

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

# ***Valutazione dell'impatto ambientale dei lanci spaziali***

Relatrice:

Prof. Roberta Bertani

Laureando:

*Marco Biscuola*

Padova 22/03/2024

## **Introduzione**

### **Inquinamento del suolo e del mare**

- **Contaminazione da carburante**
- **Deorbiting di satelliti e rifiuti spaziali**

### **Inquinamento al liftoff**

- **Formazione di ground cloud e piogge acide**
- **Danni alla vegetazione**
- **Inquinamento acustico e fauna locale**

### **Inquinamento in atmosfera**

- **Degradazione dello strato di ozono**
- **Produzione di allumina e black carbon**
- **Inquinamento luminoso**

### **Conclusioni**

### **Bibliografia**

L'esplorazione dello spazio ha sempre affascinato l'umanità, spingendola a superare i confini della Terra per scoprire nuovi mondi e approfondire la comprensione dell'universo circostante. Tuttavia, mentre i progressi nella tecnologia aerospaziale ci hanno consentito di realizzare impavidi viaggi oltre l'atmosfera terrestre, c'è un aspetto spesso trascurato di questa conquista: **l'impatto ambientale dei lanci spaziali**. In questa tesi, ci proponiamo di esplorare in dettaglio l'impatto dell'inquinamento generato dai lanci spaziali, analizzando i diversi agenti inquinanti coinvolti, i loro effetti sull'ambiente terrestre e spaziale e le possibili soluzioni per mitigare questo impatto. Partendo da una panoramica delle attività aerospaziali moderne e delle tecnologie coinvolte, esamineremo gli effetti diretti e indiretti di queste operazioni sull'atmosfera, sul clima, sul suolo e sulla biosfera terrestre.

Seppur l'inquinamento prodotto dai lanci spaziali rappresenti solo una minima percentuale dell'inquinamento prodotto dall'attività umana odierna è bene averne piena comprensione per poterne limitare i danni futuri in quanto è previsto nei prossimi anni un **aumento esponenziale del numero di lanci spaziali**.

Propellants	Main emission products	Significant launch vehicles and launch systems associated with this propellant	Advantages	Disadvantages
Al/NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub> ± HTPB (solid)	HCl, H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , soot	Titan II (0), Titan IIIA/C/D/E (0), Titan IV-B (0), Delta II (0), Space shuttle (0), Ariane 5 ECA/ES (0), Atlas V (0), H-IIA/IIB (0), GSLV (1), PSLV (0, 1, 3)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Easy to store</li> <li>• High propellant density</li> <li>• Relative design simplicity of engine</li> <li>• High thrust</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatively large environmental impact</li> <li>• Low specific impulse relative to LREs</li> <li>• No throttling or shut down</li> </ul>
LOx/LH <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> , OH, NO <sub>x</sub>	Space shuttle (1), Saturn I/V (2), Delta IV (1, 2), TitanIII E (3), Atlas III/V (2), H-IIA/IIB (1, 2), Ariane 1/2/3/4 (3), Ariane 5 ECA (1, 2), Ariane 5 G+, GS, ES (1), GSLV (3)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low environmental impact due to water vapour exhaust</li> <li>• Highest specific impulse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requires cryogenic storage due to extremely low boiling point of LH<sub>2</sub> (-252.87 °C)</li> <li>• Low density</li> <li>• Difficult to handle due to temperature requirements and explosion risk</li> </ul>
N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /UDMH ± N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (hypergolic)	H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , soot	Delta II (2) Titan II, Titan IIIA/B/C (1, 2, 3), Titan IIID/E (1, 2), Titan IV-A/B (1, 2), Long March 1-4 (1, 2), Proton (1, 2, 3), Ariane 1/2/3/4 (1, 2), Ariane 5 G+, GS, ES (2), GSLV (0, 2), PSLV (2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Can be stored for long periods</li> <li>• Relative design simplicity of engine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High toxicity</li> <li>• Difficult to handle due to safety concerns</li> </ul>
LOx/RP-1 (kerosene)	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CO <sub>x</sub> , OH, NO <sub>x</sub> , soot	Delta II(1), Titan I (1), Atlas III (1), Delta I/II/III (0), Saturn I/V (1) Falcon-9 (1, 2), Atlas V (1), Soyuz (0, 1, 2), Electron (1, 2), Angara (0, 1, 2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High propellant density</li> <li>• Relatively easy to handle</li> <li>• More affordable than LH<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub> and black soot emissions contribute to climatic warming</li> </ul>

Tabella 1: principali combustibili utilizzati nel settore spaziale. Bibliografia 3

Una ricerca del 2004 ha analizzato campioni di suolo provenienti dalla zona di caduta del primo stadio del Cyclone 3 nella regione del Arkhangelsk dopo il lancio dal cosmodromo di Plasetsk e ha rilevato:

- Presenza di UDMH **2400** volte superiore ai valori normali nella zona centrale di ricaduta.
- Presenza nelle acque dei fiumi fino a **250-300 giorni** dopo il lancio
- Presenza nelle acque dei laghi o stagni anche a **8 anni** di distanza dal lancio

Ulteriore problema è dato dagli ossidi di azoto che ricadono nelle acque favorendo il fenomeno di **eutrofizzazione**.

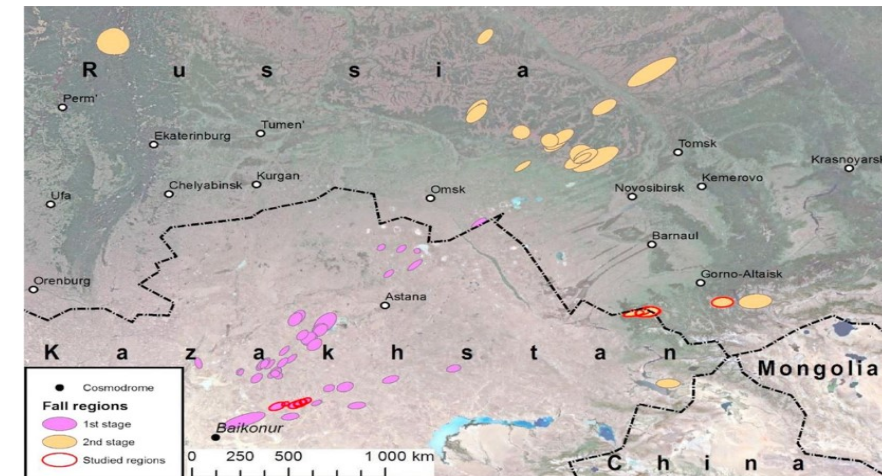


Fig. 1: Mappa della caduta degli stadi dei razzi lanciati da Baikonur. Bibliografia 11



Fig. 2: Schema eutrofizzazione. Bibliografia 12

Una volta terminata la missione del satellite si aprono due possibilità: la prima è quella di rimanere nell'orbita stabilita, o di spostarsi su una meno affollata, mentre la seconda possibilità è quella di rientrare in atmosfera. Nel primo caso i rifiuti rimasti ad orbitare creano un grave pericolo per l'ambiente spaziale perché possono collidere. Per questo motivo negli ultimi anni si è scelto di effettuare delle manovre di **deorbiting** ovvero spostare il satellite in altre orbite meno affollate, riducendo così il rischio di impatto, oppure di deviare il satellite per farlo rientrare verso la Terra causandone la disintegrazione. I principali rifiuti spaziali sono formati da:

Per la struttura:

- Alluminio
- Leghe metalliche
- Fibra di carbonio

Per l'isolamento termico:

- Materiali ceramici
- Materiali termici

Per la parte elettronica:

- Componenti elettronici
- Materiali dielettrici

In caso di caduta in ambiente marino questi materiali possono provocare diverse problematiche oltre alla mera contaminazione da combustibile o da materiali tossici presenti nel satellite. Sono stati evidenziati altri rischi come la creazione di **onde d'urto acustiche** all'impatto con l'acqua che se ripetute per diverso tempo potrebbero portare alterazioni dei tassi di alimentazione oppure il **danneggiamento del fondale marino** stesso che potrebbe venir modificato eccessivamente dai detriti più grandi portando ancora una volta ad un cambiamento nel preciso equilibrio dell'ecosistema marino.

Le reazioni presenti durante il lancio degli space shuttle danno come prodotti diversi tipi di molecole come  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $Al_2O_3$  e  $HCl$  le quali vanno a contaminare i circa due milioni di litri d'acqua utilizzati nel sistema di soppressione utilizzato durante la partenza.

Date le grandi energie in gioco l'acqua nella ground cloud tende ad **atomizzarsi**, cioè a venire suddivisa in particelle sempre più piccole sottoforma di goccioline o aerosol, legandosi con le molecole di allumina eliminando l'acido cloridrico risultando in una **pioggia estremamente acida con un pH inferiore a 0,5**. In uno studio del 1975 è stata rilevata la presenza di  $HCl$  e allumina fino a **22 chilometri** dalla zona del lancio. Un altro studio sul deposito di queste molecole in un'area di  $0,126 \text{ km}^2$  ha rilevato concentrazioni di acido cloridrico fino a  $127 \text{ g/m}^2$  e deposizioni di particolato (in forma di allumina, granelli di sabbia, pezzi di vernice e altri detriti vari) fino a  $216 \text{ g/m}^2$ .

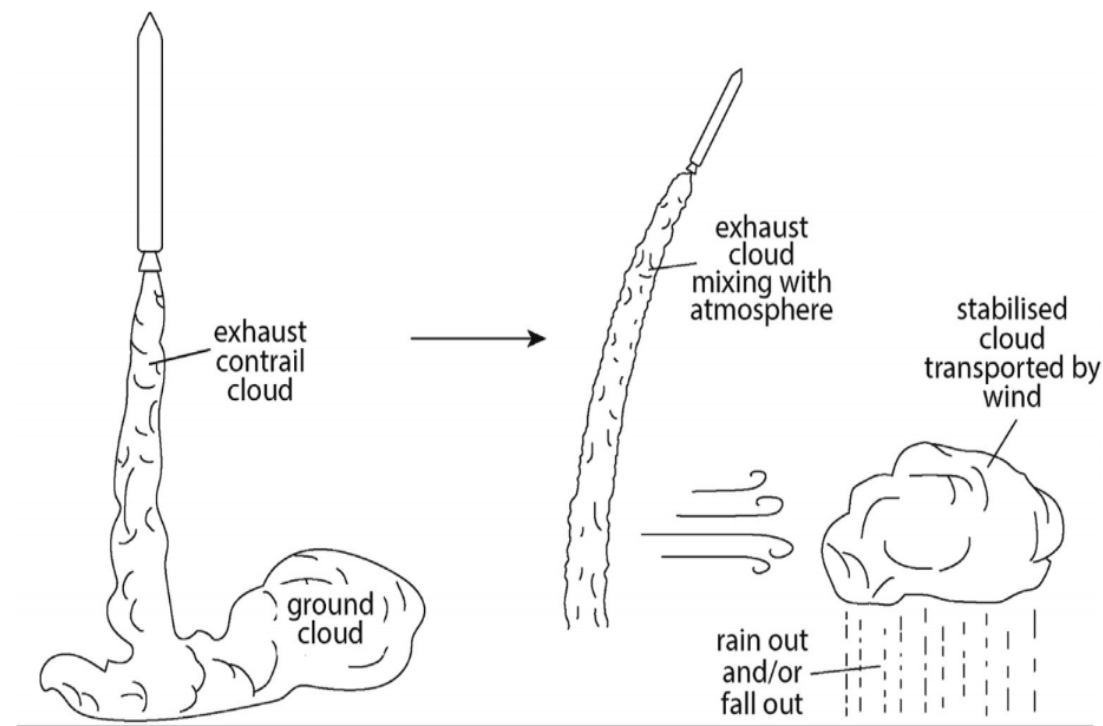


Fig. 3: Schema creazione ground cloud. Bibliografia 3

Uno studio del 1985 riguardante 9 lanci di Space Shuttle si è preoccupato degli eventuali danni che poteva subire la vegetazione nelle vicinanze della zona del lancio, a causa degli effetti provocati dalla ground cloud. Lo studio ha dimostrato che la vegetazione poteva essere fisicamente danneggiata dalla ground cloud risultante dal lancio per poi essere ulteriormente danneggiata dalla deposizione di inquinanti trasportati proprio dalla stessa ground cloud.

Nelle zone limitrofe al lancio i tipi di piante che hanno subito più danni sono stati gli arbusti e i piccoli alberi specialmente a causa della defogliazione, ovvero la **perdita parziale o totale di alcune foglie**, ai quali erano sottoposti lancio dopo lancio. L'erba è il vegetale che meglio ha sopportato questi effetti, invece per quanto riguarda le piante grasse e i piccoli arbusti si sono evidenziati diversi gradi di danno che variano in base alla singola specie. Più in generale nelle vicinanze della base sono stati osservati gravi danni come **bruciature acide e danni da deposito di ossido di alluminio** che hanno provocato un significativo declino di diverse specie vegetali.



Durante la fase di preparazione al lancio e soprattutto durante il decollo i motori del razzo producono livelli di rumore molto elevati che arrivano a toccare i **120-140 decibel** a distanze relativamente vicine. Di questo aspetto ne risente in particolar modo la fauna locale.

In primis le specie che ne risentono di più sono quelle specie sensibili al rumore per esempio diverse varietà di uccelli oppure diversi tipi di animali notturni che dipendono dalla percezione del suono per la caccia e possono essere particolarmente vulnerabili al disturbo acustico. Più in generale il rumore intenso generato dai lanci spaziali può causare disturbi alla fauna locale, gli animali possono essere spaventati e di conseguenza allontanarsi dal sito di lancio **interrompendo i loro schemi di comportamento normali** come la cura dei cuccioli o la ricerca di cibo. Tutto ciò comporta modifiche, quasi sempre negative, all'ecosistema delle aree nelle vicinanze dei siti di lancio. Per mitigare questi effetti sulla fauna locale si stanno pensando diverse soluzioni come, per esempio, l'uso di barriere fono assorbenti, l'uso di motori più silenziosi o la definizione di orari di lancio e zone di protezione limitate agli animali nelle fasi più critiche della partenza del razzo.

Il problema maggiore per quanto riguarda l'inquinamento causato dai lanci spaziali è rappresentato dalla degradazione dello strato di ozono. I lanci spaziali portano ad una perdita di ozono sia localizzata nella zona della scia di fumo lasciato dai fumi della combustione sia ad una riduzione globale della concentrazione dell'ozono.

Nel 1977 si sono effettuati i primi studi che stimano una **perdita del 40%** di ozono nella scia di passaggio del razzo, ma studi più recenti degli anni 2000 hanno rilevato una **perdita del 100%** in quella zona per poi tornare a livelli normali dopo circa un'ora dal passaggio.

Studi russi riguardanti i razzi alimentati con propellenti ipergolici hanno evidenziato che i principali inquinanti in questo caso sono gli **ossidi di azoto**.

Tutti gli studi comunque portano alla medesima conclusione ovvero che i razzi che impiegano propellenti liquidi provocano una **perdita di azoto dalle 60 alle 90 volte inferiore** rispetto ai più comuni propellenti solidi.

Per quanto riguarda la perdita di ozono a livello globale non sono stati fatti ancora studi approfonditi, ma le stime fatte indicano una perdita complessiva minima tra lo **0,05%** e lo **0,20%** tenendo conto di circa 1000 lanci all'anno.

Il **black carbon** è una particella emessa dalla combustione incompleta di materiale carbonioso, ad esempio dalla combustione del cherosene liquido, che quindi si può trovare nello strato di ozono a causa dei lanci spaziali. Queste particelle hanno la capacità di bloccare parte della radiazione emessa del Sole, provocando così un raffreddamento dello strato di ozono, ma sono anche responsabili di bloccare onde lunghe prodotte dall'emissione terrestre. L'**allumina** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) è un prodotto della combustione delle polveri di alluminio utilizzate come combustibile nei vettori che impiegano propellenti solidi. Anche questa particella come il black carbon riflette parte della radiazione ricevuta dal Sole e intrappola parte della radiazione ricevuta dalla Terra.

Il forcing radiativo di queste due molecole è circa  **$10^5$  volte maggiore** di quello della più comune  $\text{CO}_2$ .

Queste molecole danno vita ad un effetto serra proprio nello strato di ozono. La temperatura gioca un ruolo di **catalizzatore** nelle reazioni dell'ozono causandone una degradazione più rapida.



Fig. 4: Black carbon. Bibliografia 13



Fig. 5: Triossido di dialluminio (Allumina). Bibliografia 14

Gli scienziati preferiscono utilizzare sistemi di osservazione a terra poiché sono più economici rispetto alla costruzione di radiotelescopi orbitanti come il James Webb. Per evitare l'inquinamento luminoso, i siti di osservazione vengono posizionati in aree buie e poco popolate, ma è difficile evitare i **disturbi ottici** causati dai satelliti in orbita bassa come Starlink di SpaceX e altri.

Questi satelliti riflettono la luce solare, oscurando i corpi celesti più deboli nel cielo notturno.

Le costellazioni di satelliti sono preferite per motivi economici e di sicurezza, ma causano disturbi nell'osservazione dello spazio.

Per affrontare questo problema, si stanno studiando tecnologie per rendere i satelliti meno visibili e regolamentazioni per limitarne il numero e la luminosità.



Fig. 6: Scia di satelliti nella zona del riminese. Bibliografia 15

In conclusione, questa tesi ha analizzato i vari aspetti dell'impatto dei lanci spaziali sull'ambiente terrestre.

Attraverso un'esplorazione delle diverse fonti di inquinamento, a partire dall'inquinamento a terra, per poi passare alle particelle inquinanti e altri agenti inquinanti, è emerso un quadro complesso delle conseguenze ambientali dei programmi spaziali.

L'importanza di adottare misure di mitigazione e sviluppare **tecnologie più pulite e sostenibili** nel settore aerospaziale è diventata evidente, al fine di proteggere l'ecosistema terrestre e garantire un futuro sostenibile in previsione di un aumento dei lanci spaziali in quanto attualmente questo settore impatta in minima parte sull'ambiente rispetto ad altri campi della vita.

L'integrazione di **politiche ambientali** più rigorose e la **collaborazione tra agenzie spaziali** e organizzazioni internazionali sono essenziali per affrontare efficacemente questa sfida globale e perseguire l'esplorazione spaziale in modo responsabile e sostenibile.

1. Ioannis W. Kokkinakis and Dimitris Drikakis, Atmospheric pollution from rockets, in “*Physics of fluids*”, maggio 2022. Kellogg, W.W., Pollution of the upper atmosphere by rockets, in “*Space Sci Rev 3*”, 275–316 (agosto 1964).
2. Abdrazak, P. Kh, and K. Sh Musa. "The impact of the cosmodrome «Baikonur» on the environment and human health” *International Journal of Biology and Chemistry* 8.1 (2015): 26-29.
3. Dallas, J. A., et al. "The environmental impact of emissions from space launches: A comprehensive review." *Journal of Cleaner Production* 255 (2020): 120209.
4. Ul'yanovskii, Nikolay V., et al. "Migration and transformation of 1, 1-dimethylhydrazine in peat bog soil of rocket stage fall site in Russian North." *Science of the total environment* 726 (2020): 138483.
5. Lonsdale, Jemma-Anne, and Claire Phillips. "Space launches and the UK marine environment." *Marine Policy* 129 (2021): 104479.
6. Miraux, Loïs. "Environmental limits to the space sector's growth." *Science of The Total Environment* 806 (2022): 150862.
7. Semenkov, Ivan, and Tatyana Koroleva. "Review on the environmental impact of emissions from space launches: a case study for areas affected by the Russian space programme." *Environmental Science and Pollution Research* 29.60 (2022): 89807-89822.
8. Viikari, Lotta. "Environmental aspects of space activities." *Handbook of space law*. Edward Elgar Publishing, 2015. 717-768.
9. Ryan, Robert G., et al. "Impact of rocket launch and space debris air pollutant emissions on stratospheric ozone and global climate." *Earth's Future* 10.6 (2022): e2021EF002612.
10. Miraux, Loïs. "Environmental limits to the space sector's growth." *Science of The Total Environment* 806 (2022): 150862.
11. Koroleva, Tatyana V., et al. "The environmental impact of space transport." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 58 (2018): 54-69.
12. <http://www.nonnodondolo.it/content/eutrofizzazione>
13. [https://it.wikipedia.org/wiki/Nero\\_di\\_carbone](https://it.wikipedia.org/wiki/Nero_di_carbone)
14. [https://it.wikipedia.org/wiki/Ossido\\_di\\_alluminio](https://it.wikipedia.org/wiki/Ossido_di_alluminio)
15. <https://www.riminitoday.it/social/cielo-satelliti-elon-musk-visibili-anche-romagna.html>

*GRAZIE PER L'ATTENZIONE*