



**MinCiencia**

Manual de buenas prácticas para la Gestión de

# Sitios Astronómicos

con fines de Investigación Científica





**Título:** Manual de buenas prácticas para la Gestión de Sitios Astronómicos con fines de Investigación Científica

**Fotografía portada:** Sitio de observatorios de AURA, muestra el Telescopio SOAR (a la izquierda) y Telescopio Gemini Sur (a la derecha), Cerro Pachón, Región de Coquimbo, Chile | Héctor Millar.

**Coordinación, diseño de contenidos y edición general:**

Dra. Mariela C. Núñez Ávila, jefa de asesores, Gabinete de la Subsecretaría, Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

**Diseño de contenidos:**

Dr. Nicolás Trujillo Osorio, asesor en materias astronómicas y cooperación internacional, Gabinete de la Subsecretaría, Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Dr. Felipe Aguilar Sandoval, ingeniero físico, asesor científico en materias astronómicas, Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación (UMCE), Santiago de Chile.

Una parte de los contenidos de este manual provienen del Informe de la Comisión Asesora Ministerial sobre Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica (Comisión Asesora 2025), creada por Decreto Exento N°106/2025 del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

**Agradecimientos:**

A los integrantes de la Comisión Asesora 2025: Dr. Rodrigo Andrés Reeves Díaz, Dra. Elise Marie Germaine Servajeau Bergoeing, Dra. Manuela Zoccali, Dr. Marcos Andrés Díaz Quezada, Dr. (c) Omar Enrique Cuevas Ahumada, Pedro Andrés Sanhueza Pérez, Dr. Eduardo Alejandro Unda-Sanzana y a todas las personas representantes de instituciones administradoras de sitios astronómicos, gobiernos regionales y organismos públicos que participaron del proceso.

**Créditos fotografías:**

Héctor Millar y Ricardo Ferreira, profesionales del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

**Diseño:** graficAnimada.

Elenita Fuenzalida, diseño. Débora Gutiérrez, corrección de texto y estilo. Valentina Carvajal, mapas georreferenciados.

**Primera edición, Santiago de Chile, marzo 2026.**

**Como citar este documento:**

Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. (2026). *Manual de buenas prácticas para la Gestión de Sitios Astronómicos con fines de Investigación Científica*. Gobierno de Chile. Santiago, Chile.



## CONTENIDOS

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Palabras del ministro</b>                                                                                    | 3  |
| <b>Palabras del subsecretario</b>                                                                               | 4  |
| <b>Presentación</b>                                                                                             | 5  |
| <b>Introducción</b>                                                                                             | 6  |
| <b>I. Liderazgo mundial de Chile en observación astronómica</b>                                                 | 13 |
| 1.1. Condiciones de Chile para la observación astronómica                                                       | 13 |
| 1.2. Historia de la astronomía y acuerdos internacionales                                                       | 15 |
| 1.3. Gobernanza y marco regulatorio nacional para el desarrollo de la astronomía                                | 18 |
| <b>II. Rol rector del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación en materias astronómicas</b> | 32 |
| 2.1. Funciones y atribuciones de Ministerio de Ciencia para la protección de las Áreas astronómicas             | 32 |
| 2.2. Condiciones habilitantes del sitio astronómico como objeto de protección                                   | 35 |
| <b>III. Gestión de los sitios astronómicos con fines de investigación científica</b>                            | 44 |
| 3.1. Observación astronómica y tipos de tecnologías                                                             | 44 |
| 3.2. Estudio de sitio y variables para el monitoreo                                                             | 47 |
| 3.3. Tipos de contaminantes para cada tipo de tecnología                                                        | 61 |
| 3.4. Catastro Nacional de sitios astronómicos                                                                   | 66 |
| 3.5. Medidas de mitigación                                                                                      | 71 |
| <b>IV. Conclusión: buenas prácticas para la gestión de sitios astronómicos</b>                                  | 77 |
| <b>Bibliografía</b>                                                                                             | 79 |



## Palabras del ministro

Chile posee una oportunidad histórica para consolidar su liderazgo a nivel mundial en materias astronómicas. La calidad excepcional de nuestros cielos nocturnos, la estabilidad institucional y el compromiso sostenido de los diferentes gobiernos con la ciencia, han permitido que el territorio nacional albergue las infraestructuras y tecnologías astronómicas más avanzadas del planeta.

Hoy ese liderazgo nos impone una responsabilidad mayor: gestionar de manera ejemplar estos sitios astronómicos, resguardando su valor científico, ambiental y estratégico para las futuras generaciones. En este contexto, el Gobierno del Presidente Gabriel Boric reafirma su compromiso con el fortalecimiento de la astronomía como un eje estratégico del desarrollo nacional y regional, promoviendo una gobernanza moderna y orientada al interés público.

Vivimos, además, un momento decisivo. La astronomía no solo expande las fronteras del conocimiento, sino que también impulsa el desarrollo tecnológico, la formación de capital humano avanzado, la cooperación internacional y los encadenamientos productivos de alto valor agregado. Su impacto es visible en las ciencias de datos, la inteligencia artificial, la ingeniería de precisión, la óptica avanzada, la robótica, la gestión tecnológica y sus múltiples ámbitos, que en su conjunto contribuyen a una economía más sofisticada y basada en el conocimiento científico. Gestionar adecuadamente nuestros sitios astronómicos es, por tanto, una responsabilidad científica, pero también política y económica.

El propósito es hacer de la gestión responsable de nuestros sitios astronómicos, una política de Estado que trascienda gobiernos, fortalezca la confianza internacional en Chile y consolide nuestra identidad como nación que mira al cielo para construir un futuro más justo, sostenible y próspero.



**Aldo Valle Acevedo**

Ministro de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación

## Palabras del subsecretario

El Gobierno del Presidente Gabriel Boric reafirma su compromiso con la astronomía mediante la elaboración de este Manual de Buenas Prácticas para la Gestión de Sitios Astronómicos con fines de Investigación Científica, una herramienta orientadora que busca fortalecer la coordinación entre instituciones públicas, comunidades, academia e industria, bajo principios de sostenibilidad, cooperación internacional, certeza regulatoria y excelencia técnica.

En mi calidad de subsecretario y presidente de la Comisión Asesora creada por el Decreto N° 106/2025, me correspondió liderar un proceso de trabajo técnico y participativo que convocó a científicas y científicos, representantes de observatorios instalados en el país y equipos especializados del sector público. Este manual es fruto de ese esfuerzo colectivo. En él convergen la experiencia acumulada por la comunidad astronómica nacional e internacional, así como el conocimiento práctico de quienes gestionan, día a día, las condiciones que hacen posible la observación astronómica en Chile.

Agradezco especialmente a las y los integrantes de la comisión, a los equipos de los observatorios nacionales e internacionales, y a los organismos públicos que son parte de la gobernanza nacional de los sitios astronómicos, pues contribuyeron con rigurosidad y visión de futuro a este documento.

Nuestro país ha avanzado de manera sostenida en la consolidación de áreas de valor científico para la observación astronómica, en la generación de marcos normativos específicos y en el fortalecimiento de capacidades técnicas en el Estado. Esto queda plasmado en la publicación del Decreto Supremo N° 2/2023 del Ministerio de Ciencia, y este manual profundiza esa trayectoria, estableciendo referencias técnicas y legislativas, así como lineamientos para una gestión responsable y coordinada, incorporando mecanismos de seguimiento y monitoreo periódico de las variables ambientales que habilitan la observación mediante las distintas tecnologías actualmente empleadas.

La protección de las condiciones que hacen posible la astronomía en Chile exige gestión permanente, monitoreo continuo y responsabilidad compartida. Este manual es una base sólida para avanzar en esa dirección y para consolidar, con visión de Estado, el liderazgo astronómico de nuestro país.



**Cristián Cuevas Vega**

Subsecretario de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación

## Presentación

Este Manual de Buenas Prácticas para la Gestión de Sitios Astronómicos con fines de Investigación Científica reúne y sistematiza aspectos legales, lineamientos técnicos, conceptos operativos y orientaciones de gestión, para apoyar a los observatorios nacionales e internacionales, las instituciones públicas, privadas y otros actores relevantes, en el resguardo de las Áreas de Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica en Chile.

La primera sección de este manual aborda el liderazgo mundial de Chile en observación astronómica, relatando las condiciones geográficas y atmosféricas excepcionales que ofrecen los cielos del norte del país, las alianzas estables y de largo plazo de la cooperación internacional y las políticas de Estado en materia de ciencia y medio ambiente, que en conjunto resguardan este patrimonio científico de Chile y el mundo.

El rol rector del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación en materias astronómicas es desarrollado en la segunda sección del manual. Por medio de un análisis de las funciones y atribuciones de Ministerio de Ciencia para la definición y protección de las Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica, se fundamenta la definición del objeto de protección de las áreas astronómicas como también las condiciones habilitantes para el adecuado funcionamiento de cada sitio astronómico.

La tercera sección, en tanto, presenta los lineamientos técnicos para la gestión de los sitios astronómicos con fines de investigación científica, entregando las descripciones de los tipos de tecnologías de observación, las variables ambientales que sirven para caracterizar las condiciones habilitantes y los tipos de contaminación que las alteran, podrían dar cuenta de alteraciones de las condiciones habilitantes por impacto humano. Al respecto, este manual propone solicitar reportes sobre estas variables a los administradores de sitios astronómicos, para poner a disposición esta información en el Catastro Nacional de Sitios Astronómicos.

Finalmente, este manual entrega una serie de medidas de mitigación a partir de un análisis comparado de los diferentes países que mantienen observatorios astronómicos para investigación científica.

## Introducción

Durante los últimos sesenta años, Chile se ha posicionado como un polo mundial para la observación astronómica, albergando las infraestructuras más avanzadas a nivel global, que en su conjunto conforman más de la mitad de la capacidad de observación astronómica mundial en los rangos óptico e infrarrojo, lo que se une a la presencia de observatorios astronómicos de escala extrema en los rangos milimétrico y submilimétrico, como también en rayos gamma.

Su liderazgo se debe a un conjunto excepcional de condiciones geográficas, atmosféricas y ambientales que lo han posicionado como uno de los mejores lugares del mundo para la observación astronómica. La combinación de altitud extrema, atmósfera seca, estabilidad climática y baja contaminación lumínica hace que los cielos del norte del país sean comparables solo con los de Hawái en Estados Unidos o las Islas Canarias en España. Estas características, unidas a un marco institucional de protección y desarrollo científico de largo plazo, han permitido que Chile concentre una fracción significativa de la infraestructura astronómica global.

La historia de la astronomía en Chile se remonta a mediados del siglo XIX, cuando el país comenzó a ser reconocido como un lugar privilegiado para la observación del cielo desde el Hemisferio Sur. Gracias a las tempranas capacidades generadas en Chile, durante el siglo XX se pudo avanzar en la consolidación de un modelo de cooperación científica internacional que permitió grandes avances en materia astronómica. La promulgación de la Ley N° 15.172 en 1963, que facultó al Estado, por medio de la Universidad de Chile, para suscribir acuerdos con universidades y organismos extranjeros con el propósito de instalar infraestructura astronómica en el territorio nacional, estableció un marco jurídico que permitió atraer inversión científica internacional y consolidar a Chile como un polo estratégico de observación astronómica en el hemisferio sur.

Complementariamente, en 1963 el Estado de Chile celebra el primer acuerdo Estado-Estado en materia astronómica, con el Observatorio Europeo Austral (European Southern Observatory, ESO). Este acuerdo estableció el marco jurídico para la instalación y operación de proyectos astronómicos y abrió el camino para el desarrollo de infraestructura tecnológica de clase mundial en el país.

La creciente comunidad científica nacional también ha sido un factor clave para cultivar en Chile las principales líneas de investigación de la astronomía. De acuerdo al último censo de astrónomos y astrónomas de la Sociedad Chilena de Astronomía (SOCHIAS, 2024), el país cuenta actualmente con 297 astrónomas y astrónomos activos, distribuidos en 23 universidades y centros de investigación,

con una marcada presencia en las regiones de Antofagasta, Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana y Biobío.

De esta manera, Chile ha consolidado un marco jurídico sólido y coherente para otorgar certezas a las instituciones científicas internacionales que deciden invertir en infraestructura astronómica en el país. Hoy el sistema chileno combina instrumentos de derecho internacional público con normas de derecho administrativo nacional, generando un entorno institucional confiable para la instalación y operación de centros de observación astronómica.

La ley 21.105 del 2018, que crea el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (Ministerio de Ciencia), le asigna un rol central en la definición de políticas públicas en materia de CTCI. En particular, el Artículo 4 en las letras a), b), d), l) y r), establece funciones relevantes para la protección de áreas astronómicas tales como formular políticas, coordinar al sistema nacional de ciencia, tecnología, conocimiento e innovación, velar por la protección y conservación del patrimonio científico y tecnológico nacional, además de proponer al Presidente de la República las Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica.

Al mandatar al ministerio a *“velar por la protección y conservación del patrimonio científico nacional”*, la norma incluye la infraestructura astronómica instalada en Chile, las condiciones habilitantes que permiten su adecuado funcionamiento, los activos científicos y tecnológicos asociados y la cooperación internacional que opera sobre estos sitios. En consecuencia, el literal l) otorga un fundamento jurídico robusto para la acción del Ministerio de Ciencia, orientada a prevenir el deterioro de sitios astronómicos, identificar amenazas emergentes e impulsar medidas normativas o técnicas que aseguren su preservación como parte esencial del patrimonio científico del país.

Gracias a las funciones y atribuciones del Ministerio de Ciencia en materias astronómicas, el año 2023 se publicó el DDecreto Supremo N° 2/2023, que declaró oficialmente 29 comunas de las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo como Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica (Áreas astronómicas).

En marzo de 2025, en tanto, la Unión Astronómica Internacional (UAI) recomendó nuevos criterios técnicos para la protección de los cielos, enfatizando la necesidad de establecer criterios sitio-específicos con rangos de protección ajustados a cada tecnología de observación astronómica con fines de investigación científica. Esto requiere que cada observatorio declare específicamente las condiciones habilitantes para el adecuado funcionamiento de cada tipo de tecnología de observación.

La Comisión Asesora Ministerial sobre Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica –creada mediante Decreto Exento N°106/2025 por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación–, prestó una asesoría integral en la elaboración de una propuesta de actualización de las áreas astronómicas definidas por el Decreto Supremo N°2/2023, a fin de adecuarlas a la evidencia científica reciente y a los avances tecnológicos en observación astronómica en Chile.

Esta comisión recomendó ampliar el objeto de protección de las Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica como a las condiciones habilitantes de los sitios astronómicos con fines de investigación científica. Estas incluyen, además de la calidad de cielos, otras variables atmosféricas y terrestres que deben ser consideradas por el impacto que generan en las tecnologías de observación astronómica de nueva generación.

De acuerdo con la Comisión Asesora 2025, las condiciones habilitantes son el conjunto de variables ambientales (terrestres y atmosféricas) de cada sitio astronómico, que se mantienen dentro de ciertos límites que permiten a un observatorio astronómico funcionar, con las características de efectividad y eficiencia con que fue diseñado, para el logro de los objetivos científicos que fundamentaron su creación y desarrollo.

Las precisiones técnicas sugeridas por la comisión resultan hoy pertinentes, por el alto nivel de sofisticación tecnológico e industrial de los observatorios. En efecto, la observación astronómica es una práctica científica orientada a la producción, análisis e interpretación de datos provenientes de objetos y fenómenos celestes mediante instrumentos tecnológicos especializados. Permite detectar la radiación electromagnética en diversos rangos del espectro, que viaja desde el espacio hasta la superficie terrestre, permitiendo estudiar la estructura, composición, dinámica y evolución del universo.

Los diferentes tipos de tecnologías de los principales observatorios instalados en Chile, se diferencian también por la región del espectro electromagnético que observan. Es así como se desarrollan tecnologías que detectan desde ondas de radio que presentan la mayor longitud de onda, luego la radiación infrarroja, luz visible y finalmente los rayos gamma con la menor longitud de onda.

Cada una de estas tecnologías requiere de la estabilidad de un conjunto de condiciones ambientales. Cuando una organización decide desarrollar un observatorio astronómico, normalmente ese observatorio tendrá un cierto objetivo científico que justificará su creación. La selección de la o las tecnologías a establecer en un determinado sitio estará guiada por el interés de alcanzar tal objetivo científico con

certidumbre (efectividad), con un gasto previsto de recursos, incluyendo tiempo, para lograr tal resultado (eficiencia).

El estudio de sitio (*site testing*), indispensable para la futura instalación de infraestructura astronómica, consiste justamente en el registro sistemático de variables ambientales (terrestres y atmosféricas) en varias zonas del mundo, durante un período de tiempo que toma varios años, las que son analizadas por parte de la organización responsable de desarrollar un observatorio astronómico. En base a esta información ambiental, entre otros aspectos políticos-administrativos, se define el sitio en donde se procederá a instalar la o las tecnologías de observación astronómica que permitan alcanzar los objetivos de la investigación científica.

Las variables cuantificadas en el estudio de sitio son reportadas en artículos científicos que informan sobre los resultados del proceso de investigación de varios sitios y la fundamentación técnica de la selección del mejor sitio (con las mejores variables ambientales), para la instalación de un observatorio con fines de investigación científica. Algunos observatorios de mayores capacidades mantienen el monitoreo continuo de dichas variables y las dejan disponibles en sus páginas web.

Entre las variables atmosféricas más reportadas para los sitios astronómicos y que pueden ser monitoreadas figuran la fracción de cobertura de nubes, porcentaje anual de noches fotométricas, vapor de agua precipitable (PWV), *seeing* global (turbulencia) o estabilidad atmosférica, concentración de polvo y brillo en el cielo (afectado por la luminosidad artificial). En el caso de los radiotelescopios también se mide la interferencia de radiofrecuencia (RFI).

En cuanto a las variables cuantificadas de la superficie terrestre se consideran: compactación, estabilidad de taludes, microsismicidad, humedad del suelo, temperatura del suelo, composición química y radiactividad. Junto con ello, a nivel atmosférico a luminosidad artificial es una de las fuentes de contaminación con mayor alcance de distancia en la atmósfera y, por lo tanto, la más relevante para los observatorios en rangos visibles, infrarrojos y rayos gamma, ya que su efecto no está restringido solo al cielo sobre la fuente de luz, sino que puede ser detectado en el cielo lejos de ésta.

Además de la contaminación lumínica, se destaca la turbulencia, el material particulado, las vibraciones y la interferencia electromagnética como tipos de alteraciones que podrían ser generadas por actividades humanas, deteriorando las condiciones habilitantes que permiten un adecuado funcionamiento de los sitios astronómicos.

En el presente manual se describen y sistematizan una serie de medidas que buscan orientar las iniciativas públicas y privadas que se desarrollen en las áreas astronómicas, las cuales se aplican en otros países con similares infraestructuras científicas de observación astronómica, de manera de evitar el deterioro de las condiciones habilitantes de los sitios astronómicos, como también la disminución paulatina de la contaminación en el marco de los instrumentos de ordenamiento territorial comunal y regional que se desarrollen en la zona norte de Chile.

Desde el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, esperamos que el conjunto de insumos técnicos contenidos en este Manual de buenas prácticas para la Gestión de Sitios Astronómicos con fines de Investigación Científica, sirvan como orientaciones para contribuir a una gestión coordinada e informada por evidencias y, de esta manera, asegurar que el país continúe ofreciendo condiciones excepcionales para la observación astronómica y el desarrollo de la ciencia de frontera en Chile y el mundo.

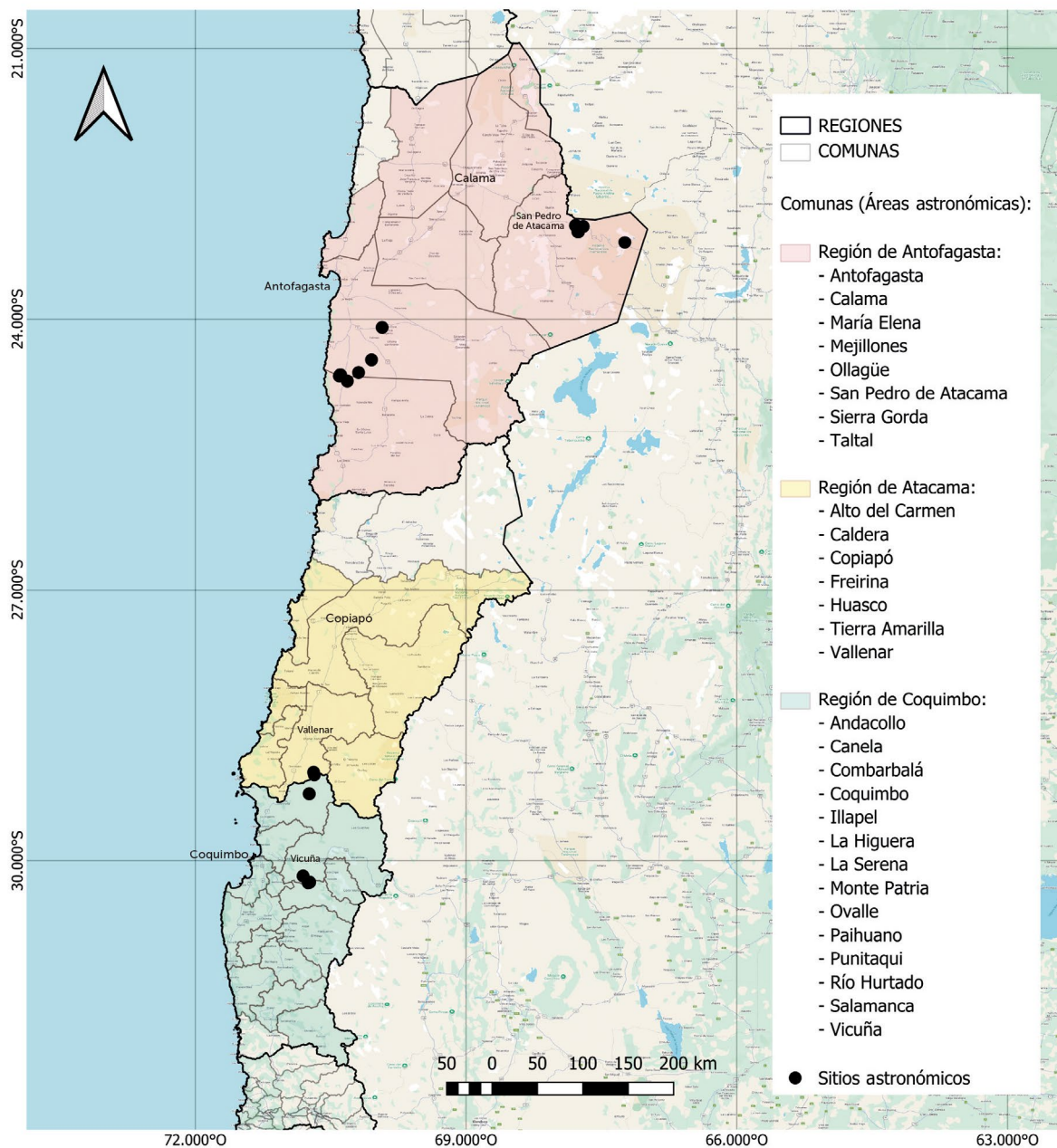


Figura 1. Comunas que corresponden a las Áreas astronómicas en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo, declaradas en el Decreto Supremo 2/2023 del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.



## I. Liderazgo mundial de Chile en observación astronómica

Chile se ha posicionado como un polo mundial para la observación astronómica, albergando las infraestructuras más avanzadas a nivel global, que en su conjunto conforman más de la mitad de la capacidad de observación astronómica mundial –en los rangos óptico e infrarrojo– lo que se une a la presencia de observatorios astronómicos de escala extrema en los rangos milimétrico y submilimétrico, y próximamente en rayos gamma.

El liderazgo del país en materia astronómica, además de las condiciones geográficas y atmosféricas excepcionales que ofrecen los cielos del norte, es producto de las alianzas estables y de largo plazo de la cooperación internacional, las políticas de Estado en materia de ciencia y medio ambiente, que en conjunto resguardan este patrimonio científico de Chile y el mundo.

### 1.1. Condiciones de Chile para la observación astronómica

El país reúne un conjunto excepcional de condiciones geográficas, atmosféricas y ambientales que lo han posicionado como uno de los mejores lugares del mundo para la observación astronómica. La combinación de altitud extrema, atmósfera seca, estabilidad climática y baja contaminación lumínica hace que los cielos del norte sean comparables solo con los de Hawái (Estados Unidos) o las Islas Canarias (España). Estas características, unidas a un marco institucional de protección y desarrollo científico, han permitido que Chile concentre una fracción significativa de la infraestructura astronómica global.

#### • *Altitud extrema y estabilidad geológica*

El norte de Chile presenta una topografía caracterizada por una sucesión de mesetas y cordones precordilleranos situados entre 2200 y 5000 metros sobre el nivel del mar. Estas altitudes reducen significativamente la cantidad de atmósfera que los telescopios deben atravesar para captar la radiación proveniente del espacio, minimizando los efectos de la absorción y la distorsión óptica.

Lugares como cerro Paranal, cerro Tololo, cerro Pachón y el Llano de Chajnantor, se encuentran entre los sitios más altos y estables desde el punto de vista atmosférico del planeta. Además, su estabilidad geológica, con bajo nivel de vibraciones y estructuras rocosas firmes, garantiza una base sólida para observatorios de gran escala, donde incluso vibraciones mínimas pueden afectar la precisión de las mediciones.

- ***Aridez y transparencia atmosférica***

El desierto de Atacama es el más seco del mundo, con precipitaciones promedio que en algunas zonas no superan los 10 mm anuales (Garreaud 2011). Esta extrema aridez produce una atmósfera excepcionalmente limpia y carente de vapor de agua, condición indispensable para la observación infrarroja y submilimétrica. En sitios como Chajnantor, la humedad relativa suele ser inferior al 10%, reduciendo drásticamente la absorción de radiación en longitudes de onda sensibles al agua. A ello se suma una muy baja concentración de polvo y aerosoles, lo que disminuye la dispersión de la luz y mejora la nitidez del cielo nocturno. Por estas condiciones, los observatorios ubicados en el norte de Chile registran valores de vapor de agua precipitable (PWV) extremadamente bajos, permitiendo mediciones que serían imposibles en la mayor parte del planeta (Bustos et al. 2014).

- ***Cielos despejados y baja turbulencia***

Las zonas de observación astronómica del país tienen –en sitios como Paranal o Armazones– alrededor de 90% de noches útiles para la investigación astronómica, lo que representa una eficiencia operativa excepcional para telescopios de gran envergadura. Esta característica se combina con una turbulencia atmosférica mínima, traducida en un *seeing* (calidad óptica del cielo) de alta estabilidad. La interacción entre masas de aire frío del océano Pacífico y masas de aire cálido del continente, genera capas atmosféricas de flujo laminar que reducen la distorsión en las imágenes, permitiendo observaciones de alta resolución.

- ***Inversión térmica y efecto de la corriente fría de Humboldt***

Un elemento distintivo del clima del norte de Chile es la corriente fría de Humboldt, que circula frente a sus costas. Esta corriente genera una capa de inversión térmica que retiene la humedad y las nubes a baja altitud, mientras que las zonas de montaña permanecen despejadas (Garreaud, 2011). Desde los observatorios andinos es común observar un “mar de nubes” por debajo de los 1500 metros de altitud, que actúa como barrera natural contra la contaminación lumínica y atmosférica. Este fenómeno climático contribuye a mantener una atmósfera seca, estable y transparente en las zonas altas, asegurando la continuidad y previsibilidad de las observaciones científicas durante todo el año.

- ***Acceso al cielo del hemisferio austral***

La ubicación de Chile en el hemisferio austral brinda un acceso privilegiado a regiones del firmamento que no son visibles desde el hemisferio norte. Desde sus observatorios se puede observar directamente el centro de la Vía Láctea, las Nubes de Magallanes y otras zonas australes de gran relevancia científica. Esto convierte al país en una ventana estratégica al cielo austral, complementaria a las observaciones realizadas en el hemisferio norte. La posición geográfica del país, combinada con la inclinación de su territorio hacia el ecuador celeste, permite un

seguimiento prolongado y estable de los objetos astronómicos durante la noche, optimizando el tiempo de observación.

## 1.2. Historia de la astronomía y acuerdos internacionales

### • *Hitos relevantes del siglo XIX*

La historia de la astronomía en Chile se remonta a mediados del siglo XIX, cuando el país comenzó a ser reconocido como un lugar privilegiado para la observación del cielo austral. Tras el funcionamiento de un primer observatorio astronómico profesional en el cerro Cordillera de Valparaíso, instalado por Juan Mouat en 1843, la expedición astronómica estadounidense dirigida por James Melville Gilliss instaló en lo que es hoy el cerro Santa Lucía en Santiago, un observatorio científico entre los años 1849 y 1852. El Estado de Chile tomó un interés directo en su desarrollo. Su propósito principal fue medir la distancia solar mediante observaciones simultáneas entre el hemisferio norte y el sur. Esta misión fue patrocinada por el U.S. Naval Observatory y es considerada un hito que marcó el inicio de una tradición de cooperación internacional en torno a la astronomía en el país.

Previo a la partida de Gilliss, el Gobierno de Chile, presidido por Manuel Montt, compró los equipos astronómicos, dando origen al Observatorio Nacional de Santiago, inaugurado en 1852 bajo la dirección del astrónomo alemán Carlos Moesta, discípulo de Christian Gerling. Actualmente el observatorio está ubicado en el cerro Calán, en la comuna de Las Condes (región Metropolitana). Durante las décadas siguientes, el observatorio participó en mediciones que permitieron, hacia fines del siglo XIX, que el país fuera considerado un sitio relevante para la observación del cielo austral, en una época en que la astronomía aún era un campo incipiente en latinoamericana.

### • *Siglo XX: época de institucionalización y crecimiento de la comunidad científica nacional*

Gracias a las tempranas capacidades generadas en Chile, durante el siglo XX se pudo avanzar en la consolidación de un modelo de cooperación científica internacional que permitió dos grandes avances en materia astronómica: la instalación de observatorios de clase mundial en su territorio y el desarrollo de un marco legislativo sólido, bien estructurado con una constante revisión y fortalecimiento hasta el día de hoy.

Ambos avances tuvieron una primera expresión en la operación del Observatorio Solar Montezuma, de la Smithsonian Institution, instalado cerca de Calama en la Región de Antofagasta, entre 1918 y 1955. Esto permitió ver a un primer observatorio astronómico internacional operando en el desierto de Atacama, y avizorar, por

parte del Estado de Chile, las facilidades que estos observatorios necesitan para una operación estable. Tras el cierre de Montezuma, producto de la contaminación por partículas en su entorno, el desarrollo astronómico en el norte de Chile no se estancó, ya que poco más tarde se alcanzan dos hitos relevantes para el desarrollo científico nacional.

Una de ellos fue la promulgación de la Ley N° 15.172 en 1963, que facultó al Estado, por medio de la Universidad de Chile, a suscribir acuerdos con universidades y organismos extranjeros con el propósito de instalar infraestructura astronómica en el territorio nacional. Esta legislación estableció el marco jurídico que permitió atraer inversión científica internacional y consolidar al país como un polo estratégico de observación astronómica en el hemisferio sur.

El primer resultado directo de esta norma fue la creación del Observatorio Interamericano Cerro Tololo (CTIO), administrado por la Association of Universities for Research in Astronomy (AURA), un consorcio integrado por universidades e instituciones científicas de Estados Unidos. Inaugurado en 1962 y ubicado en la Región de Coquimbo, el CTIO fue el primer observatorio internacional de gran escala en el país y sirvió de modelo para futuras colaboraciones científico-tecnológicas.

El segundo hito ocurrió el mismo año (1963) cuando el Estado de Chile celebra el primer acuerdo Estado-Estado en materia astronómica, con el Observatorio Europeo Austral (European Southern Observatory, ESO). Este acuerdo estableció el marco jurídico para la instalación y operación de sus proyectos astronómicos y abrió la senda para un camino de desarrollo de infraestructura tecnológica de clase mundial.

Gracias al marco legislativo establecido por dicho tratado, ESO inauguró en 1969 el Observatorio La Silla en la región de Coquimbo, su primera instalación fuera de Europa. Posteriormente expandió su presencia con la construcción del Very Large Telescope (VLT) en cerro Paranal en la región de Antofagasta que fue inaugurado en 1999.

En paralelo, la Carnegie Institution for Science estableció el Observatorio Las Campanas (LCO) en la región de Atacama en 1971, consolidando la presencia de instituciones estadounidenses en el norte del país. Por su parte, la Universidad de Chile, en colaboración con el consorcio AURA, desarrolló nuevas instalaciones en el cerro Pachón, concebidas como una extensión del complejo de Tololo.

Ya en el siglo XXI, Chile reafirmó su posición de liderazgo global con la inauguración en el llano de Chajnantor, en la región de Antofagasta, del Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) en 2011. Se trató de una alianza científica

e internacional sin precedentes entre ESO, la Associated Universities Inc. (AUI), la National Radio Astronomy Observatory (NRAO) y el National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ).

A estos hitos se suman también la reciente inauguración del Vera C. Rubin Observatory (VRO) y los proyectos actualmente en construcción: el Giant Magellan Telescope (GMT) de la National Science Foundation de Estados Unidos, el Extremely Large Telescope (ELT) de la ESO, y el Cherenkov Telescope Array (CTA-Sur). Estos observatorios consolidarán, en la próxima década, la posición de Chile como capital mundial de la observación astronómica y centro neurálgico de la ciencia internacional del siglo XXI.

La presencia de estos observatorios no solo ha aportado equipamiento científico de clase mundial a Chile. Junto con ello, la experiencia chilena en esta materia ha permitido desarrollar modelos de gobernanza internacional que combinan inversión extranjera y nacional, concesiones de territorios estatales, 10% del total de tiempo de observación astronómica reservado para instituciones nacionales y el desarrollo de capacidades para la formación de capital humano avanzado.

En este sentido, uno de los principales beneficios del liderazgo chileno en materias astronómicas ha sido el aumento sostenido del número de investigadores en el área. Según el censo astronómico 2023 de la Sociedad Chilena de Astronomía (Sochias), Chile cuenta actualmente con 297 astrónomas y astrónomos activos, distribuidos en 23 universidades y centros de investigación, con una marcada presencia en las regiones de Antofagasta, Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana y Biobío.

La creciente comunidad científica nacional también ha sido un factor clave para cultivar en el país las principales líneas de investigación en astronomía. En términos generales, la astronomía contemporánea no solo constituye una disciplina científica de frontera, sino también un instrumento esencial para comprender la estructura, la evolución y la sustentabilidad del planeta.

Desde la observación del Sol y los cuerpos menores del sistema solar, clave para la seguridad planetaria ante eventos cósmicos o cuerpos potencialmente peligrosos, hasta la exploración de galaxias y exoplanetas, la investigación astronómica aporta conocimiento fundamental sobre los procesos físicos, las dinámicas del universo y las composiciones bioquímicas que condicionan la vida vegetal y animal, siendo un área clave para comprender y mejorar la estabilidad de los ecosistemas terrestres y extraterrestres.

A nivel social, la astronomía también cumple un papel formativo estratégico, ya que permite fortalecer las capacidades nacionales para el desarrollo de pensa-

miento crítico y otras habilidades que son necesarias para cultivar conocimientos de frontera, despertando así vocaciones tempranas en ciencias, conocimientos, tecnología e innovación.

### 1.3. Gobernanza y marco regulatorio nacional para el desarrollo de la astronomía

#### • ***Certezas jurídicas de Chile para la inversión en observatorios astronómicos***

Durante más de seis décadas, Chile ha consolidado un marco jurídico sólido y coherente para otorgar certezas a las instituciones científicas internacionales que deciden invertir en infraestructura astronómica en el país. Esta estabilidad ha sido un factor clave para lograr que el país concentre la mayor cantidad de observatorios de clase mundial en el hemisferio sur y continúe proyectándose como un referente global en cooperación científica y tecnológica.

El sistema chileno combina instrumentos de derecho internacional público con normas de derecho administrativo nacional, generando un entorno institucional confiable para la instalación y operación de centros de observación astronómica. Es posible afirmar que este marco jurídico y administrativo descansa sobre cuatro pilares:

- La existencia de acuerdos internacionales y normas habilitantes para la cooperación científica.
- La acreditación formal de organismos internacionales ante el Estado chileno, que garantiza su operatividad y los regímenes de privilegios e inmunidades.
- La ejecución de actos administrativos internos que aseguran la tenencia del suelo, las condiciones tributarias, la gestión logística de los proyectos y los marcos de protección especial.
- La declaración y definición de Áreas de Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica, que constituyen un objeto de especial protección para la legislación ambiental y científico-tecnológica.

Estos elementos conforman un entramado legal y técnico que otorga certeza jurídica y previsibilidad, sin menoscabar la soberanía nacional ni la aplicación de la legislación ambiental, laboral y territorial vigente.

#### • ***Marco jurídico de los acuerdos con organismos internacionales***

La instalación de observatorios internacionales en Chile se articula mediante dos mecanismos jurídicos, que habilitan y regulan la cooperación científica internacional: La Ley N° 15.172 y los tratados internacionales Estado-Estado.

La Ley N° 15.172, promulgada en 1963, libera del pago de derechos de internación y, en general, de todo impuesto y contribuciones, a la internación del material e implementos destinados a la instalación y alhajamiento del observatorio astronómico que será construido en el país. De esta manera se establece el primer instrumento legal que permite al Estado de Chile celebrar acuerdos con universidades, consorcios académicos o instituciones extranjeras de investigación científica, a través de la Universidad de Chile. Su creación respondió a la necesidad de dotar de certeza y respaldo jurídico a los primeros proyectos astronómicos de gran escala, impulsados por universidades estadounidenses y europeas que buscaban aprovechar las condiciones excepcionales del norte chileno.

Este marco legal otorga facilidades para la instalación y operación de observatorios internacionales y determina un régimen especial en materia tributaria, aduanera y migratoria. Requiere coordinación estrecha entre el Ministerio de Relaciones Exteriores, el Ministerio de Ciencia y otros ministerios para asegurar coherencia entre los compromisos internacionales y la normativa interna, incluyendo la protección del entorno astronómico.

Gracias a esta ley se concretaron las primeras alianzas científicas internacionales, que dieron origen al Observatorio Interamericano Cerro Tololo, operado por la Association of Universities for Research in Astronomy (AURA), y al Observatorio Las Campanas, gestionado por la Carnegie Institution for Science.

El segundo mecanismo que tiene Chile para favorecer el desarrollo astronómico aplica cuando la cooperación se establece entre el Estado de Chile y organizaciones internacionales de carácter intergubernamental, con personalidad jurídica reconocida a nivel internacional. Estos acuerdos se rigen por el derecho internacional público y son aprobados conforme a la Constitución Política y a la Convención de Viena sobre el Derecho de los Tratados (1969). A su vez, estos acuerdos se inspiran en el modelo de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

El ejemplo más emblemático es el acuerdo entre el Gobierno de Chile y el Observatorio Europeo Austral, suscrito en 1963, que fue complementado con acuerdos posteriores en 1996. Este instrumento estableció el marco jurídico para la instalación de los observatorios La Silla, Paranal, ALMA y el futuro Extremely Large Telescope (ELT) en cerro Armazones.

Los acuerdos de esta naturaleza son tratados internacionales de cooperación científica y su promulgación requiere la aprobación del Congreso Nacional. Generalmente estos acuerdos contemplan:

- Reconocimiento de la personalidad jurídica internacional de la organización y de su capacidad para celebrar contratos en Chile.
- Régimen de privilegios e inmunidades limitado a las actividades científicas y administrativas necesarias para cumplir su misión.
- Franquicias tributarias y aduaneras para bienes, equipos, materiales y servicios relacionados con la instalación y operación de observatorios.
- Autorizaciones de uso de terrenos fiscales, junto con las servidumbres necesarias para caminos, energía y telecomunicaciones.
- Participación de Chile en los beneficios científicos, a través de la asignación de tiempo de observación reservado para astrónomos nacionales.
- La creación de comités mixtos de cooperación, que aseguren la coordinación entre el organismo internacional, el Ministerio de Ciencia, la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) y el Ministerio del Medio Ambiente.

Este segundo mecanismo ofrece mayor estabilidad institucional y jurídica, dado que los tratados son de aplicación permanente y gozan de jerarquía superior a las normas administrativas ordinarias. Así, la relación con organismos internacionales no es solo diplomática o administrativa, sino directamente vinculante para el diseño normativo interno en materia de protección de las áreas astronómicas.

#### • Aspectos administrativos

La construcción y operación de la infraestructura tecnológica que hace posible la observación astronómica se administra mediante una gobernanza de carácter interministerial, definida en base a roles y funciones específicas. Esta gobernanza se compone de los siguientes ministerios, servicios y agencias públicas.

- **Ministerio de Relaciones Exteriores:** que negocia y promulga los acuerdos y supervisa su cumplimiento.
- **Ministerio de Bienes Nacionales:** encargado de los títulos de uso del suelo.
- **Ministerio del Medio Ambiente y el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA):** que garantizan la sustentabilidad ambiental.
- **Ministerio de Hacienda:** que administra las franquicias tributarias y aduaneras.
- **Subsecretaría de Telecomunicaciones, Ministerio de Obras Públicas y gobiernos regionales:** responsables de la infraestructura y conectividad.

- **Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación:** que define la política astronómica, declara las Áreas de Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica y coordina la articulación científico-tecnológica nacional.

- **Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo:** a cargo de la administración técnica y financiera del Programa de Astronomía, compuesto por fondos concursables para investigación y desarrollo tecnológico en materias astronómicas.

Esta gobernanza institucional asegura coherencia técnica, eficiencia administrativa y trazabilidad jurídica en todas las etapas del ciclo de vida de un observatorio astronómico. A continuación, se presenta una descripción de este marco jurídico en función de instituciones y roles asociados.

#### **i. Acreditación ante Cancillería: personalidad, privilegios e inmunidades**

Una vez suscrito el acuerdo internacional o convenio amparado en la Ley N° 15.172, el organismo científico debe obtener su acreditación oficial ante el Estado de Chile. Este procedimiento, gestionado por la Subdirección de Privilegios e Inmunidades (PRIVIN) del Ministerio de Relaciones Exteriores, traduce los compromisos internacionales en actos administrativos internos que permiten la operación efectiva de la institución. Esta acreditación comprende:

- El registro oficial del organismo y su personal en misión científica.
- La emisión de credenciales diplomáticas y visas oficiales para funcionarios y dependientes.
- La aplicación de privilegios e inmunidades funcionales, limitadas a las actividades propias de la misión.
- La coordinación interministerial con Hacienda, Ciencia, Bienes Nacionales y otros servicios competentes.

#### **ii. Concesión de terrenos y facilidades para la operación**

La instalación de observatorios requiere grandes extensiones de terreno, generalmente ubicadas en zonas fiscales de alta montaña. En el caso de los acuerdos Estado-Estado, el Ministerio de Bienes Nacionales es el órgano encargado de otorgar los derechos de uso sobre dichos terrenos, a través de mecanismos de concesión gratuita, concesión onerosa o venta directa, según la naturaleza del proyecto y el interés público asociado.

Estas concesiones incluyen condiciones sobre superficie, plazos (habitualmente entre 20 y 50 años), mantención y uso exclusivo para fines científicos. También se constituyen servidumbres para acceso, energía eléctrica, fibra óptica o radioenlaces. En particular, el Ministerio de Bienes Nacionales emplea tres tipos de concesión:

- **Venta directa:** en el ámbito de la astronomía, se aplicó una única vez para el terreno de La Silla, concedido al European Southern Observatory. Posteriormente, el Estado abandonó esta figura y estableció un régimen permanente, mediante concesiones administrativas de largo plazo.
- **Concesión onerosa:** derecho de uso con pago de renta anual. En el ámbito de la astronomía, este tipo de concesión no ha sido empleada.
- **Concesión gratuita:** derecho de uso sin renta cuando el fin lo justifique. En el ámbito de la astronomía, este tipo de concesión es el más empleado y se comenzó a utilizar desde 1970.

En todos los casos, las concesiones deben singularizar el territorio, los inmuebles y las condiciones de uso, plazos, obligaciones de mantención y eventuales servidumbres para accesos, tendidos eléctricos y fibra óptica. Junto con ello, el título de uso del terreno debe ser coherente con los instrumentos de planificación territorial y con las áreas protegidas o con valor científico que el Estado haya declarado. En el decreto o contrato de concesión se establecen las condiciones y obligaciones, definidas en un plan de gestión.

Por otra parte, la operación científica de los observatorios astronómicos requiere infraestructura pública complementaria, que habilite el acceso y la gestión de los terrenos concesionados. Por este motivo, el Estado de Chile asegura la construcción de caminos, puentes, seguridad vial de alta montaña, suministro de energía eléctrica estable y telecomunicaciones. Para ello, se establece una coordinación con el Ministerio de Obras Públicas, empresas concesionarias, la Subsecretaría de Telecomunicaciones (Subtel) y, cuando procede, con gobiernos regionales y municipios.

### iii. Régimen tributario, aduanero y laboral para personal científico

Los proyectos astronómicos importan equipamiento de alta precisión que no se fabrica en Chile. Por ello, los acuerdos internacionales suelen contemplar exenciones tributarias y aduaneras orientadas a facilitar la instalación y operación, sin generar distorsiones fiscales. Estas franquicias pueden incluir:

- Exención de derechos de importación, tasas y bodegaje.

- Admisión temporal o definitiva de equipos científicos.
- Exención o devolución del IVA en la adquisición de bienes y servicios relacionados con la construcción y operación del observatorio.
- Exención de impuestos a la renta o contribuciones sobre bienes destinados exclusivamente a la misión científica.

Estas disposiciones se complementan con la normativa tributaria chilena y son supervisadas por el Servicio Nacional de Aduanas, el Servicio de Impuestos Internos y el Ministerio de Hacienda, garantizando transparencia y cumplimiento.

El personal extranjero acreditado bajo el acuerdo, en tanto, goza de un estatus especial que le permite cumplir sus funciones científicas con independencia operativa. Esto incluye facilidades migratorias, importación de efectos personales y exención limitada de ciertos impuestos.

El personal nacional, por su parte, se rige por la legislación laboral chilena. Su participación en los proyectos suele estar regulada mediante convenios específicos que fomentan la transferencia tecnológica, la formación de capital humano y el uso del tiempo de observación nacional asignado a las universidades y centros de investigación chilenos.

#### • **Mecanismos de protección**

Existen tres mecanismos para resguardar el adecuado funcionamiento de las tecnologías usadas en la astronomía con fines de investigación científica: las Zonas de Interés Científico para Efectos Mineros, la Protección radioeléctrica Subtel y las Áreas de Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica.

### **i. Zonas de Interés Científico para Efectos Mineros**

Las Zonas de Interés Científico para Efectos Mineros son una figura jurídica de protección territorial establecida en el Código de Minería (Artículos 17 y 17 bis) y desarrollada por el Decreto Supremo N°17/1987 del Ministerio de Minería. Su propósito es proteger áreas del territorio nacional que poseen un valor excepcional para la investigación científica o tecnológica, impidiendo que la exploración y explotación minera afecte su integridad o las condiciones que las hacen únicas. El proceso de declaración de una Zona de Interés Científico para Efectos Mineros se desarrolla en tres fases:

- **Identificación del área de interés:** las Instituciones científicas o ministerios competentes, como el Ministerio de Ciencia o el Ministerio del Medio Ambiente, presentan una solicitud técnica al Ministerio de Minería, acreditando la importancia científica del sitio y el riesgo de interferencia minera.

- **Evaluación interministerial:** el Ministerio de Minería, con apoyo del Ser-nageomin y de los ministerios sectoriales, analiza la solicitud, verifica la superposición con concesiones vigentes y evalúa los antecedentes geológicos y científicos.

- **Declaración por Decreto Supremo:** el Presidente de la República, mediante Decreto Supremo, declara el área como Zona de Interés Científico para Efectos Mineros. Desde ese momento, no pueden constituirse nuevas concesiones mineras ni ejecutarse operaciones extractivas dentro de sus límites. Además, el área queda inscrita en el Catastro Nacional de Concesiones Mineras y protegida con carácter indefinido, salvo que un nuevo decreto modifique su estatus.

Este mecanismo de protección permite proteger dos aspectos relevantes. Por un lado, resguardar las zonas donde se realizan observaciones astronómicas, investigaciones geofísicas, paleontológicas o biológicas de alta relevancia. Por otro lado, proteger las condiciones naturales específicas, como la estabilidad atmosférica, la pureza del aire, la transparencia del cielo, la baja humedad y la ausencia de polvo, esenciales para la observación astronómica y el desarrollo de tecnologías de precisión. La Tabla 1 muestra los decretos supremos emitidos para sitios astronómicos con fines de investigación científica.

Tabla 1: Decretos supremos emitidos por el Ministerio de Minería a sitios astronómicos.  
Fuente: Torres 2019.

| Nº Decreto Supremo | Fecha publicación | Lugar definido                                        |
|--------------------|-------------------|-------------------------------------------------------|
| 99                 | 1977              | Tololo 1                                              |
| 109                | 1977              | La Silla                                              |
| 43                 | 1978              | Las Campanas                                          |
| 52                 | 1986              | Paranal 1                                             |
| 1                  | 1988              | Paranal 2                                             |
| 71                 | 1991              | Paranal 3                                             |
| 11                 | 1992              | Tololo 2                                              |
| 309                | 1996              | Tololo 3                                              |
| 185                | 1998              | Cerro el Chascón, observatorio MMA (Millimeter array) |
| 349                | 2000              | Estancia El Totoral y Tololo 4                        |
| 90                 | 2006              | Observatorio ALMA                                     |

## ii. Protección radioeléctrica Subtel

El mecanismo de protección radioeléctrica es una medida de gestión del espectro radioeléctrico establecida por la Subtel, en aplicación de la Ley General de Telecomunicaciones (Ley N°18.168) y el Plan General de Uso del Espectro Radioeléctrico (D.S. N°127/2006).

Su objetivo es proteger el entorno radioeléctrico del Observatorio ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) ubicado en el Llano de Chajnantor, a 5.000 metros de altura. Este observatorio, uno de los más sensibles del mundo, opera en un rango de frecuencias comprendido entre 35 y 950 GHz, donde detecta señales cósmicas extremadamente débiles que pueden verse alteradas por emisiones artificiales incluso a grandes distancias.

El sistema de protección radioeléctrica protege tres dimensiones críticas: el espectro asignado al servicio de radioastronomía, con el fin de asegurar que las frecuencias entre 35 y 950 GHz permanezcan libres de emisiones perjudiciales; la sensibilidad científica de la tecnología, compuesta por 66 antenas parabólicas de 7 y 12 metros, cuya detección depende de señales del orden de  $10^{-24}$  W y la calidad de los datos científicos y la inversión internacional asociada al proyecto ALMA. De esta manera, se garantiza que las observaciones mantengan los estándares de precisión exigidos por la comunidad radioastronómica mundial.

La protección se formalizó mediante la Resolución Exenta N°1715, el 1 de agosto de 2023, que otorgó al observatorio ESO un permiso de servicio limitado de radio- comunicaciones, definiendo un conjunto de zonas de exclusión y coordinación destinadas a minimizar las interferencias perjudiciales. Esta medida se basa en las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R) y en los estudios técnicos presentados por Associated Universities Inc. (AUI), operador conjunto del observatorio.

El mecanismo opera mediante la delimitación de zonas concéntricas alrededor del observatorio, sustentadas en informes técnicos sobre emisión y un procedimiento de coordinación obligatorio entre la Subtel y ALMA, que establece dos tipos de zonas.

- **Zona de protección** (radio de 30 km): constituye el núcleo de máxima restricción. En su interior no se autoriza la instalación ni operación de sistemas de radiocomunicaciones de terceros que transmitan dentro de las bandas de recepción del observatorio. Su propósito es crear un entorno radio-silente absoluto, donde no existan fuentes locales de interferencia electromagnética.

- **Zona de coordinación** (radio de 120 km): territorio de resguardo, donde pueden coexistir otros servicios de radiocomunicaciones, pero bajo condiciones controladas. La Subtel informa al observatorio sobre toda solicitud de concesión o permiso de operación de transmisores dentro de esta zona. ALMA evalúa cada caso calculando la densidad de flujo de potencia interferente en el sitio del observatorio y verificando que se mantenga por debajo de los umbrales definidos por la Recomendación UIT-R RA.769-2, equivalentes a  $2 \times 10^{-6}$  W/m<sup>2</sup> como máximo.

Si el nivel estimado supera los valores admisibles, se aplican medidas correctivas, tales como reducción de potencia, reorientación de antenas, reubicación de equipos o cambio de frecuencia. En caso de discrepancia, la Subtel actúa como autoridad resolutoria final. Además, esta zona de coordinación cuenta con un procedimiento continuo de vigilancia y coordinación, en caso de que ALMA detectara emisiones interferentes provenientes de transmisores, puede notificar a Subtel, que evaluará las medidas administrativas o técnicas correspondientes.

De esta manera, el Llano de Chajnantor es un entorno protegido en el dominio radioeléctrico.

### iii. Áreas de Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica

La declaración y definición específica de áreas de valor para la observación astronómica nace con la Ley N° 21.162 (2019), que modifica la Ley N° 19.300, que aprueba la Ley sobre bases generales del medio ambiente, para exigir la elaboración de un estudio de impacto ambiental en los proyectos que puedan generar contaminación lumínica en las zonas que indica. Su principal objetivo es proteger las zonas con valor para la observación astronómica de la contaminación lumínica.

Esta ley introduce tres cambios estructurales en la legislación ambiental y científico-tecnológica nacional. Modifica el literal d) del Artículo 2 de la Ley 19.300, incorporando la luminosidad artificial como agente de contaminación. Establece, que proyectos que afecten la calidad de los cielos en zonas de desarrollo astronómico deben realizar un Estudio de Impacto Ambiental (EIA). Se trata de proyectos localizados en o próximos a áreas con valor para la observación astronómica, y que sean susceptibles de ser afectadas (modificación al Artículo 11 literal d). Por último, incorpora en la Ley N° 21.105 (Artículo 4, literal r) una nueva función para al Ministerio de Ciencia, otorgándole el mandato de proponer al Presidente de la República las Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica, para ser declaradas por decreto supremo conjunto con el Ministerio de Medio Ambiente.

Para definir las Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica, mediante Decreto N°16 de 2020 del Ministerio de Ciencia crea la primera Comisión Asesora Ministerial de Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica. El mandato de esta Comisión Asesora 2020 fue definir criterios técnicos y proponer las zonas de Chile que por sus condiciones naturales y científicas, debían ser protegidas como Áreas de Valor Científico para la Observación Astronómica. El proceso se desarrolló entre octubre de 2020 y febrero de 2021 e integró información proporcionada por observatorios profesionales, universidades, y expertos nacionales e internacionales en contaminación lumínica.

La Comisión Asesora 2020 levantó un Catastro Nacional de Sitios Astronómicos, que reveló tres grandes concentraciones territoriales en el Desierto de Atacama: Antofagasta costa, Antofagasta interior y Atacama - Coquimbo, donde se ubican las principales instalaciones astronómicas del país.

Para definir la extensión espacial de las áreas, la Comisión Asesora 2020 aplicó un modelo basado en recomendaciones de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE 150: 2017) y, en simulaciones sobre la propagación de la contaminación lumínica, se determinó un radio de protección de 150 kilómetros alrededor de cada sitio astronómico, equivalente a la distancia mínima necesaria para mantener un cielo oscuro sin interferencia de fuentes urbanas o industriales.

Para facilitar la fiscalización y la aplicación normativa, el criterio geométrico fue reemplazado por uno de corte administrativo: toda comuna cuyo territorio se superponga con dicho radio de 150 km en torno a los sitios astronómicos, sería considerada íntegramente parte del área protegida<sup>1</sup>.

Debido a la creciente evidencia científica y el constante avance de la tecnología en el campo de la astronomía, la Comisión Asesora 2020 recomienda una revisión y actualización de los fundamentos técnicos y científicos de manera regular, que permitan al Ministerio de Ciencia elaborar una actualización de las Áreas de Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica al menos cada cuatro años.

En base a esta información, el Ministerio de Ciencia elaboró el Decreto Supremo N° 2/2023, que declaró oficialmente 29 comunas de las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo como Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica (Figura 1).

---

<sup>1</sup>Ver informe de comisiones especiales: <https://www.minciencia.gob.cl/informes-comisiones-especiales>.

Las comunas en la región de Antofagasta son: Antofagasta, Calama, María Elena, Mejillones, Ollagüe, San Pedro de Atacama, Sierra Gorda y Taltal. Las comunas en la región de Atacama son: Alto del Carmen, Caldera, Copiapó, Freirina, Huasco, Tierra Amarilla, Vallenar. Las comunas en la región de de Coquimbo son: Andacollo, Canela, Combarbalá, Coquimbo, Illapel, La Higuera, La Serena, Monte Patria, Ovalle, Paihuano, Punitaqui, Río Hurtado, Salamanca y Vicuña.

De esta forma, casi todo el territorio comprendido entre San Pedro de Atacama y Vicuña fue reconocido por su relevancia científica, garantizando un marco de protección frente a proyectos que puedan generar contaminación lumínica (Figura 1).

En 2021 el Ministerio de Ciencia crea la Comisión Asesora Ministerial para Materias de Astronomía mediante el Decreto N°18. Esta comisión de carácter permanente tiene como objetivo proporcionar orientación especializada en temas relacionados con la astronomía y ciencias afines. Su función principal es asesorar al ministerio en la formulación de estrategias, políticas y recomendaciones que contribuyan al desarrollo de la astronomía en Chile y su impacto en la sociedad <sup>2</sup>.

En la sesión del 9 de enero de 2025<sup>3</sup>, esta Comisión Asesora Ministerial recomienda al Ministro de Ciencia la actualización de las Áreas de Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica. A su vez, en marzo de 2025 la Unión Astronómica Internacional (UAI) recomienda definir criterios sitio específicos con rangos de protección ajustados a cada tecnología de observación astronómica con fines de investigación científica. Esto requiere que cada observatorio declare específicamente las condiciones habilitantes para el adecuado funcionamiento de cada tipo de tecnología de observación.

Por su parte, el Ministerio del Medio Ambiente elaboró el Decreto Supremo N° 1/2022, publicado en 2023, que establece la Norma de Emisión de Luminosidad Artificial de Alumbrado de Exteriores. Esta norma fija límites técnicos y operativos para la intensidad, dirección, color y eficiencia de las luminarias, aplicables tanto a instalaciones nuevas como existentes, con el fin de prevenir el aumento del brillo artificial del cielo. Aunque el decreto tiene validez en el territorio nacional completo, presenta disposiciones más estrictas sobre las emisiones en las Áreas de Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica, decretadas por el Ministerio de Ciencia.

---

<sup>2</sup> [https://www.minciencia.gob.cl/uploads/filer\\_public/b3/8b/b38bdd27-c661-48a7-884c-9a68bd918ea9/decreto-18\\_22-oct-2021.pdf](https://www.minciencia.gob.cl/uploads/filer_public/b3/8b/b38bdd27-c661-48a7-884c-9a68bd918ea9/decreto-18_22-oct-2021.pdf)

<sup>3</sup> [https://minciencia.gob.cl/uploads/filer\\_public/07/46/074602cc-a5a3-4bb8-a483-89ea6c946b2a/acta\\_sesion\\_extraordinaria\\_9\\_de\\_enero\\_2025comisia3n\\_asesora\\_astronoma\\_adocx.pdf](https://minciencia.gob.cl/uploads/filer_public/07/46/074602cc-a5a3-4bb8-a483-89ea6c946b2a/acta_sesion_extraordinaria_9_de_enero_2025comisia3n_asesora_astronoma_adocx.pdf)

El SEA, por su parte, publicó en mayo de 2024 la Guía de Criterios de Evaluación en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), para determinar la susceptibilidad de afectar Áreas astronómicas. El objetivo de la guía es establecer cuándo las emisiones de luminosidad artificial emitidas por las partes, obras o acciones de un proyecto o actividad sometida al SEIA pueden ser susceptibles de afectar las Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica, indicadas en el Decreto Supremo N°2/2023 del Ministerio de Ciencia, debiendo ingresar el proyecto al SEIA como un Estudio de Impacto Ambiental.

Esta guía incluye criterios para definir el área de influencia de las emisiones de luminosidad artificial, define el objeto de protección de las Áreas astronómicas como *“la calidad de los cielos nocturnos para la observación astronómica”* y establece los antecedentes mínimos a presentar en una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), respecto de las emisiones de luz artificial del proyecto, a modo de uniformar y parametrizar esta información.

Una segunda Comisión Asesora Ministerial sobre Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica (Comisión Asesora 2025) fue creada mediante Decreto Exento N°106/2025 del Ministerio de Ciencia. Su misión fue prestar una asesoría integral al ministerio en la elaboración de una propuesta de actualización de las Áreas astronómicas definidas por el Decreto Supremo N°2/2023, a fin de adecuarlas a la evidencia científica reciente y a los avances tecnológicos en observación astronómica en Chile. Su trabajo estuvo orientado a fortalecer la base técnica, científica y normativa que sustenta la protección de las Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica.



Entrega oficial del informe de la Comisión Asesora Ministerial sobre Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica (Comisión Asesora 2025).

Esta comisión recomendó ampliar el objeto de protección de las Áreas astronómicas como las condiciones habilitantes de los sitios astronómicos con fines de investigación científica, que incluye además de la calidad de los cielos, otras variables atmosféricas y terrestres que deben ser consideradas y cuyos valores dan cuenta de un adecuado funcionamiento de cada tecnología de observación astronómica y que son susceptibles de ser afectadas por algún tipo de contaminación provocada por actividades humanas.

Las condiciones habilitantes son el conjunto de variables ambientales (terrestres y atmosféricas) de cada sitio astronómico, que se mantienen dentro de ciertos límites que permiten a un observatorio astronómico funcionar, con las características de efectividad y eficiencia con que fue diseñado, para el logro de los objetivos científicos que fundamentaron su creación y desarrollo (Comisión Asesora Ministerial 2025).





## II. Rol rector del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación en materias astronómicas

### 2.1. Funciones y atribuciones del Ministerio de Ciencia para la protección de los sitios astronómicos

La Ley N° 21.105 crea el Ministerio de Ciencia y le asigna un rol central en la definición de políticas públicas en materia de CTCI. La competencia es la *“suma de potestades, funciones y atribuciones que la Constitución y la ley otorgan, limitadamente, a cada órgano del Estado”*. Por su lado, la atribución es la facultad de actuación otorgada a un órgano administrativo y que, por lo tanto, delimita su ámbito y esfera de acción. En efecto, el Artículo 1 de la Ley N° 21.105 señala que el objeto de la ley es *“establecer un marco general que estructure, impulse, coordine y promueva las actividades de ciencia, humanidades y desarrollo tecnológico en todas sus etapas, a fin de contribuir al desarrollo sustentable y al bienestar social”*.

En su Artículo 2 se refiere al Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (CTCI) que *“se compone de los organismos públicos, instituciones públicas de investigación y desarrollo e instituciones de educación superior estatales; y por las personas e instituciones privadas que realizan, fomentan o apoyan actividades relevantes relacionadas con ciencia, tecnología e innovación”*. Entre estas materias se comprenden *“las actividades relacionadas con la formación de recursos humanos altamente calificados y técnicos especializados; la investigación básica y aplicada y la generación de conocimiento en las diversas disciplinas del saber”*.

El Artículo 3 señala que el Ministerio de Ciencia es la secretaría de Estado encargada de *“asesorar y colaborar con el Presidente o la Presidenta de la República en el diseño, formulación, coordinación, implementación y evaluación de las políticas, planes y programas destinados a fomentar y fortalecer la ciencia, la tecnología y la innovación derivada de la investigación científico-tecnológica (innovación de base científico-tecnológica) con el propósito de contribuir al desarrollo, incrementando el patrimonio cultural, educativo, social y económico del país y sus regiones, y propendiendo al bien común, al fortalecimiento de la identidad nacional y regional y a la sustentabilidad del medio ambiente”*. Cuando el Artículo 3, inciso segundo, señala que el Ministerio de Ciencia actúa como órgano rector, está entregándole autoridad técnica, liderazgo y responsabilidad de coordinación en todo lo que afecta al sistema científico, incluida la astronomía.

En particular, el Artículo 4 en las letras a), b), d), l) y r), establece funciones relevantes para la protección de Áreas astronómicas, como formular políticas y coordinar al sistema nacional de ciencia, tecnología, conocimiento e innovación, velar por la protección y conservación del patrimonio científico y tecnológico nacional y proponer al Presidente de la República las Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica.

Al analizar el conjunto de funciones del Artículo 4, interpretado de manera sistemática y coherente, establece que la protección de un sitio astronómico no es una función aislada ni adicional, sino la consecuencia necesaria del mandato legal del Ministerio de Ciencia de promover investigación científica de frontera, fortalecer infraestructura crítica, proteger patrimonio científico, cumplir tratados internacionales, coordinar decisiones estatales con incidencia científico-tecnológica, y definir normativamente el objeto de protección astronómica.

La convergencia de estas funciones, especialmente cuando se integran con la potestad específica de la letra r), otorga al ministerio un fundamento jurídico robusto y suficiente para redefinir el objeto de protección astronómica como *“las condiciones habilitantes del sitio astronómico”*, las cuales pueden ser científicamente cuantificadas y monitoreadas, orientar el SEIA y otros instrumentos sectoriales hacia la protección efectiva de dicho objeto, prevenir eventuales impactos negativos sobre la infraestructura científica, y asegurar la continuidad de la astronomía como infraestructura estratégica y patrimonio científico nacional.

En cuanto a las atribuciones del Artículo 5 de la Ley N° 21.105, aquellas que se relacionan directamente con la creación de las Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica y, que permiten el desarrollo de instrumentos para su desarrollo y protección, destacan las letras a), e) y k), donde es posible distinguir tres niveles de actuación administrativa, en el ámbito normativo, de coordinación y de colaboración (Tabla 2).

Tabla 2: Atribuciones del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimientos e Innovación. Ley 21.105, artículos 5, literales a), e) y k).

| Artículo                                                                                                                                                                                                                                                                        | Análisis                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a) Diseñar las políticas, normas, planes y programas del sector a su cargo, así como coordinar la acción de los organismos públicos de dicho sector.                                                                                                                            | <p>Este literal considera dos órdenes de materias. En primer lugar, la facultad de diseñar políticas, esto es, las orientaciones o directrices que rigen la actuación de una persona o entidad en un asunto o campo determinado; normas, que le permite establecer directrices obligatorias para los administrados, tales como leyes, reglamentos, resoluciones o simples actos administrativos; planes, es decir, proyectos; y programas, o sea, una serie ordenada de operaciones necesarias para llevar a cabo un proyecto, materias todas que son propias de la función gubernativa y administrativa, y que se deben coordinar con las obligaciones sobre la materia contenidas en los artículos 3 y siguientes de la Ley N° 18.575 Orgánica Constitucional sobre Bases Generales de la Administración del Estado. Conforme a las facultades normativas del ministerio, éste puede proponer al Presidente de la República las Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica, así como las medidas de protección, restricción o limitación de dichas áreas.</p> <p>En segundo lugar, el ministerio tiene la facultad de coordinar, esto es, dirigir y concertar varios elementos, en la acción de los organismos públicos, procurando la unidad de acción y observando los principios de responsabilidad, eficiencia, eficacia, impulsión de oficio del procedimiento, impugnabilidad de los actos administrativos, control, probidad, transparencia y publicidad administrativas y participación ciudadana en la gestión pública.</p> |
| e) Establecer vínculos de colaboración y cooperación, así como participar en organismos internacionales en el ámbito de ciencia, tecnología e innovación de base científico-tecnológica, sin perjuicio de las atribuciones de otros organismos de la administración del Estado. | <p>En materia de observación astronómica, la historia de nuestro país demuestra que la colaboración y la cooperación, tanto pública como privada e internacional, son esenciales para su desarrollo, en un contexto en que, pese a la dispersión normativa existente, y a la singularidad de cada uno de los convenios o acuerdos internacionales existentes, en algunos casos con Estados o en otros con entidades privadas, se trata de un sistema que funciona eficientemente y con gran potencial presente y futuro, ya que, como resultado de ello, nuestro país representa un porcentaje muy importante de la observación astronómica mundial.</p> <p>Por lo anterior, resulta imprescindible hacer uso de esta facultad de colaboración y cooperación, así como la de participar en los organismos internacionales en el ámbito de la ciencia, tecnología e innovación de base científico-tecnológica.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| k) Elaborar manuales de buenas prácticas en materia de actividades, procesos o instalaciones para la investigación científica, desarrollo experimental e innovación de base científico-tecnológica.                                                                             | <p>El ministerio tiene también facultades para elaborar manuales de buenas prácticas en materia de actividades, procesos o instalaciones para la investigación científica que puede incluir, por cierto, a las instalaciones, obras, programas, actividades o proyectos que se ubiquen en o próximo a áreas con valor científico y de investigación para la observación astronómica. Ello con el objetivo de entregar directrices a los titulares o proponentes sobre buenas prácticas en dichas áreas. Esta facultad es similar a la que se otorga al Servicio de Evaluación Ambiental en el artículo 81 letra d) de la Ley N° 19.300 para establecer guías trámite en los procedimientos de carácter ambiental. Esto configura al ministerio como órgano rector para efectos del diseño normativo en materia de Áreas astronómicas.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

## 2.2. Condiciones habilitantes del sitio astronómico como objeto de protección

El rol rector en la formulación de políticas públicas de ciencia y tecnología que tanto el Artículo 3, inciso segundo, como el literal a) del Artículo 4° de la Ley 21.105, le confieren al Ministerio de Ciencia establecer los lineamientos estratégicos y técnicos que orientan la protección de las capacidades astronómicas nacionales. Esta función habilita al ministerio a definir el marco conceptual bajo el cual deben diseñarse las áreas de valor científico y las medidas necesarias para resguardar el sitio astronómico y sus condiciones habilitantes, en coherencia con los desafíos científicos presentes y futuros. Esta función no otorga potestad reglamentaria autónoma, pero sí constituye un mandato expreso de dirección estratégica, habilitando al ministerio para construir los marcos conceptuales, técnicos y programáticos que orientan al conjunto del Estado en materias de CTCL.

En el ámbito específico de la observación astronómica, el literal a) del Artículo 4 tiene tres implicancias relevantes:

- Formular políticas que definan los objetivos del país en materia de astronomía, identifiquen los desafíos estratégicos asociados a la conservación de las capacidades astronómicas, determinen los instrumentos regulatorios pertinentes, incluyendo lineamientos para Áreas astronómicas, normas técnicas y criterios ambientales.
- Orientar a otros ministerios y órganos públicos en materias de CTCL.
- Proveer del marco conceptual para la actualización de las Áreas astronómicas del Artículo 4 literal r): La función de política pública de la letra a) es complementaria –y en ocasiones previa– a la función específica de proponer Áreas de Valor Científico para la Observación Astronómica (Artículo 4 literal r). Permite establecer el marco doctrinal y conceptual dentro del cual se propondrán las nuevas áreas, incluyendo definiciones de sitio astronómico, definiciones de condiciones habilitantes, criterios para determinar riesgos e incompatibilidades y objetivos de largo plazo del país en materia astronómica.

Por su parte el literal b) del Artículo 4 de la Ley 21.105, confiere al Ministerio de Ciencia una función amplia y estratégica de fomento a la investigación, dentro de la cual se encuentra la obligación de asegurar que existan las condiciones que hacen posible la investigación astronómica en Chile. Dado que el desarrollo de esta disciplina depende directamente de la preservación de las condiciones habilitantes de los sitios astronómicos para asegurar su adecuado funcionamiento, esta norma respalda conceptualmente la necesidad de que el Ministerio de Ciencia identifique, promueva y contribuya a resguardar dichas condiciones como parte de su misión sectorial.

En consecuencia, este literal refuerza la coherencia institucional del enfoque que entiende al sitio astronómico y sus condiciones habilitantes como elementos esenciales para cumplir el mandato legal de fomentar investigación básica y aplicada en el país. Hay tres aspectos particularmente relevantes a destacar:

**- La investigación astronómica depende de la mantención de condiciones habilitantes del sitio astronómico:** el fomento de la investigación básica y aplicada incluye, necesariamente, asegurar que existan condiciones que permitan producir ciencia en Chile. En el caso de la astronomía, la investigación se realiza principalmente en sitios astronómicos cuya aptitud depende de variables ambientales, territoriales, operacionales y tecnológicas, que pueden verse afectadas por actividades humanas. Por tanto, el mandato de fomentar investigación incluye un componente instrumental de resguardo de las condiciones habilitantes astronómicas, en cuanto éstas son condición necesaria para el desarrollo de la ciencia astronómica en Chile.

**- El Ministerio de Ciencia debe velar por que exista equilibrio entre investigación astronómica y desarrollo nacional:** la astronomía es un paradigma de investigación inspirada en la curiosidad, uno de los dos pilares que la ley ordena equilibrar, lo que implica que el ministerio no puede desatender amenazas que comprometan la continuidad o calidad de esta investigación, y debe adoptar acciones de fomento que aseguren su desarrollo sostenible.

**- Fomento multi, inter y transdisciplinario ligado a complejidades del sitio astronómico:** la investigación astronómica moderna requiere ciencias físicas, ingeniería, ciencia de datos, óptica, atmósferas, geociencias, tecnología de telecomunicaciones, infraestructura avanzada, entre otros. La protección del sitio astronómico y sus condiciones habilitantes son una condición de posibilidad para este ecosistema interdisciplinario, por lo que se integra naturalmente dentro de la función de fomento establecida por la ley.

La Ley 21.105 refuerza la necesidad de que el Ministerio de Ciencia asegure las condiciones que permiten el desarrollo tecnológico asociado a la astronomía y su ecosistema de innovación (Artículo 4 literal c). La preservación del sitio astronómico y de sus condiciones habilitantes es un requisito para cumplir con la función de fomento tecnológico, ya que su deterioro compromete la capacidad del país para sostener infraestructura científica de frontera y para generar innovación con impacto estratégico nacional.

La astronomía moderna es una de las áreas científicas donde Chile alberga infraestructura tecnológica de mayor complejidad a nivel mundial (ESO, AURA, ALMA, Rubin/LSST). Esto hace que la letra c) tenga relevancia directa para la protección

del sitio astronómico, porque el desarrollo tecnológico y la innovación científica asociada a la astronomía depende del sitio astronómico y sus condiciones habilitantes (estándares de oscuridad, estabilidad atmosférica, baja interferencia radioeléctrica, ausencia de vibraciones, control de polvo y emisiones, compatibilidad territorial y energética), que si se deterioran, el país pierde capacidad para desarrollar innovación tecnológica, atractivo para inversiones y ventajas para la transferencia tecnológica nacional.

En consecuencia, por medio de este literal se legitima la acción del Ministerio de Ciencias destinada a evaluar, anticipar y mitigar riesgos que afecten dichas condiciones, y otorga un fundamento institucional para integrar criterios astronómicos en políticas productivas y tecnológicas de otros sectores del Estado.

El literal d) del Artículo 4, refuerza el fundamento institucional para que el Ministerio de Ciencia, adopte una aproximación integral al resguardo del sitio astronómico, anticipando amenazas y promoviendo compatibilidad territorial y ambiental en su entorno. Esta norma establece un mandato amplio de fortalecimiento sistémico del ecosistema científico, incluyendo infraestructura, centros de investigación y capacidades humanas, considerando además criterios de equidad territorial. Esta función tiene una relación directa con la protección del sitio astronómico, debido a que los observatorios internacionales y nacionales instalados en Chile constituyen infraestructura científica crítica, centros de investigación de relevancia global, nodos de desarrollo tecnológico y, focos de capital humano avanzado, activos estratégicos para la ciencia y el prestigio internacional del país.

Los observatorios de clase mundial son infraestructura científica estratégica, centros de investigación y centros tecnológicos avanzados. La instalación de esta infraestructura –y su consolidación– depende de la idoneidad científica del sitio astronómico, la mantención de sus condiciones habilitantes para un adecuado funcionamiento, la ausencia de interferencias externas, la estabilidad territorial y ambiental del entorno. Por tanto, la letra d) obliga al ministerio a velar porque las condiciones habilitantes del sitio astronómico se mantengan, en tanto estas son condiciones necesarias para consolidar y sostener infraestructura científica crítica, asegurando que los sitios astronómicos conserven sus condiciones habilitantes, pues su deterioro comprometería directamente la capacidad del país para consolidar centros de investigación de clase mundial y para sostener su liderazgo científico internacional.

Por su parte, el literal h) e i) del Artículo 4 refuerzan el fundamento institucional para que el Ministerio de Ciencia participe activamente en la identificación, prevención y mitigación de amenazas al sitio astronómico y a sus condiciones habilitantes, pues su deterioro afectaría la capacidad del Estado de cumplir esta

función de carácter cultural, educativo y social, a su vez implicaría una reducción efectiva de oportunidades de participación equitativa en ciencia, contradiciendo el mandato de la letra i).

El Ministerio de Ciencia debe tener un rol activo en atraer, facilitar y promover la participación del sector privado en actividades científicas y tecnológicas, enfatizando que dicha participación debe orientarse por criterios de bien común (Artículo 4, literal j). Esta función exige que el ministerio identifique y mitigue riesgos que puedan reducir el atractivo del país para la inversión científica privada, lo que depende de la preservación del valor científico del sitio astronómico y de la mantención de sus condiciones habilitantes. En consecuencia, esta norma otorga fundamento institucional adicional para que el ministerio intervenga técnica y estratégicamente frente a amenazas que puedan comprometer la operación de observatorios astronómicos y, por extensión, la capacidad del país de atraer inversión privada y aprovechar sus beneficios en materia de conocimiento, innovación y desarrollo tecnológico.

Por otro lado, el Ministerio de Ciencia tiene una función expresa de tutela sobre los bienes, infraestructuras, capacidades y activos que conforman el patrimonio científico y tecnológico del país, entendidos como recursos estratégicos cuya preservación es de interés público (Artículo 4, literal l). Esto constituye una de las disposiciones más relevantes del Artículo 4 para justificar la intervención del ministerio en la protección del sitio astronómico.

Al mandar al ministerio a “*velar por la protección y conservación del patrimonio científico nacional*”, la norma incluye: la infraestructura astronómica instalada en Chile, las condiciones habilitantes que permiten su funcionamiento, los activos científicos y tecnológicos asociados, la cooperación internacional que opera sobre estos sitios. En consecuencia, el literal l) otorga un fundamento jurídico robusto para la acción del Ministerio de Ciencia orientada a prevenir el deterioro de sitios astronómicos, a identificar amenazas emergentes y a impulsar medidas normativas o técnicas que aseguren su preservación como parte esencial del patrimonio científico del país.

La presencia de observatorios internacionales en Chile es un pilar de su diplomacia científica y su continuidad depende de la mantención de un entorno territorial y ambiental compatible con la observación astronómica de alta precisión. El literal n) otorga al Ministerio de Ciencia un mandato amplio de articulación y cooperación tanto dentro del país como con instituciones y organismos internacionales relevantes en ciencia, tecnología, conocimiento e innovación. Este literal es relevante porque la cooperación internacional astronómica depende de la integridad del sitio astronómico, exige que Chile actúe como garante del valor científico de

los sitios entregados a los observatorios internacionales, requiere armonización territorial y sectorial que depende del sitio astronómico. Lo anterior, refuerza la obligación del Ministerio de Ciencia de proteger el sitio astronómico y sus condiciones habilitantes como condición indispensable para la cooperación nacional e internacional en astronomía.

Así mismo, el literal o) asigna al Ministerio de Ciencia un rol explícito de supervisión y garantía del cumplimiento de los compromisos internacionales asumidos por el Estado de Chile en materia científica y tecnológica. Esta función exige al ministerio actuar para evitar que proyectos o decisiones estatales comprometan la capacidad de Chile de cumplir estos tratados. En el contexto astronómico, esto implica que el Ministerio de Ciencia debe asegurar que las decisiones del Estado –en materia ambiental, territorial, energética, radioeléctrica y productiva– no comprometan la operación de observatorios establecidos mediante acuerdos internacionales.

La protección del sitio astronómico y sus condiciones habilitantes se convierte así en una obligación jurídica internacional del Estado de Chile. Esto otorga al Ministerio de Ciencia un fundamento institucional y normativo para intervenir, coordinar, emitir lineamientos y promover ajustes regulatorios destinados a evitar incumplimientos y a garantizar la continuidad y excelencia de la cooperación astronómica internacional.

En el ámbito nacional, el literal p) asigna a este ministerio un rol de colaboración técnica con otros organismos del Estado cuando estos diseñan programas o iniciativas con componentes científicos o tecnológicos, en coherencia con las políticas nacionales de ciencia, tecnología, conocimiento e innovación. En el ámbito de la astronomía, permite al ministerio fortalecer políticas públicas, iniciativas regionales y programas de innovación asociados al ecosistema astronómico.

La preservación del sitio astronómico y de sus condiciones habilitantes es un requisito esencial para asegurar la continuidad, calidad y valor público del acceso abierto a los datos en astronomía. El literal q) consagra el principio de acceso abierto al conocimiento financiado por el Estado, lo cual depende de la existencia de observatorios que operen en condiciones óptimas y produzcan datos de calidad internacional. Esta función complementa y refuerza otras disposiciones del Artículo 4 –especialmente las letras b), d), l), n) y r)–, justificando la intervención del ministerio cuando existan riesgos que comprometan la capacidad del país de generar y poner a disposición conocimiento científico de alto nivel.

La base jurídica central para la protección de la astronomía en Chile está definida el Artículo 4 literal r), ya que la definición que efectúe el Ministerio de Ciencia de Área con Valor Científico y de Investigación Astronómica determina el objeto de

protección, define el ámbito espacial de la protección, establece las variables y condiciones que caracterizan un área astronómica de valor, orienta las decisiones del SEA y otros organismos sectoriales. Este literal configura una potestad mixta, con componentes técnicos y normativos:

- **Competencia técnica exclusiva del Ministerio de Ciencia:** la determinación de qué constituye un Área con Valor Científico y de Investigación Astronómica es una atribución exclusiva de este ministerio. Ningún otro organismo del Estado posee facultades para definir este concepto ni para establecer sus elementos constitutivos.
- **Potestad reglamentaria no exclusiva:** la declaración del Área con Valor Científico y de Investigación Astronómica se realiza mediante decreto supremo conjunto (Ministerio de Ciencia – Ministerio del Medio Ambiente), lo que otorga carácter normativo a la protección, integración al ordenamiento ambiental, efectos jurídicos vinculantes para otros órganos de la Administración, incluyendo el SEA.
- **Función estratégica y permanente:** la norma obliga al ministerio a mantener actualizada la definición y alcance de estas áreas cuando cambios territoriales, tecnológicos o científicos lo hagan necesario.
- **Rol rector del ministerio en la definición técnica del objeto de protección:** en virtud del Artículo 3, inciso segundo, el ministerio actúa como órgano rector del sistema de CTCL, lo que refuerza su autoridad técnica para definir el objeto protegido y sus características esenciales.

La letra r) constituye la base jurídica central para la protección de la astronomía en Chile, ya que la definición que efectúe el Ministerio de Ciencia determina el objeto de protección, define el ámbito espacial de la protección, establece las variables y condiciones que caracterizan un área astronómica de valor, orienta las decisiones del SEA y otros organismos sectoriales. Esta función tiene las siguientes implicancias fundamentales:

- **Habilita la definición integral del objeto de protección:** si bien la norma no define qué debe entenderse por Área con Valor Científico y de Investigación Astronómica, en consecuencia, el ministerio tiene plena competencia para determinar que el objeto de protección no se limita solo a la *“la calidad de los cielos nocturnos para la observación astronómica”*, sino que comprende las condiciones habilitantes para la observación astronómica del sitio, la cual incluye condiciones ambientales, características territoriales, variables atmosféricas y ecosistémicas, requerimientos técnicos y operacionales,

infraestructura asociada, y zonas de influencia funcionales. Este alcance puede incorporar contaminantes adicionales a la luz artificial, tales como vibraciones, turbulencias, polvo y aerosoles, interferencia radioeléctrica, calor industrial, flujos de transporte espacial, expansión urbana descontrolada, entre otros.

- **Otorga exclusividad técnica al ministerio para describir y determinar las condiciones habilitantes:** dado que la función recae exclusivamente en el ministerio, este puede definir y justificar las condiciones habilitantes necesarias para el funcionamiento de un observatorio astronómico, sin que otros organismos puedan sustituir o reinterpretar esa definición.

- **Vincula al Ministerio del Medio Ambiente y al SEA:** al exigir la firma conjunta del Ministerio de Ciencia con el Ministerio de Medio Ambiente en el decreto supremo respectivo, la norma integra la protección astronómica al régimen jurídico ambiental. Esto implica que el SEA debe evaluar impactos conforme al objeto de protección definido en el decreto así como las medidas de mitigación, compensación y reparación deben responder a ese objeto técnico. El Ministerio de Ciencia adquiere competencia técnica relevante en el SEIA respecto de la afectación del área declarada.

- **Obliga al ministerio a actualizar el modelo cuando resulte insuficiente:** la función de proponer áreas supone un deber de revisión permanente. Cuando el modelo vigente –por ejemplo, centrado únicamente en calidad de los cielos– demuestra ser inadecuado frente a riesgos nuevos o no contemplados, el ministerio debe actualizar el decreto incorporando una definición más amplia y adecuada, como la noción de condición habilitante del sitio astronómico.

- **Proporciona el fundamento jurídico para prevenir conflictos:** el literal r) del Artículo 4 correctamente interpretada y ejercida, permite redefinir el objeto de protección; incorporar condiciones habilitantes, establecer zonas de influencia, otorgar claridad técnica al SEA y genera un marco regulatorio preventivo que evite situaciones que pongan en riesgo el buen funcionamiento de las infraestructuras científicas para la observación astronómica.

En cuanto a los límites de esta función podemos mencionar que no otorga por sí misma potestad para prohibir actividades productivas; no habilita regulación sectorial autónoma y no confiere facultad sancionatoria. Sin embargo, sí habilita un marco normativo que orienta y condiciona decisiones ambientales y sectoriales. Por lo tanto, sí establece criterios técnicos obligatorios para el SEIA, sí otorga al ministerio un rol vinculante respecto del objeto de protección, sí permite estructurar medidas de compatibilidad territorial en torno a cada sitio astronómico.

En resumen, el literal r) del Artículo 4 de la Ley 21.105 constituye el pilar jurídico fundamental para la protección de los sitios astronómicos en Chile. Esta función autoriza al Ministerio de Ciencia a definir el objeto de protección en términos amplios y científicos, incluyendo la noción de sitio astronómico y sus condiciones habilitantes para su adecuado funcionamiento.

Por otro lado, entrega exclusividad técnica al ministerio para determinar la naturaleza y condiciones de estas áreas protegidas e integra la protección astronómica al régimen ambiental, obligando al SEA y al Ministerio del Medio Ambiente a aplicar la definición establecida en el decreto. Este artículo, permite actualizar el marco normativo frente a nuevas amenazas o insuficiencias del modelo vigente y proporciona la base institucional para evitar conflictos, al permitir un diseño regulatorio más robusto, coherente y preventivo.

Por su alcance y efectos, el literal r) del Artículo 4 es la herramienta normativa central para estructurar una normativa que proteja efectivamente las Áreas astronómicas, a través de la mantención y buen funcionamiento de las condiciones habilitantes de los sitios astronómicos, asegurando la continuidad del desarrollo tecnológico y la excelencia de la investigación científica astronómica en Chile.





### III. Gestión de los sitios astronómicos con fines de investigación científica

#### 3.1. Observación astronómica y tipos de tecnologías

La observación astronómica es una práctica científica orientada a la producción, análisis e interpretación de datos provenientes de objetos y fenómenos celestes mediante instrumentos tecnológicos especializados. Esta observación permite recopilar la radiación electromagnética (Figura 2), en diversos rangos del espectro, que viaja desde el espacio hasta la superficie terrestre, permitiendo estudiar la estructura, composición, dinámica y evolución del universo.

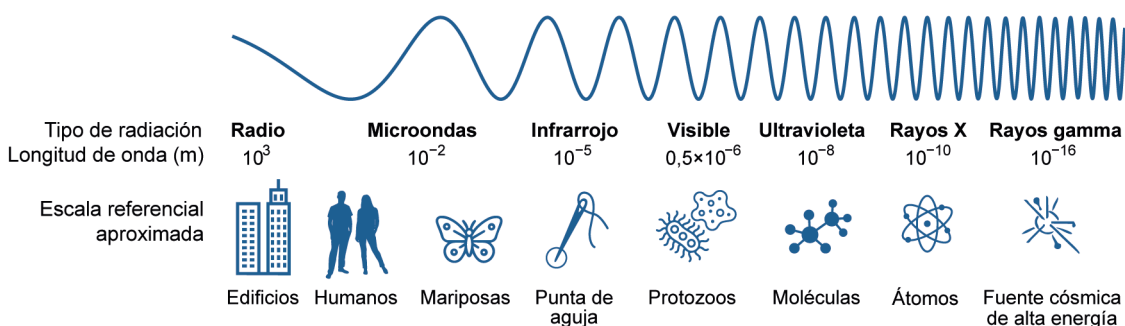


Figura 2. Valores medios de las bandas del espectro electromagnético. De izquierda a derecha, las ondas de radio presentan la mayor longitud de onda, luego viene la radiación infrarroja, luz visible y finalmente los rayos gamma con la menor longitud de onda.

El desarrollo de la observación astronómica depende de la combinación del conocimiento astronómico con ciencia de datos, tecnologías ópticas, electrónicas, robóticas y de procesamiento de señales, constituyendo uno de los campos más avanzados de la ciencia contemporánea. En Chile, esta actividad se ha consolidado como un área estratégica, gracias a la instalación de observatorios de última generación que operan en distintas longitudes de onda, aprovechando las excepcionales condiciones del norte del país y, particularmente, del desierto de Atacama y la cordillera de los Andes tratados en la primera sección de este manual.

Los diferentes tipos de tecnologías de los principales observatorios instalados en Chile, si bien está caracterizada por el tipo de instrumento y objetivo científico por el cual fue construido, se diferencian también por la región del espectro electromagnético que observan, como se detalla a continuación.

### • **Observación mediante radiofrecuencias**

El instrumento es un tipo de antena que captura señales de radio. La observación de radio corresponde al estudio de la radiación electromagnética de longitud de onda entre 0.3 y 10 milímetros, correspondiente al rango de microondas y ondas milimétricas. Su finalidad es investigar fenómenos que no emiten luz visible, como el gas interestelar, las nubes moleculares, las regiones de formación estelar o el fondo cósmico de microondas, permitiendo reconstruir la historia física y química del universo frío.

A diferencia de los telescopios ópticos, los radiotelescopios utilizan antenas parabólicas que captan señales de radio y las procesan mediante correlacionadores digitales de alta precisión. Las instalaciones pueden operar de forma independiente o en red, combinando múltiples antenas a través de técnicas de interferometría que simulan aperturas virtuales de kilómetros de diámetro. Estas capacidades tecnológicas, junto con la transparencia atmosférica del altiplano chileno, han convertido a Chile en un centro mundial de radioastronomía, donde observatorios como ALMA y APEX lideran la exploración del universo en longitudes de onda submilimétricas.

### • **Observación mediante tecnología infrarroja**

La observación infrarroja corresponde al estudio de la radiación térmica emitida por cuerpos cuya temperatura es demasiado baja para brillar en el rango visible. Orientado a la exploración del espacio en el rango de longitudes de onda que normalmente van de los 780 nanómetros hasta 1 milímetro. Por lo extenso de este rango y para diferenciar instrumentos relacionados, se subdivide en infrarrojo cercano (entre los 750nm y 1400nm), infrarrojo medio (entre los 1400nm~3000nm hasta los 25μm) e infrarrojo lejano (desde los 25μm hasta 1000μm). Su objetivo es explorar regiones del universo donde el polvo interestelar bloquea la luz óptica, permitiendo detectar estrellas en formación, nebulosas, planetas y galaxias en etapas tempranas.

Los instrumentos tecnológicos que operan en estos rangos requieren detectores extremadamente sensibles, habitualmente enfriados criogénicamente para reducir el ruido térmico. La atmósfera terrestre absorbe gran parte de esta radiación, por lo que los observatorios infrarrojos deben situarse en lugares de gran altitud, baja humedad y mínima presencia de vapor de agua precipitable (PWV). En Chile, estos factores convergen en sitios como Paranal o Chajnantor en la región de Antofagasta, donde la transparencia atmosférica permite realizar observaciones en el infrarrojo medio y submilimétrico, con niveles de precisión únicos en el planeta.

### • **Observación mediante tecnología óptica**

La observación óptica corresponde al estudio de la luz visible y de longitudes de onda cercanas al ultravioleta e infrarrojo emitidas o reflejadas por los cuerpos celestes. Esta observación incorpora óptica pasiva, activa y adaptativa, donde comúnmente se utilizan telescopios equipados con espejos o lentes empleando juegos de filtros fotométricos estándar (U, B, V, R, I), que abarcan aproximadamente desde los 320nm iniciando en un filtro ultravioleta (U) hasta los 900nm con el filtro infrarrojo (I).

Su propósito es captar imágenes y espectros que permitan analizar la luminosidad, temperatura, composición y movimiento de estrellas, galaxias y otros objetos astronómicos. Respecto a las tecnologías empleadas, los sistemas ópticos pueden ser pasivos, es decir, el instrumento no corrige las distorsiones atmosféricas; activos, cuando ajustan continuamente la forma del espejo principal para compensar deformaciones estructurales, térmicas o gravitacionales de forma lenta ( $\sim 0.05$  Hz); o adaptativos, que incorpora sensores y espejos deformables que corrigen en tiempo real los efectos de la turbulencia del aire, lo cual requiere respuestas rápidas del orden de 100 a 1000 Hz.

Gracias a estas tecnologías, los observatorios ópticos presentes en Chile alcanzan una resolución angular y una calidad de imagen comparables a las de telescopios espaciales, constituyendo la base de numerosos avances en astrofísica moderna.

### • **Observación del espacio mediante detectores terrestres de rayos gamma**

Los rayos gamma tienen longitudes de onda extremadamente cortas, típicamente inferiores a  $10^{-12}$  metros –menores que el tamaño de un átomo o del orden de picómetros–, acompañadas de frecuencias superiores a  $10^{19}$  Hz.

Algunos rayos gamma de muy alta energía se convierten en otro tipo de partículas al penetrar en la atmósfera, éstas emiten luz azul, violeta y ultravioleta por un proceso que se llama radiación Cherenkov. Cuando los rayos gamma interactúan con la atmósfera terrestre, crean cascadas de partículas que generan destellos de luz extremadamente rápidos, que los telescopios con tecnología Cherenkov pueden detectar. Los rayos gamma ocupan el extremo de mayor energía y menor longitud de onda del espectro electromagnético.

Esta diferenciación por tecnología es relevante al momento de describir los parámetros y variables que definen las condiciones habilitantes para el adecuado funcionamiento de los observatorios, pues los parámetros a considerar dependen directamente del tipo de tecnología que utiliza el observatorio.

### 3.2. Estudio de sitio y variables para el monitoreo

#### • *Estudio de sitio*

Cuando una organización decide desarrollar un observatorio astronómico, normalmente éste tendrá un cierto objetivo científico que justificará su creación. La selección de la o las tecnologías a establecer en un determinado sitio estará guiada por el interés de alcanzar tal objetivo científico con certidumbre (efectividad) y un gasto previsto de recursos, (incluyendo tiempo) a invertir para lograr tal resultado (eficiencia).

El desarrollo de un avance tecnológico obedece a un proceso ordenado de ingeniería de sistemas que comienza con un estudio conceptual, seguido a menudo por retroalimentación por parte de la comunidad científica, estudios de factibilidad, estudios de costos, revisiones por parte de paneles especializados, revisiones de diseño preliminar, revisiones de diseño crítico, prototipado, fabricación, integración, instalación, puesta en marcha, y verificación científica.

Por su parte el estudio de sitio (*site testing* en inglés), consiste en el registro sistemático en varias zonas del mundo de variables ambientales (terrestres y atmosféricas), durante un período de tiempo que a veces puede durar varios años. Estos son analizadas por parte de la organización responsable de desarrollar un observatorio astronómico. En base a esta información ambiental, entre otros aspectos políticos-administrativos, se define el sitio en donde se procederá a instalar la o las tecnologías de observación astronómica que permitan alcanzar los objetivos de la investigación científica.

En este contexto, las condiciones habilitantes son el conjunto de variables ambientales (terrestres y atmosféricas) de un sitio, cuyos valores se mantienen dentro de ciertos límites que permiten a un observatorio astronómico funcionar, con las características de efectividad y eficiencia con que fue diseñado, para el logro de los objetivos científicos que fundamentaron su creación y desarrollo (Comisión Asesora Ministerial 2025).

Las variables cuantificadas en el estudio de sitio a veces son reportadas en artículos científicos que informan sobre los resultados del proceso de investigación de varios sitios y la fundamentación técnica de la selección del mejor sitio (con las mejores variables ambientales), para la instalación de un observatorio con fines de investigación científica. Algunos observatorios de mayores capacidades mantienen el monitoreo continuo de dichas variables y las dejan disponibles en sus páginas web.

Es recomendable el monitoreo de las variables ambientales en torno a los sitios astronómicos, tanto de la superficie terrestre como de las atmosféricas, sobre todo

aquellas que son indicadoras de alteraciones artificiales inducidas por actividades humanas, que pudiesen alterar el adecuado funcionamiento de un observatorio astronómico.

Un adecuado funcionamiento es el que exhibe un observatorio astronómico cuando opera en un sitio con condiciones habilitantes que le permiten alcanzar –con las características de efectividad y eficiencia con que fue diseñado– los objetivos científicos que originalmente se propuso alcanzar (Comisión Asesora Ministerial 2025).

- **Variables cuantificadas**

#### *Variables consideradas para el estudio de sitio del TMT*

Existen dos trabajos muy completos en cuanto a la caracterización de sitios para la instalación de observatorios y el monitoreo de variables para cuantificar el adecuado funcionamiento de las tecnologías de observación. El primero corresponde a lo medido y documentado por el proyecto Thirty Meter Telescope (TMT), que se encuentra actualmente en desarrollo por un consorcio internacional, cuyo foco es la instalación e implementación de un observatorio de última generación, con un espejo primario de 30 metros de diámetro. Este proyecto ha documentado sistemáticamente sus operaciones de *site-testing*, en una serie de artículos científicos en revistas científicas que detallaremos a continuación.

Es importante informar que las características de los instrumentos que se pretenden instalar en este proyecto, cubren áreas relacionadas con un observatorio de óptica adaptativa con longitudes de onda entre el rango visible (y un poco menor, pasando al UV), llegando hasta el rango infrarrojo medio. En su conjunto cubren un rango desde los 310nm hasta los 14μm. Esta amplitud de instrumentos y longitudes de onda de interés, permiten hacer una primera aproximación de los parámetros a considerar para observatorios ópticos tanto del rango visible como infrarrojo.

En primera instancia, en la publicación del *site-testing* para el TMT (Schöck et al. 2009), se hace una revisión de los parámetros y variables más relevantes a considerar como:

- **Fracción libre de nubes (%)**: fracción de tiempo en la cual el cielo observable se encuentra libre de nubes.
- **Velocidad del viento (m/s)**: datos meteorológicos medidos con estaciones propias y normalmente de noche.
- **Temperatura del aire (°C)**: datos meteorológicos medidos con estaciones propias y normalmente de noche.

- **Humedad del aire (%)**: datos meteorológicos medidos con estaciones propias y normalmente de noche.
- **Vapor de agua precipitable (mm)**: cantidad total de vapor de agua en la atmósfera que puede condensar en líquido, típicamente medido como una columna desde la superficie terrestre hasta una altura determinada.
- **Seeing (")**: visión borrosa de los objetos astronómicos causada por la turbulencia atmosférica terrestre. La convección térmica y los vientos producen celdas de turbulencia con diferentes índices de refracción, lo que provoca perturbaciones y distorsiones en los frentes de onda de la luz entrante, que normalmente son planos antes de ingresar a la atmósfera.
- **Ángulo isoplanático (")**: ángulo para el cual la varianza de las diferencias en las aberraciones de fase sufridas por dos rayos de luz que atraviesan la atmósfera, desde diferentes puntos (o fuentes) del cielo, es aún pequeña (normalmente inferior a 1 rad<sup>2</sup>). Las fluctuaciones se deben a las diferentes zonas de turbulencia que detectan.
- **Tiempo de coherencia (ms)**: lapso de tiempo en el que la luz que atraviesa la atmósfera terrestre mantiene una relación de fase casi constante, tanto temporal como espacial<sup>4</sup>.

En este sentido y con el fin de proporcionar una fuente confiable y actualizada de mediciones, conceptos físicos y astronómicos orientados a la medición de condiciones atmosféricas necesarias para la instalación de un observatorio óptico, podemos citar la serie de publicaciones oficiales del proyecto TMT. Respecto a mediciones del *seeing* y el ángulo isoplanático, sus resultados están en el estudio de Skidmore et al. (2009), donde se presenta un análisis estadístico y propiedades temporales de las mediciones de estos parámetros, obtenidas mediante una combinación de dos instrumentos, un monitor de movimiento de imagen diferencial (DIMM) y un sensor de centelleo de apertura múltiple (MASS).

En Els et al. (2009), en tanto, se presentan los perfiles de turbulencia sobre una distribución vertical de un total de cinco montañas, donde tres son chilenas: cerro Tolar, cerro Armazones y cerro Tolonchar. Los datos para esta caracterización fueron obtenidos con los instrumentos DIMM y MASS, junto con un perfilador acústico SODAR (SONic Detection And Ranging).

---

<sup>4</sup> Las definiciones de estos parámetros están basadas en información disponible en la dirección web del Instituto de Astrofísica de Canarias: <https://www.iac.es/es/observatorios-de-canarias/calidad-del-cielo/parametros-de-calidad-del-cielo>

En cuanto al tiempo de coherencia de la turbulencia, estas mediciones están descritas y reportadas en Travouillon, Els, Riddle, Schöck y Skidmore (2009), utilizando DIMM, MASS y radiosonda, donde además se discuten diferencias encontradas entre los instrumentos, las mediciones de radiosonda corresponden a valores de la National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) y obtenidos vía reanálisis por NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Como última parte de esta colección de artículos se encuentra la caracterización del vapor de agua precipitable (PWV) en Otárola et al. (2010), obtenida en los mismos cinco sitios de todo el estudio, tres de ellos localizados en Chile.

A partir de una revisión sistemática de esta bibliografía, es posible concluir que los parámetros como el *seeing*, ángulo isoplanático y tiempo de coherencia de la turbulencia, son los más relevantes para los observatorios ópticos de última generación con óptica adaptativa, pues son los parámetros que ponen la exigencia para la mecánica y sistemas electrónicos de control para este sistema de compensación. Por otro lado, el *seeing* es el parámetro más utilizado en los observatorios ópticos de óptica pasiva y está directamente ligado entre la turbulencia atmosférica y lo difuso que pueda ser la imagen obtenida.

En el caso del vapor de agua precipitable contenido en la atmósfera, éste representa una complejidad para los observatorios e instrumentos orientados al infrarrojo como también en microondas, pues estas moléculas tienen una alta tasa de absorción en estas longitudes de onda, siendo determinante en la calidad astronómica del cielo de un sitio en estos rangos espectrales.

### *Medición de parámetros de VLT*

Nuestra segunda referencia es el Very Large Telescope (VLT) instalado en cerro Paranal en Chile y para el cual la institución administradora del sitio, cuenta con una base de datos de variables ambientales que contienen información desde 1998 al presente.

Las variables relacionadas al monitoreo de las instalaciones del VLT, se encuentran en la base de datos de políticas abiertas, disponibles en el sitio de ESO<sup>5</sup>. Estos datos proporcionan información continua desde 1998, separada en dos partes: de 1998 a marzo de 2016 y de abril de 2016 a la actualidad. Adicionalmente, las descrip-

---

<sup>5</sup> <https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/astroclimate/ASMDatabase.html>

ciones de las bases de datos proporcionan información relevante sobre cambios de instrumentos y períodos particulares que se encuentran sin mediciones. De cualquier modo, aún existen períodos sin datos que no se encuentran reportados, por lo que es importante la revisión exhaustiva y curado de datos al momento de utilizarlos en los análisis.

La base de datos de 1998 a marzo de 2016 considera los siguientes parámetros: masa de aire, tiempo de coherencia, ángulo isoplanático, flujo relativo y *seeing*. Por otra parte, los datos desde abril de 2016 están organizados por cada instrumento de medición descritos en la Tabla 3.

Tabla 3: Instrumentos y/o técnica de medición y parámetros medidos para VLT.

| Instrumento y/o técnica de medición                                                          | Parámetros medidos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DIMM (monitor diferencial de movimiento de imagen).                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Seeing</i>.</li> <li>- Flujo relativo.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| MASS (sensor de centelleo de aperturas múltiples).                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Seeing</i> de atmósfera libre a 500nm/cenit de un perfil integrado autónomo.</li> <li>- Tiempo de coherencia.</li> <li>- Ángulo isoplanático.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Combinación MASS – DIMM.                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fracción del perfil de turbulencia en la parte baja de la atmósfera.</li> <li>- Diferencias en <i>seeing</i>.</li> <li>- Tiempo de coherencia de la turbulencia en toda la atmósfera a partir del perfil combinado MASS – DIMM.</li> <li>- Ángulo isoplanático de la turbulencia en toda la atmósfera.</li> <li>- Altitud característica de la turbulencia en toda la atmósfera del perfil combinado MASS – DIMM.</li> <li>- Velocidad característica de la turbulencia en toda la atmósfera a partir del perfil combinado MASS – DIMM.</li> </ul> |
| SLODAR (detección y alcance de pendientes) para caracterización de las capas de turbulencia. | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mediciones del Cn2 (una medida de las fluctuaciones aleatorias en el índice de refracción de la atmósfera, que son causadas por variaciones en la temperatura y la humedad) a una altura equivalente a la altura de los espejos primarios (UT) del VLT.</li> <li>- Cn2 por debajo de los 300m.</li> <li>- Cn2 por debajo de los 500m.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                   |
| LHATPRO (Perfilador de humedad y temperatura baja basado en radiómetro de microondas).       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura IR en el cenit.</li> <li>- Agua líquida entre dos puntos.</li> <li>- Vapor de agua.</li> <li>- Adicionalmente, el instrumento mide humedad y temperatura a diferentes alturas.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Estación metereológica (datos metereológicos).                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura y punto de rocío.</li> <li>- Humedad relativa.</li> <li>- Presión atmosférica.</li> <li>- Material particulado.</li> <li>- Velocidad y dirección del viento.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

Junto con las variables descritas en los dos artículos analizados, las variables atmosféricas más frecuentemente reportadas para los sitios astronómicos y que pueden ser monitoreadas son: fracción de cobertura de nubes, porcentaje anual de noches fotométricas, vapor de agua precipitable (PWV), *seeing* global (turbulencia) o estabilidad atmosférica, concentración de polvo y brillo en el cielo (afectado por la luminosidad artificial). En el caso de los radiotelescopios se mide la interferencia de radiofrecuencia (RFI).

En cuanto a las variables cuantificadas de la superficie terrestre se consideran: compactación, estabilidad de taludes, microsismicidad, humedad del suelo, temperatura del suelo, composición química y radiactividad.

En particular las tecnologías actuales más avanzadas son susceptibles a los efectos de la microsismicidad, siendo posible provocar alteraciones significativas a las condiciones habilitantes debido a las acciones de fuentes de vibración instaladas a kilómetros de distancia de un sitio (ESO 2025).

La Tabla 4 presenta un resumen de las variables sugeridas para cuantificar en el monitoreo de las condiciones ambientales de los sitios astronómicos, las tecnologías de medición y las tecnologías astronómicas para las cuales aplica estas mediciones.

Tabla 4: Variables para el monitoreo, tecnologías de medición y su aplicación a las diferentes tecnologías de observación astronómica.

| Parámetro                          | Definición y relevancia científica                                                                                                                                                                                                                                       | Tecnología de medición                                                                       | Tecnología de observación más afectada                                                         |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fracción libre de nubes (%)</b> | Porcentaje de tiempo en que el cielo permanece despejado. Determina la disponibilidad de noches útiles para observación.                                                                                                                                                 | Cámaras de todo el cielo (All-Sky Camera), registros satelitales, estaciones meteorológicas. | - Observatorios ópticos de rango visible e infrarrojo cercano.<br>- Observatorios rayos gamma. |
| <b>Velocidad del viento (m/s)</b>  | Vientos fuertes afectan la operación de telescopios, ya que influyen en la estabilidad de las imágenes y en la seguridad de las estructuras. Por otro lado, la ausencia total de viento produce mala ventilación de las instalaciones, provocando deficiencias térmicas. | Estaciones meteorológicas (anemómetros).                                                     | - Observatorios ópticos de rango visible e infrarrojos.<br>- Observatorios rayos gamma.        |

|                                             |                                                                                                                                                                 |                                                                                       |                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Temperatura del aire (°C)</b>            | Afecta la dilatación de estructuras y la estabilidad de instrumentos. Además, variaciones bruscas generan turbulencia.                                          | Estaciones meteorológicas (termómetros de precisión).                                 | - Observatorios ópticos de rango visible e infrarrojos.<br>- Observatorios rayos gamma.                                             |
| <b>Humedad del aire (%)</b>                 | La humedad alta produce condensación y deteriora equipos; además, incrementa la absorción de radiación.                                                         | Estaciones meteorológicas (higrómetros).                                              | - Observatorios ópticos de rango visible e infrarrojos.<br>- Observatorios rayos gamma.                                             |
| <b>Vapor de agua precipitable (PWV, mm)</b> | Cantidad de vapor de agua en la atmósfera, que corresponde a un parámetro crítico para observación en infrarrojo y microondas, donde el agua absorbe radiación. | Radiómetro de microondas (LHATPRO), GPS meteorológicos, radiosondas.                  | - Observatorios de rango de infrarrojo medio y lejano.<br>- Observatorios de radioastronomía.                                       |
| <b>Seeing (")</b>                           | Medida de la borrosidad de las imágenes causada por turbulencia atmosférica. Define la calidad óptica del cielo.                                                | DIMM (Differential Image Motion Monitor), MASS (Multi-Aperture Scintillation Sensor). | - Observatorios ópticos de rango visible e infrarrojo cercano.<br>- Observatorios rayos gamma.                                      |
| <b>Ángulo isoplanático (")</b>              | Ángulo máximo donde las correcciones de óptica adaptativa siguen siendo válidas. Determina eficacia de la tecnología adaptativa.                                | MASS, DIMM, combinaciones MASS-DIMM.                                                  | - Observatorios ópticos de rango visible e infrarrojo cercano.<br>- Relevante en óptica adaptativa.<br>- Observatorios rayos gamma. |
| <b>Tiempo de coherencia (ms)</b>            | Tiempo durante el cual la atmósfera mantiene una fase constante en la onda de luz, que es esencial para óptica adaptativa.                                      | MASS, DIMM, radiosondas, reanálisis NCEP/NOAA.                                        | - Observatorios ópticos de rango visible e infrarrojo cercano.<br>- Relevante en óptica adaptativa.<br>- Observatorios rayos gamma. |
| <b>Masa de aire</b>                         | Relación entre la trayectoria real de la luz a través de la atmósfera y la trayectoria vertical. Afecta la atenuación de la señal por absorción y dispersión.   | Instrumentos astronómicos de monitoreo continuo (ASM, DIMM).                          | - Observatorios ópticos de rango visible e infrarrojo.<br>- Observatorios rayos gamma.                                              |
| <b>Flujo relativo (W/m<sup>2</sup>)</b>     | Cantidad de luz recibida respecto a condiciones ideales. Permite estimar transparencia atmosférica.                                                             | DIMM, fotómetros de monitoreo.                                                        | - Observatorios ópticos de rango visible e infrarrojo cercano.<br>- Observatorios rayos gamma.                                      |

|                                                                                     |                                                                                                                                    |                                                                                  |                                                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Perfiles de turbulencia</b><br><b><math>C_n^2</math> (<math>m^{-2/3}</math>)</b> | Medición vertical de la intensidad de turbulencia en distintas capas de la atmósfera. Relevante para modelos de óptica adaptativa. | MASS, SLODAR (SLOpe Detection And Ranging), SODAR (Sonic Detection And Ranging). | - Observatorios ópticos de rango visible e infrarrojo cercano.<br>- Observatorios rayos gamma. |
| <b>Altitud característica de turbulencia (m)</b>                                    | Determina la altura a la que predominan las capas de turbulencia e impacta en diseño de correcciones ópticas.                      | MASS-DIMM combinados, SLODAR.                                                    | - Observatorios ópticos de rango visible e infrarrojo cercano.<br>- Observatorios rayos gamma. |
| <b>Velocidad característica de turbulencia (m/s)</b>                                | Influye en la rapidez de correcciones de óptica adaptativa. Afecta estabilidad de imágenes.                                        | MASS-DIMM combinados.                                                            | - Observatorios ópticos de rango visible e infrarrojo cercano.<br>- Observatorios rayos gamma. |
| <b>Temperatura IR del cenit (K)</b>                                                 | Medición de la emisión infrarroja atmosférica. Se correlaciona con vapor de agua y nubosidad.                                      | Radiómetro LHATPRO.                                                              | - Observatorios en rango infrarrojo.                                                           |
| <b>Material particulado (<math>\mu g/m^3</math>)</b>                                | Concentración de aerosoles en las instalaciones, que afecta limpieza de los instrumentos.                                          | Sensores de partículas en estaciones meteorológicas.                             | - Observatorios ópticos y del rango infrarrojo.<br>- Observatorios rayos gamma.                |
| <b>Presión atmosférica (kPa)</b>                                                    | Influye en la densidad del aire y en la propagación de ondas; base para modelos atmosféricos.                                      | Estaciones meteorológicas (barómetros).                                          | - Observatorios ópticos de rango visible e infrarrojo.<br>- Observatorios rayos gamma.         |
| <b>Luminosidad artificial (radiancia difusa) (<math>mag/asc^2</math>)</b>           | Medida de la contaminación lumínica generada por asentamientos humanos; degrada la calidad del cielo nocturno.                     | Fotómetros SQM, satélites (p. ej., VIIRS), modelos de propagación lumínica.      | - Observatorios ópticos de rango visible e infrarrojo cercano.<br>- Observatorios rayos gamma. |
| <b>Radio frecuencia (GHz)</b>                                                       | Interferencias de ondas de radio.                                                                                                  | Antenas receptoras de radiofrecuencia.                                           | - Observatorios de radioastronomía.                                                            |

### • **Brillo natural del cielo y cuantificación de la luminosidad artificial**

Los sitios astronómicos con tecnologías de observación ópticos, infrarrojos y rayos gamma requieren de condiciones excepcionales de oscuridad para la observación del cielo, entre otras variables descritas en la sección previa. Por tal razón, internacionalmente se determinó que el brillo natural del cielo se encuentra en  $22 \text{ mag/arcsec}^2$  (Cinzano et al. 2001, Falchi et al. 2016). Sin embargo, este valor es dependiente de la banda espectral considerada (Patat 2003).

En este contexto, un parámetro muy relevante que se considera en el estudio de sitio y en el monitoreo continuo corresponde a la luminosidad artificial, cuyas definiciones y características han sido descritas por varios autores (Cinzano y Falchi 2012, Hänel et al. 2018, Aubé 2015, Kocifaj y Barentine 2021).

La luminosidad artificial es una de las fuentes de contaminación con mayor alcance de distancia en la atmósfera y, por lo tanto, la más relevante para los observatorios astronómicos ópticos (tanto en rangos visibles, infrarrojos y rayos gamma). Su efecto no está restringido solo al cielo sobre la fuente de luz, sino que puede ser detectado en el cielo lejos de ésta.

La unidad de medida más utilizada para evaluar la luminosidad es la radiancia difusa (Sánchez de Miguel et al. 2020), que es el flujo radiante por unidad de ángulo sólido por área proyectada, que se propaga por la atmósfera bajo un proceso de dispersión o *scattering* que explicaremos a continuación.

### • **Fundamentos técnicos, las capas de la atmósfera terrestre**

Normalmente la atmósfera terrestre se caracteriza por cinco capas en base a sus características térmicas, composición química, movimiento y densidad. A continuación, se presenta la definición de cada una de estas capas, desde la más externa hasta llegar a la superficie terrestre (Figura 3: Layers of the Atmosphere | National Oceanic and Atmospheric Administration).

- **Exósfera:** capa más externa que se extiende desde una altura de 600 km hasta los 10000 km sobre la superficie terrestre. En esta capa átomos y moléculas escapan al espacio y se encuentra la mayor parte de los satélites. En la parte baja de esta capa se encuentra la termopausa.

- **Termósfera:** se encuentra entre los 85 km y los 600 km. A pesar de ser muy ligera, los gases comienzan a ser más densos al acercarse a la Tierra. Debido a procesos de absorción de la radiación solar (en rango de UV de alta energía y rayos X), sube la temperatura hacia su parte superior. En la parte inferior de la termósfera se encuentra la mesopausa.

- **Mesósfera:** esta capa se extiende desde los 50 km hasta los 85 km. Los gases que comprenden esta capa se hacen más densos al acercarse a la Tierra, por lo que aumenta su temperatura en esa dirección. Por otro lado, los gases son lo suficientemente densos para frenar meteoros y se puede observar rastros ardientes en el cielo nocturno. La parte que separa esta capa con la inferior se llama estratopausa.

- **Estratósfera:** se extiende desde los 10 a 18 km hasta los 50 km. Estas variaciones en su altura inicial se deben principalmente a la latitud. Esta capa almacena alrededor del 19% de los gases atmosféricos, pero con muy poco vapor de agua. En esta capa la temperatura desciende al acercarse a la Tierra, el calor de la parte superior es producido en el proceso de formación de ozono, fenómeno responsable que la capa superior tenga una mayor temperatura, evitando la convección en la orientación vertical, reduciendo el movimiento de los gases en este sentido. La parte baja de transición a la capa inferior se llama tropopausa.

- **Tropósfera:** se extiende desde la superficie terrestre hasta los 18-20 km de altura en el ecuador y hasta los 10 km en los polos. La densidad de los gases en esta capa disminuye con la altura y la temperatura disminuye al ascender.

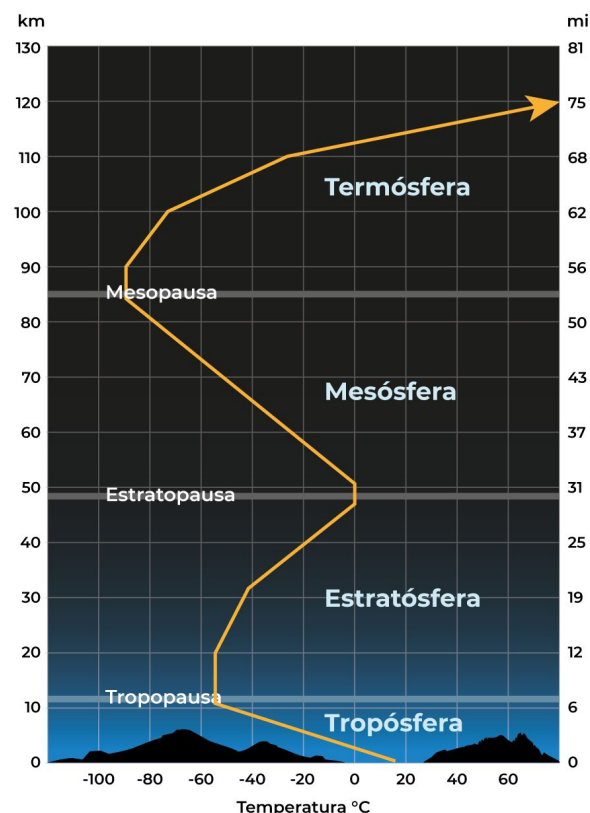


Figura 3. Capas de la atmósfera.  
National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

La atmósfera terrestre se considera una capa con densidad exponencialmente decreciente, con una escala de altura (height scale) de ~8.5 km. Este parámetro indica la altura a la cual variables tales como su densidad decrecen en un factor de  $e$  (aproximadamente 2.718). Dado esto, a 6 escalas de altura, ~50 km, la densidad habrá decrecido a una densidad despreciable, menor a 0.25%.

Existe evidencia de una distribución de aerosoles tanto en la tropósfera como en la estratósfera (Wallace y Hobbs 2006) y donde la mayor concentración en la estratósfera se encuentra en la capa de Junge (Kremser et al. 2016), ubicada entre 15 y 30 km aproximados desde la superficie terrestre. El origen de estos aerosoles estratosféricos se adjudica a las erupciones volcánicas, la desintegración de meteoros (Timmreck et al. 2018, Malinina et al. 2018, Voudouri et al. 2023), e incluso material metálico residual de satélites y aeronaves (Murphy et al. 2023).

Del mismo modo se encuentra extensamente documentada la propagación de la contaminación lumínica producida por fuentes artificiales, conocida como *sky-glow*, bajo un proceso de dispersión a través de la atmósfera (Duriscoe et al. 2007, Kocifaj 2007, Kocifaj 2014, Kocifaj y Solano Lamphar 2014, Jechow et al. 2017, Malinina et al. 2018, Ścieżor y Czaplicka 2020, Green et al. 2022, Bará et al. 2022, Wallner y Kocifaj 2023, Walczak et al. 2023), tanto de forma horizontal como vertical (Kocifaj 2007).

Tanto los aerosoles y gases que contribuyen al *sky-glow* se encuentran distribuidos entre la tropósfera y la estratósfera, alcanzando entonces la altura máxima de 50 km, independiente de la variación de la concentración de éstos. Sin embargo, también existen referencias de cálculos considerando 10 km de altura (Ścieżor y Czaplicka 2020) y otras investigaciones donde se considera 30 km de altura para aplicar modelos de contaminación lumínica en una localidad en particular (Aubé y Kocifaj 2012, Aubé y Kocifaj 2012).

#### • **Zona atmosférica libre de contaminación lumínica**

El cielo visible sobre un sitio astronómico puede ser representado mediante un casquete esférico (Figura 4). Al observar el cielo desde un sitio ideal, sin obstrucciones hacia el horizonte, el cielo se observa como un casquete esférico de 90° de elevación en el cenit.

Desde la altura angular de 30° de elevación por sobre el horizonte hacia el cenit (90°), se espera que no existan alteraciones de luminosidad artificial que puedan deteriorar las condiciones habilitantes para el adecuado funcionamiento de la tecnología de observación.

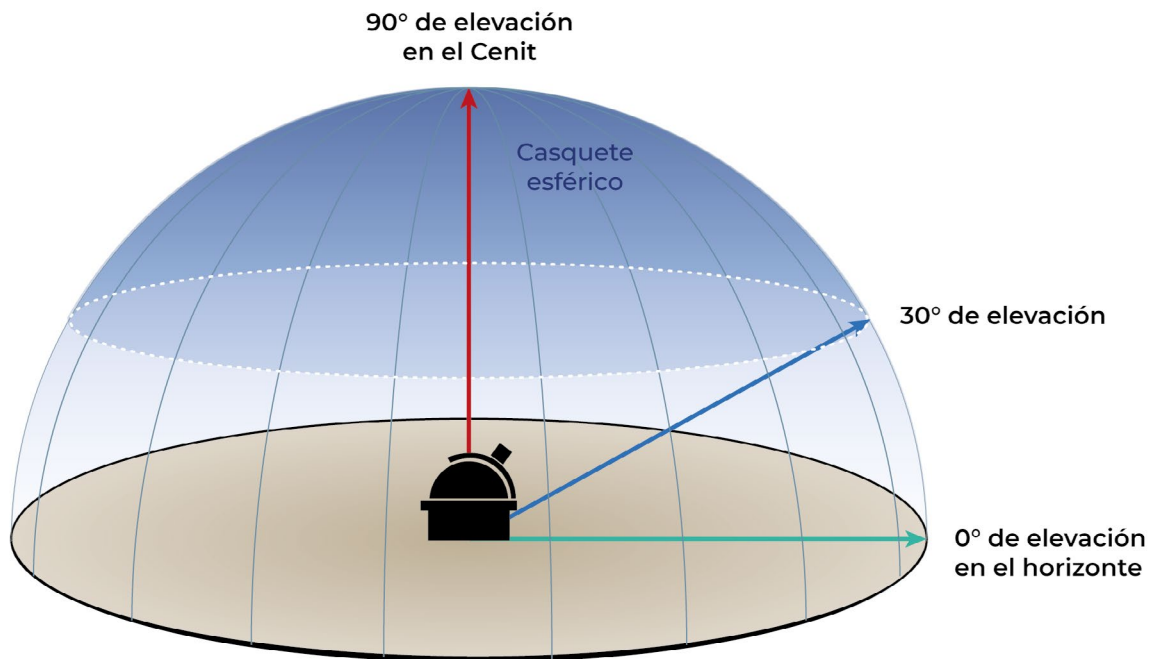


Figura 4. Representación del cielo visible sobre una tecnología de observación. El casquete esférico comienza a 30° de elevación hasta los 90° de elevación, hacia todas las direcciones del acimut desde el sitio astronómico.

Esta medida busca mantener condiciones que permitan la observación astronómica en al menos el 50% del cielo –que normalmente es posible aprovechar en un observatorio– y que corresponde al cielo que es de mejor calidad para la observación astronómica.

Este es el cielo de mayor importancia para la observación científica, pues a menor altura el cielo se halla fuertemente afectado por efectos de turbulencia, extinción y refracción atmosférica, que añaden incertidumbre a las observaciones. Por esta razón, muchos telescopios son diseñados tomando en cuenta tales limitaciones naturales y no son capaces de apuntar tan abajo. Por lo tanto, es razonable concentrar el esfuerzo de protección del cielo libre de contaminación lumínica desde 30° de elevación hasta los 90° de elevación o cenit, considerando todos los posibles ángulos de acimut (0° a 360°).

Los fotones emitidos por una fuente de contaminación lumínica interactúan con las moléculas y partículas presentes en la atmósfera y sufren una dispersión (*scattering*) que puede redireccionarlos en una nueva dirección determinada por una función de fase, la que favorece ciertos ángulos dependiendo de si la dispersión es producida por moléculas o partículas.

La primera dispersión que sufre un fotón, de primer orden, puede ser seguida por otras dispersiones, de segundo y mayores órdenes, en cuanto el fotón siga viajando en la atmósfera. Sin embargo, esas dispersiones del cielo en segundo orden (y mayores) son menos efectivas como medio de viajar desde la fuente hasta el sitio astronómico, pues cada dispersión puede ocurrir en un ángulo diferente. Además, al aumentar la extensión de su recorrido a través de la atmósfera, el fotón tiene más posibilidades de sufrir absorción en la misma. Dado esto, tiene sentido que entonces la primera prioridad al buscar la protección de la oscuridad del cielo en un sitio astronómico esté puesta en reducir la posibilidad de contaminación lumínica por causa de esas dispersiones de primer orden.

Los efectos directos de la luminosidad artificial en el campo de la astronomía han sido ampliamente demostrados (Wesołowski 2023, Aubé y Roby 2014). La luminosidad artificial aumenta el brillo general del cielo nocturno, lo que dificulta la observación de estrellas y otros objetos astronómicos. Esta luz dispersa contamina la luz proveniente de objetos astronómicos tenues, lo que genera datos y observaciones erróneas. Incluso los observatorios modernos y remotos se ven afectados por esta creciente contaminación lumínica, lo que va profundizando los desafíos en la observación astronómica, comúnmente junto con retrasos y extensión de tiempo en investigaciones astronómicas.

Normalmente esta luz, generada por fuentes artificiales como ciudades, viaja por la atmósfera interactuando con aerosoles y otras partículas, causando la dispersión en todas direcciones. Esta luz dispersada crea un resplandor difuso o resplandor del cielo que se extiende por el cielo nocturno, ocultando por ejemplo, objetos celestes débiles.

Según datos recopilados en Falchi et al. (2023) –quién analizó en 2021 el aumento de la radiancia difusa debido a luz artificial respecto al valor del brillo natural del cielo para diversos observatorios del mundo, calculado en el cenit y a los 30° de elevación sobre el horizonte–, existen solo seis observatorios que presentaban en esa fecha niveles de contaminación lumínica iguales o menores al 1% a los 30° de elevación. Tres de ellos se localizan en Chile, entre los cuales se encuentran los observatorios de Paranal, Armazones y Chajnantor. Los valores de incremento de la radiancia difusa debido a la luz artificial por sobre el brillo natural del cielo para los observatorios instalados en Chile se observan en la Tabla 5.

Tabla 5: Porcentaje del incremento de la radiancia difusa de luz artificial respecto del valor del brillo natural del cielo de los observatorios instalados en Chile en el cenit (90° de elevación) y a los 30° grados de elevación por sobre el horizonte. Fuente: Falchi et al. 2023.

| Sitio                      | Radiancia en el cenit<br>(incremento porcentual considerando<br>brillo natural de 22 mag/arcsec <sup>2</sup> ) | Radiancia media a 30° de elevación<br>(incremento porcentual considerando<br>brillo natural de 21.8 mag/ arcsec <sup>2</sup> ) |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cerro Tololo               | 6%                                                                                                             | >10%                                                                                                                           |
| Pachón                     | 4%                                                                                                             | >10%                                                                                                                           |
| La Silla                   | >1%                                                                                                            | >4%                                                                                                                            |
| Las Campanas<br>(Magellan) | >1%                                                                                                            | 6%                                                                                                                             |
| Las Campanas<br>(GMT)      | >1%                                                                                                            | >5%                                                                                                                            |
| Paranal                    | >0.2%                                                                                                          | 1%                                                                                                                             |
| Armazones<br>(NO lodge)    | >0.2%                                                                                                          | >1%                                                                                                                            |
| Armazones                  | >0.7%                                                                                                          | >2%                                                                                                                            |
| Tokyo Atacama              | >0.2%                                                                                                          | >2%                                                                                                                            |

Bajo las condiciones descritas y las evidencias científicas reportadas, la Comisión Asesora Ministerial 2025 propone que cualquier proyecto o iniciativa que genere contaminación lumínica dentro de las Áreas astronómicas (Figura 1), debiera demostrar que no generará una degradación significativa de las condiciones habilitantes de cada sitio astronómico.

En el caso de la astronomía óptica e infrarroja, esto implica la obligación de modelar la propagación lumínica para cuantificar el impacto del proyecto o iniciativa en el brillo del cielo, asegurando que sus contribuciones de luminosidad artificial se mantengan por debajo de un 1% respecto del brillo natural del cielo a 30° de elevación sobre el horizonte, medidos desde el sitio astronómico. Este umbral debe cumplirse en la totalidad del perímetro a 30° de elevación y en cualquier otro punto de la semiesfera por sobre esta altura observados desde el sitio astronómico, es decir, no puede ser superado en ningún punto del casquete esférico, ni en ninguna dirección de observación del acimut (Comisión Asesora Ministerial 2025).

Además, proponen que la suma de todas las contribuciones no debe superar un 2% del brillo natural respecto del fondo natural a 30° de elevación, en ninguna dirección de observación a dicha altura, ni en ningún punto de la semiesfera por sobre los 30°.

En base a las investigaciones científicas (Falchi et al. 2023) sobre el aumento progresivo del grado de contaminación lumínica en torno a los observatorios ópticos, se requiere realizar una coordinación de los gobiernos comunales, regionales y nacionales, así como también entre el sector público y privado, para lograr una reducción progresiva de la contaminación lumínica. La meta es alcanzar niveles no superiores al 1% del brillo natural del cielo a 30° de elevación por sobre el horizonte, procurando implementar planes de descontaminación que permitan que las condiciones gradualmente progresen hacia las condiciones habilitantes establecidas para cada sitio astronómico.

Se han desarrollado tecnologías satelitales que permiten detectar y cartografiar esta luz difusa desde el espacio, como por ejemplo datos del OLS (Operational Linescan System | NASA Earthdata), o de los satélites Suomi NPP y NOAA-20 que cuentan con un radiómetro VIIRS (Earth Science Data Systems 2024). A nivel científico se desarrollan modelos (Aubé, 2015, Aubé y Kocifaj 2012, Cinzano y Falchi 2012), los que junto a los datos satelitales mencionados permiten comprender la contribución de la luz difusa a la radiancia ascendente total de una ciudad u otra fuente de emisión y predecir su impacto sobre los sitios astronómicos.

### 3.3. Tipos de contaminantes para cada tipo de tecnología

La normativa vigente, que establece el Ministerio del Medio Ambiente en la Ley 19.300, define como *“contaminación a la presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones o permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas por la legislación vigente”*. Además, esta ley clasifica la contaminación en diferentes tipos según el medio afectado: aire, agua y suelo.

Complementariamente, y considerando la modificación por la Ley 21.162 Artículo 1 literal a), la Ley 19.300 declara como *“contaminante a todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, luminosidad artificial o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental”*.

A partir de la información del capítulo 8 del informe de la Comisión Asesora Ministerial 2025, se describen los principales tipos de contaminantes según la normativa vigente, que se relacionan directamente con las características de los sitios astronómicos en operación en Chile.

• **Contaminación Lumínica y calidad del cielo: Ministerio de Medio Ambiente /División Calidad del Aire (DRLO)**

La luminosidad artificial tiene un impacto negativo en la calidad del cielo para las operaciones de los observatorios astronómicos. El brillo artificial producido por fuentes lumínicas degrada la calidad del cielo, impactando a las tecnologías que observan en el espectro visible e infrarrojo. Para controlar y mitigar este impacto, se estableció una nueva norma lumínica, el Decreto Supremo N° 1/2023 del Ministerio del Medio Ambiente, que busca proteger las Áreas de Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica.

Esta norma lumínica establece como contaminante a la cantidad máxima permitida, medida en el efluente de la fuente emisora, que en el caso de la contaminación lumínica corresponde a la luminaria, y se establecen ciertas restricciones (certificación, orientación, color, entre otras). Aunque el control es para cada luminaria de manera independiente, no considera la contaminación lumínica producida en su conjunto.

Para el caso de las Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica, definidas por el Ministerio de Ciencia en conjunto con el Ministerio de Medio Ambiente, el Decreto Supremo N° 1/2023, establece zonas donde la norma lumínica se debe aplicar de manera estricta, exigiendo que la radiancia espectral se restrinja al espectro azul en un 1% y para el resto del territorio nacional en un 7%. Estas restricciones espectrales son aplicables a los alumbrados peatonales, vehicular e industrial, junto con las restricciones de cero emisiones de luz por sobre los 90° y evitar la sobre iluminación.

Es muy frecuente que se instalen mal las luminarias (por sobre el plano horizontal) y se utilicen niveles de iluminación (iluminancia y luminancia) muy por sobre las normas aplicables en nuestro país, por lo que se requiere de una fiscalización sistemática en terreno por parte de la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA), que permita dar cumplimiento a esta norma.

• **Material particulado y gases: Ministerio de Medio Ambiente / División Calidad del Aire**

El Ministerio del Medio Ambiente define como material particulado (MP) a un contaminante atmosférico formado por partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire, clasificándose principalmente en MP10 (partículas con diámetro menor a 10 micrómetros) y MP2.5 (partículas con diámetro menor a 2.5 micrómetros). Estas partículas pueden ser de origen natural o antropogénico y su tamaño afecta su capacidad de penetración en el sistema respiratorio, siendo las partículas más finas las que representan un mayor riesgo para la salud.

La composición del MP puede ser variable, ya que considera sustancias orgánicas e inorgánicas, polvo, hollín, metales y compuestos químicos, las que pueden ser producidas de manera natural tales como erupciones volcánicas, tormentas de polvo, polen, entre otras. También pueden ser emitidas por fuentes antropogénicas tales como los procesos de combustión de vehículos o calefacción, industrias, actividades mineras y agrícolas, incendios forestales, entre otros.

En cuanto a los gases, los considerados como contaminantes atmosféricos son el ozono troposférico ( $O_3$ ) y el dióxido de azufre ( $SO_2$ ), que pueden causar problemas respiratorios; el monóxido de carbono (CO), que en altas concentraciones puede ser mortal; el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), que contribuye a la formación de smog y lluvia ácida; el plomo (Pb) y el benceno.

En relación con los observatorios astronómicos el polvo en suspensión es un contaminante para sus operaciones porque afecta la sensibilidad y precisión de los instrumentos, ya sea por concentraciones en la atmósfera o por deposición en los espejos primarios y en el conjunto de la instrumentación astronómica. Algunos observatorios que operan en Chile poseen monitoreo de contador de partículas de polvo de tamaños de 5 micrómetros (partículas grandes) y 0,5 micrómetros (partículas pequeñas), según su propia clasificación.

#### • **Turbulencia atmosférica**

En Chile la turbulencia atmosférica no es considerada como un contaminante, pues es un movimiento natural e irregular del aire. En relación con la aeronáutica, la turbulencia atmosférica es usada como parámetro para el tránsito aéreo, pues se relaciona a la turbulencia de aire claro (CAT por sus siglas en inglés) (Ref. DGAC). Sin embargo, en la observación astronómica tiene una alta relevancia pues se relaciona con la turbulencia óptica que determina la calidad de la atmósfera en el espectro electromagnético del visible e infrarrojo.

Un parámetro que mide la fluctuación de la turbulencia óptica es el *seeing* astronómico que cuantifica la escintilación o difuminación de las imágenes capturadas por los telescopios. En este sentido, el *seeing* astronómico es un parámetro estándar que la mayoría de los observatorios miden, tanto en los estudios de sitios preparatorios, como también en el monitoreo de las variables en su etapa de operación.

La turbulencia atmosférica se puede estimar a través de variables como la temperatura y el viento. En la literatura, los modelos se basan en estas variables para estimar la energía cinética turbulenta (TKE por sus siglas en inglés) y que representa una magnitud de la turbulencia (Wallace y Hobbs 2006). Aunque el TKE es una magnitud que considera términos como el viento, la boyantes, advección y transporte de la turbulencia, además de términos de disipación, es usado de ma-

nera directa en los principales modelos que representan la turbulencia óptica y la estimación del *seeing* astronómico simplificando su estimación basados en el cizalle vertical (cambio de intensidad y dirección) del viento (Masciadri et al. 2017; Osborn y Sarazin 2018).

Además, estudios recientes han demostrado que las turbinas eólicas son productoras de turbulencia atmosférica local (Porté-Agel et al. 2020), pudiendo aumentar el TKE, que en cercanías de las Áreas con Valor Científico y de Investigación Astronómica podrían afectar al *seeing* astronómico. Además, las nuevas tecnologías que se están desarrollando y construyendo en Chile (ELT, GMT, Vera Rubin) requieren de alta precisión, donde el *seeing* astronómico es un parámetro fundamental para los objetivos científicos que se esperan alcanzar.

#### • **Vibraciones y sismicidad: Ministerio de Medio Ambiente**

En Chile, la sismicidad no es considerada como contaminante, sin embargo, la vibración sí pertenece a esta categoría. En la Guía para la Predicción de Impactos por Ruido y Vibración del SEIA, se establecen como contaminantes al ruido y la vibración, en relación con el artículo 11 de la Ley 19.300, antes mencionada. Aquí se declara que la vibración corresponde a un fenómeno mecánico generado por el movimiento oscilatorio de un cuerpo en torno a su posición en equilibrio. Además, señala como ejemplo de fuentes de vibración que interactúan con el medio ambiente a las faenas de construcción, operación de maquinaria pesada, entre otros. También señala que los descriptores más usados para caracterizar las vibraciones son:

- **Velocidad Peak de las partículas (PPV):** corresponde al valor peak de velocidad instantánea de la señal de vibración (positivo o negativo). Este descriptor se utiliza frecuentemente para la evaluación del daño sobre estructuras. Las unidades de medición más frecuentes son mm/s e in/s (del inglés *inches*, pulgadas).
- **Nivel de velocidad de vibración (Lv):** mide en decibeles y está definido por la siguiente expresión, donde V es la amplitud de velocidad (rms) y Vref es la velocidad de referencia:  $L_v = 20 \log(V/V_{ref})$ .

Para diferenciar los niveles de velocidad de vibración de los niveles de ruido se utiliza comúnmente la abreviación VdB. Para efectos de analizar los efectos de las vibraciones sobre las estructuras y receptores humanos, el rango de interés se sitúa entre 50 y 100 VdB (Hanson et al. 2006). La guía define como parámetro la frecuencia de la vibración, que describe el número de oscilaciones que se producen en un intervalo de tiempo igual a un segundo. La unidad de medición es el Hertz (Hz) y el rango de estudio habitual varía entre 1 y 100 Hz.

### • Interferencia electromagnética: Ministerio de Medio Ambiente

La interferencia de radiofrecuencia (RFI, por sus siglas en inglés) se define como toda señal no deseada, de origen natural o artificial, que ingresa al receptor de señales cósmicas del tipo radioastronómico, y degrada su sensibilidad. Los radio-telescopios trabajan en un régimen de señales extremadamente débiles, registrando densidades de flujo del orden de  $10^{-29}$  a  $10^{-26}$  W/m<sup>2</sup>/Hz provenientes de fuentes cósmicas. Esto corresponde a señales que son miles de millones de veces más débiles que las señales localmente generadas por WiFi u otros dispositivos domésticos. Por lo tanto, cualquier emisión antropogénica, incluso a niveles ínfimos comparados con estándares de telecomunicaciones, puede enmascarar completamente la señal astronómica.

La RFI más dañina se origina usualmente por emisiones del tipo intencional, como transmisiones de radio, TV, telefonía móvil, enlaces satelitales, radares de vigilancia, WiFi, radiocomunicaciones de servicios aeronáuticos o marítimos, etc. De acuerdo a lo señalado en capítulos anteriores, la RFI es regulada por la Subtel y el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones.

Tabla 6: Resumen de los tipos de contaminantes, las tecnologías de observación y las variables que se recomienda cuantificar para el monitoreo de cada sitio astronómico.

| Contaminante                               | Lumínica                                                          | Turbulencia                                                        | Material particulado                      | Vibraciones                                                       | Interferencia electro-magnética |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Tecnología                                 |                                                                   |                                                                    |                                           |                                                                   |                                 |
| <b>Óptico visible e infrarrojo cercano</b> | Luminosidad artificial (radiancia difusa) (mag/asc <sup>2</sup> ) | Seeing (")<br>Ángulo isoplanático (")<br>Tiempo de coherencia (ms) | Material particulado (ug/m <sup>3</sup> ) | Vibraciones (onda sísmica) ((m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /Hz) | -                               |
| <b>Infrarrojo Medio y Lejano</b>           | -                                                                 | Seeing (")                                                         | Vapor de agua precipitable (PWV, mm)      | Vibraciones (onda sísmica) ((m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /Hz) | -                               |
| <b>Radio-astronomía</b>                    | -                                                                 | Seeing (")                                                         | Vapor de agua precipitable (PWV, mm)      | Vibraciones (onda sísmica) ((m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /Hz) | Medición de radiofrecuencia     |
| <b>Rayos gamma</b>                         | Luminosidad artificial (radiancia difusa) (mag/asc <sup>2</sup> ) | Seeing (")                                                         | Material particulado (ug/m <sup>3</sup> ) | Vibraciones (onda sísmica) ((m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /Hz) | -                               |

### 3.4. Catastro Nacional de sitios astronómicos

Las condiciones habilitantes de cada sitio astronómico podrán ser reportadas por cada institución administradora de observatorios nacionales e internacionales al Ministerio de Ciencia de manera periódica. Esta información será puesta a disposición en el **Catastro Nacional de Sitios Astronómicos**, administrado por el Ministerio de Ciencia, en conformidad con los estándares de gestión de datos geoespaciales del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), a cargo del Ministerio de Bienes Nacionales.

El Catastro Nacional de Sitios Astronómicos constituye un bien público orientado a fortalecer la gestión de los sitios astronómicos en Chile. Este instrumento permite conocer de manera clara, transparente y actualizada la presencia, localización y características de los observatorios nacionales e internacionales en el país, destacando su relevancia como parte del patrimonio científico-tecnológico de Chile.

Mediante esta plataforma de datos geoespaciales, el Estado garantiza el acceso público a datos relevantes y contribuye a la protección de las condiciones habilitantes que hacen posible la observación astronómica de excelencia mundial. De esta manera, fortalece la gobernanza nacional en estas materias, mejorando la coordinación intersectorial y facilitando la toma de decisiones informadas en ámbitos como la planificación territorial, la evaluación ambiental, las telecomunicaciones, la energía, la infraestructura y los proyectos de inversión.

Los sitios astronómicos presentes en el Catastro Nacional de Sitios Astronómicos se individualizan en la Tabla 7 y se muestran en la Figura 5.

Tabla 7: Sitios Astronómicos en Áreas de Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica (Áreas astronómicas, Figura 1).

| ID | Nombre                                                      | Tipo            | Comuna               | Latitud    | Longitud   |
|----|-------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------|------------|------------|
| 1  | Tokio Atacama Observatory                                   | Óptico          | San Pedro de Atacama | -22,986079 | -67,742146 |
| 2  | Observatorio Ckoirama                                       | Óptico          | Antofagasta          | -24,089323 | -69,930506 |
| 3  | UA-Vicuña Mackenna                                          | Óptico          | Taltal               | -24,4505   | -70,048    |
| 4  | Extremely Large Telescope (ELT)                             | Óptico          | Taltal               | -24,589327 | -70,191676 |
| 5  | Very Large Telescope-Paranal                                | Óptico          | Taltal               | -24,627607 | -70,404514 |
| 6  | SPECULOOS-Sur (Paranal)                                     | Óptico          | Taltal               | -24,616027 | -70,390681 |
| 7  | The Next-Generation Transit Survey (NGTS)                   | Óptico          | Taltal               | -24,615731 | -70,391109 |
| 8  | Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy (VISTA) | Óptico          | Taltal               | -24,615899 | -70,397465 |
| 9  | Giant Magellan Telescope                                    | Óptico          | Vallenar             | -29,04869  | -70,682215 |
| 10 | Observatorio Cerro Las Campanas                             | Óptico          | Vallenar             | -29,020605 | -70,689784 |
| 11 | BlackGEM (La Silla)                                         | Óptico          | La Higuera           | -29,257392 | -70,737914 |
| 12 | Observatorio La Silla                                       | Óptico          | La Higuera           | -29,255853 | -70,738906 |
| 13 | Observatorio Cerro Tololo                                   | Óptico          | Vicuña               | -30,169722 | -70,806549 |
| 14 | Gemini Sur                                                  | Óptico          | Vicuña / Río Hurtado | -30,240694 | -70,736432 |
| 15 | Southern Astrophysical Research Telescope (SOAR)            | Óptico          | Vicuña / Río Hurtado | -30,237802 | -70,733477 |
| 16 | Vera Rubin Observatory                                      | Óptico          | Vicuña / Río Hurtado | -30,244608 | -70,749313 |
| 17 | Cherenkov Telescope Array                                   | Rayos gamma*    | Taltal               | -24,683428 | -70,316344 |
| 18 | Simons Observatory                                          | Radiotelescopio | Antofagasta          | -22,960626 | -67,788004 |
| 19 | Simons Array / PolarBear                                    | Radiotelescopio | Antofagasta          | -22,95824  | -67,786194 |
| 20 | CLASS (Cosmology Large Angular Scale Surveyor)              | Radiotelescopio | Antofagasta          | -22,959691 | -67,787156 |
| 21 | APEX                                                        | Radiotelescopio | Antofagasta          | -23,005868 | -67,759145 |
| 22 | ALMA                                                        | Radiotelescopio | Antofagasta          | -23,02911  | -67,754733 |
| 23 | Transport Antarctic Research Platform (TARP-04)             | Radiotelescopio | Antofagasta          | -22,958059 | -67,784285 |
| 24 | Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE)           | Radiotelescopio | Antofagasta          | -22,971638 | -67,70322  |
| 25 | NANTEN 2                                                    | Radiotelescopio | Antofagasta          | -22,969909 | -67,70304  |
| 26 | Leighton Chajnantor Telescope (LCT)                         | Radiotelescopio | Antofagasta          | -23,028506 | -67,761665 |
| 27 | CCAT (Cerro Chajnantor Atacama Telescope)                   | Radiotelescopio | Antofagasta          | -22,985619 | -67,740309 |
| 28 | UCSC MARI                                                   | Radiotelescopio | Antofagasta          | -23,148872 | -67,24072  |

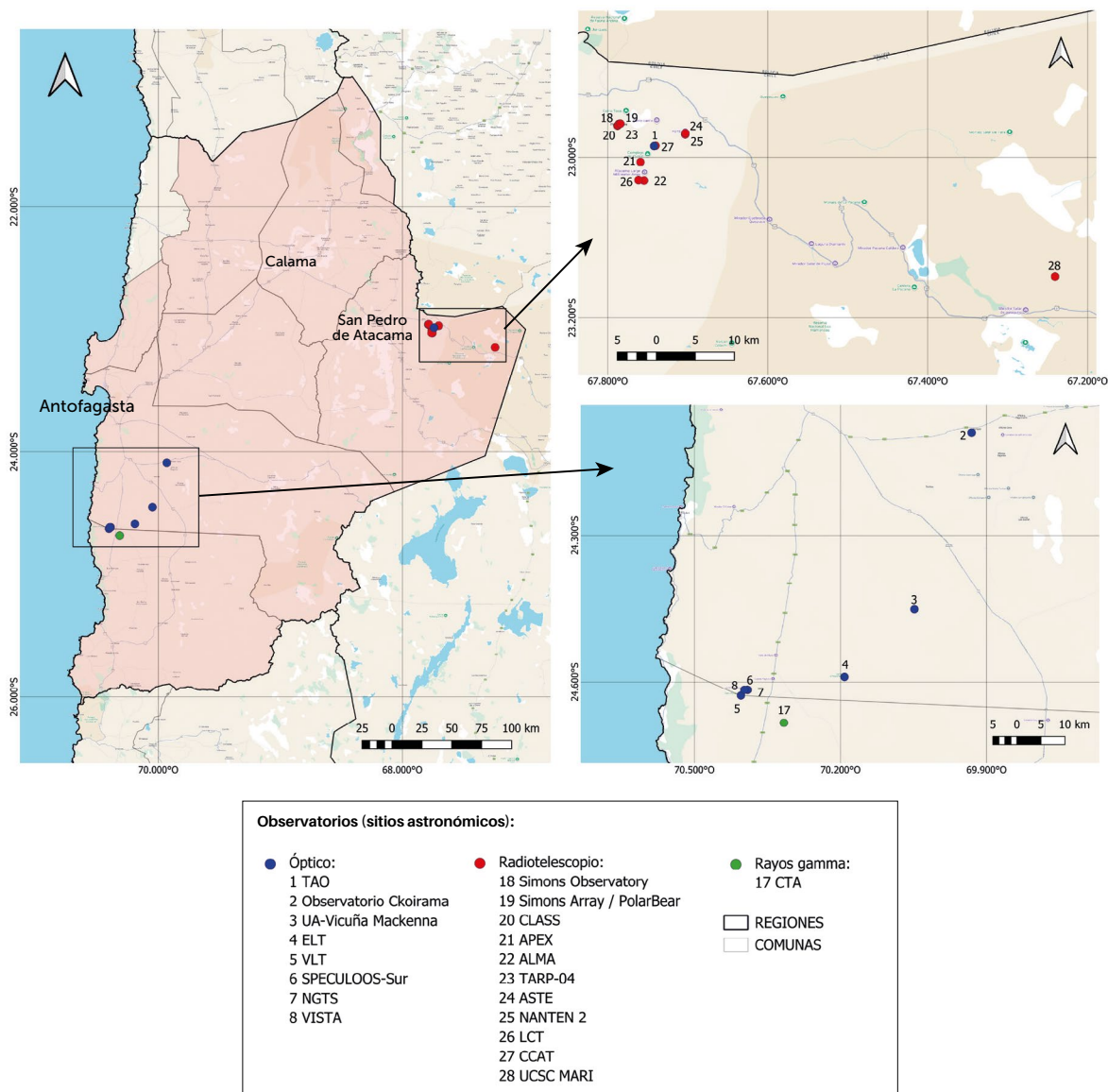


Figura 5. A) Sitios astronómicos de la región de Antofagasta.

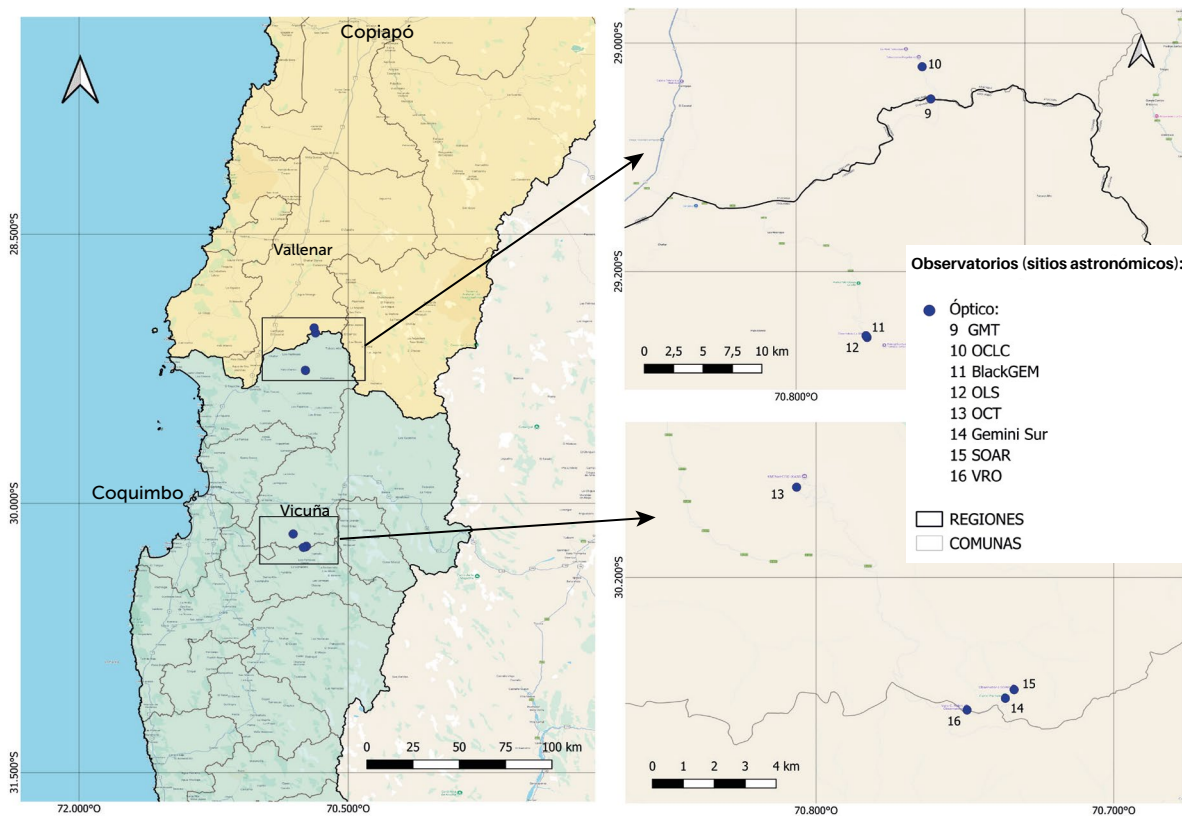


Figura 5. B) Sitios astronómicos de las regiones de Atacama y Coquimbo.

La información requerida para cada sitio astronómico se detalla a continuación en la Tabla 8.

Tabla 8: Datos institucionales y técnicos requeridos para el Catastro Nacional de Sitios Astronómicos para la Investigación Científica.

| Categoría de información                | Datos a reportar                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Antecedentes institucionales</b>     | Nombre del observatorio y sigla oficial.                                                                                                                                |
|                                         | Tipo de tecnología astronómica (óptico, óptico-infrarrojo, rayos gamma, radioastronomía).                                                                               |
|                                         | Institución administradora.                                                                                                                                             |
|                                         | Localización geográfica (región, comuna, cerro).                                                                                                                        |
|                                         | Coordenadas geodésicas (Latitud, longitud, altitud) en formato WGS84.                                                                                                   |
|                                         | Tipo de concesión de terreno (gratuito, oneroso, venta).                                                                                                                |
|                                         | Polígono de la concesión o propiedad de la tierra en donde se ubica la tecnología reportada.                                                                            |
|                                         | Tipo de protección vigente (Área astronómica, Áreas de Interés Científico para la Minería, Subtel).                                                                     |
|                                         | Polígono de la Zona de Interés Científico para Efectos Mineros (Archivo GIS: shapefile, GeoJSON o KML en WGS84).                                                        |
|                                         | Polígono de protección Subtel (Archivo GIS: shapefile, GeoJSON o KML en WGS84).                                                                                         |
|                                         | Tipo de investigación u objetivos científicos que se abordan.                                                                                                           |
|                                         | Página web institucional.                                                                                                                                               |
|                                         | Correo electrónico institucional de contacto técnico.                                                                                                                   |
| <b>Estudios de sitio (site testing)</b> | Año de inicio del estudio de sitio ( <i>Site Testing</i> ).                                                                                                             |
|                                         | Parámetros y criterios utilizados en el estudio de sitio.                                                                                                               |
|                                         | Informes técnicos o publicaciones asociadas al estudio de sitio (referencia bibliográfica en formato DOI o enlace web).                                                 |
| <b>Condiciones habilitantes</b>         | Año de validación de condiciones habilitantes.                                                                                                                          |
|                                         | Consistencia entre parámetros del estudio de sitio y condiciones actuales (en caso de cambios o ajustes, indicar justificaciones).                                      |
|                                         | Valores métricos considerados para la selección del sitio, que determinan las condiciones habilitantes para la observación astronómica.                                 |
|                                         | Variables ambientales, geológicas y/o socio-territoriales consideradas.                                                                                                 |
|                                         | Rangos y umbrales críticos de condiciones habilitantes en grados de observación relevantes para la operación de los observatorios (en un rango de 30° a 90° elevación). |
|                                         | Documentación de respaldo técnico (referencia bibliográfica en formato DOI o enlace web).                                                                               |
|                                         | Año de primera luz o inicio formal de operaciones científicas.                                                                                                          |

|                                              |                                                                                                                           |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Monitoreo de condiciones habilitantes</b> | Parámetros actualmente monitoreados.                                                                                      |
|                                              | Instrumentación y/o tecnologías empleadas para el monitoreo.                                                              |
|                                              | Año de inicio del monitoreo por variable.                                                                                 |
|                                              | Frecuencia de monitoreo por variable.                                                                                     |
|                                              | Repositorios o datos abiertos disponibles (URL institucional o archivos en formatos de datos como CSV, XLS, entre otros). |

### 3.5. Medidas de mitigación

Los grandes observatorios astronómicos necesitan de cielos nocturnos de calidad durante toda su vida útil. La protección del cielo nocturno en Chile y en países como España, Italia, Nueva Zelanda, Australia, Estados Unidos o Europa, que cuentan con observatorios astronómicos de carácter científico y con tecnología de punta, ha sido implementada a partir de instrumentos de gestión que responden a las prioridades de cada territorio, junto con otras recomendaciones técnicas por parte de organismos internacionales.

A partir de la información proveída en el capítulo 6 del informe de la Comisión Asesora Ministerial 2025, se presenta la Tabla 9 que resume las medidas de mitigación aplicadas en países que cuentan con observatorios astronómicos de carácter científico y con tecnología avanzadas de observación. Estas diferentes medidas podrían implementarse de manera complementaria a las ya existentes en Chile, por parte de los gobiernos comunales y regionales y/o de las iniciativas públicas o privadas que se desarrollen dentro de las Áreas astronómicas y que podrían generar algún grado de contaminación lumínica.

Tabla 9: Resumen de regulaciones en países que cuentan con observatorios astronómicos de carácter científico y con tecnología avanzadas de observación.  
Fuente: Comisión Asesora 2025.

| País / Jurisdicción            | Descripción de medidas de mitigación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>España</b>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Regular la eficiencia energética de las instalaciones de alumbrado exterior mediante el reglamento aprobado por R.D. 18/2022 y sus ITC-EA-01 a ITC-EA-07.</li> <li>• Limitar el flujo luminoso hacia el hemisferio superior conforme a requisitos técnicos definidos en las ITC (control de emisión y orientación).</li> <li>• Clasificar zonas según sensibilidad ambiental y tipo de entorno (zonificación lumínica).</li> <li>• Establecer niveles máximos de iluminancia y luminancia según categoría de vía o espacio exterior.</li> <li>• Exigir control del deslumbramiento y de la luz intrusa.</li> <li>• Incorporar requisitos de eficiencia energética y mantenimiento del rendimiento de las instalaciones.</li> <li>• Aplicar documentación técnica y verificación de cumplimiento conforme a las ITC.</li> </ul>                                                               |
| <b>España - Islas Canarias</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Establecer un régimen especial de protección de la calidad astronómica en el entorno de los observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias.</li> <li>• Prohibir o limitar la emisión de luz hacia el hemisferio superior en zonas de protección astronómica.</li> <li>• Restringir tipos de lámparas y espectros permitidos para reducir impacto en observación astronómica.</li> <li>• Regular horarios de funcionamiento del alumbrado exterior en zonas sensibles.</li> <li>• Establecer zonificación territorial diferenciada según proximidad a observatorios.</li> <li>• Incorporar control sobre otros contaminantes relevantes para la calidad astronómica (incluyendo radioeléctricos y atmosféricos).</li> <li>• Coordinar la aplicación normativa con autoridades técnicas vinculadas a la protección astronómica.</li> </ul>                                             |
| <b>Italia</b>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitar el flujo hemisférico superior (ULOR/ULR) a 0 cd/klm a 90° y sobre el plano horizontal en zonas estrictas. Permitir <math>\leq 0,49</math> cd/klm en otras zonas según normativa regional.</li> <li>• Exigir luminarias <i>full-cutoff</i> y controlar óptica/orientación para evitar emisión directa hacia el cielo.</li> <li>• Restringir la TCC a <math>\leq 3000</math> K y, en zonas de máxima tutela, emplear <math>\leq 2200</math> K o fuentes ámbar.</li> <li>• Diseñar niveles de iluminancia y luminancia conforme a categorías de vía, asegurando mínimos necesarios para seguridad.</li> <li>• Implementar reducción nocturna programada (el porcentaje puede variar por región).</li> <li>• Aplicar zonificación específica en torno a observatorios.</li> <li>• Verificar cumplimiento mediante mediciones fotométricas y, cuando corresponda, espectrales.</li> </ul> |

|                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Estados Unidos (general)</b>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Exigir luminarias <i>full-cutoff</i> para impedir emisión sobre el plano horizontal (según código local o estatal).</li> <li>• Establecer CCT máxima usualmente <math>\leq 3000</math> K (en algunos casos <math>\leq 4000</math> K).</li> <li>• Imponer límites máximos de lúmenes por luminaria o por área (<i>lumen caps</i>) según jurisdicción. Aplicar <i>curfews</i> y esquemas de <i>dimming</i> tras horarios definidos localmente.</li> <li>• Controlar deslumbramiento y luz intrusiva en propiedades colindantes mediante límites cuantitativos.</li> <li>• Restringir tipo de fuente en zonas sensibles (SBP, LED ámbar o filtros espectrales).</li> <li>• Requerir ensayos o certificaciones técnicas según el código aplicable (no existe norma federal única).</li> </ul> |
| <b>EE.UU. – Hawái</b>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Obligar a que luminarias exteriores que emitan más de 3000 lúmenes sean <i>fully shielded</i>.</li> <li>• Limitar la CCT a <math>\leq 4000</math> K.</li> <li>• Clasificar luminarias en categorías (Class I, II, III) según zona y sensibilidad astronómica.</li> <li>• Priorizar el uso de Sodio de Baja Presión (SBP) o iluminación ámbar en áreas vinculadas a observatorios.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>EE.UU. – Tucson / Pima County (Arizona)</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicar un <i>Outdoor Lighting Code</i> específico para proteger el cielo del desierto de Arizona.</li> <li>• Limitar la CCT a <math>\leq 3000</math> K (permitir ámbar en casos específicos).</li> <li>• Exigir luminarias <i>full-cutoff</i>.</li> <li>• Establecer límites máximos de flujo o iluminancia por área (incluyendo canopies).</li> <li>• Regular rótulos imponiendo CCT <math>\leq 3000</math> K, límites de intensidad y horarios de apagado definidos por el código.</li> <li>• Controlar deslumbramiento y luz intrusiva mediante parámetros cuantitativos.</li> <li>• Actualizar periódicamente el código mediante procesos de revisión pública.</li> </ul>                                                                                                            |
| <b>Nueva Zelanda</b>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Regular principalmente a nivel local mediante planes distritales (no existe norma nacional uniforme).</li> <li>• Exigir luminarias <i>full-cutoff</i> y establecer como objetivo ULOR cercano a 0% en zonas de observatorios.</li> <li>• Recomendar CCT <math>\leq 3000</math> K para reducir componente azul.</li> <li>• Solicitar SPD en evaluaciones ambientales cuando exista riesgo para fauna.</li> <li>• Implementar <i>curfews</i> y <i>dimming</i> en zonas protegidas según ordenanza local.</li> <li>• Definir niveles mínimos de iluminancia/luminancia conforme a estándares técnicos adoptados. Establecer zonificación diferenciada según sensibilidad territorial definida por cada consejo.</li> </ul>                                                                   |
| <b>Australia</b>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Controlar deslumbramiento y limitar <i>spill</i> mediante correcta orientación y óptica. No establecer universalmente ULOR = 0%, pero promover ULOR bajo.</li> <li>• Recomendar CCT <math>\leq 3000</math> K en guías técnicas y ambientales.</li> <li>• Restringir emisiones espectrales (<math>&lt; 500</math> nm) en zonas con fauna sensible y favorecer iluminación ámbar.</li> <li>• Implementar <i>dimming</i> programable y control horario en proyectos sensibles.</li> <li>• Aplicar estándares AS/NZS 1158 para definir iluminancia y luminancia por categoría (vehicular y peatonal).</li> <li>• Incorporar zonificación ambiental en planificación y evaluación de proyectos.</li> </ul>                                                                                     |

|                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Unión Europea<br/>(marco<br/>supranacional)</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proponer RULO = 0% en compras públicas sensibles mediante criterios GPP (no obligatorio para todos los Estados).</li> <li>• Recomendar CCT <math>\leq 3000</math> K en adquisiciones públicas para reducir fracción azul.</li> <li>• Aplicar norma EN 13201 para definir luminancia e iluminancia por categoría de vía.</li> <li>• Promover <i>dimming</i>, reloj astronómico y sistemas de telegestión.</li> <li>• Incorporar zonificación ambiental bajo el concepto de ALAN para proteger áreas oscuras.</li> </ul>                                                                                |
| <b>Chile</b>                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Establecer una norma nacional obligatoria (D.S. N.º 1/2022 MMA) aplicable en todo el territorio, con exigencias más estrictas en Áreas astronómicas.</li> <li>• Limitar la emisión de luz azul a <math>\leq 1\%</math> del espectro total en áreas de protección especial.</li> <li>• Identificar comunas sujetas a estándar estricto mediante Resolución Exenta N.º 455/2024.</li> <li>• Exigir cumplimiento inmediato para fuentes nuevas y establecer plazos para fuentes existentes.</li> <li>• Aplicar la norma a todos los tipos de alumbrado exterior definidos reglamentariamente.</li> </ul> |

## GLOSARIO DE SIGLAS EMPLEADAS

**ALAN** (*Artificial Light At Night*): luz artificial emitida durante la noche; concepto utilizado para analizar impactos ambientales, ecológicos y astronómicos de la iluminación nocturna.

**AS/NZS 1158**: norma técnica australiana y neozelandesa que establece requisitos de iluminancia y luminancia para iluminación vial (categorías vehicular y peatonal).

**cd/klm** (candela por kilolumen): unidad fotométrica utilizada para expresar intensidad luminosa normalizada por flujo luminoso total.

**cd/m<sup>2</sup>** (candela por metro cuadrado): unidad de luminancia que mide la cantidad de luz emitida o reflejada por una superficie.

**CCT** (*Correlated Color Temperature* o Temperatura de Color Correlacionada): parámetro expresado en Kelvin (K) que describe el color aparente de una fuente de luz y se utiliza como indicador indirecto del contenido de luz azul.

**CEN** (Comité Europeo de Normalización): organismo responsable del desarrollo de normas técnicas europeas (EN).

**CIE** (Commission Internationale de l'Éclairage o Comisión Internacional de Iluminación): organización internacional que desarrolla estándares y recomendaciones técnicas sobre iluminación y fotometría.

**EN 13201**: norma europea que establece requisitos de luminancia, iluminancia y uniformidad para iluminación vial según categorías de vía.

**FHS** (Flujo Hemisférico Superior): porción del flujo luminoso emitido hacia el hemisferio superior por una luminaria.

**GPP** (*Green Public Procurement* o Compra Pública Verde): criterios ambientales promovidos por la Unión Europea para orientar adquisiciones públicas sostenibles.

**IES** (*Illuminating Engineering Society*): entidad técnica estadounidense que desarrolla estándares fotométricos y guías de diseño de iluminación.

**LM-79**: norma técnica de la IES para ensayos fotométricos de luminarias LED.

**LM-80**: norma técnica de la IES para evaluación del mantenimiento del flujo luminoso en fuentes LED.

**Lux**: unidad de iluminancia que mide la cantidad de luz que incide sobre una superficie (lúmenes por metro cuadrado).

**RULO** (*Ratio of Upward Light Output*): proporción del flujo luminoso total emitido hacia el hemisferio superior; equivalente funcional a ULOR.

**SBP** (Sodio de Baja Presión o *Low Pressure Sodium* – LPS): tecnología de iluminación de descarga con espectro casi monocromático, utilizada en zonas astronómicas por su bajo impacto espectral.

**SPD** (*Spectral Power Distribution* o Distribución Espectral de Potencia): curva que representa la energía emitida por una fuente luminosa según longitud de onda.

**ULOR** (*Upward Light Output Ratio*): relación entre el flujo luminoso emitido hacia arriba por una luminaria y el flujo total emitido por ella.

**ULR** (*Upward Light Ratio*): relación entre el flujo luminoso emitido hacia el hemisferio superior y el flujo total instalado en un sistema de iluminación.

**UPR** (s): indicador relacionado con la proporción de flujo emitido hacia arriba, utilizado en contextos técnicos y de certificación.



## IV. Conclusión: buenas prácticas para la gestión de sitios astronómicos

La gestión de los sitios astronómicos en Chile constituye una tarea estratégica para el desarrollo de la investigación científica y para la protección de este patrimonio natural y tecnológico de relevancia mundial. En este contexto, el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación ejerce un rol rector en la definición y resguardo de las Áreas de Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica, ya que es el encargado de analizar y sistematizar los lineamientos técnicos que orientan la identificación, protección y gestión de los territorios donde se emplazan infraestructuras astronómicas.

El presente manual de buenas prácticas reúne y sistematiza criterios técnicos, conceptos operativos y orientaciones de gestión que permiten apoyar a las instituciones públicas, observatorios nacionales e internacionales y otros actores relevantes, en la adecuada administración de estos sitios estratégicos.

Un componente fundamental de estas buenas prácticas es la definición de los sitios astronómicos, entendidos como espacios territoriales donde se encuentran instaladas diferentes tecnologías e infraestructuras de observación astronómica y donde estas desarrollan sus operaciones científicas. Esta definición permite reconocer no solo la presencia física de telescopios o antenas, sino también el entorno territorial y ambiental necesario para su adecuado funcionamiento.

En este marco, las condiciones habilitantes de los sitios astronómicos se reconocen como el principal objeto de protección de las Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica. Las condiciones habilitantes para cada sitio astronómico son el conjunto de variables ambientales que, mantenidas dentro de ciertos límites, permiten que estos realicen observación astronómica con la finalidad de alcanzar, de manera eficiente y efectiva, los objetivos científicos que motivaron su instalación y operación.

En este sentido, el propósito central del presente manual es contribuir a la protección y aseguramiento del buen funcionamiento de los observatorios, describiendo y sistematizando las características atmosféricas, lumínicas y radioeléctricas –según la tecnología que corresponda– que hacen posible la observación astronómica en diferentes rangos del espectro electromagnético.

En consecuencia, el Ministerio de Ciencia considera que la gestión de los sitios requiere implementar prácticas sistemáticas de medición, monitoreo y evaluación de variables ambientales, varias de ellas asociadas a los distintos tipos de contaminación, tales como la contaminación lumínica, radioeléctrica o atmosférica, que puedan afectar la calidad de las observaciones.

Entre estas variables, el brillo natural del cielo constituye un indicador particularmente relevante. En función de las evidencias científicas disponibles y los insumos técnicos desarrollados para la gestión de sitios destinados a la observación astronómica, este parámetro permite evaluar el nivel de alteración del cielo nocturno respecto de sus condiciones naturales. Para la medición de esta variable se debe considerar la porción de la atmósfera utilizada en las observaciones, representada mediante el casquete esférico comprendido entre los  $30^\circ$  y  $90^\circ$  de elevación por sobre el horizonte, en todas las direcciones del acimut, espacio que corresponde al 50% de campo efectivo de observación astronómica.

A nivel mundial, existen pocos lugares que mantienen valores iguales o menores al 1% de contaminación lumínica por sobre los valores del brillo natural del cielo, estando esas condiciones excepcionales actualmente presentes en sitios astronómicos de Chile.

Por esta razón, la Comisión Asesora Ministerial 2025 señaló que cualquier proyecto o nueva actividad productiva que se instale dentro de las Áreas astronómicas (actualmente 29 comunas localizadas dentro de las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo), deberá demostrar que no generará una degradación significativa de las condiciones habilitantes de los sitios astronómicos.

En el caso de la astronomía óptica e infrarroja, esto implica modelar la propagación lumínica para cuantificar el impacto de la instalación en el brillo del cielo y asegurar que las contribuciones artificiales se mantengan por debajo de un 1% respecto del fondo natural a  $30^\circ$  de elevación sobre el horizonte, en la totalidad del perímetro y en cualquier otro punto de la semiesfera por sobre esa altura, medidos desde el sitio astronómico. La suma de todas las contribuciones de luminosidad artificial dentro del área astronómica no debiese superar un 2% del brillo natural respecto del fondo natural a  $30^\circ$  de elevación medidos desde el sitio astronómico.

A su vez, considerando los resultados de las investigaciones científicas sobre el aumento progresivo del grado de contaminación lumínica en torno a algunos observatorios ópticos, es deseable alcanzar a largo plazo una reducción progresiva de la luz artificial, para llegar a niveles de contaminación lumínica no superior al 1% del brillo natural del cielo a  $30^\circ$  de elevación sobre el horizonte, en la totalidad del perímetro y en cualquier otro punto de la semiesfera por sobre esa altura, medidos desde el sitio astronómico.

Como Ministerio de Ciencia estamos mandatados a velar por la protección y conservación del patrimonio científico nacional (Artículo 4, literal I), Ley 21.105) y esperamos que las orientaciones de este manual de buenas prácticas puedan contribuir a una gestión coordinada, informada por evidencias y orientada a asegurar que el país continúe ofreciendo condiciones excepcionales para la observación astronómica y el desarrollo de la ciencia de frontera de Chile y el mundo.

## Bibliografía

**Aubé, M.** (2015). Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1667), 20140117. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0117>

**Aubé, M. y Kocifaj, M.** (2012). Using two light-pollution models to investigate artificial sky radiances at Canary Islands observatories: Light-pollution models and artificial sky radiances. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 422(1), 819–830. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20664.x>

**Aubé, M. y Roby, J.** (2014). Sky brightness levels before and after the creation of the first International Dark Sky Reserve, Mont-Mégantic Observatory, Québec, Canada. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 139, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.01.021>

**Bará, S., Bao-Varela, C. y Falchi, F.** (2022). Light pollution and the concentration of anthropogenic photons in the terrestrial atmosphere. *Atmospheric Pollution Research*, 13(9), 101541. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101541>

**Bustos, R., Rubio, M., Otárola, A. y Nagar, N.** (2014). Parque Astronómico de Atacama: An Ideal Site for Millimeter, Submillimeter, and Mid-Infrared Astronomy. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/679330>

**Cinzano, P., Falchi, F. y Elvidge, C. D.** (2001). The first World Atlas of the artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 328(3), 689–707. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04882.x>

**Cinzano, P. y Falchi, F.** (2012). The propagation of light pollution in the atmosphere. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427(4), 3337–3357. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21884.x>

**Comisión Asesora Ministerial.** (2025). Propuesta de Actualización de las Áreas de Interés Científico para la Observación Astronómica. <https://minciencia.gob.cl/archivos/sharing/1765979333/4586/>

**Duriscoe, D. M., Luginbuhl, C. B. y Moore, C. A.** (2007). Measuring Night-Sky Brightness with a Wide-Field CCD Camera. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119(852), 192–213. <https://doi.org/10.1086/512069>

**Earth Science Data Systems, N.** (2024, 2 octubre). Visible Infrared Imaging Radiometer Suite | NASA Earthdata. [Instrument]. <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/viirs>

**Els, S. G., Travouillon, T., Schöck, M., Riddle, R., Skidmore, W., Seguel, J. y Walker, D.** (2009). Thirty Meter Telescope Site Testing VI: Turbulence Profiles. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121(879), 527–543. <https://doi.org/10.1086/599384>

**ESO.** (2025). Informe técnico sobre la propuesta de proyecto del INNA al SEIA. Resumen ejecutivo: <https://www.eso.org/public/archives/releases/pdf/eso2506b.pdf>

Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A. y Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6), e1600377. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>

Falchi, F., Ramos, F., Bará, S., Sanhueza, P., Jaque Arancibia, M., Damke, G. y Cinzano, P. (2023). Light pollution indicators for all the major astronomical observatories. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 519(1), 26–33. <https://academic.oup.com/mnras/article/519/1/26/6936422>

Garreaud, R. (2011). The Climate of northern Chile: Mean state, variability and trends. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica: Serie de Conferencias*. 41. 5–11. [https://www.astroscu.unam.mx/rmaa/RMxAC..41/PDF/RMxAC..41\\_rgarreaud.pdf](https://www.astroscu.unam.mx/rmaa/RMxAC..41/PDF/RMxAC..41_rgarreaud.pdf)

Green, R. F., Luginbuhl, C. B., Wainscoat, R. J. y Duriscoe, D. (2022). The growing threat of light pollution to ground-based observatories. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 30(1), 1. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00159-021-00138-3>

Hänel, A., Posch, T., Ribas, S. J., Aubé, M., Duriscoe, D., Jechow, A. y Kyba, C. C. M. (2018). Measuring night sky brightness: methods and challenges. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 205, 278–290. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.09.008>

International Astronomical Union (IAU). (2025). Recommendation on the protection of astronomical sites. <https://www.iau.org/IAU/iau/News/Ann2025/ann25010.aspx>

Jechow, A., Kolláth, Z., Ribas, S. J., Spoelstra, H., Hölker, F. y Kyba, C. C. M. (2017). Imaging and mapping the impact of clouds on skyglow with all-sky photometry. *Scientific Reports*, 7(1), 6741. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06998-z>

Kocifaj, M. (2007). Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources. *Applied Optics*, 46(15), 3013. <https://doi.org/10.1364/AO.46.003013>

Kocifaj, M. (2014). Night sky luminance under clear sky conditions: Theory vs. experiment. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 139, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.12.001>

Kocifaj, M. y Barentine, J. C. (2021). Air pollution mitigation can reduce the brightness of the night sky in and near cities. *Scientific Reports*, 11(1), 14622. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94241-1>

Kocifaj, M. y Solano Lamphar, H. A. (2014). Quantitative analysis of night skyglow amplification under cloudy conditions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 443(4), 3665–3674. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu1301>

Kremser, S., Thomason, L. W., Von Hobe, M., Hermann, M., Deshler, T., Timmreck, C., et al. (2016). Stratospheric aerosol—Observations, processes, and impact on climate. *Reviews of Geophysics*, 54(2), 278–335. <https://doi.org/10.1002/2015RG000511>

Malinina, E., Rozanov, A., Rozanov, V., Liebing, P., Bovensmann, H., y Burrows, J. P. (2018). Aerosol particle size distribution in the stratosphere retrieved from SCIAMACHY limb measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(4), 2085–2100. <https://doi.org/10.5194/amt-11-2085-2018>

Masciadri E., Lascaux F., Turchi A. y Fini L. (2017). Optical turbulence forecast: ready for an operational application, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 466, Issue 1, April 2017, Pages 520–539, <https://doi.org/10.1093/mnras/stw3111>

Miller Miller H. y Hanson Inc. (2018). Transit noise and vibration impact assessment manual (FTA Report No. 0123). Federal Transit Administration, U.S. Department of Transportation. [https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/docs/FTA\\_Noise\\_and\\_Vibration\\_Manual.pdf](https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/docs/FTA_Noise_and_Vibration_Manual.pdf)

Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. (2023). Decreto Supremo N°2: Declara áreas de valor científico y de investigación para la observación astronómica (Chile). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1193763>

Ministerio del Medio Ambiente. (2023). Decreto Supremo N°43: Establece norma de emisión para la regulación de la contaminación lumínica generada por alumbrados de exteriores (Chile). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1197027>

Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2006). Decreto Supremo 127. Aprueba Plan general de uso del espectro radioeléctrico. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=249068>

Murphy, D. M., Abou-Ghanem, M., Cziczko, D. J., Froyd, K. D., Jacquot, J., Lawler, M. J., Maloney, C., Plane, J. M. C., Ross, M. N., Schill, G. P., & Shen, X.. (2023). Metals from spacecraft reentry in stratospheric aerosol particles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(43), e2313374120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2313374120>

- Osborn J. y Sarazin M.** (2018). Atmospheric turbulence forecasting with a general circulation model for Cerro Paranal, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 480, Issue 1, October 2018, Pages 1278–1299, <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1898>
- Otárola, A., Travouillon, T., Schöck, M., Els, S., Riddle, R., Skidmore, W. y Querel, R.** (2010). Thirty Meter Telescope Site Testing X: Precipitable Water Vapor. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 122(890), 470–484. <https://doi.org/10.1086/651582>
- Patat, F.** (2003). UBVRI night sky brightness during sunspot maximum at ESO-Paranal. Astronomy & Astrophysics, 400, 1183–1198. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20030030>
- Porté-Agel, F., Bastankhah, M. y Shamsoddin, S.** (2020). Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review. Boundary-Layer Meteorology, 174, 1–59. <https://doi.org/10.1007/s10546-019-00473-0>
- Sánchez de Miguel, A., Kyba, C. C. M., Zamorano, J., Gallego, J. y Gaston, K. J.** (2020). The nature of the diffuse light near cities detected in nighttime satellite imagery. Scientific Reports, 10(1), 7829. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64673-2>
- Schöck, M., Els, S., Riddle, R., Skidmore, W., Travouillon, T., Blum, R., et al.** (2009). Thirty Meter Telescope Site Testing I: Overview. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 121(876), 384–395. <https://doi.org/10.1086/599287>
- Ścieżor, T. y Czaplicka, A.** (2020). The impact of atmospheric aerosol particles on the brightness of the night sky. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 254, 107168. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107168>
- Skidmore, W., Els, S., Travouillon, T., Riddle, R., Schöck, M., Bustos, E. y Walker, D.** (2009). Thirty Meter Telescope Site Testing V: Seeing and Isoplanatic Angle. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 121(884), 1151–1166. <https://doi.org/10.1086/644758>
- Sociedad Chilena de Astronomía.** (2024.). Censos de astrónomos en Chile. <https://sochias.cl/astronomia-en-chile/censos-de-astronomos/>
- Timmreck, C., Mann, G. W., Aquila, V., Hommel, R., Lee, L. A., Schmidt, A., et al.** (2018). The Interactive Stratospheric Aerosol Model Intercomparison Project (ISA-MIP): motivation and experimental design. Geoscientific Model Development, 11, 2581–2608. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2581-2018>
- Torres, R.** (2019). Zonas de interés científico para la minería. Asesoría Técnica Parlamentaria de la Biblioteca del Congreso de Chile. [https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27039/1/Zonas\\_de\\_Interes\\_Cientifico\\_para\\_la\\_Mineria.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27039/1/Zonas_de_Interes_Cientifico_para_la_Mineria.pdf)
- Voudouri, K. A., et al.** (2023). Investigating a Persistent Stratospheric Aerosol Layer Observed over Southern Europe during 2019. Remote Sensing, 15(22), 5394. <https://doi.org/10.3390/rs15225394>
- Walczak, K., Wisbrock, L., Tarr, C., Gyuk, G., Amezcua, J., Cheng, C., et al.** (2023). Quantifying nighttime light emission by land use from the stratosphere. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 310, 108739. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2023.108739>
- Wallace, J. M. y Hobbs, P. V.** (2006). Atmospheric Science: An Introductory Survey (2nd ed.). Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780127329512/atmospheric-science>
- Wallner, S. y Kocifaj, M.** (2023). Aerosol impact on light pollution in cities and their environment. Journal of Environmental Management, 335, 117534. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117534>
- Wesołowski, M.** (2023). The increase in the surface brightness of the night sky and its importance in visual astronomical observations. Scientific Reports, 13(1), 17091. [https://www.nature.com/articles/s41598-023-44423-w?utm\\_source=researchgate.net&utm\\_medium=article](https://www.nature.com/articles/s41598-023-44423-w?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article)





**MinCiencia**

A graphic consisting of three overlapping circles of varying shades of gray, positioned below the "MinCiencia" text.