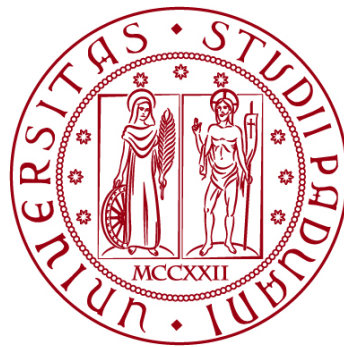


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E
AMBIENTALE

Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

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



TESI DI LAUREA

COSTELLAZIONI DI SATELLITI E
SPACECRAFT PER IL TURISMO SPAZIALE:
IMPATTI DEI GAS CLIMALTERANTI E
SCENARI EMISSIVI

Relatore: Prof. Salvatore Pappalardo

Laureando: Enrico Bosco

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

Abstract

Il cambiamento climatico indotto dalle attività antropiche è attualmente soggetto a grande attenzione da parte della comunità scientifica, nell'ottica di studiare i fenomeni che lo influenzano e di ridurre gli impatti sull'uomo e sull'ambiente.

Attraverso l'indagine dell'evoluzione del settore spaziale a partire dalla metà del XX secolo e la previsione della futura crescita causata principalmente dallo sviluppo del turismo spaziale e dal dispiegamento di costellazioni di satelliti nella *Low Earth Orbit*, sono state analizzate le emissioni causate dal lancio di missili verso lo spazio, con l'obiettivo di quantificare il contributo di questo settore alla variazione del clima terrestre.

Tra tutte le attività di origine antropica, solamente le emissioni dei missili e il rientro di oggetto dallo spazio rilasciano gas di combustione e particolato direttamente negli strati superiori dell'atmosfera, dove risiedono, accumulandosi, per anni, influenzando sul delicato equilibrio che controlla l'ozono stratosferico e sul bilancio di energia dell'atmosfera attraverso forzanti radiative. Per queste ragioni, i gas esausti devono essere sottoposti a particolare attenzione, per evitare pesanti ed indesiderate ripercussioni nel futuro.

Partendo dall'analisi dei diversi tipi di propellente usato, sono stati descritti i principali inquinanti emessi e gli effetti che ne comportano, tra i quali si possono individuare la formazione di nuvole mesosferiche e di ozono troposferico, la precipitazione di piogge acide, l'assottigliamento dello strato di ozono stratosferico e la generazione di forzanti radiative. Un ruolo di rilievo è giocato dal particolato (*black carbon* e ossido di alluminio) emesso da missili che bruciano idrocarburi o propellenti solidi o che sfruttano la tecnologia ibrida. In particolare, il sempre maggior utilizzo di missili ibridi per il turismo spaziale genererà impatti sempre più gravi; conseguenze simili saranno inoltre dovute all'incremento del numero di lanci necessari per posizionare in orbita i satelliti delle costellazioni.

Indice

1 Introduzione	1
1.1 Dal lancio dei primi satelliti al turismo spaziale.....	1
1.2 Inquinanti atmosferici e gas climalteranti.....	5
1.3 Obiettivi.....	8
1.4 Inquadramento.....	8
2 Materiali e Metodi	10
2.1 Materiali	10
2.2 Metodologia.....	10
3 Risultati e discussione	12
3.1 Emissioni in atmosfera.....	12
3.2 Piogge acide.....	16
3.3 Ozono troposferico	17
3.4 Formazione di nuvole mesosferiche	18
3.5 Riduzione dell'ozono stratosferico	18
3.6 Forzanti radiative.....	22
3.7 Turismo spaziale	24
3.8 Costellazioni di satelliti.....	28
3.9 Detriti spaziali	32
4 Conclusioni	39
Bibliografia.....	41
Sitografia	42

1 Introduzione

1.1 Dal lancio dei primi satelliti al turismo spaziale

Durante la Guerra Fredda che coinvolse Stati Uniti e Unione Sovietica dalla fine della Seconda Guerra Mondiale fino al 1990, queste due potenze cercarono continuamente di prevalere l'una sull'altra in ogni settore: militare, economico e tecnologico. In quest'ottica, furono realizzati enormi investimenti anche nel settore spaziale, che portarono ad un rapido sviluppo tecnologico: così, in quegli anni, ebbe inizio la corsa all'esplorazione spaziale. Il primo traguardo fu raggiunto dall'Unione Sovietica nel 1957, con il lancio del primo satellite senza equipaggio, seguito nel 1961 dal primo uomo nello spazio. Furono invece gli Stati Uniti con il Programma Apollo della NASA a far atterrare sulla Luna la prima navetta con astronauti a bordo: si ritiene che questo evento abbia determinato la vittoria degli statunitensi nella corsa allo spazio. Nella decade del 1970, i rapporti tra USA e URSS diventarono meno tesi e questa nuova situazione politica permise la prima missione spaziale congiunta tra le due potenze, che cooperarono per il lancio che mandò nello spazio il primo equipaggio composto da astronauti di nazionalità diverse (Mann and McKelvie, 2022).

Generalmente la corsa allo spazio, definita anche *Space Age*, viene distinta in due periodi: la *First Space Age*, iniziata nel 1957 e conclusa nel 1991 in seguito alla caduta del muro di Berlino e alla conseguente disgregazione dell'Unione Sovietica, e la *Second Space Age*, che, dall'inizio degli anni '90, arriva fino ai giorni odierni. Gli elementi caratterizzanti della *First Space Age* sono la presenza di due sole potenze predominanti e la finalità del lancio dei satelliti. Infatti, Stati Uniti e Unione Sovietica, grazie ai loro investimenti economici nel settore spaziale, riuscirono a raggiungere rapidamente un grande sviluppo tecnologico nel campo del lancio di missili e dei viaggi nello spazio e per questo motivo non ebbero rivali durante la *First Space Age*. Tra il 1957 e il 1990, il 93% dei satelliti posizionati intorno alla Terra

erano statunitensi o sovietici, mentre il contributo di tutti gli altri Paesi raggiungeva appena il 7%. Si stima inoltre che il 70% di tutti i satelliti lanciati in questo periodo fossero a scopo militare, a dimostrazione di come l'obiettivo principale di USA e URSS in questo periodo fosse quello di assumere un ruolo chiave nello scacchiere geopolitico, attraverso la possibilità di monitorare dallo spazio i movimenti degli eserciti nemici e di avere sistemi di allarme in caso di attacco nucleare. Durante la *Second Space Age*, si assiste ad un cambiamento radicale, con il passaggio da investimenti principalmente governativi a quelli di privati, con evidente scopo commerciale. Infatti, se prima del 1990 solo il 4% dei satelliti era ad uso commerciale, nella Seconda Era Spaziale proliferano le compagnie private che mettono in orbita satelliti con tale funzione, che, nel periodo compreso tra il 1991 e il 2016, arrivano ad essere il 36% del totale (Harrison et al., 2017). Inoltre, negli ultimi anni, in particolare a partire dal 2019, la compagnia privata SpaceX ha iniziato a lanciare nello spazio un numero molto elevato di satelliti, arrivando a coprire, nel 2021, il 75% dei *payloads* (ossia, di tutti gli oggetti posizionati nello spazio tramite lancio di missili, principalmente satelliti, con l'obiettivo di raggiungere un determinato scopo) mandati in orbita da tutti i Paesi del mondo (Civil and Commercial Space - Space Security, 2022). Nel 2021, inoltre, due compagnie – Blue Origin e Virgin Galactic – hanno iniziato ad offrire il servizio di turismo spaziale per viaggi suborbitali; in caso di forte proliferazione del turismo spaziale, si avrebbe un notevole aumento degli impatti ambientali negativi legati al settore spaziale (Sirieys et al., 2022). Allo stesso tempo, inoltre, non sono più solo Stati Uniti e Russia ad effettuare i lanci e, al contrario, dal 2014 la maggior parte di essi è effettuata da altri Paesi, tra i quali spiccano Cina, Stati membri dell'Unione Europea, Giappone e India (Harrison et al., 2017). La Fig. 1 mostra la variazione del numero di lanci nel periodo 1957-2022, divisi per Paese. La Fig. 2 mostra come sia aumentato il numero di satelliti lanciati annualmente nella *Low Earth Orbit* (LEO) e ne esplicita la divisione sulla base dell'obiettivo (ESA, 2022).

Un'altra particolarità della *Second Space Age* è il coinvolgimento di molti privati, che

hanno finanziato ricerche per lo sviluppo di nuove tecnologie con lo scopo di diminuire il costo dei lanci. Negli ultimi vent'anni, il tasso di decrescita media del costo per il lancio di satelliti nella LEO è stato all'incirca del 5% all'anno. Dal momento che nel 2020 il costo medio per kg di *payload* lanciato è stato di \$10.313 per i satelliti non commerciali e di \$4.092 per quelli commerciali, se tale tendenza dovesse mantenersi costante, si raggiungerebbe il costo di \$1.000 per kg entro il 2055 e di \$100 per kg entro la fine del secolo, con il conseguente aumento del numero di lanci (Adilov et al., 2022).

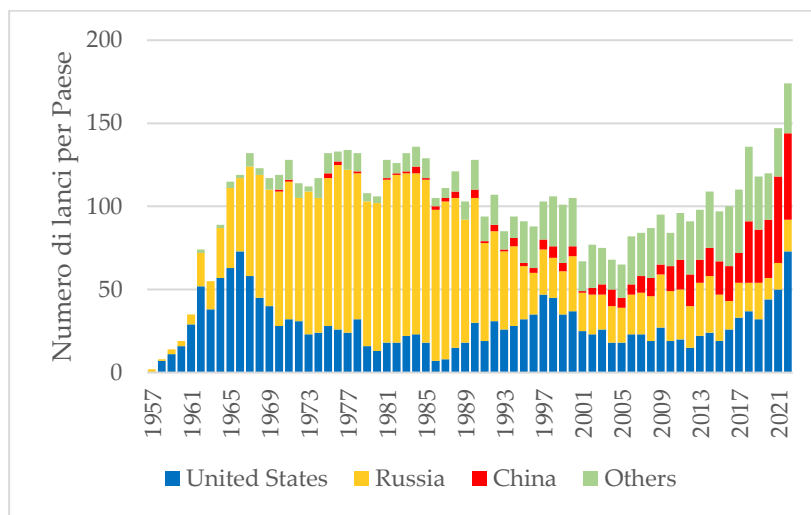


Figura 1: Numero di lanci di missili, distinti in base al Paese (I dati sono stati reperiti nella pagina web Space-Track.Org e riportati sotto forma di istogramma).

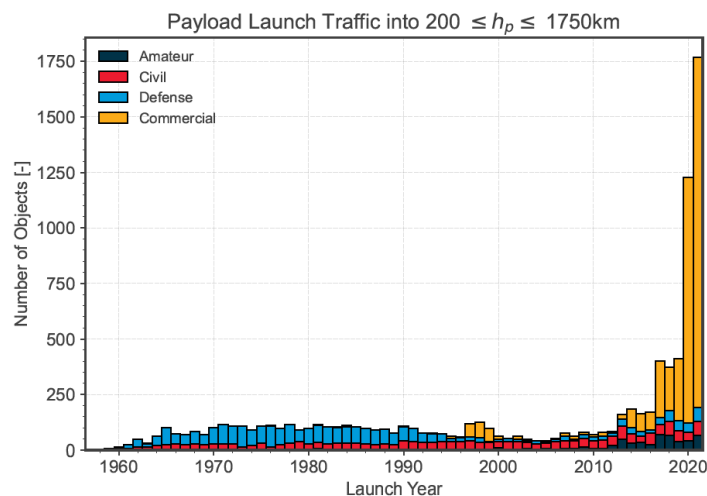


Figura 2: Numero di *payloads* lanciati in orbita *Low Earth Orbit* annualmente e divisi in base alla loro funzione: amatoriali, civili, militari o commerciali (ESA, 2022).

Inoltre, per mantenere i costi e ottenere prestazioni migliori, i missili utilizzano diversi tipi di propellente (combustibile e ossidante) in base al carico che devono trasportare e all'orbita che si intende raggiungere (la LEO – *Low Earth Orbit* – arriva a distare 2.000 km dalla superficie della Terra, mentre la GEO – *Geostationary Orbit* – è compresa tra i 35.586 e i 35.986 km). La sostenibilità ambientale non è la priorità al momento della scelta del propellente: come espresso nel lavoro di Sirieys et al. (2022) “Mission performance, cost, and reliability have historically been the key drivers of rocket design. Sustainability is, at best, a secondary consideration in the launch vehicle market today”. I propellenti più utilizzati sono i bipropellenti liquidi e i propellenti solidi: i primi sono composti da combustibile ed ossidante, entrambi allo stato liquido, e sono solitamente sfruttati per i diversi stadi del missile lanciato, l'ultimo dei quali contiene il *payload*; i propellenti solidi sono invece una miscela solida (tipicamente alluminio e perclorato di ammonio) che viene bruciata nei *Solid Rocket Motors* (SRMs) ed è di solito usata nei booster, che forniscono una spinta aggiuntiva a quella ottenuta dagli stadi del missile (Sirieys et al., 2022). La Fig. 3 mostra la divisione del numero annuo totale di lanci orbitali effettuati con successo dal 1957 al 2021 per propellente utilizzato (Sirieys et al., 2022).

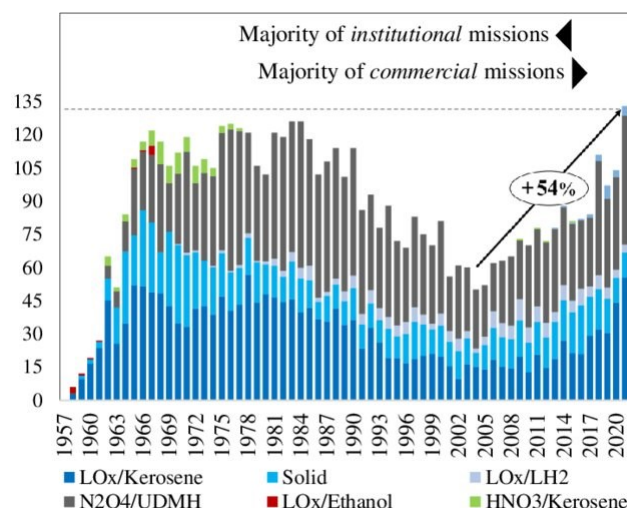


Figura 3: Numero annuale di lanci orbitali avvenuti con successo nel periodo 1957-2021, diviso per tipo di propellente usato (sono contati in modo cumulativo sia il primo stadio che eventuali booster). Si mette in evidenza che le missioni commerciali hanno portato ad una crescita del 54% nell'ultimo ventennio (Sirieys et al., 2022).

1.2 Inquinanti atmosferici e gas climalteranti

Il consumo di combustibile per il settore spaziale, secondo una stima realizzata nel 2014 considerando i circa 100 lanci avvenuti durante il precedente anno, si è attestato intorno alle 40 chilotonnellate, ossia circa lo 0,01% di quello dell'intero settore mondiale dell'aviazione (Ross & Sheaffer, 2014). Però, nonostante la limitata quantità di propellente usato, il lancio di missili ha un forte impatto climatico: dal momento che essi possono emettere fino a 10.000 volte più *black carbon* (BC) dei moderni motori a turbina (Ross & Sheaffer, 2014); nel 2018, la quantità di particelle di BC emesse nella stratosfera durante i lanci è arrivata ad essere paragonabile a quella emessa dall'aviazione globale (Ross & Toohey, 2019). Inoltre, al contrario degli aerei che viaggiano ed emettono i loro gas di scarico solo nella troposfera, i missili sono l'unica fonte di inquinamento antropico negli strati superiori dell'atmosfera (principalmente nella stratosfera e nella mesosfera), dove liberano i gas esausti e il particolato prodotti durante la combustione del propellente. La Fig. 4 mostra la percentuale di carburante, nel caso degli aeroplani, e di propellente, per i missili, bruciato, in funzione dell'altitudine; per la maggior parte dei lanci, solo un terzo del propellente totale del primo e del secondo stadio dei missili è bruciato al di sotto della tropopausa (Ross & Sheaffer, 2014).

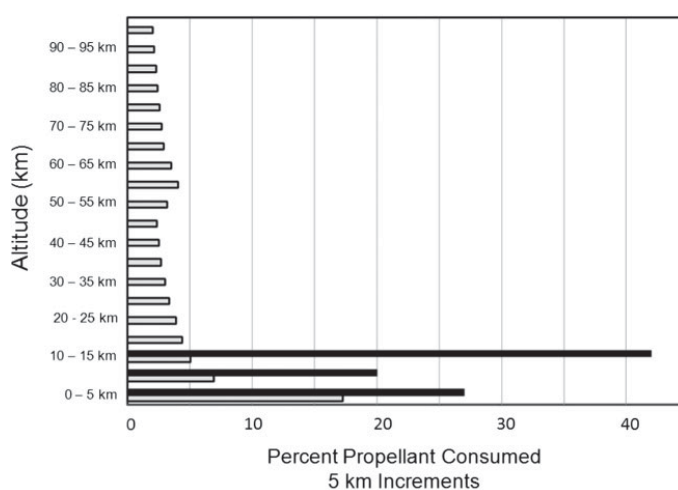


Figura 4: Percentuale media di combustibile (per gli aeroplani, in nero) e di propellente (per i missili, in grigio) bruciato, in funzione dell'altitudine (Ross & Sheaffer, 2014).

I fenomeni fisici alla base degli impatti dovuti alla presenza dei prodotti della combustione dei propellenti nella stratosfera e nella mesosfera sono poco compresi dalla comunità scientifica (Ross & Vedda, 2018), ma è ben noto come il particolato si possa accumulare in grandi quantità: infatti, essendo formato da particelle di piccole dimensioni, risiede negli strati superiori dell'atmosfera, e in particolare ad altitudini che comprendono lo strato di ozono della stratosfera, per un lasso temporale che varia tra i 3 e i 4 anni (Ross & Toohey, 2019). Le particelle di BC sono trasportate dalla circolazione atmosferica in entrambi gli emisferi; le particelle di ossido di alluminio, essendo più pesanti di quelle di BC, tendono a rimanere nell'emisfero boreale, dove sono presenti la maggior parte delle piattaforme di lancio, e dunque dove sono emesse in quantità maggiore (Ross & Vedda, 2018).

I missili richiedono stadi multipli, in numero variabile tra i 2 e i 4, per ottenere la spinta necessaria per arrivare in orbita. Alla fine di ogni stadio, i booster o i diversi stadi si separano dal veicolo centrale di lancio e sono scartati o riutilizzati, ottimizzando in questo modo la spinta generata dai motori (Ryan et al., 2022).

I quattro propellenti più comuni sono cherosene/ LO_x (ossigeno liquido), i propellenti ipergolici (il più comune è la dimetilidrazina asimmetrica, UDMH, che viene fatta reagire con il tetrossido di azoto, N_2O_4 , e a cui può essere aggiunta l'idrazina, N_2H_4 , una molecola molto tossica), idrogeno liquido/ LO_x e i propellenti solidi, che spesso utilizzano alluminio e perclorato di ammonio NH_4ClO_4 , con l'aggiunta di un idrocarburo, l'HTPD. I prodotti della combustione comuni a tutti i propellenti sono vapore acqueo, H_2O , e ossidi di azoto, NO_x . I motori che utilizzano solidi a base di carbonio, propellenti ipergolici e cherosene producono anche BC e anidride carbonica, CO_2 ; i soli combustibili solidi, inoltre, emettono ossido di alluminio, Al_2O_3 , e acido cloridrico HCl. Un'ulteriore fonte di NO_x è quella dovuta al rientro in atmosfera di missili, satelliti in disuso e detriti spaziali (Ryan et al., 2022).

L'inquinamento atmosferico provocato dagli scarichi dei missili si può distinguere principalmente in due tipi: si hanno, da una parte, l'emissione di inquinanti con un

forte impatto ambientale e, dall'altra, il rilascio di gas e particolato con effetto climalterante. Le principali cause della distruzione di molecole di ozono stratosferico sono il monossido di azoto NO e le molecole di cloro Cl₂. Anche la formazione delle piogge acide è legata alla presenza di NO_x. Per quanto riguarda invece l'effetto climalterante, i gas da sottoporre a particolare attenzione sono la CO₂ e il vapore acqueo; mentre, i due tipi di particolato da considerare sono il BC e l'ossido di alluminio Al₂O₃ (Ross & Jones, 2022; Kokkinakis & Drikakis, 2022; Ryan et al., 2022).

Attualmente, però, le conoscenze scientifiche riguardanti la riduzione dell'ozono stratosferico e i cambiamenti delle forzanti radiative hanno un basso livello di affidabilità. Questo basso livello di certezza, non permette ai decisori politici di utilizzare tali informazioni per produrre delle leggi che limitino l'emissione dei missili (Ross & Jones, 2022). Per questo motivo, nonostante il Protocollo di Montreal del 1987 che ha bandito l'utilizzo dei CFC, si stima che il settore spaziale causi ogni anno l'assottigliamento dello strato di ozono stratosferico di una quantità pari a circa il 4% dell'ozono distrutto a causa dei CFC (Ross et al., 2009). Questa quantità è attualmente divisa in modo quasi equo tra l'ozono perso a causa dei composti del cloro rilasciati dai SRMs, dalla presenza di NO_x prodotti durante i lanci e i rientri in atmosfera e dell'ossido di alluminio emesso dai SRMs (Ross & Jones, 2022).

Appare inoltre opportuno, anche dalla prospettiva della giustizia climatica, distinguere i contributi all'inquinamento del settore spaziale in base ai Paesi emettitori. Storicamente, i due Paesi che hanno realizzato più lanci verso lo spazio sono stati Stati Uniti e Unione Sovietica/Confederazione Russa ma, come è possibile notare dalla Fig. 1, dagli anni '90 del secolo scorso anche altri Paesi in tutto il mondo hanno iniziato a sviluppare un proprio programma spaziale. Sono inoltre nate molte compagnie private che contribuiscono alle emissioni nazionali. Attualmente, i dati mostrano un numero maggiore di lanci provenienti da due soli Paesi – Stati Uniti e Cina – mentre quelli di tutto il resto del mondo, con l'esclusione della Russia, pesano per meno del 17% del totale (Space-Track.Org).

1.3 Obiettivi

La seconda metà del XX secolo è stata protagonista della corsa allo spazio, soprattutto da parte delle due potenze mondiali dell'epoca: Stati Uniti e Unione Sovietica. Dal 1957, anno del primo lancio di satelliti, ad oggi, molto è cambiato, sia in termini del numero di lanci che dei loro obiettivi.

Con questa tesi basata su ricerca ed un'ampia analisi bibliografica di letteratura scientifica internazionale, letteratura grigia e report ufficiali, si intende prendere in esame questo cambiamento e stimare l'impatto che il settore spaziale ha sulle dinamiche ambientali del pianeta, con un focus particolare sull'inquinamento dell'atmosfera, gli effetti climalteranti provocati dalle emissioni dei lanci di missili verso lo spazio e i possibili scenari di sviluppo del turismo spaziale del dispiegamento di costellazioni di satelliti.

1.4 Inquadramento

Le problematiche ambientali derivanti dal settore spaziale sono individuabili sia a livello locale, in prossimità delle piattaforme di lancio dei missili (Fig. 5), sia a livello globale. Esse sono scaturite dall'emissione di gas esausti, contenuti anche particolato, negli strati superiori dell'atmosfera, con conseguenze in tutto il globo.

Per evitare il più possibile i danni locali entro i propri confini, la maggior parte dei Paesi che organizza missioni nello spazio effettua lanci da ex colonie (ad esempio, gli stati membri dell'Unione Europea hanno costruito la loro base nella Guiana francese, mentre i russi sfruttano le loro piattaforme in Kazakistan) oppure da luoghi remoti e poco abitati (quali il Pacific Spaceport Complex in Alaska e Plesetsk nel nord della Russia).

È anche opportuno osservare come la disposizione delle piattaforme di lancio non sia egualmente distribuita tra i due emisferi: infatti, la quasi totalità delle basi è situata a nord dell'Equatore. Questo si riflette inevitabilmente sugli effetti che derivano dall'emissione di gas e particolato, le cui concentrazioni in atmosfera non saranno omogenee.



Figura 5: Principali siti attivi di lancio dei missili con almeno un lancio nel periodo 2008-2018. Le piattaforme da cui sono stati effettuati voli per il turismo spaziale sono evidenziate con un puntino bianco (Aerospace Security Project).

2 Materiali e Metodi

2.1 Materiali

Le conoscenze scientifiche dei fenomeni fisici che avvengono nell'atmosfera e quelle relative al settore spaziale attinenti al tema del cambiamento climatico sono in continua evoluzione e, in quanto tali, sono oggetto di molti studi scientifici pubblicati, contenenti modelli e dati che vengono aggiornati, e in certi casi anche rivoluzionati, nell'arco di pochi anni.

Le informazioni utilizzate per redigere la presente ricerca sono state reperite tramite:

- articoli scientifici indicizzati e reperibili su banca dati di Scopus e Web of Science (ad esempio: Science, Nature, PNAS, Science of the Total Environment, Journal of Space Safety Engineering);
- siti web ufficiali che raccolgono statistiche (Statista, Our World in Data e Space Track);
- report pubblicati da organizzazioni internazionali, come il "Scientific Assessment of Ozone Depletion" del World Meteorological Organization (WMO);
- risorse web che fanno riferimento ad agenzie governative, come l'Environmental Protection Agency (EPA, USA) e la European Space Agency (ESA).

2.2 Metodologia

Poiché il tema in esame è soggetto all'aggiornamento dei modelli utilizzati in base alle più recenti conoscenze scientifiche, le informazioni raccolte possono avere alcune discrepanze. Perciò per la redazione di questa tesi è stato adottato un approccio critico per la selezione delle informazioni più affidabili, mediante il continuo confronto tra fonti e autori diversi.

Per analizzare l'impatto che il settore spaziale ha avuto e avrà nel futuro, è stato seguito il seguente *workflow* logico:

- è stato studiato lo sviluppo che tale settore ha avuto negli scorsi decenni e le prospettive di crescita attese per un futuro prossimo;
- sono stati individuati i principali fattori di inquinamento derivanti dal lancio di missili in orbita terrestre;
- è stato quantificato ognuno di questi fattori per ricavarne l'impatto passato e attuale;
- sono stati considerati alcuni possibili scenari futuri di emissioni, ipotizzando differenti sviluppi di due settori per i quali è prevista una rapida crescita: turismo spaziale e costellazioni di satelliti.

3 Risultati e discussione

3.1 Emissioni in atmosfera

I prodotti di combustione formati durante il lancio di missili dipendono principalmente dal tipo di propellente utilizzato; da ciò deriva il fatto che anche gli effetti delle emissioni dipendano dalla miscela combustibile-ossidante scelta. Più del 90% dei gas esausti consiste in anidride carbonica e vapore acqueo (Ross & Jones, 2022). La Tab. 1 riporta, per i propellenti più frequentemente usati, le altre sostanze emesse, con i relativi effetti ambientali e climalteranti che ne conseguono (Sirieys et al., 2022; Dallas et al., 2020). Il primo propellente riportato in Tab. 1 è quello utilizzato nei SRMs, mentre gli altri tre sono sfruttati nei *Liquid Rocket Engines* (LREs). Oltre a questi due tipi di motore, è usata anche la tecnologia ibrida, che fa uso di un combustibile solido, tipicamente un idrocarburo (gomma sintetica, HTPB), e di un ossidante liquido, il protossido di azoto N_2O . Dal momento che il propellente dei motori ibridi è una combinazione di quelli solidi e liquidi, le emissioni saranno

Tabella 1: Propellenti più comuni, principali prodotti della loro combustione e principali impatti ambientali (Sirieys et al., 2022; Dallas et al., 2020).

Propellente	Nome comune	Tipo	Principali emissioni	Impatto ambientale
Al/NH_4ClO_4 \pm HTPD	Propellente solido	SRMs	HCl, H_2O , CO_x , NO_x , Al_2O_3 , soot	Riduzione dell'ozono Nuvole ad alta quota Forzante radiativo
LO_x/LH_2	Criogenico	LREs	H_2O , H_2 , OH, NO	Nuvole ad alta quota
$N_2O_4/UDMH$ \pm N_2H_4	Ipergolico	LREs	H_2O , N_2 , CO_2 , NO_x , soot	Riduzione dell'ozono Nuvole ad alta quota Forzante radiativo
$LO_x/RP-1$	Cherosene	LREs	CO_2 , H_2O , CO_x , OH, NO_x , soot	Riduzione dell'ozono Nuvole ad alta quota Forzante radiativo

una combinazione di quelle indicate nella Tab. 1. È stato stimato che questo tipo di propellente abbia un indice di emissione (EI: *Emission Index*) relativo al BC maggiore di quello che utilizza cherosene, ma si prevede che il suo utilizzo continuerà a crescere, soprattutto in ottica del turismo spaziale, dal momento che garantisce un elevato livello di sicurezza (Miraux, 2021; Ross & Sheaffer, 2014; Ross et al., 2010). A dimostrazione di questo, la compagnia privata Virgin Galactic, che offre il servizio di turismo spaziale, utilizza propellente ibrido per i propri missili e, nel 2020, ha emesso un piano di lancio che prevede 400 voli suborbitali all'anno per il prossimo futuro (Ryan et al., 2022).

La Tab. 2, invece, quantifica le emissioni dei diversi inquinanti presenti nei gas esausti, in base al tipo di propellente, sotto forma di indici di emissione (EI), misurati in grammi emessi per chilogrammo di propellente bruciato (Ross & Sheaffer, 2014).

Tabella 2: Indici di emissione (EI) assunti per gas e particolato emessi, in base al tipo di propellente bruciato. Gli EI sono misurati in grammi di sostanza emessa per chilogrammo di propellente combusto. Per SMF (*Submicron Mass Fraction*) si intende la frazione di ossido di alluminio di dimensione minore del micron. Dove EI è indicato come X-Y-Z, i valori X-Z rappresentano l'intervallo statisticamente ragionevole, mentre il valore Y è quello più probabile (Ross & Sheaffer, 2014).

Tipo di missile	EI (CO₂)	EI (H₂O)	EI (BC)	EI (SMF)
Cherosene	600	350	10-20-40	0
Criogenico	0	1000	0	0
SRM	200	350	2-4-8	10-60-120
Ipergolico	150	550	2-4-8	0
Ibrido	200	200	20-40-80	0

Facendo riferimento all'anno 2018, durante il quale sono stati effettuati 86 lanci con successo, permettendo di mettere in orbita 127 satelliti, è stata calcolata la massa del particolato emesso in atmosfera: sono state rilasciate 1.540 tonnellate di Al₂O₃ (ossido di alluminio) principalmente attraverso il lancio di 20 SRMs e 160 tonnellate di BC attraverso l'impiego di 40 missili alimentati a cherosene (Miraux et al., 2022).

Oltre a queste emissioni dirette, il lancio di missili è responsabile anche della formazione di ingenti quantità di ossidi di azoto NO_x , prodotti termicamente durante l'ascesa o durante il rientro in atmosfera. La produzione di NO_x durante il lancio dei missili è possibile nel caso vi siano la compresenza di azoto gassoso e di ossigeno e temperature superiori ai 1.200 K. Uno studio del 2022 ha mostrato come la produzione di NO_x durante il lancio dei missili vari in base all'altitudine: infatti, all'aumentare della distanza dalla superficie terrestre, diminuisce velocemente la pressione dell'aria attorno agli ugelli da cui fuoriescono i gas esausti, che espandono rapidamente perdendo una parte sempre maggiore di energia termica. Quando la pressione esterna è abbastanza alta, i gas emessi subiscono solo una piccola espansione, mantenendo dunque una temperatura sufficiente a permettere la reazione tra azoto e ossigeno. Per questo motivo, la maggior parte degli NO_x che si formano, sono prodotti per altitudini minori di 30 km (Kokkinakis and Drikakis, 2022). È noto come anche la fase del rientro in atmosfera porti alla formazione di NO_x , anche se le conoscenze scientifiche in questo campo sono poche e caratterizzate da un livello di affidabilità molto basso. Un altro studio del 2022 considera una produzione di NO_x pari al 17,5% della massa del componente riutilizzabile dell'oggetto che rientra (Ryan et al., 2022).

Per valutare l'impatto delle emissioni dei missili durante il lancio, possono essere utilizzate due scale: una scala locale, che considera ciò che è situato intorno all'area di lancio e lungo la traiettoria percorsa dal missile, ed una scala globale, che considera gli effetti a livello mondiale, tenendo conto del rilascio degli inquinanti gassosi e del particolato ad alte quote e del conseguente trasporto di tali sostanze per mezzo dei moti che coinvolgono l'atmosfera. Gli impatti sull'ambiente e sul clima terrestre, così come la traiettoria tipica percorsa da un missile per arrivare in orbita, sono rappresentati nella Fig. 6.

È stato dimostrato da differenti studi che l'inquinamento atmosferico locale persiste solo per un breve lasso temporale e quindi può essere trascurato, come rivelato in uno studio di Ross & Vedda (2018): "Emissions into the troposphere are not

important, aside from transient launch and landing site air quality concerns". Generalmente, infatti, i parametri di determinati inquinanti, seppur superando i limiti di legge durante il momento del lancio, ritornano entro i valori soglia in meno di un'ora (Byrka et al., 2010; Satpathy et al., 2014). Nonostante ciò, tuttavia, è possibile incorrere in impatti ambientali di più grave entità nel caso in cui la frequenza dei lanci aumenti notevolmente, senza permettere all'ecosistema di autorigenerarsi, portando così a gravi conseguenze per flora e fauna in prossimità delle piattaforme di lancio (Sirieys et al., 2022). Inoltre, nei dintorni delle scie di scarico dei missili, si osserva la completa distruzione delle molecole di ozono per un breve periodo di tempo, solitamente inferiore all'ora (Miroux, 2021; Voigt et al., 2013). Un ulteriore fattore di inquinamento locale sono gli stadi dei missili già utilizzati che vengono lasciati cadere negli oceani o sulla terraferma: nel 2013, in Kazakistan, durante il lancio di un missile russo, è avvenuto uno tra i più gravi incidenti ambientali che ha avuto pesanti ripercussioni sull'ecosistema locale. Infatti, da uno degli stadi del missile caduti sulla terraferma sono fuoriusciti ingenti quantità di dimetilidrazina asimmetrica, utilizzata come combustibile nei propellenti ipergolici, (UDHM) – una sostanza molto tossica anche per l'uomo – che hanno inquinato una vasta area attorno alla zona di impatto; solo dopo due anni di interventi di risanamento ambientale, le concentrazioni di tale sostanza nel terreno sono rientrate nei valori prescritti dalla legge, ma è stato stimato che l'UDHM possa persistere nel terreno per almeno 37 anni (Koroleva et al., 2020).

Alla scala globale, invece, bisogna considerare le emissioni che si registrano durante il lancio, con particolare attenzione a quelle negli strati superiori dell'atmosfera, e quelle causate dal rientro di navicelle e di detriti spaziali. I principali effetti dovuti alla presenza di emissioni gassose e di particolato sono la formazione di piogge acide e di ozono troposferico, la riduzione dell'ozono stratosferico, la formazione di nuvole nella stratosfera e nella mesosfera e la generazione di forzanti radiative, che hanno un forte impatto sul clima terrestre.

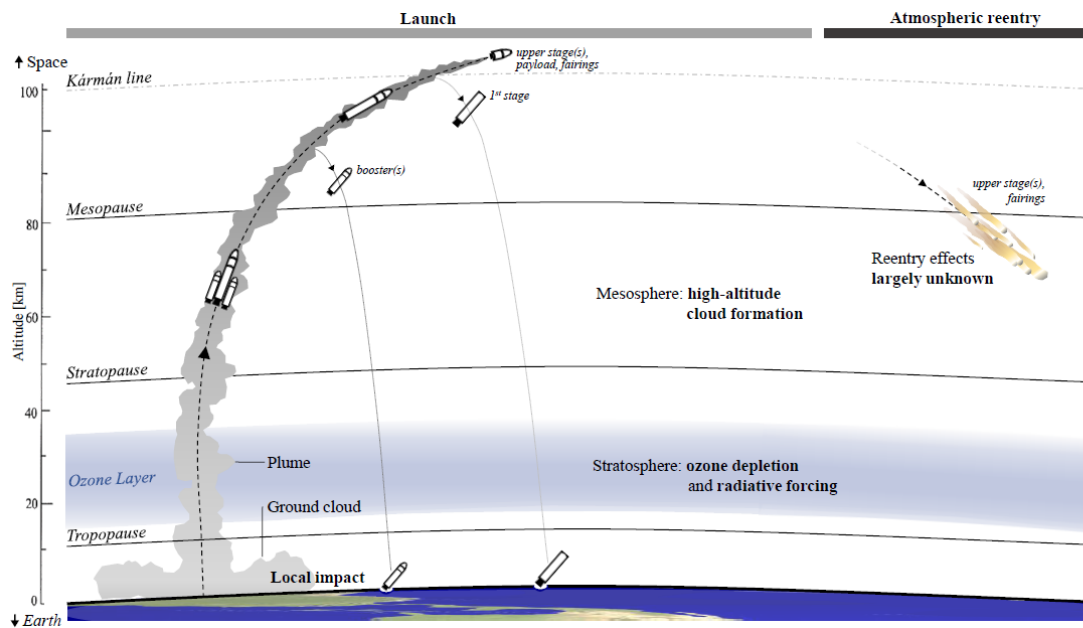


Figura 6: Traiettoria di un tipico lancio attraverso gli strati dell'atmosfera durante la fase di ascesa e il rientro in atmosfera. Per le diverse altitudini, sono anche indicati gli impatti ambientali che il lancio comporta. A meno che i missili siano (parzialmente) riutilizzabili, il primo stadio e i booster sono fatti cadere negli oceani o sulla terraferma (Sirieys et al., 2022).

3.2 Piogge acide

Le piogge acide sono un fenomeno che si verifica qualora ci siano emissioni di HCl o di NO_x nella troposfera, che si disperdono a seconda dei fenomeni di trasporto legati ai venti. Attraverso il fenomeno del *rainout*, che consiste nella rimozione dall'atmosfera degli inquinanti inglobati come nuclei di condensazione all'interno delle gocce di pioggia, acido cloridrico e ossidi di azoto cadono sul terreno, provocando gravi danni agli ecosistemi, tra cui anche l'acidificazione di laghi e corsi d'acqua, provocando la morte di parte della fauna acquatica (Sirieys et al., 2022; Kokkinakis & Drikakis, 2022). La Fig. 7 rappresenta la scia di condensazione dei gas di scarico del missile e la *ground cloud* in due momenti diversi: immediatamente dopo il lancio (a sinistra) e in seguito ad un certo periodo di tempo (a destra). Inoltre, la figura raffigura anche il *rainout* degli inquinanti emessi, per mezzo della precipitazione (Dallas et al., 2020).

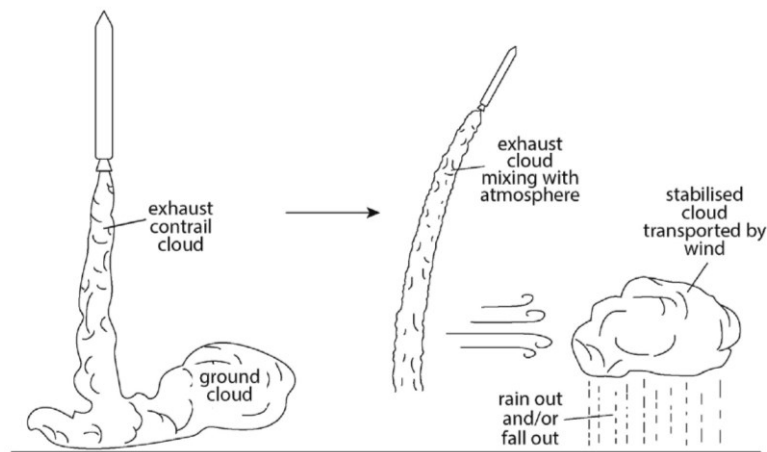


Figura 7: Illustrazione schematica della scia di condensazione dei gas combusti e della *ground cloud* immediatamente dopo il lancio (a sinistra) e in seguito ad un certo periodo di tempo (a destra) (Dallas et al., 2020).

3.3 Ozono troposferico

Gli ossidi di azoto NO_x , rilasciati come scarti della combustione o prodotti termicamente grazie all'alta temperatura che si registra nei gas di scarico e alla compresenza di azoto gassoso N_2 e di ossigeno, possono reagire con altri composti (soprattutto composti organici volatili) presenti nell'atmosfera per formare ozono, soprattutto a basse altitudini, al di sotto della tropopausa (Kokkinakis and Drikakis, 2022). Questo tipo di ozono, definito *ground-level ozone*, è considerato un inquinante: infatti, se presente in elevate concentrazioni, può causare gravi problemi al sistema respiratorio umano (US EPA, 2022). Inoltre, l'ozono troposferico deve essere considerato anche in relazione alle forzanti climatiche, per le quali contribuisce con una quota pari a $0,42 \text{ W m}^{-2}$ sul totale di $2,3 \text{ W m}^{-2}$: dunque, a causa dell'emissione, diretta o indiretta, di NO_x a seguito dei lanci, aumenta la concentrazione di ozono troposferico, con un immediato aumento della temperatura sulla superficie terrestre (Lu et al., 2021).

La Fig. 8 rappresenta la concentrazione di ozono nell'atmosfera, distinguendo tra ozono troposferico e ozono stratosferico.

3.4 Formazione di nuvole mesosferiche

Le nuvole mesosferiche, in normali condizioni, si creano sui poli, o in loro prossimità, durante le rispettive stagioni estive e hanno una particolarità: esse non si formano per nucleazione attorno a particelle sospese in atmosfera, come avviene invece per le nuvole negli strati più bassi dell'atmosfera, bensì necessitano del solo vapore acqueo (Dallas et al., 2020).

Molti studi hanno dimostrato la relazione tra le emissioni gassose negli strati superiori dell'atmosfera, a cui consegue un aumento della concentrazione di vapore acqueo, e la formazione di nuvole nella mesosfera. Non è ancora chiaro che effetti possano derivare da tale fenomeno, ma alcuni esperti ritengono che ciò possa generare delle interferenze nella comunicazione satellitare, causando interruzioni temporanee nella ricezione dei segnali (Sirieys et al., 2022; Dallas et al., 2020; Voigt et al., 2013).

3.5 Riduzione dell'ozono stratosferico

Il Protocollo di Montreal, sottoscritto da tutti i Paesi delle Nazioni Unite nel 1987, limita la produzione e l'utilizzo di sostanze che causano l'assottigliamento dello strato di ozono stratosferico, ossia delle *Ozone Depleting Substances* (ODSs), e prevede la redazione di un *Scientific Assessment of Ozone Depletion* a cadenza quadriennale, con l'obiettivo di descrivere le attuali condizioni dello strato di ozono, i fattori che lo danneggiano e le proiezioni future. L'ultimo *Scientific Assessment*, pubblicato nel 2022, afferma che il settore spaziale contribuisce all'assottigliamento dello strato di ozono stratosferico totale in quantità minore dello 0.1%, ma, allo stesso tempo, mette in evidenza come nel futuro questo contributo possa diventare significativo. Infatti, l'aumento della frequenza dei lanci di missili civili, l'utilizzo di nuovi propellenti (quali, ad esempio, quelli ad idrogeno e a metano), la creazione di enormi costellazioni di satelliti nella LEO e l'aumento del rientro in atmosfera di missili e detriti spaziali potrebbe avere un effetto preoccupante e non più trascurabile (WMO, 2022). È necessario anche osservare come il protossido di azoto N_2O , utilizzato come

ossidante negli HREs (*Hybrid Rocket Engines*), abbia un elevato ODP (*Ozone Depletion Potential*, ossia la forza relativa di una sostanza chimica di distruggere l'ozono. L'ODP di un composto chimico è definito come il rapporto tra il cambiamento dell'ozono globale causato da una data massa di tale sostanza e il cambiamento dovuto alla stessa massa di CFC-11, il clorofluorocarburo di riferimento), ma non faccia parte delle ODS bandite dal Protocollo di Montreal (WMO, 2022). Visto il grande sviluppo che sta coinvolgendo il turismo spaziale, che fa grande uso degli HREs per la loro affidabilità e sicurezza, in un futuro prossimo il contributo del protossido di azoto alla riduzione dell'ozono stratosferico assumerà un peso sempre maggiore.

Le emissioni causate dal lancio di missili verso lo spazio assumono un ruolo di particolare rilievo per quanto riguarda la riduzione dell'ozono stratosferico. Infatti, esse hanno tre caratteristiche uniche rispetto a qualsiasi altro tipo di emissione prodotta dall'uomo (Ross et al., 2009):

1. i prodotti della combustione del propellente sono l'unica fonte antropogenica di sostanze chimiche con capacità di distruggere l'ozono iniettata direttamente nella stratosfera. Inoltre, dal momento che gli strati superiori dell'atmosfera sono relativamente isolati dalla troposfera, le emissioni dei singoli lanci si accumulano nella stratosfera, rimanendovi per qualche anno.
2. i livelli di ozono stratosferico sono controllati da reazioni chimiche catalitiche, guidate da gas e particolato reattivo: la presenza, anche in minima quantità, di gas esausti può essere la causa di significative modifiche alla concentrazione di ozono.
3. è noto come i motori dei missili emettano molti dei gas e del particolato che controllano le reazioni catalitiche (Tab. 1 e 2). Ciò è vero per ogni tipo di propellente, seppur in diverse quantità: non esistono propellenti *green*. Anche il vapore acqueo, originariamente considerato inerte, contribuisce alla riduzione dell'ozono.

Lo strato di ozono stratosferico (si veda la Fig. 8) è il risultato di un bilancio chimico dinamico, i cui contributi sono la produzione e la distruzione di ozono e la circolazione globale dell'aria stratosferica. La distruzione delle molecole di ozono è causata da molteplici fattori, sia diretti (le emissioni di gas reattivi e le ODS che arrivano dalla troposfera) che indiretti (produzione termica di NO_x e il particolato emesso come prodotto di combustione dei motori). La causa principale della distruzione dell'ozono è la presenza di tracce di gas reattivi, noti come radicali (Cl, NO_x, HO_x), che controllano il bilancio tra produzione e distruzione. Inoltre, dal momento che le reazioni che coinvolgono i radicali sono catalitiche, una singola molecola di uno di questi radicali può arrivare a distruggere 10⁵ molecole di ozono, prima di essere deattivata e trasportata fuori dalla stratosfera. Le reazioni che coinvolgono i radicali avvengono molto velocemente (da pochi minuti fino a qualche ora), da cui deriva che le iniezioni provocate dalle scie di condensazione dei gas esausti dei missili possono creare dei "buchi" nell'ozono localizzati. Anche il particolato gioca un importante ruolo nella riduzione dell'ozono, attraverso due diversi fenomeni fisici. Innanzitutto, l'accumulo di BC e di ossido di alluminio nella

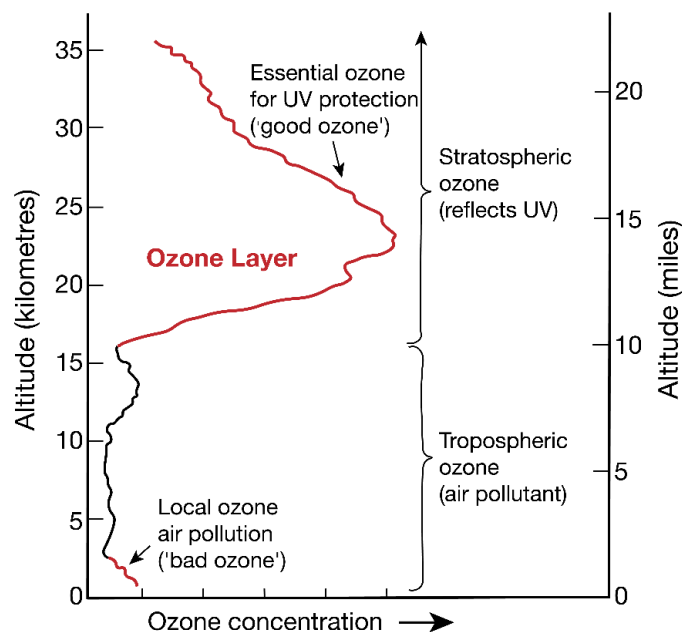


Figura 8: Profilo verticale della concentrazione di ozono (descrizione qualitativa) e distinzione tra ozono troposferico e ozono stratosferico (Ritchie & Roser, 2018).

stratosfera, assorbendo una parte delle radiazioni provenienti dal Sole, riscalda l'aria, accelerando così le già esistenti reazioni tra l'ozono e i radicali. Inoltre, sulla superficie delle particelle dell'ossido di alluminio avvengono delle ulteriori reazioni, che a loro volta riducono la concentrazione dell'ozono. Un altro fattore da tenere in considerazione è il vapore acqueo rilasciato dai missili nella stratosfera, che, oltre ad essere la sorgente dei radicali OH_x , è responsabile anche dalla formazione di particelle di ghiaccio, le quali a loro volta hanno un moderato effetto distruttivo sulle molecole di ozono (Ross & Vedda, 2018; Ross et al., 2009).

Uno studio del 2009 ha calcolato che in quell'anno la riduzione dell'ozono stratosferico causata dal settore spaziale sia stata all'incirca dello 0,03% dell'ozono totale globale, in relazione ai circa 95 lanci effettuati (Ross et al., 2009). Uno studio più recente ha invece evidenziato come il contributo del lancio di missili raggiunga il 3% dell'ozono distrutto dai CFC; sapendo che il contributo delle ODS bandite dal Protocollo di Montreal si attesta attorno al 4% dell'ozono globale, il settore spaziale arriva così ad avere un impatto dello 0,12% sull'ozono totale. Questa quantità è attualmente divisa in modo quasi equo tra l'ozono perso a causa dei composti del cloro rilasciati dai SRMs, dalla presenza di NO_x prodotti durante i lanci e i rientri in atmosfera e dall' Al_2O_3 emesso dai SRMs (Ross & Jones, 2022). Quindi attualmente la componente dovuta al lancio di missili sembra essere trascurabile rispetto a quella dei CFC, ma considerando il futuro incremento del numero di lanci annuali resi possibili grazie alla riduzione dei costi e il necessario aumento del numero di satelliti delle costellazioni che rientreranno in atmosfera, la perdita di ozono provocata dalle missioni spaziali potrà diventare paragonabile a quella delle sostanze bandite dal Protocollo di Montreal.

Nel 2022, alcuni scienziati hanno simulato diversi scenari possibili per gli impatti che la crescita del settore spaziale porterà con sé. Nello scenario più moderato, che tiene conto solo dei piani proposti con termine nel 2050 riguardanti la formazione di costellazioni di satelliti nella LEO, uno sviluppo limitato del turismo spaziale, le missioni per tornare sulla Luna e la creazione di un impianto solare nello spazio, è

stata stimata la riduzione dell'ozono stratosferico in quantità pari al 6% degli impatti annui globali (Miraux et al., 2022).

3.6 Forzanti radiative

L'effetto climalterante delle emissioni dei missili è da analizzare sotto due punti di vista: il rilascio in atmosfera di ingenti quantità di *Greenhouse Gases* (GHG) e quello del particolato.

Per quanto riguarda i gas che hanno un effetto sul clima, i principali da tenere in considerazione sono l'anidride carbonica e il vapore acqueo, che compongono più del 90% dei gas esausti. La quantità annua di CO₂ emessa dai missili si attesta intorno alle 0,0003 Gt, estremamente inferiore alle 30 Gt rilasciate in atmosfera a livello globale: in quanto tale, la CO₂ non ha un impatto ambientale significativo sul cambiamento climatico e il suo contributo può essere trascurato. Anche il vapore acqueo, la cui concentrazione in atmosfera varia molto rapidamente, non gioca un ruolo di rilievo nell'ottica della variazione del clima terrestre. (Ross & Jones, 2022). "CO₂ and H₂O emissions [...] are unimportant, even at launch rates orders of magnitude greater than today" (Ross & Vedda, 2018). Altri gas, quali NO_x e HCl che sono emessi in minore quantità, non causano direttamente una forzante radiativa (RF: *Radiative Forcing*), ma, dal momento che hanno la capacità di ridurre la quantità di ozono stratosferico, possono comunque avere un RF indiretto (Ross & Sheaffer, 2014).

La descrizione degli effetti dovuti alla presenza di particelle di piccole dimensioni di BC e di ossido di alluminio è più complicata e i fenomeni fisici che le coinvolgono sono poco compresi dalla comunità scientifica. È noto come BC e Al₂O₃ abbiano un lungo tempo di vita negli strati superiori dell'atmosfera, che varia tra i 3 e i 4 anni, che ne consente in tal modo l'accumulo, dato dalla somma dei contributi dei singoli lanci, e che crea dei *layer* di questo particolato nella stratosfera (Ross & Vedda, 2018). La Fig. 9 raffigura in modo schematico e semplificato gli strati di BC e ossido di

alluminio che si formano nella stratosfera e ne indica gli effetti sulla temperatura (Miraux, 2021).

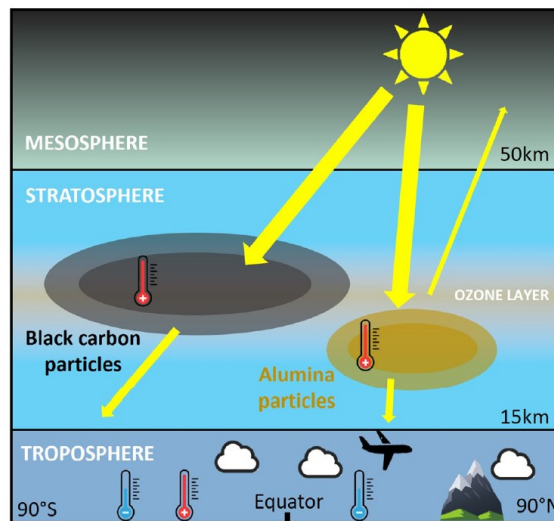


Figura 9: Layer di *black carbon* e ossido di alluminio formati in seguito alle emissioni del particolato durante il lancio dei missili. Sono anche riportati gli effetti sulla temperatura (Miraux, 2021).

Il BC assorbe una parte delle radiazioni solari provenienti dal Sole, scaldando la stratosfera e diminuendo il flusso di radiazioni che raggiunge la superficie terrestre, e ne blocca una parte anche di quelle in uscita dall'atmosfera. Si pensa però che l'effetto dovuto alla diminuzione dell'albedo della Terra causato dal BC sia maggiore della riduzione della temperatura della superficie: il BC ha dunque un RF netto positivo. Per quanto riguarda le particelle di ossido di alluminio, inizialmente si pensava che, dato il loro colore più chiaro rispetto a quelle del BC, avessero la capacità di riflettere parte della radiazione solare, comportando un raffreddamento della troposfera. Più recenti ricerche hanno portato alla conclusione che anche l'ossido di alluminio potrebbe generare un RF positivo (ossia, un effetto riscaldante), dal momento che sarebbe responsabile dell'assorbimento delle radiazioni terrestri con un'elevata lunghezza d'onda, impedendone l'uscita verso lo spazio. In quanto tali, entrambi i tipi di particolato considerati hanno RF positivo e partecipano quindi al fenomeno del riscaldamento globale (Ross & Jones, 2022; Ross & Sheaffer, 2014). Uno studio del 2014 ha confrontato il RF delle emissioni di CO₂ di missili che usano propellenti idrocarburici con il RF di quelle di BC, arrivando alla conclusione che le

emissioni di BC hanno un impatto sul clima maggiore di un fattore 10^5 rispetto a quelle della CO_2 (Ross & Sheaffer, 2014). Ross e Sheaffer nel 2014 hanno anche stimato che, a quel tempo, il contributo del lancio di missili al RF globale era positivo e pari circa a $16 \pm 8 \text{ mW m}^{-2}$, con il BC che contribuiva per il 70%, l'ossido di alluminio per il 28%, il vapore acqueo per il 2% e l'anidride carbonica per circa lo 0%. Ciò significa che il contributo maggiore al RF del settore spaziale deriva dai missili con propellenti a base di idrocarburi che emettono *black carbon* e dai SRMs che rilasciano ossido di alluminio (Ross & Sheaffer, 2014). Inoltre, sapendo che nel 2011 è stata stimata una forzante radiativa totale pari a $2,3 \text{ W m}^{-2}$, nel 2014 l'effetto globale del settore spaziale sul cambiamento climatico era considerato trascurabile.

Come si può notare dalla Tab. 2 al Paragrafo 3.1, l'EI (BC) relativo ai motori ibridi è maggiore rispetto a quello dei motori che utilizzano cherosene. Considerato inoltre il notevole sviluppo che la tecnologia ibrida vedrà grazie all'aumentare del turismo spaziale, l'emissione totale di BC aumenterà in modo significativo e con essa anche il RF, di cui il BC è il principale responsabile. Uno scenario del 2010, che considera il lancio annuale di 1.000 missili ibridi con propellente a base di idrocarburi, ha evidenziato come le emissioni di BC causerebbero un RF paragonabile a quello stimato per il settore dell'aviazione mondiale di quel periodo (Ross et al., 2010).

3.7 Turismo spaziale

Il servizio di turismo spaziale è stato offerto per la prima volta nel 2021 dalle due compagnie private Virgin Galactic e Blue Origin e si prevede che nel prossimo futuro esse assumeranno un ruolo dominante nel mercato dei voli suborbitali; non bisogna però trascurare SpaceX, che pianifica di offrire i più impattanti voli orbitali ai turisti spaziali (Miraux et al., 2022; Ryan et al., 2022).

Virgin Galactic, di proprietà di Richard Branson, ha sviluppato un processo di lancio composto da due fasi: la navetta contenente i passeggeri è portata ad alta quota da un velivolo alimentato a carburante per jet, prima di essere sganciata e proseguire utilizzando un propellente ibrido, in cui il combustibile è gomma solida e il

comburente è protossido di azoto N_2O e i cui prodotti della combustione sono NO_x , H_2O e BC. Il lanciatore della Blue Origin brucia invece idrogeno e ossigeno liquidi, rilasciando NO_x e H_2O in atmosfera; SpaceX sfrutta invece il missile Falcon 9 che brucia cherosene, generando così NO_x , H_2O e BC.

La Fig. 10 rappresenta in modo schematico le fasi che caratterizzano il volo suborbitale offerto dalla compagnia Virgin Galactic (www.virgingalactic.com).

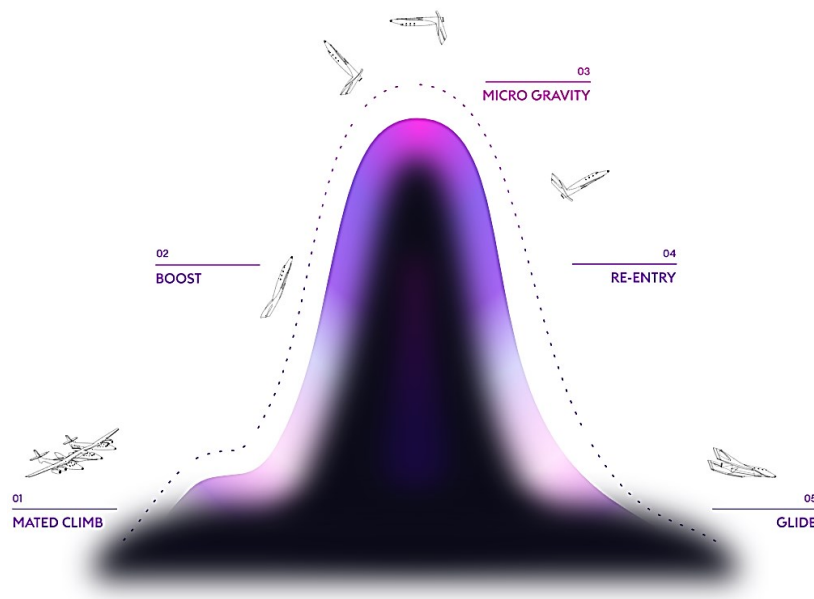


Figura 10: Fasi del volo suborbitale offerto dalla compagnia Virgin Galactic: la navetta contenente i passeggeri viene portata ad alta quota da un velivolo, dal quale poi si stacca per raggiungere gli 80 km di altitudine, prima di iniziare il rientro in atmosfera (www.virgingalactic.com).

Al contrario di Blue Origin e SpaceX che non hanno ancora annunciato i rispettivi piani di lancio per il futuro, Virgin Galactic ha ufficializzato l'intenzione di offrire 400 voli suborbitali all'anno (Ryan et al., 2022). Rispetto ai missili che utilizzano cherosene, quelli ibridi della compagnia di Branson hanno un indice di emissione del BC molto maggiore e pari circa al doppio; inoltre, facendo uso del protossido di azoto come ossidante della reazione di combustione, è possibile registrare anche emissioni di N_2O , che, sommandosi alle ingenti quantità di NO_x prodotte termicamente all'uscita degli ugelli che disperdono i gas esausti e durante il rientro in atmosfera, creano un serio problema alla stabilità dell'ozono stratosferico.

Nel 2022, Miraux, Wilson e Calabuig hanno ipotizzato diversi scenari futuri di sviluppo del settore del turismo spaziale. Nel primo, che considera una crescita moderata, hanno previsto 800 voli suborbitali all'anno entro il 2030, arrivando a 2.400 entro il 2050, con l'aggiunta di 20 voli orbitali annui. Per il secondo caso, caratterizzato da una crescita più rapida del settore, sono stati previsti fino a 4.000 voli suborbitali e 200 orbitali all'anno entro il 2050. Però, nonostante il grande incremento del numero di lanci rispetto all'attuale situazione, dal momento che i veicoli utilizzati per i voli suborbitali sono di piccole dimensioni, gli impatti relativi ai singoli lanci sarebbero di conseguenza minori. Infatti, come modellato dagli studiosi, gli impatti ambientali del turismo spaziale sarebbero cagionati prevalentemente dai veicoli di lancio di dimensioni maggiori, ossia quelli utilizzati per i voli orbitali che, nel 2030, sarebbero responsabili del 63% degli impatti del turismo spaziale, con soli 20 lanci contro gli 800 dei voli suborbitali. Entro il 2050, gli impatti sul cambiamento climatico del settore spaziale raggiungerebbero un livello preoccupante per quanto concerne la distruzione dell'ozono stratosferico, riducendone la quantità rispettivamente dello 0,8% nello scenario a crescita moderata e dell'1,4% nel secondo scenario. Inoltre, una volta raggiunti i 1000 lanci all'anno da parte di Virgin Galactic, verrebbe rilasciata nella stratosfera una quantità di BC paragonabile a quella dell'intero settore spaziale attuale. Ciò avrebbe come conseguenza un notevole aumento del RF globale (Miraux et al., 2022).

Nonostante le emissioni di BC del settore spaziale si attestino intorno allo 0,02% delle emissioni totali globali, uno studio del 2022 ha dimostrato come, dopo 3 anni di emissioni derivanti dal turismo spaziale, si avrebbe un effetto riscaldante pari al 6% dell'effetto riscaldante globale proveniente da tutte le altre fonti di BC: infatti, il *black carbon* rilasciato direttamente negli strati superiori dell'atmosfera ha un *radiative forcing* molto più efficiente – il RF per unità di massa è circa 500 volte maggiore – di quello emesso nella troposfera (Ryan et al., 2022).

Già nel 2010, Ross e Sheaffer hanno evidenziato come la *carbon footprint* di un turista spaziale a bordo di un volo suborbitale possa corrispondere a quella di un

passaggero di un volo commerciale dopo aver percorso la tratta Londra – Los Angeles diverse migliaia di volte (Ross & Sheaffer, 2014). Numericamente, la *carbon footprint* di un passeggero su un volo della Virgin Galactic è di 14 tCO₂eq mentre per un passeggero della Blue Origin è di 34 tCO₂eq, dove la differenza è dovuta ai maggiori impatti legati alla produzione del veicolo di lancio: ne risulta quindi un'impronta carbonica media di 24 tCO₂eq per turista spaziale a bordo di un volo suborbitale. Normalizzando gli impatti per passeggero attraverso i fattori di normalizzazione del Joint Research Center dell'Unione Europea, che corrispondono all'impatto medio annuale (l'anno di riferimento è il 2010) di un cittadino dell'Unione Europea, si ricava che la *carbon footprint* media normalizzata di un volo suborbitale è di 2,6 cittadini UE (Miroux et al., 2022).

Si può eseguire il medesimo procedimento anche per i voli orbitali, sapendo che è stata calcolata una *carbon footprint* pari a 660 tCO₂eq per passeggero, considerando il lancio di un Falcon 9 della SpaceX. In questo caso, tenendo conto anche degli effetti di acidificazione dell'aria e della distruzione di molecole di ozono stratosferico, si ottiene un'impronta carbonica corrispondente a migliaia di cittadini UE, tralasciando le ingenti quantità di BC emesse negli strati superiori dell'atmosfera (Miroux et al., 2022).

La Fig. 11 riassume l'impronta ambientale dei passeggeri delle diverse tipologie di voli spaziali (turismo suborbitale, orbitale e della Luna, trasporto Terra-Terra, viaggi su Marte) normalizzata rispetto a quella dei cittadini dell'UE, attraverso i fattori di normalizzazione del Joint Research Center. L'impronta ambientale è suddivisa in base ai possibili impatti previsti: acidificazione dell'aria, cambiamento climatico (come forzante radiativa), distruzione di ozono, ossidazione fotochimica (come formazione di ozono troposferico) e consumo di risorse (Miroux et al., 2022).

Nell'ottica della *climate justice*, dopo aver dimostrato come il turismo spaziale possa provocare degli impatti ambientali significativi anche a livello globale, influenzando la vita di ogni persona sul pianeta, è opportuno osservare che l'attività spaziale non è facilmente accessibile a ciascuno dal punto di vista economico. Infatti, i biglietti

per i voli che permettono di sperimentare l'assenza di gravità raggiungono cifre proibitive per la maggior parte della popolazione: il costo di un biglietto per un volo suborbitale varia tra i 450 mila e i 28 milioni di dollari americani, mentre bisogna essere disposti a pagare 55 milioni di dollari per poter salire a bordo di un volo orbitale. Ciò significa che rispettivamente lo 0,0025% e lo 0,0001% della popolazione mondiale possono permettersi il turismo spaziale suborbitale ed orbitale (Miraux et al., 2022).

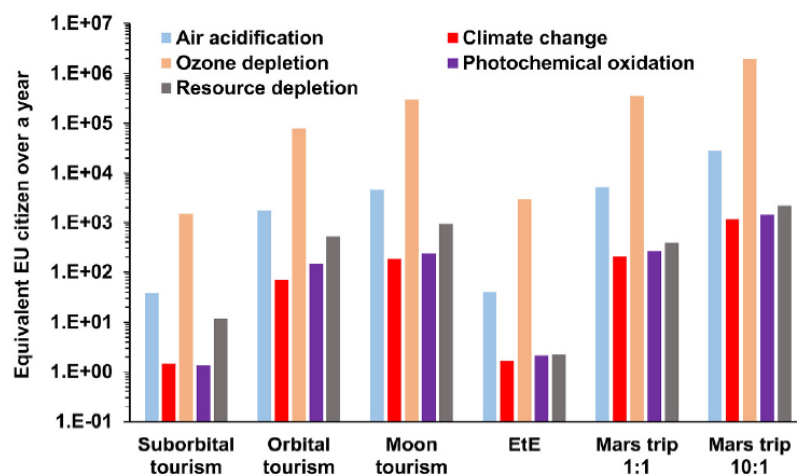


Figura 11: Impronta ambientale dei passeggeri dei voli spaziali, divisi per tipo di impatto e quantificati in termine di cittadini UE secondo la normalizzazione del Joint Research Center (Miraux et al., 2022).

3.8 Costellazioni di satelliti

Storicamente, sono stati lanciati satelliti principalmente con finalità militare: durante la *First Space Age*, ossia nel periodo 1957-1991, il 60% dei satelliti americani e il 77% di quelli sovietici supportavano l'attività militare dei rispettivi Paesi (Spagnulo, 2019). Come già detto in precedenza, con la fine della Guerra Fredda, anche altri Paesi hanno sviluppato la tecnologia necessaria per mettere in orbita i propri satelliti, il cui scopo non si limitava più esclusivamente al sostegno degli eserciti nazionali. Nel 2017, l'associazione non governativa *Union of Concerned Scientists*, fondata presso il Massachusetts Institute of Technology (MIT), stimò che, dei 1.783 satelliti operativi in orbita in quel periodo, 803 fossero americani, di cui 310 di

proprietà del Pentagono (Spagnulo, 2019). Inoltre, come mostrato nella Fig. 2, il numero di satelliti a fini commerciali è aumentato molto velocemente nell'ultimo decennio: infatti, in questa situazione di rapido sviluppo del settore spaziale, sono nate molte compagnie private che stanno realizzando o hanno pianificato il dispiegamento di un'elevatissima quantità di satelliti: le cosiddette costellazioni di satelliti. Il loro scopo è quello di fornire un servizio globale di comunicazione per garantire l'accesso ad Internet in ogni parte del pianeta a costi contenuti. In tal modo, queste compagnie acquisiranno una posizione di grande rilievo nell'emergente mercato dell'*Internet-of-Things* (IoT), il cui volume di affari è previsto che raggiungerà i mille miliardi di dollari entro qualche anno (Spagnulo, 2019).

I progetti delle costellazioni prevedono il loro dispiegamento soprattutto nella LEO, in modo da poter ottimizzare le dimensioni delle antenne che devono essere installate sui satelliti e ridurre al minimo la latenza della trasmissione dei segnali (Schulz and Glassmeier, 2021). Schulz e Glassmeier hanno stimato che, sulla base dei piani presentati fino al 2020 dalle compagnie private, il numero di satelliti che sarà messo in orbita nei prossimi anni potrebbe raggiungere le 110 mila unità (Schulz and Glassmeier, 2021). In questo momento il leader del settore è Starlink, una sottodivisione della più grande SpaceX di proprietà di Elon Musk, che nel periodo 2019-2022 ha lanciato in orbita oltre 4.000 satelliti.

La Fig. 12 presenta l'andamento temporale della dimensione della costellazione di Starlink (www.satellitemap.space).

Oltre alla costellazione di Starlink, anche la compagnia britannica di comunicazioni OneWeb sta già procedendo al dispiegamento dei propri satelliti nella LEO e attualmente può contare su circa 700 satelliti in servizio (www.oneweb.net).

Inoltre, dai piani presentati da queste due società, si evince che sia stata fatta la richiesta per un ampliamento delle loro costellazioni, in numero pari a 30 mila e 48 mila unità, rispettivamente per Starlink e OneWeb (Schulz and Glassmeier, 2021).

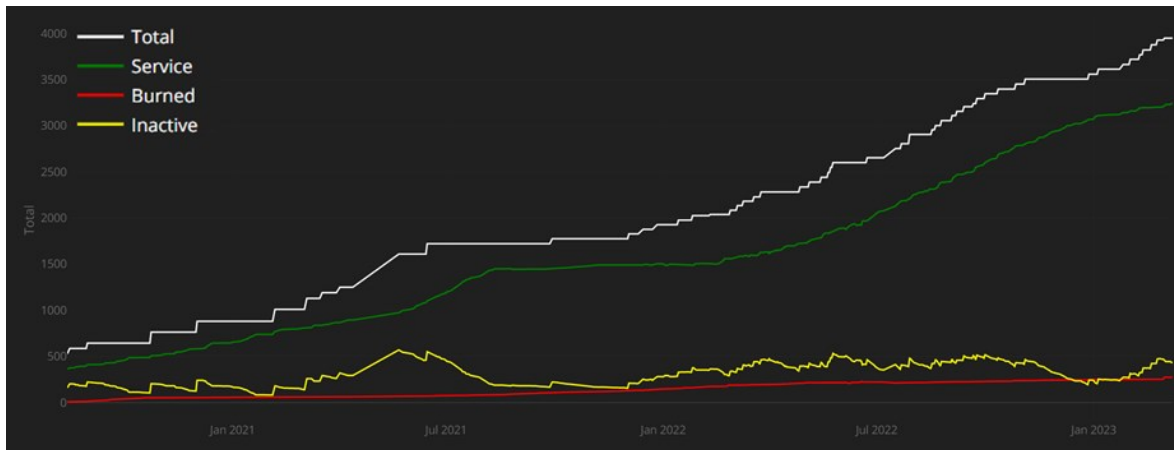


Figura 12: Andamento temporale del numero di satelliti inattivi, rientrati nell’atmosfera terrestre, in servizio e totali della costellazione di Starlink (www.satellitemap.space).

La Fig. 13 descrive la distribuzione spaziale dei satelliti delle costellazioni di Starlink e di OneWeb attorno alla Terra (www.satellitemap.space).

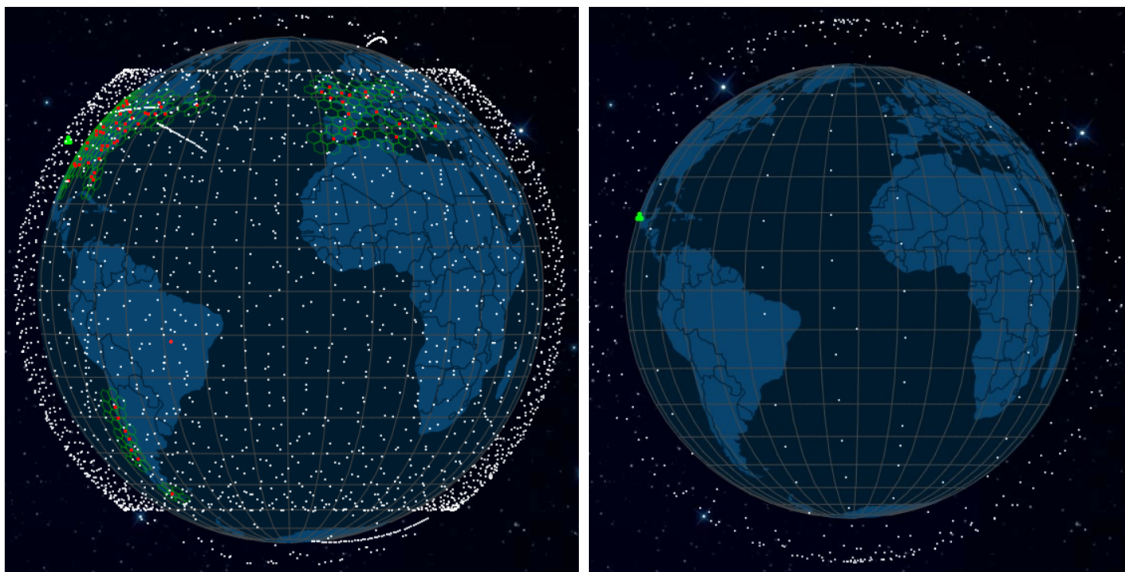


Figura 13: L’immagine a sinistra rappresenta la distribuzione spaziale dei satelliti della costellazione Starlink di SpaceX nella LEO. I satelliti sono rappresentati dai punti bianchi, mentre i punti rossi indicano la posizione delle stazioni a terra che controllano i satelliti. Infine, le linee bianche rappresentano satelliti che devono ancora essere posizionati. L’immagine di destra descrive la distribuzione dei satelliti di OneWeb. Si può notare facilmente la differenza di densità – e dunque anche di numero – di satelliti tra le due costellazioni (www.satellitemap.space).

Bisogna poi considerare che ci sono molte altre compagnie che pianificano di portare in orbita terrestre le loro costellazioni di satelliti, tra cui le canadesi Telesat e Kepler

Communications, l'americana Amazon con il progetto Kuiper e le cinesi CASC (*China Aerospace Science and Technology Corporation* – il principale appaltatore del programma spaziale cinese) e CASIC (*China Aerospace Science and Industry Corporation* – un'azienda pubblica che sviluppa tecnologia spaziale e militare). Oltre a queste compagnie che, con una buona probabilità, porteranno a compimento i loro progetti, in questo settore sono molteplici quelle che emergono per poi sparire velocemente, rendendo complessa la formulazione di scenari accurati (Schulz and Glassmeier, 2021).

Per posizionare in orbita tutti questi satelliti, saranno necessari molti più lanci di quelli che sono registrati oggi: per la sola attività spaziale legata alle costellazioni, si prevede che il numero di lanci annui possa raggiungere i 145 entro il 2038 (Miraux et al., 2022). Come diretta conseguenza, si assisterà ad un notevole aumento degli impatti ambientali dovuti alle emissioni di gas climalteranti e di particolato.

Allo stesso tempo, bisogna tener conto di altri due importanti fattori che influiranno sull'attività spaziale dei prossimi anni. Innanzitutto, i satelliti, essendo dispiegati nella LEO, dovranno essere dotati di un proprio sistema di propulsione per mantenere un'orbita costante, contrastando l'effetto di attrazione gravitazionale terrestre. Dunque, una volta esaurito il propellente, i satelliti saranno fatti rientrare nell'atmosfera terrestre, dove si inceneriranno disperdendo metalli e altri elementi chimici in forma atomica o come aerosol. Per questo motivo, e per permettere di avere in orbita satelliti con le più recenti tecnologie disponibili, le compagnie private fissano a cinque anni il tempo di vita dei satelliti. Ogni cinque anni, quindi, le costellazioni dovranno essere completamente sostituite. Il secondo aspetto da non sottovalutare è la produzione di massa dei payload, che comporterà senz'altro minori controlli sulle singole unità, portando a malfunzionamenti del sistema elettrico o di propulsione. A ciò consegnerà un tasso di fallimento non trascurabile attualmente stimato attorno al 5%, come confermato dopo i primi lanci effettuati da Starlink (Schulz and Glassmeier, 2021). In queste condizioni, è dunque lecito pensare

che nel futuro il numero di missili impiegati per il dispiegamento in orbita delle costellazioni di satelliti prevarrà sul totale di quelli utilizzati nell'intero settore spaziale.

3.9 Detriti spaziali

La presenza di satelliti orbitanti intorno alla Terra, le missioni spaziali e qualsiasi tipo di attività al di fuori dell'atmosfera terrestre sono caratterizzate intrinsecamente dalla produzione di detriti spaziali, definiti anche *debris*. Con questo termine si intendono i rifiuti prodotti dal settore spaziale e comprendono gli stadi dei missili che si separano dopo aver finito il propellente, satelliti in disuso, parti di missili o *payloads* e frammenti di diverse dimensioni generati a seguito di esplosioni o di impatti tra satelliti o debris (Adilov et al., 2021).

A causa delle loro caratteristiche estremamente variabili e per poterne descrivere al meglio la pericolosità, i detriti spaziali sono solitamente suddivisi in tre categorie in base alle loro dimensioni (Miroux, 2021):

- *large-sized debris*: hanno dimensioni maggiori di 10 cm ed è generalmente possibile tracciarli. Si stima che abbiano una popolazione di 34 mila oggetti;
- *medium-sized debris*: hanno dimensioni comprese tra 1 e 10 cm, non sono sempre tracciabili e hanno una popolazione di circa 900 mila elementi;
- *small-sized debris*: hanno dimensioni comprese tra 1 mm e 1 cm, non sono tracciabili e i frammenti di questa grandezza nelle orbite potrebbero essere fino a 128 milioni.

La forza distruttiva dei detriti spaziali è determinata dal prodotto tra la massa dell'oggetto e la sua velocità relativa, che mediamente è pari a 15 km/s. A parità delle altre condizioni, la collisione con un *debris* più grande di 10 cm può provocare la distruzione di un satellite, generando a sua volta una significativa quantità di frammenti altamente pericolosi. I *medium-sized debris* possono portare a danni ingenti, mettendo fuori uso un satellite o addirittura distruggendone alcune parti,

mentre quelli più grandi di 1 mm possono causare il fallimento della missione (Miraux, 2021; Adilov et al., 2021).

Oltre alla produzione incidentale di detriti spaziali, devono essere tenuti in considerazione anche due episodi, di cui uno volontario, che ne hanno provocato un aumento improvviso. Nel 2007, la Cina ha testato un missile antisatellite distruggendo intenzionalmente un loro satellite in disuso, il Fengyun-1C e producendo almeno 35 mila detriti altamente pericolosi di dimensione maggiore di 1 cm. Nel 2009, invece, si è verificata la collisione tra un satellite russo, il Kosmos 2251, e uno statunitense in disuso, l'Iridium 33 (Adilov et al., 2021; Spagnulo, 2019). Nella Fig. 14 è possibile notare l'influenza di questi eventi sul numero totale di detriti tracciabili mediante radar.

Spagnulo, nel libro intitolato "Geopolitica dell'esplorazione spaziale", svolge un'analisi accurata dell'influenza che la geopolitica ha avuto, e ha tutt'ora, nel determinare le decisioni che sono alla base dell'esplorazione spaziale e, più in generale, dello sviluppo di tutto il settore spaziale. In particolare, l'autore afferma che le potenze mondiali – all'inizio USA e Russia, a cui si sono poi aggiunte Cina e Unione Europea – hanno da sempre cercato di ottenere una posizione di supremazia

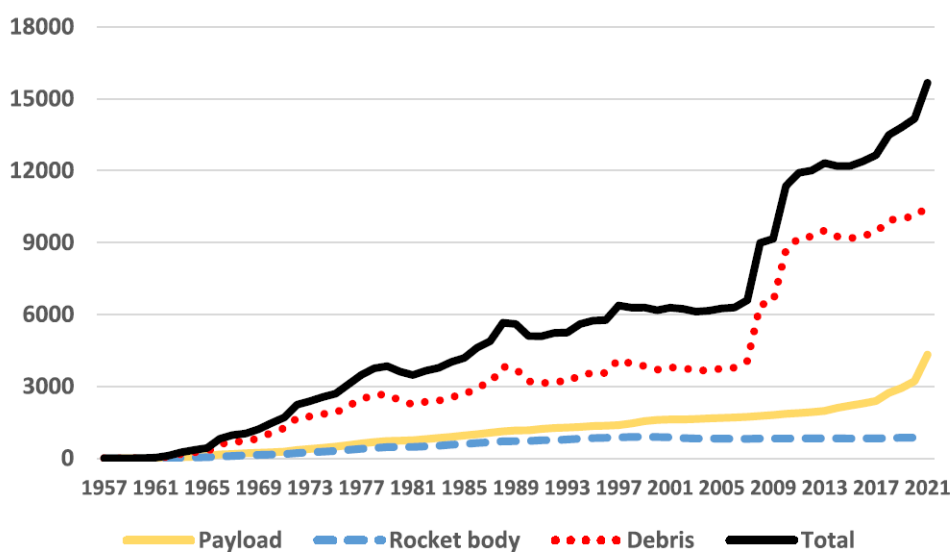


Figura 14: Numero e tipo di oggetti tracciabili con il radar nella LEO. Sono in particolare da notare i bruschi aumenti del numero di *debris* relativi agli anni 2007 e 2009 (Adilov et al., 2021).

nello spazio: i missili antisatellite rientrano dunque in questa logica. Il missile lanciato nel 2007 dalla superficie terrestre per abbattere un satellite in orbita è infatti un gesto di forza con cui Pechino ha voluto far sapere agli Stati Uniti di essere in possesso di una tecnologia che è in grado di neutralizzare i satelliti militari delle nazioni avversarie, indebolendone dunque la capacità militare (Spagnulo, 2019).

La presenza di detriti nello spazio costituisce il maggiore pericolo alla sostenibilità nel lungo termine dell'attività spaziale, degradando le orbite e riducendone la capacità di ospitare oggetti artificiali, quali satelliti e stazioni abitate come la ISS (Miraux, 2021). La Fig. 15 descrive in modo qualitativo la diminuzione della capacità di carico delle orbite all'aumentare dell'inquinamento dovuto a detriti.

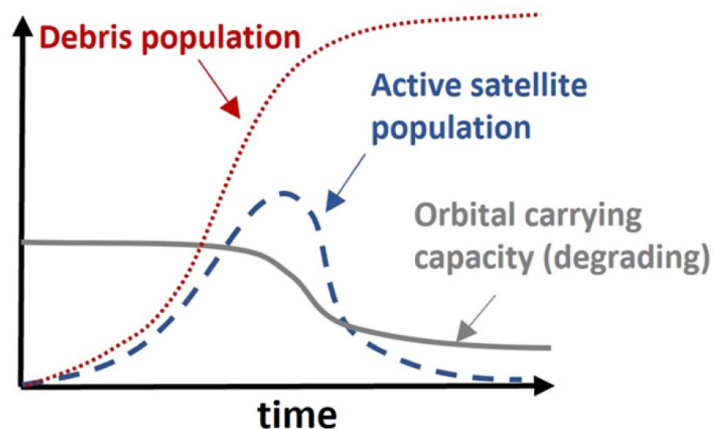


Figura 15: Variazione della capacità di carico delle orbite all'aumentare del numero di *debris*. La scala temporale potrebbe essere di decine o centinaia di anni (Miraux, 2021).

Nel 1978, Kessler e Cour-Palais hanno teorizzato che la popolazione di *debris* nelle orbite può raggiungere una densità critica oltre la quale si innesta una serie di collisioni tra detriti spaziali che può autosostenersi anche senza il posizionamento di nuovi *payloads*. Il fenomeno che coinvolge queste reazioni a catena è noto nella comunità scientifica come "Kessler Syndrome" e ha come diretta conseguenza l'impossibilità di utilizzare le orbite coinvolte per centinaia di anni. Dal momento che attualmente circa il 55% dei detriti spaziali catalogati si trovano nella LEO, è maggiore la probabilità che un evento simile si verifichi in tale orbita, causando

problemi per molti servizi, tra cui le comunicazioni satellitari e il monitoraggio meteorologico e ambientale (Miraux, 2021; Adilov et al., 2021).

Uno studio del 2021 ha ipotizzato che ci sarà una “Economic Kessler Syndrome”, prima che possano prendere il via le reazioni a catena di collisione: infatti, gli studiosi prevedono che l’attività nelle orbite perderà ogni possibilità di lucro a causa dei danni provocati dai *debris*, portando ad una diminuzione del numero di lanci e prevenendo così l’impossibilità fisica dell’utilizzo delle orbite (Adilov et al., 2021).

Negli ultimi anni, la consapevolezza della pericolosità dell’inquinamento spaziale è aumentata notevolmente e sono in corso ricerche per trovare una soluzione a questo problema. Infatti, dal momento che i *debris* hanno tempi di persistenza nello spazio anche molto lunghi, restando in orbita fino a centinaia di anni se la loro distanza iniziale dalla superficie terrestre è maggiore di 800 km, sono necessarie delle tecnologie che permettano di eliminare i detriti più rapidamente. Nonostante i grandi passi avanti fatti per sviluppare soluzioni migliori, attualmente il rimedio più efficace rimane quello di far rientrare nell’atmosfera terrestre i satelliti che raggiungono la fine del loro ciclo di vita, causandone il completo incenerimento grazie alle forze di attrito aerodinamico che si sviluppano a contatto con l’aria (Adilov et al., 2021).

3.10 Rientro in atmosfera

Per ridurre il problema dovuto alla formazione di detriti spaziali nella LEO, le compagnie hanno approvato dei piani per far rientrare nell’atmosfera terrestre i satelliti delle costellazioni alla fine del loro utilizzo. Se questa scelta porta con sé enormi vantaggi dal punto di vista dell’inquinamento delle orbite, allo stesso tempo, però, altera il naturale apporto di materia che viene immesso nel sistema terrestre attraverso l’atmosfera e, come già discusso nel Paragrafo 3.5, aumenta la quantità di NO_x prodotta termicamente, causando un incremento della riduzione dell’ozono stratosferico.

Schulz e Glassmeier, nello studio pubblicato nel 2021, hanno analizzato il fenomeno di incenerimento che si verifica durante la fase di rientro, confrontando l'iniezione di materia dovuta ad eventi naturali (principalmente meteoriti) con quella di origine antropica registrata durante l'anno 2019 – periodo utilizzato come *baseline* – e con quella prevista secondo due scenari. Tali scenari considerano diversi sviluppi delle costellazioni di satelliti: il primo fa riferimento all'attività spaziale del 2019 e al dispiegamento delle costellazioni che hanno maggiore probabilità di essere realizzate (circa 19 mila satelliti); il secondo prende in esame il doppio dell'attività spaziale del 2019 e il completamento delle costellazioni del primo scenario e di metà dei progetti la cui realizzazione è meno sicura, per un totale di circa 75 mila satelliti. Le Tab. 3, 4 e 5 riportano alcuni dei risultati più significativi individuati dallo studio e mettono, in particolare, in evidenza il confronto tra l'apporto antropico e quello naturale (Schulz and Glassmeier, 2021).

In media, in un anno l'apporto naturale di materia può essere quantificato in 12,3 kt, con una prevalenza dei non-metalli (5,7 kt) sui metalli (4,0 kt), presenti comunque in modo significativo. I metalli più abbondanti sono ferro e magnesio; tra i metalloidi e i non-metalli figurano ossigeno, silicio e carbonio (Schulz and Glassmeier, 2021).

L'apporto di materia di origine antropica registrato nell'arco del 2019 ammonta a 0,89 kt, in cui il contributo maggiore è fornito dagli stadi dei missili (87%). Inoltre, solo 0,35 kt di ciò che entra nell'atmosfera viene disperso come aerosol o in forma atomica; all'interno di questa quantità rientrano l'alluminio, l'elemento più presente, seguito da ferro, nichel e rame. I metalli coprono l'86% del materiale iniettato (Schulz and Glassmeier, 2021).

Per quanto riguarda invece l'apporto antropico calcolato per gli scenari, bisogna fare una considerazione riguardo il tasso di sopravvivenza degli oggetti che rientrano in atmosfera: Schulz e Glassmeier hanno stimato che, durante la discesa verso terra, le percentuali di massa che non si inceneriscono sono rispettivamente del 20% per gli *spacecraft*, del 35% per gli stadi finali dei missili e del 70% per gli stadi principali; inoltre, si ritiene che i satelliti delle costellazioni brucino completamente e che i

missili riutilizzabili tornino sulla superficie terrestre intatti. Detto ciò, per il primo scenario si prevede un afflusso totale pari a 2,7 kt, di cui 1,6 kt iniettate nell'atmosfera, con una prevalenza dei metalli (almeno il 75%). Un ruolo importante è giocato ancora una volta dall'alluminio, seguito a sua volta da ferro, nichel e silicio. Invece, l'afflusso totale del secondo scenario è pari a 8,1 kt, di cui 4,9 kt sono iniettate nell'atmosfera, composte dai medesimi elementi chimici in proporzioni simili. La predominanza di elementi come alluminio, ferro, nichel e silicio è dettata dal loro largo impiego nella costruzione dei satelliti (Schulz and Glassmeier, 2021).

Già nel 2019, la percentuale di materiale di origine antropica iniettata in atmosfera era pari al 2,8%, ma potrebbe raggiungere il 12,8% nel primo scenario e il 39,8% nel secondo. Inoltre, con il dispiegamento delle costellazioni e il successivo rientro in atmosfera dei satelliti, la quantità di aerosol iniettata aumenta, nei due scenari, del 30,2% e del 94,0%, con la possibilità di causare effetti negativi, quali l'incremento del numero di nuvole mesosferiche e l'interferenza nella trasmissione dei segnali radio (Schulz and Glassmeier, 2021).

Tabella 3: Iniezione naturale e antropica per i diversi prodotti dell'ablazione. L'unità di misura degli apporti di materia è kt/yr. I numeri tra parentesi sono le percentuali ottenute dal confronto con i valori dell'apporto naturale della medesima riga (Schulz and Glassmeier, 2021).

Iniezione	Iniezione antropica						Iniezione naturale
	Baseline (2019)		Scenario 1		Scenario 2		
Atomica	0,09	(1,0)	0,39	(4,7)	1,23	(14,6)	8,42
Aerosol	0,26	(6,7)	1,18	(30,2)	3,68	(94,2)	3,90
Totale	0,35	(2,8)	1,57	(12,8)	4,90	(39,8)	12,32
Arrivata al suolo	0,54	(1138)	1,17	(2458)	3,21	(6753)	0,05

Tabella 4: Iniezione naturale e antropica per gruppo di elementi. L'unità di misura degli apporti di materia è kt/yr. I numeri tra parentesi sono le percentuali ottenute dal confronto con i valori dell'apporto naturale della medesima riga (Schulz and Glassmeier, 2021).

Iniezione	Iniezione antropica						Iniezione naturale
	Baseline (2019)		Scenario 1		Scenario 2		
Metalli	0,31	(7,5)	1,19	(29,4)	3,64	(90,0)	4,05
Metalloidi	0,01	(0,7)	0,12	(7,4)	0,41	(24,6)	1,65
Non-metalli	0,001	(0,02)	0,01	(0,2)	0,03	(0,6)	5,67
Totale	0,35	(2,8)	1,57	(12,8)	4,90	(39,8)	12,32

Tabella 5: Iniezione naturale e antropica di alcuni elementi. L'unità di misura degli apporti di materia è kt/yr. I numeri tra parentesi sono le percentuali ottenute dal confronto con i valori dell'apporto naturale della medesima riga. È da notare che una percentuale maggiore del 100% indica che l'origine di tali elementi è prevalentemente antropica (Schulz and Glassmeier, 2021).

Elemento	Iniezione antropica						Iniezione naturale
	Baseline (2019)		Scenario 1		Scenario 2		
C	<0,01	(0)	<0,01	(0)	<0,01	(0)	1,05
O	-	-	-	-	-	-	3,85
Mg	<0,01	(0)	<0,01	(0)	<0,01	(0)	1,30
Al	0,21	(161)	0,81	(614)	2,47	(1877)	0,13
Si	<0,01	(0)	0,08	(5)	0,25	(15)	1,65
Ti	<0,01	(~100)	0,05	(~750)	0,17	(~2500)	<0,01
Fe	0,04	(2)	0,16	(7)	0,50	(22)	2,30
Ni	0,02	(25)	0,09	(99)	0,27	(304)	0,09
Cu	0,02	(~700)	0,04	(~1750)	0,11	(~5000)	<0,01
Ge	<0,01	(~800)	0,04	(~8000)	0,12	(~26500)	<0,01

4 Conclusioni

Nella ricerca si mette in evidenza come gli effetti indotti dalle emissioni del settore spaziale siano complessi e, in generale, caratterizzati da un elevato livello di incertezza. Nonostante ciò, la letteratura scientifica si interroga da anni su questi temi e offre numerose stime degli impatti e ipotesi di scenari emissivi.

I più significativi impatti ambientali che si possono riscontrare a seguito del lancio di missili, variabili in base alla natura del propellente usato, sono l'incremento nella formazione di nuvole mesosferiche, la produzione di ozono troposferico, la precipitazione di piogge acide, l'assottigliamento dello strato dell'ozono e la generazione di forzanti climatiche. In particolare, la distruzione delle molecole di ozono è causata da radicali chimici, come Cl, NO e HO_x, e dall'accumulo di particolato (BC e ossido di alluminio) nella stratosfera, in corrispondenza dello strato di ozono. Invece le sostanze che contribuiscono maggiormente alle forzanti radiative sono il BC e l'ossido di alluminio.

Attualmente il tasso di crescita del settore spaziale è in forte aumento, supportato soprattutto dall'incremento dell'attività di compagnie private che offrono turismo spaziale e che si occupano del dispiegamento di costellazioni di satelliti nella LEO. Virgin Galactic ha già confermato che effettuerà 400 voli suborbitali all'anno ed è plausibile che Blue Origin ne segua le orme; inoltre, a breve SpaceX inizierà ad offrire i più impattanti voli orbitali. Secondo alcuni scenari ipotizzati recentemente, il turismo spaziale potrebbe diminuire la concentrazione di ozono stratosferico totale per una quota compresa tra lo 0,8% e l'1,4% entro il 2050. Per di più, dato che il BC emesso nella stratosfera ha una forzante radiativa 500 volte maggiore rispetto a quello rilasciato nella troposfera, l'effetto riscaldante provocato dai lanci del settore del turismo coprirà il 6% dell'effetto riscaldante derivante da tutte le altre fonti di BC del pianeta.

I lanci necessari al dispiegamento delle costellazioni di satelliti potrebbero sortire un effetto simile nei confronti dello strato di ozono e del riscaldamento globale, a cui

però vanno aggiunti i problemi legati alla formazione di ingenti quantità di detriti spaziali, con conseguente diminuzione della capacità delle orbite di ospitare satelliti. Per questo motivo, si rende essenziale procedere al rientro degli oggetti artificiali nell'atmosfera terrestre. Ciò però causa un'alterazione del naturale afflusso di materia, che modifica la composizione chimica degli strati superiori dell'atmosfera, i cui effetti sono ancora purtroppo in gran parte ignoti.

Nonostante il settore spaziale e i complessi fenomeni che ne determinano gli impatti ambientali e climalteranti siano attualmente oggetto di molti studi, è ancora molta la ricerca da sviluppare per poter comprendere a pieno gli effetti dell'attività spaziale e per evitare il superamento dei *tipping points* sia per l'inquinamento atmosferico che quello delle orbite.

Bibliografia

- Adilov, N., Alexander, P. and Cunningham, B., 2021. Understanding the Economics of Orbital Pollution Through the Lens of Terrestrial Climate Change. *Space Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2021.101471>.
- Adilov, N., Alexander, P.J., Cunningham, B.M. and Albertson, N., 2022. An Analysis of Launch Cost Reductions for Low Earth Orbit Satellites. *Economics Bulletin*.
- Byr'ka, A.A., Bogolitsyn, K.G., Kosyakov, D.S. and Shpigun, O.A., 2010. Application of analytical methods for estimating contamination of atmospheric air during launch of carrier rockets of different classes from the Plesetsk Cosmodrome. *Inorganic Materials*, 46(15), pp.1627–1631. <https://doi.org/10.1134/S0020168510150057>.
- Dallas, J.A., Raval, S., Alvarez Gaitan, J.P., Saydam, S. and Dempster, A.G., 2020. The environmental impact of emissions from space launches: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120209>.
- ESA, 2022. ESA'S Annual Space Environment Report.
- Harrison, T., Cooper, Z., Johnson, K. and Roberts, T.G., 2017. Escalation & Deterrence in the Second Space Age. [online] Center for Strategic and International Studies. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15240.11525>.
- Kokkinakis, I.W. and Drikakis, D., 2022. Atmospheric pollution from rockets. *Physics of Fluids*. <https://doi.org/10.1063/5.0090017>.
- Koroleva, T. v., Semenov, I.N., Sharapova, A. v., Krechetov, P.P. and Lednev, S.A., 2020. Ecological consequences of space rocket accidents in Kazakhstan between 1999 and 2018. *Environmental Pollution*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115711>.
- Lu, X., Zhang, L. and Shen, L., 2021. Tropospheric ozone interacts with weather and climate. In: *Air Pollution, Climate, and Health: An Integrated Perspective on Their Interactions*. Elsevier. pp.15–46. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820123-7.00006-1>.
- Miriaux, L., 2021. Environmental limits to the space sector's growth. *Science of the Total Environment*, 806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150862>.
- Miriaux, L., Wilson, A.R. and Dominguez Calabuig, G.J., 2022. Environmental sustainability of future proposed space activities. *Acta Astronautica*, 200, pp.329–346. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.07.034>.
- Ross, M., Mills, M. and Toohey, D., 2010. Potential climate impact of black carbon emitted by rockets. *Geophysical Research Letters*, 37. <https://doi.org/10.1029/2010GL044548>.
- Ross, M. and Toohey, D., 2019. The Coming Surge of Rocket Emissions. *Eos*, [online] 100. <https://doi.org/10.1029/2019EO133493>.
- Ross, M., Toohey, D., Peinemann, M. and Ross, P., 2009. Limits on the space launch market related to stratospheric ozone depletion. *Astropolitics*, 7(1), pp.50–82. <https://doi.org/10.1080/14777620902768867>.

- Ross, M. and Vedda, J., 2018. The Policy and Science of Rocket Emissions. Center for Space Policy and Strategy. Available at: <www.aerospace.org/policy>.
- Ross, M.N. and Jones, K.L., 2022. Implications of a growing spaceflight industry: Climate change. *Journal of Space Safety Engineering*, 9, pp.469–477. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2022.04.004>.
- Ross, M.N. and Sheaffer, P.M., 2014. Radiative forcing caused by rocket engine emissions. *Earth's Future*, 2, pp.177–196. <https://doi.org/10.1002/2013ef000160>.
- Ryan, R.G., Marais, E.A., Balhatchet, C.J. and Eastham, S.D., 2022. Impact of Rocket Launch and Space Debris Air Pollutant Emissions on Stratospheric Ozone and Global Climate. *Earth's Future*, 10. <https://doi.org/10.1029/2021EF002612>.
- Satpathy, J., Panigrahi, T., Sahu, S. and Panda, R., 2014. Environmental Impact Assessment of Missile Test Firing. *Discovery*, 14, pp.19–26.
- Schulz, L. and Glassmeier, K.H., 2021. On the anthropogenic and natural injection of matter into Earth's atmosphere. *Advances in Space Research*, 67, pp.1002–1025. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.036>.
- Sirieys, E., Gentgen, C., Milton, J. and de Weck, O., 2022. Space sustainability isn't just about space debris: On the atmospheric impact of space launches. *MIT Science Policy Review*, 3, pp.143–151. <https://doi.org/10.38105/spr.whfig18hta>.
- Spagnulo, M., 2019. *Geopolitica dell'esplorazione spaziale*. Rubbettino Editore.
- Voigt, Ch., Schumann, U., Graf, K. and Gottschaldt, K.-D., 2013. Impact of rocket exhaust plumes on atmospheric composition and climate — an overview. *Progress in Propulsion Physics* 4. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/eucass/201304657>.
- WMO, 2022. Executive Summary. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022.

Sitografia

- Aerospace Security Project*, 2022 [online] Available at: <<https://www.csis.org/programs/international-security-program/aerospace-security-project>> [Accessed 24 November 2022].
- Civil and Commercial Space - Space Security, 2022. Space environment: payloads launched by country. *Aerospace Security*. [online] 1 Sep. Available at: <<https://aerospace.csis.org/data/space-environment-total-payloads-launched-by-country/>> [Accessed 28 October 2022].
- Mann, A. and McKelvie, C., 2022. *What was the space race? Origins, events and timeline*. [online] Space.com. Available at: <<https://www.space.com/space-race.html>> [Accessed 25 October 2022].
- OneWeb. [online] Available at: <<https://oneweb.net/>> [Accessed 9 March 2023].
- Ritchie Hannah and Roser, M., 2018. *Ozone Layer*. [online] Our World in Data. Available at: <<https://ourworldindata.org/ozone-layer>> [Accessed 24 November 2022].

Satellite Map. [online] Available at: <<https://satellitemap.space/#>> [Accessed 9 March 2023].

Space-Track.Org, 2022 [online] Available at: <<https://www.space-track.org/>> [Accessed 24 November 2022].

US EPA, 2022. *Health Effects of Ozone Pollution*. [online] Available at: <<https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution>> [Accessed 24 November 2022].

Virgin Galactic. [online] Available at: <<https://www.virgingalactic.com/>> [Accessed 7 March 2023].