

REPENSAR LA REGULACIÓN DEL RIESGO DE COLISIÓN EN LEO: DE LA EXPOSICIÓN ABSOLUTA A LA CONTRIBUCIÓN MARGINAL

Resumen: La creciente congestión de la órbita terrestre baja (LEO), impulsada por el despliegue masivo de constelaciones y la diversificación de actores espaciales, plantea nuevos desafíos para la regulación del riesgo de colisión. Desde el artículo fundacional de Kessler y Cour-Palais (1978), la gobernanza de la sostenibilidad orbital se ha estructurado, entre otros componentes, en torno a la limitación de la probabilidad acumulada de colisión asociada a cada misión individual, cristalizada en ciertos ordenamientos en el umbral de 10^{-3} durante la vida orbital del objeto.

El presente trabajo sostiene que este enfoque, basado en la exposición absoluta al riesgo, resulta necesario pero conceptualmente incompleto en entornos de densidad creciente. En particular, no distingue entre el riesgo heredado del entorno orbital y la contribución marginal que cada misión añade al sistema.

Se propone, por ello, complementar el estándar vigente mediante una métrica de “riesgo añadido” (ΔP_{coll}), definida como el aumento marginal de la probabilidad de colisión dentro de un régimen orbital definido atribuible a una misión específica durante un horizonte temporal definido. Esta variable permitiría articular una arquitectura regulatoria de doble capa: un umbral obligatorio de seguridad y un conjunto de incentivos orientados a fomentar diseños técnicamente más sostenibles.

Lejos de endurecer el marco regulatorio, la propuesta busca refinar la variable que lo estructura, alineando crecimiento económico, seguridad jurídica y preservación a largo plazo del entorno orbital.

I. INTRODUCCIÓN: DEL PARADIGMA DE KESSLER A LA ARQUITECTURA REGULATORIA CONTEMPORÁNEA

En 1978, Donald J. Kessler y Burton G. Cour-Palais publicaron en el *Journal of Geophysical Research* el artículo titulado *Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt*. En él formulaban una hipótesis que, con el paso del tiempo, se convertiría en uno de los pilares conceptuales de la política internacional de mitigación de desechos espaciales: la posibilidad de que, a partir de una determinada densidad crítica de objetos artificiales en órbita terrestre, las colisiones entre satélites generasen fragmentos suficientes para incrementar progresivamente la probabilidad de nuevas colisiones, dando lugar a un proceso autosostenido de fragmentación en cadena.

El denominado “síndrome de Kessler” no describía un evento catastrófico instantáneo, sino una dinámica acumulativa y estructural. Su relevancia no residía únicamente en el plano físico, sino en la advertencia implícita sobre los límites materiales del entorno orbital como recurso finito. Desde entonces, la hipótesis de Kessler ha operado como fundamento técnico de las políticas de mitigación de desechos espaciales, inspirando las directrices del IADC, las “*UN Space Debris Mitigation Guidelines*”, así como múltiples marcos regulatorios nacionales.

La respuesta normativa a este riesgo sistémico ha adoptado, en términos generales, una arquitectura preventiva basada en la limitación de la probabilidad de colisión asociada a cada misión individual. En particular, en determinados ordenamientos —como el estadounidense— se ha consolidado el estándar conforme al cual la probabilidad de colisión con objetos de tamaño superior a 10 cm durante la vida orbital de la misión no debe superar el umbral de 10^{-3} (una entre mil). Este enfoque, centrado en la evaluación cuantitativa del riesgo de cada objeto, ha permitido operacionalizar la preocupación por la congestión orbital dentro de procedimientos administrativos de autorización.

Sin embargo, la aceleración del número de lanzamientos, el despliegue de constelaciones masivas en órbita terrestre baja (LEO) y la progresiva diversificación de actores espaciales plantean una cuestión estructural: ¿es la exposición absoluta al riesgo la variable más adecuada para gestionar un fenómeno cuya naturaleza es acumulativa y sistémica?

El modelo vigente evalúa si una misión concreta se sitúa por debajo de un determinado umbral de probabilidad de colisión, pero no distingue entre el riesgo heredado de un entorno orbital ya congestionado y la contribución marginal que la propia misión añade a dicho entorno. En un contexto de densidad creciente, esta aproximación puede generar efectos distributivos

relevantes, trasladando a operadores individuales el coste de una congestión sistémica preexistente, sin diferenciar adecuadamente entre diseños más o menos sostenibles.

El presente trabajo propone una reformulación conceptual de la variable regulatoria dominante. Sin cuestionar la necesidad de mantener un umbral de seguridad mínimo, se sugiere complementar el modelo de exposición absoluta con una métrica de contribución marginal al riesgo de colisión dentro de un régimen orbital determinado. Esta aproximación permitiría articular una arquitectura regulatoria de doble capa: un nivel de seguridad obligatorio y un nivel adicional orientado a incentivar diseños técnicamente más sostenibles.

De este modo, el tránsito desde la “aceptabilidad del riesgo” hacia la “contribución al riesgo” no implica relajar estándares, sino refinar la herramienta con la que se gestiona un entorno orbital cuya estabilidad constituye condición material del ejercicio efectivo del derecho de acceso al espacio.

II. LA TRADUCCIÓN REGULATORIA DE LA HIPÓTESIS DE KESSLER: DE LA FÍSICA DEL RIESGO AL ESTÁNDAR ADMINISTRATIVO

La hipótesis formulada por Kessler y Cour-Palais en 1978 constituyó, en su origen, un modelo de evolución dinámica de poblaciones de objetos en órbita terrestre. Sin embargo, su influencia trascendió rápidamente el ámbito estrictamente científico para convertirse en el fundamento técnico de las primeras políticas sistemáticas de mitigación de desechos espaciales. El tránsito desde una advertencia física —la posibilidad de una cascada autosostenida de colisiones— hacia un marco normativo operativo implicó necesariamente una simplificación conceptual: el riesgo sistémico debía traducirse en parámetros evaluables en procedimientos administrativos concretos.

Este proceso de “traducción regulatoria” se articuló progresivamente a través de instrumentos de soft law y estándares técnicos internacionales. Las “*Space Debris Mitigation Guidelines*” del Comité de las Naciones Unidas para los Usos Pacíficos del Espacio Ultraterrestre (COPUOS), adoptadas en 2007, así como las directrices del Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC), consolidaron un conjunto de principios orientados a limitar la generación de nuevos fragmentos, reducir el tiempo de permanencia en órbitas protegidas y prevenir explosiones o fragmentaciones accidentales.

La lógica subyacente es inequívocamente kessleriana: evitar que la densidad de objetos supere niveles a partir de los cuales las colisiones se conviertan en el principal mecanismo de generación de desechos. No obstante, la operacionalización de este objetivo exigía una métrica

concreta que permitiera a las autoridades nacionales decidir, caso por caso, si una misión era autorizable.

En determinados ordenamientos, especialmente en el ámbito estadounidense, esta necesidad cristalizó en la adopción de un umbral cuantitativo específico: la probabilidad de colisión con objetos catalogados de tamaño superior a 10 cm durante la vida orbital del satélite no debe superar el valor de 10^{-3} , antes mencionado. Este estándar, incorporado en la práctica regulatoria de la Federal Communications Commission (FCC) para sistemas NGSO y alineado con el enfoque de la NASA Orbital Debris Mitigation Standard Practices (ODMSP), constituye uno de los ejemplos más claros de la transformación de un riesgo sistémico en una variable administrativa individualizable.

Desde un punto de vista jurídico, este modelo presenta varias virtudes. En primer lugar, introduce un criterio objetivo y cuantificable que reduce la discrecionalidad administrativa. En segundo lugar, incentiva la adopción de medidas técnicas de mitigación —capacidad de maniobra, estrategias de *post-mission disposal*, reducción de superficie efectiva— orientadas a disminuir la probabilidad de colisión. Finalmente, permite integrar el análisis de sostenibilidad orbital dentro de procedimientos de autorización espacial. Algo similar ocurre con los requisitos para la determinación del riesgo de letalidad en maniobras de reentrada, que no son objeto del presente trabajo.

Sin embargo, la adopción de un umbral uniforme plantea una cuestión estructural que merece atención doctrinal. El valor de 10^{-3} evalúa la exposición absoluta de la misión al riesgo de colisión en un entorno dado, pero no distingue entre el riesgo inherente al régimen orbital —derivado de la densidad preexistente de objetos— y la contribución adicional que la propia misión introduce en dicho entorno.

En otras palabras, el modelo vigente presupone el entorno orbital como un parámetro exógeno y constante. La congestión se incorpora en el cálculo como una condición del entorno, no como una variable atribuible a decisiones acumulativas de los operadores. Esta aproximación resulta comprensible en un contexto de densidad moderada, pero adquiere mayor complejidad en escenarios de crecimiento acelerado de constelaciones en órbita terrestre baja (LEO), donde el número de objetos operativos y no operativos se incrementa de forma sostenida.

El resultado es una arquitectura regulatoria centrada en la aceptabilidad del riesgo individual, pero relativamente indiferente a la dimensión incremental del riesgo sistémico. Desde la perspectiva del análisis económico del Derecho, podría afirmarse que el modelo actual

internaliza parcialmente el riesgo de colisión de cada misión, pero no discrimina adecuadamente entre distintos niveles de contribución marginal al deterioro del entorno orbital.

Este desajuste no invalida el estándar existente, pero sí invita a reconsiderar si la exposición absoluta constituye la variable óptima para gestionar un fenómeno cuya naturaleza es acumulativa. La cuestión, por tanto, no es si el umbral de 10^{-3} es técnicamente razonable — que lo es dentro de los supuestos de modelización actuales— sino si, en un contexto de congestión creciente, resulta suficiente como único parámetro estructurador de la política regulatoria.

Es precisamente en este punto donde la evolución del entorno orbital obliga a reabrir el debate conceptual iniciado, de forma implícita, por el propio Kessler: si el riesgo es sistémico y acumulativo, ¿puede su gestión descansar exclusivamente en la evaluación aislada de cada objeto?

III. EL MODELO DE EXPOSICIÓN ABSOLUTA COMO VARIABLE REGULATORIA DOMINANTE

La arquitectura regulatoria contemporánea en materia de mitigación del riesgo de colisión orbital descansa, de forma predominante, sobre una lógica de exposición absoluta. En términos simplificados, la autoridad competente evalúa si la probabilidad acumulada de colisión de un objeto espacial durante su vida orbital —incluida la fase operativa y el periodo posterior hasta su reentrada o retirada— se mantiene por debajo de un umbral predeterminado.

Desde el punto de vista técnico, esta probabilidad se estima mediante modelos estadísticos que integran diversos parámetros: densidad de objetos en el régimen orbital considerado, distribución de tamaños, área efectiva del satélite, altitud e inclinación, duración de la misión, capacidad de maniobra y tasas de éxito del plan de retirada al final de la vida útil (*post-mission disposal*, PMD). El resultado es una probabilidad agregada, expresada habitualmente como valor adimensional acumulado a lo largo del horizonte temporal definido.

Formalmente, podría representarse de manera esquemática como:

$$P_{\text{coll}}(R, t) = f(\rho_R, A_{\text{eff}}, t, v_{\text{rel}}, \text{PMD}, \dots)$$

donde "R" representa el régimen orbital, "t" el horizonte temporal considerado, y " ρ_R " la densidad de objetos en dicho régimen. El modelo integra la exposición al entorno existente, pero no descompone explícitamente el origen de dicho entorno.

En el plano jurídico, la autoridad no exige la comprensión exhaustiva del modelo físico por parte del operador, sino la demostración de que el valor resultante no supera el umbral establecido. La variable decisiva es el resultado final: si la probabilidad es inferior a 10^{-3} , la misión es, en principio, autorizable; si lo supera, deberá introducir modificaciones de diseño o medidas adicionales de mitigación.

Este esquema presenta una ventaja evidente: simplifica la complejidad física del entorno orbital en un criterio administrativamente gestionable. Permite además un tratamiento homogéneo de misiones técnicamente diversas bajo un estándar común, facilitando la coherencia regulatoria y la previsibilidad para los operadores.

No obstante, el carácter agregado del parámetro oculta una distinción relevante. El valor " P_{coll} " refleja la probabilidad de que el objeto colisione con el entorno orbital existente, pero no diferencia entre:

1. El riesgo que el entorno impone al objeto (riesgo heredado o *inherited risk*).
2. El riesgo adicional que la presencia del objeto introduce en dicho entorno (riesgo inducido o *added risk*).

El modelo, tal como se aplica habitualmente, responde a la primera dimensión. Evalúa la aceptabilidad del riesgo soportado por la misión, no la magnitud del impacto incremental que la misión genera sobre el sistema orbital.

Esta distinción es conceptualmente relevante. Como ya se ha señalado, en un entorno de baja densidad, la diferencia entre exposición y contribución puede resultar marginal. Sin embargo, en un contexto de congestión creciente, la separación analítica entre ambas dimensiones adquiere mayor importancia. El aumento del valor de " P_{coll} " puede deberse predominantemente a la densidad preexistente del régimen orbital, circunstancia ajena a la decisión individual del operador. El umbral uniforme actúa, entonces, como un mecanismo de asignación de costes regulatorios en función de la congestión heredada.

Desde una perspectiva doctrinal, puede afirmarse que el modelo actual internaliza el riesgo individual de la misión, pero no necesariamente el coste marginal que la misión impone al sistema. El parámetro de exposición absoluta no permite discriminar entre misiones que, aun cumpliendo el mismo umbral, difieren sustancialmente en su contribución incremental a la probabilidad agregada de colisión en el régimen orbital considerado.

Esta limitación no es fruto de un error conceptual, sino de la prioridad histórica otorgada a la prevención de daños directos asociados a cada objeto. La regulación nació para evitar colisiones y fragmentaciones individuales; no para optimizar dinámicamente la evolución de la población orbital. Sin embargo, la progresiva densificación de determinadas altitudes en LEO y el despliegue de constelaciones masivas reabren el debate sobre la idoneidad exclusiva de esta variable.

El paso siguiente consiste, por tanto, en examinar si es posible complementar —no sustituir— el modelo de exposición absoluta con una métrica que capture la dimensión incremental del riesgo sistémico. La cuestión no es abandonar el umbral de seguridad, sino preguntarse si la política de sostenibilidad orbital puede articularse sobre una variable más alineada con la naturaleza acumulativa del fenómeno que la inspiró.

IV. RIESGO HEREDADO Y CONTRIBUCIÓN MARGINAL: EL PROBLEMA DISTRIBUTIVO DEL MODELO VIGENTE

La distinción entre exposición absoluta y contribución incremental permite identificar una dimensión hasta ahora escasamente explorada en el análisis regulatorio: el carácter distributivo del riesgo orbital en entornos congestionados.

En el modelo dominante, el parámetro decisivo es la probabilidad acumulada de colisión del objeto durante su vida orbital. Sin embargo, este valor incorpora indistintamente dos componentes conceptualmente diferenciables:

- El riesgo heredado del entorno orbital preexistente.
- El riesgo adicional que la propia misión introduce en dicho entorno.

Podemos denominar al primero **riesgo heredado** (*inherited risk*): la fracción de probabilidad de colisión que deriva de la densidad y configuración orbital existentes en el momento de la autorización. Este componente es exógeno a la decisión individual del operador; responde a la evolución histórica acumulada del régimen orbital.

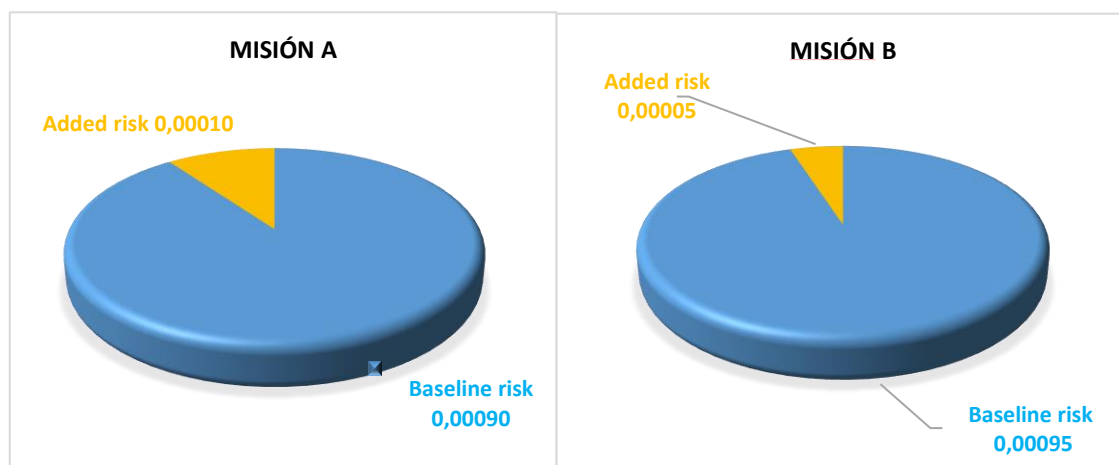
El segundo componente es la **contribución marginal** de la misión al riesgo sistémico: el incremento que la presencia de un nuevo objeto genera en la probabilidad agregada de colisión dentro del mismo régimen orbital.

En el modelo actual, ambos elementos aparecen integrados en un único valor agregado. La autoridad evalúa el resultado final sin descomponer explícitamente la proporción atribuible al entorno heredado y la atribuible al diseño y parámetros de la misión.

Esta integración puede ilustrarse mediante un ejemplo analítico simplificado.

Supóngase un régimen orbital determinado en el que la probabilidad agregada de colisión asociada al entorno existente, para un horizonte temporal dado, equivale a 0,00090. Un primer operador propone una misión cuya configuración añade una contribución incremental estimada de 0,00010, de modo que la probabilidad total acumulada alcanza el umbral regulatorio de 0,001.

Un segundo operador, en un régimen ligeramente más congestionado, parte de un riesgo heredado de 0,00095 y diseña su misión de forma que la contribución adicional sea de 0,00005, alcanzando igualmente una probabilidad total de 0,001.



Bajo el estándar vigente, ambas misiones son equivalentes desde el punto de vista regulatorio: cumplen el umbral de 10^{-3} y, por tanto, resultan aceptables.

No obstante, desde la perspectiva de la evolución sistémica del entorno orbital, las dos misiones no son idénticas. La primera introduce una contribución marginal doble respecto de la segunda. El modelo de exposición absoluta no distingue entre ambas situaciones, pues únicamente verifica la aceptabilidad del valor agregado.

Este ejemplo revela una asimetría conceptual: el parámetro regulatorio responde a la pregunta “¿es la misión suficientemente segura para operar en este entorno?”, pero no responde a la pregunta “¿cuánto riesgo adicional añade esta misión al entorno?”.

En un contexto de baja densidad orbital, la diferencia puede resultar marginal. Sin embargo, en escenarios de congestión creciente, el riesgo heredado puede aproximarse progresivamente al umbral regulatorio. En tales circunstancias, los operadores se ven obligados a asumir costes crecientes para reducir su exposición total por debajo del límite, aun cuando su contribución incremental sea reducida.

El modelo vigente actúa entonces como un mecanismo de asignación individualizada del coste de la congestión sistémica. El operador que pretende acceder a un régimen orbital densamente poblado debe compensar, mediante medidas técnicas adicionales, una fracción significativa del riesgo que no ha generado.

Desde una perspectiva jurídica, esta situación no es necesariamente injusta —la regulación siempre distribuye cargas—, pero sí plantea una cuestión de eficiencia y de alineación de incentivos. El estándar uniforme no diferencia entre diseños que minimizan de forma sustancial su contribución marginal y aquellos que simplemente ajustan su exposición total hasta el umbral.

El resultado es que el sistema incentiva el cumplimiento mínimo del umbral, pero no necesariamente la minimización activa de la contribución incremental al riesgo sistémico.

Esta constatación no implica que el modelo actual sea erróneo. Implica, más bien, que el parámetro de exposición absoluta, aun siendo necesario como umbral de seguridad, puede resultar insuficiente como única variable estructuradora de una política de sostenibilidad orbital en un entorno caracterizado por la acumulación progresiva de objetos.

Si el fenómeno que se pretende gestionar es acumulativo y sistémico —tal como advirtió Kessler—, la variable regulatoria debería reflejar, al menos en parte, la dimensión incremental del riesgo. La transición conceptual consiste, por tanto, en pasar de un modelo centrado exclusivamente en la aceptabilidad del riesgo individual a uno que incorpore también la contribución marginal al riesgo colectivo.

En la sección siguiente se propone una formalización sencilla de esta contribución incremental, no como sustituto del umbral de seguridad vigente, sino como complemento destinado a articular una arquitectura regulatoria de doble capa.

V. DE LA EXPOSICIÓN ABSOLUTA A LA CONTRIBUCIÓN MARGINAL: FORMALIZACIÓN DEL “ADDED RISK”

La constatación de que el modelo vigente no distingue entre riesgo heredado y contribución incremental plantea una cuestión metodológica: ¿es posible aislar, de forma operativa, la fracción del riesgo atribuible a una misión concreta dentro de un régimen orbital determinado?

La respuesta es afirmativa, siempre que se acepte que la métrica propuesta no constituye un nuevo observable físico, sino una variable regulatoria derivada de los mismos modelos probabilísticos ya empleados para la evaluación de la exposición absoluta.

Si la probabilidad acumulada de colisión de una misión en un régimen orbital "R" durante un horizonte temporal "t" se expresa como:

$$P_{\text{coll}}(R, t | M)$$

donde "M" representa el conjunto de parámetros técnicos de la misión (área efectiva, altitud, duración, capacidad de maniobra, fiabilidad del plan de retirada, etc.), puede definirse la contribución marginal al riesgo sistémico como la diferencia entre:

- la probabilidad agregada con la misión incluida en el entorno, y
- la probabilidad agregada del mismo entorno bajo idénticos supuestos, pero sin dicha misión.

Formalmente:

$$\Delta P_{\text{coll}}(R, t) = P_{\text{coll}}(R, t | M) - P_{\text{coll}}(R, t | \emptyset)$$

donde " $P_{\text{coll}}(R, t | \emptyset)$ " representa la probabilidad agregada en el régimen orbital considerado en ausencia de la misión evaluada.

Esta formulación no introduce un nuevo modelo físico. Se limita a comparar dos escenarios contruidos bajo el mismo marco probabilístico: uno que incorpora el objeto propuesto y otro que no lo incorpora. En términos conceptuales, se trata de una operación análoga a las empleadas en análisis de impacto regulatorio en otros ámbitos técnicos.

El “*Added Risk*” o Riesgo Añadido se definiría, pues, como el aumento marginal de la probabilidad de colisión dentro de un régimen orbital definido atribuible a una misión específica durante un horizonte temporal definido.

Conviene subrayar que el valor ΔP_{coll} no sustituye al parámetro de exposición absoluta. El umbral de seguridad —por ejemplo, $P_{\text{coll}} < 10^{-3}$ — puede y debe mantenerse como condición necesaria para la autorización. La contribución marginal no elimina el estándar existente; lo complementa.

Desde una perspectiva regulatoria, la diferencia esencial es que el modelo vigente responde a la pregunta:

¿Es aceptable la exposición al riesgo de esta misión en el entorno actual?

Mientras que la métrica de contribución marginal permite formular una pregunta adicional:

¿En qué medida esta misión incrementa el riesgo sistémico del entorno orbital?

La distinción no es meramente semántica. La primera pregunta se orienta a la seguridad individual de la misión; la segunda, a la sostenibilidad colectiva del régimen orbital.

En términos prácticos, el cálculo de ΔP_{coll} podría realizarse utilizando los mismos entornos de modelización y herramientas empleadas actualmente para justificar el cumplimiento del umbral absoluto (i.e., DRAMA, NASA Debris Assessment Software). La autoridad reguladora exigiría al operador no solo la demostración de que $P_{\text{coll}}(R, t | M)$ se sitúa por debajo del límite, sino también la presentación del valor diferencial respecto del escenario base.

La viabilidad técnica de esta aproximación descansa en un principio sencillo: si el regulador ya acepta modelos probabilísticos para evaluar la exposición absoluta, no existe impedimento conceptual para emplear esos mismos modelos en la comparación de escenarios con y sin la misión.

Naturalmente, la métrica de contribución marginal está sujeta a las mismas incertidumbres inherentes a cualquier modelización probabilística del entorno orbital. Sin embargo, tales incertidumbres no son mayores que las que ya afectan al cálculo del parámetro de exposición absoluta. La cuestión no es alcanzar una precisión absoluta, sino disponer de una variable suficientemente robusta para estructurar incentivos regulatorios coherentes con la naturaleza acumulativa del fenómeno.

La introducción de ΔP_{coll} permite así descomponer el riesgo total en sus componentes estructurales y ofrece al regulador una herramienta adicional para diferenciar entre misiones que, aun cumpliendo el mismo umbral de seguridad, presentan contribuciones sustancialmente distintas al deterioro incremental del entorno orbital.

Esta desagregación constituye el presupuesto conceptual para una arquitectura regulatoria de doble capa, en la que la seguridad mínima obligatoria coexista con mecanismos orientados a incentivar diseños que minimicen activamente su impacto sistémico.

VI. HACIA UNA ARQUITECTURA REGULATORIA DE DOBLE CAPA: SEGURIDAD OBLIGATORIA E INCENTIVOS A LA SOSTENIBILIDAD

La formalización de la contribución marginal al riesgo sistémico permite articular una arquitectura regulatoria que combine estabilidad jurídica con innovación normativa. Lejos de cuestionar el estándar de seguridad vigente, la propuesta aquí defendida se limita a complementarlo mediante una segunda dimensión orientada a la sostenibilidad.

La primera capa regulatoria permanecería inalterada. Toda misión debería demostrar que su probabilidad acumulada de colisión en el régimen orbital correspondiente se sitúa por debajo del umbral establecido.

Este nivel constituye el “suelo de seguridad” (*safety floor*) imprescindible para garantizar la protección mínima frente a colisiones catastróficas. Su mantenimiento asegura la continuidad con el marco regulatorio internacional y evita generar incertidumbre jurídica en el sector.

La segunda capa, sin embargo, introduciría una dimensión adicional basada en la contribución marginal: $\Delta P_{\text{coll}}(R, t)$.

A diferencia del umbral obligatorio, esta variable no operaría como condición excluyente, sino como criterio diferenciador susceptible de generar incentivos regulatorios.

La lógica subyacente es sencilla: si dos misiones cumplen el estándar mínimo de seguridad pero presentan contribuciones incrementales distintas al riesgo sistémico, el regulador podría reconocer normativamente esa diferencia.

Ello permitiría desplazar el eje regulatorio desde un modelo exclusivamente prohibitivo — basado en la superación o no del umbral— hacia un modelo parcialmente incentivador, en el que la minimización activa de la contribución marginal generase ventajas objetivas para el operador.

Las modalidades concretas de incentivo podrían adoptar diversas formas dentro de los marcos nacionales de autorización espacial y uso del espectro radioeléctrico. A título ilustrativo:

- Prioridad o tramitación acelerada en procedimientos administrativos.
- Reducción proporcional de tasas vinculadas a la autorización.

- Modulación de garantías financieras o de seguros obligatorios.
- Reconocimiento de “créditos de sostenibilidad orbital” transferibles dentro de límites reglamentarios.
- Mejores condiciones de acceso a programas públicos o contratos institucionales.

Este enfoque no implica trasladar la responsabilidad sistémica al sector privado sin apoyo institucional. Al contrario, reconoce que la sostenibilidad orbital constituye un interés público cuya preservación exige mecanismos que alineen los incentivos empresariales con el objetivo colectivo.

En el modelo vigente, la reducción de riesgo adicional se traduce únicamente en el cumplimiento del umbral mínimo. Una vez alcanzado dicho límite, el incentivo marginal para continuar reduciendo la contribución al riesgo sistémico disminuye significativamente. La arquitectura de doble capa permite reintroducir una señal económica y regulatoria que recompense el diseño sostenible más allá del cumplimiento estricto.

Desde el punto de vista jurídico, esta propuesta no requiere una modificación sustancial de los principios internacionales vigentes. El artículo VI del Tratado sobre el Espacio Ultraterrestre impone a los Estados la obligación de autorizar y supervisar continuamente las actividades nacionales en el espacio. Nada impide que dicha supervisión incorpore métricas diferenciadoras que incentiven comportamientos alineados con la sostenibilidad orbital.

Asimismo, el derecho de acceso al espacio reconocido en el artículo I del Tratado no se ve restringido por esta arquitectura. Por el contrario, la preservación de las condiciones materiales de estabilidad orbital constituye un presupuesto necesario para el ejercicio efectivo de dicho derecho en el largo plazo.

La propuesta, en definitiva, no sustituye la lógica preventiva derivada del paradigma de Kessler, sino que la actualiza. Si el riesgo de colisión es un fenómeno acumulativo, la regulación debe reflejar no solo la aceptabilidad individual del riesgo, sino también la responsabilidad incremental en su generación.

El tránsito desde un modelo basado exclusivamente en la exposición absoluta hacia una arquitectura de doble capa permite mantener la seguridad como condición obligatoria y convertir la sostenibilidad en un vector incentivado. En un entorno caracterizado por el despliegue masivo de constelaciones en LEO y la creciente complejidad de la gobernanza

espacial, esta evolución puede constituir un instrumento eficaz para equilibrar crecimiento económico y estabilidad orbital.

La transición hacia una arquitectura regulatoria de doble capa no requiere una reforma estructural del Derecho internacional del espacio. Su viabilidad depende, fundamentalmente, de la configuración de los procedimientos nacionales de autorización y supervisión de actividades espaciales.

En el caso español, la futura Ley de Actividades Espaciales —actualmente en fase de tramitación— ofrece un marco particularmente adecuado para integrar una métrica de contribución marginal como complemento del estándar de seguridad vigente. El artículo VI del Tratado sobre el Espacio Ultraterrestre impone a los Estados la obligación de autorizar y supervisar continuamente las actividades espaciales de entidades bajo su jurisdicción. La legislación nacional constituye el instrumento a través del cual se concreta dicha obligación.

Ello adquiere especial relevancia en el contexto de la política espacial europea. La iniciativa “Zero Debris” promovida por la Agencia Espacial Europea (ESA), si bien de naturaleza voluntaria, o la propuesta de la Directiva de la Unión Europea para la regulación de las actividades espaciales, refleja una tendencia clara hacia la internalización progresiva de criterios de sostenibilidad en la contratación pública y en los estándares técnicos aplicables a misiones financiadas con fondos europeos.

Conviene subrayar, una vez más, que la propuesta no impone cargas regulatorias adicionales indiscriminadas al sector privado. Por el contrario, ofrece una alternativa a modelos basados exclusivamente en la imposición de requisitos cada vez más estrictos de diseño a costa del operador. La introducción de incentivos permite desplazar parcialmente la lógica regulatoria desde la obligación hacia la cooperación, alineando el interés público en la sostenibilidad orbital con la racionalidad económica empresarial.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Fundamentos científicos del riesgo de colisión

Kessler, D. J., & Cour-Palais, B. G. (1978). Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt. *Journal of Geophysical Research*, 83(A6), 2637–2646.

Kessler, D. J. (1991). Collisional cascading: The limits of population growth in low Earth orbit. *Advances in Space Research*, 11(12), 63–66.

2. Modelización del riesgo y herramientas técnicas

NASA (2019). *NASA Orbital Debris Mitigation Standard Practices (ODMSP)*. Washington, D.C.

ESA / THEMIS Consortium (2023). *THEMIS: A Tool for Holistic Evaluation of Mission Impact on Space Sustainability*. (Presentaciones técnicas y documentación del proyecto THEMIS orientado a evaluación integral de impacto de misión.)

European Space Agency (ESA). *DRAMA – Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis Tool*. ESA Space Debris Office.

Rossi, A., et al. (2022). *Environmental Index for Fragmentation Impact and Sustainability Assessment of Space Missions*. Journal of Space Safety Engineering.

3. Marco internacional y directrices

United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA) (2007). *Space Debris Mitigation Guidelines of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space*.

Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC). *IADC Space Debris Mitigation Guidelines*.

4. Regulación nacional y estándares cuantitativos

Federal Communications Commission (FCC). 47 CFR § 25.114 – NGSO applications and orbital debris mitigation disclosures.

Federal Aviation Administration (FAA). Mitigation Methods for Launch Vehicle Upper Stages on the Creation of Orbital Debris, Federal Register, 2023.