

Propuesta de Actualización de las Áreas de Interés Científico para la Observación Astronómica

Comisión Asesora Ministerial sobre Áreas con Valor
Científico y de Investigación para la Observación
Astronómica.

28 de octubre de 2025

Resumen ejecutivo

Chile es reconocido internacionalmente por la calidad excepcional de sus cielos para la observación astronómica, los cuales constituyen un patrimonio científico de relevancia global. En virtud de este valor estratégico, el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación convocó a la Comisión Asesora Ministerial sobre Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica, creada mediante el Decreto Exento N°106 de 2025, con el objetivo de actualizar las Áreas de Interés Científico definidas por el Decreto Supremo N°2/2023. Esta actualización responde a los avances tecnológicos recientes, a la evolución de las amenazas a la calidad astronómica de los cielos, y al fortalecimiento del marco normativo de protección.

La propuesta se sustenta en un análisis que abarca:

1. Las condiciones naturales que hacen del norte de Chile un entorno óptimo para la astronomía, destacando la aridez, la estabilidad atmosférica, la altitud y el acceso privilegiado al cielo austral.
2. El desarrollo histórico y jurídico del país en materia astronómica, incluyendo los mecanismos de cooperación internacional y el régimen legal que otorga certeza y protección a la inversión científica.
3. Una comparación internacional que aporta referentes útiles para la gestión de la contaminación lumínica y radioeléctrica.
4. La identificación de fuentes de contaminación (lumínica, atmosférica, radioeléctrica y espacial) y las competencias institucionales para su regulación.

El documento propone criterios actualizados para la delimitación de áreas astronómicas, proponiendo la creación de zonas núcleo y anillos de protección con restricciones diferenciadas, considerando umbrales técnicos de contaminación y metodologías reproducibles basadas en datos empíricos. Además, establece rangos heurísticos de brillo del cielo y lineamientos para mantener o recuperar la calidad de los sitios astronómicos donde no existe información de sus condiciones habilitantes (resultantes del estudio de sitio que llevó a la selección del lugar), junto con un conjunto de recomendaciones que incluyen la elaboración de una norma secundaria de calidad de cielo nocturno para el Desierto de Atacama.

Finalmente, se presenta un nuevo Catastro Nacional de Sitios Astronómicos, que redefine las áreas protegidas y orienta la planificación territorial y ambiental en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo. Esta propuesta busca dar certezas, consolidando a Chile como referente mundial en la protección del cielo nocturno, reforzando su liderazgo científico y su compromiso con la preservación del patrimonio astronómico global.

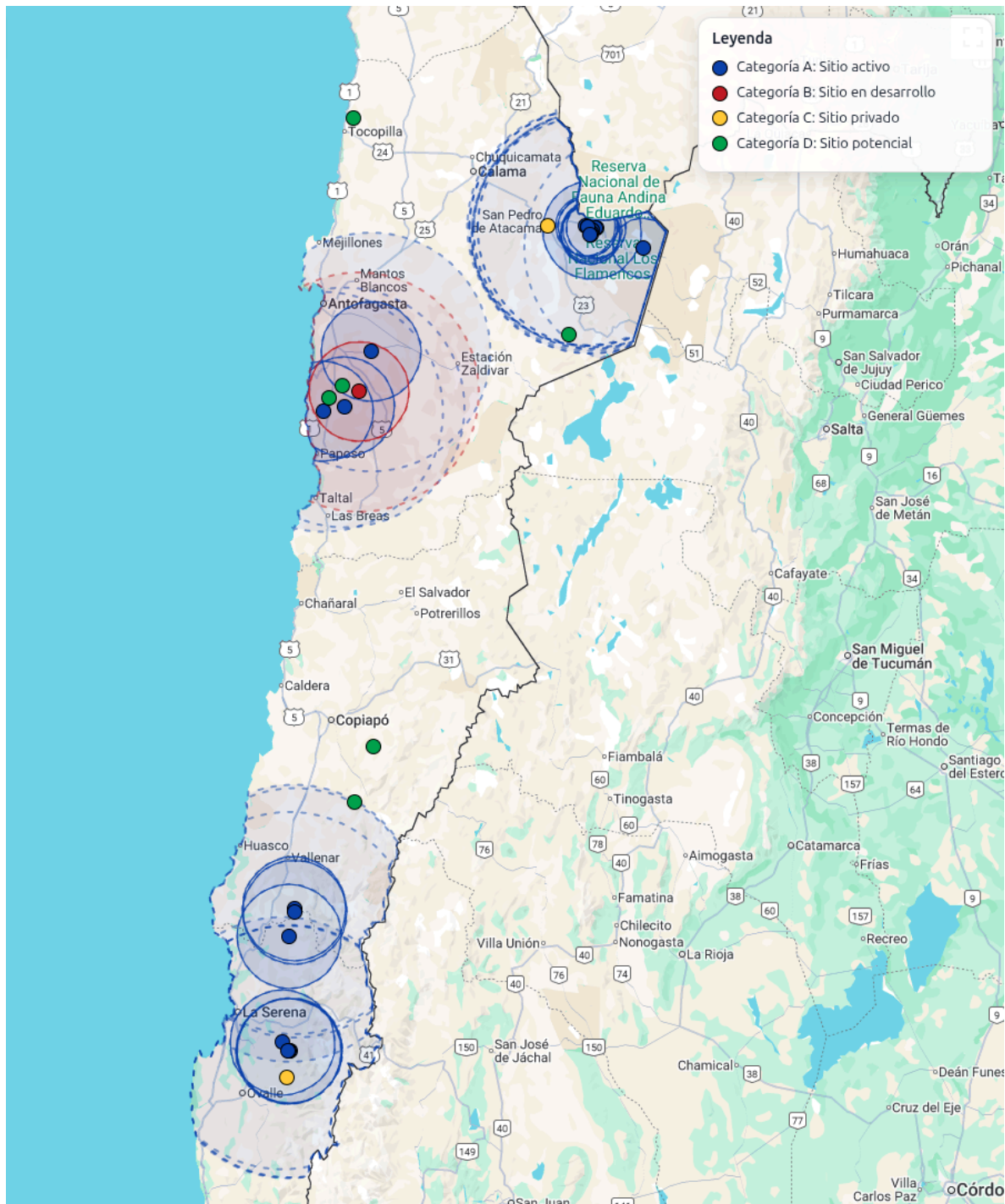


Figura resumen: “Actualización de las Áreas de Interés Científico para la Observación Astronómica”, propuestas por la Comisión Asesora Ministerial sobre Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica. Cada sitio de interés astronómico está señalado con un marcador sólido, de color diferente según su categoría. En el caso de cada sitio activo o en desarrollo, se propone crear una zona núcleo, delimitada por un perímetro sólido, en la cual restringir las actividades que pudiesen afectar las condiciones habilitantes del sitio astronómico establecidas en su estudio de sitio. A la vez, se propone crear un anillo de protección, de perímetro segmentado, en el cual aplicar restricciones estrictas.

Tabla de contenidos

1. Introducción	7
1.1. Estructura del documento	8
2. La nueva Comisión Asesora	10
2.1. Proceso de selección de integrantes de la Comisión 2025	11
2.2. Gobernanza y metodología de trabajo	11
3. Condiciones de Chile para la observación astronómica	14
3.1. ¿Qué es la observación astronómica?	14
3.1.1. Observación óptica	14
3.1.2. Observación infrarroja	15
3.1.3. Observación de radio frecuencias	15
3.2. Condiciones geográficas para la “observación astronómica” en Chile	17
3.2.1. Altitud extrema y estabilidad geológica	17
3.2.2. Aridez y transparencia atmosférica	17
3.2.3. Cielos despejados y baja turbulencia	17
3.2.4. Inversión térmica y efecto de la Corriente de Humboldt	18
3.2.5. Acceso al cielo del Hemisferio Austral	18
4. Historia de la astronomía y acuerdos internacionales	19
4.1. Hitos relevantes del siglo XIX	19
4.2. Siglo XX: época de institucionalización y crecimiento de la comunidad científica nacional	19
5. Marco legislativo para la protección de las áreas de valor astronómico con fines de investigación científica	22
5.1. Certezas jurídicas de Chile para la inversión en observatorios astronómicos	22
5.2. Naturaleza jurídica de los acuerdos con organismos internacionales	22
5.3. ¿Cómo se administra el marco jurídico para la construcción y operación de la infraestructura astronómica?	24
5.4. Acreditación ante Cancillería: personalidad, privilegios e inmunidades	24
5.5. Concesión de terrenos y facilidades para la operación	25
5.6. Régimen tributario, aduanero y laboral para personal científico	26
5.7. Mecanismos de protección	26
5.7.1. Mecanismo de protección radioeléctrica para el Observatorio ALMA	26
5.7.2. Áreas de valor científico y de investigación para la observación astronómica	28
6. Legislación internacional comparada	30
6.1. España	31

6.1.1. Normas generales	31
6.1.2. Islas Canarias	32
6.1.2.1. Tipos de Contaminación que Afectan la Calidad Astronómica:	33
6.1.2.2. Criterios Generales para Reducir la Contaminación Lumínica (CL):	33
6.1.2.3. Ejemplos de Aplicación:	34
6.2. Italia	35
6.2.1. Parámetros técnicos a verificar siguiendo las restricciones al alumbrado que se aplican en diversas provincias de Italia	37
6.3. Estados Unidos	38
6.3.1. Conceptos y medidas frecuentes	38
6.3.2. Estados Unidos (federal) — situación general	39
6.3.3. Hawái — reglas estatales relevantes (ejemplo técnico concreto)	39
6.3.4. Tucson (ciudad) y Pima County — características técnicas y exigencias concretas	39
6.3.5. Ejemplos destacados y otras jurisdicciones	40
6.4. Nueva Zelanda	41
6.5. Australia	42
6.6. Unión Europea (nivel EU / nacionales)	43
6.7. Conclusiones Generales	44
7. Marco conceptual	45
7.1. El concepto de condiciones habilitantes	45
7.1.1. Condiciones en la superficie terrestre	47
7.1.2. Condiciones en la atmósfera	47
7.1.3. Preservación de las condiciones habilitantes	48
7.2. El concepto de adecuado funcionamiento de un observatorio astronómico	50
7.3. El concepto de avances tecnológicos de última generación	50
8. Tipos de contaminación y organismo público competente	52
8.1. Contaminación Lumínica y calidad del cielo: MMA /División Calidad del Aire (DRLO)	52
8.2. Material particulado y gases: MMA / División Calidad del Aire	53
8.3. Turbulencia atmosférica	53
8.4. Vibraciones y sismicidad: MMA	54
8.5. Electromagnética: MMA	55
9. Actualización de áreas astronómicas	58
9.1. Cálculo de las áreas astronómicas	59
9.1.1. Áreas astronómicas para radioastronomía	60
9.1.2. Áreas astronómicas para tecnologías ópticas e infrarrojas	60

9.1.3. Otros factores a considerar en la definición de las áreas astronómicas	65
9.2. Preservación de condiciones habilitantes en las áreas astronómicas	66
10. Conceptos, propuestas y recomendaciones	69
10.1. Conceptos y propuestas	69
10.2. Recomendaciones presentadas a lo largo del documento	72
10.3. Recomendaciones adicionales	73
11. Créditos y agradecimientos	75
12. Referencias	76
12.1. Capítulo 3	76
12.2. Capítulo 4	76
12.3. Capítulo 7	76
12.4. Capítulo 8	76
12.5. Capítulo 9	77
13. Anexos	79
Anexo 1: Catálogo Nacional de Sitios Astronómicos	79
Referencias que sustentan la inclusión de los sitios de Categoría D	83
Anexo 2: Brillo del cielo aumentado por sobre su nivel natural	84

1. Introducción

La primera Comisión Asesora Ministerial de Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica fue creada en 2020 mediante el Decreto Supremo N°16 del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (de aquí en adelante llamado “Ministerio CTCI”). Esta comisión, de aquí en adelante llamada “Comisión 2020”, dio cumplimiento a la Ley 21.162, promulgada por el Ministerio de Medio Ambiente en 2019 para modificar la Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, mediante la incorporación de la luminosidad artificial como fuente de contaminación ambiental. El mandato de la Comisión 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. Con estos antecedentes, la Comisión 2020 levantó un Catastro Nacional de Sitios Astronómicos, compuesto por sitios de cuatro posibles categorías de interés. El análisis 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, como Paranal, Armazones, Chajnantor, Tololo, Pachón, Las Campanas y La Silla. A partir de estas zonas, se aplicaron criterios técnicos específicos que consideraron siete dimensiones: infraestructura existente o potencial, condiciones geográficas y atmosféricas, productividad científica, impacto en la comunidad nacional, potencial futuro, sinergias regionales y articulación con iniciativas internacionales.

Para definir la extensión espacial de las áreas, la Comisión 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 observatorio profesional, equivalente a la distancia mínima necesaria para mantener un cielo oscuro sin interferencia de fuentes urbanas o industriales. No obstante, 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 sería considerada íntegramente parte del área protegida.

El resultado de este trabajo fue la definición de 29 comunas distribuidas en tres regiones, Antofagasta, Atacama y Coquimbo, que conforman el primer Catálogo Nacional de Áreas Astronómicas protegidas. 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.

Junto con ello, las cuatro principales recomendaciones de la Comisión fueron las siguientes:

1. *Que la revisión de las zonas que integran el catálogo de Áreas Astronómicas sea un ejercicio periódico solicitado por el Ministerio CTCL, siguiendo un método similar al usado para definir las que integran la [primera] versión del catálogo, y que se realice en concurrencia con la periódica revisión de la norma de contaminación lumínica en Chile (i.e. aproximadamente cada 4 años).*
2. *Que la pre-Área Astronómica “Atacama Interior”, que agregaría al [primer] catálogo de Áreas Astronómicas a las comunas Chañaral y Diego de Almagro, se mantenga en observación, y que todo esfuerzo posible sea hecho por las autoridades de gobierno, en el marco de sus atribuciones, para preservar las condiciones naturales de la zona, a pesar de no hallarse ésta recomendada para inclusión en la [primera] versión del catálogo de Áreas Astronómicas.*
3. *Que el Gobierno de Chile copatroce la presentación del CRP [Conference Room Paper que se hallaba en discusión a inicios de 2021] ante COPUOS y que promueva la adopción de sus recomendaciones por parte de otros Estados Miembros de ONU. No obstante, sugiere que los representantes diplomáticos de Chile presten atención a la elegibilidad que los grupos de investigación chilenos tengan para recibir financiamiento, en caso de generarse un fondo en virtud de la recomendación 30 del documento.*
4. *Que la contaminación lumínica considere junto a la óptica e infrarroja también a las radiofrecuencias y que sea incorporada permanentemente dentro de las políticas públicas de protección y control de la contaminación en áreas alrededor de los observatorios, considerando a instituciones como la Subsecretaría de Telecomunicaciones del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.*

La recomendación 3, que nació de la preocupación por la emergente contaminación que resulta de la actividad espacial de las constelaciones de satélites, fue acogida y dio lugar a un trabajo en la Organización de Naciones Unidas cuya culminación se espera en 2026¹.

La recomendación 1, en tanto, fundamenta la elaboración del presente documento, cuatro años después de completado el trabajo de la Comisión 2020, el cual se ha confeccionado tomando en cuenta también las recomendaciones 2 y 4.

1.1. Estructura del documento

Al presente capítulo introductorio le sigue un capítulo en que se explica el proceso de conformación de la nueva comisión a cuyo cargo quedó la confección del presente documento.

Los capítulos 3, 4, y 5, abordan las condiciones naturales que Chile ofrece para la observación astronómica, una síntesis del desarrollo histórico de la astronomía en Chile, y el marco legislativo que regula el desarrollo de observatorios en Chile y la protección de los lugares donde se emplazan.

¹ Consultar en la Organización de Naciones Unidas los siguientes Conference Room Papers: A/AC.105/C.1/2021/CRP.17, A/AC.105/C.1/2025/CRP.14/Rev.1

El capítulo 6 hace una revisión de las protecciones de cielo oscuro aplicadas por otros países.

El capítulo 7 desarrolla la manera en que se aplican en este documento una serie de conceptos que definen, según su decreto de creación, el trabajo de la nueva comisión.

El capítulo 8 describe los tipos de contaminantes que pueden afectar a la calidad de un sitio astronómico, y el organismo que en Chile tiene competencias en relación a tales contaminantes.

El capítulo 9 describe el método con el cual la nueva comisión calcula las características actualizadas de las áreas astronómicas.

El capítulo 10 presenta las principales recomendaciones formuladas por la nueva comisión; el capítulo 11 reconoce las contribuciones específicas realizadas para este trabajo, y el capítulo 12 reúne las referencias utilizadas que no fueron citadas directamente en los capítulos anteriores.

El anexo contiene el nuevo Catastro Nacional de Sitios Astronómicos, en base al cual se deben construir las Áreas Astronómicas, y un detalle del cálculo de aumento de brillo del cielo por sobre su nivel natural, que fundamenta los valores usados para referirse a esta cantidad.

2. La nueva Comisión Asesora

La Comisión Asesora Ministerial sobre Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica, de aquí en adelante llamada “Comisión 2025”, fue creada mediante el Decreto Exento N°106, del 26 de marzo de 2025, por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. Su misión es prestar 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.

La Comisión 2025 tiene carácter temporal y su trabajo está orientado a fortalecer la base técnica, científica y normativa que sustenta la protección de los cielos chilenos, en cumplimiento de la función asignada al Ministerio por la Ley N°21.105, que lo faculta para proponer al Presidente de la República dichas áreas de valor científico.

El decreto que crea la Comisión 2025 establece en su artículo 2 los siguientes objetivos específicos:

- a. Desarrollar un informe técnico con la descripción de las condiciones habilitantes necesarias para el adecuado funcionamiento de los observatorios astronómicos en Chile, considerando los avances tecnológicos de última generación.*
- b. Realizar una revisión exhaustiva de la evidencia científica internacional que permita la construcción de criterios y umbrales técnicos para el adecuado funcionamiento de los observatorios astronómicos en Chile.*
- c. Realizar análisis comparado internacional sobre la normativa, legislación y políticas públicas para el adecuado funcionamiento de los observatorios astronómicos, considerando los avances tecnológicos de última generación.*
- d. Consultar a los organismos públicos competentes para complementar los contenidos elaborados para el informe técnico.*

El Decreto N°106 fijó un plazo inicial de cuatro meses contados desde la primera sesión, realizada el 4 de abril de 2025, lo que establecía como fecha de término el 4 de agosto de 2025. Sin embargo, mediante el Decreto Exento N°132 del 1 de agosto de 2025, el Ministerio extendió el plazo de funcionamiento hasta el 31 de octubre de 2025, atendiendo a la solicitud formal de la Comisión 2025 y al informe favorable de su Secretaría Técnica.

La Comisión 2025 estuvo compuesta por siete expertos nacionales con destacada trayectoria en astronomía, gestión de observatorios y protección de cielos, los doctores y profesionales:

- Rodrigo Andrés Reeves Díaz
- Elise Marie Germaine Servajean Bergoeing
- Manuela Zoccali

- Marcos Andrés Díaz Quezada
- Omar Enrique Cuevas Ahumada
- Pedro Andrés Sanhueza Pérez
- Eduardo Alejandro Unda Sanzana

2.1. Proceso de selección de integrantes de la Comisión 2025

Para seleccionar estos profesionales, el Gabinete de Subsecretaría empleó la Metodología de Consulta a Expertos, que permitió levantar perfiles profesionales a partir de las recomendaciones de las siguientes instituciones:

- Comisión Asesora Ministerial en materias astronómicas del Ministerio CTCI
- Sociedad Chilena de Astronomía (SOCHIAS)
- European Southern Observatory (ESO)
- Centro de Excelencia en Astrofísica y Tecnologías Afines (CATA)
- Instituto Milenio de Astronomía (MAS)

La selección y revisión exhaustiva de los profesionales sugeridos se realizó mediante los siguientes criterios técnicos y disciplinares, adecuados al objeto de la Comisión:

- Perfiles científicos en materia de ingenierías de observación, ingeniería climática, experiencia previa en política científica y/o medioambiental, experiencia en trabajo colaborativo e interdisciplinar en contextos de comisiones asesoras.
- Paridad de género de los integrantes.
- Presencia regional de las macrozonas norte, macrozona centro, macrozona centro-sur.
- Representatividad institucional de los integrantes.

2.2. Gobernanza y metodología de trabajo

El Subsecretario de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, Sr. Cristian Cuevas Vega, ejerció la presidencia de la Comisión 2025, actuando como su representante oficial y vocero. A su vez, la Secretaría Técnica fue designada por la Subsecretaría y fue integrada por la Dra. Mariela Núñez Ávila, jefa de asesores del gabinete de la subsecretaría y el Dr. Nicolás Trujillo Osorio, asesor en materias astronómicas del gabinete de Subsecretaría del Ministerio de Ciencias, quienes cumplieron las funciones de gestión y coordinación administrativa, levantamiento de actas, generación y sistematización de insumos técnicos y seguimiento de acuerdos.

La Comisión 2025 adoptó una metodología participativa e informada por evidencias, estructurada sobre los siguientes principios:

- Periodicidad y coordinación: realización de 1 sesión semanal de trabajo durante 30 semanas, incluyendo una sesión presencial en la región de Antofagasta.

- Sistematización técnica: creación de un repositorio digital con documentos, estudios científicos y técnicos, antecedentes legislativos relevantes, organizados por institución y tipo de fuente.
- Registro transparente: levantamiento de actas en cada sesión, con aprobación por parte de los miembros en la siguiente reunión formal. Se realizaron periódicamente presentaciones con la síntesis de los avances y los acuerdos alcanzados.
- Generación de insumos técnicos: la Secretaría técnica generó insumos técnicos, tanto metodológicos como de contenido, que fueron presentados en las sesiones para ser considerados por los comisionados.
- Presentaciones y reuniones con instituciones invitadas por los comisionados: durante los meses de trabajo, se escucharon las presentaciones técnicas de los representantes de las siguientes instituciones:
 - ESO, representada por el Dr. Ángel Otarola y el Dr. Andreas Kaufer.
 - NOIRLab, representado por el Dr. Guillermo Damke.
 - Las Campanas Observatory, representado por su Director, Dr. Leopoldo Infante.
 - ALMA, representada por el Líder Técnico de Receptores, Dr. Giorgio Siringo.
 - AURA, representada por su Director Científico, Dr. Stuartt Corder.

En una sesión se recibió a las siguientes instituciones y sus representantes:

- Dra. Itziar de Gregorio, Representante de ESO en Chile.
- Dr. Andreas Kaufer, Profesional de ESO Chile.
- Sra. Daniela González, Directora ejecutiva Fundación Cielos de Chile
- Sra. Gabriela López, Directora de la Oficina de Protección de la Calidad del Cielo.
- Dr. Guillermo Blanc, profesional de Carnegie y Jefe de Desarrollo Científico-Técnico en el Observatorio Las Campanas.
- Dr. Leopoldo Infante, Director del Observatorio Las Campanas (LCO).
- Sr. Oscar Contreras, Vicepresidente de Giant Magellan Telescope (GMT)
- Dr. Stuartt Corder, Director Científico de AURA y Subdirector de NOIRLab.

En cuanto a los organismos públicos, que da cuenta del requerimiento del artículo 2, letra d, del decreto de creación de la Comisión 2025, se realizó:

- Una sesión de la Comisión 2025 en Antofagasta con la presencia del Gobierno Regional de Antofagasta, representado por el Gobernador Ricardo Díaz y el Jefe de la División de Planificación y Desarrollo Regional, Sr. Pablo Rojas.
- Una sesión en que se recibió a Igor Valdebenito, Jefe Departamento Ruido, Lumínica y Olores de la División de Calidad del Aire del Ministerio de Medio Ambiente y Camilo Padilla, profesional de la Oficina de Evaluación Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente.

Además, como parte del programa de la sesión en Antofagasta, la Comisión 2025 realizó una visita técnica a cerro Paranal y cerro Armazones, en la comuna de Taltal, para conocer las instalaciones del Very Large Telescope y el Extremely Large Telescope.

El desarrollo conceptual de los requerimientos del artículo 2, letras a, b, y c, del decreto de creación de la Comisión 2025, es realizado en el Capítulo 7 del presente documento. El requerimiento de la letra a se aborda en los Capítulos 7 y 9; el requerimiento de la letra b se aborda en los Capítulos 7 y 8; el requerimiento de la letra c se aborda en el Capítulo 6.

Cabe notar que, como un esfuerzo adicional, que ha parecido pertinente a la Comisión 2025, se presenta en el Anexo 1 una actualización del Catastro Nacional de Sitios Astronómicos.

Los insumos desarrollados por la comisión referentes a las nuevas tecnologías y los avances en el conocimiento científico revisado durante las sesiones, y que se presentan en el siguiente informe, constituyen una propuesta técnica a ser considerada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e innovación para la actualización de las Áreas de Valor Científico para la Observación Astronómica.

3. Condiciones de Chile para la observación astronómica

Chile se ha posicionado como un polo mundial para la observación astronómica, albergando las infraestructuras astronómicas más avanzadas a nivel global, que se proyecta 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 de Chile en materia astronómica es el resultado de la cooperación internacional, las políticas de Estado en medio ambiente, en ciencia y las condiciones geográficas y atmosféricas excepcionales que ofrecen los cielos del norte de Chile. A continuación, se abordan estos aspectos, desde la definición de “observación astronómica” hasta los factores únicos que hacen del norte de Chile un lugar privilegiado para el estudio del universo.

3.1. ¿Qué es la observación astronómica?

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. La observación astronómica permite recopilar 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. 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 de Chile y, particularmente, del Desierto de Atacama y la Cordillera de los Andes.

3.1.1. Observación 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. 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, se utilizan telescopios equipados con espejos o lentes que concentran la luz en el rango de 320 a 900 nanómetros aproximadamente, empleando juegos de filtros fotométricos estándar (U, B, V, R, I).

Los sistemas ópticos pueden ser *pasivos*, cuando el instrumento no corrige las distorsiones atmosféricas; *activos*, cuando ajustan continuamente la forma del espejo principal para compensar deformaciones térmicas o gravitacionales; o *adaptativos*, cuando incorporan sensores y espejos deformables que corrigen en tiempo real los efectos de la turbulencia del aire.

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.

3.1.2. Observación 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. 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. Este tipo de observación trabaja en longitudes de onda comprendidas entre 780 nanómetros y 1 milímetro aproximadamente, subdivididas en *infrarrojo cercano*, *medio* y *lejano*.

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 de 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.

3.1.3. Observación de radio frecuencias

La observación de radio corresponde al estudio de la radiación electromagnética de longitud de onda entre 0.3 milímetros 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 correladores 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.

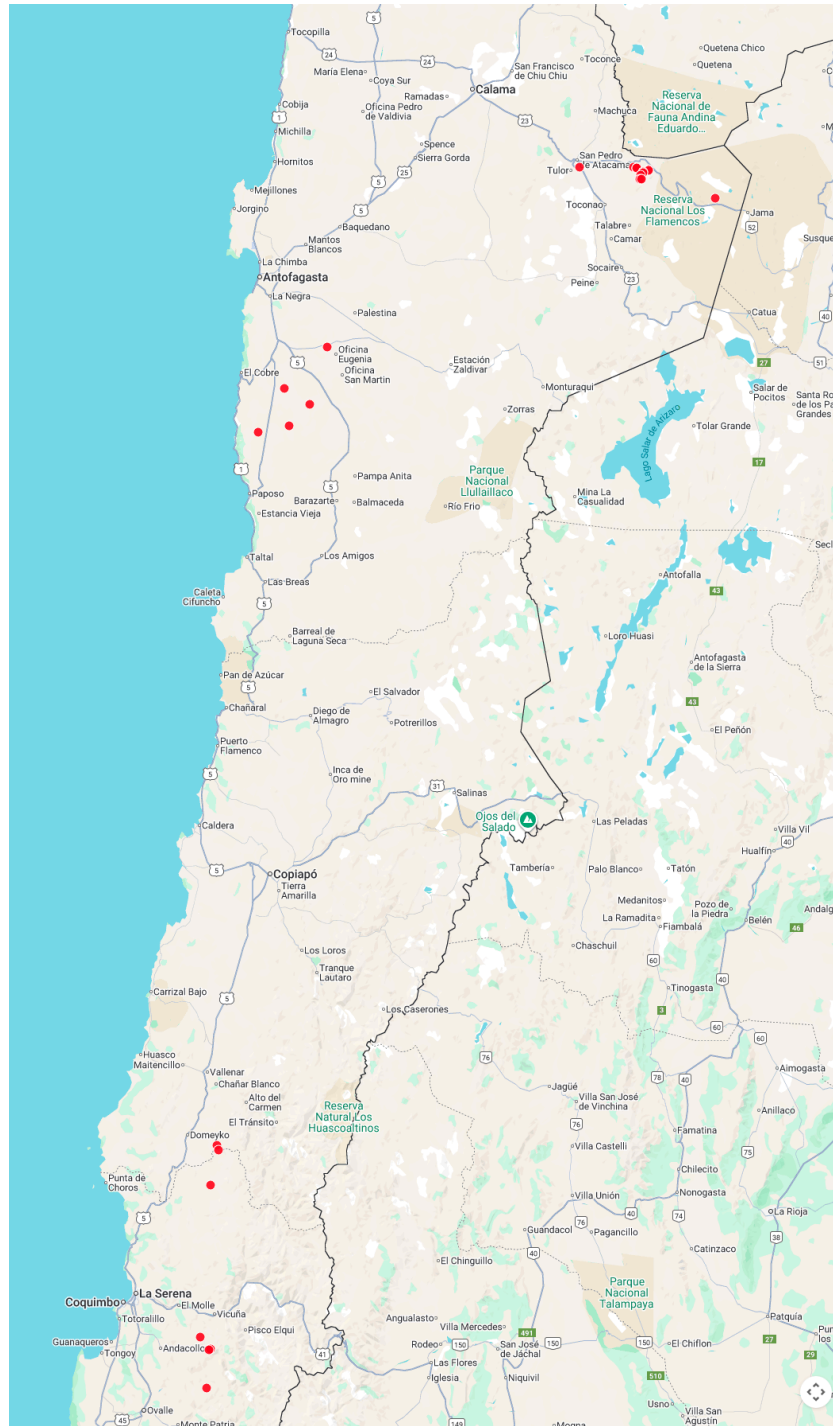


Figura 1: Distribución de los principales observatorios astronómicos en el Desierto de Atacama, en base al reporte de la Comisión 2020. Los puntos de color rojo marcan la posición de cada observatorio.

3.2. Condiciones geográficas para la “observación astronómica” en Chile

Chile 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 del país sean comparables solo con los de Hawái o las Islas Canarias. 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.

3.2.1. 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 (ver Figura 1) se encuentran entre los sitios más altos y estables 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 variaciones mínimas pueden afectar la precisión de las mediciones.

3.2.2. 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 imposibles en la mayor parte del planeta (Bustos et al. 2014).

3.2.3. Cielos despejados y baja turbulencia

Las zonas de observación astronómica de Chile disfrutan, en sitios como Paranal o Armazones, en torno a 90% de noches útiles para la investigación astronómica², lo que representa una eficiencia operativa excepcional para telescopios de gran envergadura. Esta característica se combina con una turbulencia atmosférica mínima, traducida en “seeing” (calidad óptica del cielo) de alta estabilidad. La interacción entre masas de aire frío del

² <https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/astroclimate/Obsconditions.html> "The long-term (2014-2024) of the Photometric + Clear fraction at the Paranal Observatory is 77%. And the usable time fraction is 90%."

Pacífico y masas de aire cálido del continente genera capas atmosféricas de flujo laminar, reduciendo distorsión en las imágenes y permitiendo observaciones de alta resolución.

3.2.4. Inversión térmica y efecto de la Corriente 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.

3.2.5. 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 (Figura 2). 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 de Chile, 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.

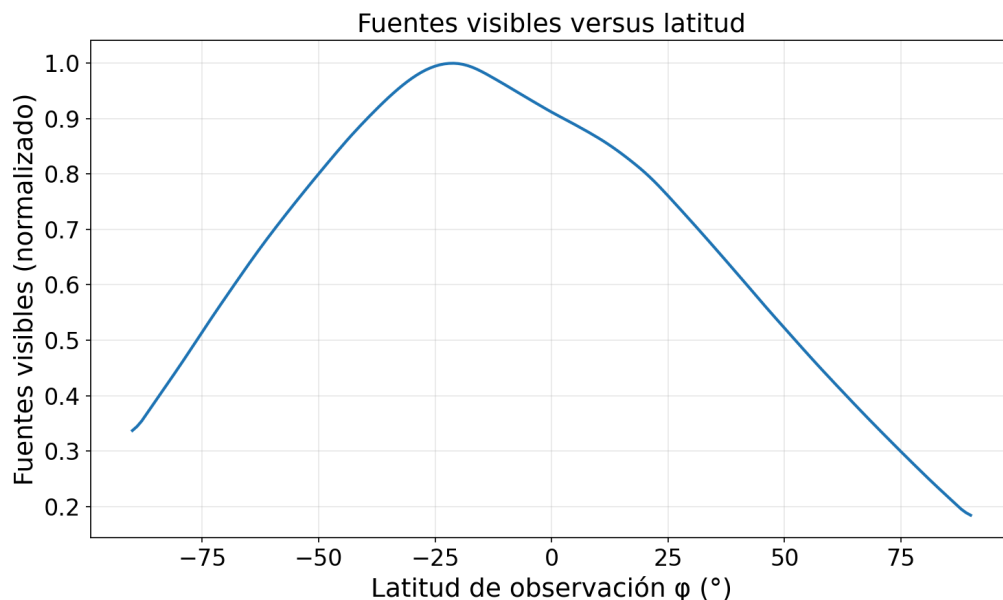


Figura 2: Normalización de la cantidad de objetos visibles desde cada latitud terrestre, al considerar el cielo por sobre 45° de altura. Si bien las fuentes extragalácticas están distribuidas isotrópicamente, la presencia a gran altura del centro de la Vía Láctea favorece las latitudes del Desierto de Atacama para tener acceso a la mayor cantidad posible de fuentes observables.

4. Historia de la astronomía y acuerdos internacionales

4.1. 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 en Valparaíso desde 1843, iniciativa de Juan Mouat, entre 1849 y 1852, la expedición astronómica estadounidense dirigida por James Melville Gilliss instaló en lo que es hoy el Cerro Santa Lucía de la comuna de Santiago, un observatorio científico en que el Estado de Chile tomó un interés directo. Su propósito principal era 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.

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, y actualmente ubicado en el Cerro Calán, en la Comuna de Las Condes. Durante las décadas siguientes, el observatorio participó en observaciones que permitieron, hacia fines del s. XIX, que Chile fuera considerado un sitio relevante para la observación del cielo austral, en una época en que la astronomía aún era un campo incipiente en la región latinoamericana.

4.2. 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: por un lado, la instalación de observatorios de clase mundial en su territorio y, por el otro, el desarrollo de un marco legislativo sólido, bien estructurado y en 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, 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 pues poco más tarde se alcanzan dos hitos relevantes para el desarrollo científico nacional.

Primero, 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. Esta legislación estableció el marco jurídico que permitió atraer inversión científica internacional y consolidar a Chile como un polo estratégico de observación astronómica en el hemisferio sur.

El primer resultado directo de esta norma fue la creación del Observatorio Interamericano de 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.

Segundo, y también 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 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, y posteriormente expandió su presencia con la construcción del Very Large Telescope (VLT) en el Cerro Paranal, de la comuna de Taltal, en la Región de Antofagasta, 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, 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, tales como 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), que 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. 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. 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 Biobío³.

La creciente comunidad científica nacional también ha sido un factor clave para cultivar en Chile las principales líneas de investigación de la astronomía. En términos generales, la astronomía contemporánea no sólo 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 pensamiento crítico y otras habilidades que son necesarias para cultivar conocimientos de frontera, despertando así vocaciones tempranas en ciencias, conocimientos, tecnología e innovación. Todo esto ha sido posible gracias al cultivo de diversas líneas de investigación en la comunidad científica nacional.

³ <https://sochias.cl/astronomia-en-chile/censos-de-astronomos/>

5. Marco legislativo para la protección de las áreas de valor astronómico con fines de investigación científica

5.1. 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 Chile 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:

1. La existencia de acuerdos internacionales y normas habilitantes para la cooperación científica;
2. La acreditación formal de organismos internacionales ante el Estado chileno, que garantiza su operatividad y los regímenes de privilegios e inmunidades;
3. 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;
4. 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.

5.2. Naturaleza jurídica de los acuerdos con organismos internacionales

El marco legal que permite la instalación de observatorios internacionales en Chile se articula mediante dos mecanismos jurídicos principales, que habilitan y regulan la cooperación científica internacional:

Por un lado, la Ley N° 15.172, promulgada en 1963, 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.

Gracias a esta ley se concretaron las primeras alianzas científicas internacionales, que dieron origen al Observatorio Interamericano de 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.

Por otro lado, el segundo mecanismo se 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 CEPAL.

El ejemplo más emblemático es el Acuerdo entre el Gobierno de Chile y el Observatorio Europeo Austral (ESO), suscrito en 1963 y 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 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; y
- 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.

5.3. ¿Cómo se administra el marco jurídico para la construcción y operación de la infraestructura astronómica?

El marco jurídico de Chile para 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 SEA, que garantizan la sustentabilidad ambiental;
- Ministerio de Hacienda, que administra las franquicias tributarias y aduaneras;
- SUBTEL, MOP y Gobiernos regionales, que son 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, que está 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.

5.4. 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.

La 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; y

- la coordinación interministerial con Hacienda, Ciencia, Bienes Nacionales y otros servicios competentes.

5.5. 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. 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 y, cuando procede, con Gobiernos regionales y Municipios.

5.6. 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; y
- 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 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.

5.7. Mecanismos de protección

Existen dos instrumentos para resguardar el adecuado funcionamiento de las tecnologías usadas en la astronomía con fines de investigación científica.

5.7.1. Mecanismo de protección radioeléctrica para el Observatorio ALMA

El mecanismo de protección radioeléctrica es una medida de gestión del espectro radioeléctrico establecida por la Subsecretaría de Telecomunicaciones, 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 en la Región de Antofagasta. 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.

La protección se formalizó mediante la Resolución Exenta N°1715, de 1 de agosto de 2023, que otorgó a la European Southern Observatory (ESO) un permiso de servicio limitado de radiocomunicaciones, 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): Es un 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 2×10^{-6} W/m² 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 autorizados, puede notificar a SUBTEL, que evaluará las medidas administrativas o técnicas correspondientes.

El sistema de protección radioeléctrica protege tres dimensiones críticas. Primero, 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. Segundo, 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. Tercero, la calidad de los datos científicos y la inversión internacional asociada al proyecto ALMA, garantizando que las observaciones mantengan los estándares de precisión exigidos por la comunidad radioastronómica mundial. De esta manera, el Llano de Chajnantor es un entorno protegido en el dominio radioeléctrico.

5.7.2. 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 introduce tres cambios estructurales en la legislación ambiental y científico-tecnológica. Primero, esta ley incorpora la “luminosidad artificial” como contaminante en la Ley N° 19.300 (art. 2 letra d). Segundo, esta ley incorpora la exigencia de Estudio de Impacto Ambiental (EIA) a proyectos localizados en o próximos a áreas con valor para la observación astronómica, y que sean susceptibles de ser afectadas (modificación al art. 11 letra d)). Tercero, esta ley incorpora una nueva función para el Ministerio CTCI (art. 4, letra r), de la Ley N° 21.105), otorgándole el mandato de proponer las áreas con valor científico y de investigación para la observación astronómica, a ser declaradas por decreto conjunto con Medio Ambiente.

El Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación 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. Se definió la presencia y características de los observatorios nacionales e internacionales y de los estudios técnicos que identificaron los territorios con condiciones óptimas para la observación astronómica profesional. Se consideraron la sumatoria de zonas circulares de 150 kilómetros de radio alrededor de cada sitio astronómico descrito previamente, que posteriormente se tradujeron a los límites comunales, considerando facilitar administrativamente la aplicación de la norma.

El Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) publicó en mayo de 2024 la Guía de **Criterios de evaluación en el 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 Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) pueden ser susceptibles de afectar áreas con valor científico y de investigación para la observación astronómica (indicadas en el Decreto Supremo N°2 de 2023 del Ministerio, Tecnología, Conocimiento e Innovación), debiendo presentar el proyecto SEIA como un Estudio de Impacto Ambiental. Además, incluye criterios para definir el área de influencia de las emisiones de luminosidad artificial, define el objeto de protección de las áreas astronómicas 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. No obstante, un análisis de la guía, durante su período de aplicación ha permitido detectar importantes oportunidades de mejora, a fin de reducir las incertezas que el documento puede generar.

Por otra 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, a su vez aprovecha la existencia de las áreas de valor científico y de investigación para la observación astronómica, decretadas por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación elaboró a través del Decreto Supremo N° 2/2023, para presentar disposiciones más estrictas sobre las emisiones en tales áreas.

6. Legislación internacional comparada

La protección del cielo nocturno en Chile y en países como España, Italia, Estados Nueva Zelanda, Australia, Estados Unidos o en Europa, ha sido implementada a partir de instrumentos de gestión que responden a las prioridades de cada territorio. Por una parte, la motivación astronómica ha sido muy relevante y pionera en muchos lugares a la hora de establecer restricciones a los alumbrados exteriores de tipo artificial: Los grandes observatorios astronómicos internacionales necesitan cielos nocturnos de calidad durante toda su vida útil. Las áreas silvestres protegidas, como parques nacionales, reservas y monumentos también necesitan de cielos libres de contaminación luminosa. Además, la creciente evidencia científica en torno a los variados efectos adversos en la salud humana ha impulsado nuevas medidas de protección. Es ampliamente reconocido el carácter contaminante de la iluminación artificial, por lo que consecuentemente, se implementan instrumentos de gestión de corte ambiental, de salud, y astronómico, destinados a la protección de los cielos nocturnos en los países antes nombrados y en varios otros. Dado que las herramientas son variadas, resulta relevante realizar un breve análisis de legislación comparada, para efectos de extraer conclusiones que pudieran ayudar a mejorar nuestra propia legislación para la protección del cielo chileno que, en el caso del Desierto de Atacama, se asume de un carácter patrimonial, dada su excepcional calidad para propósitos de investigación astronómica.

Los principales indicadores utilizados en este análisis son los siguientes:

- **Ámbito geográfico:** El alcance territorial dice bastante sobre la legislación usada en diversos países.
- **Zonificación:** Dentro de los países se suele segregar zonas, dado que se asume que no todo el territorio puede y debe ser protegido de la misma manera. Áreas silvestres protegidas y observatorios astronómicos, científicos o turísticos, suelen ser las prioridades.
- **FHS:** El flujo hemisférico superior (ULR en inglés) es la principal restricción o condición que se le suele aplicar al alumbrado exterior. En este caso, se trata de la emisión de luz en los ángulos horizontales, cerca de este plano y directamente hacia el hemisferio superior
- **TCC:** La Temperatura de Color Correlacionada es otra restricción o condición aplicada al alumbrado exterior, utilizada para limitar los efectos adversos del alumbrado exterior.
- **Radiancia Espectral:** La regulación espectral es otra forma de controlar la contaminación lumínica, que es más precisa que la TCC. Se asume que las emisiones azules son las más perjudiciales para la astronomía, el medio ambiente y la salud humana.
- **Certificación de Luminarias:** Una forma de regular la contaminación lumínica es condicionando la importación, fabricación y/o la comercialización de los equipos de alumbrado usados en exteriores.

- **Fiscalización Técnica:** La verificación de las instalaciones de alumbrado exterior es otro mecanismo de control del alumbrado.
- **Inclusión de Otros Contaminantes:** La legislación de protección del cielo nocturno incluye a veces la contaminación en radiofrecuencias e incluye la contaminación atmosférica.
- **Luminancia e Iluminancia:** La legislación de protección del cielo nocturno busca reducir los niveles de Luminancia (cantidad de luz que una superficie emite o refleja) e Iluminancia (cantidad de luz que incide sobre una superficie) implementadas en zonas sensibles del territorio.
- **Normativas:** las normas de protección del cielo nocturno trabajan en concordancia con las otras normas, del tipo industriales o de protección ambiental.
- **Terceros:** Analizar las causas que producen la contaminación, es decir el entorno de la industria o institución a la cual se aplica la norma lumínica. Determinar los niveles de luminancia e iluminancia del objeto y el entorno que lo rodea.

Los países considerados en este análisis son aquellos que cuentan con observatorios astronómicos de carácter científico y con tecnología de punta, que suele traer aparejada formas concretas de cooperación internacional, dado que sus costos son muy elevados. Posteriormente, se consideran otros países en los que se ha hecho un esfuerzo de protección del cielo nocturno por causas ambientales, de turismo astronómico o contemplación paisajística. No se consideran todos los países que cuentan con algún tipo de normativa o legislación contra la contaminación lumínica, dado que son muchos y muchos de ellos tienden a repetir esquemas y marcos legislativos preexistentes o porque las restricciones propuestas no tienen mayor imposición.

El énfasis de este documento está puesto en la experiencia astronómica.

6.1. España

6.1.1. Normas generales

El Reino de España cuenta con el Real Decreto 18/2022 que reemplaza al R.D. 1890/2008 para regular la eficiencia energética del alumbrado exterior, modificando la ITC-EA-01 para adaptarlo a las nuevas tecnologías imperantes y exigir mayor eficiencia energética. En lo referido a la contaminación luminosa y el alumbrado exterior:

1. Al mejorar la eficiencia del alumbrado con un mejor diseño se puede reducir parcialmente la emisión de luz hacia el cielo.
2. Al imponer restricciones de potencia unitaria y eficiencia luminosa mínimas, se refuerza a que los diseños sean más comedidos, lo que indirectamente contribuye a un menor despilfarro lumínico.
3. Los parámetros de resplandor luminoso nocturno y luz intrusa o molesta, que permanecen vigentes, de la ITC EA-03, industria.gob.es inciden en la contaminación lumínica:

4. Límite de emisión directa hacia el cielo - Flujo hemisférico superior instalado (FHSinst) son menos restrictivos que los chilenos, salvo la zona E1, correspondiente a observatorios y parques naturales, con un FHSinst igual o menor a 1%. En la zona E2, correspondiente a sectores periurbanos y rurales, el valor es igual o menor a 5%; en zonas urbanas residenciales, E3, es igual o menor a 15%; y, en centros urbanos y comerciales, E4, es igual o menor a 25%.
5. La luz intrusa o molesta está expresada como iluminancia vertical en ventanas (E_v): E1= 2 lux; E2=5 lux; E3=10 lux; E4=25 Lux.
6. Intensidad luminosa por luminaria (I) (dirección molesta): E1 = 2.500 cd, E2 = 7.500 cd, E3 = 10.000 cd, E4 = 25.000 cd.
7. Luminancia media de fachadas (L_m): E1 = 5 cd/m², E2 = 5 cd/m², E3 = 10 cd/m², E4 = 25 cd/m².
8. Luminancia máxima de fachadas (L_{max}): E1 = 10 cd/m², E2 = 10 cd/m², E3 = 60 cd/m², E4 = 150 cd/m².
9. Luminancia máxima de señales y anuncios (L-máx): E1 = 50 cd/m², E2 = 400 cd/m², E3 = 800 cd/m², E4 = 1.000 cd/m².
10. Incremento umbral de contraste (TI) (deslumbramiento perturbador): TI = 15 % (aplicado con distintos umbrales de adaptación según clase de alumbrado).
11. Se exige que: solo se ilumine la superficie que se quiera dotar de alumbrado, no superar niveles máximos de la ITC-EA-02, y respetar factores de utilización/mantenimiento de ITC-EA-04. El proyecto debe minimizar la luz dispersa (reflejada).
12. Restricción espectral / TCC (CCT) en zonas protegidas (E1): En zona E1 (observatorios internacionales/nacionales) se recomienda/obliga el uso de lámparas de vapor de sodio. Si no es posible, la Guía indica filtrar la radiación por debajo de 440 nm (es decir: limitar la emisión azul). La razón técnica es que el resplandor nocturno aumenta fuertemente con longitudes de onda más cortas. En la práctica esto implica restricción del componente azul / CCT alto en zonas E1.

En resumen, en la legislación española se incluyen restricciones que se aplican también a Chile, aunque en líneas generales no son más estrictas las primeras. Las exigencias españolas siguen los parámetros de la Comisión Internacional de Alumbrado, CIE, la que promueve el uso y masificación del alumbrado, incluye en sus recomendaciones altos niveles de luminancia e iluminancia, restringe muy poco las emisiones de luz hacia el hemisferio superior, entre otras prácticas permisivas.

Por otra parte, la exigencia de iluminar sólo lo que requiere alumbrado no se da en la legislación chilena.

6.1.2. Islas Canarias

Las Islas Canarias concentran observatorios astronómicos de categoría mundial, en El Teide (isla de Tenerife) y especialmente en el Roque de los Muchachos (La Palma). Por ello, sus

restricciones a la contaminación lumínica son de especial relevancia para Chile. La base de la protección insular es la Ley del Cielo.

La Ley del Cielo (Ley 31/88 y R.D. 243/92) se establece con el objetivo de mantener la excelente calidad astronómica de los observatorios en Canarias, que han recibido grandes inversiones públicas. Esta ley busca proteger los observatorios de la contaminación que podría afectar la calidad de las observaciones astronómicas.

6.1.2.1. Tipos de Contaminación que Afectan la Calidad Astronómica:

- Contaminación radioeléctrica
- Contaminación atmosférica
- Sobrevuelo de aeronaves
- Contaminación lumínica

6.1.2.2. Criterios Generales para Reducir la Contaminación Lumínica (CL):

1. Evitar la Emisión de Luz sobre el Horizonte: Es fundamental que la luz emitida no se disperse a larga o corta distancia por encima de los 90 grados, minimizando el flujo contaminante y maximizando el flujo útil.
2. Apagado y Reducción del Flujo Lumínico:
 - a. Apagado a medianoche de alumbrado ornamental, monumentos, alumbrado deportivo y anuncios luminosos.
 - b. Reducción del flujo lumínico en alumbrado vial y peatonal después de medianoche.
3. Niveles Luminotécnicos:
 - a. Utilizar los niveles luminotécnicos mínimos recomendados (CIE) y los establecidos en el R.D. 1890/2008 como objetivos.
 - b. No superar el 20% del valor medio de estos niveles.
4. La utilancia: Utilizar el mayor índice de utilancia posible. La utilancia es la relación entre el flujo saliente de las luminarias, la superficie a iluminar y los niveles obtenidos en esa zona objetivo. Como mínimo del 50%.
5. Uso de Luminarias y Lámparas Certificadas por el IAC:
 - a. Deben ser utilizadas exclusivamente en viales (motorizados y peatonales) y en otras instalaciones.
 - b. Deben tener baja radiación azul-ultravioleta.
 - c. Características de las Luminarias Certificadas:
 - i. FHSinst nulo y clase G6 respecto a gamma 90° según anexo A en: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/en-13201-2015>.
 - ii. La estructura inferior de la luminaria, si la tiene, debe ser de color negro mate.
 - iii. No deben tener cierres o difusores plásticos (como paneles en faroles o cierres abombados).

- iv. Instalación sin inclinación.
- d. Tipos de Lámparas Recomendadas por el IAC (espectros):
 - i. Ámbar puro IAC
 - ii. Ámbar IAC
 - iii. Blanco súper cálido IAC
 - iv. Blanco cálido IAC

6.1.2.3. Ejemplos de Aplicación:

- **Alumbrado Vial:**
 - Utilizar vidrio plano y sin inclinación.
 - Emplear LED ámbar o con filtro ámbar.
 - Niveles de iluminación recomendados: 7.5-9 lux para viales y 15-18 lux para aparcamientos.
 - Reducción de utilancia mayor al 50%.
- **Alumbrado Peatonal:**
 - Utilizar vidrio plano y sin inclinación.
 - Emplear LED cálido o super cálido.
 - Niveles de iluminación recomendados: 10-12 lux.
 - Reducción de utilancia mayor al 50%.
- **Alumbrado Deportivo:**
 - Utilizar proyectores asimétricos para evitar la dispersión de luz.
 - Niveles de iluminación:
 - Polideportivos: 75-90 lux para entrenamiento, 200-240 lux para competición.
 - Tenis y Pádel: 200-240 lux para entrenamiento, 300-360 lux para competición.
 - Apagado antes de las 24:00 h.
 - Utilancia mayor al 50%.
- **Letreros Luminosos:**
 - Se permite cualquier fuente de luz y color.
 - Limitaciones de brillo: 200 cd/m² en Tenerife y 50 cd/m² en La Palma.
 - Apagado antes de las 24:00 h.

El caso de las Islas Canarias presenta importantes conclusiones para Chile. Por una parte, la mayoría de las restricciones son similares, aunque el indicador de la utilancia y la reducción de los niveles de luminancia en sectores viales y peatonales no están presentes en la normativa chilena. No obstante ello, si se enfatizara más en el ajuste de los niveles de alumbrado según la densidad de uso o el cambio de categoría, por ejemplo, a altas horas de la noche, se podrían hacer valer esas disminuciones de emisión lumínica. También está ausente en Chile la integración de todas las formas de contaminación que afectan a la astronomía, es decir, la contaminación lumínica, la radioeléctrica, el efecto adverso de la aeronavegación y la contaminación atmosférica. En Canarias el seguimiento, control y fiscalización de estas formas de contaminación están radicadas en un sólo órgano

fiscalizador y evaluador, la Oficina Técnica de Protección del Cielo de Canarias (OTPC). Este organismo público, dependiente del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), es un ejemplo de esa integración de funciones y del valor que se le otorga al cielo nocturno.

6.2. Italia

El caso italiano es heterogéneo, ya que las restricciones que se aplican para la protección del cielo nocturno dependen de cada región, incluso de cada comuna en muchos casos. Un factor clave que explica la existencia de esta variada y rica legislación contra la contaminación lumínica es la histórica preocupación de las ONG italianas, como CieloBuio, y de algunos centros de investigación en esta materia, como la Universidad de Padova. Donde la legislación regional es heterogénea o la información pública es parcial, se indica explícitamente.

La siguiente tabla muestra el estado general (ley/reglamento regional o provincial) y puntos técnicos típicos que la mayoría de esas leyes/reglamentos contienen. Para muchas regiones existen variaciones municipales y/o reglamentos de detalle.

Región / Provincia autónoma	¿Ley regional/provincial?	Puntos técnicos frecuentes (límites típicos)
Nacional (Italia)	No hay ley única nacional; instrumentos nacionales: CAM (DM 27/09/2017) + normas UNI/EN. Gazzetta Ufficiale+1	CAM exige requisitos de compra pública (límites de flujo superior, control horario, eficiencia). Normas UNI (p. ej. UNI 10819, EN 13201) definen métodos y niveles de iluminancia. Bosetti Gatti+1
Lombardia	Sí (ley regional vigente) — normativa aplicada en todo el territorio.	Full-cutoff obligatorio; límites ULOR / flujo hacia cielo; zonificación protectora; límites de CCT en áreas sensibles. UNOOSA
Veneto	Sí (ley/reglamento)	Zonas y prescripciones, 0 cd/klm a 90° en muchas categorías; requerimientos de apantallamiento; dimming/curfew. ISPRA+1
Emilia-Romagna	Sí (L.R. n.19/2003 y directrices 2013)	Zonas, 0 cd/klm a 90° para muchas instalaciones; reducción nocturna y requisitos documentales. ISPRA
Toscana	Sí	Normativa regional con zonificación y requisitos técnicos (full-cutoff, reducción nocturna).
Piemonte	Sí	Ley regional + requisitos técnicos (shielding, límites CCT en sectores protegidos).
Liguria	Sí	Prescripciones similares: full-cutoff, zonificación y control horario.
Friuli-Venezia Giulia	Sí	Ley regional y disposiciones técnicas (disposizioni tecniche).

Región / Provincia autónoma	¿Ley regional/provincial?	Puntos técnicos frecuentes (límites típicos)
Trentino (Provincia Aut. di Trento)	Sí — Ley provincial n.16/2007. Restricción clara y completa. consiglio.provincia.tn.it+1	Definición de contaminación lumínica, zonificación, obligaciones (apantallamiento, reducción, documentación técnica y planes de adecuación). energia.provincia.tn.it
Alto Adige / Bolzano (Provincia Aut.)	Sí	Normativa provincial con protección para observatorios y requisitos técnicos.
Valle d'Aosta	Sí	Ley regional/provincial.
Marche	Sí	Normativa regional con reglas técnicas.
Umbria	Sí	Normativa regional.
Abruzzo	Sí	Normativa regional.
Molise	Parcial / histórico: cobertura incompleta (compendios varían).	Algunos informes indican ausencia o normativa limitada. lightpollution.it
Puglia (Apulia)	Sí	Ley/reglamento regional.
Basilicata	Sí	Normativa regional.
Campania	Sí	Normativa regional.
Calabria	Históricamente: ausencia o cobertura parcial (varía por fuente y municipio). voltimum.it+1	Si no hay ley regional clara, rigen ordenanzas municipales, CAM y normas UNI.
Sicilia	No consolidada / sin ley regional integral (muchos documentos técnicos municipales lo confirman). hub-api.comune.enna.it+1	En ausencia de ley regional uniforme: se aplican ordenanzas de municipios, condicionamientos en EIA y requisitos de contratación (CAM); proyectos sujetos a exigencias locales.
Sardegna	Históricamente listada entre regiones con cobertura parcial (verificar actualizaciones municipales/regionales). lightpollution.it	

Hay consenso técnico (normas UNI, CAM) que introducen los parámetros prácticos: full-cutoff (apantallamiento), límite de flujo hacia el hemisferio superior (0–0,49 cd/klm a 90° o 0 cd/klm en normas estrictas), límites de TCC (típicamente ≤ 3000 K en zonas protegidas), dimming/noches con reducción $\geq 30\%$ y zonificación para observatorios. [Bosetti Gatti+2ISPR+2](#)

6.2.1. Parámetros técnicos a verificar siguiendo las restricciones al alumbrado que se aplican en diversas provincias de Italia

- Flujo hacia el hemisferio superior (ULOR/ULR/cd/klm): Calcular ULOR (por normativa o según UNI): objetivo operativo: 0 cd/klm a 90° y por encima para zonas estrictas; $\leq 0,49$ cd/klm tolerancia práctica en muchas normas. Incluir cálculos y sumatorias por luminaria y por zona. [ISPRA+1](#)
- Apantallamiento / óptica: Requerir luminarias full-cutoff o equivalentes; especificar la clase fotométrica y ángulo hasta el que no hay emisión directa. Adjuntar plano de orientación de luminarias. [Snpambiente](#)
- Temperatura de color (TCC/CCT) y contenido azul: Indicar TCC máxima para la intervención según zona (recomendación general: ≤ 3000 K; en zonas de máxima tutela considerar fuentes ámbar o ≤ 2200 K). Si la normativa exige, adjuntar SPD/curva espectral. [ISPRA+1](#)
- Niveles de iluminancia / luminancia: Proyectar según UNI EN 13201 (niveles por categoría de vía, uniformidad). Justificar que los niveles son los mínimos necesarios para seguridad. [Snpambiente](#)
- Control horario y dimming: Incluir control por reloj astronómico / detector de presencia y plan de reducción nocturna. Requisito común: $\geq 30\%$ de reducción nocturna en horarios indicados por la normativa; especificar horarios/curfew por zona. [Bosetti Gatti](#)
- Protección de observatorios / zonificación: Si se está dentro de zonas de tutela, aplicar límites más estrictos (TCC, ULOR, prohibiciones de usos luminosos, horarios). Incluir mapa de zonificación y distancias a observatorios. [ISPRA](#)
- Mediciones en obra y aceptación: Medición con luxómetro (iluminancia), goniofotómetro o lectura en laboratorio de la luminaria, y medición espectral (espectrómetro portátil) si la normativa local lo solicita. Incluir procedimiento de control y tolerancias. [Snpambiente](#)
- Cálculo de radiancia espectral (si requerido): Si se piden límites espectrales, convertir SPD a radiancia por banda ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$) o definir un índice proxy (CCT + % energía < 500 nm). Incluir método y unidades usadas. (Nota: la normativa italiana generalmente usa CCT/curvas espectrales más que límites directos en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$). [Bosetti Gatti+1](#)

Al comparar con la legislación chilena, cabe primero indicar que la restricción de flujo hemisférico superior que se usó en Chile en el DS N°43/2012 MMA y que se replicó en el actualmente vigente DS N°01/2022 MMA, está copiada de la legislación italiana. La mayor diferencia encontrada es la limitación de los flujos luminosos, según el horario, que en Chile no se ha implementado sistemáticamente y que tendría efectos muy beneficiosos en materia no sólo de control de la contaminación luminosa, también en lo ambiental, salud humana y eficiencia y ahorro energéticos. Por otra parte, la legislación italiana es más estricta que la chilena a la hora de hacer exigir requisitos técnicos a los proyectos de alumbrado, para demostrar que se toman medidas de control de los efectos adversos del alumbrado exterior.

6.3. Estados Unidos

Se presenta una descripción general de las medidas técnicas que suelen imponerse en Estados Unidos (qué restringen y cómo se expresan técnicamente), y después el detalle por jurisdicción (Hawái, Tucson / Pima County). Al final se incluyen ejemplos adicionales (Flagstaff y el papel de organizaciones/guías federales y de la International Dark-Sky Organization - IDA).

6.3.1. Conceptos y medidas frecuentes

Éstas son las restricciones técnicas que aparecen repetidamente en ordenanzas y leyes de EE. UU.:

- Apantallamiento / “full-cutoff” (sin emisión por encima del plano horizontal): las luminarias deben impedir que la luz se dirija hacia el cielo (no uplight). Se especifica a nivel de óptica del equipo (ángulo cutoff, formas de lente) y por el diseño de la luminaria, su geometría. [Border States+1](#)
- Límites de temperatura de color (CCT, en Kelvin): se fija un máximo de CCT para reducir la componente azul (que dispersa más en la atmósfera y aumenta el brillo del cielo nocturno). Muchos códigos modernos exigen ≤ 3000 K; algunos permiten ≤ 4000 K para ciertos casos o agencias. En inglés el valor exacto aparece como “rated color temperature shall not exceed X K”. [tucsonaz.gov+1](#)
- Topes de lúmenes / “lumen caps” por luminaria o por área (lumen density / lumen-per-area): se establecen máximos de flujo (lúmenes) por tipo de uso o por área de iluminación (p. ej. estacionamientos, canopies) y a veces límites por pie cuadrado o lux. También hay límites para luminarias no prefijadas. [tucsonaz.gov+1](#)
- Curfews / dimming / horarios: algunas ordenanzas requieren atenuación o apagado parcial tras cierta hora para actividades que no requieren iluminación continua. Se regula como “curfew” o requisitos de dimming (por ejemplo: apagar o reducir a % después de las 22:00–23:00). [cfht.hawaii.edu+1](#)
- Control de deslumbramiento y luz intrusiva: se establecen límites cuantitativos (lux/foot-candles o candela por m² / nits) sobre cuánto puede incidir en la propiedad colindante o en ventanas; se especifican ángulos de deslumbramiento y máximos de intensidad luminosa. [American Legal Publishing+1](#)
- Restricciones espectrales (tipo de fuente): en zonas sensibles (vinculadas a observatorios) se exige fuentes con espectro restringido —históricamente se favoreció Sodio de Baja Presión; hoy se usan soluciones del tipo LED ámbar o filtros específicos (p. ej. 590 nm) para reducir la emisión en azul/verde. Flagstaff es un ejemplo extremo. [Access Fixtures+1](#)
- Requisitos de permiso, listado de productos aprobados y etiquetado: códigos suelen incorporar listas de luminarias aprobadas (approved products list) y exigir certificaciones (IES LM-79/LM-80, dark-sky certification). [flagstaff.az.gov+1](#)

- Objeto y alcance: las ordenanzas definen su aplicación (nuevas instalaciones, reemplazos, remodelaciones mayores) y a menudo exigen que, ante obras mayores, todo el lote quede conforme. tucsonaz.gov

6.3.2. Estados Unidos (federal) — situación general

No existe una ley federal única que regule la contaminación lumínica a escala nacional; la regulación efectiva es local y estatal. A nivel federal hay guías y buenas prácticas publicadas por agencias (BLM, NPS, etc.) y programas voluntarios (International Dark-Sky Association) que recomiendan estándares técnicos (apantallado, TCC, límite en lúmenes totales, restricción horaria). En la práctica la mayoría de restricciones se aplican por ordenanza municipal/condado o por estatutos estatales. [Servicio Nacional de Parques+2Bureau of Land Management+2](#)

Las agencias federales (BLM, NPS, USFWS) prevén orientaciones acerca de las mejores prácticas de gestión para obras en terrenos federales y áreas protegidas (p. ej. requisitos de apantallado, horarios, espectro), pero normalmente esas prácticas se aplican a proyectos que afectan tierras federales. [Bureau of Land Management+1](#)

6.3.3. Hawái — reglas estatales relevantes (ejemplo técnico concreto)

Hawai'i Revised Statutes §201-8.5 (y ordenanzas locales isleñas derivadas) establece que, desde fechas de implementación, todas las nuevas luminarias exteriores que emitan más de 3 000 lúmenes deben ser apantalladas “fully shielded” y además tener CCT $\leq 4\,000\text{ K}$ (con excepciones específicas para costas, etc.). El requisito se aplica a agencias estatales desde fechas señaladas y ha servido como base para ordenanzas insulares más estrictas en islas con observatorios (p. ej. Mauna Kea / zonas costeras tienen reglas particulares). [Justia+1](#)

Además, en Hawái hay clasificaciones de luminarias (Class I/II/III) en algunas ordenanzas insulares que condicionan el tipo de fuente (p. ej. ciertas áreas “rendición de color crítico” o áreas donde se exige SBP (sodio de baja presión) o ámbar). Estas especificaciones se traducen técnicamente en restricciones de TCC, apantallado y horas de operación. [Access Fixtures+1](#)

6.3.4. Tucson (ciudad) y Pima County — características técnicas y exigencias concretas

- Código conjunto “City of Tucson / Pima County Outdoor Lighting Code” (documentos y enmiendas recientes; OLC 2012 y borradores posteriores). El código aplica tanto a la ciudad de Tucson como al área no incorporada del condado y está pensado específicamente para proteger el cielo del desierto de Arizona (valorado por astronomía y biodiversidad). [tucsonaz.gov+1](http://tucsonaz.gov)

- Límite de CCT: los borradores/actualizaciones y la versión a la que se tiene acceso del OLC establecen CCT máximo de 3000 K para fuentes (con menciones explícitas de 3000 K como tope; ámbar permitido en casos). Esto se aplica a la mayoría de las instalaciones nuevas y es una de las reglas más citadas en las fichas técnicas. tucsonaz.gov+1
- Alcance / aplicación: el código regula instalaciones nuevas, ampliaciones y en muchos casos relacionados con obras mayores obligan a poner el conjunto de la propiedad en conformidad. Se incluyen reglas para estacionamientos, iluminación vial, iluminación bajo marquesinas (canopies) con topes de iluminancia (por ejemplo: máximos en lúmenes por área bajo canopies). tucsonaz.gov+1
- Apantallado y emisión al cielo: exigen luminarias apantalladas (full cutoff), prohibición de emisión hacia arriba, controles para evitar la luz intrusa y el deslumbramiento. [Border States+1](https://borderstates+1)
- Se regulan señales (signage): el código y ordenanzas afines fijan reglas para rótulos iluminados (p. ej. apagado a las 21:00, CCT \leq 3000 K, límite de nits) — ejemplo: sección de “dark sky protection option” exige CCT \leq 3000 K y máximos de intensidad para rótulos. [American Legal Publishing](https://americanlegalpublishing)
- Proceso de actualización: el OLC ha pasado por revisiones (hay borradores 2023–2025 y documentación de la Junta de Supervisores de Pima con actualizaciones/consultas públicas). Dado que es una reglamentación que está en evolución, conviene verificar la versión local vigente—el ayuntamiento/condado pública los borradores y finales en su web. tucsonaz.gov+1

6.3.5. Ejemplos destacados y otras jurisdicciones

- Flagstaff (Arizona): paradigma técnico/histórico. Flagstaff fue la primera “International Dark-Sky City”; su código contiene requisitos muy estrictos: prohíbe ciertas tecnologías (ej. mercurio vapor), favorece ámbar/590 nm para zonas cercanas a observatorios, y tiene listas de productos aprobados y especificaciones del ratio S/P escotópico/fotópico, entendido como la comparación entre la cantidad de luz visible en bajos niveles de alumbrado (lúmenes escotópicos) y la luz visible en condiciones de bastante luz (lúmenes fotópicos) y límites espectrales. Es un buen ejemplo de cómo una ordenanza puede imponer requerimientos espectrales muy concretos (no sólo TCC). [DarkSky International+1](https://darkskyinternational+1)
- Otras jurisdicciones y tendencias:
 - Estados: algunos estados/condados han aprobado leyes o guías (p. ej. Texas tiene normativas que permiten medidas alrededor de instalaciones militares; varios estados adoptan recomendaciones de IES/IDA). No hay un patrón único: la mayoría de la regulación práctica sigue siendo local. [Appleton Group+1](https://appletongroup+1)
 - Organizaciones: la ONG International Dark-Sky Association (IDA) publica plantillas de ordenanzas y criterios técnicos para distintas aplicaciones, bajo sus “5 principios”: apantallado, control a la emisión de luz (lumen control), TCC bajo, control horario, señalización). [DarkSky International+1](https://darkskyinternational+1)

El caso de los Estados Unidos es amplio y variado y presenta restricciones de interés para nuestro país. Por una parte, los 5 principios de la IDA resumen los requisitos más utilizados y que son similares a los de nuestro país. El control de los flujos luminosos es probablemente el principio que menos control tiene en nuestro país, lo que tiene que ver por una parte con el diseño de los proyectos de alumbrado y además, con la instalación de los parques de alumbrado; algo que en nuestro país se verifica muy poco.

El requisito más complejo y definitivo que se ha estado usando en Estados Unidos es el límite de lúmenes (lumen cap) que está contenido en el código conjunto de Tucson y el condado de Pima antes nombrado. Fija valores según una tabla, incorporando todas las fuentes de alumbrado artificial y pone límites a todo un proyecto en un área o parcela. Es complejo de utilizar, sin embargo, es la herramienta de control de las emisiones lumínicas más completa, especialmente cuando ya está incorporado el apantallado de las fuentes, la no emisión de luz por sobre el plano horizontal y el color de dichas fuentes.

Nueva Zelanda y Australia presentan una combinación de requisitos de corte astronómico y ambiental, aunque también están presentes los requisitos de la CIE, los que suelen ser permisivos y fomentan la sobre iluminación. A continuación se presentan las principales restricciones que se utilizan, en algunos casos de manera combinada, en ambos países.

6.4. Nueva Zelanda

No hay una ley nacional única de control de contaminación lumínica; se usan directrices locales (ordenanzas municipales en sitios sensibles como Mackenzie/Mt John), guías nacionales para fauna y buenas prácticas técnicas; la regulación práctica depende de los consejos (councils) de nivel municipal y de requisitos en evaluaciones ambientales. [Ministry for the Environment+1](#)

- Flujo hemisférico superior / ULOR / RULO (cómo lo limitan): No se cuenta con una norma nacional uniforme. En ordenanzas locales de cohorte ambiental y astronómico, por ejemplo en el Distrito Mackenzie, se exigen luminarias full-cutoff y límites de emisión hacia arriba. La práctica recomendada local es exigir ULOR muy bajos, del orden de 0% para zonas de observatorios astronómicos. [Dark Sky Reserve](#).
- Temperatura de color (TCC) y control espectral / radiancia espectral: Se dispone de varios documentos y estudios públicos y de organismos de investigación nacionales que advierten del impacto del azul en la fauna y en la salud humana. Basados en ellos, los planes y ordenanzas locales suelen recomendar ≤ 3000 K. Las evaluaciones ambientales piden SPD cuando se presenta el riesgo de afectar a la fauna. [Ministry for the Environment+1](#).
- Horarios (curfew), atenuación (dimming) y controles: Los Consejos y sitios protegidos (Mackenzie) exigen controles horarios y atenuación; en EIA suele pedirse planes de control (esquemas de dimerización, sensores o temporizadores). [Dark Sky Reserve+1](#).

- Niveles autorizados (iluminancia / luminancia): Entre Nueva Zelanda y Australia existe un marco técnico común: se usan normas de diseño (EN 13201 de Europa; AS/NZS 1158 en Australia/NZ) que definen niveles mínimos de iluminancia o luminancia por categoría de vía/espacio (por seguridad), y las políticas de contaminación lumínica intentan que esos niveles sean los mínimos necesarios, evitando la sobre iluminación, lo que se vuelve algo difícil de lograr, por el uso combinado de las recomendaciones de la CIE.
- Zonificación y protección de observatorios / áreas sensibles: La experiencia neozelandesa en materia de zonificación se establece a partir del Distrito Mackenzie. Otros territorios alrededor de observatorios implementan la zonificación y ordenanzas estrictas (límites horarios, cierre total, límites CCT). A nivel nacional, no hay una zonificación única: cada Consejo la define en su plan. [Dark Sky Reserve](#).

6.5. Australia

Se recurre a la combinación de normas técnicas AS/NZS (serie 1158) para diseño/nivel de iluminación en vías y espacios públicos, y National Light Pollution Guidelines for Wildlife (Gobierno federal) que recomiendan límites de TCC y buenas prácticas (reducción de flujos, dirección, espectro) para proteger la fauna. Además, los estados y municipios aplican restricciones locales. [dcceew.gov.au+1](#).

- Flujo hemisférico superior / ULOR / RULO (cómo lo limitan): La referencia técnica AS/NZS 1158 no establece un flujo hemisférico superior a cero, estándar para todos los casos. Aunque obliga al control del deslumbramiento, limitación de emisiones de luz fuera de las zonas útiles (spill) y correcta orientación; además GBC/guías y Green Star solicitan declarar ULOR/UPR y promueven ULOR muy bajo para proyectos sostenibles. El documento federal y guías para fauna recomiendan minimizar luz hacia el cielo y usar luminarias full-cutoff. [Green Building Council of Australia+1](#)
- Temperatura de color (CCT) y control espectral / radiancia espectral: Las guías “National Light Pollution Guidelines for Wildlife” establecen criterios de diseño que incluyen preferir CCT bajos, menores a 3.000 K y, para especies marinas o aves migratorias, medidas espectrales concretas: uso de longitudes de onda ámbar o limitar energía <500 nm. Hay recomendaciones explícitas sobre SPD. [dcceew.gov.au+1](#)
- Horarios (curfew), atenuación (dimming) y controles: Las guías federales y estatales recomiendan límites horarios y uso de tele-gestión (timers astronómicos, detección de presencia); la guía NSW Dark-Sky exige documentación para asegurar que las luces no operen en exceso y sugiere CCT igual o menor a 3.000 K. También promueven el uso de dimming programable.
- Niveles autorizados (iluminancia / luminancia): Como fue explicado, Australia y Nueva Zelanda utilizan las normas técnicas AS/NZS 1158: categorías Vehicular (V) y Peatonal (P), con requisitos de iluminancia (lux) o luminancia (cd/m²) para cada

categoría. Las actualizaciones 2020–2022 especifican métricas de eficiencia y nuevos índices energéticos. [Calificación de Energía+1](#)

- Zonificación y protección de observatorios / áreas sensibles: Los estados, los municipios y la guía federal para fauna recomiendan la zonificación en los proyectos que se someten a sus evaluaciones; la guía NSW Dark-Sky y otros instrumentos ayudan a incorporar zonas de oscuridad en la planificación. [Planificación NSW+1](#).

6.6. Unión Europea (nivel EU / nacionales)

No existe aún una única ley supranacional europea que fije todos los límites, aunque la UE ha impulsado criterios (revisión GPP, guías técnicas), y la práctica regulatoria se apoya en la zonificación ambiental (CIE/CEN/EN), en criterios de contratación pública (Green Public Procurement - GPP) y normas de iluminación (EN 13201). Sus recomendaciones más claras están orientadas a minimizar el flujo hemisférico superior (RULO/ULOR) y limitar la $TCC \leq 3000$ K en las compras públicas. Algunos Estados miembros ya cuentan con regulación/ordenanzas nacionales o regionales. [susproc.jrc.ec.europa.eu+1](#)

- Flujo hemisférico superior / ULOR / RULO (cómo lo limitan): La revisión de criterios de GPP y guías técnicas propone RULO = 0% para la compra pública y limita el porcentaje de flujo por encima de ciertos ángulos. Además, varias regiones europeas aplican límites por zonificación “zoning” (véase CIE 126/CIE 150 comparativas). [susproc.jrc.ec.europa.eu+1](#)
- Temperatura de color (CCT) y control espectral / radiancia espectral: La propuesta de GPP y varios documentos técnicos recomiendan limitar TCC a ≤ 3.000 K para las compras públicas y con ello reducir la fracción azul de la luz emitida. Algunos países han adoptado límites similares en ordenanzas locales. A escala técnica, la UE usa normas CEN/EN y criterios medioambientales para exigir unas curvas de distribución espectral más amigables con el medio cuando es necesaria la protección de la biodiversidad y el cuidado de los observatorios astronómicos. [Appleton+1](#)
- Horarios (curfew), atenuación (dimming) y controles: GPP y recomendaciones europeas promueven la disminución de flujos (dimming), el control por reloj astronómico y sistemas de telegestión; medidas concretas (horarios, %) varían por país/municipio. [susproc.jrc.ec.europa.eu+1](#)
- Niveles autorizados (iluminancia / luminancia): En Europa aplica la norma EN 13201, que establece niveles de luminancia/media y uniformidad para distintas categorías de vía (ej.: M- y C-categorías). Los reguladores nacionales traducen esos requisitos a ordenanzas y políticas locales. [susproc.jrc.ec.europa.eu](#). Estos valores son similares a los de la CIE, por lo que son elevados.
- Zonificación y protección de observatorios / áreas sensibles: Varios países utilizan la zonificación ambiental para regular las emisiones de luz de noche (bajo el concepto de ALAN) y con ello conseguir proteger áreas oscuras.

6.7. Conclusiones Generales

Las principales restricciones para limitar la contaminación lumínica en los países y zonas geográficas analizadas son las siguientes:

1. Se utiliza con frecuencia la emisión del flujo hemisférico superior (FHS, ULOR, RULO) cercano a cero. Por ello, las fuentes deben cumplir requisitos de cierre total (full cut-off, fully shielding).
2. Existe una tendencia general: hacia la reducción del componente azul de las emisiones lumínicas del alumbrado artificial, de preferencia por $TCC \leq 3000$ K para iluminación exterior general; en áreas especialmente sensibles se recomiendan TCC aún más bajas o espectro ámbar (por ejemplo 1800–2200 K o LEDs ámbar) o filtros. Las guías de conservación y Dark-Sky recomiendan <3000 K. Las normativas de las Islas Canarias y de Chile se decantan por la iluminación ámbar en zonas de desprotección astronómica y ambiental.
3. Respecto de la radiancia espectral ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$): en la práctica pocos marcos normativos fijan límites absolutos en unidades espectrales; prefieren proxys (CCT, SPD) o índices de “bajo contenido de azul”. Cuando las normativas piden límite espectral, normalmente es a nivel de estudios puntuales (EIA) o en zonas de máxima protección (observatorios, reservas). dcceew.gov.au+1
4. Se va haciendo más popular la inclusión de límites al alumbrado exterior por horario (curfew), atenuación (dimming) o apagados parciales fuera de horas de máxima actividad, para reducir el brillo del cielo y el consumo energético.
5. La zonificación es usada de diversas maneras. De hecho, la misma CIE utiliza la definición de “lighting zones” o “environmental zones” (ej. CIE 126/CIE 150 zonas E0..E4) en donde se asignan objetivos distintos: desde “reserva natural / observatorio” hasta “área urbana”. Se usa para fijar límites de ULOR, nivel de iluminancia permitido y CCT. Los principales problemas derivados de las recomendaciones CIE son los siguientes: no fija límites realmente relevantes a los FHS, tampoco a los niveles de alumbrado para los diversos usos en los alumbrados exteriores; incidiendo en las altas emisiones de luz que se ven por doquier. [DarkSky International+1](#)
6. Para Chile, son especialmente relevantes los criterios de utilancia, derivado de la Ley del Cielo de Canarias; la variación de niveles de alumbrado o incluso apagado de las instalaciones en horas de bajo o ausencia de uso o circulación de personas o vehículos; y, la aplicación de límites de lúmenes (lumen cap) en Tucson, Arizona y en condado de Pima. Es un instrumento complejo de utilizar, sin embargo, está orientado a controlar los flujos luminosos totales por superficie, por lo que es muy interesante como experiencia para una futura norma secundaria de protección del cielo, estableciendo límites por capacidad de carga territoriales.

7. Marco conceptual

Como se ha expuesto en el Capítulo 2, el decreto exento 106/2025 del 26 de marzo de 2025, del Ministerio CTCL creó la Comisión 2025. Según el artículo 2, letra a, de tal decreto una de las funciones de la Comisión es “Desarrollar un informe técnico con la descripción de las condiciones habilitantes necesarias para el adecuado funcionamiento de los observatorios astronómicos en Chile, considerando los avances tecnológicos de última generación”. El presente capítulo desarrolla tres conceptos clave que perfilan esta función.

Sin embargo, la Comisión 2025 considera necesario expresar una idea previa: la manera en que están perfiladas sus funciones sitúa el foco de su quehacer en los observatorios astronómicos que operan en Chile, lo que justificaría dar recomendaciones cuya principal preocupación sea la viabilidad de la operación de estos centros de investigación. En contraste con esto, pero sin entrar en conflicto con tal resultado esperado:

Es convicción de la Comisión 2025 que la prioridad del Estado de Chile debe ser la protección de los sitios chilenos que ofrecen condiciones excepcionales para la observación del Universo. La presencia en Chile de observatorios astronómicos, especialmente aquellos de primer nivel mundial, es un indicador de la calidad de los sitios que el país ofrece. Por consiguiente, es esa calidad la que debe ser protegida, tanto para seguir siendo atractivos a la hora de recibir proyectos internacionales como para permitir el desarrollo de iniciativas chilenas de frontera que aprovechen esas condiciones excepcionales.

7.1. El concepto de condiciones habilitantes

El “site testing” o “estudio de sitio” consiste en el registro sistemático, durante un período de tiempo que a veces puede durar varios años, de todas aquellas variables ambientales de interés para la toma de decisiones por parte de la organización responsable de desarrollar un observatorio astronómico. Los estudios de sitio ofrecen a Chile evidencia de cuáles son los mejores sitios que el territorio nacional ofrece para desarrollar observaciones astronómicas.

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

Las condiciones habilitantes son el conjunto de variables ambientales 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. Son las condiciones que existían cuando, como resultado de una evaluación de las características de uno o más sitios candidatos para el desarrollo de un nuevo observatorio astronómico, la organización responsable seleccionó el sitio en el cual el observatorio fue establecido.

Las condiciones habilitantes a veces son reportadas en artículos científicos que informan sobre los resultados del proceso de estudio de sitio. No obstante, no es raro que, por razones históricas o por limitaciones prácticas, tales estudios de sitio no existan para todos los observatorios astronómicos actualmente en operación en Chile. Para estos casos se propondrá más abajo una prescripción de tipo heurística.

En el marco de los acuerdos que el Estado de Chile establece con organismos científicos, hasta ahora de origen internacional, previos al establecimiento de un nuevo observatorio astronómico, el presente documento asume que Chile en general tendrá la responsabilidad de mantener las condiciones habilitantes, resultantes del estudio de sitio, que existían al momento de la selección de un sitio para el desarrollo de tal observatorio. Con objeto de hacer claro el alcance de tal responsabilidad:

Se recomienda que el protocolo de negociación del Estado de Chile con un organismo científico que pretenda instalar un nuevo observatorio incluya una comunicación explícita de las condiciones habilitantes, contenidas en el estudio de sitio realizado por parte del organismo científico. Estas condiciones habilitantes deben ser validadas por un servicio estatal con las competencias científicas adecuadas. Tal validación debe tener lugar previo a la firma de un acuerdo del Estado de Chile con el organismo científico, y podrá o no requerir nuevas mediciones, a criterio del servicio estatal a cargo de la validación.

Las alteraciones a las variables ambientales características de un lugar pueden ser de origen natural o artificial, y en ambos casos tales variaciones pueden ser de alcance local o global. En el presente documento se consideran las alteraciones de origen artificial de alcance local a las condiciones habilitantes. En este sentido, la palabra “local” se usa en el sentido de aquellas alteraciones que se originan en causas radicadas dentro del territorio nacional, lo que incluye el límite de su espacio aéreo. En relación a las alteraciones de origen artificial de alcance global, por ejemplo las propias de procesos globales de cambio climático de origen antropogénico, así como de aquellas alteraciones de origen natural, sean éstas de alcance global o local, no son objeto de este documento. Sin embargo:

Se recomienda que el Estado de Chile establezca un protocolo que, periódicamente, como resultado de mediciones realizadas por parte de un servicio estatal, monitoree los eventuales cambios de origen artificial global, o de origen natural, global o local, a las condiciones habilitantes de los sitios con valor para la observación astronómica con fines de investigación científica.

Diferenciaremos a continuación las condiciones ambientales medidas en la superficie terrestre y las condiciones ambientales medidas en la atmósfera.

7.1.1. Condiciones en la superficie terrestre

Estas variables son de incorporación relativamente reciente en la historia de los estudios de sitio, los cuales a menudo se han concentrado en aquellas que caracterizan la atmósfera sobre un sitio candidato para la instalación de un nuevo observatorio.

En este grupo se consideran variables tales como: compactación, estabilidad de taludes, microsismicidad, humedad del suelo, temperatura del suelo, composición química y radiactividad.

La alteración accidental de estas condiciones por causas artificiales locales se encuentra generalmente fuera del alcance de la tecnología actual. No obstante:

Se recomienda el monitoreo de la evolución de las capacidades tecnológicas y de cómo varía el potencial alcance de sus efectos en todo tipo de variables ambientales, tanto de superficie como atmosféricas, incluso si en el pasado las capacidades necesarias para alterarlas se han encontrado muy por encima de lo permitido por las tecnologías de aplicación industrial.

Cabe destacar que ya existe evidencia de que, del conjunto de variables listadas anteriormente, la microsismicidad es susceptible a los efectos de la tecnología actual, siendo posible provocar alteraciones significativas a las condiciones habilitantes de microsismicidad mediante acciones de fuentes de vibración instaladas a kilómetros de distancia de un sitio⁴.

7.1.2. Condiciones en la atmósfera

La medición de estas variables ha constituido el foco tradicional de los estudios de sitio conducentes a la selección de un sitio para el establecimiento de un nuevo observatorio astronómico. En este grupo se considera una gran cantidad de posibles parámetros, los que se pueden consultar en detalle en referencias tales como Shöck et al., 2009. Sin embargo, en la experiencia de la Comisión 2025, las variables más frecuentemente medidas, y por lo tanto más fácilmente monitoreables a largo plazo son:

- Fracción de cobertura de nubes.
- Porcentaje anual de noches fotométricas.
- Vapor de agua precipitable.
- Seeing (turbulencia) global.
- Concentración de polvo.
- Brillo del cielo.

La alteración de algunas de estas condiciones se halla dentro del alcance de la tecnología actual, lo que explica por qué muchos esfuerzos de investigación se han concentrado en

⁴ ESO 2025. Informe técnico sobre la propuesta de proyecto del INNA al SEIA — Resumen ejecutivo: <https://www.eso.org/public/chile/news/eso2506/>

entender cómo las acciones humanas perturban estos parámetros, y también explica por qué muchos esfuerzos regulatorios han prestado atención a los efectos de las acciones humanas sobre algunos de ellos, como se describe en el Capítulo 6.

7.1.3. Preservación de las condiciones habilitantes

Con objeto de poder decidir si las condiciones habilitantes de un observatorio se mantienen en el tiempo, es necesario monitorear la evolución de tales condiciones en relación a condiciones de comparación:

En los casos en que la información de las condiciones habilitantes contenidas en el estudio de sitio exista, se debe respetar la manera en que tales condiciones fueron medidas y todo esfuerzo debe hacerse por repetir las medidas de modo de lograr una comparación lo más directa posible.

Para aquellos casos en que esta información no sea conocida pues no fue medida o la información se ha perdido, diferenciaremos dos casos:

En el caso de condiciones en la superficie, particularmente para la variable de microsismicidad, la medición de las condiciones actuales, o simulación de cómo tales condiciones cambiarían si fueran afectadas por una nueva fuente contaminante, debe hacerse en los sitios donde operan los equipos de observación astronómica, individualizados por sus coordenadas geográficas.

En el caso de condiciones en la atmósfera, consideraremos la prescripción heurística de que las variables deben ser medidas dentro de un casquete esférico de cielo, de altura h en grados sobre el horizonte, considerando lo siguiente:

Al observar el cielo desde un sitio ideal, sin obstrucciones hacia el horizonte, el cielo se observa como un casquete esférico con una altura de 90° . El ángulo sólido de este casquete es 2π steradianes. Más generalmente, considerando una altura h en grados sobre el horizonte, donde h puede tomar valores entre 0 y 90° , el ángulo sólido del casquete esférico por encima de la altura h es:

$$A(h) = 2\pi(1 - \sin h)$$

Considerando este formalismo, es posible afirmar que **el casquete esférico que subtiende un ángulo sólido equivalente a 50% del cielo observable sobre el horizonte** se obtiene cuando $h=30^\circ$. Éste 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, de modo que muchos telescopios son diseñados tomando en cuenta tales limitaciones naturales y no

son capaces de apuntar tan abajo⁵. Por lo tanto es razonable concentrar el esfuerzo de protección en el cielo desde 30° hacia arriba.

En el caso de condiciones en la atmósfera, la medición instrumental se realizará según el estándar propio de la medición de cada variable (i.e. al cenit, o a ángulos más bajos según corresponda). Sin embargo, la simulación de cómo tales condiciones cambiarían si fueran afectadas por una nueva fuente contaminante, pondrá especial atención a todo el borde inferior de un casquete esférico de cielo a una altura angular de 30° sobre el horizonte, considerando por tanto todos los posibles ángulos de acimut.

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 particular, y particularmente en el cielo que es de mejor calidad para el trabajo del observatorio. A la vez se asume que desde esa altura angular hacia el cenit no existirán alteraciones artificiales locales que puedan empeorar tales condiciones.

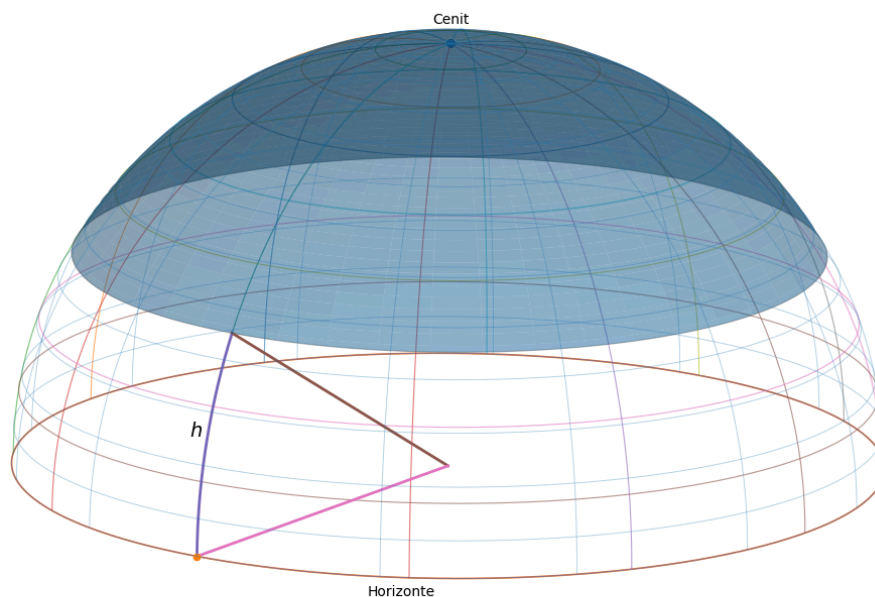


Figura 3: Representación del cielo visible sobre un sitio astronómico. El casquete esférico que comienza a la altura angular h corresponde al cielo que se desea proteger, dependiendo del criterio aplicado.

Finalmente, con objeto de aclarar la manera de proceder en relación a alturas más bajas se agrega la siguiente condición:

La altura de 30° es aquella en la que, si las políticas de protección están funcionando correctamente, se espera alcanzar un resultado cuantitativo bien

⁵ VLT, 20°: https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/sciops/At_Telescope.html

GMT, 30°: https://giantmagellan.org/wp-content/uploads/2022/04/GMT-REQ-03215_Observatory-Architecture-Rev-G.pdf
(página 77)

definido, con una tolerancia muy baja en relación al valor de comparación. Tal tolerancia puede ser mayor a alturas más bajas, en la medida en que se pueda demostrar que la tendencia global agregada en todo el acimut, al modelar el cambio de las condiciones por efecto de la incorporación de nuevas fuentes, no supere los valores medidos antes de agregar esas nuevas fuentes.

7.2. El concepto de adecuado funcionamiento de un observatorio astronómico

En relación a sus condiciones ambientales un observatorio astronómico puede, en principio, realizar observaciones astronómicas en condiciones altamente desafiantes, al costo de lograr resultados con baja efectividad o eficiencia, requiriendo repetir muchas veces las observaciones para lograr buenas relaciones de señal a ruido en sus resultados, y reduciendo por tanto la capacidad de observar diversos objetos científicos en un período de tiempo dado. Esta situación sería reflejo de un deterioro de las condiciones ambientales del sitio donde opera el observatorio astronómico.

El concepto de adecuado funcionamiento está íntimamente ligado al de las condiciones habilitantes, desarrollado en la sección previa.

Diremos que 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.

7.3. El concepto de avances tecnológicos de última generación

Con el paso del tiempo la tecnología avanza y es posible que las condiciones originales existentes en un sitio astronómico sean aprovechadas para realizar mediciones científicas más precisas que las planeadas originalmente, o bien es posible que emerjan nuevas tecnologías, que permitan la realización de mediciones de interés científico no concebidas inicialmente. Normalmente en los observatorios astronómicos profesionales la implementación de estas nuevas técnicas 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. Esta compleja secuencia de pasos es de todos modos una descripción simplificada de lo que, en la práctica, puede involucrar procesos similares para una serie de subsistemas complejos que, en conjunto, conformen la nueva tecnología.

Dado lo expuesto, es claro que el desarrollo de un avance tecnológico no es un proceso inmediato. A menudo demorará varios años para cruzar las distintas etapas del proceso que va desde estudio conceptual hasta verificación científica.

Diremos que los avances tecnológicos de última generación corresponden a los que resultan de un proceso ordenado de ingeniería de sistemas, conducente a la adición de capacidades tecnológicas nuevas a un observatorio astronómico. Tales capacidades pueden aprovechar las condiciones habilitantes que dieron origen al observatorio, o pueden aprovechar condiciones ambientales estudiadas con posterioridad, no caracterizadas originalmente, que hacen posible el funcionamiento de la nueva tecnología.

En el primer caso, en que la nueva tecnología aprovecha las condiciones habilitantes que dieron origen al observatorio, no es necesario ofrecer recomendaciones pues quedan cubiertas por lo expuesto en secciones anteriores y deben ser resguardadas por Chile como parte de sus compromisos. Por otra parte, en el segundo caso, en que la nueva tecnología aprovecha condiciones no estudiadas originalmente:

Se recomienda que el Estado de Chile establezca un protocolo para la revisión de sus acuerdos con los observatorios astronómicos, de tal modo que si uno de éstos plantea la expectativa de operar nuevas tecnologías, cuyo aprovechamiento sea posible solamente si se mantienen condiciones ambientales no estudiadas previamente, y que por lo tanto no fueron declaradas al establecer un acuerdo previo, se firme un nuevo acuerdo que extienda las obligaciones de las partes. Para la firma de este acuerdo debe seguirse el mismo proceso que llevó a la firma del acuerdo original, incluyendo el involucramiento de un servicio estatal que valide las condiciones reportadas sobre las cuales se establecerá un nuevo compromiso de protección.

8. Tipos de contaminación y organismo público competente

La normativa vigente que establece el Ministerio de 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 21162 Art. 1 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”⁶.

Para los fines de este informe y en referencia a las condiciones habilitantes definidas en el Capítulo 7, se describen las principales definiciones de contaminantes según la normativa vigente y que se relacionan con las características de selección y operación de sitios astronómicos en Chile.

8.1. Contaminación Lumínica y calidad del cielo: MMA /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 DS 1/2022 del Ministerio del Medio Ambiente, el cual busca proteger las zonas de interés de investigación 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, a la que 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.

Así también la definición de Áreas con Valor Científico y de Investigación Astronómica son definidas por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación mediante la ley 21.162 quienes establecieron en el DS 1/2022 las zonas en 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

⁶ <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>

espectrales son aplicables a los alumbrados peatonales, vehicular e industrial, junto con las restricciones de cero emisión de luz por sobre los 90° y evitar la sobre iluminación. Es vital que esta norma sea efectiva y sistemáticamente fiscalizada en terreno, dado que 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.

8.2. Material particulado y gases: MMA / División Calidad del Aire

El MMA 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 como sustancias orgánicas e inorgánicas, el polvo, el hollín, metales y compuestos químicos, las que pueden ser producidas de manera natural como erupciones volcánicas, tormentas de polvo, polen, entre otras, pero también pueden ser emitidas por fuentes antropogénicas 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, pues afecta la sensibilidad de los instrumentos ya sea por concentraciones en la atmósfera o por deposición en los espejos primarios e instrumentos. 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.

8.3. Turbulencia atmosférica

En Chile la turbulencia atmosférica no es considerada como un contaminante, pues es un movimiento natural e irregular del aire. En relación a la aeronáutica es usado como parámetro para el tránsito aéreo pues se relaciona a la turbulencia de aire claro (CAT por sus siglas en inglés) (Ref. DGAC⁷). Sin embargo, en la astronomía tiene una alta relevancia pues se relaciona con la turbulencia óptica que determina la calidad de la atmósfera para la observación astronómica en el espectro electromagnético del visible e infrarrojo. Un

⁷ <https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2017/07/boletin5.pdf>

parámetro que mide la fluctuación de la turbulencia óptica es el seeing astronómico el cual cuantifica la escintilación o difuminación de las imágenes capturadas por los telescopios. El seeing astronómico es un parámetro estándar que la mayoría de los observatorios mide, tanto en los estudios de sitios para la selección de estos lugares, como también para sus posteriores operaciones.

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 and Hobbs). 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, el TKE es usado de manera 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; Osborne and Sarazin, 2018).

Algunos estudios 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 la ciencia que se espera obtener.

Se recomienda que la turbulencia atmosférica producida por fuentes no naturales pueda ser considerada como contaminante en las Áreas con Valor Científico y de Investigación Astronómica, pues puede constituir un riesgo para la calidad del cielo, degradando la atmósfera para fines de la observación astronómica y desarrollo tecnológico en Chile.

8.4. Vibraciones y sismicidad: MMA

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 en el SEIA⁸, se establecen como contaminantes al ruido y la vibración, en relación con el artículo 11 de la ley 19.300 del MMA antes mencionada. Aquí declara en su marco conceptual que la vibración corresponde a un fenómeno mecánico dado por el movimiento oscilatorio de un cuerpo en torno a su posición en equilibrio y señala como ejemplo de fuentes de vibración que interactúan con el medio ambiente, 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) que corresponde al valor peak de velocidad instantánea de la señal de vibración (positivo o negativo). Este descriptor se utiliza

⁸ https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2019/07/15/040619_guia_r_y_v_web.pdf

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 (L_v): se mide en decibels y está definido por la siguiente expresión:

$$L_v = 20 \log \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)$$

donde V es la amplitud de velocidad (rms) y V_{ref} es la velocidad de referencia. Para diferenciar los niveles de velocidad de vibración de los niveles de ruido se utiliza comúnmente la abreviación “VdB”. El nivel de velocidad de vibración típico de un área residencial es 50 VdB (con V_{ref} 1×10^{-6} inches/second o 1×10^{-8} m/s), pudiendo ser inferior. Por otra parte, el umbral de percepción humana se sitúa en torno a 65 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., 2006⁹).

Finalmente 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.

La ley 19.300 en su artículo 11, incluyó una modificación mediante la ley 21.162, letra d), la cual señala que la “Localización en o próxima a poblaciones, recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos, glaciares y **áreas con valor para la observación astronómica con fines de investigación científica**, susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar”, integrando de manera literal las áreas de interés astronómico.

Se recomienda que todas las actividades que pudiesen ser fuentes ocasionales o regulares de vibraciones y que afecten las áreas protegidas, deben ser consideradas según el marco de la normativa del Ministerio de Medio Ambiente.

8.5. Electromagnética: MMA

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 radiotelescopios trabajan en un régimen de señales extremadamente débiles, registrando densidades de flujo del orden de 10^{-29} a 10^{-26} W/m²/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

⁹ https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/docs/FTA_Noise_and_Vibration_Manual.pdf

emisiones del tipo intencional, como son transmisiones de radio, TV, telefonía móvil, enlaces satelitales, radares de vigilancia, WiFi, radiocomunicaciones de servicios aeronáuticos o marítimos, etc.

En Chile, el marco regulatorio nacional provee instrumentos para abordar este tipo de contaminación. La Ley 19.300, Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (1994), establece el derecho a un medio ambiente libre de contaminación y sienta las bases para la protección de recursos naturales y áreas de valor científico. Si bien la ley no menciona explícitamente la RFI, su definición amplia de contaminante incluye cualquier agente (físico, químico o energético) cuya presencia en el entorno en determinadas concentraciones o duraciones pueda resultar nociva. Esto permite considerar la interferencia radioeléctrica como un contaminante ambiental cuando amenaza la integridad de “recursos ambientales” no tradicionales, como la calidad del cielo para la observación astronómica.

Por su parte, la Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL), amparada por la Ley General de Telecomunicaciones (Ley 18.168), es responsable de administrar el espectro radioeléctrico y de dictar normas técnicas y resoluciones para evitar interferencias perjudiciales entre servicios de radiocomunicaciones. Reconociendo la importancia de proteger la radioastronomía, SUBTEL ha implementado medidas pioneras en Chile: destacó la creación de una zona de protección radioastronómica alrededor del observatorio ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array). En agosto de 2004, SUBTEL otorgó a las entidades operadoras de ALMA (AUI/NRAO y ESO) permisos de telecomunicaciones limitados que incluyeron condiciones especiales de protección espectral. Mediante las Resoluciones Exentas N° 1055/2004 y N° 1056/2004, y posteriormente ratificadas con las Resoluciones Exentas N° 1715/2023 y N° 1716/2023, se definió un Radio de Protección de 30 km centrado en el llano de Chajnantor (23°01' S, 67°45' W) y una Zona de Coordinación de 120 km. Coordenadas centrales de ALMA: 23°01' 40" sur y 67°45' 17" oeste (Datum WGS-84)

En la zona de protección estricta no se permite la instalación de transmisores pertenecientes a terceros que operen en las bandas de frecuencia utilizadas por ALMA, esencialmente todas aquellas por encima de 31.3 GHz (frecuencias milimétricas/submilimétricas). Adicionalmente, dentro del radio de 120 km cualquier nuevo transmisor relevante debe ser coordinado: SUBTEL no autorizará emisiones fijas en ciertas bandas sin antes evaluar, en conjunto con ALMA, su posible impacto en las observaciones. Las Resoluciones Exentas antes mencionadas ofrecen también protección al resto de los proyectos de radio-astronomía que existen dentro del Parque Astronómico de Atacama. Además, en estas resoluciones se entrega una tabla donde se indica la potencia máxima que puede tener una fuente emisora de frecuencia menor a 31.3 GHz respecto de la distancia a la cual se ubica el radiador. Las protecciones mencionadas parecen ser efectivas y suficientes hasta el momento. Sin embargo se aprecia un par de aspectos relevantes en los que éstas podrían mejorar, como por ejemplo:

- La protección considera resguardar desde la frecuencia más baja de ALMA hacia arriba en frecuencia. Sin embargo, existen proyectos de radio-astronomía en el Parque Astronómico Atacama (PAA) que operan en frecuencias por debajo de la mencionada y, por lo tanto, son susceptibles a ser contaminados. Entonces, es necesario que la SUBTEL pueda extender las protecciones mencionadas al PAA, y considerando los rangos de frecuencias de los proyectos instalados y por instalarse en el PAA.
- En las resoluciones exentas se indica de forma explícita que no es posible garantizar protección frente a interferencias generadas por sistemas que operan en bandas no atribuidas a radio-astronomía, en particular “aquellos que realicen radiocomunicación espacial”.

En relación al último punto:

Se recomienda revisar la indicación, presente en las resoluciones exentas sobre protección del espectro radioeléctrico, de que no es posible garantizar protección frente a interferencias de quienes realicen radiocomunicación espacial puesto que, como se indica en el libro blanco “ALMA Spectrum and RFI” (ALMA, 2023), las comunicaciones de los satélites de baja órbita (LEO) con estaciones terrestres pueden ser una amenaza de contaminación RFI a la operación de los radio-telescopios en suelo chileno, a medida que estos sistemas satelitales incrementen las frecuencias de operación de dichas transmisiones hacia ondas milimétricas, con el fin de aumentar el ancho de banda de comunicación. Respecto a esto, se debe considerar la posibilidad de establecer distancias mínimas desde los centros de radio-astronomía a las ubicaciones de instalación de las estaciones terrestres para los sistemas LEO.

9. Actualización de áreas astronómicas

En el presente capítulo se desarrolla cada uno de los elementos que permiten definir las áreas astronómicas en Chile. La Comisión 2020 abordó este trabajo siguiendo estos pasos:

1. Crear una tipología de “sitios” con valor científico y de investigación para la observación astronómica, los que de aquí en adelante serán llamados “Sitios Astronómicos”.
2. Definir criterios para que un área que incluya a uno o más Sitios Astronómicos sea considerada candidata a Área Astronómica.
3. Establecer una geometría, validada con criterios técnicos, que precisen la forma y tamaño de un Área Astronómica.
4. Presentar un catálogo de Áreas Astronómicas propuestas por la Comisión al Ministerio CTCL, mostrando cómo cada una de las áreas cumple con los criterios establecidos antes.

Sobre los pasos 1 y 2 la Comisión 2025 no realiza innovaciones, por encontrar adecuadas las definiciones realizadas por la Comisión 2020. Las categorías de sitios con valor científico y de investigación para la observación astronómica en Chile, A, B, C, y D se mantienen entonces como:

- A. **Sitios profesionales activos:** Observatorios científicos activos o en desarrollo activo por parte de una institución académica y/o de investigación, nacional o extranjera. Son sitios en los que se ejecutan proyectos formales aprobados y/o existen recursos institucionales, públicos o privados comprometidos.
- B. **Sitios profesionales en desarrollo:** Son sitios en los que una institución académica y/o de investigación, nacional o extranjera, planea el eventual desarrollo de un observatorio científico pero su desarrollo no se encuentra activo actualmente. Se trata de sitios ya caracterizados y con instrumentación inicial formal, o con recursos formalmente asociados a su adquisición, sobre los cuales hay un interés manifiesto de investigadores, validado por su institución, de desarrollar el sitio en una escala de tiempo predecible.
- C. **Sitios semi-profesionales (privados):** Son sitios propiedad de empresas cuyo rubro es el alojamiento de telescopios (“telescope hosting”), que albergan equipamiento científico usado por alguna institución académica y/o de investigación, nacional o extranjera.
- D. **Sitios de gran potencial profesional:** Estos sitios no cuentan con un desarrollo activo y su uso no está formalmente en los planes de ninguna institución, pero existe evidencia de que son sitios de excepcional calidad para la observación astronómica, que podrían ser propuestos por Chile para la instalación de futuros observatorios científicos.

Sin embargo, la Comisión 2025 cree necesario revisar el paso 3, que establece la geometría que precisa la forma y tamaño de las Áreas Astronómicas. Asimismo, en relación al paso 4,

se presenta brevemente el trabajo de actualización realizado, que da pie a un nuevo Catálogo Nacional de Sitios Astronómicos, en base al cual se define entonces, por aplicación de la metodología del paso 3, un Catálogo Nacional de Áreas Astronómicas.

9.1. Cálculo de las áreas astronómicas

La Comisión 2020 entendió que cada punto del Catálogo Nacional de Sitios Astronómicos define de manera independiente una geometría que llamó una “pre-Área Astronómica”. La Comisión 2025 razona del mismo modo pero ocupa directamente la nomenclatura “área astronómica”.

La forma circular de las áreas astronómicas se mantiene en relación al trabajo de la Comisión 2020. Sin embargo, la Comisión 2025 plantea que la extensión de las áreas astronómicas debe definirse de manera diferenciada según:

- Tipo de tecnología de observación predominante. Con la excepción de los sitios de Categoría D, los restantes sitios, de las categorías A, B, y C, exhibirán normalmente el predominio de un cierto tipo de tecnología de observación.
- Variables medibles: brillo del cielo (afectado por la luminosidad artificial), nivel de interferencia de radiofrecuencia (RFI), vapor de agua precipitable (PWV), estabilidad atmosférica.

Para los sitios de Categorías A y B se plantea considerar que existe un gradiente de susceptibilidad de afectación de la calidad del sitio dependiente de la distancia a posibles fuentes contaminantes. Esto permite definir anillos o zonas de protección en torno a un sitio de interés. En una zona núcleo, más próxima al sitio astronómico, operarán ciertas restricciones, mientras en una zona de protección, con forma de anillo y rodeando a la zona núcleo, operarán restricciones distintas.

Dada la importancia que cobra la definición precisa de los sitios astronómicos se presenta la siguiente indicación:

Las áreas astronómicas deben ser definidas a partir de la posición de los sitios astronómicos de interés nacional. La información debe ser mantenida en un Catálogo Nacional de Sitios Astronómicos, diferenciados por tecnología de observación (radioastronomía u observación óptica/IR), por categorías de desarrollo (A y B), con georreferenciación precisa, incorporando todos los datos necesarios para su integración en sistemas de información geográfica y en instrumentos de planificación territorial. La lista debe incluir tanto observatorios en operación (Categoría A) como proyectos en desarrollo (Categoría B), y debe mantenerse como un instrumento dinámico y flexible, abierto a la incorporación de nuevas instalaciones. Este catálogo debe someterse a una actualización periódica cada cinco años, en concordancia con los ciclos de evaluación de proyectos científicos y con los plazos habituales de la actualización de políticas

públicas en ciencia, medioambiente y ordenamiento territorial. Esta actualización deberá realizarse de manera sincronizada con la revisión de la norma de contaminación lumínica, de modo de asegurar coherencia entre la protección de los cielos y la regulación vigente.

En el caso de los sitios de Categorías C y D se plantea implementar una estrategia de protección en base a “mejores esfuerzos”, según se explica más abajo.

9.1.1. Áreas astronómicas para radioastronomía

En el caso de la radioastronomía, el parámetro más crítico corresponde a la interferencia de radiofrecuencia (RFI), ya que incluso emisiones muy débiles pueden saturar los receptores de los radiotelescopios. De acuerdo con las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R RA.769), la densidad de potencia espectral incidente de cierta interferencia, tomando como referencia una frecuencia cercana a la de la emisión de línea del Hidrógeno neutro de 1.42 GHz, no debería superar los $-255 \text{ dB(W/m}^2\text{/Hz)}$ para la observación del continuo, como es establecido en la Tabla 1 del Anexo 1 de la recomendación señalada. Para resguardar esta condición:

Para las áreas astronómicas definidas en torno a sitios de categorías A o B, en los cuales predominen las tecnologías de observación radioastronómica, se propone la definición de una zona núcleo de 30 kilómetros de radio libre de emisiones activas, que asegure un ambiente radioeléctrico protegido para observatorios como ALMA o APEX. Esta protección debería centrarse en las bandas actualmente utilizadas por ALMA y otros proyectos en operación, pero mantenerse abierta a la incorporación de nuevas frecuencias en el futuro, en función de la evolución de la investigación científica.

Complementariamente, se plantea la creación de un anillo de protección que se extienda desde los 30 hasta los 120 km medidos desde el sitio radioastronómico, dentro del cual toda nueva instalación emisora de radiofrecuencia deba ser sometida a evaluación de compatibilidad espectral y de posibles impactos acumulativos. La implementación de esta política requiere de una metodología robusta, basada en la elaboración de mapas espectrales, el monitoreo continuo mediante estaciones fijas y la realización de campañas periódicas de verificación en terreno.

9.1.2. Áreas astronómicas para tecnologías ópticas e infrarrojas

La definición de subáreas para la protección de la astronomía óptica e infrarroja debe basarse en criterios geométricos, ambientales y de preservación de la calidad de la observación posible desde el sitio. Los elementos críticos en este razonamiento son los siguientes:

El contaminante que la Comisión 2025 ha podido constatar que tiene efectos percibibles a mayores distancias es la luminosidad artificial, también llamado contaminación lumínica. Este hecho ya fue observado por la Comisión 2020 que, al considerar imágenes generadas con cámaras SQC, de medición de brillo del cielo, identificaba fuentes a cientos de kilómetros de distancia. Por otra parte, la luminosidad artificial resulta de la interacción entre la radiación electromagnética de origen artificial y la atmósfera. 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%. Este mismo razonamiento muestra que $\sim 90\%$ de la masa de la atmósfera estará contenida dentro de dos escalas de altura, ~ 17 km. Este porcentaje varía según la composición y condiciones atmosféricas locales, pero es un buen valor aproximado.

Consideremos un sitio astronómico a una cierta distancia de una fuente de emisiones lumínicas. Como se ha planteado en el Capítulo 7, el ángulo sólido que representa 50% del **cielo observable** desde cualquier sitio astronómico corresponde al casquete esférico medido desde los 30° de altura sobre el horizonte. No obstante, un rango de esos primeros 30° de cielo observable suelen no ser usados en astronomía profesional, ya que se trata de una parte del cielo fuertemente afectada por turbulencia, extinción, etc, de modo que los telescopios a menudo no son diseñados para apuntar tan abajo. Debido a esto, es común afirmar que el ángulo sólido que representa el 50% del **cielo más utilizado para la observación astronómica** desde cualquier sitio astronómico corresponde al casquete esférico medido desde los 45° de altura sobre el horizonte. (Cabe subrayar que el casquete esférico, que comienza a 45° de altura, es menor al 30% del cielo observable desde un sitio astronómico, lo que hace que cualquier restricción que cuide preferentemente este casquete esférico de 45° es extremadamente austera.)

Por otro lado, la fuente emite fotones en un rango de ángulos cenitales respecto a su vertical. Cuando el ángulo cenital es 0° , la fuente emite fotones directamente hacia arriba; cuando el ángulo cenital es 90° , la fuente emite fotones directamente hacia el horizonte. Los fotones emitidos por la fuente interactúan a continuación 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, a primer orden, puede ser seguida por otras dispersiones, a segundo y mayores órdenes, así como el fotón sigue viajando en la atmósfera. Sin embargo, esas dispersiones de 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, y porque 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 de un sitio astronómico esté puesto en reducir la posibilidad de contaminación por causa de esas dispersiones a primer orden. Por lo ya expuesto en relación a la estructura de la atmósfera, tales dispersiones van a gozar de distinta probabilidad dependiendo de la altura a la que ocurran, hallándose $\sim 90\%$ concentradas en los primeros 17 km sobre la superficie (dos escalas de altura).

El problema de proteger el 50% del cielo más usado para la investigación astronómica se puede entonces reformular como el de aumentar las posibilidades de mantener prístino un ángulo sólido de 45° en torno al cenit del sitio astronómico, protegiéndolo de las dispersiones a primer orden, originadas en los primeros 17 km de altura sobre la superficie, de fotones emitidos por una fuente lumínica a cierta distancia del sitio astronómico. Con este planteamiento podemos deducir cuál es una distancia adecuada entre el sitio astronómico y la fuente.

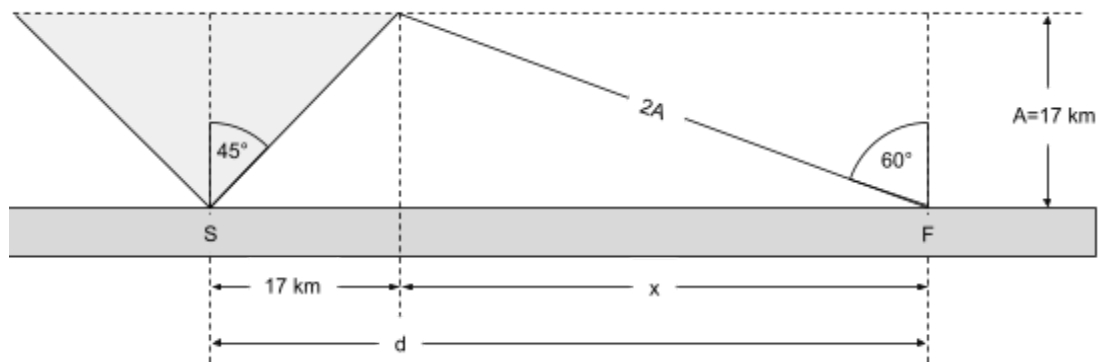


Figura 4: El sitio S se encuentra a una distancia d de la fuente F. Sobre S y F la línea vertical indica la dirección del cenit, desde donde se miden los ángulos cenitales respectivos. La distancia $2A$ en la atmósfera corresponde al doble del valor correspondiente al espesor A de atmósfera.

Esos 45° a 17 km de altura corresponden a una distancia horizontal de 17 km (ver Figura 4), ignorando la curvatura terrestre, que puede afectar ligeramente este valor para distancias mayores. Esta distancia podría ser un radio de protección mínimo adecuado si es que la fuente solamente emitiera fotones directamente hacia arriba. Sin embargo, las emisiones de la fuente no son por lo general, intencionadas en una dirección específica, pues potencialmente emite en todas direcciones. Además, mientras mayor sea la distancia a la fuente, mayor será el ángulo cenital en el cual el fotón será emitido, y mayor será la distancia que el fotón tendrá que recorrer a través de la atmósfera antes de potencialmente ser dispersado hacia el sitio astronómico. Si bien idealmente esta distancia puede ser indefinidamente grande, pues a mayor distancia más fuerte será la protección, un límite razonable viene dado por aquella distancia a la cual la cantidad de atmósfera (masa de aire, A) que el fotón tendrá que recorrer, antes de entrar al ángulo sólido de 45° en torno al cenit del sitio astronómico, aumente al menos al doble. Esto se justifica en que la absorción de fotones por parte de la atmósfera sigue una ley exponencial (Beer–Lambert), por lo que la cantidad de luz que sobrevive hasta dispersarse disminuye

rápida con la densidad atmosférica (más alta a bajas altitudes) y con la longitud del trayecto. Al duplicarse la masa de aire atravesada, la transmisión se reduce de forma no lineal, lo que disminuye significativamente la probabilidad de que un fotón sea dispersado hacia el cono cenital de 45° del sitio astronómico. Este aumento al doble de la distancia atmosférica ocurre cuando el ángulo cenital del fotón, z , emitido por la fuente es al menos 60° pues es una aproximación conocida en astronomía y meteorología que, para ángulos moderados:

$$A = \sec(z)$$

Tal consideración permite calcular la distancia adicional a la cual debe ser puesta la fuente, arrojando un resultado total de ~50 km una vez que las distancias son sumadas. Este análisis físico y geométrico justifica de manera robusta la implementación de un radio mínimo de 50 km en torno al observatorio, donde las condiciones habilitantes no cambien, como medida eficaz para preservar la calidad del cielo en el cono cenital. Dado esto:

Para las áreas astronómicas definidas en torno a sitios de categorías A o B, en los cuales predominan las tecnologías de observación óptica o infrarroja, se propone establecer una zona núcleo de 50 km en que no se desarrollen actividades que pudieran alterar las condiciones habilitantes del sitio astronómico, establecidas en sus estudios de sitio.

Un análisis de la evolución en décadas pasadas de las fuentes de contaminación lumínica de origen industrial cerca de los sitios astronómicos (comparar Cinzano et al. 2001, Falchi et al. 2016, 2023), ilustra el pronunciado crecimiento de las mismas, en áreas que se hallaban protegidas por normativas de emisiones lumínicas. Esto grafica la dificultad y elevado costo asociado a asegurar que las emisiones capaces de afectar a la operación de un observatorio astronómico se mantengan bajo un cierto nivel, particularmente ante rápidos cambios de tecnologías de iluminación y otras, usadas en la industria, no abarcadas por las normativas vigentes en cada momento. Por otra parte, la evidencia acumulada indica que fuentes aparentemente menores, como luminarias aisladas o actividades de baja escala, pueden tener un impacto tan nocivo como una gran fuente si se ubican en las cercanías inmediatas. Además, según ha mostrado ESO en un estudio reciente (ESO 2025), las actividades industriales a corta distancia de un sitio astronómico pueden generar emisiones y efectos de otro tipo (material particulado, turbulencia atmosférica, vibraciones, etc.), imposibles de mitigar más que con la distancia. Por estas razones, el establecimiento de una zona núcleo de 50 km resulta indispensable para resguardar el valor científico de los sitios astronómicos, que justifica la inversión científica y tecnológica instalada en varios de ellos, y para garantizar la operación de los observatorios en el largo plazo.

La definición de una zona núcleo en torno a los sitios astronómicos debe complementarse con áreas de protección más amplias que permitan manejar la compatibilidad de actividades humanas y orientar la planificación territorial. De este modo, se busca evitar

un deterioro progresivo de las condiciones excepcionales de observación que han convertido a Chile en un líder mundial en astronomía. Dado esto, y considerando el límite de cielo visible desde cada sitio astronómico, se considera el límite de los 30° de altura que marcan el límite del 50% de cielo observable desde el sitio astronómico.

Complementariamente, se plantea establecer un anillo de protección que se extienda desde los 50 km hasta los 120 km de radio medidos desde el sitio astronómico. Dentro de este anillo, cualquier proyecto o nueva actividad productiva debe demostrar que no generará una degradación significativa de las condiciones de observación. En el caso de la astronomía óptica e infrarroja, esto implica la obligación de 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° de elevación sobre el horizonte, medidos desde el sitio astronómico. Este umbral debe cumplirse en la totalidad del perímetro a 30° de altura y también se debe cumplir esta condición 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 de la circunferencia ni en ninguna dirección de observación a dicha altura, ni sobre ella.

El límite de los 120 km se plantea con objeto de minimizar el impacto de las emisiones cenitales de los proyectos ubicados entre 50 y 120 km que, generando dispersión lumínica hasta un máximo de 50 km de altura sobre sus instalaciones, pudieran afectar la calidad del cielo visible desde un sitio astronómico a 45° (a 50 km) hasta la mitad de esa altura angular (~22.5° a 120 km), teniendo presente la expectativa de mantener el brillo del cielo bajo el umbral indicado a 30° de altura. Los 120 km constituyen un límite conservador, pues estudios tales como el de OPCC 2021, señalan que las contribuciones principales al brillo del cielo (hasta un 99.5% del valor medido), observado desde una selección de sitios astronómicos, se obtiene al agregar el efecto de fuentes en un radio de 210 km en torno al sitio.

Un aspecto crítico en este contexto es la consideración del **impacto acumulativo**. Las recomendaciones anteriores, como las aplicadas en procesos de evaluación ambiental (SEIA), han tolerado cifras más altas de contribución lumínica individual. Sin embargo, la superposición de proyectos y actividades genera un efecto acumulado que puede comprometer seriamente la calidad de los cielos. Por ello:

Además, se propone que la suma de todas las contribuciones dentro del anillo de 50–120 km no supere un 2% del brillo natural respecto del fondo natural a 30° de elevación. Este umbral no debe ser superado en ningún punto de la circunferencia, en ninguna dirección de observación a dicha altura, ni en ningún punto de la semiesfera por sobre esos 30° garantizando así que el estándar de protección se mantenga en el largo plazo y que no se diluyan los esfuerzos de regulación por la vía de múltiples autorizaciones parciales.

Este enfoque integrado, que combina zonas núcleo con anillos de transición regulados bajo criterios estrictos de modelación y límites acumulativos, permitirá asegurar que la actividad humana pueda coexistir con la astronomía, protegiendo un patrimonio científico y cultural único en el mundo y evitando un deterioro irreversible de las condiciones excepcionales de observación que distinguen a Chile.

9.1.3. Otros factores a considerar en la definición de las áreas astronómicas

Además de los parámetros específicos que determinan la calidad de la observación en cada rango del espectro (óptico, infrarrojo y radio), existen factores ambientales y antrópicos transversales que pueden afectar la calidad de los sitios astronómicos y, por extensión, la operación de los observatorios y la sustentabilidad de sus emplazamientos. Estos factores deben ser considerados de forma integrada, ya que en muchos casos el impacto se extiende simultáneamente a distintas tecnologías.

En primer lugar, la **turbulencia atmosférica** es un factor transversal que afecta especialmente a la astronomía óptica e infrarroja, degradando la calidad de la imagen y obligando al uso de sistemas de óptica adaptativa. Su caracterización requiere instrumentación específica (MASS-DIMM, SLODAR, radiosondas) y debe integrarse como parte del monitoreo de largo plazo de cada sitio.

La presencia de partículas en la atmósfera constituye un factor crítico para la observación astronómica, particularmente en los rangos óptico e infrarrojo. El **polvo en suspensión** reduce la transparencia del cielo, incrementa la dispersión de la luz y altera las mediciones fotométricas y espectroscópicas. Además, su deposición sobre superficies ópticas y sensores acelera el deterioro de los recubrimientos reflectantes, disminuye el rendimiento de los espejos e incrementa de manera significativa los costos de operación y mantención de los telescopios. Por estas razones, se recomienda incorporar de manera sistemática mapas de concentración de aerosoles y polvo atmosférico en la delimitación de subáreas de protección, así como establecer programas de monitoreo continuo que permitan anticipar tendencias y diseñar medidas de mitigación.

Otros factores a considerar son las **vibraciones** y la **sismicidad inducida** por actividades mineras, de transporte, construcción o fuentes continuas de vibración como los parques eólicos, entre otros. Estos fenómenos afectan con especial intensidad a la interferometría que requiere estabilidad mecánica, aunque también inciden en la operación de telescopios ópticos e infrarrojos. Para el caso de ALMA, se ha estimado que una distancia mínima de 15–20 km respecto de faenas de explosivos o perforación resulta razonable para evitar impactos detectables en la calidad de las observaciones.

En síntesis, la protección de los cielos para la astronomía en Chile requiere abordar de manera coordinada la contaminación lumínica, la humedad y el vapor de agua, el polvo y los aerosoles, la turbulencia atmosférica, la interferencia de radiofrecuencia, las vibraciones y la sismicidad inducida. Estos factores transversales deben incorporarse como

criterios de evaluación y de monitoreo continuo en las distintas subáreas astronómicas, de modo que la regulación contemple no sólo los parámetros ópticos, infrarrojos o de radio por separado, sino también la interacción entre ellos y los efectos acumulativos en el tiempo.

9.2. Preservación de condiciones habilitantes en las áreas astronómicas

Según las prescripciones desarrolladas en el Capítulo 7, las áreas astronómicas son zonas en las que el Estado de Chile busca mantener ciertas condiciones habilitantes, que permitan la operación de ciertas tecnologías de observación astronómica que puedan alcanzar, con las características de efectividad y eficiencia con que fueron diseñadas, los objetivos científicos que originalmente se propusieron alcanzar.

Con objeto de decidir sobre el estado de preservación de las condiciones habilitantes, deberán hacerse las mediciones de las variables ambientales de interés según las formalidades conceptuales presentadas en el Capítulo 7, y a continuación deberá hacerse una comparación de los resultados de esas mediciones con respecto a ciertos valores de referencia.

Comparación 1: En aquellos casos en que la información de las condiciones habilitantes exista, los valores de referencia serán aquéllos, contenidos en el estudio de sitio que llevó a la selección del lugar.

Comparación 2: En los casos en que la información de las condiciones habilitantes no exista, se recomiendan como comparación los siguientes valores de referencia que, según la experiencia de la Comisión 2025, son más susceptibles de ser afectados por alteraciones de origen artificial local:

- Fracción de cobertura de nubes: 80% de noches despejadas, lo que considera tanto las noches con cielo estable (fotométrico) como inestable (Cavazzani et al., 2011).
- Porcentaje anual de noches fotométricas: 70% Este valor considera únicamente los casos de noches libres de nubes, con un cielo estable. Constituye un subconjunto del valor anterior, pero el porcentaje está planteado sobre el total de noches en un año.
- Vapor de agua precipitable: Mediana anual de 1 mm en sitios a más de 4000 m.s.n.m., y mediana anual de 3 mm en sitios a menor altura (Bustos et al., 2014; Thomas-Osip et al., 2007).
- Seeing (turbulencia) global: Mediana de 1". Este valor es más permisivo que los valores típicamente reportados en estudios de sitio, los que suelen priorizar sitios con seeing en torno a 0.8" o menor a este valor como algunos sitios en Chile (Schöck et al., 2009). Sin embargo, hasta 1" un sitio aún se considera de buena calidad para observaciones astronómicas ordinarias.
- Concentración de polvo: $2.3 \times 10^5 \text{ Nm}^{-3}$ para partículas de $0.5 \mu\text{m}$, y $0.2 \times 10^3 \text{ Nm}^{-3}$ para partículas de $5.0 \mu\text{m}$ (Lombardi et al., 2010).

- Brillo del cielo: La contaminación lumínica que altere el brillo natural del cielo prístino debe estar concentrada, si existiere, dentro de los primeros 20° de altura, pudiendo generar alteraciones de las condiciones naturales que no superen el 1% a 30° grados de altura, y no mayor a 0.1% a 45° de altura, considerando además el efecto agregado de fuentes concurrentes, las que no deben superar un cierto límite.

En relación al último punto cabe notar que un valor ampliamente citado (Cinzano et al., 2001) para el brillo natural del cielo es $V=22 \text{ mag/arcsec}^2$. Sin embargo, este valor es dependiente de la banda espectral considerada (Patat, 2003).

La restricción de 1% ya indicada debe ser aplicada en relación a cada banda espectral potencialmente afectada y teniendo presente el cálculo correcto de los porcentajes de aumento de brillo del cielo versus la magnitud medida en cada caso, como se ilustra en la siguiente tabla (ver Anexo 2):

Porcentaje de aumento del brillo del cielo por sobre su nivel natural	Brillo del cielo (mag/arcsec^2)
1	21.99
2	21.98
5	21.95
10	21.90
20	21.80
50	21.56
100	21.25

Hechas las comparaciones explicadas antes:

Los esfuerzos de protección deberán tomar una de tres posibles formas, dependiendo del estado de conservación de las condiciones de un sitio:

Caso 1: Sitios de Categoría A o B en condiciones cercanas a las condiciones habilitantes o, si esta información no existe, cercano a los rangos heurísticos: Se deben maximizar los esfuerzos por mantener tales condiciones intactas, con cero empobrecimiento respecto a las condiciones actuales, e idealmente haciendo que la diferencia entre condiciones actuales y condiciones habilitantes disminuya.

Caso 2: Sitios de Categoría A o B en condiciones lejanas a sus condiciones habilitantes o, si esta información no existe, lejanas a los rangos heurísticos: El objetivo primordial será implementar planes de descontaminación que permitan

que las condiciones gradualmente progresen en dirección de acercarse a los rangos heurísticos sugeridos.

Caso 3: Sitios de Categoría C (privados) o D (potenciales). Se considerarán como referencia los rangos heurísticos pero la protección se implementará únicamente sobre una base de mejores esfuerzos, es decir, si cierta actividad humana fuere a afectar esos parámetros ambientales y existe más de una alternativa de emplazamiento de tal actividad humana, se optará por que tal actividad se desarrolle en un sitio que no sea parte de este listado de sitios potenciales.

Con objeto de implementar correctamente el Caso 2:

Se recomienda que el Estado de Chile elabore una norma secundaria de calidad de cielo, que tenga como objeto de protección el cielo oscuro del Desierto de Atacama.

10. Conceptos, propuestas y recomendaciones

Con objeto de facilitar la rápida identificación de los elementos principales del presente documento, se resumen aquí los elementos clave presentados a lo largo del documento.

10.1. Conceptos y propuestas

1. Es convicción de la Comisión 2025 que la prioridad del Estado de Chile debe ser la protección de los sitios chilenos que ofrecen condiciones excepcionales para la observación del Universo. La presencia en Chile de observatorios astronómicos, especialmente aquellos de primer nivel mundial, es un indicador de la calidad de los sitios que el país ofrece. Por consiguiente, es esa calidad la que debe ser protegida, tanto para seguir siendo atractivos a la hora de recibir proyectos internacionales como para permitir el desarrollo de iniciativas chilenas de frontera que aprovechen esas condiciones excepcionales.
2. Las condiciones habilitantes son el conjunto de variables ambientales 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. Son las condiciones que existían cuando, como resultado de una evaluación de las características de uno o más sitios candidatos para el desarrollo de un nuevo observatorio astronómico, la organización responsable seleccionó el sitio en el cual el observatorio fue establecido.
3. En los casos en que la información de las condiciones habilitantes contenidas en el estudio de sitio exista, se debe respetar la manera en que tales condiciones fueron medidas y todo esfuerzo debe hacerse por repetir las medidas de modo de lograr una comparación lo más directa posible.
4. En el caso de condiciones en la superficie, particularmente para la variable de microsismicidad, la medición de las condiciones actuales, o simulación de cómo tales condiciones cambiarían si fueran afectadas por una nueva fuente contaminante, debe hacerse en los sitios donde operan los equipos de observación astronómica, individualizados por sus coordenadas geográficas.
5. En el caso de condiciones en la atmósfera, la medición instrumental se realizará según el estándar propio de la medición de cada variable (i.e. al cenit, o a ángulos más bajos según corresponda). Sin embargo, la simulación de cómo tales condiciones cambiarían si fueran afectadas por una nueva fuente contaminante, pondrá especial atención a todo el borde inferior de un casquete esférico de cielo a una altura angular de 30° sobre el horizonte, considerando por tanto todos los posibles ángulos de acimut.
6. La altura de 30° es aquella en la que, si las políticas de protección están funcionando correctamente, se espera alcanzar un resultado cuantitativo bien definido, con una tolerancia muy baja en relación al valor de comparación. Tal

tolerancia puede ser mayor a alturas más bajas, en la medida en que se pueda demostrar que la tendencia global agregada en todo el acimut, al modelar el cambio de las condiciones por efecto de la incorporación de nuevas fuentes, no supere los valores medidos antes de agregar esas nuevas fuentes.

7. Diremos que 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.
8. Diremos que los avances tecnológicos de última generación corresponden a los que resultan de un proceso ordenado de ingeniería de sistemas, conducente a la adición de capacidades tecnológicas nuevas a un observatorio astronómico. Tales capacidades pueden aprovechar las condiciones habilitantes que dieron origen al observatorio, o pueden aprovechar condiciones ambientales estudiadas con posterioridad, no caracterizadas originalmente, que hacen posible el funcionamiento de la nueva tecnología.
9. Las áreas astronómicas deben ser definidas a partir de la posición de los sitios astronómicos de interés nacional. La información debe ser mantenida en un Catálogo Nacional de Sitios Astronómicos, diferenciados por tecnología de observación (radioastronomía u observación óptica/IR), por categorías de desarrollo (A y B), con georreferenciación precisa, incorporando todos los datos necesarios para su integración en sistemas de información geográfica y en instrumentos de planificación territorial. La lista debe incluir tanto observatorios en operación (Categoría A) como proyectos en desarrollo (Categoría B), y debe mantenerse como un instrumento dinámico y flexible, abierto a la incorporación de nuevas instalaciones. Este catálogo debe someterse a una actualización periódica cada cinco años, en concordancia con los ciclos de evaluación de proyectos científicos y con los plazos habituales de la actualización de políticas públicas en ciencia, medioambiente y ordenamiento territorial. Esta actualización deberá realizarse de manera sincronizada con la revisión de la norma de contaminación lumínica, de modo de asegurar coherencia entre la protección de los cielos y la regulación vigente.
10. Para las áreas astronómicas definidas en torno a sitios de categorías A o B, en los cuales predominen las tecnologías de observación radioastronómica, se propone la definición de una zona núcleo de 30 kilómetros de radio libre de emisiones activas, que asegure un ambiente radioeléctrico protegido para observatorios como ALMA o APEX. Esta protección debería centrarse en las bandas actualmente utilizadas por ALMA y otros proyectos en operación, pero mantenerse abierta a la incorporación de nuevas frecuencias en el futuro, en función de la evolución de la investigación científica.
11. Complementariamente, se plantea la creación de un anillo de protección que se extienda desde los 30 hasta los 120 km medidos desde el sitio radioastronómico, dentro del cual toda nueva instalación emisora de radiofrecuencia deba ser sometida a evaluación de compatibilidad espectral y de posibles impactos acumulativos. La implementación de esta política requiere de una metodología

robusta, basada en la elaboración de mapas espectrales, el monitoreo continuo mediante estaciones fijas y la realización de campañas periódicas de verificación en terreno.

12. Para las áreas astronómicas definidas en torno a sitios de categorías A o B, en los cuales predominen las tecnologías de observación óptica o infrarroja, se propone establecer una zona núcleo de 50 km en que no se desarrollen actividades que pudieran alterar las condiciones habilitantes del sitio astronómico, establecidas en sus estudios de sitio.
13. Complementariamente, se plantea establecer un anillo de protección que se extienda desde los 50 km hasta los 120 km de radio medidos desde el sitio astronómico. Dentro de este anillo, cualquier proyecto o nueva actividad productiva debe demostrar que no generará una degradación significativa de las condiciones de observación. En el caso de la astronomía óptica e infrarroja, esto implica la obligación de 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° de elevación sobre el horizonte, medidos desde el sitio astronómico. Este umbral debe cumplirse en la totalidad del perímetro a 30° de altura y también se debe cumplir esta condición 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 de la circunferencia ni en ninguna dirección de observación a dicha altura, ni sobre ella.
14. Además, se propone que la suma de todas las contribuciones dentro del anillo de 50–120 km no supere un 2% del brillo natural respecto del fondo natural a 30° de elevación. Este umbral no debe ser superado en ningún punto de la circunferencia, en ninguna dirección de observación a dicha altura, ni en ningún punto de la semiesfera por sobre esos 30° garantizando así que el estándar de protección se mantenga en el largo plazo y que no se diluyan los esfuerzos de regulación por la vía de múltiples autorizaciones parciales.
15. Los esfuerzos de protección deberán tomar una de tres posibles formas, dependiendo del estado de conservación de las condiciones de un sitio:

Caso 1: Sitios de Categoría A o B en condiciones cercanas a las condiciones habilitantes o, si esta información no existe, cercano a los rangos heurísticos: Se deben maximizar los esfuerzos por mantener tales condiciones intactas, con cero empobrecimiento respecto a las condiciones actuales, e idealmente haciendo que la diferencia entre condiciones actuales y condiciones habilitantes disminuya.

Caso 2: Sitios de Categoría A o B en condiciones lejanas a sus condiciones habilitantes o, si esta información no existe, lejanas a los rangos heurísticos: El objetivo primordial será implementar planes de descontaminación que permitan que las condiciones gradualmente progresen en dirección de acercarse a los rangos heurísticos sugeridos.

Caso 3: Sitios de Categoría C (privados) o D (potenciales). Se considerarán como referencia los rangos heurísticos pero la protección se implementará únicamente sobre una base de mejores esfuerzos, es decir, si cierta actividad humana fuere a afectar esos parámetros ambientales y existe más de una alternativa de emplazamiento de tal actividad humana, se optará por que tal actividad se desarrolle en un sitio que no sea parte de este listado de sitios potenciales.

10.2. Recomendaciones presentadas a lo largo del documento

1. Se recomienda que el protocolo de negociación del Estado de Chile con un organismo científico que pretenda instalar un nuevo observatorio incluya una comunicación explícita de las condiciones habilitantes, contenidas en el estudio de sitio realizado por parte del organismo científico. Estas condiciones habilitantes deben ser validadas por un servicio estatal con las competencias científicas adecuadas. Tal validación debe tener lugar previo a la firma de un acuerdo del Estado de Chile con el organismo científico, y podrá o no requerir nuevas mediciones, a criterio del servicio estatal a cargo de la validación.
2. Se recomienda que el Estado de Chile establezca un protocolo que, periódicamente, como resultado de mediciones realizadas por parte de un servicio estatal, monitoree los eventuales cambios de origen artificial global, o de origen natural, global o local, a las condiciones habilitantes de los sitios con valor para la observación astronómica con fines de investigación científica.
3. Se recomienda el monitoreo de la evolución de las capacidades tecnológicas y de cómo varía el potencial alcance de sus efectos en todo tipo de variables ambientales, tanto de superficie como atmosféricas, incluso si en el pasado las capacidades necesarias para alterarlas se han encontrado muy por encima de lo permitido por las tecnologías de aplicación industrial.
4. Se recomienda que el Estado de Chile establezca un protocolo para la revisión de sus acuerdos con los observatorios astronómicos, de tal modo que si uno de éstos plantea la expectativa de operar nuevas tecnologías, cuyo aprovechamiento sea posible solamente si se mantienen condiciones ambientales no estudiadas previamente, y que por lo tanto no fueron declaradas al establecer un acuerdo previo, se firme un nuevo acuerdo que extienda las obligaciones de las partes. Para la firma de este acuerdo debe seguirse el mismo proceso que llevó a la firma del acuerdo original, incluyendo el involucramiento de un servicio estatal que valide las condiciones reportadas sobre las cuales se establecerá un nuevo compromiso de protección.
5. Se recomienda que la turbulencia atmosférica producida por fuentes no naturales pueda ser considerada como contaminante en las Áreas con Valor Científico y de Investigación Astronómica, pues puede constituir un riesgo para la calidad del cielo, degradando la atmósfera para fines de la observación astronómica y desarrollo tecnológico en Chile.

6. Se recomienda que todas las actividades que pudiesen ser fuentes ocasionales o regulares de vibraciones y que afecten las áreas protegidas, deben ser consideradas según el marco de la normativa del Ministerio de Medio Ambiente.
7. Se recomienda revisar la indicación, presente en las resoluciones exentas sobre protección del espectro radioeléctrico, de que no es posible garantizar protección frente a interferencias de quienes realicen radiocomunicación espacial puesto que, como se indica en el libro blanco “ALMA Spectrum and RFI” (ALMA, 2023), las comunicaciones de los satélites de baja órbita (LEO) con estaciones terrestres pueden ser una amenaza de contaminación RFI a la operación de los radio-telescopios en suelo chileno, a medida que estos sistemas satelitales incrementen las frecuencias de operación de dichas transmisiones hacia ondas milimétricas, con el fin de aumentar el ancho de banda de comunicación. Respecto a esto, se debe considerar la posibilidad de establecer distancias mínimas desde los centros de radio-astronomía a las ubicaciones de instalación de las estaciones terrestres para los sistemas LEO.
8. Se recomienda que el Estado de Chile elabore una norma secundaria de calidad de cielo, que tenga como objeto de protección el cielo oscuro del Desierto de Atacama.

10.3. Recomendaciones adicionales

1. En relación a la zona núcleo de 50 km para sitios de categorías A o B, en los cuales predominan las tecnologías de observación óptica o infrarroja, la Comisión 2025 recomienda que no se permita la instalación u operación de faenas industriales, urbanizaciones u otras actividades de origen antropogénico, ya que incluso pequeñas modificaciones en proyectos existentes, como cambios en los sistemas de iluminación, aumento del tránsito vehicular o emisión adicional de polvo y humedad, pueden generar deterioros irreversibles en la transparencia y oscuridad del cielo.
2. Se recomienda que cualquier fortalecimiento de la protección provista por la existencia de las áreas astronómicas se aplique de manera concurrente con la provista por la actual normativa de emisiones lumínicas (DS 1 de 2022 del Ministerio del Medio Ambiente), o sus eventuales revisiones, no abandonando la aplicación de ésta pues ofrece una protección complementaria, cuya existencia ha sido asumida al elaborar el presente documento.
3. Se recomienda que el Estado de Chile lleve a cabo un monitoreo permanente de la aparición de nuevas tecnologías espaciales que, por sus características de lanzamiento, operación o destino posterior, pudieran afectar la calidad de la observación astronómica posible desde el territorio nacional, manteniendo un liderazgo internacional en la preocupación sobre la temática y en el impulso al establecimiento de regulaciones internacionales al respecto. Entre estas tecnologías pueden mencionarse, de manera no exhaustiva, las constelaciones de satélites de comunicaciones, las propuestas de proveer luz solar nocturna por

reflexión en satélites, las iniciativas de realizar publicidad espacial, y las de efectuar espectáculos de luces desde el espacio.

11. Créditos y agradecimientos

La Comisión 2025 expresa su agradecimiento y reconocimiento a

- El Subsecretario del Ministerio CTCl, Cristian Cuevas Vega, por formalmente presidir el trabajo de la Comisión 2025, asegurando la continuidad y valoración de su trabajo y recomendaciones, a pesar de enfrentar numerosas contingencias propias de la labor ministerial.
- La Secretaría Técnica, compuesta por Nicolás Trujillo Osorio y Mariella Núñez Ávila, por su constante apoyo e iniciativa durante el trabajo realizado. Los capítulos 1 a 5 son, en gran medida, resultado del trabajo de la Secretaría Técnica, a la vez que varios insumos reunidos o elaborados para apoyar la labor de la Comisión 2025.
- Al consultor Felipe Aguilar Sandoval, por aportar insumos científicos útiles para la conceptualización formulada por la Comisión 2025.

12. Referencias

En los casos en que no se ha dado la referencia específica en el capítulo mismo, se informan a continuación las referencias generales usadas para elaborar el capítulo.

12.1. Capítulo 3

- Bustos, Ricardo & Rubio, Mónica & Otarola, Angel & Nagar, Neil. (2014). Parque Astronómico de Atacama: An Ideal Site for Millimeter, Submillimeter, and Mid-Infrared Astronomy. Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 126. 10.1086/679330.
- Garreaud, Rene. (2011). The Climate of northern Chile: Mean state, variability and trends. Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica: Serie de Conferencias. 41. 5-11.
- Unda-Sanzana, Eduardo (2020). Cálculo de la capacidad astronómica instalada en Chile. Disponible en <https://sochias.cl/material-de-interes/articulos-de-interes/>

12.2. Capítulo 4

- Barandiaran, J. (2015). Reaching for the stars? Astronomy and growth in Chile. In A. Gupta (Ed.), Science and Technology Studies in Latin America: Institutional and Policy Perspectives (pp. 89–112). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18974-3_5
- Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. (2021). *Informe de la Comisión Asesora Ministerial sobre Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica. Propuesta de áreas de valor científico para la observación astronómica*. Gobierno de Chile.
- Silva, B. (2020). Chile: A center of global astronomy, 1850–2019. In Historical Studies in the Natural Sciences, 50(4), 523–558. University of California Press. <https://doi.org/10.1525/hsns.2020.50.4.523>
- Sociedad Chilena de Astronomía (SOCHIAS). (2024). Censo astronómico 2024: Informe de resultados. SOCHIAS. <https://sochias.cl/astronomia-en-chile/censos-de-astronomos/>

12.3. Capítulo 7

- Shöck et al. 2009, Publications of the Astronomical Society of the Pacific 121, 384.

12.4. Capítulo 8

- Masciadri E., Lascaux F., Turchi A., Fini L., 2017, MNRAS, 466, 520. Doi: [10.1093/mnras/stw3111](https://doi.org/10.1093/mnras/stw3111)

- Osborn J., Sarazin M., 2018, MNRAS, 480, 1278. Doi: [10.1093/mnras/sty1898](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1898)
- Porté-Agel, F., Bastankhah, M. & Shamsoddin, S. Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review. *Boundary-Layer Meteorol* 174, 1–59 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10546-019-00473-0>
- Wallace, J.M. and Hobbs, P.V. (2006) *Atmospheric Science, an Introductory Survey*. 2nd Edition, Elsevier, Amsterdam.

12.5. Capítulo 9

- Cavazzani, S., Ortolani, S., Zitelli, V., & Maruccia, Y. (2011). Fraction of clear skies above astronomical sites: A new analysis from satellite data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 411(2), 1271–1283.
- Bustos, Ricardo & Rubio, Mónica & Otarola, Angel & Nagar, Neil. (2014). *Parque Astronómico de Atacama: An Ideal Site for Millimeter, Submillimeter, and Mid-Infrared Astronomy*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 126. 10.1086/679330.
- Thomas-Osip, J. E., McWilliam, A., Phillips, M. M., & Prieto, G. (2007). Calibration of the relationship between precipitable water vapor and 225 GHz atmospheric opacity via optical echelle spectroscopy at Las Campanas Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119(857), 697–708.
- Lombardi, G., Zitelli, V., Ortolani, S., Pedani, M., & Ghedina, A. (2010). New dust measurements at ORM, and comparison with Paranal Observatory. *Proc. SPIE* 7733.
- Shöck et al. 2009, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 121, 384.
- Cinzano, P., Falchi, F., & 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.
- Fabio Falchi et al., The new world atlas of artificial night sky brightness. *Sci. Adv.* 2, e1600377(2016). DOI: [10.1126/sciadv.1600377](https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377)
- Fabio Falchi, Felipe Ramos, Salvador Bará, Pedro Sanhueza, Marcelo Jaque Arancibia, Guillermo Damke, Pierantonio Cinzano, Light pollution indicators for all the major astronomical observatories, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 519, Issue 1, February 2023, Pages 26–33, <https://doi.org/10.1093/mnras/stac2929>
- Patat, F. (2003). UBVRI night sky brightness during sunspot maximum at ESO-Paranal. *Astronomy & Astrophysics*, 400, 1183–1198.

- OPCC, 2021. “Contribución de las fuentes artificiales al brillo superficial en el cenit en los principales observatorios astronómicos del norte de Chile”. Documento compartido a la comisión.

13. Anexos

Anexo 1: Catálogo Nacional de Sitios Astronómicos

Durante el período de trabajo de la Comisión 2025 se hizo una revisión del listado del listado de Sitios Astronómicos considerado por la Comisión 2020, materializando una de las recomendaciones presentadas por tal comisión en su informe. En lo esencial el listado ha sido mantenido intacto salvo por los siguientes cambios:

- El informe de la Comisión 2020 incluía en su sección 4.2.1 el criterio de que “La definición de una Área Astronómica debe permitir la preservación de excelentes condiciones ya existentes en la misma.” lo cual daba luego pie a ignorar la aplicación de sus recomendaciones a observatorios ubicados fuera del Desierto de Atacama. En la presente versión del listado se han eliminado tales sitios (“Calle Larga”, “El Roble”), con objeto de minimizar el riesgo de posible confusión en el uso del documento.
- Se ha eliminado un sitio que ha cesado sus operaciones desde el trabajo de la Comisión 2020 (ACT), y también un sitio donde no ha habido confirmación de que se planee desarrollar un proyecto astronómico, a la vez que no hay datos que respalden su calidad (Maricunga).
- Se ha modificado la categoría del sitio “Ventarrones”, de B a D, pues el proyecto de observatorio conocido por la Comisión 2020 se ha detenido y el futuro del sitio es incierto aunque claramente con gran potencial.
- Se ha modificado el nombre de “Mackenna” a “Vicuña Mackenna”, y de “LSST” a “Vera Rubin Observatory”.
- Se ha agregado una columna que informa el tipo de tecnología predominante en cada sitio, para que el listado permita implementar lo indicado en el Capítulo 9.
- Se han agregado sitios de Categoría D no presentes en el listado original.

Nombre del sitio	Categoría (según definiciones de la Comisión 2020)	Tecnología predominante (R: radio; O: óptica/IR)	Latitud	Longitud
Simons Observatory	A	R	-22.952942	-67.807059
Polarbear	A	R	-22.958057	-67.786008
CLASS	A	R	-22.959705	-67.787144
NANTEN2	A	R	-22.969894	-67.703091
ASTE	A	R	-22.971608	-67.70327
CCAT-p	A	R	-22.98547	-67.739799
TAO	A	O	-22.986497	-67.742382
APEX	A	R	-23.005657	-67.758123

Nombre del sitio	Categoría (según definiciones de la Comisión 2020)	Tecnología predominante (R: radio; O: óptica/IR)	Latitud	Longitud
ALMA	A	R	-23.027671	-67.754781
TARP-04	A	R	-22.958059	-67.784285
LCT	A	R	-23.028506	-67.761665
UCSC - MARI	A	R	-23.148872	-67.24072
UA - Ckoirama	A	O	-24.0893	-69.9306
ELT	A	O	-24.589124	-70.191606
Paranal	A	O	-24.627639	-70.404366
Las Campanas	A	O	-29.018214	-70.690962
GMTO	A	O	-29.048181	-70.682795
La Silla	A	O	-29.256044	-70.737123
CTIO	A	O	-30.168839	-70.805721
SOAR	A	O	-30.237737	-70.733162
Gemini	A	O	-30.2404	-70.736234
Vera Rubin Observatory	A	O	-30.244721	-70.7477
UA - Vicuña Mackenna ¹⁰ (3)	B	O	-24.4505	-70.048
Privado - SpaceObs	C	-	-22.952722	-68.180194
Privado - El Sauce	C	-	-30.471916	-70.763984
Tolar (2)	D	-	-21.9639	-70.0997
Tolonchar (2)	D	-	-23.9333	-67.9750
Ventarrones (1)	D	-	-24.3992	-70.2083
La Chira (1)	D	-	-24.5056	-70.3450
Carrizalillo (3)	D	-	-27.6047	-69.9007
La Peineta (4)	D	-	-28.0910	-70.0923

En las siguientes figuras se presentan los sitios considerados en el listado de más arriba, mostrando las zonas núcleo en torno a los sitios de Categoría A y B (Figura 5), y en una figura aparte los anillos de protección en torno a las zonas núcleo de los sitios de estas mismas categorías (Figura 5).

¹⁰ Este cerro, el más alto de la sierra Vicuña Mackenna, es a veces confundido con Armazones. Además, este sitio se ha considerado de Categoría B en atención a los convenios firmados y anuncios realizados por el Gobierno Regional de Antofagasta y la Universidad de Antofagasta entre 2024 y 2025. Sin embargo, en caso de que tales convenios no fructificaran, el sitio merecería mantener la Categoría D, considerando la referencia técnica citada entre paréntesis.



Figura 5: Zonas núcleo de 30 km para sitios astronómicos de Categorías A y B con tecnologías predominantemente de radio, y de 50 km para sitios astronómicos de Categorías A y B con tecnologías predominantemente óptica e infrarroja.

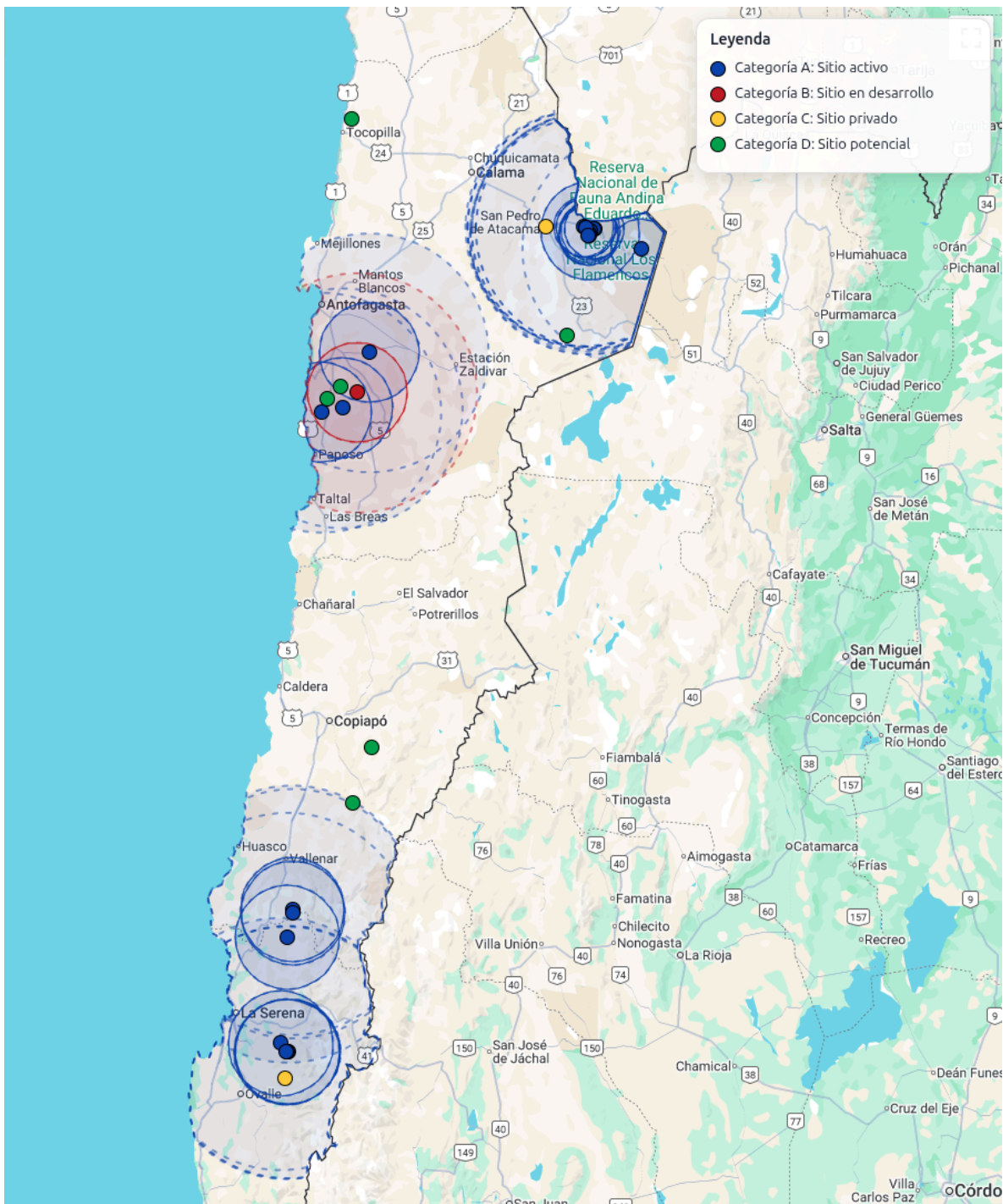


Figura 6: Anillos de protección en torno a las zonas núcleo. Estos anillos se extienden hasta 120 km para sitios astronómicos de Categorías A y B, independiente del tipo de tecnología de observación astronómica que predomine en ellos.

Referencias que sustentan la inclusión de los sitios de Categoría D

1. Kornilov, V., Safonov, B., Kornilov, M., Shatsky, N., Voziakova, O., & Potanin, S. (2012). Comparison of the scintillation noise above different observatories. *Astronomy & Astrophysics*, 546, A41
2. Schöck, M., Els, S., Riddle, R., Skidmore, W., Travouillon, T., Blum, R., Bustos, E., Chanan, G., Djorgovski, G., Gillett, P., Gregory, B., Nelson, J., Otárola, A., Seguel, J., Vasquez, J., Walker, A., Walker, D., Wang, L., & Yoshii, Y. (2009). Thirty Meter Telescope Site Testing I: Overview. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121(876), 384–395.
3. Ardeberg, A. (1983). Site selection for a Very Large Telescope. In *Proceedings of the Workshop on ESO's Very Large Telescope, Cargèse, 16–19 May 1983* (pp. 217–254). European Southern Observatory.
4. Stock, Jürgen. *Astronomical Observing Conditions in North-Central Chile (Chile Site Survey Technical Report no. 2)*. Tucson, AZ: Kitt Peak National Observatory, 1963.

En las dos últimas referencias, los textos no incluyen las coordenadas precisas de los cerros listados. Sin embargo, los documentos demuestran la existencia de estudios de los lugares, y permiten identificar sus coordenadas en base a la descripción que incluyen.

Anexo 2: Brillo del cielo aumentado por sobre su nivel natural

La ecuación de Pogson relaciona magnitudes y brillos del siguiente modo:

$$m_2 - m_1 = -2.5 \log_{10} \left(\frac{F_2}{F_1} \right)$$

Para el cielo prístino $m_1=22$ mag/arcsec² y $F_1=F_p$:

$$m_2 = 22 - 2.5 \log_{10} \left(\frac{F_2}{F_p} \right)$$

Cuando el cielo prístino se ve contaminado en $X\%$ sobre su nivel de brillo natural F_p , tenemos que:

$$F_2 = F_p \left(\frac{100 + X}{100} \right)$$

Luego:

$$m_2 = 27 - 2.5 \log_{10} (100 + X)$$

Porcentaje de aumento del brillo del cielo por sobre su nivel natural	Brillo del cielo (mag/arcsec ²)
0.1	21.9989
1	21.9892
2	21.9785
5	21.9470
10	21.8965
20	21.8020
50	21.5598
100	21.2474