

Principales tipos de contaminación derivados de la operación de vehículos espaciales del Turismo Espacial

González Ghirimoldi Hernán^a; Coppa Matias^b; Di Bernardi Alejandro^b

^aFacultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional de La Plata. Calle 6 N° 777 e/ 47 y 48. 1900, La Plata, Pcia. Buenos Aires, Argentina.

^bGrupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Pcia Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

El presente trabajo se centra en el análisis de la contaminación generada por la actividad de vehículos espaciales, y en particular aquellos destinados para vuelos con fines turísticos. Del presente escrito surgen los incrementos en los niveles de emisiones de gases y remanentes tóxicos de combustibles que podrían afectar la integridad de los ecosistemas terrestres como consecuencia del lanzamiento de vuelos turísticos al espacio de forma regular a escala anual.

1.- INTRODUCCION

El Turismo Espacial se está convirtiendo en uno de los mayores usos comerciales del espacio, empresas como SpaceX, Virgin Galactic y Blue Origin tienen entre sus proyectos vuelos turísticos espaciales. Recientemente la empresa SpaceX confirmó el envío de un turista japonés que realizará una órbita a la Luna. Asimismo, en febrero de este año 2019, la compañía Virgin Galactic envió exitosamente su primer pasajero al espacio, y planea comenzar con los viajes de turistas al espacio a mediados del corriente año 2019.

El intensivo uso comercial del espacio conllevará un aumento en los niveles de emisiones de contaminantes por parte de los vehículos espaciales que debe ser considerado para poder desarrollar estas actividades en el largo plazo. De este modo, en este trabajo se realizará un breve análisis de los principales tipos de contaminación resultantes de la actividad de las aeronaves espaciales y los incrementos en los niveles de contaminación que implicarían cientos de vuelos turísticos al espacio al año.

A partir de una revisión bibliográfica exhaustiva de los principales trabajos académicos publicados, se analizan los efectos contaminantes de los vehículos asociados a los viajes espaciales con fines turísticos.

Se seleccionaron aquellos trabajos que han sido publicados a partir del siglo XXI, especialmente de los últimos seis años, previos a la fecha de elaboración de este escrito, ya que los resultados se basan en las últimas tendencias y desarrollos en materia de tecnología espacial.

Priorizando aquellas investigaciones referentes específicamente a la contaminación de residuos sólidos y fragmentos generados por la operación de los vehículos aeroespaciales, se centró el análisis en la afectación debido a los viajes orbitales y suborbitales.

Producto de la operación de los vehículos espaciales, se analizan los efectos ambientales y el potencial impacto de los residuos de combustible y productos de combustión más nocivos: la Dimetilidrazina Asimétrica y el Dióxido de Carbono, así como el producto de otros residuos de combustible.

2.- METODOLOGIA

3.- DESARROLLO

TURISMO ESPACIAL-BREVE INTRODUCCIÓN

El turismo espacial nace como una necesidad de financiamiento de la Agencia Espacial rusa, luego del colapso de la Unión Soviética. Ante esta necesidad de fondos, esta entidad se inclinó por vender los asientos sobrantes para recaudar mayores ingresos y así poder continuar con su funcionamiento. A partir de esta nueva posibilidad, 9 turistas pagaron los millones solicitados por la agencia rusa y emprendieron viaje a la Estación Espacial rusa MIR, en los primeros vuelos y posteriormente a la Estación Espacial Internacional (ISS por sus siglas en inglés). Todos ellos volaron con el sistema de propulsión ruso Soyuz [21] [17].

Actualmente, empresas como SpaceX, Virgin Galactic y Blue Origin, lideran la oferta de viajes espaciales turísticos. Estas compañías cuentan con tecnología de vanguardia, como la utilización de lanzadores reutilizables, combustibles de bajo impacto ambiental y utilización de centros de lanzamiento a partir de acciones de bajo impacto, como el ahorro de energía por parte de Virgin Galactic y la reutilización de plataformas por parte de Blue Origin. Sus principales vehículos son: el Falcon 9 y Falcon Heavy, en el primer caso, SpaceShipTwo, para el segundo caso y New Shepard para la última compañía mencionada [17].

Con esta nueva modalidad de viajes, las emisiones de gases y demás contaminantes se verán incrementadas, es por esto que resulta de utilidad analizar cuánta contaminación se agregaría con la introducción del Turismo Espacial al mercado de viajes global.

Por estas razones, se procede a desarrollar en este trabajo, un análisis del incremento de contaminantes generado por esta tipología de viajes.

PRINCIPALES CONTAMINANTES GENERADOS POR LA OPERACIÓN DE VUELOS ESPACIALES

Para determinar el incremento de las emisiones de contaminantes por parte de la tipología de viajes de centro de estudio de este trabajo es necesario analizar los principales tipos de residuos generados por la actividad de vehículos espaciales en general.

Los principales tipos de residuos generados por los vehículos espaciales se pueden dividir de la siguiente manera:

- Gaseosos
- Acústicos
- Sólidos
- Líquidos

Este trabajo sólo se enfocará en los contaminantes gaseosos, sólidos y líquidos, quedando los contaminantes acústicos para futuros trabajos.

Gaseosos- Aspectos Generales

Se inicia este apartado considerando las emisiones de gases con potenciales efectos adversos sobre el medio antrópico y natural. Como consecuencia de la actividad de los vehículos espaciales, diversos tipos de gases y vapores son emitidos y que de acuerdo a su concentración y sus características pueden implicar diversos tipos de riesgos ambientales.

Entre las emisiones gaseosas de los cohetes se pueden destacar CO (monóxido de carbono), N₂ (Dinitrógeno) H₂ (Dihidrógeno), H₂O (Protóxido de hidrógeno o Agua) y CO₂ (Dióxido de carbono). Mientras que los cohetes de combustible sólido adicionalmente inyectan cantidades significativas de partículas de óxido de aluminio (Al₂O₃) y componentes gaseosos de cloro en la atmósfera [20].

Los efectos atmosféricos de las emisiones de los cohetes dependen del tipo de motor y combustible utilizado. Los cohetes de combustibles sólidos compuestos por carburantes de aluminio y oxidantes de perclorato de amonio (NH₄ClO₄) representan sólo una mínima fracción del total de

existencias de emisiones emanadas por cohetes. Por otro lado, existen los sistemas de cohetes lanzadores de combustibles líquidos de oxígeno/querosén (LOX/Querosén), como los que utiliza SpaceX, que son comúnmente utilizados y que también tienen potenciales efectos negativos sobre el ambiente terrestre [20].

Estos gases, aunque pueden representar un nivel bajo de emisiones, pueden ser muy tóxicos si contienen berilio o partículas de óxido de berilio, gas de cloro, gas de ácido clorhídrico, gas de ácido fluorhídrico o algunos otros compuestos de flúor. Cuando se utiliza un oxidante de perclorato de amonio, el gas de escape puede contener hasta aproximadamente un 14% de ácido clorhídrico, que es un gas tóxico. Para motores de cohetes grandes, esto puede significar muchas toneladas de gas altamente tóxico [9] [20].

En lo que concierne a los posibles efectos sobre el medio antrópico y sobre la fauna local, los derrames accidentales de oxidantes líquidos, tales como tetróxido de nitrógeno o gases rojos de ácido nítrico, pueden generar nubes tóxicas de gases corrosivos, las cuales tienen mayor densidad que el aire y que permanecen cerca del suelo. Algunos gases como CO (Monóxido de carbono) o CO₂ (Dióxido de carbono) causan daños a la salud si son inhalados en dosis concentradas. Gases tales como el cloruro de hidrógeno (HCl) de los propelentes sólidos que usan un oxidante de perclorato, dióxido de nitrógeno (NO₂), tetróxido de nitrógeno (N₂O₄) o vapores de ácido nítrico (HNO₃) tienen niveles bajos de cantidades de inhalación permitidas antes de que se produzcan daños en la salud. El daño potencial que pueden generar estos gases se incrementa con las cantidades emitidas, el nivel de empuje y la duración del fuego del vehículo en las regiones dentro o cerca del sitio de lanzamiento [9] [20].

Dicho esto, cabe destacarse que existen métodos de mitigación y distintas variables a considerar para aminorar las emisiones de gases nocivos y mitigar las emanaciones producidas. Un factor muy importante a tener en cuenta es el clima local al momento de realizar un lanzamiento. La dispersión por el viento y el esparcimiento y

dilución con el aire pueden reducir la concentración de materiales tóxicos a niveles tolerables en unos pocos minutos, pero esto depende de las cantidades en las que estén presentes y de las condiciones climáticas locales. Por lo tanto, se debe poner especial atención al momento de programar los lanzamientos cuando existe la posibilidad de que el viento disperse estos gases a áreas pobladas o con gran presencia de fauna. Para la expulsión de gases extremadamente nocivos (por ejemplo aquellos que contienen óxido de berilio o ciertos componentes de flúor) y usualmente para todos los niveles bajos de propulsión, los gases emitidos desde las instalaciones de prueba deben ser capturados, tratados químicamente, desintoxicados y purificados antes de ser liberados a la atmósfera [18].

Sólidos- Aspectos Generales

Entre los principales tipos de residuos generados por la actividad de los vehículos espaciales se encuentran los residuos sólidos. Estos pueden presentarse en la forma de desprendimientos que caen a la superficie de la Tierra provenientes de vehículos lanzados al espacio o también en la forma de partículas sólidas residuales de los combustibles utilizados por las naves espaciales.

La caída de fragmentos representa una de las amenazas principales. Más allá de las caídas planeadas de vehículos espaciales, las cuales los expertos calculan en varias docenas al año, las caídas de emergencia también ocurren [9].

En la actualidad, la NASA estima que caen a la superficie de la Tierra entre 50 y 100 toneladas de basura espacial al año a la superficie de la Tierra [11].

Aunque los principales residuos sólidos se conforman por los ya mencionados fragmentos que se desprenden de los vehículos espaciales, también existen otros tipos de contaminación derivados de los combustibles sólidos. De igual manera, según [18] los propelentes sólidos no tienen problemas de toxicidad significativos.

Vale mencionar, sin embargo, que existen varios ingredientes de propelentes [por ejemplo, algunos

agentes de reticulación, plastificantes (componente para agregar viscosidad), estabilizadores, endurecedores, catalizadores de combustión y otros aditivos] que pueden ser toxinas con consecuencias dermatológicas o respiratorias, y algunos son cancerígenos o potencialmente cancerígenos en animales. Además, los combustibles sólidos tienen menor cantidad de elementos oxidantes de lo necesario para alcanzar la combustión. Como consecuencia, sustancias no quemadas aparecen como hollín, que pueden generar impactos negativos sobre el medioambiente [9] [18].

Líquidos- Aspectos Generales

Por último dentro de los cuatro tipos de residuos principales que surgen como consecuencia de la actividad de vehículos espaciales se encuentran los residuos líquidos. Estos se presentan en la forma de desechos de combustibles de cohetes.

A continuación se detallan los peligros más comunes que pueden ocasionarse a partir de los propelentes líquidos:

Varios propelentes, como el tetróxido de nitrógeno, el ácido nítrico, el óxido nítrico y/o el peróxido de hidrógeno, sólo pueden manipularse en contenedores y tuberías de materiales especiales. Cuando cualquier propelente se contamina con productos de corrosión, sus propiedades físicas y químicas pueden alterarse lo suficiente como para que no sea adecuado para su propósito inicial. La corrosión causada por productos gaseosos expulsados es más crítica en aplicaciones donde estos productos pueden dañar estructuras de lanzamiento en el suelo y partes del vehículo, y/o afectar a comunidades y hogares cerca de las instalaciones o del sitio de prueba [18].

Con el tiempo, algunos propelentes (p. Ej., Peróxido de hidrógeno o nitrometano) pueden volverse inestables en sus tanques de almacenamiento e incluso pueden detonar en ciertas condiciones, dependiendo de las impurezas locales, las temperaturas y las magnitudes de choque. Cuando los oxidantes líquidos (por ejemplo, el oxígeno líquido) y los

combustibles, se mezclan involuntariamente, a veces puede ocurrir una detonación. Los accidentes inusuales en el lanzamiento de vehículos de vuelo o accidentes de transporte pueden causar que se produzca esta mezcla de sustancias y que se generen explosiones como consecuencia de ello [18].

Muchos oxidantes reaccionan con una variedad de compuestos orgánicos. El ácido nítrico, el tetróxido de nitrógeno, el flúor y/o el peróxido de hidrógeno reaccionan espontáneamente cuando entran en contacto con muchas sustancias orgánicas y causan incendios. La mayoría de los combustibles de cohetes expuestos al aire son fácilmente inflamables cuando se calientan. El oxígeno solo no suele iniciar un incendio con materiales orgánicos, pero intensificará en gran medida un incendio existente [18].

Los accidentes imprevistos durante el funcionamiento del motor o accidentes de tráfico en carreteras o ferrocarriles mientras se transportan materiales peligrosos, incluidos muchos propelentes, han causado derrames que exponen a las personas a incendios intensos y/o riesgos potenciales para la salud [18].

La exposición a muchos propelentes de uso común representa un peligro para la salud humana. Las sustancias tóxicas no quemadas afectan al cuerpo humano de varias maneras, siendo los trastornos de salud ocasionados por estas sustancias, propios de cada tipo de combustible. El ácido nítrico causa quemaduras graves en la piel y desintegración de los tejidos. Asimismo, el contacto de la piel con anilina o hidracina puede causar náuseas y otros efectos adversos para la salud. La hidracina, la monometilhidracina, la Dimetilhidrazina Asimétrica o el hidrato de hidracina son conocidos y sospechados de causar cáncer en animales y humanos como se hace mención más adelante en este escrito. Muchos vapores provenientes de los combustibles causan irritación en los ojos, incluso en pequeñas concentraciones. La ingestión inadvertida de varios de los propelentes líquidos puede causar una grave degradación de la salud. La inhalación de gases de escape tóxicos o combustibles

líquidos vaporizados es quizás el peligro más común para la salud. Estos componentes pueden causar daños severos si la exposición es larga o en concentraciones que exceden los valores máximos establecidos. En los Estados Unidos, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) ha establecido límites o umbrales en la exposición y concentración permitidos para la mayoría de los propelentes químicos [18].

LAS PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN Y OTROS CONTAMINANTES CONTEMPLADOS

Este trabajo se inició mencionando los residuos y la contaminación ambiental que produce la operación de los vehículos espaciales. Esta no es la única manera en que la actividad de aeronaves puede afectar al medioambiente. En este apartado se profundiza más acerca de los tipos de impactos ambientales que producen las operaciones de aeronaves espaciales.

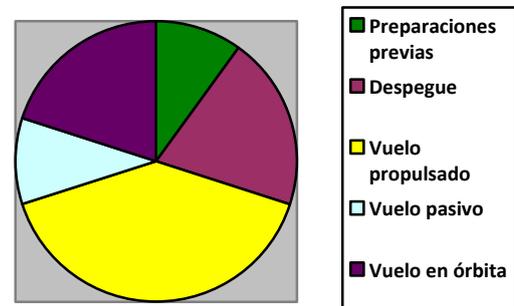
Las actividades de vehículos espaciales llevadas a cabo en los centros de lanzamiento generan en mayor o menor medida algún efecto sobre el entorno adyacente.

En rasgos generales las principales fuentes de contaminación en la actividad espacial son: En primer lugar, el equipamiento en tierra, las instalaciones de producción y construcción por los derrames de combustible. A esto se le agregan los motores, las unidades de cohetes y los fragmentos derivados de los lanzamientos por las emisiones de gases y partículas tóxicas. Y finalmente, los vehículos espaciales que se salen de su órbita y caen a la Tierra, así como también, sus fragmentos derivados que en algunos casos alcanzan la superficie terrestre produciendo contaminación y poniendo en riesgo a las personas y animales que habitan las zonas de impacto de los desprendimientos [14] [12] [9] [18].

La contaminación en los sitios de lanzamiento se produce principalmente en las siguientes fases de la operación de vehículos espaciales:

- Durante las preparaciones previas al despegue de los lanzadores
- Durante el despegue
- Durante el vuelo propulsado
- Así como también en caso de accidentes [9], [2]

Según [9] algunos expertos afirman que las preparaciones previas al despegue representan el 10% de la contaminación total, mientras el despegue representa el 20%, el vuelo propulsado el 40%, el vuelo pasivo 10% y en órbita el 20%.



(Tabla 1, Proporción de contaminación de las distintas fases de operación de los vehículos espaciales).

Durante los accidentes el grueso de la contaminación aparece en el soporte de lanzamiento en el que tuvo lugar, sin tener en cuenta las operaciones previas.

En las etapas previas al lanzamiento, la mayor parte de la contaminación se produce en el momento en que se carga combustible al lanzador y la aeronave. Es necesario llenar los tanques de combustible en un período corto de tiempo, con grandes cantidades de combustible que contienen distintos niveles de toxicidad, corrosión e inflamabilidad, como ya se ha explicado en apartados anteriores.

La probabilidad de contaminación se ve incrementada en los casos que:

- Existen derrames de los componentes
- Las tuberías presentan rupturas
- En casos de drenaje, descarga y neutralización de los tanques de combustible, tuberías o equipamiento

- Y en situaciones que acontecen cuando el vuelo es cancelado [9].

A pesar de que se toman rigurosas medidas de prevención, el vapor y gases de componentes provenientes de los combustibles líquidos continúan filtrándose a la atmósfera y los combustibles continúan derramándose sobre la superficie durante el suministro de los mismos. Los casos más peligrosos son los derrames de hidrógeno durante las instancias de preparación previas al lanzamiento con motores de hidrógeno-oxígeno, debido a que la combinación de estos dos gases puede desatar una explosión [9].

En estos casos en que se generan filtros y derrames de componentes tóxicos, estos pueden contaminar el suelo, el agua y la atmósfera del sitio de lanzamiento y áreas adyacentes. El vapor tóxico que se genera es movilizado por el viento causando quemaduras en las personas y animales salvajes, pudiendo matar plantas y organismos vivos en el agua [9].

En la etapa de lanzamiento se genera contaminación con combustibles no quemados o sus óxidos. Esto se relaciona, mayormente con combustibles sólidos. Por citar un ejemplo, un lanzamiento del *Space Shuttle* generaba una capa gruesa de varios centímetros, compuesta por hollín, de un color plateado, envolviendo los alrededores de la plataforma. El hollín es el óxido de aluminio que aparece durante la combustión de toneladas de combustible sólido en los aceleradores de lanzamiento. A pesar de que se cree que el polvo es ambiental y químicamente inactivo, contamina considerablemente el suelo y la atmósfera [9].

Algunos expertos temen que el aluminio en el ambiente podría desatar tumores cancerígenos. El hollín y otros productos de la combustión tienen un impacto negativo sobre la capa de ozono y generan como consecuencia lluvias ácidas [9].

Durante el despegue de un cohete acelerador/lanzador, se quema oxígeno en la atmósfera lo que produce contaminación a través de los agentes resultantes del proceso de combustión. Una cantidad considerable de óxido nítrico, dióxido de carbono y otras sustancias

venenosas son evacuadas a la atmósfera. La quema de oxígeno, crea subproductos del cloro y flúor que pueden generar agujeros en la capa de ozono y desatar lluvias ácidas y de otros elementos químicos agresivos. En ciertos casos, se les aplica agua a las llamas de escape para reducir la temperatura del flujo de escape y consecuentemente reducir su impacto en la plataforma de despegue, así como también poder disminuir los niveles de ruido generados [9].

No obstante, el mayor impacto negativo sobre el medioambiente como consecuencia de la operación de vehículos espaciales es producido por accidentes y catástrofes de cohetes aceleradores en las plataformas de despegue o durante los primeros segundos del vuelo. La gravedad de los impactos puede verse acrecentada debido a explosiones, así como también, a causa de incendios de tanques repletos de combustible de cohetes lanzadores que llevan cargamento [9]. El poder de la explosión, de acuerdo a algunas estimaciones, puede alcanzar entre el 70 y el 90% de la potencia explosiva del trinitrotolueno (más conocido como TNT, compuesto químico explosivo) [9]. Un ejemplo de esta situación fue el accidente ocurrido el 4 de octubre de 1990, cuando el cohete lanzador Zenith explotó poco después de haber despegado al caerse encima de la plataforma de lanzamiento. La explosión fue tan poderosa que motores de un peso de entre 2 y 3 toneladas fueron expulsados a una distancia de hasta 3 km. En el caso del sitio Baikonur, ubicado en Kazajstán, en los primeros 20 años de funcionamiento, 3 plataformas de lanzamiento fueron destruidas debido a explosiones [9].

Una de las mayores catástrofes involucró al *Challenger Space Shuttle* el 28 de enero de 1986. El cohete explotó 74 segundos después de haber despegado y miles de espectadores lo presenciaron. Siete tripulantes perdieron la vida. La atmósfera, el suelo y el océano fueron contaminados a partir de este incidente [9].

Los fragmentos resultantes de explosiones como la que fue mencionada en el párrafo anterior pueden alcanzar grandes distancias. En el caso de la explosión del *Challenger*, los fragmentos

resultantes cayeron al mar en un área de 50km² a una distancia de 1,5 kilómetros de la plataforma. Se ha reportado que fragmentos resultantes de un estallido, llegaron a una distancia de 13 kilómetros luego de que el Delta-2 explotara el 7 de enero de 1997 [9].

Sin embargo el uso de cohetes lanzadores con preparación pre-lanzamiento completamente automática permite confiar que la situación mejorará. Por citar un ejemplo, los cohetes R-7A necesitan 100 personas en la plataforma para cargar combustible, mientras que en el caso del cohete Angara, no se necesita a nadie presente en la plataforma [9].

Según los autores [14] la evaluación de los accidentes no puede estar basada en experiencia práctica sino que la única manera de efectuar un estudio de los problemas de seguridad es a través de un cálculo de los factores de riesgo. El peligro potencial debe ser evaluado de manera cuantitativa.

Según los dichos de estos autores, la concepción reactiva y *a posteriori* de los incidentes en los lanzamientos de los cohetes debe ser sustituida por una perspectiva preventiva. Los autores proponen estimar los riesgos aceptables en base a pronósticos a través de modelos matemáticos y no con una perspectiva reactiva como la que se tiene actualmente.

CONTAMINACIÓN POR DESPRENDIMIENTO DE ETAPAS DE LOS VEHÍCULOS ESPACIALES

Uno de los mayores impactos provenientes de la actividad de vehículos espaciales es la caída de fragmentos o etapas de aeronaves. En este apartado se procede a explicar en mayor detalle acerca de este punto.

La caída de distintos elementos de tecnología espacial en la Tierra genera un serio peligro ambiental. Este impacto deriva de las construcciones específicas de los cohetes lanzadores de la actualidad [9]. Esto se debe a que los lanzadores espaciales han tenido y aún tienen una característica de construcción

específica: poseen varias etapas. Esta característica gradualmente se ha ido convirtiendo en un peligro para el medioambiente a medida que los vuelos espaciales se han intensificado [9]. Sin embargo, el desarrollo de vehículos reutilizables está revirtiendo esta problemática, lo cual como se comentó en el inicio, es una característica presente en todos los vehículos utilizados para el Turismo Espacial.

Cuando un cohete lanzador ingresa a la atmósfera, sus etapas utilizadas caen al suelo desde una altitud de varias docenas de kilómetros. El momento de la caída, así como el peso y tamaño de los objetos, son bien sabidos. Por lo tanto, existe una buena posibilidad de evitar un impacto ambiental negativo [9].

Las partes de los lanzadores caen en áreas escasamente pobladas a lo largo del trayecto del vuelo y se rompen en fragmentos. Estas partes de acuerdo a lo expuesto por los autores [9] son llamadas “Las áreas de impacto de las unidades de separación”. Estas áreas pueden estar localizadas a diferentes distancias: alrededor de 800 km para cohetes de 2 etapas y unos 2.500 km para cohetes de 3 etapas.

La industria espacial históricamente ha estado llevando a cabo una práctica irracional en lo concerniente al diseño de nuevas áreas de impacto para nuevos cohetes, ya que con algunas excepciones, estas generalmente no coincidían con las ya existentes. Como consecuencia, las zonas de colisión se incrementaron considerablemente, así como también, el territorio que fue retirado de su uso económico y fue contaminado por fragmentos de vehículos espaciales [9].

La contaminación más importante que ocurre en las áreas de impacto tiene lugar cuando las partes de los cohetes golpean el suelo, caen en pedazos y derraman el combustible restante. Debido a que las zonas de impacto están localizadas en lugares inhabitados, las partes de los cohetes no causan daño a las personas si el vuelo va de acuerdo a lo planeado. Sin embargo, las desviaciones imprevistas ocurren ocasionalmente, por lo que es imposible garantizar plena seguridad a las

personas que habitan en zonas aledañas a las áreas de impacto [9].

Las cantidades de metal que caen al suelo difieren de acuerdo al tipo de cohete. Se estima que unas 15 toneladas de construcciones de metal han caído a la superficie por cada cohete pesado y mediano ruso. La cifra puede elevarse a varias docenas de toneladas en el caso de cohetes muy pesados. Por citar un caso, unas 180 toneladas de restos de metal cayeron al suelo luego del despegue del lanzador *Saturn-5* con un cohete Apollo. Los expertos estiman que un promedio de hasta 70 toneladas de metal o el 10% del peso total del lanzador se desploma en la superficie terrestre luego de cada lanzamiento [9].

Los fragmentos de cohetes que caen a la superficie terrestre, contaminan no sólo la tierra, sino que también los océanos de todo el mundo. Con respecto a la reducción de la contaminación, primeramente es necesario fijar estrictamente el tiempo y el lugar del impacto. Por ejemplo, los Estados Unidos, conduce mediciones telemétricas y de trayectoria de vuelos de ensayo de objetos espaciales para localizar las áreas de impacto de los fragmentos, y usa hidrófonos que facilitan la tarea de localización. La información como el lugar de la caída, la profundidad y temperatura del agua, las corrientes locales, la dirección del viento, la cantidad de residuos de combustibles y el estado del océano permiten calcular el peligro ambiental al determinar la contaminación en el área de impacto y su dispersión [9].

La elección del área de impacto solía depender, por un lado, de la necesidad de optimizar las características del cohete lanzador, incluyendo aquellos que contienen etapas separables. Por otro lado, dependía también de la intención de hacer caer las partes en zonas escasamente pobladas. Por lo tanto, el cambio en la consideración de las áreas de impacto como lo más ambientalmente favorables, implicó que se modificaran las características de las nuevas generaciones de cohetes. Estas nuevas consideraciones son estudiadas por el centro espacial ruso Khrunichev, en particular. Un ejemplo de esto son las modificaciones implementadas en la construcción del Proton-M moderno, que

permitieron reducir el área de impacto necesaria, a un radio de 3.000 km² menor. Asimismo, la utilización del promotor cohete Angara permite que no se necesite un área de impacto para la primera etapa [9].

Sin embargo, estos nuevos métodos para reducir las áreas de impacto deben implementarse en todas las agencias espaciales del mundo. Debido a la incorporación de economías emergentes a las actividades espaciales, han incrementado los riesgos generados por la caída de fragmentos de cohetes [9]. Particularmente, crece la presión ambiental en los océanos de todo el mundo. Países como Rusia y Noruega descargan las partes de sus lanzadores en el Océano Ártico. El Océano Pacífico es el lugar de evacuación para tecnologías espaciales de los Estados Unidos, Japón y la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés) así como también para objetos sacados de órbita intencionalmente por centros de control de misión [9].

Al considerar cuál se debe optar, si contaminación por basura espacial sobre el suelo o sobre los océanos, hasta el momento, no existen recomendaciones científicas fundamentadas al respecto. Sin embargo, [9] sostiene que la contaminación sobre la tierra tiene menores impactos. Muchos componentes de propelentes y la Dimetilhidrazina Asimétrica (DA) en particular se disuelven en agua ilimitadamente. La contaminación producto de la DA se esparce más rápidamente en el agua que sobre el suelo. Esta no puede localizarse como sobre la tierra, cerrando el área y descontaminándola. En el agua, la DA se introduce fácilmente en partículas en el océano y consecuentemente podría introducirse en el organismo de seres humanos [9].

Por otra parte, otras de las formas de contaminación que derivan de la caída de fragmentos y partes de vehículos espaciales es la contaminación a través de los residuos de combustible remanentes en las distintas partes que colisionan contra la superficie terrestre. Luego de que un motor de una de las etapas deja de funcionar, su tanque todavía contiene algunos residuos de combustible. El propelente también permanece en tuberías, bombas y válvulas. Este

combustible residual en los tanques puede ser clasificado en reservas de seguridad y en combustible no quemado [9].

Los tanques están cargados con un pequeño exceso de modo de que los motores no se detengan durante el vuelo por falta de combustible. Las reservas de seguridad usualmente comprenden del 2 al 3 % de la cantidad total. La proporción puede parecer pequeña en un principio, sin embargo en lanzadores pesados puede comprender docenas de toneladas en cifras absolutas [9].

De acuerdo al diseño del vehículo espacial, la etapa de separación se cae con residuos de combustible al suelo o descarga el combustible en la atmósfera y se cae sin él. En el primer caso, el 90 % del carburante se quema debido al contacto con oxígeno en el aire. El combustible restante es esparcido por el viento en forma de gotas y vapor a largas distancias para luego introducirse en depósitos de precipitaciones atmosféricas. Algunas etapas caen en los mares y océanos y contaminan las aguas. En el segundo caso, se descarta la contaminación en el suelo pero aumenta la contaminación en el aire. De todas formas, la manera de evitar dicha contaminación es creando tecnología espacial orientada a preservar la naturaleza y haciendo que los motores quemem el llamado combustible “puro”.

El principal método para contener la contaminación causada por los componentes tóxicos de los combustibles, es descartar todas estas clases de carburantes y cambiarlos por propelentes que sean ambientalmente seguros para lanzadores pesados. Ejemplos de estos tipos de lanzadores son el Angara y el vehículo operado por la empresa de Turismo Espacial Blue Origin, ya que en el último caso, sus productos de combustión son vapor de agua [9].

Por otra parte, la colisión, o desviación de su órbita de un vehículo espacial y sus fragmentos representa otro tipo de contaminación a destacar. Es necesario distinguir entre:

- Las desviaciones de órbita controladas o autorizadas

- Y las colisiones de carácter fallido, como es el caso de una colisión accidental o de emergencia

Los descensos controlados con el normal funcionamiento de todos los sistemas, generalmente no supone un peligro para la población o las estructuras en la superficie. En un momento preestablecido los frenos de los motores se encienden y funcionan durante un cierto período de tiempo, dirigiendo los fragmentos hacia una zona oceánica en donde se prohíbe la navegación para efectuar el deceso del objeto. El área debe ser lo suficientemente grande ya que la trayectoria de los fragmentos, lo cuales pueden variar tanto en tamaño como en masa, es prácticamente impredecible [9].

Estimar límites aproximados para el área de impacto y el momento de ingreso a la atmósfera no resulta una labor difícil. De esta forma, la velocidad y la resistencia aerodinámica del objeto son conocidas [9].

Es posible pronosticar el momento del impacto contra el suelo sólo durante el 15% del tiempo previo a la colisión, por lo que el nivel de precisión de medición es el que se pueda lograr durante ese lapso de tiempo. Sin embargo, en la mayoría de los casos, este período suele ser suficiente para tomar las medidas de seguridad necesarias [9].

No obstante, la amenaza de fragmentos de cohetes que caen a la superficie se incrementa sustancialmente en el caso de un vehículo y fragmentos incontrolables, ya que no se sabe si estas partes se quemarán por completo en la atmósfera o si alcanzarán la superficie y en qué forma lo harán [9].

Adicionalmente, los impactos de emergencia son incluso más peligrosos. Podrían ser causados por una variedad de razones incluyendo a la llamada “hinchazón” de la atmósfera causada por la actividad solar, la incapacidad del centro de control de controlar el vehículo, la ruptura repentina del cohete en fragmentos, el agotamiento de combustible o la incapacidad del vehículo de maniobrar [9].

A partir de lo comentado hasta aquí, se puede deducir que los mayores impactos derivados de la operación de las aeronaves espaciales se ocasionan por un lado, por la caída de fragmentos y vehículos fuera de control, los cuales terminan ocasionando el mayor efecto adverso sobre el ecosistema por la propia colisión y el riesgo de caída sobre zonas fuera de las áreas de impacto. Por otro lado, se encuentran los derrames de combustibles durante los procesos de rellenado, de traslado de los mismos y de operación general de los vehículos.

PRINCIPALES AGENTES CONTAMINANTES DETECTADOS

De acuerdo a la investigación realizada existen dos contaminantes principales que se destacan tanto por su nivel de peligrosidad, como por su presencia en cantidades emitidas que derivan de la actividad de vehículos espaciales en general, estos son:

- Por un lado, la Dimetilhidrazina Asimétrica, por su potencial efecto cancerígeno en animales y humanos, su capacidad de producir daños en el organismo de seres vivos, especialmente en el hígado, su alta capacidad de migración en suelos húmedos y su generación de subproductos con mayores niveles de toxicidad.
- Por otro lado, el Dióxido de Carbono, gas emitido en grandes cantidades por los vehículos aeronáuticos, y que tiene un efecto invernadero que puede causar un sobrecalentamiento en la atmósfera terrestre.

El primero de los contaminantes mencionados no es utilizado en las aeronaves de Turismo Espacial, sin embargo se lo tomará como caso extremo para analizar como impactaría en el ambiente el uso de este tipo de combustible por parte de un vehículo que realiza vuelos turísticos al espacio con regularidad.

Por otra parte se medirá las cantidades emitidas de Dióxido de Carbono por parte de los vehículos espaciales utilizados con propósitos de turismo.

VARIACIÓN DE LOS TIPOS DE CONTAMINACIÓN MENCIONADOS CON LA INSERCIÓN DEL TURISMO ESPACIAL EN LAS ACTIVIDADES ESPACIALES COMERCIALES

Resulta necesario analizar de manera cuantitativa con los datos obtenidos de los estudios recopilados, acerca de los incrementos de los agentes contaminantes que podría producir el Turismo Espacial de llevarse a cabo con regularidad.

Cabría preguntarse cómo es la situación en el caso particular del Turismo Espacial en cuanto a las emisiones de Dióxido de Carbono.

Según [6], las conclusiones de los estudios realizados sugieren que sólo un mínimo impacto podría ser atribuido a las actividades relacionadas al espacio efectuadas por el humano. Sin embargo, estas conclusiones optimistas fueron basadas en datos estadísticos disponibles a mediados de los 90, lo cual comprendió unas pocas decenas de vuelos por año en todo el mundo. Si los pronósticos realizados se cumplen, en unos pocos años el mercado del Turismo Espacial requerirá de alrededor de miles de vuelos por año, por lo que los niveles de contaminación aumentarían [6].

Al respecto, [15] publicó un estudio académico acerca del potencial cambio climático en el caso de que cohetes híbridos vuelen diariamente desde centros espaciales turísticos. De acuerdo con los autores, esto puede representar una amenaza para el equilibrio climático global, ya que los motores de los cohetes emiten más carbono negro por unidad de masa de combustible que los aviones y vehículos aéreos. Asimismo, se ha estimado que el tiempo de prolongación de la contaminación generada por las emanaciones de los cohetes, es mayor debido a la secreción directa de gases en la estratósfera superior (a diferencia de la contaminación de los aviones). Por lo tanto, 1.000 lanzamientos por año de cohetes suborbitales crearían una capa persistente de partículas de carbono negro en la zona norte de la estratósfera. Esto podría causar cambios potenciales

significativos en la circulación atmosférica global y las distribuciones de ozono y temperatura. Las abundancias del ozono estratosférico tropical se estiman que cambiarían hasta en un 1%, mientras que el ozono polar se vería modificado hasta en un 6%. Las temperaturas de la superficie polar se alterarían hasta en un grado Celsius regionalmente con impactos significativos en las fracciones de hielo del mar polar [15].

Esta discusión estuvo concentrada en las alteraciones en la fuerza radiativa de la atmósfera como consecuencia de las emisiones de dióxido de carbono. La fuerza radiativa es un parámetro que determina como las actividades humanas alteran el balance de energía de la Tierra. La radiación solar promedio en la Tierra es de 342 W/m². Una fracción (69%) de esta energía es absorbida por la Tierra y la atmósfera y debe ser irradiada de nuevo al espacio para un correcto balance de energía. El incremento en la concentración de gases de invernadero y otros contaminantes, tales como el carbono negro o dióxido de carbono, actúan en la absorción radiativa y los coeficientes de emisión de la atmósfera, cambiando los parámetros de fuerza radiativa debido a que se absorben las ondas cortas de radiación solar [6]. Por este motivo, según este estudio, mil vuelos anuales dejarían un impacto considerable en la atmósfera terrestre.

De acuerdo a lo mencionado por los autores [15] luego de una década de continuos lanzamientos, el promedio de la fuerza radiativa global del carbono negro excedería la fuerza del dióxido de carbono emitido en un factor de 105 y sería comparable a la fuerza radiativa de la aviación subsónica actual [6].

Adicionalmente, el autor [16] alude que los viajes suborbitales turísticos incrementarían las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. El autor proyecta que cada turista espacial que realice esta modalidad de viaje produciría 6 toneladas de CO₂ en el transcurso del viaje, sin tener en consideración las cantidades de energía y recursos que requieren los vehículos espaciales y el mantenimiento de las instalaciones en tierra.

En contraste, según [8], estudios extensivos acerca de las emisiones causadas por el transporte

espacial, en los que se incluye el Turismo Espacial, en el período de 2010-2065 en un escenario de 200.000 pasajeros espaciales por año reveló que las emisiones de los viajes turísticos espaciales rondarían entre el 0,006 y el 1,5% de las emisiones provenientes del transporte aéreo.

Aunque la información expuesta por este último autor citado refleja datos favorables al Turismo Espacial, hay que considerar que las emisiones causadas por este tipo de transporte cubren la mayoría de las emanaciones en altitudes mayores al tráfico de aerolíneas. Los gases expulsados en zonas sensibles de la alta atmósfera deben tener una especial consideración, del mismo modo, no hay que dejar de lado la contaminación proveniente de los centros espaciales [8].

Considerando los aportes de los trabajos citados en este apartado, es claro que mayores cantidades de vuelos anuales de vehículos para el Turismo Espacial incrementarían las emisiones de CO₂ a la atmósfera, y no menos importante, estas secreciones de gases se dan en lugares sensibles, al producirse directamente en la atmósfera.

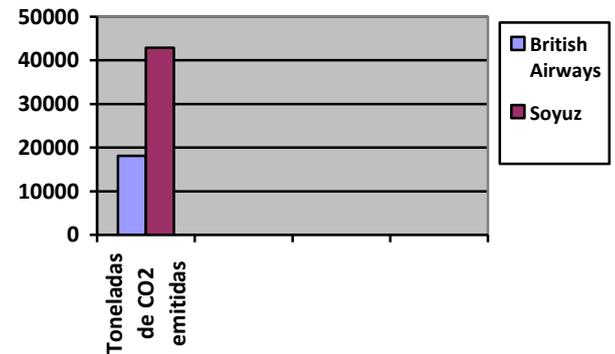
Sin embargo, resultaría de utilidad analizar de manera genérica, cuánto aportarían de CO₂ los vehículos de las compañías que se perfilan a ser los oferentes de viajes turísticos al espacio mencionadas en este trabajo.

De acuerdo con [17] y [19] la compañía de viajes turísticos espaciales Virgin Galactic asegura que puede poner 8 personas en el espacio generando la misma cantidad de emisiones de CO₂ que un solo asiento de un vuelo de Nueva York a Londres. Esto sería 604,2 kg de CO₂ por vuelo de la empresa de Turismo Espacial precitada, por lo que suponiendo 1.000 vuelos anuales del vehículo SpaceShipTwo de esta empresa, se alcanzarían los 604.200 kg de dióxido de carbono anuales. Esto representaría una milésima de los niveles de emisiones que típicamente emiten las principales aerolíneas a la atmósfera anualmente [17] [13].

Según los aportes de [13], un estudio realizado por Futron concluyó que según la tecnología suborbital actual se emitirían 3 toneladas de CO₂ por pasajero. De este modo, siguiendo el supuesto de 1.000 vuelos por año, y suponiendo que se llevarían 6 pasajeros por cada vuelo, según este

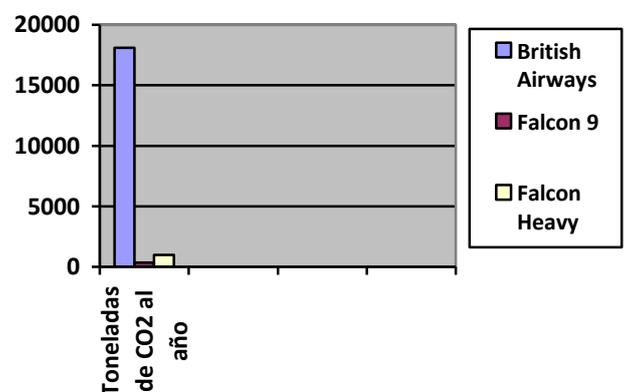
estudio, se deduce que se emitirían 18.000 toneladas de Dióxido de Carbono al año. Para ponerlo en perspectiva, y utilizando los mismos puntos de comparación del estudio en cuestión, esto equivale a 1,6 días de funcionamiento de una central eléctrica de gas de 500 MW, o 1 día de usuarios de dispositivos electrónicos del Reino Unido, tales como un televisor, dejándolos encendidos, según los datos expuestos por el autor. Asimismo, según [5], las emisiones de British Airways en el año 2013 fueron de 18.100.000 toneladas, resultantes principalmente de las operaciones de vuelo. Por lo que las emisiones por vuelos suborbitales equivaldrían al 0,099 % de las emisiones anuales de la aerolínea precitada.

Cabría también pensar, un caso más extremo, considerando que se realizaran vuelos con fines turísticos con el sistema de propulsión Soyuz, como todos los viajes turísticos espaciales realizados hasta la fecha. En este caso, extrayendo el dato de [13] que un vuelo orbital a la Estación Espacial Internacional (EEI) con el cohete ruso, implicaría 143.000 toneladas de CO₂ por pasajero. De este modo, conociendo que los vuelos a la EEI con este vehículo implicaban un turista y dos cosmonautas profesionales, se llega a un total de 429.000 toneladas de CO₂ emitidas por vuelo. Si se supone que se realizarán 100 vuelos orbitales con fines turísticos a la EEI por año, se emitirían 42.900.000 toneladas de dióxido de carbono. Esto equivaldría a más del doble de emisiones de British Airways en un año, tomando el dato precitado. Por lo que en este caso, con el turismo orbital utilizando este sistema de propulsión, las emisiones serían insostenibles.



(Tabla 2, Emisiones de CO₂ del sistema Soyuz en comparación con la aerolínea British Airways)

Por último, se podría analizar las emisiones causadas por esta tipología de viajes si se utilizara tecnología de la empresa SpaceX. Se sabe que el Falcon 9 emite 341,6 kg por vuelo y que el Falcon Heavy emite 976 kg por vuelo [1]. Si se supone que se realizarán 1.000 lanzamientos a la EEI, se emitirían 976 toneladas (o 976.000 kg) por año con el Falcon Heavy o 341,6 toneladas (341.600 kg) con el Falcon 9. Estas cifras equivalen al 5,39 % y al 1,89 % respectivamente de las emisiones anuales de la aerolínea British Airways en el año 2013. A su vez, comparando estos números se puede ver que los vehículos de la compañía SpaceX emitirían la mitad, en el caso del Falcon 9, o tan sólo un 61 % más que las emisiones anuales del SpaceShipTwo de Virgin Galactic.



(Tabla 3, Toneladas de CO₂ emitidas por los vehículos de SpaceX en comparación con la aerolínea British Airways).

De las tres principales empresas que se ha hecho mención en este trabajo se ha analizado sólo las emisiones de dos de ellas, esto no es casualidad, ya que de acuerdo con las declaraciones oficiales de Blue Origin, y por el tipo de combustible del motor B-3, los únicos residuos generados por este vehículo son vapor de agua, por lo que las emisiones de carbono son de 0 kg/toneladas. De este modo, 1.000 lanzamientos anuales del vehículo New Shepard no implicarían emisión alguna de dióxido de carbono en la atmósfera [3]. Se puede observar en este apartado, que las tres principales empresas de Turismo Espacial emitirían escasas cantidades de CO₂ a la atmósfera, o hasta incluso ninguna como se vio en el último ejemplo. Según [13] y [19] Virgin Galactic planea hacer funcionar su aeropuerto espacial con la mayor cantidad de energía renovable posible, lo que podría convertirlos en productores de energía alcanzando niveles negativos de emisiones de CO₂, esto es, previniendo mayores emisiones de Dióxido de Carbono de las que emiten sus vehículos.

De esta forma, se puede afirmar que la incidencia de estas tecnologías en la atmósfera sería insignificante o nula, y ya que ninguno de estos vehículos utiliza combustibles tóxicos como la Dimetilhidrazina Asimétrica, que ya se ha mencionado en este trabajo, se puede concluir que la afectación al medio ambiente por operación de los vehículos espaciales para viajes turísticos sería insignificante.

Sin embargo, se podría suponer un caso más extremo, es decir, vuelos turísticos al espacio utilizando vehículos a base de Dimetilhidrazina Asimétrica.

Si se toman los escenarios más pesimistas, suponiendo el lanzamiento de 1.000 vuelos turísticos anuales, de un vehículo espacial que funcione a base de combustible de Dimetilhidrazina Asimétrica (tomando como referencia el vehículo ruso Proton) se obtiene por cada lanzamiento el derrame de 524 mg debajo del sistema de propulsión, 2.200 mg por derrames provenientes de los tanques de combustibles y 1,5 mg esparcidos por 737 m² provenientes de fragmentos desprendidos de la primera etapa del

cohetes (ya que este vehículo posee varias etapas y no cuenta con sistemas reutilizables como los que poseen las aeronaves de las empresas de Turismo Espacial). Se utiliza el supuesto que este vehículo posee dos etapas en total. Dicho esto, es importante aclarar que sólo existiría contaminación química en las áreas de impacto de la primera etapa, no así de la segunda. Además se utiliza el caso del desarrollo de estas actividades de vehículos espaciales en un ecosistema vulnerable, es decir que requiere mayor tiempo de asimilación y posee un ritmo de degradación más lento de los residuos contaminantes, así como también, que posee menor tolerancia a residuos tóxicos.

Aunque la DA se evapora inmediatamente del suelo, y tomando como referencia los datos aportados por [10], como máximo sólo el 4% de estas cantidades permanecerían al día siguiente, el 0,5 % al cabo de 90 días, y tan sólo 0,1% al cabo de un año. Relacionado a esto, el estudio realizado por [4] muestra que la DA es rápidamente biodegradable y no es bioacumulable, a pesar de que sus agentes derivados poseen un alto potencial de migración y que pueden ser igual o más tóxicos que el contaminante principal.

Asimismo, se toma como referencia que luego de la inyección de 200 mg de DA, toda actividad ecológica muere [10]. A partir de esto, se puede observar que en las áreas debajo de los sistemas lanzadores toda actividad biológica quedaría aniquilada. Lo mismo sucedería en el caso de las áreas con derrames de combustible de los tanques, en el caso de que existieran derrames. Sin embargo, el área de 737 m² preservaría su actividad biológica, sin inconveniente.

Como se mencionó más arriba, suponiendo una cantidad de 1.000 lanzamientos anuales, significaría más de 2 lanzamientos diarios, por lo que aún en ese caso el área de impacto de 737m² permanecería con su ecosistema intacto. Por otro lado, las áreas debajo del vehículo y en las zonas de derrame de los tanques de combustible quedarían aún en peores condiciones y con necesidad de mayor tiempo para la degradación de los residuos remanentes.

Si se toma este escenario como pesimista y como caso extremo, se puede ver que sólo el área de la plataforma de despegue, debajo del sistema de propulsión, y en las áreas (de existir) donde se produzcan derrames de combustible se estaría afectando el ecosistema. En el resto de las zonas, el impacto químico de la DA es insignificante, incluso manteniendo un ritmo de vuelos de más de 2 por día o 1.000 anuales. Estos datos fueron recolectados del Cosmódromo Baikonur y partir de los estudios derivados del cohete Proton ruso de [10].

A partir de este análisis se ve que la contaminación máxima se daría en el caso del uso de combustibles que posean DA que afectaría el ecosistema de la forma mencionada anteriormente y con el uso del sistema de propulsión Soyuz. Dicho esto, el uso de otros tipos de combustibles que resultan ser menos nocivos, implicarían efectos insignificantes sobre el ambiente como se ha mencionado anteriormente en este apartado.

CONCLUSIONES

En conclusión, los principales tipos de contaminación derivados de la actividad de vehículos espaciales se relacionan con la emisión de gases como lo es el Dióxido de Carbono, la caída de fragmentos de etapas separables que se desprenden durante el funcionamiento de las aeronaves y los remanentes de combustibles que quedan en las partes de tanques de combustibles que colisionan contra la superficie de la Tierra.

Sin embargo, para el caso particular del Turismo Espacial, la caída de etapas no es uno de los principales problemas, ya que los oferentes de esta tipología de viajes utilizan tecnología reutilizable.

Por otro lado, los combustibles más tóxicos como la Dimetilhidrazina Asimétrica no son utilizados en los vehículos de Turismo Espacial, sin embargo se ha visto que si este fuera el caso, su impacto ambiental sólo se daría en aquellas áreas donde existan derrames accidentales de combustible, y debajo de la plataforma de lanzamiento, para el resto de áreas involucradas en el proceso de operación del vehículo, la

contaminación resultante no afectaría el normal funcionamiento de los ecosistemas que habitan dichas áreas.

Por último, se demostró que según los datos obtenidos de las distintas fuentes consultadas, las emisiones de CO₂ resultantes de 1.000 vuelos anuales de vehículos de Turismo Espacial no generarían grandes cantidades de este gas con la excepción de la utilización del sistema de propulsión del Soyuz, el cual de todas maneras, no forma parte de los futuros planes de vuelos espaciales con fines turísticos.

REFERENCIAS

- [1] Abela, A., Berg, E., Fillmore, L., Kaisersatt, S., Lebow, C., Nieto, M. P., & Thompson, V. (2011). *Final Environmental Assessment: Falcon 9 and Falcon 9 Heavy Launch Vehicle Programs from Space Launch Complex 4 East at Vandenberg Air Force Base, California*. MANTECH SRS TECHNOLOGIES INC LOMPOC CA.
- [2] Barmin, I. V., Neustroev, V. N., & Lebedeva, L. I. (2018). Problems of ground safety supporting at launch of space vehicle with manned spacecraft. *Acta Astronautica*, 150, 6-14.
- [3] Blue Origin. Tomado de <https://www.blueorigin.com/engines>, (20 de Diciembre de 2018).
- [4] Carlsen, L., Kenessov, B. N., & Batyrbekova, S. Y. (2008). A QSAR/QSTR study on the environmental health impact by the rocket fuel 1, 1-dimethyl hydrazine and its transformation products. *Environmental health insights*, 1, EHI-S889.
- [5] Civil Aviation Authority. (2017). Information on aviation's environmental impact.
- [6] DeLuca, L. T., Galfetti, L., Maggi, F., Colombo, G., Merotto, L., Boiocchi, M., ... & Fanton, L. (2013). Characterization of HTPB-based solid fuel formulations: Performance, mechanical properties, and pollution. *Acta Astronautica*, 92(2), 150-162.

- [7] EPA, (2014). Tomado el 17/3/2019 de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/tsd1.pdf>.
- [8] Goehlich, R. A. (2014). Space Tourism: Hurdles and Hopes. *International Journal of Aviation Systems, Operations and Training (IJASOT)*, 1(1), 17-34.
- [9] Kiselev, A. I., Medvedev, A. A., & Menshikov, V. A. (2012). *Astronautics: Summary and prospects*. Springer Science & Business Media.
- [10] Koroleva, T. V., Krechetov, P. P., Semenov, I. N., Sharapova, A. V., Lednev, S. A., Karpachevskiy, A. M., ... & Kasimov, N. S. (2018). The environmental impact of space transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 54-69.
- [11] NASA (2018). Tomado de https://www.nasa.gov/mission_pages/station/new_s/orbital_debris.html
- [12] Neronov, V. V., Chernitsova, O. V., Koroleva, T. V., & Krechetov, P. P. (2012). Contemporary state of vegetation in Baikonur Cosmodrome and estimate of its potential resistance to impact of space-rocket activities. *Arid Ecosystems*, 2(3), 186-196.
- [13] Pandey, M. M., 2012. The Possibility of Space Tourism in India: Issues and Concerns
- [14] Romanov, V. I., & Romanova, R. L. (2003). Risk factors of negative impact on objects of the environment upon accidents during launches of rocket-space hardware. *Cosmic Research*, 41(5), 494-501.
- [15] Ross, M., Mills, M., & Toohey, D. (2010). Potential climate impact of black carbon emitted by rockets. *Geophysical Research Letters*, 37(24).
- [16] Rueda Carazo, A. (2015). EL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DEL TURISMO ESPACIAL: UNA PERSPECTIVA JURÍDICA.
- [17] Seedhouse, E., 2014. *Tourists in Space*. Springer, Cham.
- [18] Sutton, G. P., & Biblarz, O. (2016). *Rocket propulsion elements*. John Wiley & Sons.
- [19] Van Pelt, M. (2012). *Rocketing into the future: the history and technology of rocket planes*. Springer Science & Business Media.
- [20] Voigt, C., Schumann, U., Graf, K., & Gottschaldt, K. D. (2013). Impact of rocket exhaust plumes on atmospheric composition and climate—an overview. *EUCASS Proceedings Series—Advances in AeroSpace Sciences*, 4, 657-670.
- [21] Webber, D., 2013. Space tourism: Its history, future and importance. *Acta Astronautica*, 92(2), pp.138-143.