

Marco para la delimitación integrada aire-suelo del espacio aéreo de baja altitud y la gestión de usos: una perspectiva de ordenación del espacio territorial

Autores

AN Yibin, XU Xiaoli, DANG Anrong, SUN Jiuhu, LI Xiangyu, RONG Yuejing

Resumen

En el contexto del rápido desarrollo de la economía de baja altitud y de la transición hacia una gobernanza territorial de cobertura integral y de todos los elementos, el espacio aéreo de baja altitud se reconoce cada vez más como un nuevo tipo de recurso territorial tridimensional. Sin embargo, la delimitación tradicional de este espacio ha priorizado durante largo tiempo las operaciones aéreas y ha prestado atención insuficiente a las funciones del suelo, lo que dificulta responder a actividades diversificadas como la logística de reparto, el rescate de emergencia y el vuelo de pasajeros. Desde una perspectiva de acoplamiento sistémico aire-suelo, este artículo sostiene que la delimitación del espacio aéreo de baja altitud debe pasar del control de rutas a la gobernanza espacial tridimensional. Para ello, aclara los atributos territoriales de recurso de este espacio, revela el acoplamiento entre acceso aéreo y uso del suelo, construye un sistema técnico para la delimitación coordinada de fronteras aéreas y terrestres, y propone un marco de gestión de usos que combina zonificación de usos y clasificación funcional. Un estudio de caso en Jinan verifica la validez científica y la operatividad del marco. El estudio ofrece apoyo metodológico y referencia para la toma de decisiones orientadas a la asignación eficiente de los recursos de baja altitud y al desarrollo de alta calidad de la economía correspondiente.

Palabras clave

espacio aéreo de baja altitud; tecnología de delimitación; gestión de usos; coordinación aire-suelo; utilización de recursos de baja altitud

Introducción

A medida que la transformación económica de China entra en una etapa crítica, la economía de baja altitud se ha convertido en una forma industrial emergente y en una nueva fuente de crecimiento [1-2]. Escenarios como la logística mediante drones, la movilidad aérea urbana (UAM) y el turismo cultural de baja altitud se desarrollan con rapidez, lo que hace que los vuelos de baja altitud sean más frecuentes, diversos y refinados [3-8]. Al mismo tiempo, conceptos como el desarrollo orientado a la verticalidad (VOD) reciben creciente atención. Estos conceptos subrayan la organización coordinada de redes de transporte de baja altitud, instalaciones de despegue y aterrizaje vertical y espacios funcionales urbanos, y plantean exigencias inéditas a la capacidad de oferta, al modo de organización y a la precisión de gestión de los recursos del espacio aéreo de baja altitud [9]. Como soporte espacial central de la economía de baja altitud, la disposición planificadora, la tecnología de delimitación y la gestión de usos de este espacio afectan directamente la seguridad de vuelo y la eficiencia operativa, y además moldean la calidad y el techo de la expansión industrial [10].

La delimitación tradicional del espacio aéreo de baja altitud procede de la lógica de la gestión aeronáutica. Se centra en organizar los flujos de tráfico aéreo y concede atención insuficiente a las funciones territoriales del suelo, la capacidad ambiental de soporte y la exposición al riesgo. Este enfoque centrado en el aire y débil en relación con el suelo produce desajustes entre elementos aéreos

y terrestres, conflictos entre actividades de vuelo y entorno urbano, así como la coexistencia de déficit locales y recursos ociosos [8]. En comparación con la demanda de rápido crecimiento de la economía china de baja altitud, el sistema nacional de gestión de este espacio sigue rezagado tanto en tecnología como en modo de gobernanza. Los cuellos de botella se concentran en métodos de delimitación y mecanismos de gestión de usos que aún no se adaptan a las necesidades operativas de las nuevas formas de actividad [11-12].

Por tanto, resulta esencial actualizar la lógica de gestión de usos del espacio aéreo de baja altitud y fortalecer la coordinación aire-suelo. Esta exigencia es coherente con la reforma china hacia un control del espacio territorial de cobertura integral y de todos los elementos [13-14], y también se alinea con las tendencias internacionales en la gestión de la baja altitud [15-16]. La coordinación aire-suelo es, en esencia, una forma de romper las barreras de gestión entre la delimitación del espacio aéreo y la gobernanza del espacio terrestre, así como entre la operación aérea y los servicios reguladores basados en tierra. Apoyada en la administración de recursos naturales y en la «cartografía única» de la planificación territorial, identifica los elementos clave de las actividades de baja altitud, las instalaciones terrestres, las funciones urbanas, los riesgos de seguridad y las reglas de gobernanza. Sobre esta base, el estudio revisa las limitaciones de la literatura existente y construye un marco de tecnología de delimitación integrada aire-suelo y de gestión de usos. Este marco enriquece la teoría de la gobernanza territorial tridimensional y proporciona una metodología operativa para una gobernanza refinada del espacio aéreo de baja altitud.

1 Avances de la investigación sobre la delimitación del espacio aéreo de baja altitud y la gestión de usos

1.1 Concepto y atributos del espacio aéreo de baja altitud

El espacio aéreo de baja altitud es un recurso territorial tridimensional profundamente afectado por el entorno superficial y por la actividad humana. Es no estructurado, altamente heterogéneo y está fuertemente acoplado con la superficie terrestre [19-21]. Su escasez, sus restricciones de capacidad y sus externalidades de riesgo implican que su desarrollo y utilización deban coordinar seguridad, eficiencia y necesidades de gobernanza desde una perspectiva territorial [22-25]. La gestión de la baja altitud debe, por ello, superar el enfoque que separa aire y suelo. El control de usos debe extenderse al espacio tridimensional mediante zonificación, restricciones normativas y gobernanza coordinada, de modo que pueda conectarse de manera precisa con el patrón funcional del espacio territorial [26-29]. Con el crecimiento de la logística de baja altitud, la UAM y las industrias relacionadas, se vuelve más visible el atributo económico del espacio aéreo de baja altitud como nuevo factor de producción. Su marco de gestión debe promover una asignación eficiente de recursos y el desarrollo ordenado de la economía de baja altitud, manteniendo al mismo tiempo el umbral de seguridad [30-36].

1.2 Evolución de la tecnología de delimitación del espacio aéreo de baja altitud

La delimitación temprana del espacio aéreo de baja altitud derivó principalmente de la planificación aeronáutica tradicional y de la investigación sobre seguridad operativa. La base de delimitación se centraba en la viabilidad del vuelo y la evitación de obstáculos, incluidas la organización de rutas o corredores, el despeje de obstáculos, la conectividad de despegue y aterrizaje y los intervalos de separación [15,19]. Estos métodos orientados por la operación son eficaces para mantener el orden aéreo básico, pero en entornos urbanos densamente construidos, donde las actividades de baja altitud se superponen y operan en paralelo, suelen enfrentar grandes diferencias de exposición al riesgo

terrestre, fuerte heterogeneidad de las restricciones espaciales e insuficiente coherencia transregional. Las delimitaciones resultantes suelen ser fragmentadas y de tipo corredor, y tienen dificultades para describir con precisión las diferencias verticales.

Desde mediados y finales de la década de 2010, el auge de los sistemas UTM y U-space para operaciones de drones a escala ha impulsado gradualmente un nuevo paradigma que trata las características del espacio territorial como condición previa. La experiencia internacional en la planificación urbana del espacio aéreo de baja altitud para drones muestra que Estados Unidos, los países europeos y Japón incorporan habitualmente la gradación de riesgos, la geovalla, los escenarios operativos, la organización de rutas y la regulación digital en la planificación de baja altitud [37]. Bajo este cambio, la delimitación ya no depende solo de la viabilidad del vuelo, la evitación de obstáculos y la conectividad de rutas. También incorpora la exposición poblacional, las funciones de superficie y los objetivos sensibles, la forma y altura de las edificaciones, los corredores de infraestructura clave y las áreas ecológicamente sensibles como restricciones básicas. La delimitación tridimensional se expresa entonces mediante una combinación de estratificación vertical, organización corredor-nodo y geozonas. Las geozonas se convierten en un soporte clave para la publicación, consulta y actualización digital de reglas [38-39], desplazando la delimitación desde la simple optimización de obstáculos y conectividad hacia una descripción integrada del acoplamiento entre riesgo espacial, características de superficie y demanda operativa.

Distintas jurisdicciones han desarrollado trayectorias diferenciadas [15,30,40-44]. Estados Unidos tiende a enfatizar la organización categorial y la gestión dinámica a grandes escalas. La Unión Europea ha establecido gradualmente un sistema de geozonas y reglas U-space para entornos complejos de alta densidad. Japón subraya la correspondencia entre el avance técnico e institucional de las aplicaciones urbanas de baja altitud y las condiciones espaciales urbanas. En conjunto, la tecnología de delimitación del espacio aéreo de baja altitud avanza desde una lógica de operación aérea centrada en rutas y evitación de obstáculos hacia una lógica territorial centrada en geozonas y restricciones tridimensionales integradas.

Tabla 1. Comparación de los principios de delimitación y los modelos de clasificación del espacio aéreo de baja altitud

País o región	Principio básico de delimitación	Lógica de clasificación del espacio aéreo	Principales elementos de delimitación
Estados Unidos	Seguridad primero; apertura y eficiencia	Sigue las clases A-G de la OACI/FAA; la baja altitud utiliza principalmente la clase G	Las clases existentes y el espacio aéreo controlado de aeropuertos forman el marco, con delimitación dinámica
Unión Europea	Orientación por riesgo; coordinación aire-suelo	Geozonas U-space como núcleo; acceso basado en la superposición de riesgos	Gestión jerárquica de geozonas combinada con corredores de rutas

Japón	Seguridad urbana primero; integración aire-suelo	Sigue la lógica OACI y se centra en escenarios específicos de AAM	Organización integrada de corredores de rutas, vertipuertos y áreas operativas
Canadá	Reglas claras; orientación a la responsabilidad	Utiliza el sistema de clases A-G de la OACI	Las clases de espacio aéreo son la base, con zonas prohibidas y restringidas por riesgo
Australia	Gradación de riesgos; reglas simplificadas	Sigue la lógica de clasificación de la OACI	Basada en restricciones geográficas y condiciones operativas, evitando una reconstrucción compleja
Reino Unido	Seguridad e innovación; delimitación progresiva	Basada en espacio aéreo controlado y no controlado, conectada con U-space	Clase G como núcleo, avanzando en la ingeniería de corredores y nodos

1.3 Avances en la gestión de usos y su articulación con la planificación

Bajo una gobernanza de cobertura integral y de todos los elementos, la conexión científica entre la gestión de usos del espacio aéreo de baja altitud y la planificación territorial es central para resolver los conflictos por recursos de baja altitud. Internacionalmente, la gestión de usos y su enlace con la planificación pueden agruparse en tres modos: orientación de mercado, habilitación tecnológica y regulación administrativa. Estados Unidos utiliza principalmente la orientación de mercado para adaptar los recursos del espacio aéreo de baja altitud a la demanda [30]. Japón depende en mayor medida de los escenarios de vuelo y de la adaptación técnica. Los países europeos combinan marcos regulatorios con supervisión del mercado. Canadá, Australia y el Reino Unido enfatizan la seguridad territorial, aunque una orientación muy fuerte hacia la seguridad puede limitar la innovación. Pese a su amplia cobertura entre países, la gestión de usos del espacio aéreo de baja altitud aún muestra una coordinación aire-suelo débil, mecanismos insuficientes para equilibrar múltiples objetivos y una conexión limitada entre gobernanza aérea y terrestre.

China también ha comenzado a desarrollar experiencias locales de control de usos espaciales de baja altitud. Centrada en la gestión colaborativa del espacio territorial y del espacio aéreo de baja altitud, ha intentado extender al ámbito de baja altitud la experiencia de control del espacio territorial. Se ha formado inicialmente un mecanismo de gobernanza en el que el gobierno central proporciona un marco institucional general y los gobiernos locales refinan las reglas de implementación, equilibrando unidad institucional y adaptabilidad local. Los trabajos recientes subrayan cada vez más la identificación de elementos aire-suelo, la correspondencia con escenarios operativos, la disposición de redes de instalaciones y las respuestas planificadoras en la planificación urbana de baja altitud [18]. También utilizan la evaluación de capacidad de carga, la identificación de áreas restringidas y la fusión de datos

multi-fuente para mejorar la base científica de la gestión [25,45]. Los avances técnicos en planificación de rutas de drones, comunicación y detección integradas (ISAC) y gestión conjunta de recursos proporcionan apoyo adicional para la organización de rutas, la asignación del espacio aéreo y el control colaborativo aire-suelo [46].

No obstante, persisten debilidades significativas. En la implementación, los límites de derechos y responsabilidades entre la gestión aérea y el control terrestre no están plenamente claros. Según las orientaciones del Consejo de Estado para promover la aviación general, la gobernanza del espacio de baja altitud requiere coordinación entre la aviación militar y civil, los gobiernos locales y los departamentos pertinentes; sin embargo, algunas regiones aún no han establecido una vinculación interdepartamental eficaz, lo que genera desconexión entre la gestión del espacio aéreo, la disposición de infraestructuras y la ejecución de proyectos. Institucionalmente, la gestión del espacio aéreo de baja altitud no se ha integrado suficientemente con los requisitos terrestres de evitación de zonas funcionales especiales y obstáculos típicos. Los métodos existentes aún no incorporan de forma adecuada las fronteras espaciales del suelo en el proceso de delimitación del espacio aéreo y, por tanto, no pueden apoyar plenamente una asignación refinada de recursos ni un uso eficiente en escenarios de baja altitud transregionales e intersectoriales.

Tabla 2. Comparación de los sistemas de gestión de usos del espacio aéreo de baja altitud

País o región	Leyes o políticas centrales	Regulador	Orientación de gestión
Estados Unidos	Federal Aviation Act (1958); regla Part 107 para pequeños UAS (2016); Advanced Air Mobility Coordination and Leadership Act (2022)	Federal Aviation Administration (FAA)	Orientación de mercado y reglas operativas dinámicas
Unión Europea	Regulación europea sobre drones (2019); marco regulatorio U-space (2023)	Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea (EASA) y autoridades nacionales de aviación (NAA)	Control de riesgo basado en geozonas y publicación digital de reglas
Japón	Ley de Aviación (2022); hoja de ruta de movilidad aérea avanzada (2018)	Japan Civil Aviation Bureau (JCAB)	Seguridad urbana orientada por escenarios y coordinación AAM
Canadá	Aeronautics Act (1985); Canadian Aviation Regulations Part IX para drones (2019)	Transport Canada	Responsabilidades operativas claras y cumplimiento de seguridad
Australia	Civil Aviation Safety	Civil Aviation Safety	Control graduado por

	Regulations Part 101 para drones (2002); Airspace Act (2007)	Authority (CASA)	riesgo y reglas simplificadas
Reino Unido	Air Navigation Order (2016)	Civil Aviation Authority (CAA)	Gestión progresiva que vincula espacio aéreo controlado y U-space

2 El espacio aéreo de baja altitud bajo el acoplamiento del sistema aire-suelo

2.1 Definición de atributos: el espacio aéreo de baja altitud como recurso territorial

El espacio aéreo de baja altitud difiere de los recursos de suelo que pueden asignarse plenamente mediante mecanismos de mercado, y también de los espacios de prohibición de vuelo sujetos a control administrativo completo. Es un recurso espacial cuasi público que requiere un equilibrio dinámico entre interés público y eficiencia operativa. La premisa teórica de su delimitación debe, por tanto, pasar de la clasificación aérea tradicional a la expresión como recurso espacial. Al aclarar fronteras espaciales, atributos de propiedad, asignación de derechos de desarrollo, acceso al uso, distribución de beneficios y restricciones de seguridad pública, el espacio aéreo de baja altitud puede convertirse en un recurso espacial tridimensional identificable, medible, asignable e incorporable al sistema de planificación y gestión [36]. Esta traducción del espacio de vuelo en recurso espacial constituye la lógica básica de la delimitación integrada aire-suelo.

2.2 Mecanismo de acoplamiento: interacción entre espacio territorial y recursos de baja altitud

Desde la perspectiva de la integridad del sistema espacial, el espacio territorial y los recursos de baja altitud constituyen un sistema de acoplamiento espacial verticalmente anidado y mutuamente restrictivo. Su interacción se expresa mediante tres mecanismos: restricciones espaciales de fondo, adaptación funcional y transmisión coordinada del riesgo. Las áreas sensibles políticas y militares, el terreno y la geomorfología, los perfiles de altura de los edificios y otros elementos centrales del espacio territorial definen directamente el alcance utilizable y los umbrales operativos del espacio aéreo de baja altitud, formando restricciones rígidas para el desarrollo de recursos. A la inversa, la concentración espacial de actividades de inspección de baja altitud, logística aérea, UAM y otras actividades orienta la disposición de nodos de despegue y aterrizaje, instalaciones de apoyo y redes de servicios terrestres, impulsando el uso del espacio territorial hacia una expansión tridimensional.

El acoplamiento profundo de función y riesgo implica que la delimitación del espacio aéreo de baja altitud debe conectarse con el control de usos del espacio territorial. La zonificación funcional terrestre determina la intensidad de uso de la baja altitud y el nivel de control. Las áreas densamente pobladas, las zonas ecológicamente sensibles y otras unidades espaciales corresponden a reglas diferenciadas de acceso de baja altitud y a umbrales de seguridad distintos. Al mismo tiempo, los riesgos de seguridad y las externalidades ambientales del vuelo de baja altitud actúan directamente sobre los intereses públicos de la superficie. El acoplamiento aire-suelo no es solo una anidación física del espacio, sino también un acoplamiento institucional de lógicas de planificación, reglas de control y responsabilidades de gobernanza. Proporciona así la base interna para reconstruir la teoría de la delimitación del espacio aéreo de baja altitud.

El control de cobertura total y de todos los elementos de la planificación territorial proporciona la plataforma central para la gobernanza de los recursos de baja altitud. Las plataformas existentes de gestión de operaciones de vuelo de baja altitud ya muestran una forma inicial de gobernanza tridimensional, pero aún requieren que la planificación territorial actúe como marco rector para lograr una coordinación profunda del control aire-suelo y una articulación de reglas. La construcción teórica de la gobernanza de recursos de baja altitud desde una perspectiva territorial debe apoyarse en el marco de control de la planificación territorial, conectarse con el sistema de gestión del espacio aéreo de baja altitud, aclarar el mecanismo bidireccional mediante el cual las condiciones del suelo configuran el espacio aéreo y las operaciones aéreas retroalimentan el uso del suelo, y apoyar la asignación coordinada de recursos territoriales y de baja altitud.

3 Tecnología de delimitación del espacio aéreo de baja altitud y marco de gestión de usos desde una perspectiva territorial

3.1 Construcción del marco: del reconocimiento de elementos a la delimitación integrada aire-suelo

La coordinación aire-suelo va más allá de una lógica unidireccional en la que los obstáculos terrestres solo restringen el vuelo. Enfatiza un acoplamiento dinámico. Por un lado, las funciones del suelo, la densidad de población y la forma edificada determinan el nivel de riesgo y las condiciones de acceso del espacio aéreo de baja altitud. Por otro, la delimitación de rutas aéreas y áreas operativas impone requisitos inversos sobre la disposición de instalaciones de despegue y aterrizaje, puntos sensibles al ruido e infraestructuras de apoyo.

Desde el mecanismo, la idoneidad del espacio aéreo de baja altitud no depende solo de las condiciones operativas aéreas, sino que está profundamente modelada por la estructura espacial del suelo. La forma funcional urbana, los corredores de infraestructura, las restricciones ecológicas y las instalaciones sensibles definen conjuntamente el rango utilizable y los riesgos operativos de este espacio. Mediante la superposición de elementos aéreos y terrestres, afectan la accesibilidad, la seguridad y la eficiencia. La delimitación integrada aire-suelo debe, por ello, describir la interacción dentro de un marco espacial urbano tridimensional, en lugar de tratar el espacio terrestre como un conjunto de restricciones pasivas. Funcionalmente, las actividades de baja altitud sirven sobre todo a funciones urbanas terrestres y, por tanto, deben corresponder a la zonificación funcional del suelo. En la gobernanza, el espacio aéreo de baja altitud implica una gestión conjunta entre múltiples departamentos; la coordinación aire-suelo debe usar unidades espaciales y reglas unificadas para conectar la gestión operativa con la gestión de usos, reduciendo la fricción institucional.

El artículo propone un marco integral compuesto por restricciones del espacio aéreo de baja altitud, tecnologías de delimitación, principios de delimitación, delimitación de fronteras aéreas y terrestres, delimitación integrada aire-suelo y gestión de usos con optimización dinámica (figura 1). El marco se basa en la gobernanza de todo el territorio y trata la seguridad, la protección ambiental y la asignación eficiente de recursos como requisitos integrados.

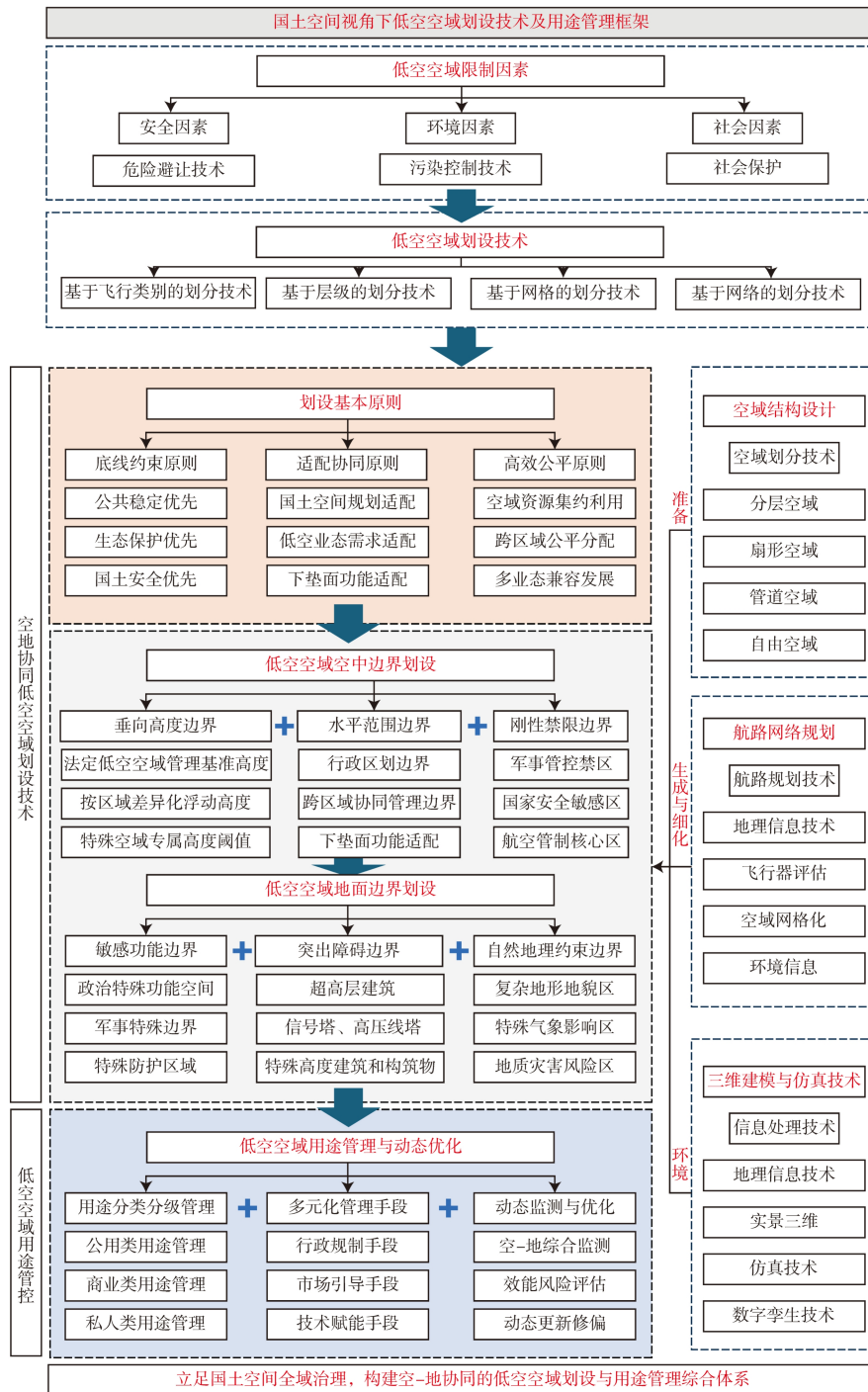


Figura 1. Sistema integrado aire-suelo de delimitación del espacio aéreo de baja altitud y gestión de usos

3.2 Principios básicos de delimitación

El marco propuesto sigue tres principios básicos. Primero, el principio de restricción de línea de fondo da prioridad a la estabilidad pública, la protección ecológica y la seguridad territorial nacional. Las áreas de control militar, las zonas sensibles de seguridad nacional, las áreas centrales de control aeronáutico y otras restricciones rígidas deben excluirse o controlarse estrictamente. Segundo, el principio de adaptación y coordinación exige que el espacio aéreo de baja altitud se ajuste a la planificación

territorial, a las necesidades de las actividades de baja altitud y a las funciones de la superficie subyacente. Tercero, el principio de eficiencia y equidad enfatiza la utilización intensiva de los recursos aéreos, la asignación equitativa entre regiones y la compatibilidad entre múltiples industrias. Estos principios permiten que la delimitación del espacio aéreo equilibre seguridad pública, demanda operativa y eficiencia de recursos.

3.3 Tecnología de delimitación integrada aire-suelo

3.3.1 Delimitación de fronteras aéreas

La delimitación de fronteras aéreas incluye límites verticales de altura, límites horizontales de alcance y límites rígidos de prohibición o restricción. En la dimensión vertical, la altura de referencia legal para la gestión del espacio aéreo de baja altitud debe combinarse con alturas flotantes diferenciadas regionalmente y umbrales especiales para determinados espacios aéreos. En la práctica, el espacio aéreo de baja altitud puede dividirse según la altura real en múltiples capas, como capas operativas ultrabaja, baja y media-baja, correspondientes respectivamente a operaciones de pequeños drones, áreas de gestión de drones ligeros y áreas de integración de aviación general.

En la dimensión horizontal, los datos geográficos de alta precisión y los datos 3D de escena real deben sustituir al modelo tradicional de ruta punto a punto. La tecnología de malla tridimensional puede voxelizar el espacio aéreo, calcular envolventes de despeje de edificios y franjas de separación de seguridad, y generar geovallas digitales. Los espacios aéreos fijos y temporales deben combinarse según los escenarios de vuelo. El espacio temporal puede delimitarse dentro de ventanas horarias especificadas para apoyar el turismo de baja altitud, el rescate de emergencia y otras actividades dinámicas. Al integrar modelado 3D de escena real, análisis de obstáculos, análisis de altura de vuelo y evitación de conflictos, las fronteras aéreas pueden expresarse como unidades espaciales precisas y actualizables.

3.3.2 Delimitación de fronteras terrestres

La delimitación de fronteras terrestres incluye límites funcionales sensibles, límites de obstáculos prominentes y límites de restricciones geográficas naturales. Los límites funcionales sensibles incluyen espacios políticos y militares especiales, áreas de protección especial y zonas de evitación de infraestructura pública. Los límites de obstáculos prominentes incluyen edificios altos, torres de señalización, torres de alta tensión y edificios o estructuras con alturas especiales. Los límites de restricciones geográficas naturales incluyen terrenos y geomorfologías complejos, áreas afectadas por condiciones meteorológicas especiales y zonas con riesgo de desastre geológico. La delimitación de fronteras terrestres transforma los riesgos del suelo en restricciones espaciales para el espacio aéreo de baja altitud y proporciona una base para diferenciar condiciones de acceso e intensidad operativa.

3.3.3 Delimitación integrada aire-suelo

La delimitación integrada aire-suelo conecta la estratificación aérea con la zonificación terrestre. El flujo de trabajo incluye identificar restricciones, integrar datos de evaluación, construir modelos 3D, filtrar áreas sensibles e incorporar datos de levantamiento territorial y datos de terreno y geomorfología. Debe considerar las diferencias en las funciones de la superficie subyacente entre áreas urbanas, rurales y ecológicas. El resultado es un sistema de delimitación multiescalar que vincula frontera aérea, frontera terrestre y restricciones de acoplamiento aire-suelo, proporcionando apoyo espacial para el desarrollo de alta calidad de la economía de baja altitud (figura 2).

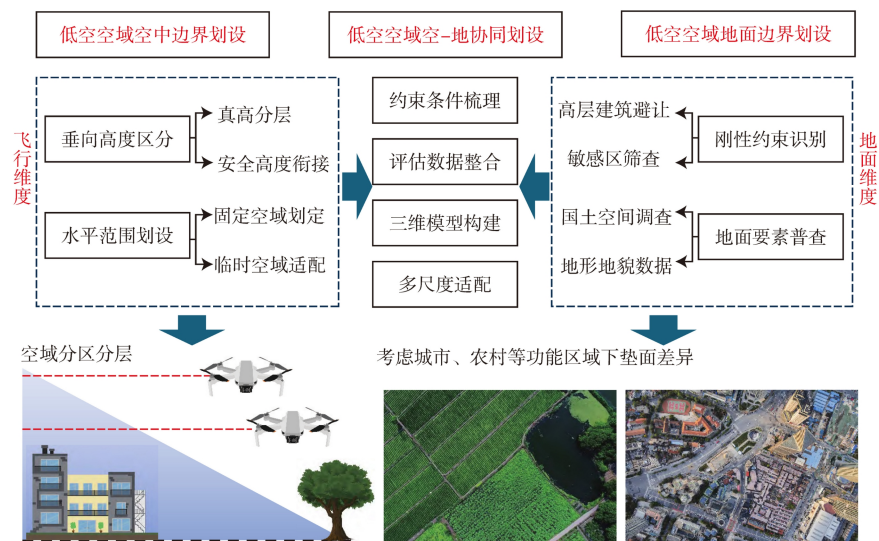


Figura 2. Marco técnico para la delimitación del espacio aéreo de baja altitud desde una perspectiva territorial

3.4 Diseño institucional para la gestión integrada aire-suelo de usos

3.4.1 Lógica institucional de la gestión de usos bajo coordinación aire-suelo

La gestión integrada aire-suelo de usos es un medio clave para el uso eficiente de recursos de baja altitud y para la seguridad del espacio territorial. Apoyada por normas institucionales y regulación en circuito cerrado, debe conectarse profundamente con el sistema existente de planificación territorial y aplicarse en la práctica. Esto responde a debilidades actuales en China, incluidas la escasa conexión entre instituciones de gestión de usos y sistemas de planificación, y la dificultad de incorporar los requisitos de gestión a los procesos de implementación de la planificación. También apoya la integración de la aviación general y la economía de baja altitud exigida por el plan nacional del sistema moderno de transporte integral.

El marco integra la gestión de usos de baja altitud en todo el proceso de planificación, implementación y evaluación del espacio aéreo. En la clasificación de usos, distingue usos de emergencia, comerciales, de servicio público y de operación industrial, y desarrolla estándares diferenciados. Establece una correspondencia multidimensional entre tipo de uso del suelo territorial, tipo de actividad de baja altitud y nivel de intensidad de control. En la implementación, fortalece la integración de la articulación planificadora, la habilitación tecnológica y la coordinación interdepartamental, mantiene la línea de seguridad y apoya la utilización eficiente de recursos.

3.4.2 Zonificación de usos orientada a la planificación territorial

En el nivel de optimización de la planificación, la gestión de baja altitud debe incorporarse explícitamente a la planificación territorial maestra, la planificación detallada, la planificación integral del transporte y los planes especiales pertinentes. La planificación maestra debe aclarar las zonas funcionales de baja altitud y los requisitos estratégicos. La planificación detallada debe refinar unidades espaciales y requisitos de control. La planificación especial debe conectar infraestructuras de baja altitud, rutas, corredores y escenarios operativos. En la implementación, los requisitos de gestión de baja altitud deben vincularse con los permisos de planificación, y los mecanismos interdepartamentales deben conectar la gestión de baja altitud, la disposición de infraestructura y la aprobación de proyectos.

La actualización dinámica debe apoyarse en el esquema nacional de planificación 2021-2035 y en los cambios de las formas de negocio y de la demanda operativa de baja altitud. Las reglas de gestión y los límites de zonificación deben optimizarse periódicamente. Los efectos de la implementación deben retroalimentar la revisión de planes mediante un circuito cerrado de preparación, implementación, evaluación y ajuste, asegurando que la gestión del espacio aéreo de baja altitud y el sistema de planificación territorial permanezcan coordinados.

3.4.3 Clasificación de usos orientada a la gobernanza territorial

La gestión integrada aire-suelo de usos también necesita refinar la clasificación de usos. Distintos tipos de espacio territorial corresponden a diferentes actividades de baja altitud e intensidades de control. El suelo de construcción urbana soporta transporte de pasajeros UAM y logística por drones de alta intensidad, así como inspección urbana y rescate de emergencia de menor intensidad. El suelo de construcción rural soporta logística rural y turismo comercial rural. El suelo agrícola soporta inspección agrícola, protección fitosanitaria y monitoreo de cultivos. Los espacios ecológicos soportan patrullas de protección ecológica, monitoreo de vegetación, protección de biodiversidad y monitoreo dinámico de desastres o del medio hídrico. El sistema de clasificación de usos debe combinar regulación administrativa, orientación de mercado y habilitación tecnológica, vinculando así la intensidad de gestión con los atributos de la actividad y la sensibilidad del uso del suelo subyacente.

Tabla 3. Ejemplo de correspondencia multidimensional entre uso territorial, actividad de baja altitud e intensidad de control

Tipo de espacio territorial	Tipo de uso del suelo	Actividad típica de baja altitud	Intensidad de control
Espacio urbano	Suelo de construcción urbana	Transporte de pasajeros UAM	Alta
Espacio urbano	Suelo de construcción urbana	Logística por drones	Alta
Espacio urbano	Suelo de construcción urbana	Inspección urbana y rescate de emergencia	Baja
Espacio urbano	Suelo de construcción urbana	Turismo de baja altitud y fotografía aérea comercial	Media
Espacio rural	Suelo de construcción rural	Logística rural	Media
Espacio rural	Suelo de construcción rural	Turismo comercial rural	Media
Espacio agrícola	Tierra cultivada	Inspección agrícola	Baja
Espacio agrícola	Tierra cultivada	Protección fitosanitaria de tierras agrícolas	Baja
Espacio agrícola	Tierra cultivada	Monitoreo dinámico de	Baja

		cultivos	
Espacio agrícola	Huertos, tierras forestales, pastizales y otras tierras de producción agrícola	Inspección de recursos forestales	Alta
Espacio agrícola	Huertos, tierras forestales, pastizales y otras tierras de producción agrícola	Patrulla contra incendios	Media
Espacio agrícola	Huertos, tierras forestales, pastizales y otras tierras de producción agrícola	Patrulla de protección ecológica	Media
Espacio ecológico	Tierras de protección ecológica, incluidas humedales, áreas protegidas, tierras no utilizadas y otras tierras con función ecológica	Monitoreo rutinario de vegetación	Media
Espacio ecológico	Tierras de protección ecológica	Patrulla de protección de biodiversidad	Media
Espacio ecológico	Tierras de protección ecológica	Monitoreo dinámico de desastres geológicos y ambiente hídrico	Media

3.5 Análisis de caso: delimitación integrada aire-suelo del espacio aéreo de baja altitud en Jinan

3.5.1 Área de caso y proceso de evaluación

El estudio de caso aplica el marco propuesto a Jinan. Construye un sistema de evaluación de recursos del espacio aéreo de baja altitud mediante datos multi-fuente, incluidos distribución de obstáculos, espacio aéreo militar, espacio aéreo aeroportuario, funciones terrestres, distribución industrial, elementos sensibles y demanda operativa. La evaluación se organiza en torno a tres capas de criterios: capacidad, riesgo y demanda. La evaluación de capacidad considera distribución de obstáculos, evitación de conflictos y análisis de altura de vuelo. La evaluación de riesgo considera espacio militar y aeroportuario, elementos sensibles y restricciones de seguridad. La evaluación de demanda considera funciones terrestres, distribución industrial y demanda de uso (figura 3).

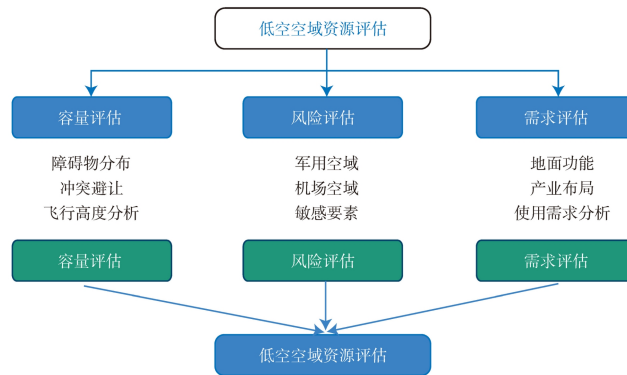


Figura 3. Marco ilustrativo para la evaluación de recursos del espacio aéreo de baja altitud

3.5.2 Gestión de usos por capas, zonas y franjas temporales

En la etapa de implementación, el área de caso combina estratificación aérea con zonificación terrestre. Verticalmente, el espacio aéreo se divide por altura real en capas de 0-300 m, 300-600 m y 600-1.000 m, correspondientes a vuelo de baja velocidad, vuelo de velocidad media y operaciones de emergencia de mayor nivel o de mayor distancia. En el suelo, las áreas sensibles políticas y militares, los edificios altos, las zonas de riesgo de desastre geológico, la infraestructura pública y otros espacios controlados se utilizan como restricciones clave. Los resultados de evaluación de idoneidad se traducen después en áreas idóneas, condicionalmente idóneas y restringidas, logrando una delimitación aérea y un control terrestre coordinados.

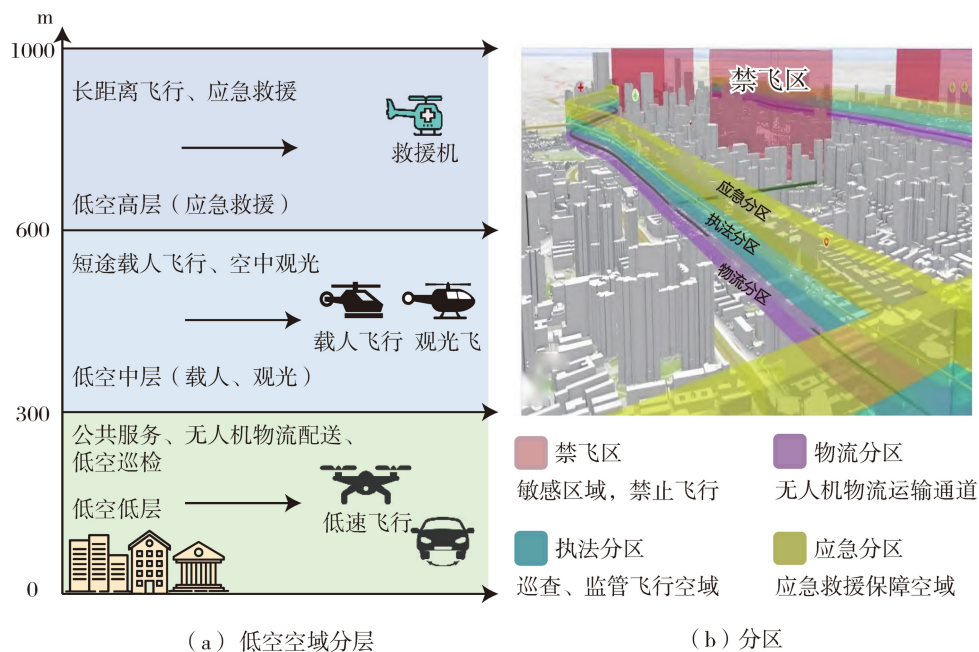


Figura 4. Esquema de gestión de usos

El caso también introduce gestión por franjas temporales. Durante los periodos pico, las restricciones de vuelo se endurecen y los vuelos de emergencia tienen prioridad. En periodos normales, las restricciones se relajan moderadamente para asegurar el funcionamiento fluido de corredores de carga y de servicio público. En periodos valle, pueden permitirse actividades especiales de vuelo, como logística nocturna e

inspección de seguridad, bajo control estricto del ruido y la contaminación lumínica. Esta combinación de estratificación, zonificación y programación temporal permite que la gestión responda con mayor precisión a demandas complejas de actividades de baja altitud.

3.5.3 Adaptabilidad práctica y experiencia

La experiencia central del área de caso consiste en implementar preliminarmente el proceso de delimitación integrada aire-suelo y el sistema de gestión zonificada y clasificada propuestos por este estudio, mejorando parcialmente las limitaciones de la gobernanza tradicional del espacio aéreo de baja altitud. El caso construye una cadena técnica completa desde la integración de datos hasta la evaluación integral y la implementación de la delimitación. Basado en la plataforma de cartografía única de la planificación territorial, integra datos aire-suelo multi-fuente y aborda la desconexión de datos heterogéneos. Utiliza un modelo cuantitativo de correspondencia entre uso del suelo y actividad para clasificar la idoneidad del espacio aéreo en todo el territorio, y convierte los resultados de evaluación en múltiples restricciones para la delimitación, logrando la transmisión desde datos hacia reglas implementables.

En el extremo de la gestión, la administración tridimensional piloto de capas, zonas y franjas temporales también supera las limitaciones del control tradicional unidimensional. En comparación con reglas que solo enfatizan la estratificación por altura o las prohibiciones y restricciones regionales, la matriz de gestión formada por el enlace de los tres tipos de reglas se adapta mejor a las necesidades complejas de las actividades de baja altitud. Desde una perspectiva de todo el territorio y todos los elementos, sin embargo, el sistema aún presenta deficiencias en la coordinación de reglas transfronterizas y en el apoyo a áreas rurales, áreas naturales protegidas y otros espacios no urbanos. Los trabajos futuros deben mejorar la articulación normativa interregional y construir un mecanismo dinámico y progresivo de ajuste de la planificación, con el fin de apoyar una coordinación a mayor escala de los recursos de baja altitud.

4 Discusión y conclusiones

4.1 Conclusiones de la investigación

Este estudio se centra en la delimitación del espacio aéreo de baja altitud y la gestión de usos desde la perspectiva de la gobernanza del espacio territorial de cobertura integral y de todos los elementos. Construye un marco sistemático para la tecnología de delimitación integrada aire-suelo y la gestión de usos. El estudio confirma que el espacio aéreo de baja altitud ha evolucionado de un mero medio de vuelo a un recurso territorial tridimensional que requiere confirmación tridimensional de derechos y asignación refinada. La esencia de la coordinación aire-suelo es el juego bidireccional y el equilibrio dinámico entre los intereses de desarrollo terrestre y los intereses de acceso aéreo.

La tecnología de delimitación basada en el mapeo de riesgos terrestres y el sistema de gestión de usos por zonificación, clasificación y gradación propuestos en el artículo superan la limitación de la gestión tradicional del espacio aéreo, que enfatiza el cielo y descuida el suelo. Proporcionan una interfaz técnica operativa para incorporar el espacio aéreo de baja altitud a la cartografía única de la planificación territorial. El estudio de caso muestra que el marco puede conectar datos, evaluación, delimitación y reglas, y tiene viabilidad práctica para la asignación y gobernanza de recursos de baja altitud.

4.2 Recomendaciones de política

La delimitación del espacio aéreo de baja altitud y la gestión de usos deben integrarse en el sistema de planificación territorial y fortalecerse en la articulación con la planificación y la implementación. Primero,

deben formularse cuanto antes normas de planificación especial para la baja altitud urbana y la infraestructura integrada aire-suelo. Estas normas deben aclarar indicadores clave como la zonificación de baja altitud y la disposición de instalaciones, incorporar dichos requisitos a las unidades de planificación territorial detallada y traducirlos en unidades concretas de gestión planificadora con base legal para su implementación.

Segundo, debe reforzarse la articulación de la gestión. Los departamentos de recursos naturales, aviación civil y otros órganos deben establecer mecanismos colaborativos y una plataforma unificada de intercambio de datos sobre recursos de baja altitud, integrar datos multi-fuente y abrir cadenas interdepartamentales de aprobación y supervisión. Tercero, debe introducirse una reserva elástica en las áreas centrales urbanas de acuerdo con las características iterativas de las industrias de baja altitud. Los corredores de servicio público, los nodos de transporte y los corredores de servicio de despegue y aterrizaje vertical deben planificarse por adelantado, con vínculos claros entre gestión del espacio aéreo y restricciones de construcción terrestre, para evitar la pérdida irreversible de recursos de baja altitud. Por último, los gemelos digitales, los GIS inteligentes de todo el espacio y las tecnologías afines deben utilizarse para construir un circuito dinámico de retroalimentación de «planificación - monitoreo - evaluación - alerta temprana». Esto permitirá supervisar en tiempo real la implementación de planes y la dinámica de vuelos, apoyar evaluaciones periódicas, conectarse con el ajuste dinámico de la planificación territorial y promover el cambio desde un plano estático hacia una gobernanza dinámica.

4.3 Limitaciones y perspectivas

Este estudio es una exploración inicial de la delimitación del espacio aéreo de baja altitud, la gestión de usos y la articulación con la planificación. Propone un marco integrado aire-suelo que ofrece ideas para la planificación y la gestión en el ámbito de baja altitud, pero sigue limitado en dos aspectos. En términos de datos, el acceso a modelos urbanos 3D refinados por encima de LOD3 es difícil, por lo que la validación microescalar de la tecnología de delimitación propuesta en entornos construidos complejos sigue siendo insuficiente. Técnicamente, el marco se basa principalmente en la forma espacial física estática y no incorpora plenamente los efectos en tiempo real de campos meteorológicos y físicos dinámicos, como campos de viento y entornos electromagnéticos, sobre la delimitación del espacio aéreo. Por ello, aún carece de un análisis dinámico del acoplamiento espacial aire-suelo.

La investigación futura se centrará en la delimitación dinámica de mallas de espacio aéreo basada en percepción en tiempo real, así como en modelos cuantitativos de evaluación de la capacidad del espacio aéreo de baja altitud. Estos estudios proporcionarán un apoyo científico más preciso para el funcionamiento eficiente de la economía de baja altitud.

Referencias

- [1] Li Xiaohua. Orientación gubernamental, construcción del ecosistema industrial y desarrollo de la economía de baja altitud. *Reform*, 2025(2): 21-35.
- [2] Dang Anrong, Zhang Chaoyang, Wang Feifei, et al. Avances y perspectivas de la investigación sobre la planificación de infraestructuras de baja altitud. *Journal of Human Settlements in West China*, 2025, 40: 25-33.
- [3] Zhang Honghai, Li Shan, Yi Jia, et al. Revisión de la planificación de rutas urbanas de baja altitud. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 53(6): 827-838.
- [4] Liao Xiaohan, Huang Yaohuan, Xu Chenchen. Investigación sobre recursos del espacio aéreo de baja altitud para aplicaciones de UAV. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76: 2607-2620.

- [5] Wang Jiwu, Wang Yining, Zhang Junshen. Estrategias de respuesta planificadora para la utilización del espacio aéreo de baja altitud bajo la economía de baja altitud. *Planners*, 2025, 41: 31-38.
- [6] Fei Yuhan, Zhang Honghai, Zhang Liandong, et al. Planificación de rutas para el transporte logístico urbano con drones. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2023, 47: 79-84.
- [7] Uber. Acelerar hacia un futuro de transporte aéreo urbano bajo demanda. 2016-10-27. https://evtol.news/__media/UE_WhitePaper_2016.pdf.
- [8] Liu Jiawen, Wang Liuying, Shen Tong, et al. Desarrollo de la economía de baja altitud en China y en el extranjero y sus escenarios de aplicación en ferrocarriles. *Railway Transport and Economy*, 2025, 47: 30-43.
- [9] Jin Lixia, Li Shan, Zeng Jiarong, et al. Desarrollo orientado a la verticalidad (VOD): comparación internacional y trayectoria de China. *Urban Planning Forum*, 2026(1): 73-80.
- [10] Wang Juntong, Bao Danwen, Zhou Jiayi, et al. Estado de la investigación y perspectivas de la planificación del espacio aéreo de baja altitud. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46: 82-107.
- [11] Gao Zhihong. Construcción jurídica de la gestión del espacio aéreo para la economía de baja altitud. *China Law Review*, 2025: 184-195.
- [12] Kong Dejian, Yuan Ze. Situación actual, experiencia y perspectivas del sistema político y jurídico para la economía de baja altitud. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition)*, 2024, 37: 85-95.
- [13] Comité Central del Partido Comunista de China y Consejo de Estado. Opiniones sobre el establecimiento y la supervisión de la implementación del sistema de planificación territorial. 2019-05-23. http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm.
- [14] Yu Haitao, Lin Jian, Peng Zhenwei, et al. Diálogo académico sobre la mejora del sistema de control de usos del espacio territorial. *Urban Planning Forum*, 2023(5): 1-11.
- [15] Federal Aviation Administration. Regulaciones para pequeños sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) (Part 107). 2020-10-06. <https://www.faa.gov/newsroom/small-unmanned-aircraft-systems-uas-regulations-part-107>.
- [16] Comisión Europea. Reglamento de Ejecución (UE) 2021/664, de 22 de abril de 2021, relativo a un marco regulatorio para U-space. 2021-04-23. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32021R0664>.
- [17] Finn R. L., Wright D. Sistemas de aeronaves no tripuladas: vigilancia, ética y privacidad en aplicaciones civiles. *Computer Law & Security Review*, 2012, 28(2): 184-194.
- [18] Huang Jianzhong, He Jiawen, Zhang Weicong, et al. Planificación urbana de baja altitud: elementos, vías de implementación y respuestas de planificación para la coordinación suelo-aire. *Urban Planning Forum*, 2025(5): 14-22.
- [19] Organización de Aviación Civil Internacional. Procedimientos para los servicios de navegación aérea - Gestión del tránsito aéreo (PANS-ATM, Doc 4444). 16.ª ed. Montreal: OACI, 2016.
- [20] Quan Quan, Li Gang, Bai Yiqin, et al. Panorama y sugerencias sobre la gestión del tráfico de UAV de baja altitud. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(1): 6-34.
- [21] Chen Zhijie. Desafíos técnicos para el desarrollo futuro de los sistemas de control del tráfico aéreo. *Command Information System and Technology*, 2016, 7(6): 1-5.

- [22] Bi Yunlong, Tan Liping, Tu Mengzhao, et al. Evolución histórica, práctica local y construcción del sistema de control de usos del espacio territorial. *Planners*, 2025, 41: 78-85.
- [23] Wang Zhoulin, Chen Weizhen. Mecanismo y modo de gobernanza de la planificación territorial: desde la perspectiva de la teoría de los derechos de control. *Urban Development Studies*, 2021, 28(6): 50-57.
- [24] Oficina General del Consejo de Estado. Opiniones orientadoras sobre la promoción del desarrollo de la aviación general. 2016-05-13. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/17/content_5074120.htm.
- [25] Lin Jian, Wu Yuxiang, Wu Jiayu, et al. Sobre la construcción de un sistema de planificación espacial: planificación espacial, control de usos del espacio territorial y supervisión de recursos naturales. *City Planning Review*, 2018, 42(5): 9-17.
- [26] Tang Xinmin, Gu Junwei, Liu Bing, et al. Revisión de tecnologías de vigilancia de baja altitud y tendencias de desarrollo. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 56: 973-993.
- [27] Fan Zhe, Yu Fengyuan, Zhao Jianbo. Estado de desarrollo y tendencias de las tecnologías de prueba de sistemas de navegación para aeronaves de baja altitud. *Metrology & Measurement Technology*, 2025, 45: 100-110.
- [28] Quan Zaixin, Wu Dingjie, Gao Jiajing, et al. Revisión del tráfico aéreo urbano de baja altitud y la planificación de trayectorias de UAV. *Aeronautical Computing Technique*, 2024, 54(4): 121-126.
- [29] Kopardekar P., Rios J., Prevot T., et al. Concepto de operaciones para la gestión del tráfico de sistemas de aeronaves no tripuladas (UTM). 2016-06-13. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160003003>.
- [30] SESAR Joint Undertaking. Concepto de operaciones U-space (CONOPS). 2019-09-30. <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/u-space/CORUS%20ConOps%20vol2.pdf>.
- [31] Zhu Yongwen, Chen Zhijie, Pu Fan, et al. Cuestiones científicas y técnicas en la gestión inteligente del tráfico aéreo. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25: 174-184.
- [32] Jia Yongnan. Exploración preliminar de esquemas de gestión del tráfico de sistemas no tripulados en el espacio aéreo de baja altitud. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46: 121-147.
- [33] Dorling K., Heinrichs J., Messier G. G., et al. Problemas de ruteo de vehículos para entrega con drones. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(1): 70-85.
- [34] Chen Xiao, Mao Yebing. Estado actual y perspectivas de la tecnología ADS-B en la seguridad del espacio aéreo de baja altitud. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(20): 61-67.
- [35] Cai Ming, Ma Chuanqi, Zhu Huasa, et al. Revisión de tecnologías de apoyo a la seguridad para operaciones de baja altitud. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2025, 23: 1-26.
- [36] Shi Chunhui, Liu Ze, You Xiao, et al. Control de usos del espacio aéreo de baja altitud basado en derechos de desarrollo de baja altitud: situación actual, teoría y sistema institucional. *Urban Planning Forum*, 2026(1): 65-72.
- [37] Liu Quan, Chen Yaoyao, Hong Xiaowei, et al. Experiencia internacional en la planificación urbana del espacio aéreo de baja altitud para UAV. *Urban Planning Forum*, 2024(5): 64-70.
- [38] Ni Hongfu, Wang Xiaoxing. Lógica económica de la gestión del espacio aéreo de baja altitud. *Southeast Academic Research*, 2025(4): 175-187.

- [39] Wang Jiaoe, Du Delin. Interpretación geográfica de la economía de baja altitud y análisis teórico de los sistemas humano-tierra de baja altitud. *Resources Science*, 2025, 47: 1628-1639.
- [40] Public-Private Committee for Advanced Air Mobility. Concepto de operaciones para la movilidad aérea avanzada. 2023-12-06. <https://www.aero.jaxa.jp/eng/research/star/concerto/>.
- [41] European Union Aviation Safety Agency. Estudio sobre la aceptación social de la movilidad aérea urbana en Europa. 2021-05-19. <https://trid.trb.org/View/1869021>.
- [42] Transport Canada. Manual de información aeronáutica (TC AIM). 2025-10-02. <https://tc.canada.ca/en/aviation/publications/aeronautical-information-manual-aim>.
- [43] Civil Aviation Safety Authority. Civil Aviation Safety Regulations 1998. 2024-11-29. <https://www.legislation.gov.au/F2024L01553/asmade/2024-11-29>.
- [44] United Kingdom Civil Aviation Authority. The Air Navigation Order 2016. 2016-07-13. <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2016/765/contents>.
- [45] Feng Mingxiang, Li Haijun, Yan Fei, et al. Método de identificación y cálculo de zonas urbanas restringidas para vuelos de baja altitud mediante integración de datos multi-fuente. *Urban Planning Forum*, 2025(Suppl. 2): 146-153.
- [46] Xia Hao, Lin Yuewei, Yan Jun, et al. Revisión de tecnologías clave para comunicación y detección integradas en UAV de baja altitud. *Telecommunication Engineering*, 2025, 65(6): 838-847.

Traducción asistida por IA