

POLITECNICO DI TORINO



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea

**Progettazione e valutazione di
un sistema di trasporto
innovativo aereo per farmaci
emoderivati in condizione di
emergenza**

Relatore

prof. Enrico Cestino

Candidato

Davide ANGELINI

matricola: 275717

A.O.U. "Città della Salute e della Scienza di Torino"

dott.ssa Daniela Cestino

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

Sommario

Il presente lavoro ha come obiettivo principale l'analisi della sicurezza ed economicità delle consegne di farmaci emoderivati in condizioni di emergenza effettuate attualmente via auto, proponendo una soluzione innovativa di trasporto mediante l'utilizzo di droni o velivoli a decollo e atterraggio verticale (VTOL).

Inizialmente, viene costruita una mappa del rischio, con lo scopo di evidenziare le zone più delicate per il sorvolo aereo. La stima della posizione di caduta di un aeromobile è effettuata attraverso l'uso di funzioni di distribuzione di probabilità, integrando dati geospaziali e sulla densità di popolazione reperiti da dataset open source di Meta e OpenStreetMap.

Una volta individuate le zone di rischio, si ricorre all'algoritmo di Dijkstra per determinare il percorso ottimale, bilanciando la lunghezza del percorso e la sicurezza. Tale procedimento è stato confrontato con altre tecniche di ricerca del percorso ottimale. Si prosegue poi con la stima dei costi associati ai diversi metodi di trasporto: via gomma, drone e VTOL. Questi costi sono stati analizzati per tre profili di missione (consegna in urgenza, in priorità media e distribuzione routinaria dei farmaci), su tratte tipiche dedotte da dati reali forniti dall'A.O.U. "Città della Salute - Molinette" di Torino.

Infine, considerando la frequenza delle tratte, analizzata attraverso i dati del periodo 2020-2022 forniti dalla stessa struttura sanitaria, vengono confrontate le varie strategie di trasporto per individuare quella più adeguata per la missione specifica.

A conclusione del lavoro, è individuata la posizione di un hub di consegna farmaci per ciascuno dei mezzi di trasporto (auto, drone, VTOL), in modo tale da ottimizzare le consegne.

I risultati ottenuti rappresentano un importante contributo alla valutazione dell'efficacia e della fattibilità del trasporto aereo di farmaci in situazioni di emergenza, aprendo nuove prospettive per l'innovazione nel campo della logistica sanitaria.

Abstract

The main objective of this paper is to analyze the safety and cost-effectiveness of emergency blood-derivative drug deliveries currently made via car, proposing an innovative transport solution using drones or vertical take-off and landing (VTOL) aircraft.

Initially, a risk map is constructed, with the aim of highlighting the most sensitive areas for aerial overflight. The estimation of aircraft crash location is done through the use of probability distribution functions, integrating geospatial and population density data retrieved from open source Meta and OpenStreetMap datasets.

Once the risk zones are identified, Dijkstra's algorithm is used to determine the optimal route, balancing route length and safety. This procedure was compared with other optimal route finding techniques. This is followed by estimating the costs associated with the different transportation methods: by road, drone and VTOL. These costs were analyzed for three mission profiles (urgent, medium priority and routine drug delivery), on typical routes deduced from real data provided by the A.O.U. "Città della Salute - Molinette" of Turin.

Finally, considering the frequency of the routes, analyzed through the 2020-2022 data provided by the same healthcare facility, the various transportation strategies are compared to identify the most appropriate one for the specific mission.

At the conclusion of the work, the location of a drug delivery hub for each of the transport means (car, drone, VTOL) is identified.

The results obtained represent an important contribution to the evaluation of the effectiveness and feasibility of air transportation of drugs in emergency situations, opening new perspectives for innovation in the field of healthcare logistics.

Ringraziamenti

*«Guido, i' vorrei che tu e Lapo ed io
fossimo presi per incantamento
e messi in un vasel, ch'ad ogni vento
per mare andasse al voler vostro e mio;*

*sì che fortuna od altro tempo rio
non ci potesse dare impedimento,
anzi, vivendo sempre in un talento,
di stare insieme crescesse 'l disio. »*

(Dante Alighieri, "Rime", componimento LII)

Mi ritengo una persona molto fortunata, ma in senso latino. "Fortuna", infatti, è traducibile oggi con "sorte", intendendo dunque sia la fortuna avversa, sia la sfortuna. Tanto è accaduto in questi anni di Magistrale; se avessi una macchina del tempo, il me del 2019 non crederebbe che di lì a pochi anni sarebbero scoppiate varie guerre e una pandemia. Al tempo, stesso, il me del 2019 non crederebbe mai alla forza degli affetti delle persone che oggi mi circondano, per le quali sì, posso dire di essere fortunato in senso italiano.

Voglio ringraziare i miei relatori per avermi stimolato in questo lavoro multidisciplinare. Mi ha permesso di guardare ben oltre al recinto delle mie conoscenze, affrontando con strumenti nuovi tematiche molto complesse. A mia madre devo dialoghi e discussioni che mi hanno fatto crescere e mi hanno reso determinato nelle mie azioni. Tante volte mi sono arrabbiato per mia miopia, tante volte mi ha fatto vedere le cose da punti di vista diversi. Mio padre mi ha dato il senso dell'ordine e l'amore per la perfezione, al tempo stesso mi ha insegnato che un compromesso imperfetto vale più di qualsiasi tensione. Nonostante la mia testardaggine, non è casuale che dalle varie imprese sportive di questi anni sia approdato al nuoto, verso cui mi spingeva a 13 anni.

In mio fratello Giorgio ho (ri)trovato la spalla perduta, il Jerry senza cui "Tom & Jerry" perde di significato. Sono orgoglioso dell'uomo che sta diventando e spero che non finiscano mai i momenti di insegnamento sulla vita che possa darmi.

Se sono riuscito ad attraversare asperità accademiche e professionali è anche merito del sostegno infinito dei genitori bis, ovvero di tutti i nonni, per la loro saggezza senza tempo, e di tutti gli zii che compongono la nostra famiglia.

Ringrazio Orsola per essere entrata in punta di piedi nella mia vita e avermi sorretto in questi mesi, con amore e affetto sinceri.

Devo al dottore dei dottori "Milly" Rigel Brandeis, al secolo conosciuto come Emanuele Milazzo, la gratitudine di essere stato il Grillo parlante che riporta sulla giusta strada e l'isola durante la tempesta in mare.

A tutti i "Bears" va l'onore e l'onere di sensazioni che ricordo sempre con piacere, dal sentirsi a casa con la quotidianità di una Coca Zero in centro a Palermo alle catene di montaggio durante l'organizzazione di super eventi.

Sono grato al gruppo "Reparto Ortofrutta" per le cene e le serate torinesi, sperando verso nuove avventure insieme, a debita distanza dal Bivacco Borroz ma con la stessa determinazione.

Ringrazio tutto il team di Dally presente e passato per avermi accompagnato verso le sfide affrontate insieme, con il quale siamo cresciuti in saggezza e perseveranza.

Infine, ma non per importanza, va un pensiero al Primo Piano del Collegio Einaudi, grazie al quale ho messo nuove radici in terre sconosciute.

Indice

Elenco delle tabelle	9
Elenco delle figure	10
I Introduzione	13
0.1 Contesto generale	15
0.2 Requisiti della missione	15
0.3 Obiettivi della ricerca	16
0.4 Metodologie di ricerca	16
II Analisi di stato dell'arte	19
1 Panoramica sui farmaci emoderivati	21
1.1 Definizione e Normative Vigenti	21
1.2 Aspetti di conservazione e trasporto	22
1.2.1 Farmaco "Kovaltry"	23
2 Tecnologie di trasporto: VTOL	25
2.1 Generalità sui VTOL	25
2.2 Normativa di riferimento	26
2.2.1 Analisi della CS-27 e della CS-25	27
2.2.2 Condizioni specifiche per i VTOL	29
2.3 Wisk Cora	30
III Esecuzione della ricerca	33
3 Valutazione della sicurezza della consegna	35

3.1	Mappe di input per il calcolo	35
3.1.1	Mappa della densità della popolazione	37
3.1.2	Mappa dei ripari	40
3.2	Costruzione della mappa del rischio per VTOL e droni	43
3.2.1	Introduzione	43
3.2.2	Ballistic descent	43
3.2.3	Uncontrolled Glide	48
3.2.4	Calcolo della $P_{casualty}$ finale	50
3.3	Calcolo del percorso ottimo in VTOL e drone	52
3.3.1	Algoritmo di Dijkstra	53
3.3.2	Algoritmo A*	59
3.3.3	Confronto risultati algoritmo di Dijkstra e A*	63
3.4	Calcolo del percorso ottimo in auto	65
3.5	Valutazione del rischio in auto	68
4	Valutazione del costo della consegna	69
4.1	Modello di costo per aeromobili	69
4.2	Modello di costo per auto	71
5	Analisi delle consegne per il Piemonte	73
5.1	Consegne per il 2022	74
5.2	Estensione della mappa del rischio al Piemonte	76
IV	Risultati e Conclusioni	83
6	Confronto auto, VTOL e drone	85
6.1	Costruzione dell'Indice di Merito	85
6.1.1	Approfondimento sulla soglia minima di sicurezza	87
6.2	Analisi di una tratta singola	88
6.3	Analisi aggregate	90
7	Hub per le consegne di farmaci	93
7.1	Posizione ideale di un hub per consegna via gomma	93
7.2	Posizione ideale di un hub per consegna via VTOL o drone	95
8	Conclusioni	101
	Bibliografia	105

V	Appendice	109
8.1	Manipolazione del dataset della popolazione	111
8.2	Tabella dei bisogni di farmaci in emergenza	112

Elenco delle tabelle

1.1	Periodo di conservazione del farmaco <i>Kovaltry</i>	23
2.1	Caratteristiche tecniche del Wisk Cora	32
2.2	Caratteristiche tecniche del drone Talon	32
3.1	Coordinate della mappa del rischio	36
3.2	Area di Torino considerata per la visualizzazione della mappa della densità di popolazione	37
3.3	Dati del <i>Wisk Cora</i> per la caduta balistica	44
3.4	Nella tabella delle celle visitate con 0 si indica la distanza dal punto di partenza rispetto a punto di partenza e con ∞ le distanze non conosciute. Sotto si riporta anche la tabella delle celle visitate, per il momento con la sola origine.	53
3.5	Si aggiorna dunque la tabella delle distanze necessarie per raggiungere tali celle.	54
3.6	Per ognuna di esse si guarda il rischio globale per raggiungerle e si aggiorna la tabella delle distanze:	55
3.7	Confronto risultati algoritmo Dijkstra e A*	63
6.1	Pesi per la missione <i>urgente</i>	86
6.2	Pesi per la missione <i>media</i>	87
6.3	Pesi per la missione <i>routine</i>	87
6.4	Risultati dell'indice di merito per la consegna del <i>Kovaltry</i> tra l'ospedale "Molinette" e "Martini".	88
8.1	Percentuale di missioni portate a termine da VTOL e drone	102
8.2	Valori finali dell'Indice di Merito	102
8.3	Tabella dei bisogni di farmaci in emergenza degli ospedali	113

Elenco delle figure

1.1	Etichetta "etica" che indica l'origine di un farmaco da sangue ottenuto attraverso donazioni volontarie. Fonte: Toscana Media News	22
1.2	Contenuto di una confezione di Kovaltry 1000UI	24
2.1	Render digitale del velivolo <i>Volocity</i> della Volocopter, dal sito della Volocopter	25
2.2	Livello di probabilità di failure catastrofiche su ore di volo accettabile per elicotteri, estratto della CS-27 a pag.250, ref. [11]	27
2.3	Livello di probabilità di failure catastrofiche su ore di volo accettabile per grandi aeromobili, estratto della CS-25 a pag.779, ref. [10]	29
2.4	Livello di probabilità di failure catastrofiche su ore di volo accettabile per i VTOL, estratto del ref. [13] a pag.31	30
2.5	Wisk Cora, tratto da Aviation Week	30
2.6	Primo volo pubblico del Wisk Cora, tratto da Aviation Week	31
3.1	Zona considerata per l'analisi	36
3.2	Mappa della densità di popolazione in funzione della precisione della griglia adottata	38
3.3	Densità della popolazione 150x150 (a) di fianco a mappa satellitare di Torino (b), tratta da Satellites Pro	39
3.4	Celle occupate completamente o parzialmente da un poligono	40
3.5	Edifici di OpenStreetMap con il tag <i>building = True</i> ; i puntini azzurri sono edifici puntiformi, come statue.	41
3.6	Zone di Torino con almeno un edificio, mappa elaborata con dati di OpenStreetMap	41
3.7	Numero di edifici per cella di Torino	42
3.8	Rappresentazione delle frequenze dei punti di impatto. In basso a destra i vettori di velocità iniziale e velocità del tempo sono collocati nella posizione iniziale (0,0,700m)	45

3.9	Area di impatto per un oggetto in traiettoria di rientro obliqua, tratta da pag. 13 di [1]	46
3.10	Mappa del rischio di sorvolo per il VTOL Wisk Cora su Torino e province adiacenti.	50
3.11	Confronto mappa del rischio e visualizzazione di Google Earth	51
3.12	Il punto di partenza è la cella (1,1), quello di arrivo la cella (4,4). Nell'algoritmo si tiene una lista del rischio complessivo associato per visitare una cella e una lista delle celle visitate. .	53
3.13	Si inizia guardando le celle adiacenti, ovvero la cella (1,2) di rischio 2 e la cella (2,1) di rischio 1 (supponendo che ci si possa muovere solo in direzione verticale e orizzontale)	54
3.14	Si deve dunque scegliere la cella corrente; si prende quella di rischio globale minimo, ovvero la cella (2,1) in questo caso. . .	54
3.15	Si guardano allora tutte le celle adiacenti a quelle segnate come visitate, ovvero la (1,2), la (2,2) e la (3,1).	55
3.16	Applicazione algoritmo di Dijkstra, rischio totale: $5.5769 \cdot 10^{-7}$	57
3.17	Applicazione algoritmo di Dijkstra, rischio totale: $1.4580 \cdot 10^{-7}$	57
3.18	Applicazione algoritmo di Dijkstra, rischio totale: $6.5299 \cdot 10^{-7}$	58
3.19	Applicazione algoritmo A^* , rischio totale: $6.1370 \cdot 10^{-7}$	60
3.20	Applicazione algoritmo A^* , rischio totale: $5.6893 \cdot 10^{-7}$	61
3.21	Applicazione algoritmo A^* , rischio totale: $2.7575 \cdot 10^{-7}$	62
3.22	Confronto Dijkstra - A^*	63
3.23	Confronto Dijkstra - A^*	64
3.24	Confronto Dijkstra - A^*	64
3.25	Mappa della rete stradale e zoom su Torino, ottenuti da <i>OpenStreetMap</i>	66
3.26	Percorso più breve in auto tra due punti, grafico di base da <i>OpenStreetMap</i> , tragitto calcolato con <i>NetworkX</i>	67
5.1	Mappa dei bisogni di farmaci in emergenza nel dataset fornito, zoom su Torino; l'ospedale Molinette è quello con i bisogni maggiori	74
5.2	Mappa dei bisogni di farmaci in emergenza nel dataset fornito	75
5.3	Mappa del rischio per VTOL Wisk Cora, consegna "urgente" .	77
5.4	Mappa del rischio per VTOL Wisk Cora, consegna "media" . .	78
5.5	Mappa del rischio per VTOL Wisk Cora, consegna "routine" .	79
5.6	Mappa del rischio per drone Talon, consegna "urgente"	80
5.7	Mappa del rischio per drone Talon, consegna "media"	81
5.8	Mappa del rischio per drone Talon, consegna "routine"	82

6.1	Percorso in VTOL e in auto per la consegna del farmaco <i>Kovaltry</i> dall'ospedale "Le Molinette" al "Martini".	89
6.2	Risultato dell'indice di merito cumulato per le consegne del 2022 di priorità "urgente"	90
6.3	Risultato dell'indice di merito cumulato per le consegne del 2022 di priorità "media"	91
6.4	Risultato dell'indice di merito cumulato per le consegne del 2022 di priorità "routine"	91
7.1	Posizione dell'hub in auto, legenda parte 1	94
7.2	Posizione dell'hub in auto, legenda parte 2	94
7.3	Posizione dell'hub in auto, zoom sulla zona tra l'hub e l'ospedale "Le Molinette"	95
7.4	Posizione dell'hub per il VTOL, consegna Urgente, e zoom sulla posizione dell'hub.	96
7.5	Posizione dell'hub per il VTOL, consegna Urgente, visualizzazione su cartina.	96
7.6	Posizione dell'hub per il VTOL, consegna Urgente, visualizzazione su cartina, dettaglio su Torino	97
7.7	Posizione dell'hub in VTOL, consegna Media	98
7.8	Posizione dell'hub in VTOL, consegna Media, visualizzazione su cartina.	99
7.9	Posizione dell'hub in VTOL, consegna routine, visualizzazione su cartina	100
8.1	Posizione dell'hub per il VTOL, consegna Urgente, visualizzazione su cartina, dettaglio su Torino	103

Parte I

Introduzione

0.1 Contesto generale

Scopo delle strutture ospedaliere è garantire la migliore prestazione sanitaria possibile ai pazienti trattati. In corrispondenza di **eventi traumatici** come incidenti stradali, sciistici et similia, ma anche di interventi chirurgici, è necessario somministrare **farmaci emoderivati**, così chiamati perché non di origine sintetica ma ottenuti dal sangue umano attraverso donazioni.

Dato che l'utilizzo è legato all'occorrenza di incidenti, l'impiego è imprevedibile, conseguentemente è difficile applicare le tradizionali logiche di gestione dei magazzini. Se da un lato si preferisce tenere delle scorte più del necessario al fine di garantire dei livelli minimi di assistenza, al tempo stesso picchi di fabbisogno portano le strutture ospedaliere a contattare i plessi vicini per l'approvvigionamento in emergenza dei farmaci necessari. Ciò porta un **aumento del carico di lavoro delle farmacie ospedaliere** rispetto alla tradizionale redistribuzione di medicine prevista, oltre a rischi maggiori dovuti all'organizzazione di consegne senza preavviso.

Allo stato attuale la consegna di farmaci è effettuata da speciali operatori in **automobile**, molto raramente è affidata alle forze dell'ordine (coinvolte invece nel trasporto di organi). Centri ospedalieri, magazzini e case produttrici non sono connessi da una rete informativa adeguata, per cui all'occorrenza gli operatori devono telefonare ai vari depositi per cercare il farmaco necessario.

0.2 Requisiti della missione

I requisiti sono determinanti nel processo decisionale per selezionare la modalità di trasporto più appropriata in base al tipo di farmaco da trasportare. In collaborazione con l'ospedale "Città della Salute" di Torino, sono stati individuati tre profili di missione: "urgente", "media" e "routine".

- Consegna **urgente**: in queste situazioni, la vita dei pazienti dipende dalla tempestività della consegna dei farmaci emoderivati. Ad esempio, la consegna è urgente se il payload è un antidoto. Pertanto, i requisiti principali per la missione in questa categoria includono:
 - Massima priorità al tempo di consegna.
 - Sicurezza del sorvolo aereo come una priorità secondaria.
 - Accettabilità di costi più elevati in considerazione della priorità sulla tempestività.

-
- Consegna **media**: ci si concentra su un equilibrio tra tempo di consegna e sicurezza del sorvolo aereo, mentre la sicurezza del sorvolo rimane importante ma con una priorità inferiore rispetto alle altre due.
 - Consegna di **routine**: la sicurezza del sorvolo durante la consegna è la massima priorità, seguita dal controllo dei costi e, infine ma in misura minore, dal tempo di consegna. Questa categoria è particolarmente adatta per le consegne programmate di farmaci in situazioni non critiche.

Il profilo di missione scelto dipende dalla tipologia di farmaco e dal contesto generale. Un approfondimento sarà fornito nel paragrafo 5.

0.3 Obiettivi della ricerca

La presente ricerca si propone di **confrontare diverse strategie di trasporto dei farmaci emoderivati in condizioni di emergenza** per individuare quella più ideale per le missioni indicate. In particolare, si valuterà la consegna tramite automobile (utilizzata attualmente) confrontandola con quella tramite **VTOL** (aeromobili a decollo e atterraggio verticale, *Vertical Take-Off Landing*), e tramite droni. Si prenderanno in considerazione solamente VTOL *manned*, ovvero con un pilota a bordo, mentre i droni rientrano tra i **Sistemi A Pilotaggio Remoto** (SAPR) (o *unmanned*).

La valutazione comprende sia aspetti di sicurezza del sorvolo delle aree circostanti, sia di economicità.

Il bisogno di efficientamento del sistema di consegna porta anche alla **centralizzazione** della conservazione dei farmaci, per superare gli impasse attuali dovuti alla presenza di più attori coinvolti, come sottolineato da un comunicato della Città Metropolitana di Torino del 29 Marzo 2022 (cfr.[19]). La presente ricerca si concluderà dunque con l'individuazione della posizione ideale per un *hub* di consegna farmaci in condizione di emergenza.

0.4 Metodologie di ricerca

Il lavoro si articola in tre parti:

1. Analisi di Stato dell'Arte
2. Esecuzione della ricerca
3. Risultati e Conclusioni

Innanzitutto si definiscono le peculiarità dei farmaci emoderivati, *payload* principale della missione. Si illustrano aspetti di produzione, conservazione e requisiti di trasporto di tali farmaci.

In seguito ci si focalizza sulle tecnologie di trasporto, in particolare per i VTOL si chiariscono i principali campi di applicazione odierni e le tendenze emergenti.

Si passa alla valutazione della sicurezza del sorvolo aereo, mediante la costruzione di una mappa del rischio. In particolare, in tale mappa ogni cella contiene una stima della probabilità che un guasto catastrofico per il mezzo porti a un impatto con una persona e che tale impatto sia fatale. La distribuzione sul territorio della densità della popolazione è ottenuta da un dataset di *Meta*, la multinazionale proprietaria di *Facebook*, mentre la presenza di edifici è stimata tramite *OpenStreetMap*. Si applicano modelli di balistica di oggetti di rientro per stimare la traiettoria seguita durante la caduta, la posizione di impatto e la stima dei danni a persone, mediando i risultati tramite distribuzioni discrete di probabilità. Si descrivono anche delle tecniche computazionali adoperate per snellire l'esecuzione dei calcoli senza perdere di precisione.

Per determinare la traiettoria di minimo rischio tra due punti si usa l'algoritmo di Dijkstra e l'algoritmo A* (del quale Dijkstra è un caso particolare). Ciò viene usato per il calcolo della traiettoria degli aeromobili, invece per le auto si considerano i risultati di *OpenStreetMap* tenendo conto della rete stradale.

Si introducono dei modelli di costo elementari per valutare il viaggio tramite VTOL e drone, tenendo conto delle rispettive motorizzazioni. I risultati sono confermati da dati presenti in letteratura.

Infine, si analizza un dataset fornito dalla farmacia ospedaliera dell'ospedale "Città della Salute - Molinette" di Torino sulle consegne in condizioni di emergenza reali dell'anno 2022. Si individuano in questo modo le tratte più frequenti da ottimizzare.

Con i risultati ottenuti un indice di merito è costruito per comparare i mezzi di trasporto. L'analisi è condotta su tratte tipiche individuate in precedenza e in modo aggregato sui dati forniti.

Infine, si calcola la posizione di un hub ideale di consegna dei farmaci, sia per il trasporto su gomma, sia aereo.

Parte II

Analisi di stato dell'arte

Capitolo 1

Panoramica sui farmaci emoderivati

1.1 Definizione e Normative Vigenti

Per farmaco emoderivato si intende un farmaco prodotto «dal sangue o dal plasma umani, provenienti da donazioni volontarie, attraverso processi di lavorazione industriale» (da "Farmaci Emoderivati", Agenzia Italiana del Farmaco, cfr. [15]). In Italia il **Centro Nazionale Sangue** dal 2007 coordina le operazioni di raccolta di sangue da donazioni gratuite e volontari (figura 1.1). Dalla raccolta si esegue un processo di **frazionamento** per dividere le singole sostanze (piastrine, diverse proteine, ecc...) utilizzate poi nei farmaci. Dal plasma del sangue si estraggono quattro costituenti principali *albumina*, *immunoglobuline*, *fattori della coagulazione* e *antitrombina*¹, oltre ad altre proteine plasmatiche salvavita..

La raccolta del sangue è svolta in modo anonimizzato ma si deve tenere tracciabilità completa di origine del materiale e successive lavorazioni². Dal momento che l'origine del farmaco non è sintetica, sono sottoposti a particolari controlli di qualità per minimizzare o ridurre rischi quali contaminazioni

¹pag. 3 da "Qualità e sicurezza della catena di produzione dei plasmaderivati", Raffaella Sardelli, Scuola di Medicina Ospedaliera, Roma 09-10 Novembre 2017, riferimento [22]

²"Presso i centri e le aziende di produzione deve essere conservata specifica documentazione atta a risalire dal prodotto finito alle singole donazioni, da esibire a richiesta dell'autorità sanitaria nazionale o regionale", dal Decreto legge n.219 del 21 Ottobre 2005, articolo 15, comma 5

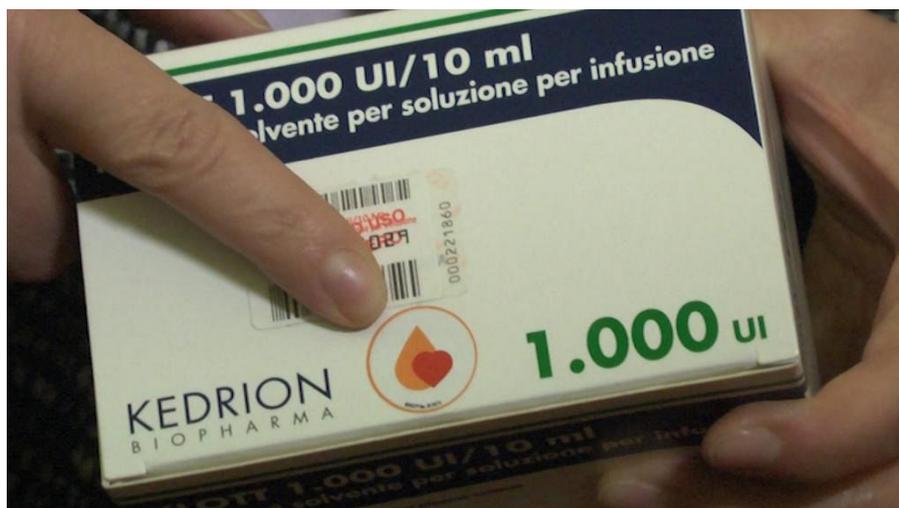


Figura 1.1: Etichetta "etica" che indica l'origine di un farmaco da sangue ottenuto attraverso donazioni volontarie. Fonte: Toscana Media News

virali o di patogeni.

1.2 Aspetti di conservazione e trasporto

Per i farmaci emoderivati è necessario garantire opportune condizioni di stoccaggio e il mantenimento della catena del freddo durante il trasporto, con la continua misurazione della temperatura (cfr. "Guide to the preparation, use and quality assurance of Blood Components"³) e, ove possibile, l'utilizzo di allarmi per segnalare anomalie termiche⁴. Quando si deve progettare il trasporto, bisogna valutare opportunamente i rischi coinvolti⁵, come ad esempio l'effetto di ritardi nella consegna o difetti nei sistemi di refrigerazione.

Dal momento che si tratta di farmaci salvavita, le strutture ospedaliere devono possedere un certo quantitativo sempre disponibile. Sono conservati allo stato liofilizzato e vanno sciolti (processo di "ricostituzione") in soluzione fisiologica all'utilizzo. Ad esempio, il *Kovaltry* (su cui si scenderà più nel

³"Guide to the preparation, use and quality assurance of Blood Components", EDQM, 21st Edition 2023, capitolo 4.2 "Storage and distribution", paragrafo 4.2.1, pag.196, ref. [14]

⁴4.4.2 "Equipment", pag. 199, ibidem

⁵4.7.2.2, pag. 202, ibidem

dettaglio nel paragrafo 1.2.1) non deve essere congelato, ha una durata di 3 anni se mantenuto tra i 2°C e gli 8°C, 12 mesi a temperatura ambiente (sotto i 25°C) e solo 3 ore dal momento della preparazione in acqua⁶. Ciò deve essere tenuto conto durante tutte le fasi in cui il prodotto è trasportato, dal centro produttivo, al magazzino ospedaliero, ad eventuali trasporti eccezionali.

1.2.1 Farmaco "Kovaltry"

Nella presente sezione si illustrano maggiori dettagli sul farmaco emoderivato *Kovaltry* poiché utilizzato nelle consegne in emergenza del 2022 (paragrafo 6.2). Non ci si soffermerà tanto sulle proprietà farmacologiche o sui benefici di utilizzo, quanto sulle informazioni più importanti per la missione di trasporto del presente lavoro.

Il *Kovaltry* (rif. [2]) è un fattore VIII della coagulazione umano ricombinante, utilizzato in pazienti con particolari emofilie. In particolare, è utilizzato per fermare emorragie e durante interventi chirurgici. Per la sua natura, rientra nella classe "A" descritta al paragrafo 6.1.1, ovvero tra le consegne da effettuare in condizioni di urgenza. Una singola confezione contiene sia polvere che solvente da utilizzare per la ricostituzione e la successiva infusione endovenosa. La tabella 1.1 mostra i tempi di conservazione a seconda delle condizioni.

<i>Condizioni di conservazione</i>	<i>Durata</i>
In frigorifero (2-8°C)	Massimo 30 mesi
A temperatura ambiente (sotto i 25°C)	12 mesi
Dopo la ricostituzione	3 ore

Tabella 1.1: Periodo di conservazione del farmaco *Kovaltry*

In nessun caso il farmaco deve essere congelato. La figura 1.2 mostra il contenuto di una confezione di *Kovaltry* 1000UI.

Può essere venduto in condizioni singole o in lotti da 30. Nel paragrafo 6.2 si prenderà in considerazione la confezione singola. Considerato il contenuto, il peso di quest'ultima è stimato a 400g.

⁶dal bugiardino [dal sito dell'EMA](#)



Figura 1.2: Contenuto di una confezione di Kovaltry 1000UI

Capitolo 2

Tecnologie di trasporto: VTOL

2.1 Generalità sui VTOL

Per VTOL si intendono aeromobili con capacità di **decollo e atterraggio verticale** (*Vertical Take-Off Landing*), senza la necessità di un impiego di una pista. In virtù di tale caratteristica, hanno un impiego flessibile per varie tipologie di missioni. L'abilità in sé è in comune con gli *elicotteri*, tuttavia nell'uso comune il termine *VTOL* si riferisce piuttosto ad aeromobili con più di due unità di propulsione (cfr. EASA, ref. [12]). Si parla dunque di *propulsione distribuita*. Si distinguono inoltre dai droni per le dimensioni, le capacità di trasporto e le missioni in cui sono impiegati.



Figura 2.1: Render digitale del velivolo *Volocity* della Volocopter, dal [sito della Volocopter](#)

A seconda della tipologia di installazione le tipologie di VTOL più comuni

sono¹:

- *vectored thrust*, con la capacità di variare direzione e orientamento della spinta propulsiva, ottenuta tipicamente da un sistema distribuito di eliche; il sistema propulsivo impiegato è il medesimo durante le fasi di decollo/atterraggio, spostamento e hover;
- *lift + cruise*, che impiegano due sistemi propulsivi differenti per decollo e crociera (supportata da un'ala);
- *wingless*, aeromobili multirottore particolarmente efficienti in hover.

La propulsione può essere con tradizionali motori a getto o elettrici. I primi sono per lo più di impiego militare, rientra in questa categoria il convertiplano *Bell Boeing V-22 Osprey* utilizzato ampiamente dall'aviazione statunitense. I secondi invece sono i protagonisti della recente *Urban Air Mobility*, poiché tramite leghe ultraleggere e uso di compositi avanzati riescono a sfruttare a pieno la potenza dei motori elettrici per missioni di trasporto nei range cittadini o nella provincia. In questo lavoro di tesi ci si concentra dunque sui VTOL elettrici, indicati anche come **eVTOL**.

2.2 Normativa di riferimento

Lo sviluppo tecnologico degli eVTOL è molto recente, per cui la normativa di riferimento è in corso di sviluppo. Per il mercato europeo l'EASA ha emesso innanzitutto una condizione speciale con le prime linee guida di sviluppo il 2 Luglio 2019 ("Special Condition for small-category VTOL aircraft", ref. [13]). In particolare, si rende nota la necessità di formulare una normativa a sé stante per i VTOL dal momento non rientrano all'interno né della CS-23, poiché relativa ad aerei leggeri con una massa massima al decollo inferiore a 5.700 kg, né della CS-27, relativa a elicotteri di peso massimo al decollo di 3175kg².

Come primo approccio si indica di prendere come riferimento i limiti CS-27, ammettendo comunque che i VTOL dovranno operare per lo più in aree urbane e congestionate, per cui bisogna adottare maggiori controlli di sicurezza.

¹Classificazione tratta da Bacchini e Cestino "Electric VTOL Configurations Comparison", ref. [3]

²pag.4, "Preamble", ref. [13]

2.2.1 Analisi della CS-27 e della CS-25

Si pone il tema di stimare il livello minimo di rischio di failure catastrofiche accettabile (che verrà ripreso nel paragrafo 6.1.1 sull'indice di merito). In questo paragrafo si prenderanno in considerazione i contenuti della CS-27 e della CS-25.

A pag.5 del documento sui VTOL [13] la normativa specifica che i limiti della CS-27 erano stati elaborati sulla base di dati statistici, chiaramente non presenti per la nuova tecnologia dei VTOL dato il tipo di motorizzazione innovativo. Pertanto, si parte prendendo i valori della CS-23 riferiti alla categoria *Basic* ma si incrementa il livello di sicurezza richiesto; ciò li porta a far coincidere con quelli degli elicotteri indicati nella CS-27/29. Per quanto concerne il sorvolo di aree densamente popolate, si fa riferimento invece alla CS-25 (per velivoli civili di grandi dimensioni).

La CS-27 introduce una distinzione degli elicotteri innanzitutto in base alla capacità di reazione di fronte a una failure a un motore.

Si parla di categoria A quando il velivolo non è in grado di continuare il

Class	Failure condition classifications			
	Minor (Note 1)	Major	Hazardous	Catastrophic
	Allowable quantitative probability (Note 2) and functional development assurance level (FDAL)			
I (Note 3)	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-4}$ FDAL C	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-6}$ FDAL C
II (Note 3)	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-6}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL C
III (Note 3)	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL C	$\leq 10^{-8}$ FDAL B
IV (Note 4)	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL B	$\leq 10^{-9}$ FDAL A

Figura 2.2: Livello di probabilità di failure catastrofiche su ore di volo accettabile per elicotteri, estratto della CS-27 a pag.250, ref. [11]

volo in maniera sicura se c'è una failure a uno dei motori, per cui è necessario un atterraggio di emergenza; se invece il velivolo è in grado di proseguire, si parla di categoria B.

In base poi al peso massimo al decollo e al numero di occupanti, si introduce un'ulteriore classificazione:

- classe I, per elicotteri di categoria B, con MTOM sino a 1814kg, limite di 2 occupanti e modalità di volo VFR (ovvero, a vista, senza l'ausilio di particolari strumentazioni);
- classe II, per elicotteri di categoria B, con MTOM sino a 1814kg, limite di 5 occupanti;
- classe III, per elicotteri di categoria B, con MTOM superiore a 1814kg, con 6 o più occupanti (sino a 9, altrimenti non si parla più di elicottero leggero e si deve guardare la CS-29);
- classe IV, per elicotteri di categoria A.

La probabilità di failure consentita dipende dalla classe; la tabella sottostante (tab. 2.3) illustra i valori³. Si nota come per gli elicotteri di classe IV il limite sia 10^{-9} con un danno catastrofico, mentre per la classe I è 10^{-6} .

Nella CS-25 la probabilità di failure ammessa dipende dal tipo di danno e dalle conseguenze. In particolare, per danni letali a parte della crew o ai passeggeri il limite di probabilità di failure concesso è 10^{-7} , mentre con danni catastrofici si parla di 10^{-9} (ref. [10], pag. 779).

³ref. [11], pag.250

Figure 2a: Relationship Between Severity of the Effects and Classification of Failure Conditions

Severity of the Effects	Effect on Aeroplane	No effect on operational capabilities or safety	Slight reduction in functional capabilities or safety margins	Significant reduction in functional capabilities or safety margins	Large reduction in functional capabilities or safety margins	Normally with hull loss
	Effect on Occupants excluding Flight Crew	Inconvenience	Physical discomfort	Physical distress, possibly including injuries	Serious or fatal injury to a small number of passengers or cabin crew	Multiple fatalities
	Effect on Flight Crew	No effect on flight crew	Slight increase in workload	Physical discomfort or a significant increase in workload	Physical distress or excessive workload impairs ability to perform tasks	Fatalities or incapacitation
Classification of Failure Conditions		No Safety Effect	Minor	Major	Hazardous	Catastrophic

Figure 2b: Relationship Between Classification of Failure Conditions and Probability

Classification of Failure Conditions	No Safety Effect	Minor	Major	Hazardous	Catastrophic
Allowable Qualitative Probability	No Probability Requirement	<--Probable-->	<--Remote-->	Extremely <-----> Remote	Extremely Improbable
Allowable Quantitative Probability:	No Probability Requirement	<-----> <10 ⁻³	<-----> <10 ⁻⁵	<-----> <10 ⁻⁷	<-----> <10 ⁻⁹

Figura 2.3: Livello di probabilità di failure catastrofiche suore di volo accettabile per grandi aeromobili, estratto della CS-25 a pag.779, ref. [10]

2.2.2 Condizioni specifiche per i VTOL

Il paragrafo 2510 di [13] riprende i contenuti della CS-27 e li applica al caso dei VTOL. In particolare, si parla di VTOL **Basic** quando le condizioni di avaria che impediscono un atterraggio di emergenza controllato al velivolo sono considerate catastrofiche, dunque sulla falsariga della A per gli elicotteri. Invece, la categoria **Enhanced** si applica quando le condizioni di avaria che impediscono il proseguimento del volo e l'atterraggio in sicurezza dell'aeromobile sono considerate catastrofiche⁴. In base alla categoria e al numero limite di passeggeri la normativa indica l'incidenza massima tollerabile di failure catastrofiche per ore di volo, riportate in figura 2.4.

⁴pag. 31 di [13]

		Failure Condition Classifications			
Maximum Passenger Seating Configuration		Minor	Major	Hazardous	Catastrophic
Category Enhanced	-	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL B	$\leq 10^{-9}$ FDAL A
Category Basic	7 to 9 passengers	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL B	$\leq 10^{-9}$ FDAL A
	2 to 6 passengers (see note A)	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL C	$\leq 10^{-8}$ FDAL B
	0 to 1 passenger (see note A)	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-6}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL C

[Quantitative safety objectives are expressed per flight hour]

Figura 2.4: Livello di probabilità di failure catastrofiche su ore di volo accettabile per i VTOL, estratto del ref. [13] a pag.31

Il VTOL scelto Wisk Cora (sez. 2.3) rientra nella categoria "Basic" tra 2 e 6 passeggeri, per cui la probabilità di una failure catastrofica è di 10^{-8} su ore di volo. Tuttavia, come sarà spiegato nel paragrafo 6.1.1, si sceglie il valore di 10^{-7} .

2.3 Wisk Cora



Figura 2.5: Wisk Cora, tratto da [Aviation Week](#)

Si illustrano le caratteristiche principali del VTOL **Wisk Cora** di generazione 5, utilizzato di seguito nelle analisi al paragrafo 3.1. Trattasi di un velivolo della categoria *lift + cruise*, con 12 rotori per il decollo verticale e un'elica per il movimento orizzontale. E' conosciuto anche come *Kitty Hawk Cora*, dal

nome dell'azienda originaria acquisita da *Boeing* nel 2022⁵. E' stato disegnato per fungere da taxi urbano, può trasportare infatti sino a 4 passeggeri, con uno spazio extra per eventuali bagagli. La generazione 6 presenta un tempo di ricarica di soli 15 minuti⁶ e un cambio di motorizzazione con *tilt-rotors*, garantendo dunque un tempo di attesa nei vertiporti molto ridotto. E' prevista l'entrata in servizio nel mercato statunitense nel 2028, l'immagine 2.6 è tratta da un volo di test svolto a luglio del 2023⁷. Le caratteristiche tecniche



Figura 2.6: Primo volo pubblico del Wisk Cora, tratto da [Aviation Week](#)

del Wisk Cora sono state prese dal lavoro di Bacchini & Cestino (ref. [3]), la tabella 2.1 riporta le principali usate nell'analisi al paragrafo 3.2. In particolare, si riferiscono a una versione del VTOL *manned*, mentre negli ultimi anni l'azienda ha optato verso un modello *unmanned*⁸.

⁵[Boeing invests \\$450M in flying taxi developer Wisk](#)

⁶Dal sito ufficiale <https://wisk.aero/aircraft/>, ref. [5]

⁷[Articolo di Business Wire](#)

⁸tratto da [eVTOL News](#)

Apertura alare	2m
Range	100km
Tempo di volo	19 minuti
Velocità massima	180km/h
Peso massimo al decollo	1224kg
Capacità totale delle batterie	63kWh
f (lift-to-drag)	12
Dimensione massima	11m
Quota massima	900m ^a

Tabella 2.1: Caratteristiche tecniche del Wisk Cora

^adato tratto da [TransportUp](#)

Si riportano anche le caratteristiche del drone "Talon", prese dal lavoro [21], nella tabella 2.2.

Superficie alare	0.02m ²
Range	30km
Tempo di volo	120 minuti
Velocità massima	65km/h
Peso massimo al decollo	1.4kg
Capacità totale delle batterie	0.189kWh ^a
f (lift-to-drag)	12 ^b
Dimensione massima	0.3m
Quota massima	50m

Tabella 2.2: Caratteristiche tecniche del drone Talon

^aTratto da [Aeromao](#)

^bStima

Parte III

Esecuzione della ricerca

Capitolo 3

Valutazione della sicurezza della consegna

Il presente capitolo illustra le tecniche seguite per valutare la sicurezza della consegna dei farmaci tramite aeromobili e droni. In particolare, per VTOL e droni è stato utilizzato il metodo della *mappa del rischio* (sezioni 3.1 e 3.2), mentre per le automobili si è fatto uso di considerazioni statistiche sul rischio di incidenti nell'area del Piemonte (sezione 3.5).

3.1 Mappe di input per il calcolo

La *mappa del rischio* consente di associare a ogni cella il rischio di sorvolo per un'area considerata. E' uno strumento utile per la pianificazione di una traiettoria dal momento che può essere input di algoritmi di calcolo del percorso (come l'algoritmo di Dijkstra, paragrafo 3.3.1) per trovare una traiettoria di minimo rischio. Il riferimento principale per il seguente lavoro è l'articolo di Primatesta et al. (ref. [21]).

L'area valutata comprende la città di Torino e buona parte delle province del Piemonte. E' delimitata dalle coordinate nella tabella 3.1, la figura 3.1 mostra il rettangolo grande tratto da *Google Maps*. All'interno vi è un rettangolo di coordinate più piccolo solo per Torino che verrà utilizzato nel paragrafo 3.1.1.

Nord [°]	45.7868
Sud [°]	44.7265
Est [°]	8.4294
Ovest [°]	7.1877

Tabella 3.1: Coordinate della mappa del rischio

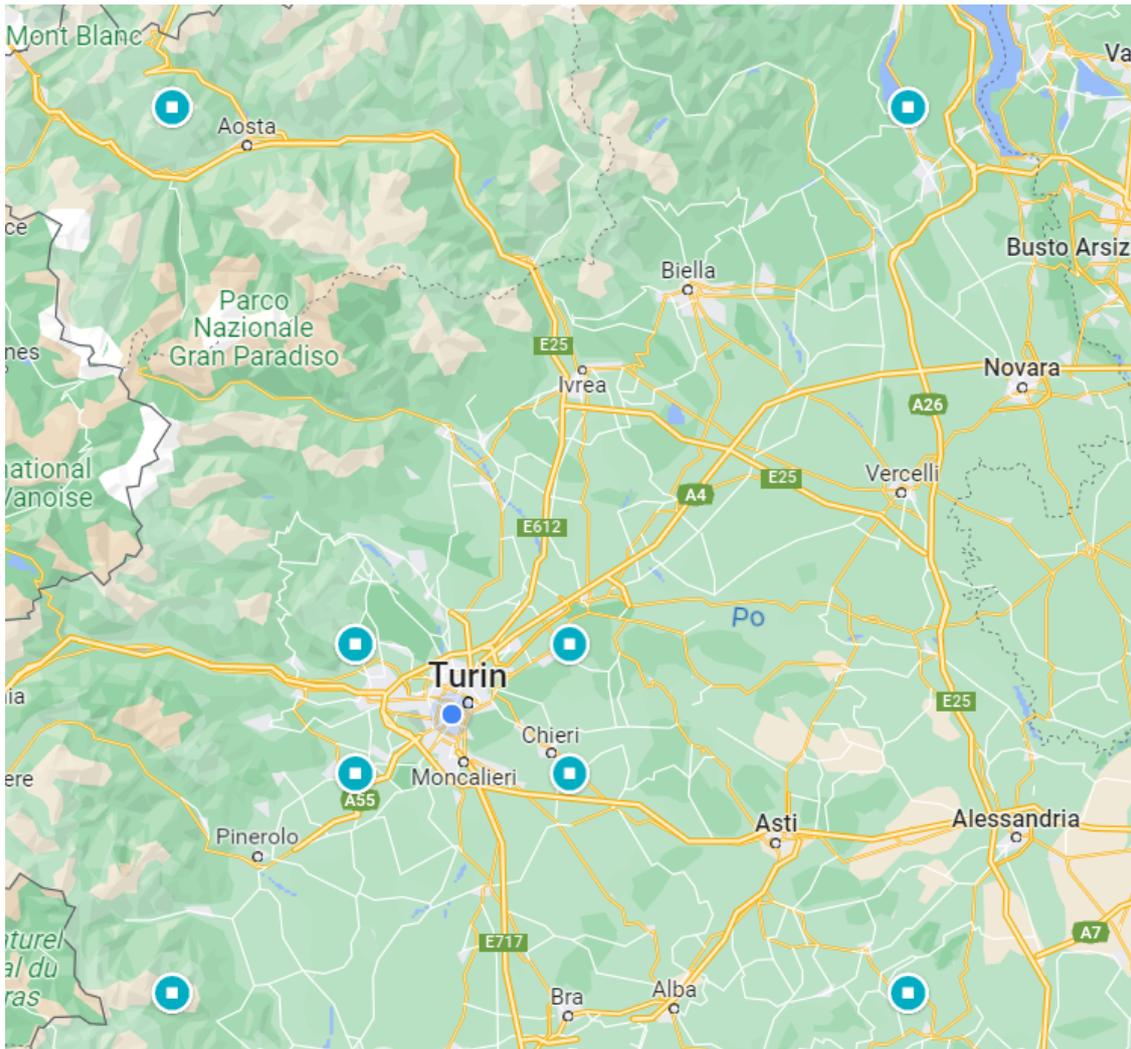


Figura 3.1: Zona considerata per l'analisi

Le seguenti mappe sono utilizzate per il calcolo:

- densità della popolazione
- mappa dei ripari (o *sheltering*), intesi come protezione dalla caduta di

aeromobili offerte da tetti di edifici, alberi, ecc...

Di seguito si illustra come tali mappe sono state generate e manipolate.

3.1.1 Mappa della densità della popolazione

La densità della popolazione è un dato molto importante per la sicurezza del sorvolo. In questo lavoro è stato utilizzato il dataset open-source di Meta (la società che possiede Facebook, ref. [18]). Trattasi di una mappa dell'Italia con una griglia di celle con dimensione di 30 metri, dove in ognuna vi è il dato della densità di popolazione. La mappa è elaborata con tecniche di machine learning a partire da dati satellitari sugli edifici, censimenti della popolazione e attività delle celle telefoniche.

Si precisa che [21] utilizza un dataset simile basato su dati da censimenti (ref. [9]). Tuttavia, si preferisce usare il dataset di Meta perché più aggiornato e con una risoluzione migliore.

Nell'appendice 8.1 è illustrato l'algoritmo di manipolazione del dataset. Le figure 3.2 e 3.3 mostra la densità della popolazione di Torino in funzione della risoluzione $N_1 \times N_2$ adottata per l'area di Torino in tabella 3.2.

Nord [°]	45.14616
Est [°]	7.85825
Sud [°]	44.99146
Ovest [°]	7.49605

Tabella 3.2: Area di Torino considerata per la visualizzazione della mappa della densità di popolazione

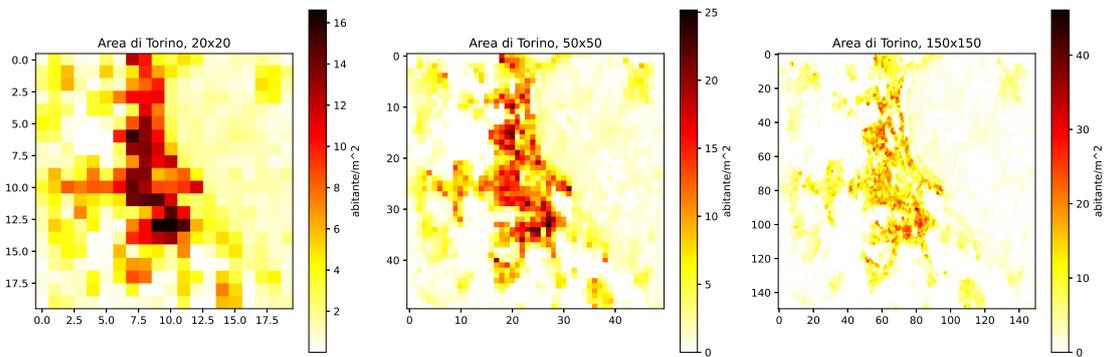
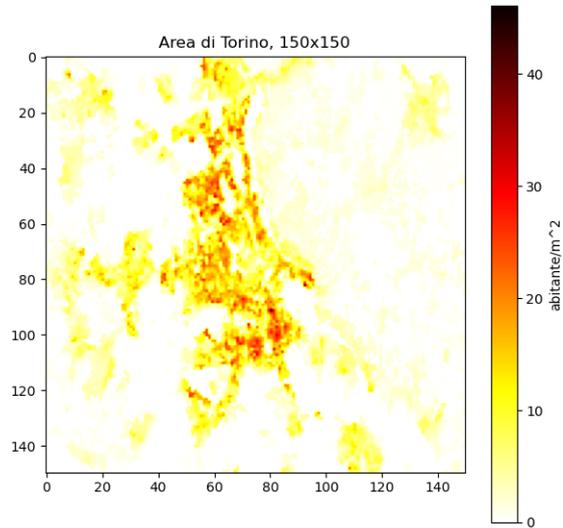
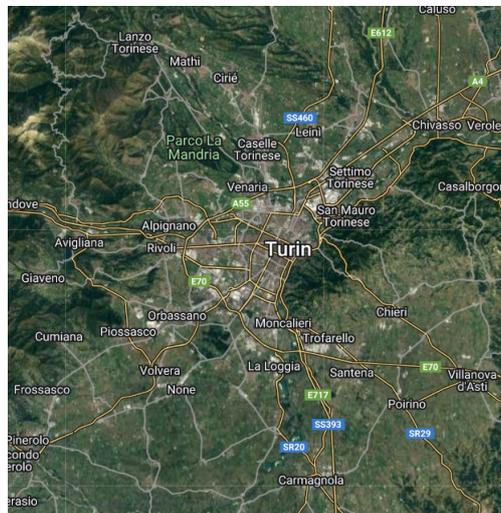


Figura 3.2: Mappa della densità di popolazione in funzione della precisione della griglia adottata

3.1 – Mappe di input per il calcolo



(a)



(b)

Figura 3.3: Densità della popolazione 150x150 (a) di fianco a mappa satellitare di Torino (b), tratta da [Satellites Pro](#)

3.1.2 Mappa dei ripari

Per la costruzione della mappa dei ripari si è preso come riferimento il lavoro di Dalamagkidis et al. (ref. [17]). In particolare, una mappa di ripari consente di diminuire notevolmente la probabilità di impatto fatale dal momento che essi proteggono gli abitanti. E' stato utilizzato il database open source di OpenStreetMap. Gli edifici sono salvati con una serie di caratteristiche, tra cui le coordinate dei punti del perimetro esterno e interno (ad esempio per pozzi luce dei palazzi). Per mappare gli edifici in un'area di interesse, si elabora un codice Python che individui tutti gli edifici con il tag *building = True* nell'area di 'Turin, Italy'.

Il passo seguente è posizionare correttamente gli edifici nella griglia generata. In particolare, la griglia presenta delle celle, mentre degli edifici si dispongono le coordinate dei punti perimetrali come detto. Pertanto, può accadere che un edificio occupi una o più celle se esso è abbastanza grande (o la griglia molto fitta). Allora si utilizza un algoritmo Python in cui si evidenziano tutte le celle che sono occupate o interessate da un edificio. Una rappresentazione grafica è nella figura 3.4, dove sono evidenziate le celle che circoscrivono un esempio di poligono.

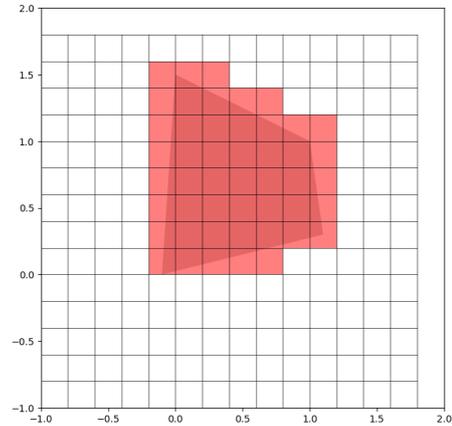


Figura 3.4: Celle occupate completamente o parzialmente da un poligono

Il risultato per una griglia 150×150 è in figura 3.6 e mostra le celle in cui vi è almeno un edificio.

Occorre porsi una riflessione sulla validità del calcolo effettuato. Mentre la mappa della densità di popolazione servirà a indicare delle zone di rischio, sopra le quali il sorvolo è da evitare, la mappa degli edifici costituisce un elemento di sicurezza poiché essi sono una protezione dalla caduta di aeromobili. Riprendendo [17], il lavoro [21] stima un fattore di protezione (o *sheltering factor*) da 0 a 10, con 2.5 valido per alberi, 7.5 per edifici civili e 10 per industriali; sceglie infine 7.5 per tutti gli edifici nell'area di Torino. Tuttavia, la suddetta si riferisce a un calcolo compiuto sui droni a uso per lo più ricreativo, di massimo peso al decollo inferiore almeno di due ordini di

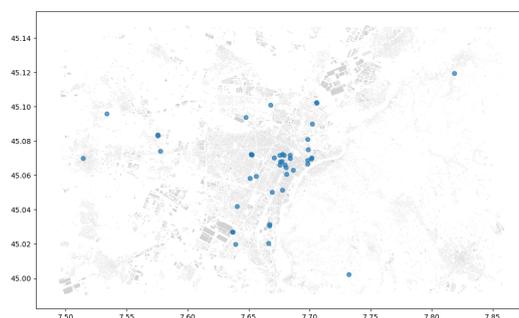


Figura 3.5: Edifici di OpenStreetMap con il tag *building = True*; i puntini azzurri sono edifici puntiformi, come statue.

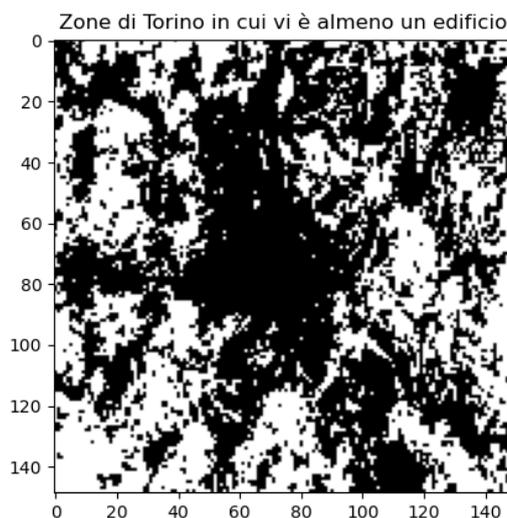


Figura 3.6: Zone di Torino con almeno un edificio, mappa elaborata con dati di OpenStreetMap

grandezza rispetto ai VTOL qui trattati. Per cui, se si utilizzasse la mappa creata, si indurrebbe un falso livello di protezione poiché tale mappa indicherebbe che quasi in ogni cella vi è almeno un edificio a protezione dei civili da cadute.

In ogni caso, per evitare di introdurre falsi livelli di sicurezza, si sceglie di proseguire per un'altra strada. La mappa 3.6 è *booleana*, indica infatti la presenza o meno di un edificio nella cella considerata. Il discriminante è dunque

c'è un edificio o non c'è un edificio, trattando in egual modo celle con 1 o 100 edifici ad esempio. Per scongiurare di utilizzare una mappa con un falso livello di sicurezza, per ogni cella si associa allora il numero di edifici presenti. I risultati sono nella figura 3.7, per una mappa 150×150 .

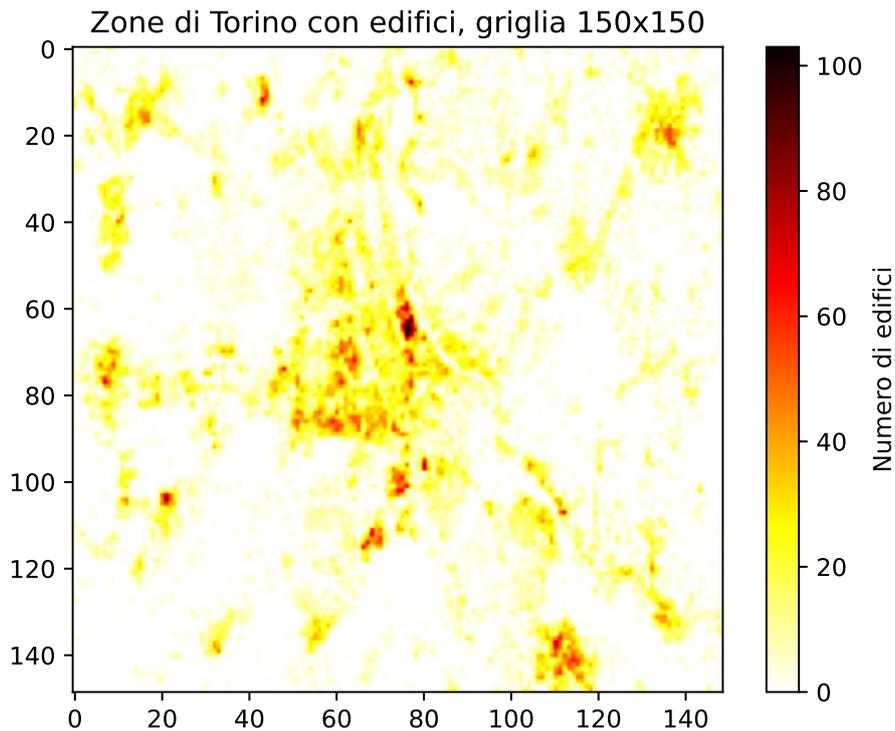


Figura 3.7: Numero di edifici per cella di Torino

Se dunque una cella è effettivamente densamente popolata da edifici, allora è ragionevole porre un fattore di protezione come [21]. Se invece vi è un edificio isolato, per esempio un'abitazione di campagna, non si può porre lo stesso fattore di protezione. Sul valore del fattore di protezione si rimanda al paragrafo Probabilità di fatality (sezione 3.2.2).

3.2 Costruzione della mappa del rischio per VTOL e droni

In questa sezione gli input calcolati in 3.1 sono utilizzati per costruire la mappa del rischio di sorvolo del Piemonte. Dopo un'introduzione iniziale concettuale, si spiegano i passaggi seguiti per la costruzione.

3.2.1 Introduzione

Per costruire la mappa di rischio desiderata, si considerano i modi di caduta più frequenti descritti da [17]:

- *ballistic descent* (paragrafo 3.2.2);
- *uncontrolled glide* (paragrafo 3.2.3).

Per ognuno di essi si considera una **funzione di densità di probabilità** (PDF), indicante la probabilità che *dopo una failure il velivolo colpisca una persona e che tale impatto sia fatale*:

$$P_{casualty} = P_{event} \cdot P_{impact} \cdot P_{fatality} \quad (3.1)$$

P_{event} rappresenta la probabilità che si verifichi una failure catastrofica. misurata in unità di ore di volo; P_{impact} è la probabilità di impattare su una persona; $P_{fatality}$ è la probabilità che tale impatto sia fatale.

Per ognuno dei modi di caduta si calcola la $P_{casualty}$ e si sommano i risultati:

$$P_{casualty} = P_{casualty}^{ballistic\ descent} + P_{casualty}^{uncontrolled\ glide} \quad (3.2)$$

3.2.2 Ballistic descent

Con discesa balistica si intende la caduta incontrollata del velivolo, soggetto unicamente alla forza di gravità e alla resistenza aerodinamica. Il riferimento principale è il lavoro di La-Cour Harbo (ref. [6]). L'autore parte dall'equazione 3.3:

$$m\dot{\vec{V}} = m\vec{g} - c|\vec{V}|\vec{V} \quad (3.3)$$

dove m indica la massa del velivolo, \vec{V} il vettore velocità, g l'accelerazione di gravità e c è una costante che include il coefficiente di resistenza aerodinamica C_D , la superficie alare e la densità dell'aria.

Calcolo del punto di impatto

L'equazione è risolta numericamente, sino a trovare la velocità di impatto al suolo e la posizione dell'impatto. Nella pratica è ragionevole assumere che non saranno esattamente note informazioni come posizione iniziale o velocità iniziale; per alcune di esse si utilizza una distribuzione normale statistica. La tabella 3.3 contiene i valori del *Wisk Cora* utilizzati nel calcolo di esempio, tratti da [3], invece con "*" si intendono dei valori ipotizzati. Si risolve l'equazione $n = 1000$ volte, riportando la posizione trovata di volta in volta entro una griglia 50×50 . In figura 3.8 è riportato un istogramma 2D con i risultati delle frequenze di impatto per cella. Dividendo poi il valore di ogni cella per il numero $n = 1000$ di tentativi totali si ottiene una distribuzione di probabilità discreta del punto di impatto del velivolo.

Quota di volo*	700m
Massa	1224kg
Superficie alare	$10m^2$
Velocità del vento media* ^a , secondo una distribuzione normale	$\mu_w = 25.2m/s$ $\sigma_w = 7.2m/s$
Direzione di volo del VTOL*	170° , rispetto all'asse X
Densità dell'aria	$1.225 kg/m^3$
Coefficiente di portanza	1.493
Velocità iniziale X del VTOL ($V_{x_i}^*$), secondo una distribuzione normale	$\mu_{V_{x_i}} = 140m/s$ $\sigma_{V_{x_i}} = 10m/s$
Velocità iniziale Y del VTOL ($V_{y_i}^*$), secondo una distribuzione normale	$\mu_{V_{y_i}} = 0m/s$ $\sigma_{V_{y_i}} = 5m/s$

Tabella 3.3: Dati del *Wisk Cora* per la caduta balistica

^atratta da [Climi e Viaggi](#) per Torino

Calcolo della probabilità di impatto

La probabilità di impatto in punto di coordinate (x,y) è ottenuta moltiplicando la densità di popolazione di quel punto $\rho_{(x,y)}$ per l'area esposta all'impatto A_{exp} :

$$P_{impact}(x, y) = \rho_{(x,y)} \dot{A}_{exp} \quad (3.4)$$

In particolare, A_{exp} rappresenta l'area del corpo di una persona potenzialmente soggetta a un impatto con oggetti di rientro spaziale, è tratta da una

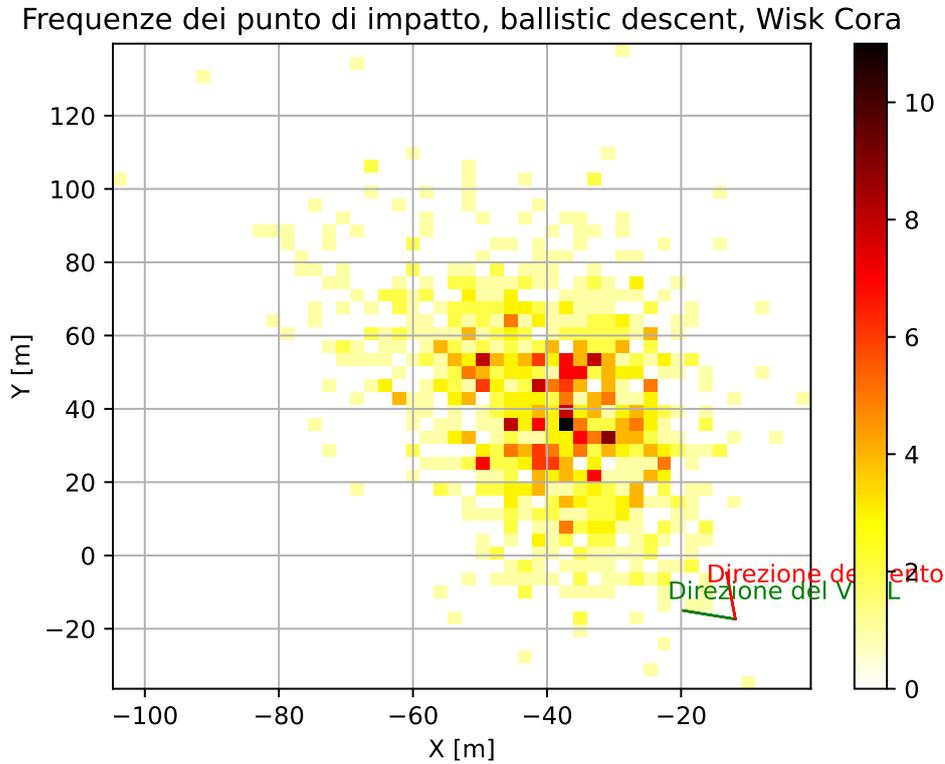


Figura 3.8: Rappresentazione delle frequenze dei punti di impatto. In basso a destra i vettori di velocità iniziale e velocità del tempo sono collocati nella posizione iniziale (0,0,700m)

circolare della *Federal Aviation Administration* (FAA, ref. [1]). Si assume che il corpo di una persona sia approssimabile come un cilindro di raggio $r_p = 30cm^1$ e altezza $h_p = 180cm^2$. L'area A_{exp} si ottiene considerando un angolo di impatto rispetto al suolo θ dell'oggetto in caduta (in questo caso, il velivolo); la figura 3.9 mostra la proiezione sul suolo dell'ombra della persona possibilmente colpita dal velivolo. Il valore finale di A_{exp} è dato dalla seguente equazione:

$$A_{exp} = 2(r_p + r_{VTOL})\frac{h}{\tan(\theta)} + \pi(r_{VTOL} + r_p)^2 \quad (3.5)$$

¹Conversione da 1ft presente in [1]

²Conversione da 6ft presente in [1]

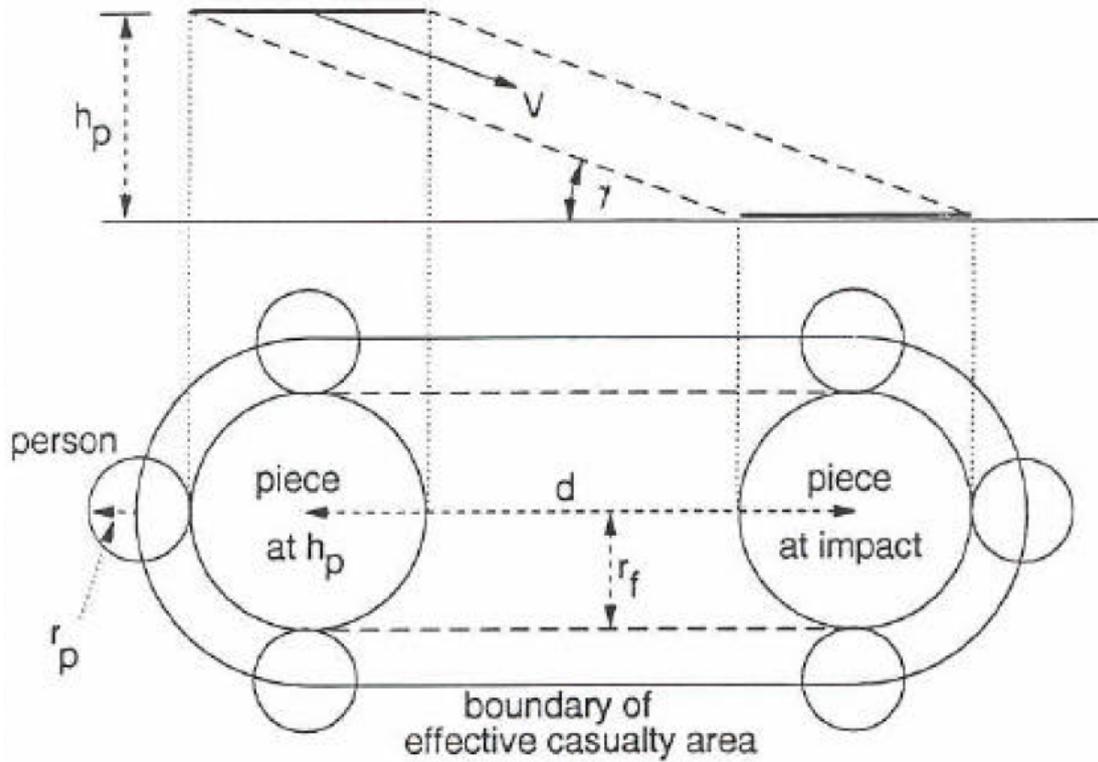


Figura 3.9: Area di impatto per un oggetto in traiettoria di rientro obliqua, tratta da pag. 13 di [1]

Bisogna specificare che [1] riguarda la caduta di detriti spaziali, comparabili come dimensioni per droni. Nel caso in oggetto, il valore r_{VTOL} è molto più grande, per cui ci si aspetta una probabilità di impatto notevolmente maggiore.

Nell'equazione scritta i parametri sono costanti a eccezione del θ , che dipende dal modo con cui il VTOL colpisce il suolo. Esso è stimato a partire dalle componenti di velocità di impatto al suolo:

$$\theta = \arctan\left(\frac{|V_y|}{|V_x|}\right) \quad (3.6)$$

Per generare la probabilità di impatto in mappe di piccole dimensioni, si ipotizza che il VTOL possa avere una failure in qualsiasi punto della griglia $N_2 \times N_2$ ad un'altezza costante, dunque si calcolano le PDF relative a ciascun punto di partenza. Si sommano le PDF totali e si normalizza il risultato. Il codice implementato segue i passaggi:

1. il VTOL parte da una posizione iniziale $(i, j, altezza[k])$, con $i \in [0, N_1)$ e $j \in [0, N_2)$ e l'altezza data da un valore random dalla distribuzione normale;
2. sceglie valori casuali per l'intensità del vento e velocità del VTOL, seguendo distribuzioni gaussiane, secondo media e deviazione standard indicati nella tabella precedente;
3. calcola la posizione di impatto X,Y, l'angolo di impatto rispetto al suolo e il tempo di impatto;
4. i punti 2 e 3 sono ripetuti $n = 1000$ volte; per cui si costruisce un istogramma 2D di dimensioni $N_1 \times N_2$ dove per ogni cella c'è la frequenza di impatto (come nella sezione precedente 3.2.2);
5. si ottiene una PDF discreta dividendo i valori dell'istogramma per il numero totale di campionamenti $n = 1000$;
6. si riesegue il calcolo iterativamente cambiando $(i, j, altezza[k])$; ovvero, per ogni posizione iniziale del VTOL in volo nella mappa $N_1 \times N_2$, calcolo una PDF con l'informazione del punto di impatto;
7. sommo tutte le PDF ottenute e normalizzo per il numero di volte in cui ho eseguito il calcolo, ovvero, dividendo il risultato per $N_1 \cdot N_2$

Il valore PDF risultante è inserito nell'equazione:

$$P_{impact}(x, y) = \sum_{x,y} PDF \cdot D(x, y) \cdot A_{exp}(\theta(x, y)) \quad (3.7)$$

Calcolo della probabilità di Fatality

La *probabilità di fatality* stima che l'impatto con una persona sia fatale, in essa viene considerata la mappa dei ripari calcolata alla sezione 3.1.2. Di seguito si espongono sinteticamente le trattazioni di [17] e [21] sulla scelta dello sheltering factor, indicando poi la conclusione per il caso dei VTOL. In [17] lo sheltering factor è adottato per evitare una sovrastima del rischio di sorvolo, considerando che elementi urbani come edifici e alberi possono schermire da impatti di grave entità. Considera come $34J$ l'energia di impatto necessaria per procurare un danno a una persona (tratto da [20]) e formula la probabilità di fatality come segue:

$$P_{fatality} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \left[\frac{\beta}{E_{imp}} \right]^{\frac{1}{4p_s}}} \quad (3.8)$$

dove p_s è il parametro di sheltering, che può assumere un valore nell'intervallo $p_s \in (0,1]$, $\beta = 34J$ come indicato precedentemente, α è l'energia di impatto richiesta per avere una probabilità di fatality pari a 1 considerando $p_s = 50\%$, E_{imp} è l'energia di impatto definita come $E_{imp} = 0.5 \cdot M \cdot V^2$. L'autore indica di porre un valor medio di $p_s = 0.5$, considerando che con $p_s = 1$ si ha una migliore copertura e un basso valore di rischio a parità di energia cinetica di impatto.

La fonte [21] invece formula la $P_{fatality}$ in modo tale da considerare diverse tipologie di coperture:

$$P_{fatality} = \frac{1 - k}{1 - 2k + \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \left[\frac{\beta}{E_{imp}} \right]^{\frac{3}{p_s}}} \quad (3.9)$$

dove $k = \min(1, (\frac{\beta}{E_{imp}})^{\frac{3}{p_s}})$. In questo modo $p_s \in (0, \infty)$, tuttavia dato che per $p_s > 10$ la probabilità assume un valore vicino allo 0 di macchina, si pone $p_s = 10$ per la copertura offerta da edifici industriali, $p_s = 7.5$ da edifici civili e $p_s = 2.5$ da alberi. Nell'implementazione pratica, non adotta questa distinzione e pone $p_s = 7.5$ laddove ci siano edifici.

Tra le due trattazioni per la $P_{fatality}$ si è seguita quella di [17] poiché più adatta ai VTOL. Infatti, dal momento che le energie cinetiche in gioco sono molto più elevate con i VTOL, si preferisce abbandonare la distinzione tra alberi e tetti.

Nell'implementazione del codice, bisogna scegliere quale fattore di sheltering adottare per le celle considerate. Alcune celle potrebbero avere più edifici a protezione degli abitanti, altre di meno. Allora si calcola il numero medio di edifici per cella, indicato con $N_{average}$; se la cella ha un numero di edifici N superiore a esso, allora si pone $p_s = 0.5$, seguendo [17], altrimenti per $N < N_{average}$ vale $p_s = 0$.

3.2.3 Uncontrolled Glide

Nel modo di caduta uncontrolled glide il pilota perde i comandi del velivolo, che scende secondo un angolo di planata dettato dalla geometria e dalle condizioni aerodinamiche. In particolare, per droni ad ala fissa accade se c'è una perdita di potenza dei motori oppure per una perdita di efficienza delle superfici di controllo; per droni con un singolo o multi-rotore, l'angolo

di planata coincide con quello dato dall'autopilot.

Di seguito si espone il modo di calcolo del punto di impatto; per l'implementazione successiva del calcolo di P_{impact} e $P_{fatality}$ si ripetono i passaggi già descritti.

Calcolo del punto di impatto

La distanza percorsa rispetto al piano dipende semplicemente dal glide ratio moltiplicato per la discesa compiuta:

$$dist(h) = \gamma \cdot h \quad (3.10)$$

dove con γ si intende il *glide ratio* (da [21]).

Calcolo della probabilità di impatto

Passando a un approccio probabilistico, i valori di velocità iniziale (nelle due direzioni X e Y), altezza e velocità del vento sono dati da una distribuzione normale. I valori sono i medesimi assunti nella trattazione per Ballistic descent alla sezione 3.2.2 e rispetto a esso cambia solo la definizione della PDF; per la probabilità di impatto e di fatality si è seguito la medesima logica. Per calcolare la PDF:

1. il VTOL parte da una posizione iniziale (i,j,h) , con $i \in [0, N1)$, $j \in [0, N2)$ e l'altezza h data da un valore random dalla distribuzione normale;
2. si calcola il tempo di impatto al suolo come:

$$t_{im} = \frac{V_{y_i} + \sqrt{V_{y_i}^2 + 2 \cdot 9.81m/s^2 \cdot h}}{9.81m/s^2} \quad (3.11)$$

3. si calcola la distanza percorsa dall'equazione 3.10;
4. si calcolano le velocità di impatto al suolo;
5. si ripetono i punti dall'1 al 4 $n = 1000$ volte, poi si costruisce un istogramma con le frequenze di impatto;
6. dividendo i valori dell'istogramma per il totale, si ottiene la PDF discreta cercata.

La trattazione per la $P_{fatality}$ è la medesima del paragrafo 3.2.2 e si omette.

3.2.4 Calcolo della $P_{casualty}$ finale

Per ognuno dei due modi di caduta si calcola la $P_{casualty}$ come descritto dalla 3.2, poi si sommano i valori ottenuti di celle corrispondenti. Si riporta in figura 3.10 il risultato per l'area del Piemonte intero, confrontato in figura 3.11 con una visione satellitare tratta da Google Earth. Nel capitolo 5.2 sono riportate altre mappe per altri aeromobili o condizioni di volo.

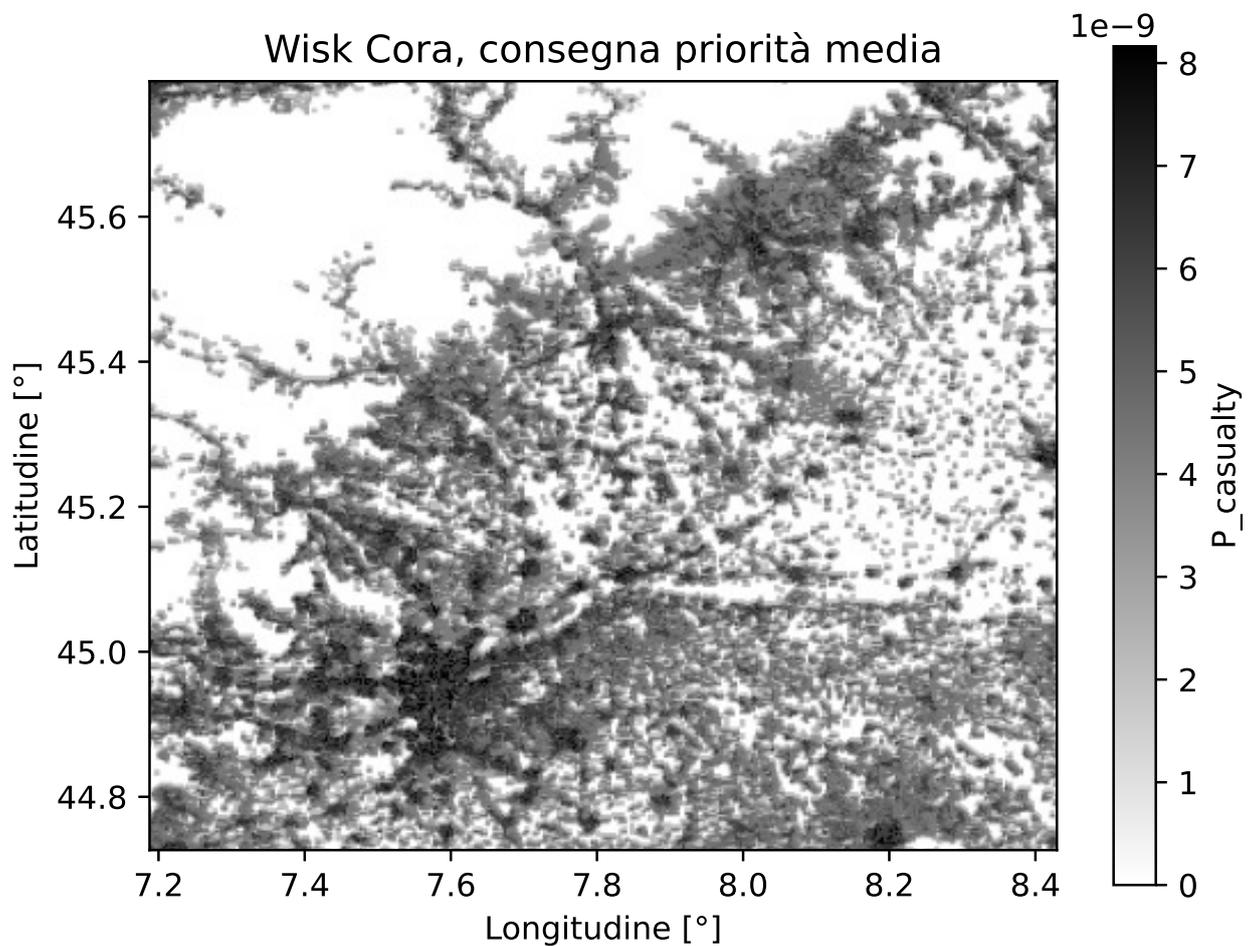
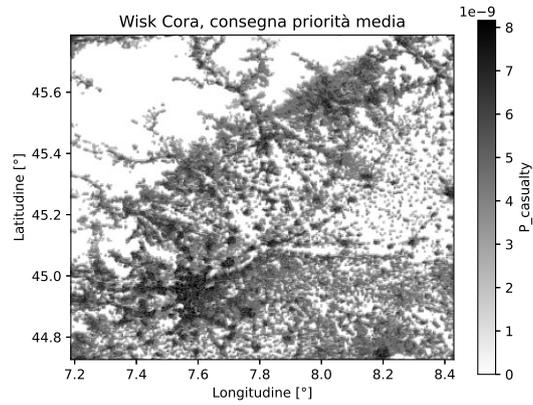


Figura 3.10: Mappa del rischio di sorvolo per il VTOL Wisk Cora su Torino e province adiacenti.



(a)



(b)

Figura 3.11: Confronto mappa del rischio e visualizzazione di [Google Earth](#)

3.3 Calcolo del percorso ottimo in VTOL e drone

Il calcolo della traiettoria è stato implementato partendo da un problema semplice e aggiungendo via via variabili per renderlo più complesso:

- dapprima si è trovata la traiettoria di minimo rischio assoluto, con l'algoritmo di Dijkstra applicato alla mappa del rischio precedentemente elaborata;
- considerato che un VTOL è meno reattivo nelle manovre rispetto a un drone, per considerare traiettorie più rettilinee e realistiche si è passati all'algoritmo A*.

Le analisi fatte riguardano sempre la medesima mappa del rischio su Torino e province adiacenti.

Il paragrafo [3.3.1](#) illustra il funzionamento dell'algoritmo di Dijkstra e i risultati; il paragrafo [3.3.2](#) si concentra sull'algoritmo A*.

3.3.1 Algoritmo di Dijkstra

Introduzione al funzionamento

Si tratta di un algoritmo statico che calcola il percorso di minimo rischio su una mappa in cui per ogni cella c'è un livello di rischio associato. Per essere più precisi, Dijkstra si usa per mappe con un peso per il passaggio su alcune celle. L'esecuzione è molto veloce, tuttavia, a volte il percorso risultante può essere contorto poiché si guarda solo al minimo rischio globale.

E' stato pensato per i grafi, quindi nel caso di una mappa ogni cella è connessa alle altre adiacenti (in direzione orizzontale e verticale, non diagonale in questa trattazione). Si spiega sinteticamente il funzionamento, supponendo di muoversi sulla seguente griglia di dimensioni 4x4, di pesi (ovvero rischi) casuali. Le descrizioni sono riportate nelle didascalie di figure e tabelle.

0	2	3	5
1	3	4	7
7	3	5	6
3	4	5	6

Figura 3.12: Il punto di partenza è la cella (1,1), quello di arrivo la cella (4,4). Nell'algoritmo si tiene una lista del rischio complessivo associato per visitare una cella e una lista delle celle visitate.

<i>Tabella dei rischi totali</i>															
(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)
0	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
<i>Tabella delle celle visitate</i>															
(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)
X															

Tabella 3.4: Nella tabella delle celle visitate con 0 si indica la distanza dal punto di partenza rispetto a punto di partenza e con ∞ le distanze non conosciute. Sotto si riporta anche la tabella delle celle visitate, per il momento con la sola origine.

0	2	3	5
1	3	4	7
7	3	5	6
3	4	5	6

Figura 3.13: Si inizia guardando le celle adiacenti, ovvero la cella (1,2) di rischio 2 e la cella (2,1) di rischio 1 (supponendo che ci si possa muovere solo in direzione verticale e orizzontale)

<i>Tabella dei rischi totali</i>															
(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)
0	2	∞	∞	1	∞										
<i>Tabella delle celle visitate</i>															
(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)
X															

Tabella 3.5: Si aggiorna dunque la tabella delle distanze necessarie per raggiungere tali celle.

0	2	3	5
1	3	4	7
7	3	5	6
3	4	5	6

Figura 3.14: Si deve dunque scegliere la cella corrente; si prende quella di rischio globale minimo, ovvero la cella (2,1) in questo caso.

<i>Tabella dei rischio totali</i>															
(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)
0	2	∞	∞	1	∞										
<i>Tabella delle celle visitate</i>															
(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)
X				X											

0	2	3	5
1	3	4	7
7	3	5	6
3	4	5	6

Figura 3.15: Si guardano allora tutte le celle adiacenti a quelle segnate come visitate, ovvero la (1,2), la (2,2) e la (3,1).

<i>Tabella dei rischio totali</i>															
(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)
0	2	∞	∞	1	4	∞	∞	8	∞						
<i>Tabella delle celle visitate</i>															
(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)
X				X											

Tabella 3.6: Per ognuna di esse si guarda il rischio globale per raggiungerle e si aggiorna la tabella delle distanze:

Tra le celle di cui si il rischio totale ci sono tre candidate che non sono state visitate:

- la cella (1,2), con rischio totale 2;
- la cella (2,2), con rischio totale 4;
- la cella (3,1), con rischio totale 8.

Si sceglie dunque di visitare la cella con rischio minimo, ovvero la (1,2). L'esecuzione continua finché si giunge alla cella di destinazione, la (4,4).

0	2	3	5
1	3	4	7
7	3	5	6
3	4	5	6

Dunque si ripercorre il percorso fatto, in modo tale da trovare quello con rischio minimo.

Risultati

Le figure [3.16](#), [3.17](#) e [3.18](#) mostrano l'applicazione dell'algoritmo di Dijkstra su vari percorsi.

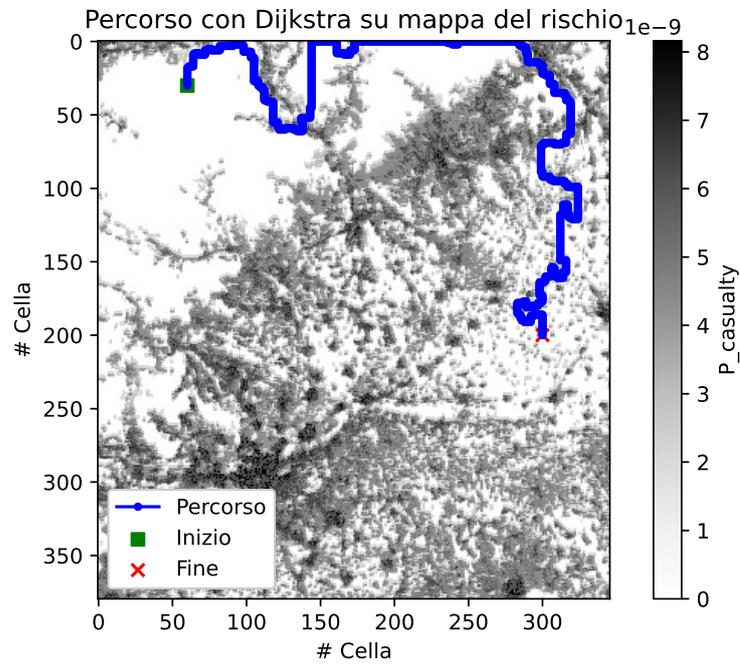


Figura 3.16: Applicazione algoritmo di Dijkstra, rischio totale: $5.5769 \cdot 10^{-7}$

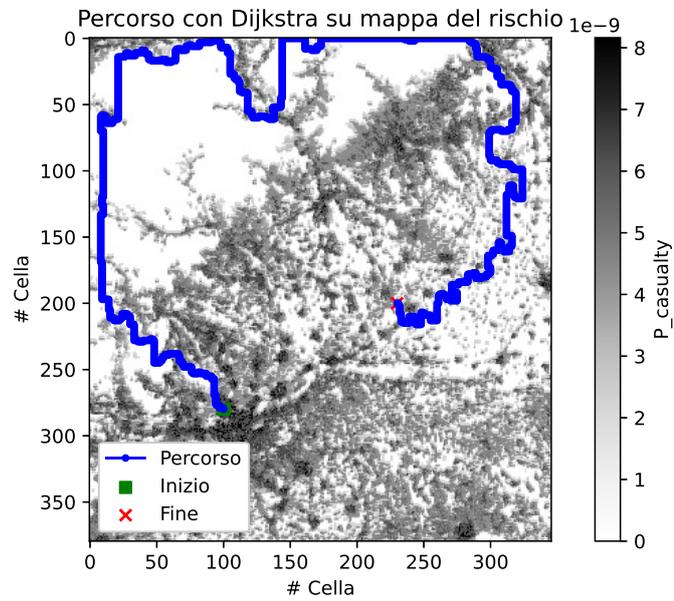


Figura 3.17: Applicazione algoritmo di Dijkstra, rischio totale: $1.4580 \cdot 10^{-7}$

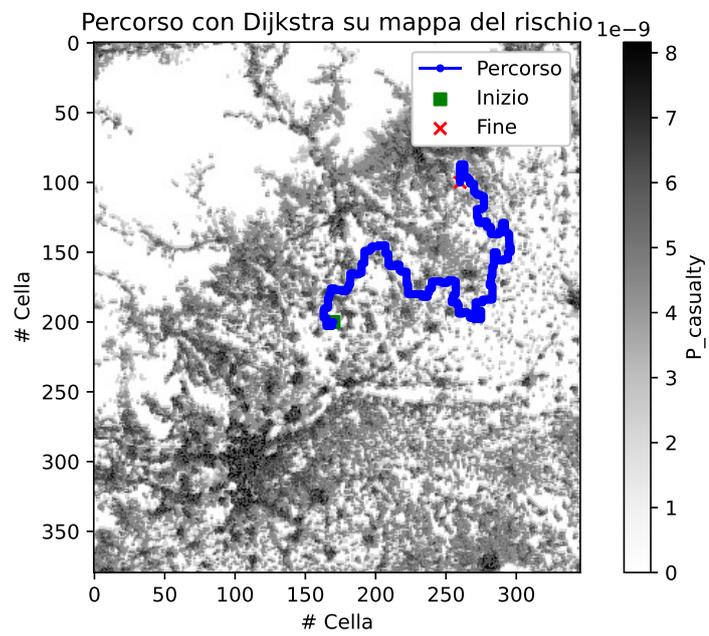


Figura 3.18: Applicazione algoritmo di Dijkstra, rischio totale: $6.5299 \cdot 10^{-7}$

3.3.2 Algoritmo A*

L'algoritmo A* trova il percorso di minimo rischio basandosi su una funzione euristica. In base alla definizione della funzione, l'algoritmo si presta meglio in problemi di ottimizzazione. Mentre l'algoritmo di Dijkstra prende in considerazione unicamente il valore predeterminato di rischio associato a ogni cella della mappa, A* analizza la distanza tra il punto attuale e la destinazione, per cui le traiettorie individuate sono più uniformi. La funzione euristica, che può essere espressa genericamente in:

$$f(i, j) = g(i, j) + h(i, j) \quad (3.12)$$

dove con (i, j) si indica la cella attuale, con $g(i, j)$ il costo/rischio del percorso fatto sinora per raggiungere la cella (i, j) (valutazione del passato) e con $h(i, j)$ una funzione che il costo/rischio del percorso dalla cella (i, j) alla destinazione (valutazione del percorso da fare).

E' fondamentale una corretta definizione di $h(i, j)$, essa può infatti essere ottimistica se sottostima il costo/rischio per raggiungere la destinazione, oppure può sopravvalutare tale costo rischio. In linea generale un'euristica troppo ottimistica (che dunque sottostima troppo) potrebbe indicare percorsi apparentemente brevi ma che in realtà hanno un costo/rischio maggiore, a tal punto che è necessario analizzare più nodi, con il rischio non arrivare a una convergenza. Tuttavia, un'euristica ottimistica ben formulata permette di completare il calcolo in fretta, fornendo un percorso di qualità molto vicino al minimo assoluto (dato dall'algoritmo di Dijkstra); si sfrutterà proprio questa qualità per trovare un percorso minimo assoluto e con un numero ridotto di manovre, per simulare una traiettoria di VTOL più realistica.

Invece, un'euristica che sovrastima il costo/rischio reale garantisce di trovare di trovare il percorso più breve, pagando tuttavia un costo computazionale maggiore; infatti porta a esplorare più nodi e soluzioni, individuando il minimo.

L'algoritmo di Dijkstra è un caso particolare di A*: se si pone $h(i, j) = 0$, si ha una valutazione solo del rischio del percorso fatto, ignorando dunque valutazioni sul percorso da fare; il costo computazionale aumenta ma si ha garanzia di trovare il percorso di minimo rischio.

Le funzioni di valutazione del percorso rimanente più comuni sono quella *euclidea* e di *Manhattan*. Nella prima si calcola semplicemente la distanza euclidea tra la posizione attuale (indicata per esempio con (x_n, y_n)) e la

posizione finale (indicata con (x_{fine}, y_{fine})):

$$h(n) = \sqrt{(y_{fine} - y_n)^2 + (x_{fine} - x_n)^2} \quad (3.13)$$

Nell'euristica di Manhattan prende in considerazione solo i movimenti verticali e orizzontali (dunque, i movimenti ammissibili nel problema formulato sulla mappa del rischio):

$$h(n) = |y_{fine} - y_n| + |x_{fine} - x_n| \quad (3.14)$$

L'implementazione segue quella di Dijkstra vista nel paragrafo precedente. Come euristica, si è scelta quella di Manhattan in modo da considerare solo movimenti realistici. La funzione di costo $g(n)$ è indicata con il rischio della cella da esplorare della mappa. Si illustrano dei risultati sulla mappa del rischio del velivolo Wisk Cora.

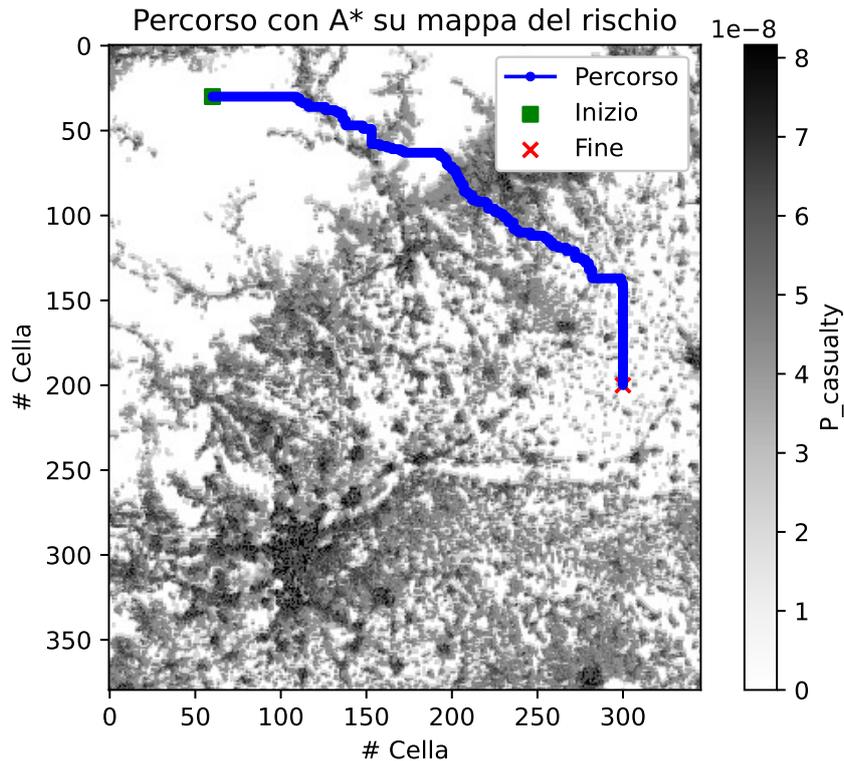


Figura 3.19: Applicazione algoritmo A*, rischio totale: $6.1370 \cdot 10^{-7}$

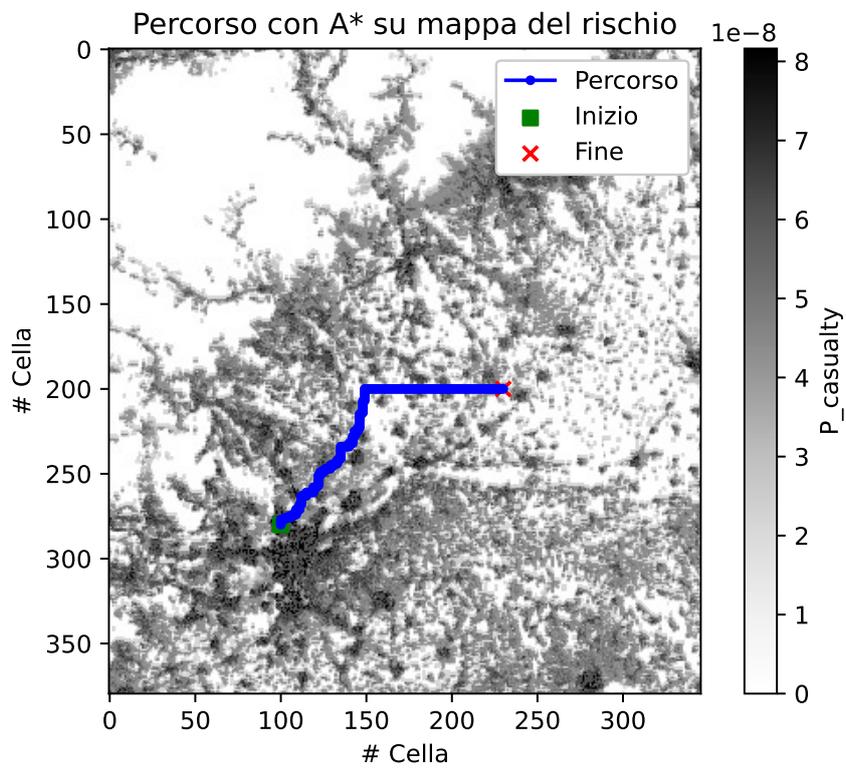


Figura 3.20: Applicazione algoritmo A*, rischio totale: $5.6893 \cdot 10^{-7}$

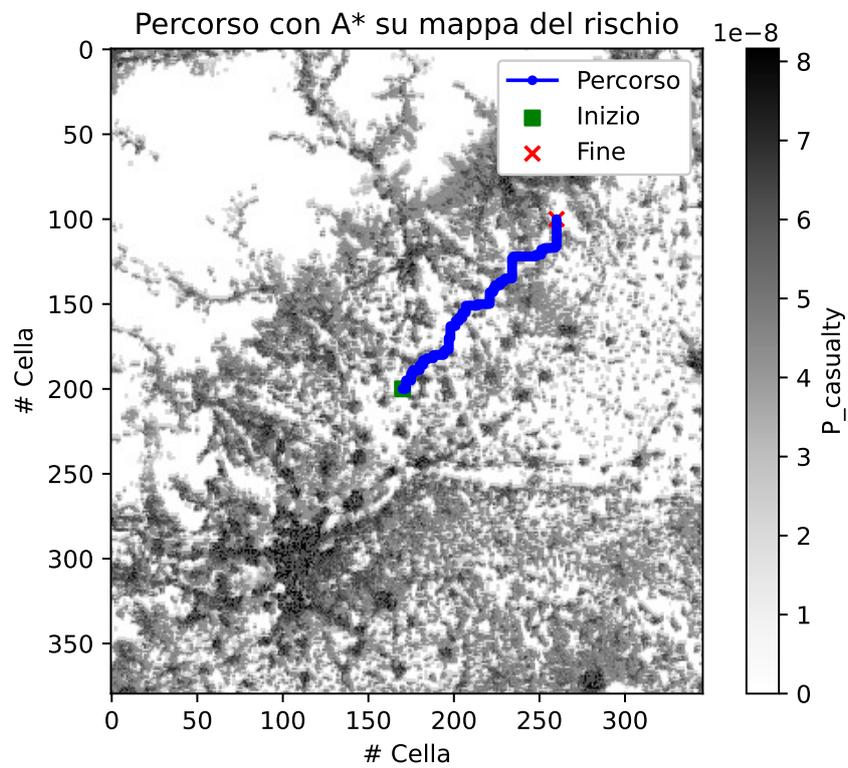


Figura 3.21: Applicazione algoritmo A*, rischio totale: $2.7575 \cdot 10^{-7}$

3.3.3 Confronto risultati algoritmo di Dijkstra e A*

La tabella 3.7 confronta i risultati dei due algoritmi. Si nota che Dijkstra fornisce in tutti i casi il percorso di minimo rischio, mentre A* dà delle traiettorie più regolari. Tali percorsi sono più lunghi con A*, tuttavia, il rischio complessivo è minore. In A* di fatti il VTOL tiene sempre una traiettoria molto vicina a quella ottimale data dall'euristica di Manhattan, ciò è particolarmente evidente nel primo esempio.

Inizio	Fine	Rischio totale, Dijkstra	Rischio totale, A*
(30,60)	(200,300)	$5.5769 \cdot 10^{-7}$	$6.1370 \cdot 10^{-7}$
(280,100)	(200,230)	$1.4580 \cdot 10^{-7}$	$5.6893 \cdot 10^{-7}$
(200,170)	(100,260)	$6.5299 \cdot 10^{-7}$	$2.7575 \cdot 10^{-7}$

Tabella 3.7: Confronto risultati algoritmo Dijkstra e A*

Alla luce dei risultati, si sceglie di utilizzare l'algoritmo A* per individuare la traiettoria ottimale, privilegiando percorsi più realistici.

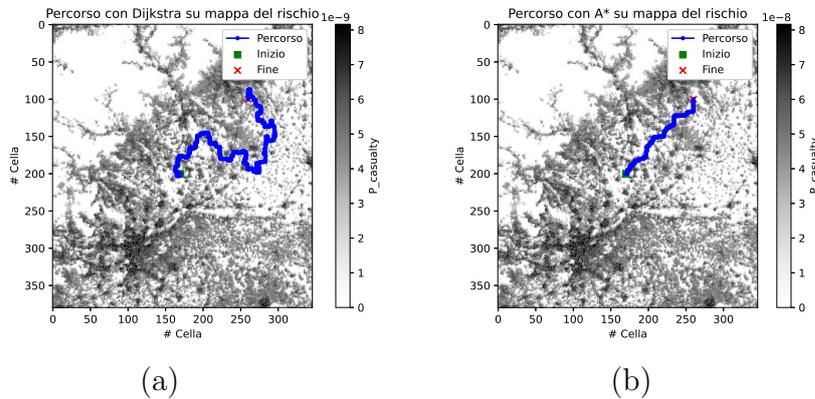


Figura 3.22: Confronto Dijkstra - A*

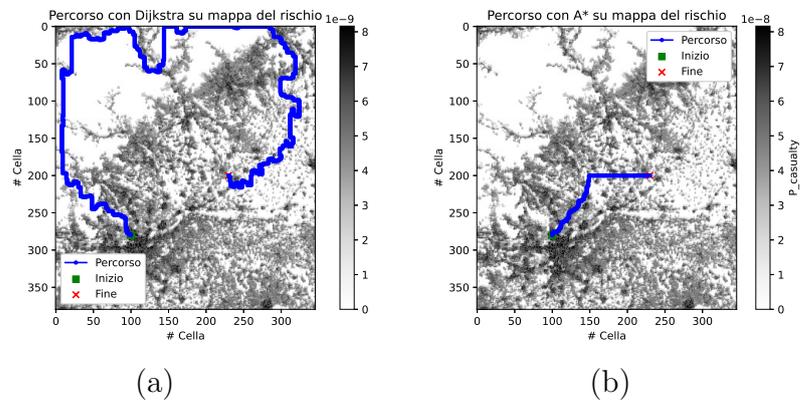


Figura 3.23: Confronto Dijkstra - A*

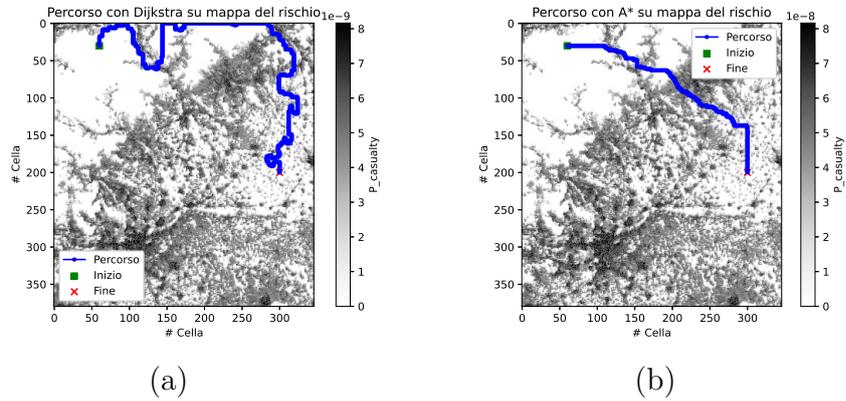


Figura 3.24: Confronto Dijkstra - A*

3.4 Calcolo del percorso ottimo in auto

Allo stato attuale la consegna di farmaci emoderivati in condizione di emergenza avviene in auto tramite mezzi propri dell'ospedale. Non si usano né ambulanze, né si fa affidamento alle forze dell'ordine (come accade invece per il trasporto di organi).

Per trovare il percorso ottimo di VTOL e droni prima sono state svolte analisi statiche sul rischio di sorvolo, poi sono stati calcolati i percorsi ottimi di consegna. Invece, nel caso delle automobili occorre invertire la prospettiva. Infatti il trasporto su gomma è intrinsecamente legato alla presenza della rete stradale. Allora il percorso di minimo rischio coincide con il percorso più breve dal momento che maggiore è il tragitto, maggiore è il rischio di incorrere in incidenti. In questa sezione si spiega come calcolare il percorso più breve in auto; in [3.5](#) è introdotto il modello elementare di valutazione del rischio.

Per ottenere il percorso in auto si è fatto uso della libreria open source di *OpenStreetMap*, la medesima usata per trovare gli edifici al paragrafo [3.1.2](#). In particolare, la figura [3.25](#) mostra la rete stradale tra le quattro coordinate dell'area di Torino e delle province adiacenti.

Date delle coordinate di inizio e fine, il passo successivo è associare a queste coordinate il nodo del grafo più vicino. Il percorso più breve in auto è dunque ottenuto utilizzando la libreria *NetworkX* di Python³. In particolare, nel grafo c'è già l'informazione del senso di marcia, per cui si trova il percorso più breve in modo realistico. La figura [3.26](#) mostra un esempio di risultato.

³[Sito di NetworkX](#)

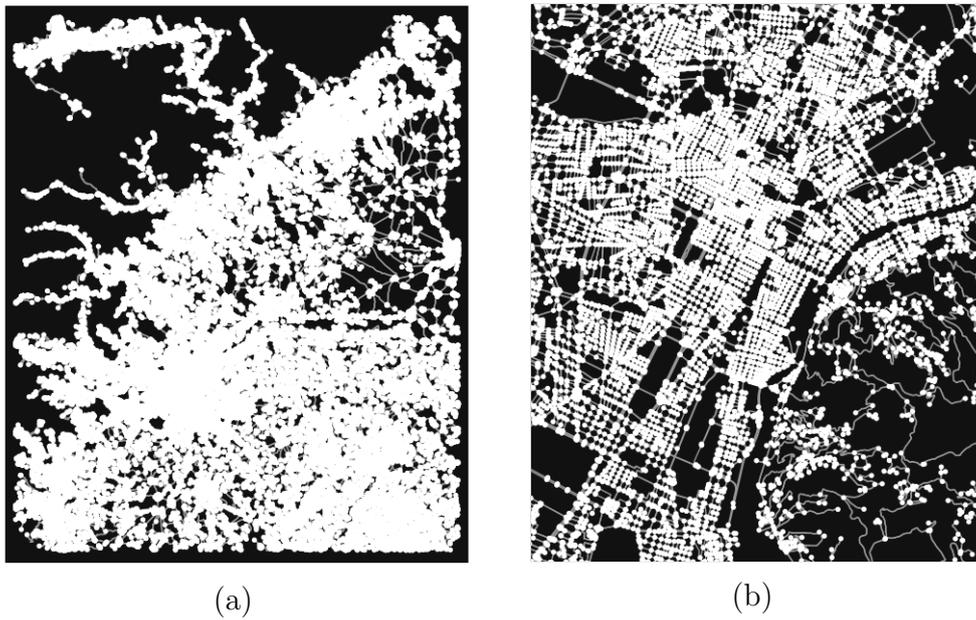


Figura 3.25: Mappa della rete stradale e zoom su Torino, ottenuti da *OpenStreetMap*

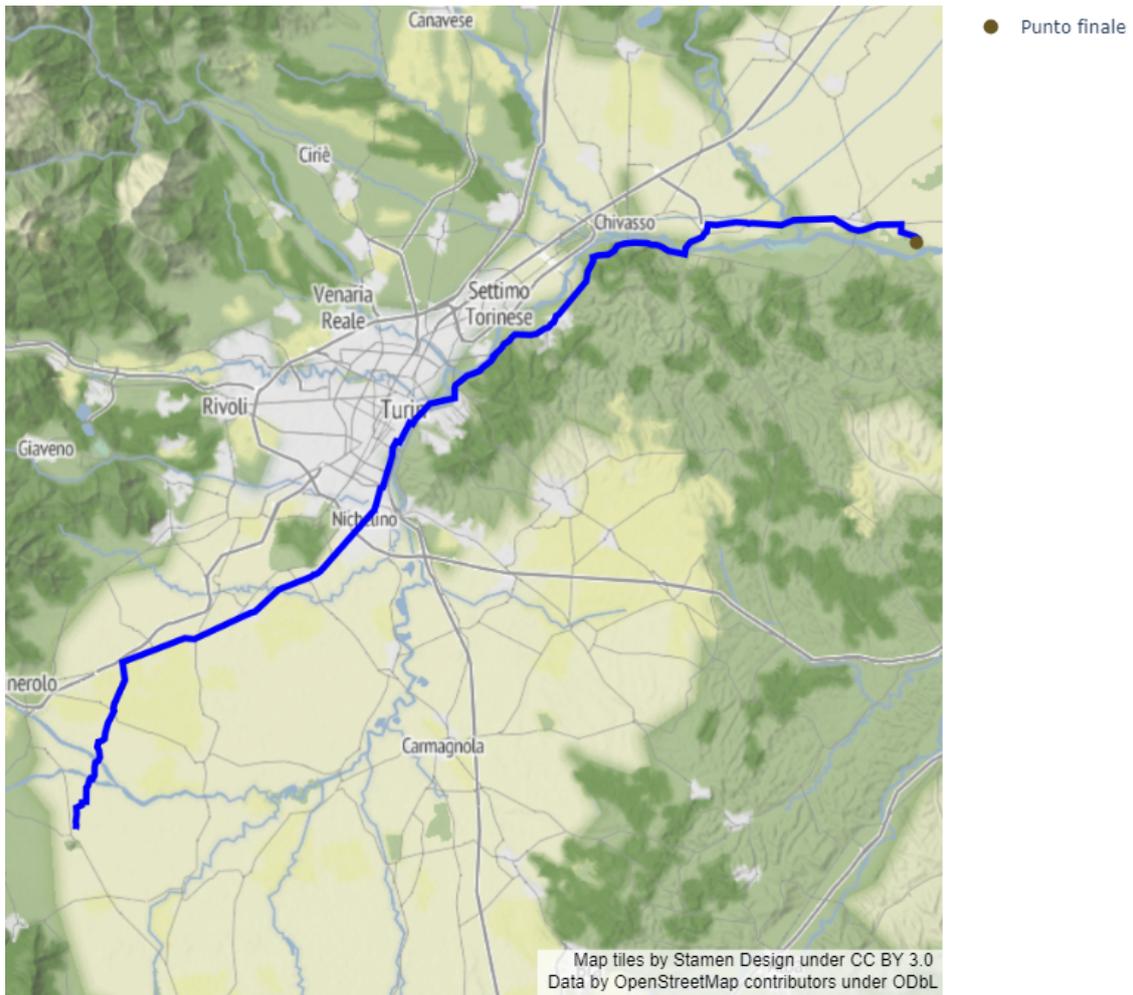


Figura 3.26: Percorso più breve in auto tra due punti, grafico di base da *OpenStreetMap*, tragitto calcolato con *NetworkX*.

3.5 Valutazione del rischio in auto

Per valutare il rischio del trasporto in auto si prendono in considerazione le statistiche sugli incidenti. La P_{event} negli aeromobili era misura di una failure catastrofica per il velivolo, serve un indicatore analogo anche per le automobili. E' stato analizzato il documento "L'Incidentalità Stradale sulla Rete Viaria Principale" realizzato dall' "Automobil Club d'Italia" per conto del "Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti" (ref. [16]). Come equivalente della P_{event} si prende il tasso di incidenti per 100km. Il dato per la regione Piemonte⁴ del 2017 riporta una media di 2.64 incidenti letali per 100km. Pertanto, la sicurezza di un percorso è valutata moltiplicando la lunghezza del percorso stesso per il coefficiente trovato, così anche da avere un numero adimensionale comparabile con la P_{event} aeronatica.

$$P_{event_{auto}} = 0.00264/km \quad (3.15)$$

⁴Tabella a pag.10 di [16]

Capitolo 4

Valutazione del costo della consegna

La valutazione del costo dei trasporti è uno dei parametri di interesse per rendere il sistema delle consegne più efficiente. Inoltre, può dare anche una dimensione di concretezza e fattibilità dei risultati raggiunti.

Nel presente capitolo si forniscono dei modelli base per stimare il costo delle consegne in VTOL, in drone e in automobile.

4.1 Modello di costo per aeromobili

In prima approssimazione, il costo operativo del viaggio in VTOL o drone è stato determinato considerando:

- stipendio del pilota se il mezzo è manned, misurato in minuti di volo percorsi;
- costo di ricarica della batteria a fine del percorso;
- costi operativi infrastrutturali.

L'ipotesi è che gli aeromobili viaggino a velocità in modulo costante e pari alla velocità di crociera. In questo modo, il tempo di volo può essere stimato come:

$$t_{volo} = \frac{l_{percorso}}{V_{crociera}} \quad (4.1)$$

Supponendo che il tempo di lavoro di un pilota sia di 35 ore settimanali¹, che un mese in media è composto da 4 settimane e uno stipendio lordo di €8000 mensili, il costo per ora risulta:

$$C_{pilota} = \frac{\textit{stipendio mensile}}{\textit{ore di lavoro settimanali} \cdot \textit{numero di settimane}} = \frac{\text{€}8000}{35h \cdot 4} = \text{€}57.14/h \quad (4.2)$$

Invece per il costo di ricarica, innanzitutto stima il consumo di potenza medio come capacità della batteria diviso il range del VTOL:

$$C_{potenza_{media}} = \frac{\textit{Capacità della batteria}}{\textit{Range del VTOL}} \quad (4.3)$$

Per cui il costo di ricarica risulta:

$$l_{percorso} \cdot C_{potenza_{media}} \cdot P_{ricarica} \quad (4.4)$$

dove $P_{ricarica}$ è il prezzo medio di ricarica in €/kW, assunto come 0.45/kW.

Infine, si fornisce una stima del costo operativo del VTOL. Il paper dell’AIAA di Duffy et al. (ref. [7]) affronta il tema dei costi dei VTOL e di come ridurli in base al tipo di motorizzazione. Il Wisk Cora rientra nella categoria “stopped rotor” indicata dal suddetto lavoro perché ha 12 eliche verticali per il decollo e altre orizzontali per la crociera. I valori sono riportati in percentuale rispetto ai costi ben più noti dell’elicottero Robinson R44. Prendendo questi da [Aircraft Cost Calculator](#) (ref. [4]), si ottengono i costi legati a manutenzione giornaliera, cambio della batteria e altri fattori (fuel escluso):

- single rotor, elettrico, \$194/h;
- stoped rotor, elettrico, \$197/h;
- tiltrotor, elettrico, \$194/h;
- single rotor, motore alternativo, \$248/h.

Per il Wisk Cora si parla dunque di \$197/h.

¹Stima tratta dal sito [Urbe Aero](#)

Il costo totale è dunque:

$$C_{\text{volo}} = C_{\text{pilota}} + C_{\text{ricarica}} + C_{\text{operativi}} \quad (4.5)$$

Il Wisk Cora ha un range di 100km e una batteria di capacità 63kW. Nell'implementazione pratica, la lunghezza del percorso calcolato è stimato con il numero di celle attraversate moltiplicato per il lato delle celle, pari a 250m.

4.2 Modello di costo per auto

L'approccio utilizzato è simile a quello del paragrafo precedente. Si suppone una velocità media di 50km/h perché, sebbene in condizioni di emergenza si possano supporre velocità maggiori, bisogna considerare l'impatto di eventuali strade piccole e del traffico. La durata della consegna è stimata come:

$$t_{\text{consegna}_{\text{auto}}} = \frac{l_{\text{auto}}}{V_{\text{auto}}} \quad (4.6)$$

Considerando il costo del carburante per €1.90/l, uno stipendio lordo di €30.000 del guidatore² e un consumo³ di 20.8l/km, si ottiene:

$$\begin{aligned} C_{\text{auto}} &= C_{\text{guidatore}} + C_{\text{riifornimento}} = \\ &= \frac{€30.000}{12 * 40 * 4} \cdot t_{\text{consegna}_{\text{auto}}} + €2/l \cdot l_{\text{percorso}} * \frac{1000}{20.8km/l} \end{aligned} \quad (4.7)$$

²Stimato dall'A.O.U. "Città della Salute"

³Tratto da [Motor1](#)

Capitolo 5

Analisi delle consegne per il Piemonte

Il presente capitolo introduce l'oggetto finale della missione. Lo studio parte da un'analisi delle consegne di farmaci in emergenza realmente effettuate nel corso dell'anno 2022 dalla farmacia ospedaliera dell'ospedale "Città della Salute - Molinette" verso altri centri in Piemonte (talvolta in regioni limitrofe, come Liguria per l'Istituto "Gaslini" o le U.S.L. della Val d'Aosta), oppure a partire da altri ospedali verso "Le Molinette". Come anticipato nell'introduzione (ref. "Requisiti della missione" 0.2), le consegne riguardavano tre classi di farmaci:

- farmaci di classe **A**, ovvero con requisito di consegna **urgente**; trattasi di farmaci salvavita, come emoderivati e/o antidoti, la cui somministrazione deve avvenire nel tempo più breve possibile; sono l'oggetto principale della presente ricerca;
- farmaci di classe **B**, ovvero con requisito di consegna **media**; rientrano in questa fascia prodotti medicinali la cui somministrazione è richiesta nel più breve tempo possibile ma con un requisito di urgenza inferiore alla classe "A"; si precisa che in corrispondenza di mancanza di scorte regionali o nazionali o in base alle condizioni di ammissione del paziente in pronto soccorso un farmaco di classe "B" può passare in classe "A"; per semplicità nelle analisi che seguono la classe "A" è stata assegnata a prodotti medicinali intrinsecamente salvavita, prescindendo dunque dai casi particolari;

- farmaci e prodotti farmaceutici di classe **C**, ovvero con requisito di consegna di **routine**; si tratta di prodotti il cui utilizzo è programmabile nei giorni successivi, ad esempio vaccini per la pandemia di Covid-19, garze sterili, ecc...

Il dataset fornito comunque non include la normale redistribuzione delle scorte farmaceutiche ma corrisponde a effettivi bisogni soddisfatti da consegne straordinarie per il 2022.

5.1 Consegne per il 2022

Le seguenti mappe 5.2 e 5.1 forniscono una spiegazione visuale dei bisogni imprevisti di farmaci nell'anno 2022. La grandezza dei cerchi rappresenta i bisogni di ogni ospedale.

Nelle analisi saranno considerati solo gli ospedali del territorio Piemontese, entro le coordinate specificate all'inizio del presente lavoro nella tabella 3.1.



Figura 5.1: Mappa dei bisogni di farmaci in emergenza nel dataset fornito, zoom su Torino; l'ospedale Molinette è quello con i bisogni maggiori

In tabella 8.3 in Appendice si riporta il medesimo dato.

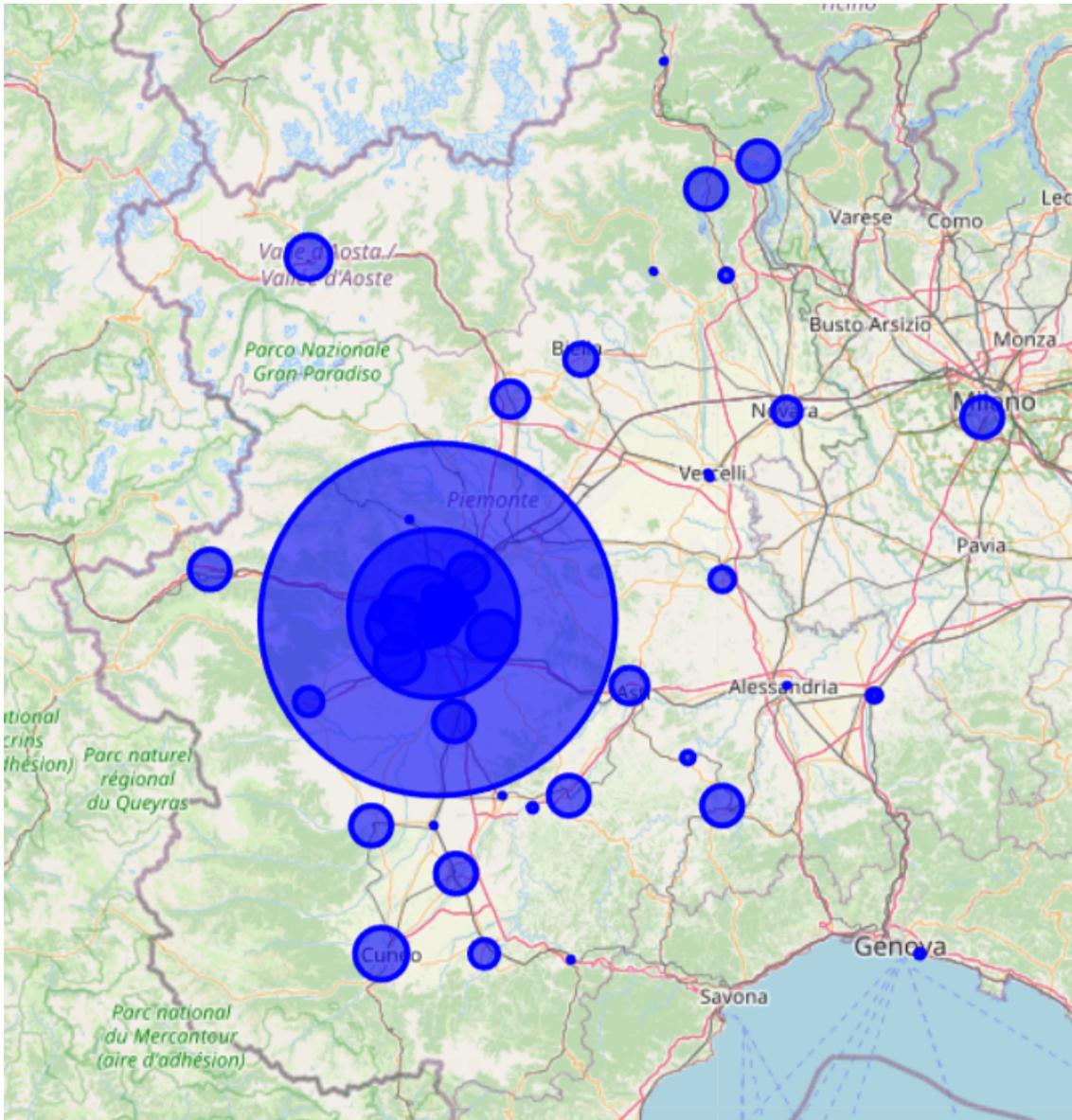


Figura 5.2: Mappa dei bisogni di farmaci in emergenza nel dataset fornito

5.2 Estensione della mappa del rischio al Piemonte

Per valutare le consegne in drone o VTOL rispetto a quelle effettivamente svolte nell'anno 2022 è necessario estendere la mappa del rischio al territorio del Piemonte. Ci porta un aumento considerevole del costo computazionale, per cui sono stati adottati degli accorgimenti di seguito illustrati.

I dati iniziali per la costruzione della mappa sono:

- scelta di un velivolo (drone Talon o VTOL Wisk Cora)
- Scelta di un set di condizioni esterne, ovvero velocità e direzione del vento; in questo caso, si è scelto un vento medio di intensità $\mu_w = 7m/s$ e $\sigma_w = 2m/s$, direzione $\phi = 0.52rad$ e densità dell'aria $1.225kg/m^3$
- Scelta di un profilo di missione; in base a esso infatti la velocità iniziale cambia:
 - se la missione è *urgente*, la velocità $\mu_{V_{x_i}}$ è pari al 70% della V_{max} , mentre la $\mu_{V_{y_i}}$ è scelta di conseguenza in modo tale da avere $V = V_{max}$;
 - se la missione è di *media* urgenza, si prende il 20% dei valori precedentemente indicati;
 - se la missione è di *routine*, si prende il 30% dei valori precedentemente indicati.

La mappa presenta celle quadrate di dimensione $250m \times 250m$. Data una cella (i,j) , con l'incertezza su quota del 10% e velocità iniziali indicate nella tabella 3.3, si ottiene una PDF (i,j) con i metodi calcolati nel capitolo 3. Si ha così una PDF bidimensionale, in cui per ogni cella c'è la $P_{casualty}$, per cui si prende il valor medio dei valori presenti e lo si associa alla cella (i,j) .

In altri termini, alla cella (i,j) della mappa è associata una stima del rischio di sorvolo della cella stessa, tale stima rappresenta la probabilità che si verifichi una failure catastrofica del velivolo, che questa failure porti a un impatto con una persona e che tale impatto sia fatale.

Si riportano i risultati per aeromobile e per tipo di consegna. Da una prima analisi si evince come il rischio massimo per il drone sia dell'ordine di grandezza di 10^{-3} in alcuni punti, mentre per il VTOL ci si ferma a 10^{-9} . Ciò rispecchia effettivamente le norme ENAC sul sorvolo di centri abitati.

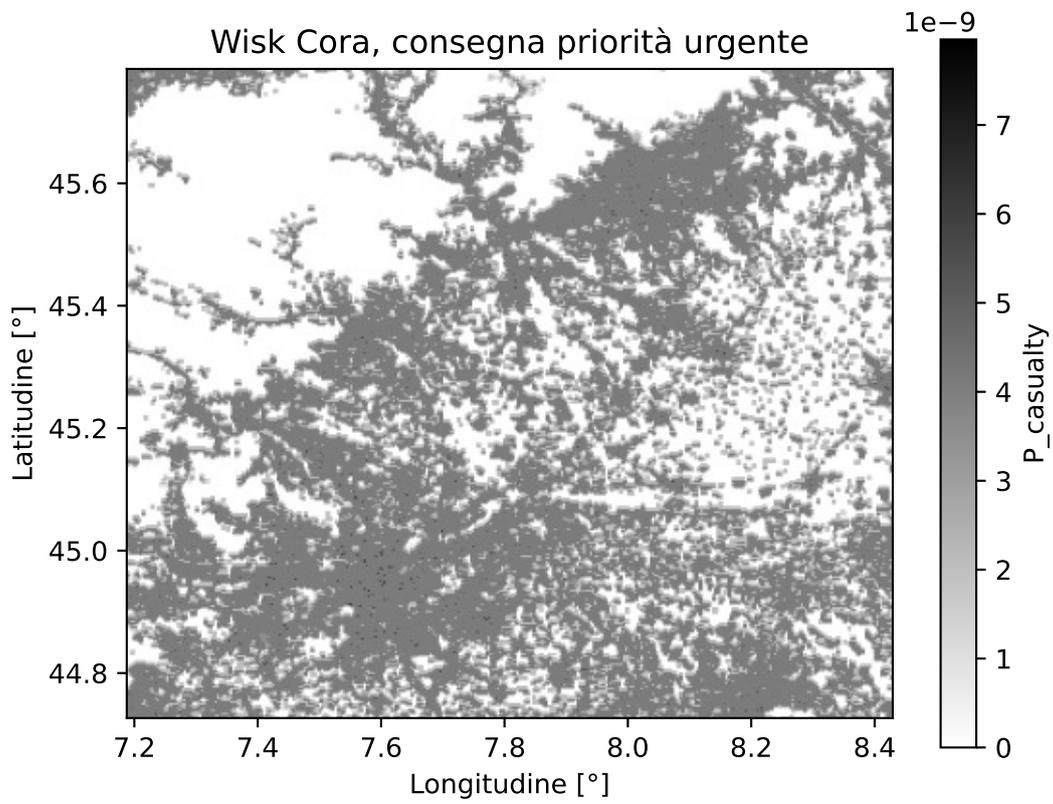


Figura 5.3: Mappa del rischio per VTOL Wisk Cora, consegna "urgente"

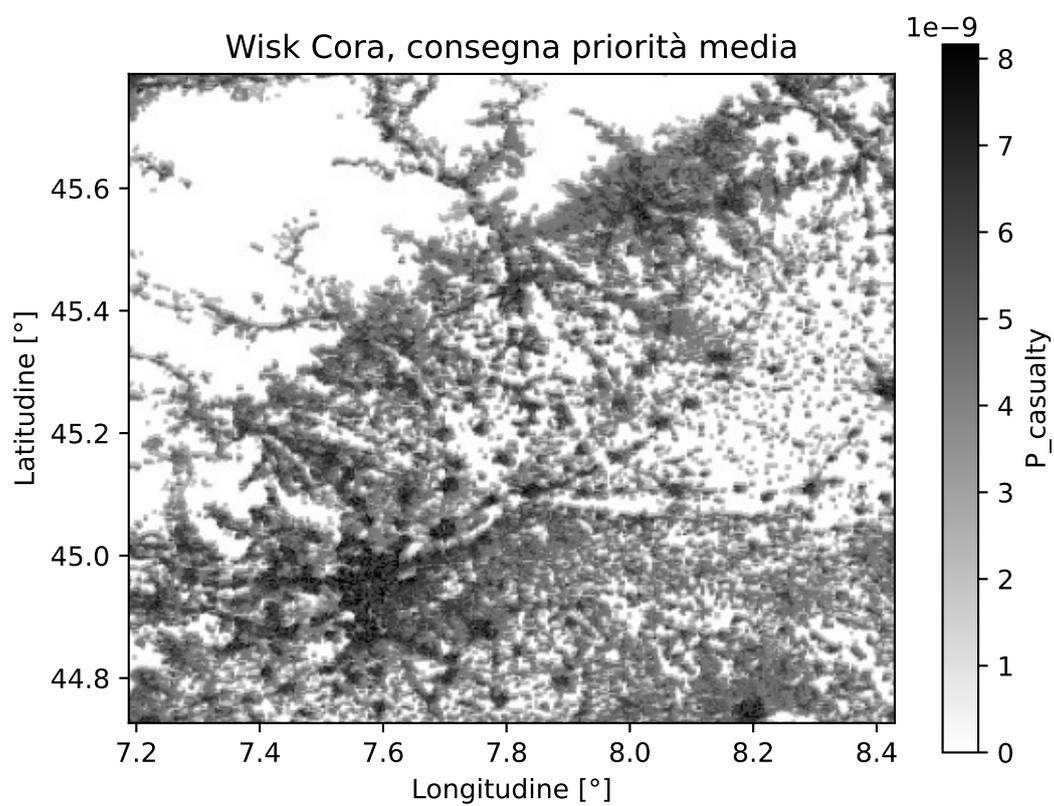


Figura 5.4: Mappa del rischio per VTOL Wisk Cora, consegna "media"

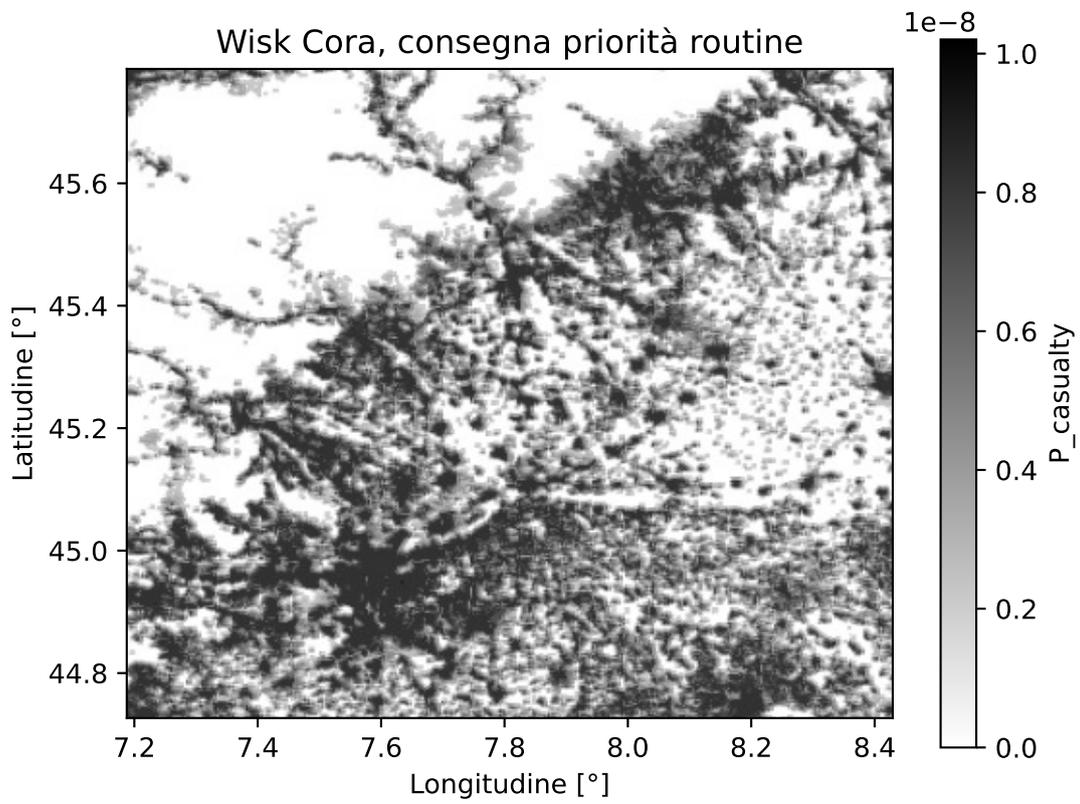


Figura 5.5: Mappa del rischio per VTOL Wisk Cora, consegna "routine"

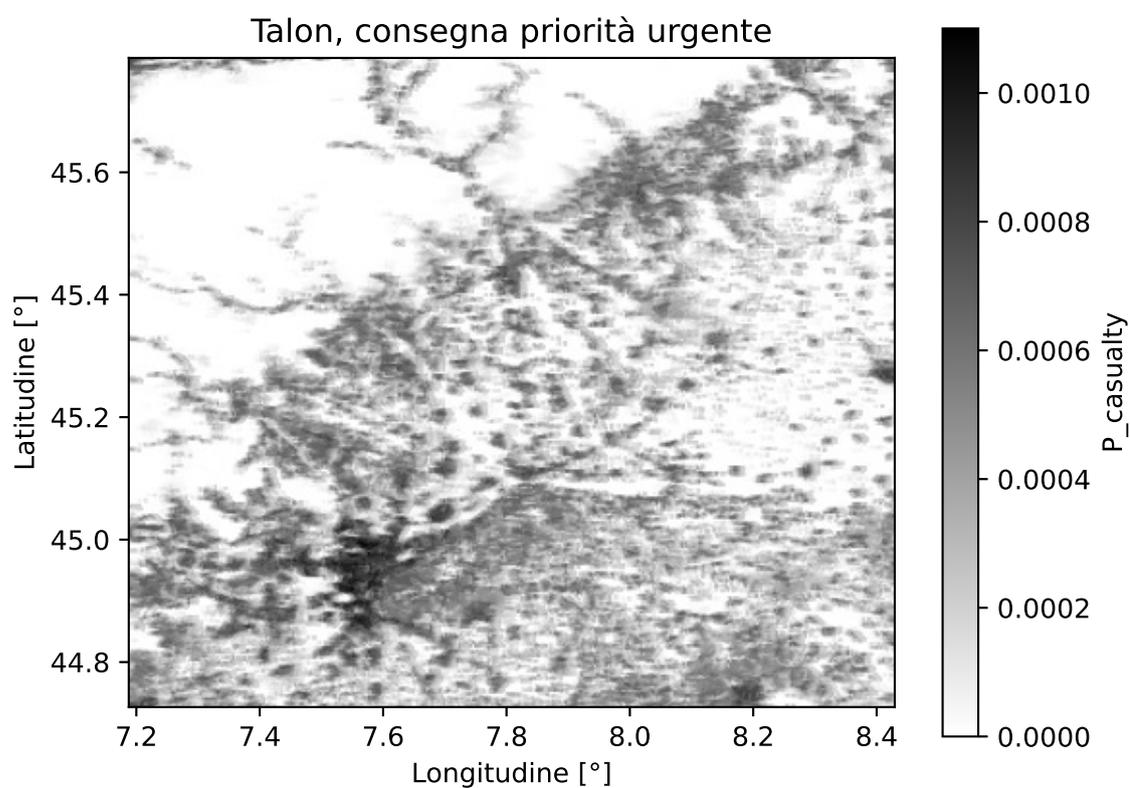


Figura 5.6: Mappa del rischio per drone Talon, consegna "urgente"

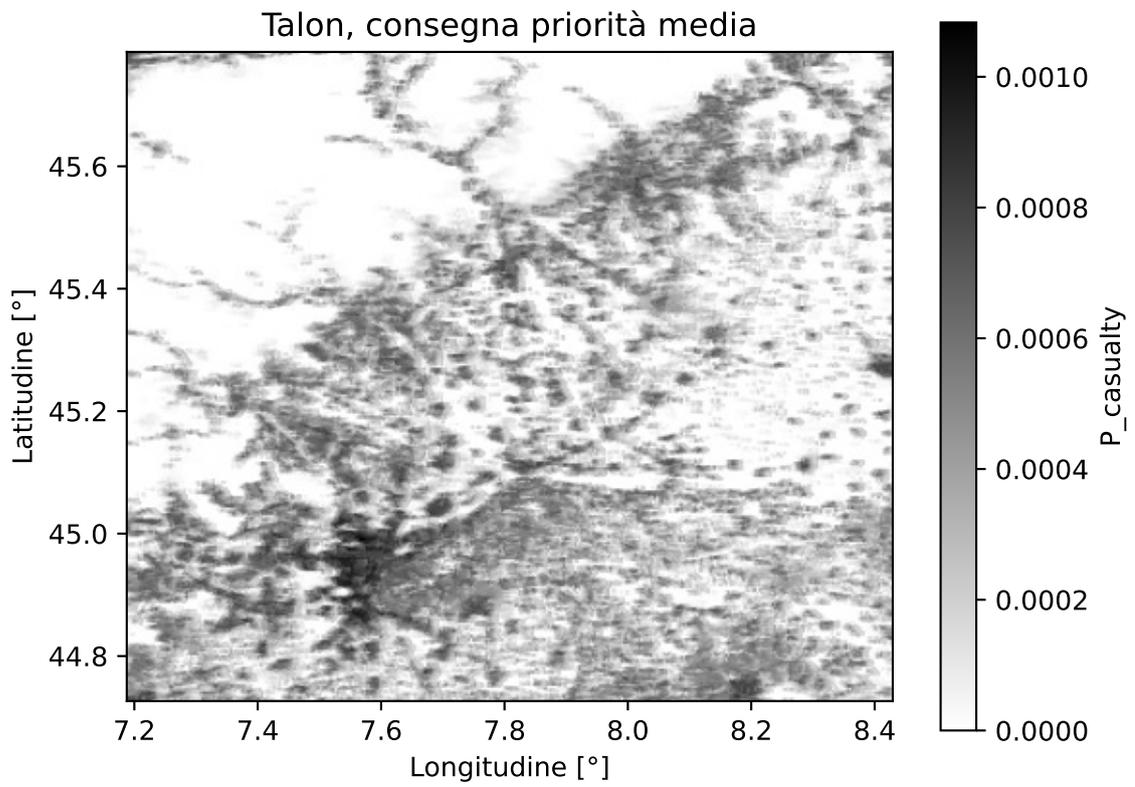


Figura 5.7: Mappa del rischio per drone Talon, consegna "media"

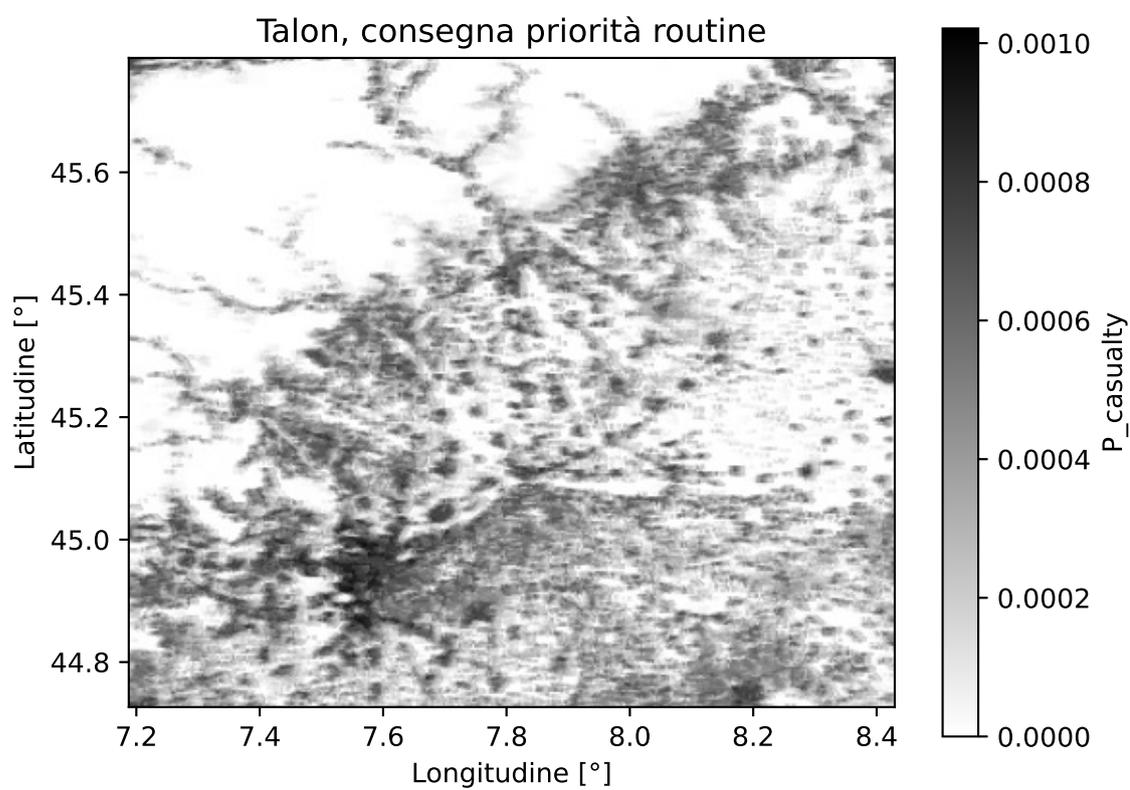


Figura 5.8: Mappa del rischio per drone Talon, consegna "routine"

Parte IV

Risultati e Conclusioni

Capitolo 6

Confronto auto, VTOL e drone

6.1 Costruzione dell'Indice di Merito

Per confrontare i mezzi di trasporto è stato costruito un **indice di merito**, che permette di avere una misura quantitativa della bontà di un mezzo di trasporto per una determinata missione. Il lavoro di riferimento è Cestino e Romeo "Innovative Unmanned Aircrafts: Role and Constraints for GMEs Applications" (ref. [8]), in base alla missione specifica cambia la definizione dei pesi, premiando o meno un mezzo di trasporto con una determinata caratteristica ricercata.

Innanzitutto si definiscono delle **soglie limite** che il mezzo deve soddisfare. In particolare, sono definiti i seguenti criteri:

- condizione sul **payload**, che deve essere inferiore al payload massimo per l'aeromobile o mezzo di trasporto;
- condizione sulla **lunghezza del tragitto**, che deve essere inferiore al range massimo per l'aeromobile o mezzo di trasporto;
- condizione sulla **sicurezza**, per cui il rischio associato al percorso deve essere inferiore a un limite fissato.

Se il mezzo soddisfa le soglie richieste, allora l'indice di merito è ottenuto come:

$$I = \frac{\sum_i W_i \frac{(I_i - I_{min/max})^2}{(I_{max} - I_{min})^2}}{\sum_i W_i} \quad (6.1)$$

dove I_i rappresenta la grandezza da valutare per quel determinato mezzo i , $I_{max/min}$ è il massimo o minimo della grandezza presa in esame tra i mezzi giudicati idonei, W_i è il peso attribuito alla misura in esame (va da 0 a 10). Ad esempio, se è di interesse massimizzare una certa grandezza, la formula diventa:

$$I = \frac{\sum_i W_i \frac{(I_i - I_{min})^2}{(I_{max} - I_{min})^2}}{\sum_i W_i} \quad (6.2)$$

In questo modo per $I_i = I_{max}$ si ottiene valore 1 da moltiplicare al W_i ; vale l'opposto se è di interesse minimizzare una grandezza.

Le tre grandezze prese in esame nella seguente analisi sono:

1. costo del trasporto;
2. sicurezza complessiva del trasporto;
3. tempo di consegna.

Il valore dei pesi W_i cambia a seconda della missione specifica. Come specificato nell'introduzione (sezione 0.2), si definiscono tre profili di missione: **urgente**, **media** e **routine**. La tabella 6.1 mostra i pesi adottati per il primo profilo di missione, relativo ai farmaci emoderivati. Come si evince, il valore più importante è dato al tempo poiché è critico consegnare il farmaco il prima possibile. Il peso minore è dato invece al costo di consegna, mentre la sicurezza assume un valore intermedio. E' doverosa una precisazione: **l'indice di merito è calcolato solamente quando le soglie indicate precedentemente sono rispettate**. Porre un valore inferiore alla sicurezza non implica rischiare il fallimento della missione di consegna perché si privilegia il tempo di consegna, infatti il requisito minimo di safety deve sempre essere rispettato. Si tratta piuttosto di privilegiare una capacità di un mezzo di trasporto rispetto a un altro, in questo caso appunto il tempo di consegna.

Missione: <i>urgente</i>	
W_{costo}	2
$W_{sicurezza}$	5
W_{tempo}	10

Tabella 6.1: Pesi per la missione *urgente*

Nel caso della missione *media* (tabella 6.2) assume più importanza la sicurezza della consegna, sebbene non raggiunga il valore massimo di 10, per il resto vi è un bilanciamento tra sicurezza della consegna e costo.

Missione: <i>media</i>	
W_{costo}	4
$W_{sicurezza}$	8
W_{tempo}	6

Tabella 6.2: Pesì per la missione *media*

Infine per la consegna di *routine* la sicurezza ha il massimo peso, secondariamente il costo della consegna, mentre il tempo ha il valore più basso.

Missione: <i>routine</i>	
W_{costo}	8
$W_{sicurezza}$	10
W_{tempo}	4

Tabella 6.3: Pesì per la missione *routine*

6.1.1 Approfondimento sulla soglia minima di sicurezza

Per quanto riguarda i VTOL nel calcolo della mappa del rischio, il Wisk Cora rientrerebbe nella categoria Basic, per cui dato il numero di passeggeri il rischio minimo accettabile di failure catastrofiche per il velivolo sarebbe di 10^{-8} su ore di volo. Tuttavia, è stato utilizzato $P_{event} = 10^{-7}$ per conservatività. Se infatti si pone $P_{event} = 10^{-8}$, nella produttoria per la $P_{casualty}$ il valore complessivo risulta più basso, aprendo virtualmente più percorsi per il VTOL. Al fine di essere conservativi, si preferisce sovrastimare il rischio complessivo e di porre $P_{event} = 10^{-8}$. La soglia minima da superare per il calcolo della mappa del rischio è $P_{casualty_{globale}} > 10^{-6}$, ottenuta sommando il valore del rischio di ogni cella della mappa.

Il requisito di probabilità di failure catastrofica è invece più stringente per i droni. Data la diversa filosofia costruttiva, la P_{event} è stata posta pari a 10^{-2} seguendo l'analisi di [21]. Come soglia si è scelto sempre $P_{casualty_{globale}} > 10^{-6}$ per poter confrontare opportunamente i due mezzi

Per la consegna in automobile invece non è stata posta una soglia di sicurezza ma il valore di 0.264failure/km determinato nella sezione 3.5 è stato preso in considerazione nella valutazione dell'indice di merito.

6.2 Analisi di una tratta singola

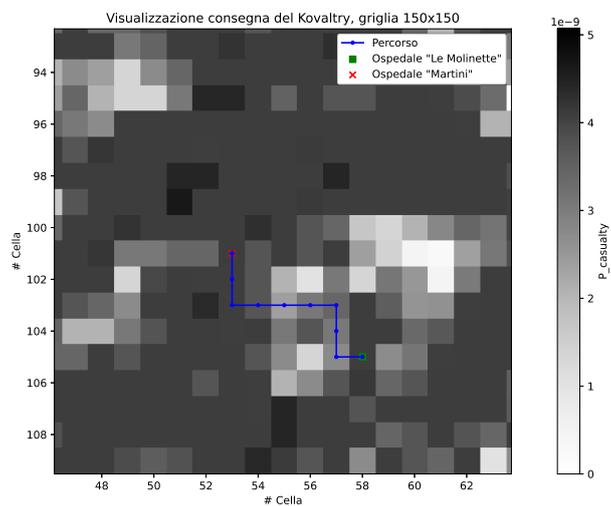
Si analizza adesso una singola tratta per individuare il miglior mezzo di trasporto. Trattasi della consegna del farmaco emoderivato *Kovaltry* (sez. 1.2.1) dall'ospedale "Le Molinette" all'ospedale "Martini".

Il payload sono 6 confezioni di farmaci, del peso ciascuna di 400g. In particolare, il drone Talon non soddisfa il requisito di payload e di sicurezza, per cui l'indice di merito relativo risulta 0. Invece tra VTOL e automobile vince il primo con un indice di merito maggiore (1 contro 0 dell'auto) in virtù dei tempi di consegna minori (100s VTOL contro 811s=14min in auto, considerando una tratta andata e ritorno). L'indice di merito dell'auto è 0 non per le soglie non superate (non sono state poste infatti soglie nel caso dell'automobile) ma perché nell'equazione 6.1 il mezzo di trasporto che ha i valori I_i più bassi porta a 0 il valore della grandezza i . Si ottiene una verifica della correttezza del tempo del trasporto su strada con una semplice simulazione tramite [Google Maps](#), che riporta un tempo medio di 15 minuti per tratta. Nella tabella 6.4 sono riportati i risultati completi dell'analisi. Si osserva inoltre che stando alle casistiche di incidenti stradali la consegna in auto è molto più rischiosa della consegna in VTOL. La figura 6.1 mostra il risultato.

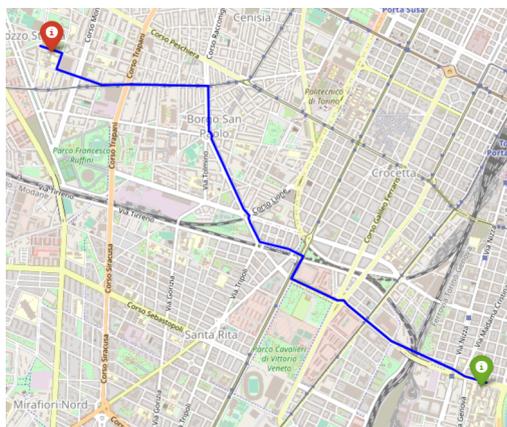
<i>Parametro</i>	Auto	VTOL
Tempo di consegna	811s = 14min	100s = 1.67min
Costo	€5.76	€7.06
$P_{casualty_{totale}}$	$2.98 \cdot 10^{-4}$	$2.516 \cdot 10^{-8}$
Indice di merito	0	1

Tabella 6.4: Risultati dell'indice di merito per la consegna del *Kovaltry* tra l'ospedale "Molinette" e "Martini".

6.2 – Analisi di una tratta singola



(a)



(b)

Figura 6.1: Percorso in VTOL e in auto per la consegna del farmaco *Kovaltry* dall'ospedale "Le Molinette" al "Martini".

6.3 Analisi aggregate

Nella precedente sezione 6.2 è stato introdotto il metodo dell'indice di merito per analizzare un esempio di consegna. Adesso si procede prendere in esame tutte le consegne da e verso l'ospedale "Le Molinette" nell'anno 2022. In particolare, si considerano sia consegne di farmaci emoderivati (dunque, di classe A, con priorità "urgente"), sia altre medicine o materiale ospedaliero (come aghi e garze, tipicamente di classe "C").

L'ipotesi è che ogni confezione abbia un peso di 400g, come per il farmaco "Kovaltry" visto precedentemente. Per ogni consegna di una determinata classe si calcola l'indice di merito, poi si sommano i risultati e li si normalizza per il numero di consegne considerate (71 consegne di tipo "urgente", 144 consegne di tipo "medio", 241 consegne di tipo "routine"). I grafici seguenti nelle figure 6.2, 6.3 e 6.4 mostrano i risultati cumulati. Così come passando dalla consegna urgente alla media alla routine aumenta di importanza il peso del costo, allo stesso modo aumenta il valore dell'indice di merito per l'automobile. Solamente per la consegna di "routine" l'automobile supera il VTOL. Il drone invece non supera mai le soglie previste, per limiti di sicurezza e payload per lo più; si ritrova lo stesso risultato di [21], che stimava la $P_{casualty}$ del Talon dell'ordine di grandezza di 10^{-5} .

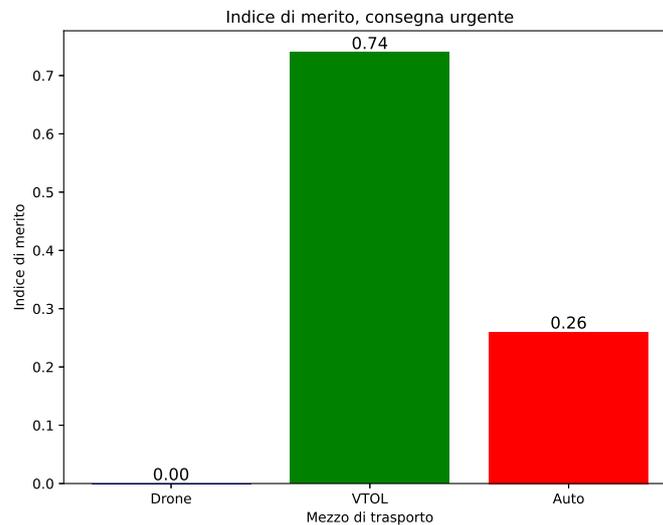


Figura 6.2: Risultato dell'indice di merito cumulato per le consegne del 2022 di priorità "urgente"

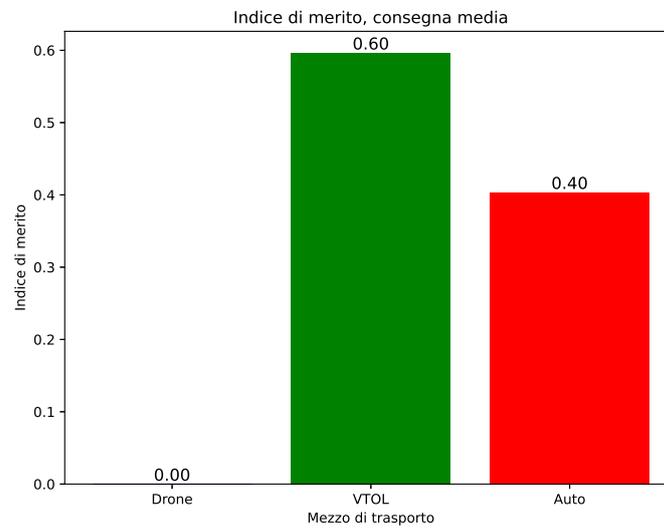


Figura 6.3: Risultato dell'indice di merito cumulato per le consegne del 2022 di priorità "media"

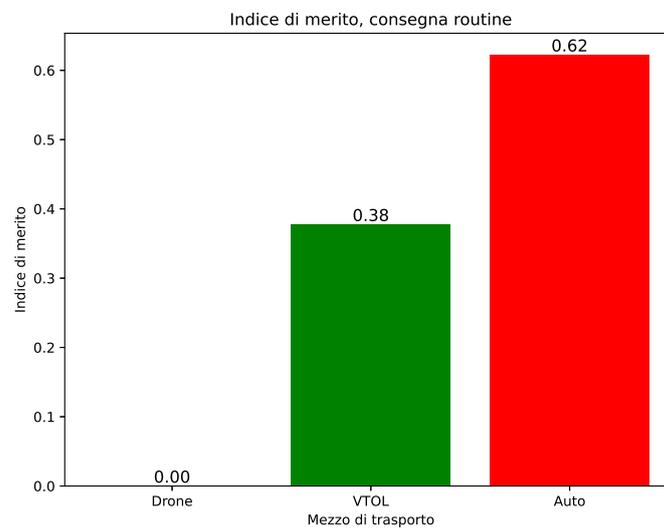


Figura 6.4: Risultato dell'indice di merito cumulato per le consegne del 2022 di priorità "routine"

Capitolo 7

Hub per le consegne di farmaci

La centralizzazione della distribuzione di farmaci emoderivati porterebbe un notevole miglioramento nella loro gestione. Da un lato si eviterebbero sprechi dovuti alle scadenze, dall'altro i farmacisti ospedalieri potrebbero più facilmente trovare le scorte di cui si ha bisogno, senza esser costretti a contattare i singoli magazzini ospedalieri. L'ultima analisi del presente lavoro di tesi si concentra sulla determinazione della posizione ideale per un hub di distribuzione farmaci.

7.1 Posizione ideale di un hub per consegna via gomma

Il punto di partenza dell'analisi è il dataset delle consegne effettuate da e verso l'ospedale "Città della Salute - Molinette" nel 2022. In particolare, è stato implementato il seguente algoritmo:

1. si divide la mappa del Piemonte in 25 celle equispaziate;
2. si sceglie una posizione dell'hub (i,j)
3. si applica il metodo utilizzato in [3.4](#) (Calcolo del percorso ottimo in auto) per connettere l'hub con i centri ospedalieri del dataset;
4. si calcola la somma delle distanze di tutti i percorsi.

La posizione dell'hub risulta all'interno di Torino, precisamente vicino la Tangenziale Sud verso Rivoli. Ciò è in accordo con l'analisi preliminare svolta con la figura 5.2, che vedeva la maggior parte dei bisogni di farmaci concentrati negli ospedali principali di Torino. I risultati dell'indice di merito davano il costo delle consegne del 2022 di €6211; invece per mezzo dell'hub centralizzato risultano notevolmente ridotte, pari a €1104.

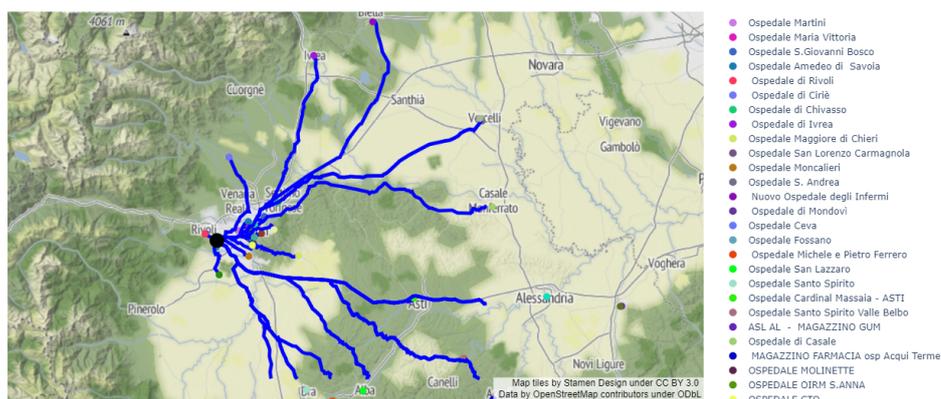


Figura 7.1: Posizione dell'hub in auto, legenda parte 1

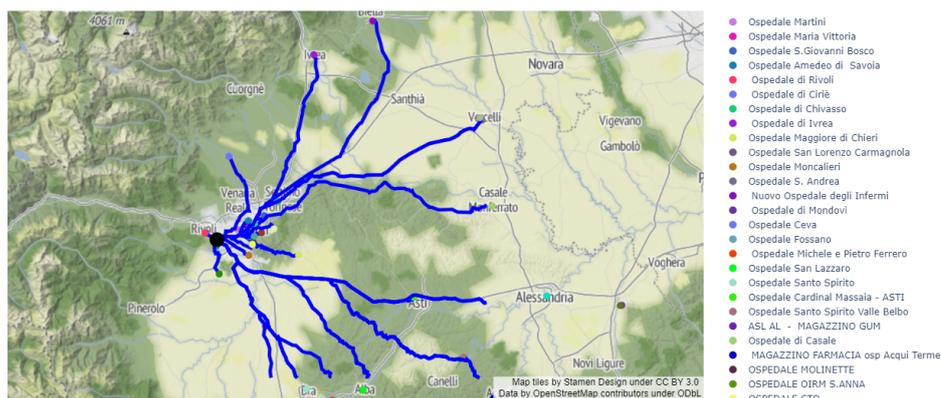


Figura 7.2: Posizione dell'hub in auto, legenda parte 2

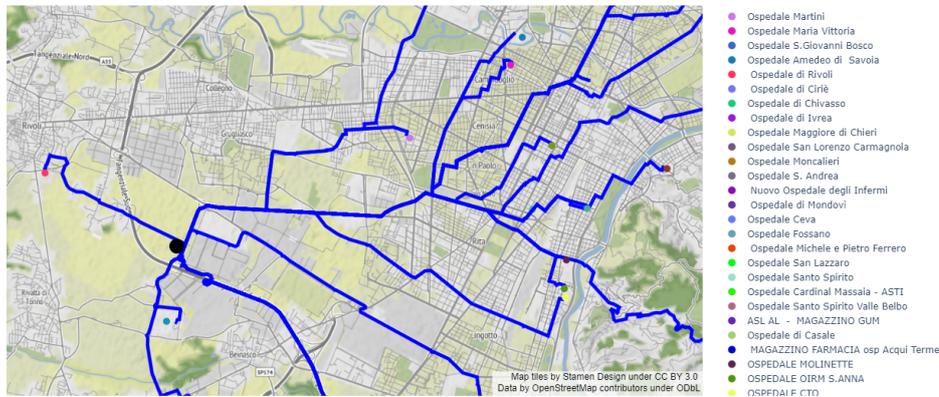


Figura 7.3: Posizione dell'hub in auto, zoom sulla zona tra l'hub e l'ospedale "Le Molinette"

7.2 Posizione ideale di un hub per consegna via VTOL o drone

Nel caso dell'hub aeronautico, la filosofia di implementazione è la medesima. I percorsi sono calcolati con l'algoritmo A^* . E' possibile individuare due tipologie di hub: massima sicurezza del sorvolo e minimo costo. Nel caso dell'auto infatti il legame con la rete stradale fa sì che il percorso di minima distanza sia anche di minimo costo e massima sicurezza (poiché la sicurezza è data dal coefficiente di incidenti letali per la lunghezza del percorso), mentre per gli aeromobili ciò non è detto dato che ogni cella è associata al proprio rischio.

L'hub stato calcolato con le diverse mappe del rischio a seconda della priorità di consegna (urgente, media, routine), unendo poi i risultati. Dall'analisi dei risultati i due hub (minimo costo e minimo rischio) risultano coincidenti e collocati nelle vicinanze dell'ospedale "Le Molinette"; si ritrovano dunque le medesime conclusioni del paragrafo precedente, che vedeva l'hub significativamente vicino agli ospedali con la maggior richiesta di farmaci. A differenza della consegna in auto, non c'è il vincolo delle strade, per cui il sistema risulta più efficiente.

Le figure 8.1, 7.8, ?? e 7.9 mostrano la posizione dell'hub di minimo rischio.

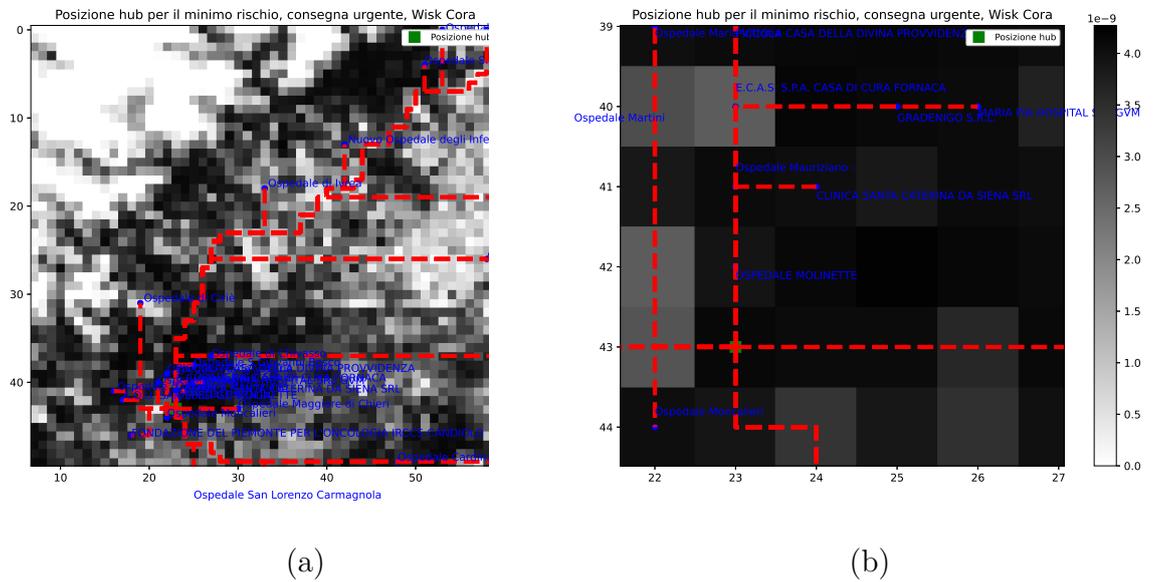


Figura 7.4: Posizione dell’hub per il VTOL, consegna Urgente, e zoom sulla posizione dell’hub.

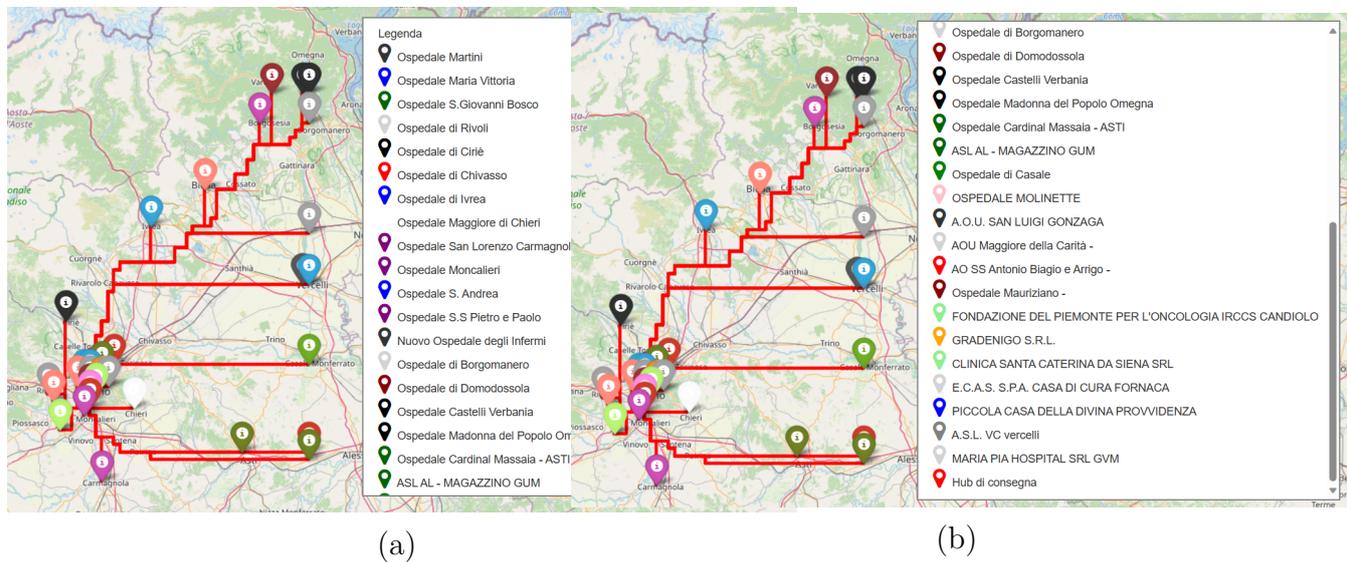


Figura 7.5: Posizione dell’hub per il VTOL, consegna Urgente, visualizzazione su cartina.



Figura 7.6: Posizione dell'hub per il VTOL, consegna Urgente, visualizzazione su cartina, dettaglio su Torino

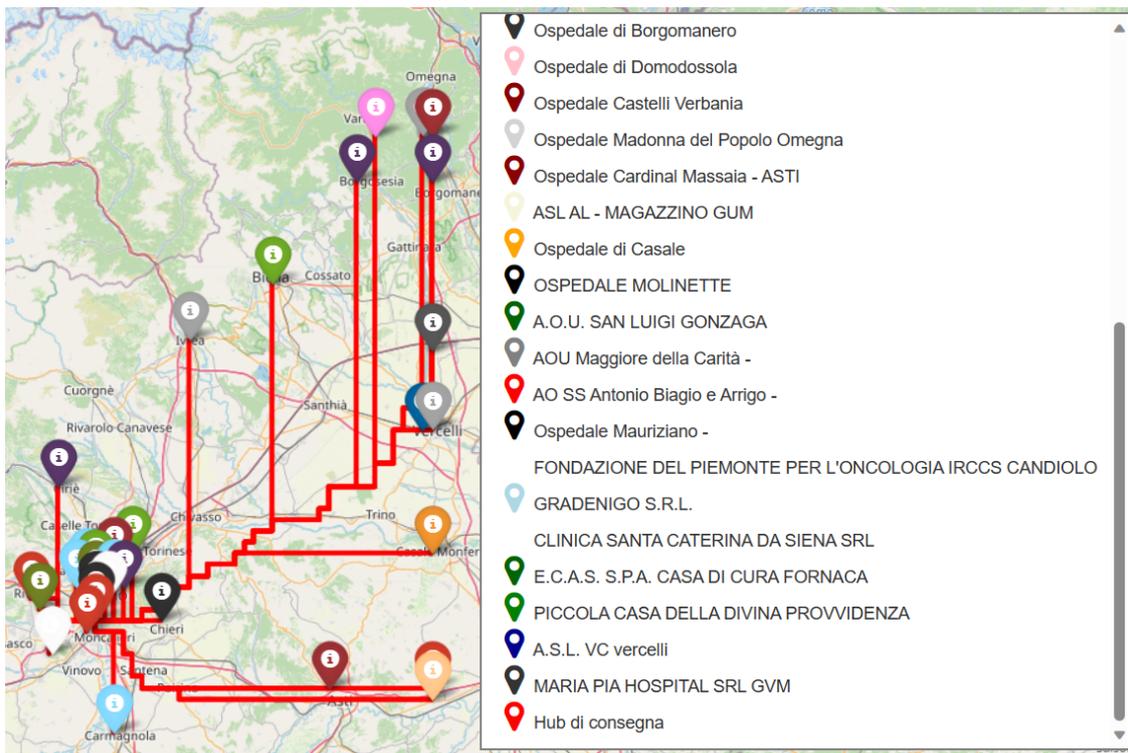


Figura 7.8: Posizione dell'hub in VTOL, consegna Media, visualizzazione su cartina.

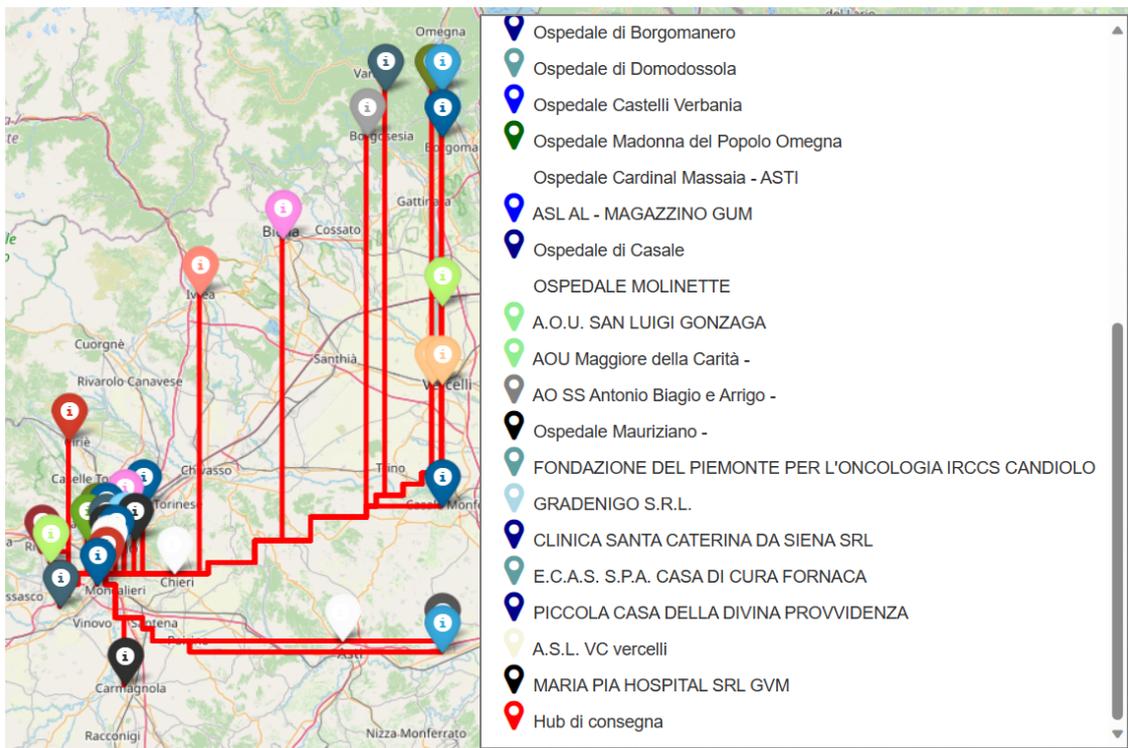


Figura 7.9: Posizione dell'hub in VTOL, consegna routine, visualizzazione su cartina

Capitolo 8

Conclusioni

La definizione delle soglie di sicurezza dell'indice di merito ha permesso di fissare un punto di riferimento rispetto al quale valutare le prestazioni dei mezzi di trasporto. Il presente lavoro dimostra che il VTOL manned è la migliore scelta per le missioni di consegna di farmaci emoderivati, soddisfacendo sia i requisiti di sicurezza del sorvolo, sia di payload massimo, sia di range. Ciò accade benché nell'introduzione siano state fatte scelte conservative sulla probabilità di failure catastrofiche P_{event} . Risulta competitivo anche rispetto al mezzo di trasporto su gomma oggi utilizzato.

La tabella 8.1 introduce quante delle consegne del 2022 sono state portate a termine con successo per tipo di mezzo di trasporto. Il drone è sufficiente per trasportare i payload richiesti (solo nel 4% delle missioni per prodotti di classe A, 2% di classe B e 6% di classe C), ha range limitati e non rispetta i livelli minimi di sicurezza in nessun caso. Su quest'ultimo punto, si ritrovano di fatto i divieti di sorvolo da parte di droni di aree densamente popolate della legge italiana, nonché i risultati da letteratura (ref. [21]).

Il VTOL invece performa molto bene per le consegne in urgenza e di priorità media, mentre per le consegne di routine talvolta non riesce a soddisfare il requisito del payload. Comunque copre completamente gli ospedali considerati, mostrando il 100% delle missioni portate a termine dal punto di vista del range. Il valore dell'indice di merito è superiore nei primi due casi agli altri mezzi di trasporto, mentre sulle consegne routinarie vince l'automobile (tabella 8.2).

A - Urgente			
	<i>Sicurezza</i>	<i>Payload</i>	<i>Range</i>
VTOL	83%	100%	100%
Drone	0%	4%	78%
B - Media			
	<i>Sicurezza</i>	<i>Payload</i>	<i>Range</i>
VTOL	77%	98%	100%
Drone	0%	2%	67%
C - Routine			
	<i>Sicurezza</i>	<i>Payload</i>	<i>Range</i>
VTOL	76%	76%	100%
Drone	0%	6%	67%

Tabella 8.1: Percentuale di missioni portate a termine da VTOL e drone

A - Urgente			
	<i>VTOL</i>	<i>Drone</i>	<i>Auto</i>
Indice di merito	0.74	0	0.26
B - Media			
	<i>VTOL</i>	<i>Drone</i>	<i>Auto</i>
Indice di merito	0.59	0	0.40
C - Routine			
	<i>VTOL</i>	<i>Drone</i>	<i>Auto</i>
Indice di merito	0.38	0	0.62

Tabella 8.2: Valori finali dell'Indice di Merito

Per quanto riguarda le posizioni dell'hub, la posizione ideale è vicino i centri ospedalieri che hanno più bisogno di farmaci emoderivati. Questi sono gli ospedali centrali di Torino poiché accolgono il maggior numero di pazienti. La rete stradale fa sì che l'hub migliore per le consegne in auto sia vicino la tangenziale, mentre per i VTOL la posizione ottima è proprio in prossimità dell'ospedale "Le Molinette".

Bisogna sottolineare che il presente studio è limitato a un singolo modello di VTOL e di drone. Il lavoro può essere ulteriormente ampliato tenendo in considerazioni diversi tipi di VTOL e di droni. Ad esempio, VTOL con una diversa motorizzazione o autonomi potrebbero dare risultati diversi da quelli

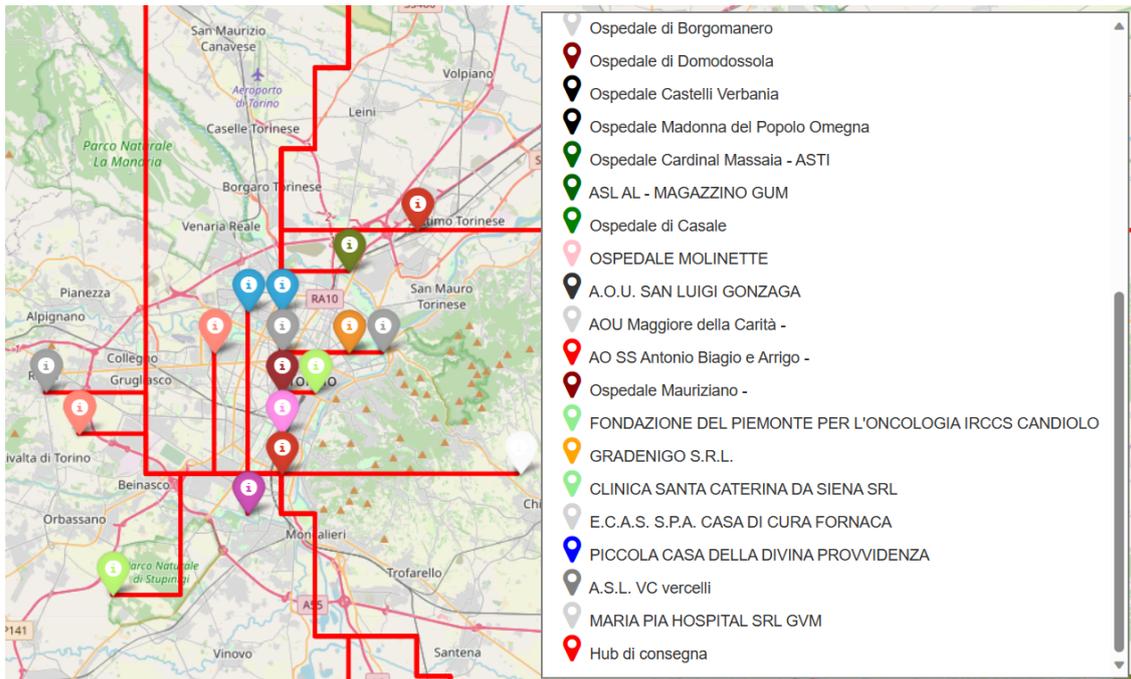


Figura 8.1: Posizione dell'hub per il VTOL, consegna Urgente, visualizzazione su cartina, dettaglio su Torino

esposti. Il metodo descritto della mappa del rischio risulta ancora valido. E' possibile anche ricercare l'hub con un metodo di ottimizzazione più efficiente, per esempio un algoritmo genetico o un'ottimizzazione surrogata, esplorando anche altre zone della mappa. Inoltre, è possibile combinare i risultati di VTOL, drone e automobile per individuare la migliore posizione dell'hub.

Bibliografia

- [1] Federal Aviation Administration. *EXPECTED CASUALTY CALCULATIONS FOR COMMERCIAL SPACE LAUNCH AND REENTRY MISSIONS*. Vol. 431.35-1. 2020. URL: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/licenses_permits/media/Ac4311fn.pdf.
- [2] European Medicines Agency. *Kovaltry*. Accesso 30 Settembre 2023. URL: <https://www.ema.europa.eu/en/medicines/human/EPAR/kovaltry>.
- [3] E. Bacchini A.; Cestino. “Electric VTOL Configurations Comparison”. In: *Aerospace* (2020). DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace6030026>.
- [4] Aircraft Cost Calculator. *ROBINSON R44 Raven II*. Accesso 9 Ottobre 2023. URL: <https://shorturl.at/hCV59>.
- [5] Wisk Cora. *Introducing Generation 6*. Accesso 7 Ottobre 2023. URL: <https://wisk.aero/aircraft/>.
- [6] Anders la Cour Harbo. “Ground impact probability distribution for small unmanned aircraft in ballistic descent”. In: (2020). DOI: [10.1109/ICUAS48674.2020.9213990](https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9213990).
- [7] et al. Duffy Michael James. “A Study in Reducing the Cost of Vertical Flight with Electric Propulsion”. In: *Aerospace* (Giugno 2017). DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2017-3442>.
- [8] G. Romeo E. Cestino. “INNOVATIVE UNMANNED AIRCRAFTS: ROLE AND CONSTRAINTS FOR GMES APPLICATIONS”. In: (ott. 2011).
- [9] S. B. Adamo et al. E. Doxsey-Whitfield K. MacManus. “Taking Advantage of the Improved Availability of Census Data: A First Look at the Gridded Population of the World, Version 4”. In: *Papers in Applied Geography* 1 (2015), pp. 226–234. URL: <https://doi.org/10.1080/23754931.2015.1014272>.

-
- [10] EASA. *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes (CS-25)*. Vol. Amendment 27. Nov. 2021.
- [11] EASA. *Certification Specifications, Acceptable Means of Compliance and Guidance Material for Small Rotorcraft (CS-27)*. Vol. Amendment 10. Gennaio 2023.
- [12] EASA. *Decollo e atterraggio verticale (VTOL)*. Accesso 5 Ottobre 2023. URL: <https://www.easa.europa.eu/it/light/topics/vertical-take-and-landing-vtol>.
- [13] EASA. *SPECIAL CONDITION Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Aircraft*. Vol. SC-VTOL-01. 2019. URL: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/SC-VTOL-01.pdf>.
- [14] EDQM. *Guide to the preparation, use and quality assurance of Blood Components*. 21st edition. 2023.
- [15] Agenzia Italiana del Farmaco. *Farmaci emoderivati*. Accesso 18 Settembre 2023. 2023. URL: <https://www.aifa.gov.it/emoderivati>.
- [16] A. Grande. *L'INCIDENTALITA' STRADALE SULLA RETE VIARIA PRINCIPALE*. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2017. URL: <https://www.certifico.com/component/attachments/download/7422>.
- [17] Les A. Piegl K. Dalamagkidis K. P. Valavanis. *On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System*. 2nd. Springer, 2012. DOI: [10.1007/978-94-007-2479-2](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2479-2).
- [18] Facebook Connectivity Lab e Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University. 2016. *High Resolution Settlement Layer (HRS�)*. Source imagery for HRS� © 2016 DigitalGlobe. Accesso 10 December 2022. URL: <https://data.humdata.org/dataset/italy-high-resolution-population-density-maps-demographic-estimates>.
- [19] LOSA, *un progetto per creare un hub del farmaco in Canavese*. Accesso 18 Settembre 2023. 9-10 Novembre 2017. URL: <http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/comunicati/attivita-produttive/losa-un-progetto-per-creare-un-hub-del-farmaco-in-canavese>.
- [20] Range Commanders Council Range Safety Group. *Common Risk Criteria standards for national test ranges: Supplement, Supplement to documento 321-027*. Vol. 88002-5110. Army White Sands Missile Range, 2007.

- [21] Anders la Cour-Harbo S. Primatesta A. Rizzo. “Ground Risk Map for Unmanned Aircraft in Urban Environments”. In: *Journal of Intelligent & Robotic Systems* (2019). URL: <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01015-z>.
- [22] Raffaella Sardelli. “Qualità e sicurezza della catena di produzione dei plasmaderivati”. In: (2017).

Parte V

Appendice

8.1 Manipolazione del dataset della popolazione

1. Dal file generale si estrae una mappa ridotta entro confini prefissati, individuati dalle coppie di meridiani e paralleli (Nord, Sud, Est, Ovest).
2. In seguito si decide a priori la risoluzione $N_1 \times N_2$ della griglia che si vorrà utilizzare (con N_1 che indica le celle in direzione Ovest-Est, ovvero sull'asse X, ed N_2 rispettivamente per Sud-Nord, asse Y). Infatti la risoluzione iniziale del dataset di 30 metri porterebbe a un allungamento dei tempi di calcolo, per cui un primo algoritmo riduce la risoluzione sino a quella desiderata.
3. Si costruisce una versione ridotta del dataset iniziale, limitata all'area del Piemonte; ciò viene fatto in modo tale che la lettura e l'esecuzione siano più veloci rispetto all'analisi del dataset intero con i dati dell'Italia. La variabile creata ha la seguente struttura:

latitudine1	longitudine1	densità della popolazione1
latitudine2	longitudine2	densità della popolazione2
...		

4. Si inizializzano due matrici di zeri, *population_map* (di dimensioni $N_1 \times N_2$) e *ricorrenze* (con dimensioni $N_1 \times N_2$); nella prima si salverà la somma delle densità della popolazione, la seconda invece è una matrice di contatori
5. Per ogni riga del dataset della popolazione:
 - (a) si vedono le coordinate nelle prime due colonne e si cerca la cella corrispondente di *population_map*, indicata ad esempio con indici i e j
 - (b) si somma il valore di densità di popolazione al valore di *population_map*[i,j] e si aggiorna la matrice dei contatori ricorrenze
6. Alla fine dell'esecuzione, si divide ogni elemento di *population_map* per il corrispettivo di ricorrenze, ottenendo dunque la matrice di densità della popolazione cercata con la risoluzione $N_1 \times N_2$ voluta.

8.2 Tabella dei bisogni di farmaci in emergenza

Ospedale	Coordinate	Richiesta
Ospedale Martini	(45.0671, 7.6284)	40
Ospedale Maria Vittoria	(45.0823, 7.6579)	4
Ospedale S.Giovanni Bosco	(45.0997, 7.7128)	9
Ospedale Amedeo di Savoia	(45.0880, 7.6613)	9
Ospedale di Rivoli	(45.0598, 7.5217)	10
Ospedale di Pinerolo	(44.8825, 7.3202)	14
Ospedale di Ciriè	(45.2355, 7.5988)	1
Ospedale di Ivrea	(45.4673, 7.8722)	18
Ospedale Maggiore di Chieri	(45.0099, 7.8230)	24
Ospedale Moncalieri	(45.0088, 7.6627)	4
Ospedale S. Andrea	(45.3179, 8.4146)	1
Ospedale S.S Pietro e Paolo	(45.7129, 8.2616)	1
Nuovo Ospedale degli Infermi	(45.5441, 8.0625)	15
Ospedale di Borgomanero	(45.7048, 8.4587)	6
Ospedale di Domodossola	(46.1167, 8.2869)	1
Ospedale di Mondovì	(44.3900, 7.8026)	13
Ospedale di Savigliano	(44.6425, 7.6607)	1
Ospedale Ceva	(44.3778, 8.0386)	2
Ospedale Michele e Pietro Ferrero	(44.6756, 7.9321)	3
Ospedale San Lazzaro	(44.6997, 8.0308)	0
Ospedale Santo Spirito	(44.7014, 7.8479)	1
Ospedale Cardinal Massaia - ASTI	(44.9126, 8.1946)	17
Ospedale Santo Spirito Valle Belbo	(44.7741, 8.3565)	6
Ospedale di Alessandria	(44.8942, 8.8648)	6
Ospedale di Casale	(45.1218, 8.4478)	12
Ospedale Molinette	(45.0418, 7.6742)	175
OSPEDALE C.T.O.	(45.0339, 7.6740)	0
A.O.U. San Luigi Gonzaga	(45.0290, 7.5572)	27
A.O.U. Maggiore della Carità di Novara	(45.4441, 8.6225)	13
A.O. S. Croce e Carle	(44.3904, 7.5211)	26
A.O. S.S. Antonio Biagio e Arrigo -	(44.9161, 8.6232)	1
Ospedale Mauriziano -	(45.0522, 7.6642)	83
"I.R.C.C.S Candiolo"	(44.9661, 7.5674)	24
I.R.C.S.S. Istituto Giannina Gaslini	(44.3926, 8.9884)	3
Gradenigo S.R.L.	(45.0701, 7.7057)	5
AZIENDA U.S.L. VALLE D' AOSTA	(45.7407, 7.3206)	21
E.C.A.S. S.P.A. Casa di Cura "Fornaca"	(45.0655, 7.6699)	8
Piccola Casa della Divina Provvidenza	(45.0802, 7.6808)	1
A.S.L. Vercelli	(45.3239, 8.4077)	2
Azienda Sanitaria Locale Tortona ¹¹³	(44.8936, 8.8602)	5
Maria Pia Hospital s.r.l.	(45.0698, 7.7438)	10

Tabella 8.3: Tabella dei bisogni di farmaci in emergenza degli ospedali