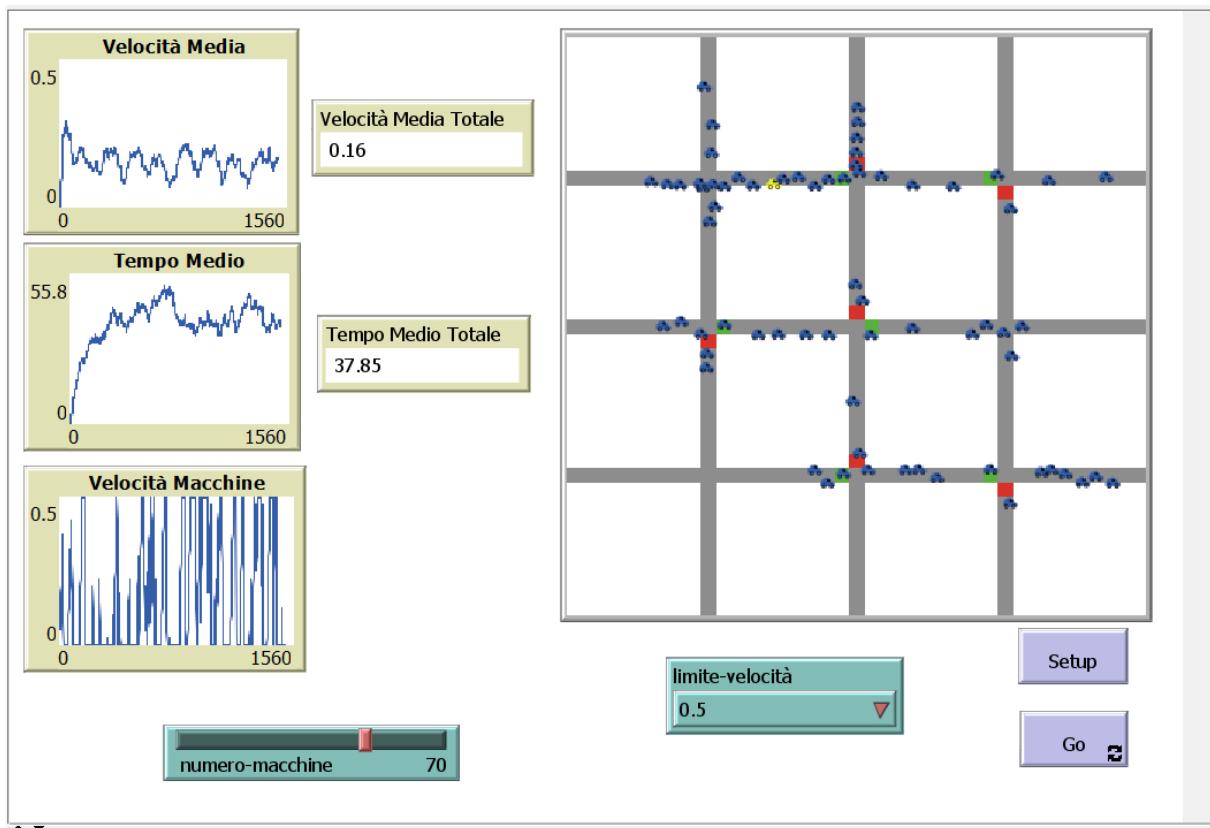
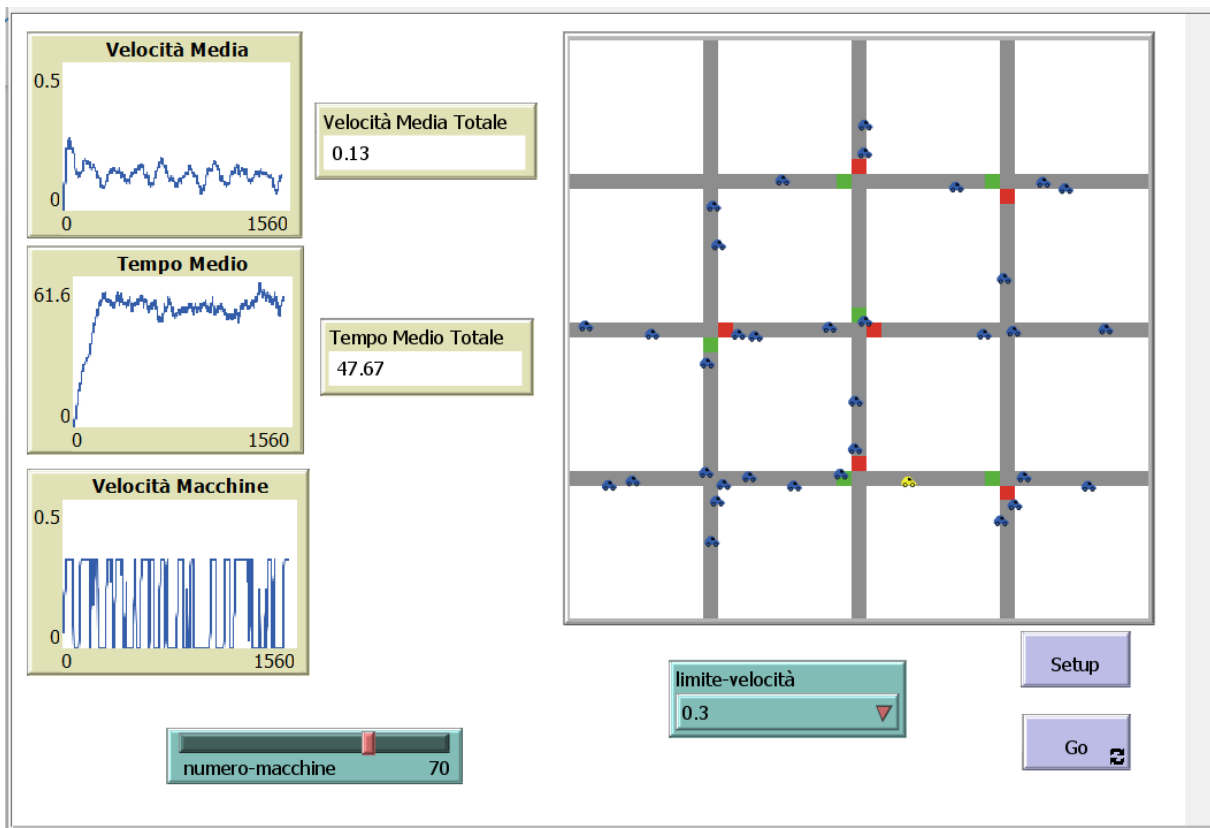


Figura 12: Limite velocità = 30 km/h, Traffico = congestionato



### 3.3b Traffico scorrevole

Sotto l'ipotesi di una strada scarsamente trafficata, osservando le Figure 13 e 14, si può notare che, con un limite di velocità di 30 km/h (Figura 14), la velocità media di scorrimento è inferiore del 24% rispetto a quella con limite 50 km/h (Figura 13), con Velocità Media Totale rispettivamente di 19 e 25 km/h.

Successivamente, analizzando il grafico relativo al tempo medio di permanenza nell'interfaccia virtuale si osserva che i valori medi corrispondono a 44 e 31 tick, con un incremento del 42% quando si riduce il limite di velocità. Se per la situazione di traffico congestionato quindi la differenza non è così netta, quando le auto girano su strade abbastanza libere la riduzione di velocità influisce significativamente sulla durata del percorso.

Risultato molto simile alle condizioni di traffico intenso (2.3a) si ha invece osservando i grafici dell'andamento della velocità riportati nelle Figure 13 e 14, dove appunto emerge chiaramente che ad una velocità più elevata è associata una guida più discontinua, mentre con il limite di velocità inferiore le variazioni di velocità sono meno pronunciate.

Figura 13: Limite velocità = 50 km/h, Traffico = scorrevole

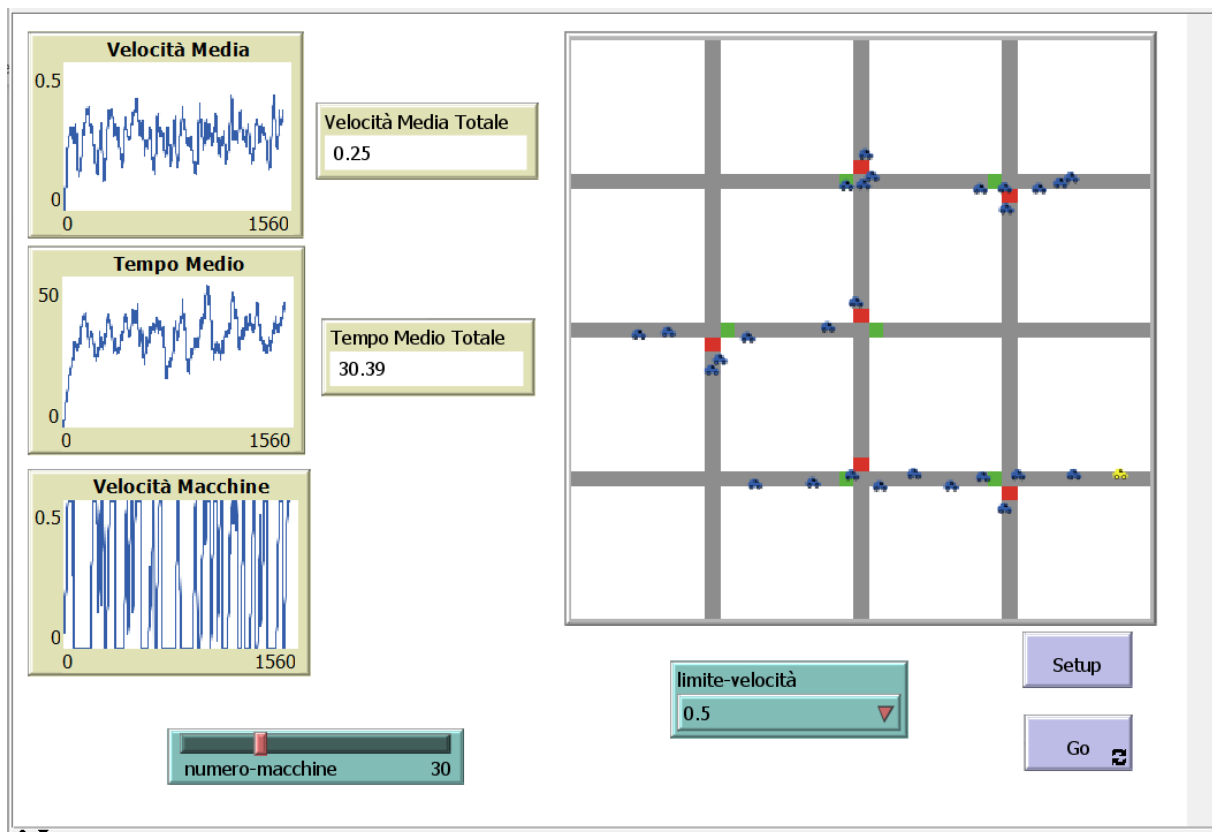
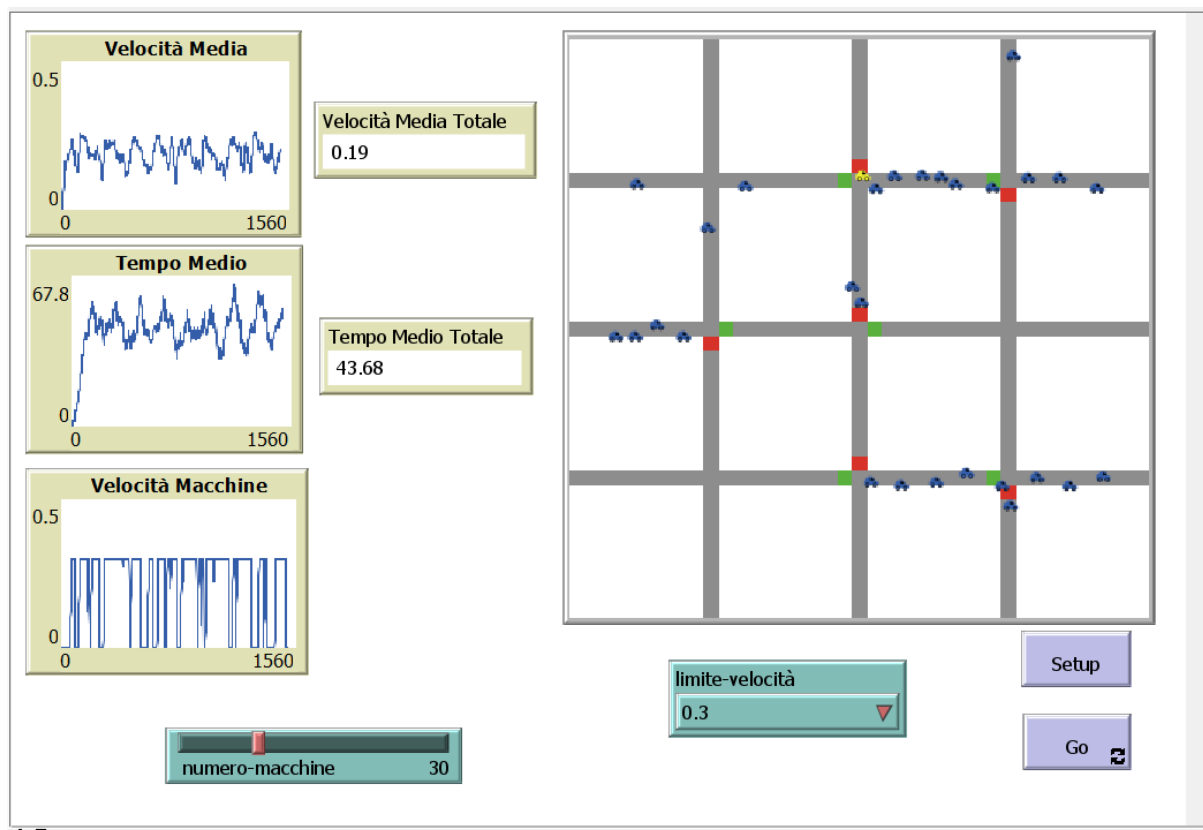


Figura 14: Limite velocità = 30 km/h, Traffico = scorrevole



### 3.4 Commento riassuntivo sulla viabilità

I dati emersi dalla simulazione evidenziano una complessa interazione tra i limiti di velocità imposti e le dinamiche del traffico urbano.


Nonostante una minore oscillazione nella guida, la riduzione della velocità media di scorrimento, passando da un limite di 50 km/h a uno di 30 km/h, costituisce un argomento a favore di limiti più elevati. Tuttavia, è importante notare che le differenze riscontrate sempre superiori al 20%, sono dovute alla presenza nel modello di tratti di strada fittizi e decisamente brevi, non rappresentativi del reale contesto urbano. Resta comunque evidente che il tempo di percorrenza risulta significativamente diverso con diversi limiti di velocità.

Nel 2012, a sostegno di questo studio, nella città di Fontainebleau in Francia, esperimenti reali sulla viabilità [8] hanno rilevato che, su tratti di media durata, l'aumento del tempo necessario per compiere lo stesso tragitto era di circa il 10%. È interessante osservare, come mostrato nella Figura 15, che i risultati indicano un maggiore tempo di percorrenza e, di conseguenza, una minore velocità media. Tuttavia, per quanto riguarda il consumo di carburante, i dati favoriscono il limite di

velocità inferiore; bisogna anche in questo caso affidarsi solo in parte a questi dati poiché, trattandosi di un esperimento di oltre dieci anni fa, non erano state sviluppate le stesse tecnologie odierne per migliorare l'efficienza del motore .

Infine, si nota curiosamente come lo stesso tragitto fatto in bicicletta richiede lo stesso tempo che in auto con il limite di 50 km/h; ciò mostra come il traffico e la segnaletica stradale siano i principali fattori che determinano la durata di percorso.

Figura 15: Test di viabilità a 30 km/h, Fontainebleau

limite à <b>30</b> km/h	<u>limite</u> à <b>50</b> km/h	à vélo
		
<b>9'50</b>	<b>8'20</b>	<b>8'20</b>
<b>18</b> km/h	<b>21</b> km/h	<b>21</b> km/h
<b>5.2</b> l/100km	<b>8.8</b> l/100km	<b>0</b> l/100km

## 4 Conclusione

Questa ricerca analizza l'impatto dell'introduzione del limite di velocità di 30 km/h nelle zone urbane, sia attraverso l'analisi di dati sugli incidenti a Toronto, sia mediante la realizzazione di un modello di simulazione della viabilità stradale.

Dallo studio emerge che la riduzione del limite di velocità a 30 km/h comporta sia vantaggi che svantaggi e in alcune situazioni non influisce affatto sugli aspetti analizzati, come gravità e frequenza degli incidenti.

In generale però, secondo quanto visto in questo studio e quanto osservato in studi condotti dalla United Nations Road Safety Collaboration, dalla World Health Organization e da altri interessati, un traffico più fluido e costante, seppur più lento, comporta numerosi vantaggi in termini di viabilità, sicurezza stradale, efficienza energetica, urbanistica ed in termini economici:

### 1. Viabilità:

- a. Minor numero di "stop-and-go", che riducono la congestione;
- b. Diminuzione dello stress per i conducenti;

### 2. Sicurezza:

- a. Maggior tempo di reazione, per reagire a imprevisti.
- b. Significativa riduzione della distanza necessaria per fermare completamente il veicolo (una macchina che viaggia a 30 km/h si ferma in 13,3 metri, mentre a 50 km/h impiega il doppio, 27,7 m);
- c. Minore severità dell'impatto in caso di collisione (un pedone colpito a 30 km/h ha il 90/95% di possibilità di sopravvivere all'urto, mentre se viene colpito a 50km/h ne ha solo il 50%);

### 3. Efficienza energetica e impatto ambientale

- a. Riduzione del consumo di carburante derivante da una diminuzione delle accelerazioni (il motore a benzina in realtà è più efficiente a velocità superiori, che sono però difficili da mantenere in modo costante per lunghi tratti in strade urbane);
- b. Ridotto consumo di freni e pneumatici, che, durante il processo di usura, rilasciano microparticelle nocive che permangono nell'atmosfera.
- c. Minore stress meccanico sui veicoli, con potenziali risparmi in termini di manutenzione;

#### 4. Considerazioni urbanistiche

- a. Migliore integrazione tra diversi utenti della strada (pedoni, ciclisti, automobilisti).
- b. Creazione di spazi urbani più vivibili e a misura d'uomo.
- c. Potenziale riduzione dell'inquinamento acustico.

#### 5. Risparmio pubblico

- a. Riduzione dei costi pubblici (ad esempio costi di intervento, sanitari, legali, sociali, ecc.) come conseguenza della riduzione degli incidenti, soprattutto mortali. Di seguito sono riportati alcuni dati relativi ai costi da incidenti stradali in Italia nel 2019 [5]:
  - i. Il costo sociale totale dell'incidentalità con feriti è stimato a circa 16,85 miliardi di euro; includendo anche i danni materiali senza feriti, il costo totale sale a circa 23,42 miliardi di euro;
  - ii. Il costo medio di un incidente mortale è di circa 1,6 milioni di euro.

I risultati e le informazioni ottenute suggeriscono dunque che in un contesto urbano soprattutto ad alta densità di traffico, l'imposizione di limiti di velocità inferiori porta benefici che vanno oltre la mera questione della velocità di percorrenza, in quanto sono relativi al benessere e alla sicurezza dei cittadini.

## 5 Bibliografia

1. Alan Agresti: *Foundations of Linear and Generalized Linear Models* (2015)
2. City of Toronto: *Motor Vehicle Collisions involving Killed or Seriously Injured Persons* (2023); <https://open.toronto.ca/dataset/motor-vehicle-collisions-involving-killed-or-seriously-injured-persons/>
3. Comune di Bologna: *Bologna Città 30* (2024); <https://www.bolognacitta30.it/>
4. Eurostat: *Road safety statistics in the EU* (2024); [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road\\_safety\\_statistics\\_in\\_the\\_EU&oldid=630784#The\\_number\\_of\\_persons\\_killed\\_in\\_road\\_traffic\\_accidents\\_fell\\_by\\_22.25\\_between\\_2012\\_and\\_2022](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road_safety_statistics_in_the_EU&oldid=630784#The_number_of_persons_killed_in_road_traffic_accidents_fell_by_22.25_between_2012_and_2022)
5. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: *Costi Sociali dell'Incidentalità Stradale – Anno 2019* (2020); [https://www.mit.gov.it/sites/default/files/media/documentazione/2020-12/Costo%2BSociale\\_2019.pdf](https://www.mit.gov.it/sites/default/files/media/documentazione/2020-12/Costo%2BSociale_2019.pdf)
6. United Nations: *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development* (2015); <https://sdgs.un.org/2030agenda>
7. United Nations, Department of Economic and Social Affairs: *THE 17 GOALS* (2015); <https://sdgs.un.org/goals>
8. Ville 30: *Impact du 30 km/h en ville : le test* (2012); <https://ville30.org/2012/12/23/impact-du-30-kmh-en-ville-le-test/>
9. World Health Organization, United Nations Road Safety Collaboration: *GLOBAL PLAN, DECADE OF ACTION FOR ROAD SAFETY 2021-2030* (2020); [https://cdn.who.int/media/docs/default-source/documents/health-topics/road-traffic-injuries/global-plan-for-road-safety.pdf?sfvrsn=65cf34c8\\_35&download=true](https://cdn.who.int/media/docs/default-source/documents/health-topics/road-traffic-injuries/global-plan-for-road-safety.pdf?sfvrsn=65cf34c8_35&download=true)

Grazie a chi mi vuole bene!