

Evaluación de la contaminación lumínica en zonas astronómicas críticas del norte de Chile mediante teledetección satelital y análisis masivo de datos.

Light Pollution Assessment in Critical Astronomical Areas of Northern Chile Using Satellite Remote Sensing and Big Data Analysis

Jonathan Enrique Ruiz Apablaza^{1*}

RESUMEN

Este estudio analizó la evolución de la contaminación lumínica en los alrededores de los observatorios Cerro Paranal y ALMA (Chile) entre 2014 y 2024, usando datos satelitales del sensor VIIRS-DNB procesados en Google Earth Engine. Se establecieron zonas de análisis de 10 a 150 km de radio y se midió la radiancia artificial promedio anual con métodos estandarizados. Los resultados evidencian un aumento sostenido en ambos sitios, más pronunciado en las zonas más cercanas. En Cerro Paranal, la radiancia en el radio de 10 km pasó de prácticamente cero a 0,1014 nW/cm²/sr; en ALMA, el incremento fue similar, de 0,0008 a 0,1010 nW/cm²/sr. Ambos casos representan aumentos porcentuales superiores al 10.000%. Los cambios más notorios se registraron desde 2020, asociados al desarrollo de megaproyectos en la región y a mejoras en la sensibilidad del sensor satelital. La metodología demostró ser eficaz y replicable para monitorear zonas remotas. El estudio concluye que es urgente actualizar las normativas de contaminación lumínica, ampliar los perímetros de protección en torno a los observatorios e incorporar herramientas de teledetección en la planificación territorial, con el fin de preservar los cielos oscuros como patrimonio científico, cultural y ecológico.

Palabras clave: contaminación lumínica, observatorios astronómicos, teledetección satelital, VIIRS-DNB, conservación de cielos oscuros

ABSTRACT

This study analyzed the evolution of light pollution in the surroundings of the Cerro Paranal and ALMA observatories (Chile) between 2014 and 2024, using satellite data from the VIIRS-DNB sensor processed in Google Earth Engine. Analysis zones ranging from 10 to 150 km in radius were established, and average annual artificial radiance was measured using standardized methods. The results show a sustained increase at both sites, most pronounced in the nearest zones. At Cerro Paranal, radiance within the 10 km radius grew from virtually zero to 0.1014 nW/cm²/sr; at ALMA, the increase was similar, rising from 0.0008 to 0.1010 nW/cm²/sr. Both cases represent percentage increases exceeding 10,000%. The most notable changes were recorded from 2020 onward, linked to the development of large-scale projects in the region and improvements in the sensitivity of the satellite sensor. The methodology proved effective and replicable for monitoring remote areas. The study concludes that there is an urgent need to update light pollution regulations, expand protection perimeters around observatories, and incorporate remote sensing tools into territorial planning, with the aim of preserving dark skies as a scientific, cultural, and ecological heritage.

Keywords: light pollution, astronomical observatories, satellite remote sensing, VIIRS-DNB, dark sky conservation

¹ Universidad Bernardo O'Higgins.

*Autor de Correspondencia: jonathanr@docente.ubo.cl

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación lumínica, definida como la alteración artificial del brillo natural del cielo nocturno por la presencia de fuentes de luz de origen humano (Falchi et al., 2016), se ha consolidado en las últimas décadas como uno de los problemas ambientales emergentes con mayor repercusión sobre la astronomía, los ecosistemas nocturnos y la salud humana. Este fenómeno no solo afecta la percepción del cielo estrellado, considerado patrimonio natural y cultural de la humanidad, sino que también interfiere con los ritmos circadianos de diversas especies y altera procesos ecológicos sensibles que dependen de los ciclos naturales de luz y oscuridad (Kyba et al., 2017).

El incremento sostenido de iluminación artificial en áreas urbanas, suburbanas y rurales ha sido impulsado por el crecimiento poblacional, la expansión de la actividad productiva y la implementación de nuevas tecnologías de alumbrado, como las luminarias LED de espectro blanco-azulado. Estas últimas, si bien más eficientes energéticamente, presentan un mayor potencial de dispersión atmosférica en longitudes de onda corta, lo que intensifica el brillo del cielo incluso a grandes distancias de los focos emisores (Bará, 2016). Este tipo de contaminación se ve favorecido en regiones con atmósferas limpias, baja nubosidad y escasa humedad, como ocurre en zonas desérticas de alta altitud. Cabe señalar, no obstante, que el sensor satelital VIIRS-DNB utilizado en este estudio presenta una sensibilidad reducida precisamente en el rango espectral azul-violeta (~400–500 nm) donde estas luminarias emiten con mayor intensidad; esta limitación instrumental implica que el impacto de las fuentes LED blanco-azules puede estar subestimado en las mediciones reportadas, aspecto que se discute en detalle en la sección de consideraciones sobre sesgo espectral.

La astronomía profesional es una de las disciplinas más directamente afectadas por la contaminación lumínica, ya que la detección de objetos celestes débiles requiere condiciones de oscuridad extrema. Incrementos leves en el brillo del cielo nocturno pueden deteriorar drásticamente la calidad de las observaciones, disminuyendo la sensibilidad instrumental y limitando el rango observable del universo (Walker, 1987). En consecuencia, la preservación de cielos nocturnos oscuros ha sido reconocida internacionalmente como un objetivo prioritario para el desarrollo de la astronomía terrestre.

El impacto de la contaminación lumínica en la astronomía observacional es un fenómeno físico bien documentado que degrada la calidad de los datos de dos maneras fundamentales: reduce el contraste y disminuye la relación señal-ruido (S/N). El brillo del cielo nocturno, o skyglow, actúa como un velo de fotones parásitos que se superpone a la débil señal proveniente de objetos celestes distantes. Esto es particularmente perjudicial para estudios de objetos de bajo brillo superficial, como galaxias enanas, colas de marea galácticas o nebulosas extendidas, cuya detección depende de un contraste máximo contra un fondo lo más oscuro posible. Para instrumentos de vanguardia como los espectrógrafos del Very Large Telescope (VLT) o del futuro Extremely Large Telescope (ELT), un aumento en el brillo de fondo significa que se requieren tiempos de exposición significativamente más largos para alcanzar la misma profundidad o relación S/N, lo que reduce la eficiencia operativa del observatorio y limita la cantidad de proyectos que pueden llevarse a cabo (IAU Commission B7, 2020).

Más allá de la astronomía, la introducción masiva de luz artificial nocturna (conocida por su acrónimo en inglés, ALAN) representa una profunda alteración ecológica. En ecosistemas áridos y de alta fragilidad como el Desierto de Atacama, la vida ha evolucionado bajo ciclos naturales de luz y oscuridad durante milenios. La ALAN interfiere directamente con estos ciclos, afectando a una amplia gama de taxones. Por ejemplo, se ha demostrado que la iluminación artificial desorienta a insectos polinizadores nocturnos, como las polillas, atrayéndolos hacia las fuentes de luz y alejándolos de su función ecológica, lo que puede tener efectos en cascada sobre la flora nativa (Gaston et al., 2013). De igual manera, altera los patrones de forrajeo de mamíferos como el zorro chilla (*Lycalopex griseus*) y diversas especies de murciélagos, que dependen de la oscuridad para cazar y evitar a sus propios depredadores, modificando así las dinámicas de la red trófica del desierto (Rowse et al., 2016).

Asimismo, la pérdida del cielo oscuro tiene profundas implicaciones para la salud humana y el patrimonio cultural. La exposición a la luz durante la noche, especialmente a la de longitud de onda corta (blanco-azulada),

suprime la producción de melatonina, una hormona clave en la regulación de los ritmos circadianos humanos (Chepesiuk, 2009). Esta alteración crónica se ha asociado con un mayor riesgo de trastornos del sueño, problemas metabólicos y ciertos tipos de cáncer. Culturalmente, la oscuridad estrellada del Desierto de Atacama es un pilar de la cosmovisión de los pueblos originarios Lickanantay (Atacameños). Para ellos, el cielo no es un objeto de estudio pasivo, sino un mapa sagrado que estructura su calendario, sus prácticas agrícolas y su vida ceremonial. La desaparición de las estrellas más débiles por el velo luminoso representa, por tanto, un borrado de su patrimonio inmaterial y una desconexión con sus raíces ancestrales (Moyano & Uribe, 2012).

Iniciativas como la Declaración de La Palma (2007), el programa Starlight de la UNESCO y diversas normativas regionales han abogado por la creación de zonas de protección astronómica y la regulación de emisiones lumínicas en áreas críticas (Marín & Jafar, 2008).

En este contexto, Chile ocupa una posición estratégica a nivel mundial. Concentra cerca del 70% de la capacidad instalada de telescopios ópticos del hemisferio sur, muchos de ellos situados en el Desierto de Atacama, una región reconocida por su estabilidad atmosférica, baja humedad, mínima cobertura nubosa y escasa contaminación ambiental (Patat, 2003). Este territorio alberga observatorios de clase mundial como el Very Large Telescope (VLT), el Extremely Large Telescope (ELT) y el Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), cuya operatividad depende críticamente de la calidad del cielo nocturno.

Sin embargo, la región norte de Chile enfrenta actualmente presiones crecientes derivadas de procesos de urbanización acelerada, la expansión de la actividad minera y energética, y el despliegue de infraestructura asociada a nuevos polos de desarrollo económico. Estas transformaciones territoriales se traducen en un aumento de las emisiones de luz artificial, muchas veces fuera de norma o sin evaluación adecuada de su impacto astronómico. A pesar de que el país cuenta con regulaciones sobre contaminación lumínica desde 1998, y actualizaciones posteriores en 2012 (publicado en el Diario Oficial en 2013), la fiscalización sigue siendo limitada, especialmente en zonas alejadas de los centros urbanos y en sectores productivos estratégicos (Ministerio del Medio Ambiente, 2012).

La normativa chilena, aunque pionera en su momento con el Decreto Supremo N° 686 de 1998 y su posterior actualización en el D.S. N° 43 de 2012 (publicado en el Diario Oficial en 2013), presenta limitaciones significativas frente al actual escenario de crecimiento. Si bien la norma establece restricciones sobre el espectro de luz permitido (prohibiendo la luz blanca y favoreciendo el Sodio de Alta Presión) y la dirección del flujo luminoso (exigiendo luminarias apantalladas), su ámbito de aplicación y fiscalización ha demostrado ser insuficiente (Ministerio del Medio Ambiente, 2013). Las principales debilidades radican en que los radios de protección definidos son fijos y no se basan en modelos de propagación acumulativos, la normativa es menos exigente con la iluminación publicitaria y ornamental, y la capacidad de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) para fiscalizar en zonas remotas o en el interior de grandes faenas industriales es logísticamente compleja. Esto crea un escenario donde el cumplimiento de la norma puede ser formalmente correcto, pero el impacto agregado de múltiples proyectos sigue degradando la calidad del cielo (Sanhueza, 2021).

Los estudios científicos sobre contaminación lumínica han evidenciado una tendencia global al alza. Kyba et al. (2017) reportaron un crecimiento anual promedio del 2,2% en la superficie terrestre iluminada artificialmente, aunque investigaciones recientes basadas en ciencia ciudadana han estimado tasas de hasta un 10% en algunas regiones del mundo (Kyba et al., 2023). Sin embargo, muchas de estas investigaciones adolecen de una cobertura espacial discontinua, al depender de estaciones de monitoreo locales, o se basan en modelos teóricos sin validación empírica sistemática. Esto deja un vacío en la caracterización precisa de las dinámicas regionales de contaminación lumínica, especialmente en áreas remotas de alta sensibilidad astronómica como el altiplano chileno.

En este contexto, surge la necesidad de aplicar herramientas de teledetección satelital que permitan monitorear de manera continua, objetiva y espacialmente extensa la evolución de la radiancia artificial nocturna. El sensor VIIRS-DNB, embarcado en los satélites Suomi NPP y NOAA-20, representa una de las fuentes de datos más confiables para este propósito, al ofrecer imágenes globales mensuales de radiancia calibrada, con una resolución espacial adecuada para evaluar gradientes de contaminación lumínica (Elvidge et al., 2017).

Combinado con plataformas de procesamiento masivo como Google Earth Engine, este enfoque permite analizar tendencias temporales y espaciales con alta precisión y replicabilidad.

En función de lo anterior, el presente estudio se propuso evaluar cuantitativamente la evolución de la radiancia artificial nocturna en los entornos de los observatorios Cerro Paranal y ALMA, durante el periodo comprendido entre 2014 y 2024, utilizando datos satelitales VIIRS-DNB y herramientas de procesamiento geoespacial. La hipótesis central plantea que ambos enclaves astronómicos han sido progresivamente afectados por fuentes luminosas externas, vinculadas a la expansión territorial no regulada y a la insuficiencia de fiscalización de las normativas lumínicas vigentes. La validación de esta hipótesis permitirá aportar evidencia empírica relevante para la gestión ambiental, la planificación territorial y la protección efectiva de los cielos oscuros en Chile.

2. METODOLOGÍA

El presente estudio se llevó a cabo en el norte de Chile, una de las regiones con mayores condiciones para la observación astronómica a nivel mundial debido a su atmósfera seca, estable y limpia (Garstang, 1989; Cinzano et al., 2001). La investigación se centró específicamente en los entornos de los observatorios Cerro Paranal y ALMA, ubicados en las regiones de Antofagasta y Atacama respectivamente. El primero se sitúa a una altitud aproximada de 2.635 m s.n.m., a unos 12 km. de la costa del océano Pacífico, mientras que ALMA se emplaza en el llano de Chajnantor, a más de 5.050 m s.n.m., en una de las plataformas de observación más elevadas y remotas del planeta. Ambos sitios fueron seleccionados por su importancia científica, su localización en zonas astronómicamente privilegiadas y la creciente presión lumínica derivada de procesos de urbanización, expansión minera y desarrollo energético.

Para la evaluación de la evolución espacio-temporal de la contaminación lumínica se utilizaron imágenes satelitales provenientes del sensor VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), específicamente de su banda Day/Night Band (DNB), embarcada en los satélites Suomi NPP y NOAA-20. Esta banda ha sido ampliamente validada para el monitoreo global de radiancia nocturna artificial (Elvidge et al., 2017). Se empleó la base de datos mensual calibrada y filtrada NOAA/VIIRS/DNB/MONTHLY_V1/VCMSLCFG, accesible públicamente en la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017), que entrega productos de radiancia nocturna en unidades de nW/cm²/sr con una resolución espacial de aproximadamente 750 metros. La colección utilizada corresponde a los datos comprendidos entre enero de 2014 y diciembre de 2024.

Estas imágenes satelitales ya han sido preprocesadas por el Earth Observation Group del NOAA para eliminar señales no asociadas a fuentes permanentes de luz artificial terrestre, tales como incendios forestales, actividad pesquera, tormentas eléctricas, auroras o reflejos de luna llena, asegurando así una representación más precisa de la contaminación lumínica antropogénica (Elvidge et al., 2017). A pesar de ello, se aplicaron controles adicionales de calidad mediante la exclusión de valores considerados atípicos, definidos como aquellos que superaban tres desviaciones estándar por encima de la media anual local. Este procedimiento buscó reducir el impacto de datos espurios no eliminados por los filtros originales de la base satelital.

El área de análisis se definió mediante la generación de zonas de influencia concéntricas (buffers) de 10, 25, 50, 100 y 150 kilómetros de radio en torno al centro geométrico de cada observatorio. Estos rangos se establecieron en función de la literatura especializada sobre modelos de dispersión atmosférica de luz artificial, que indican una influencia desproporcionada de fuentes cercanas (<10 km.) sobre el brillo del cielo nocturno, especialmente en atmósferas limpias como la del Desierto de Atacama (Garstang, 1989; Cinzano et al., 2001).

Para cada buffer y año del periodo 2014–2024, se extrajeron los valores de radiancia artificial promedio utilizando algoritmos implementados en Google Earth Engine, mediante un script desarrollado en lenguaje JavaScript (ver código Anexo N°1). Se aplicó una reducción zonal por promedio aritmético para calcular la radiancia media anual de cada zona. Esta se definió como:

$$R_{media} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i$$

donde R_{media} es la radiancia promedio del área de análisis, R_i representa los valores individuales de radiancia en cada píxel dentro del buffer, y N es el número total de píxeles válidos. Previamente, todos los valores fueron corregidos por fondo natural mediante la sustracción de $0,2 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$:

$$R_{corregida} = R_{cruda} - 0,2$$

conforme a recomendaciones para eliminar el ruido de sensor sobre océanos libres de iluminación artificial (Cao & Bai, 2014; Elvidge et al., 2016). Esta corrección garantiza que los datos analizados reflejen únicamente la radiancia artificial detectable, descartando la contribución del fondo instrumentado.

Para identificar y eliminar valores atípicos, se aplicó el siguiente criterio estadístico:

$$R_i > \mu + 3\sigma$$

donde μ es la media anual local y σ su desviación estándar. Los píxeles que excedieron este límite fueron descartados automáticamente

El procesamiento automatizado en Earth Engine permitió generar una serie temporal de 11 años para cada observatorio y cada buffer. Adicionalmente, se generó un mapa temático de radiancia artificial promedio para los años 2014 y 2024 con simbología cromática estandarizada, y se elaboraron gráficos de tendencia para visualizar comparativamente la evolución de los niveles de radiancia artificial. Las imágenes satelitales mensuales originales fueron inspeccionadas manualmente en casos de anomalías estadísticas, a fin de verificar la consistencia espacial de los datos.

Como parte de la validación metodológica, los resultados obtenidos para zonas urbanas reconocidas, como Antofagasta y Calama, fueron comparados con estimaciones reportadas en investigaciones previas (Falchi et al., 2016), observándose concordancia en los patrones y rangos de radiancia. Asimismo, se contrastaron los valores más bajos de radiancia obtenidos en zonas desérticas no intervenidas con la línea base propuesta en estudios internacionales sobre cielos prístinos (Falchi et al., 2016).

Este enfoque metodológico presenta ventajas significativas: se basa en datos satelitales gratuitos, es completamente reproducible, escalable a otras regiones, y no depende de estaciones de medición in situ, lo que lo convierte en una herramienta eficiente para el seguimiento longitudinal de la contaminación lumínica en territorios remotos o de difícil acceso. Su integración con plataformas de análisis geoespacial como Google Earth Engine garantiza la posibilidad de extender su aplicación a nivel regional o global con bajo costo computacional y alta capacidad de automatización (Gorelick et al., 2017).

En suma, la combinación de sensores satelitales VIIRS-DNB, buffers concéntricos multiescalares, correcciones normalizadas por fondo natural, criterios estadísticos de control de calidad y procesamiento automatizado por scripting permitió establecer un protocolo robusto, replicable y metodológicamente fundado para la evaluación espacio-temporal de la contaminación lumínica en zonas astronómicas críticas del norte de Chile.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos revelaron un aumento significativo, sostenido y cuantificable en los niveles de radiancia artificial durante el período 2014–2024 en las áreas circundantes a los observatorios Cerro Paranal y ALMA. Este incremento fue particularmente evidente en los sectores más cercanos a las instalaciones, lo que resulta coherente con los principios de propagación de luz artificial en atmósferas limpias y secas, donde los efectos de fuentes luminosas son más intensos a distancias reducidas (Garstang, 1989; Cinzano et al., 2001).

En el caso del observatorio Cerro Paranal, la radiancia media en el buffer de 10 km. experimentó un cambio de 0,0000 nW/cm²/sr en 2014 a 0,1014 nW/cm²/sr en 2024. Esta variación representa un incremento absoluto de 0,1014 nW/cm²/sr, que constituye la métrica principal de este estudio. Dado que el valor base de 2014 era nulo (0,0000 nW/cm²/sr), el cálculo de un crecimiento relativo porcentual convencional implicaría una división por cero, resultando teóricamente en un valor infinito. Para facilitar la interpretación comparativa, se adoptó una base mínima referencial de 0,0010 nW/cm²/sr, valor de carácter metodológico y arbitrario, que permite expresar dicho incremento como un 10.140%; sin embargo, este porcentaje debe entenderse como una métrica interpretativa secundaria, subordinada al incremento absoluto, lo que evidencia una alteración drástica y acelerada de las condiciones de oscuridad natural del sitio. Por su parte, en ALMA, el buffer de 10 km. mostró un incremento desde 0,0008 nW/cm²/sr en 2014 hasta 0,1010 nW/cm²/sr en 2024, equivalente a un aumento absoluto de 0,1010 nW/cm²/sr. Dado que el valor inicial de ALMA (0,0008 nW/cm²/sr) es distinto de cero, el porcentaje fue calculado sobre dicho valor inicial observado, resultando en un 12.525% —cifra obtenida como $(0,1010/0,0008 - 1) \times 100$ —, a diferencia de Paranal donde se utilizó la base referencial de 0,0010 nW/cm²/sr. Ambos valores deben entenderse como métricas comparativas secundarias, subordinadas al incremento absoluto, confirmando una alteración profunda del entorno inmediato.

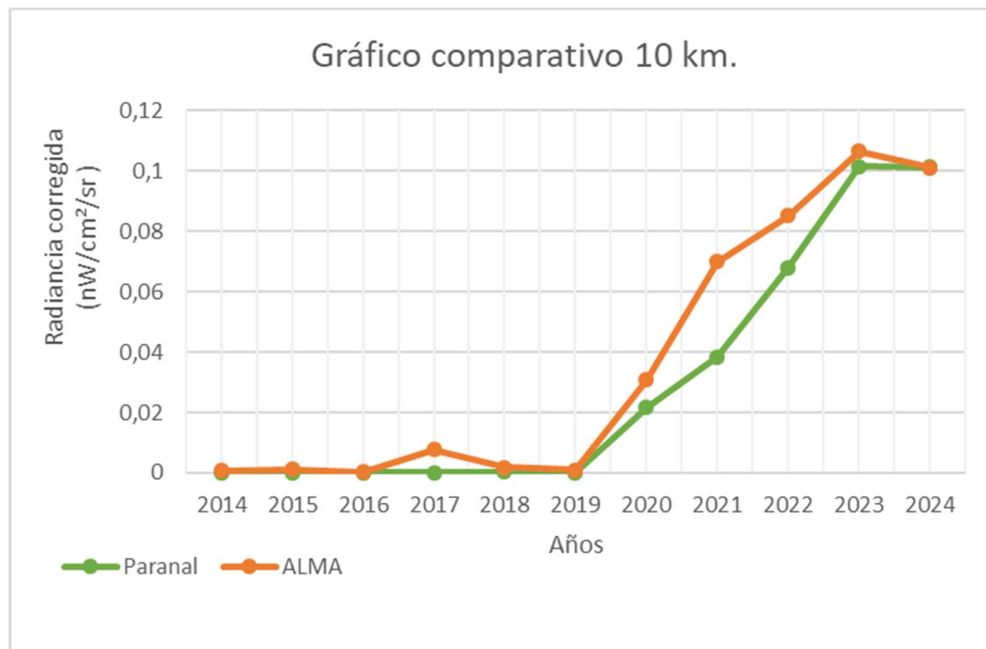


Figura 1: Niveles de radiancia artificial en 10 kilómetros. Fuente: NOAA, elaboración propia, 2025.

En los buffers intermedios (10–50 km.), también se observó una tendencia creciente. En Paranal, se pasó de 0,0011 nW/cm²/sr en 2014 a 0,0998 nW/cm²/sr en 2024, mientras que en ALMA la radiancia en esta franja aumentó de 0,0089 nW/cm²/sr a 0,11674 nW/cm²/sr. Estos incrementos equivalen a un aumento relativo de aproximadamente 8.973% en Paranal y 1.212% en ALMA. En los buffers de 50–100 km., las alzas fueron de 0,0232 a 0,1267 nW/cm²/sr en Paranal (incremento de 446%), y de 0,0183 a 0,1272 nW/cm²/sr en ALMA (aproximadamente 595%).

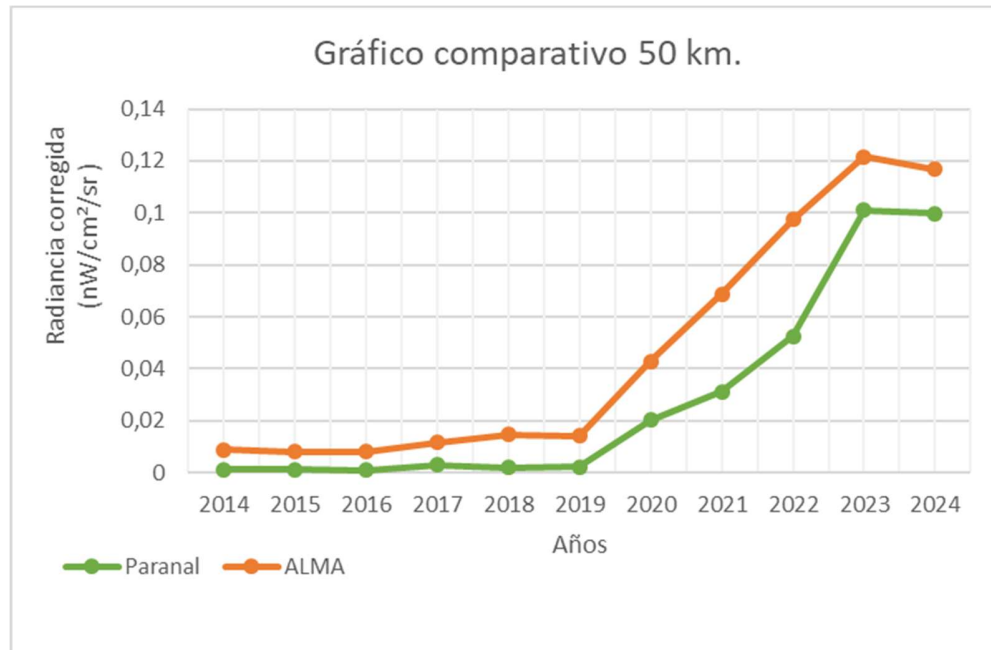


Figura 2: Niveles de radiancia artificial en 50 kilómetros. Fuente: NOAA, elaboración propia, 2025.

En cuanto a las áreas más alejadas (100–150 km.), el crecimiento fue también constante pero más moderado, lo que concuerda con los modelos de dispersión exponencial de luz en función de la distancia (Falchi et al., 2016). En Paranal, se pasó de 0,1133 nW/cm²/sr en 2014 a 0,2105 nW/cm²/sr en 2024 (un 85,8% de aumento), mientras que en ALMA los valores evolucionaron de 0,1405 a 0,2963 nW/cm²/sr, lo que representa un 110,9% de incremento.

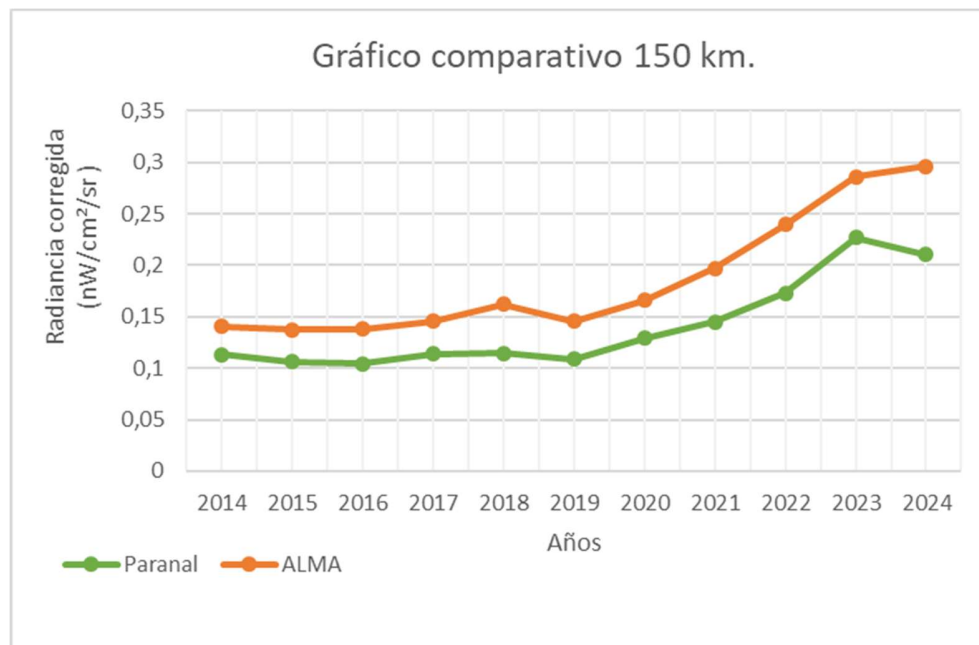


Figura 3: Niveles de radiancia artificial en 150 kilómetros. Fuente: NOAA, elaboración propia, 2025.

La evolución temporal de estos indicadores se presenta en las Figuras 1, 2 y 3, donde se evidencia un quiebre significativo en la pendiente de crecimiento a partir del año 2020. Este cambio coincide con la expansión de proyectos industriales y energéticos en las regiones aledañas, como la implementación del proyecto INNA y otras obras de infraestructura vinculadas a la minería y la generación fotovoltaica. El incremento en Paranal durante ese año fue de $0,0216 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ a $0,0385 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ (78,2% más) en el buffer de 10 km., mientras que en ALMA se observó un aumento de $0,0308$ a $0,0699 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ (127% más) en la misma franja.

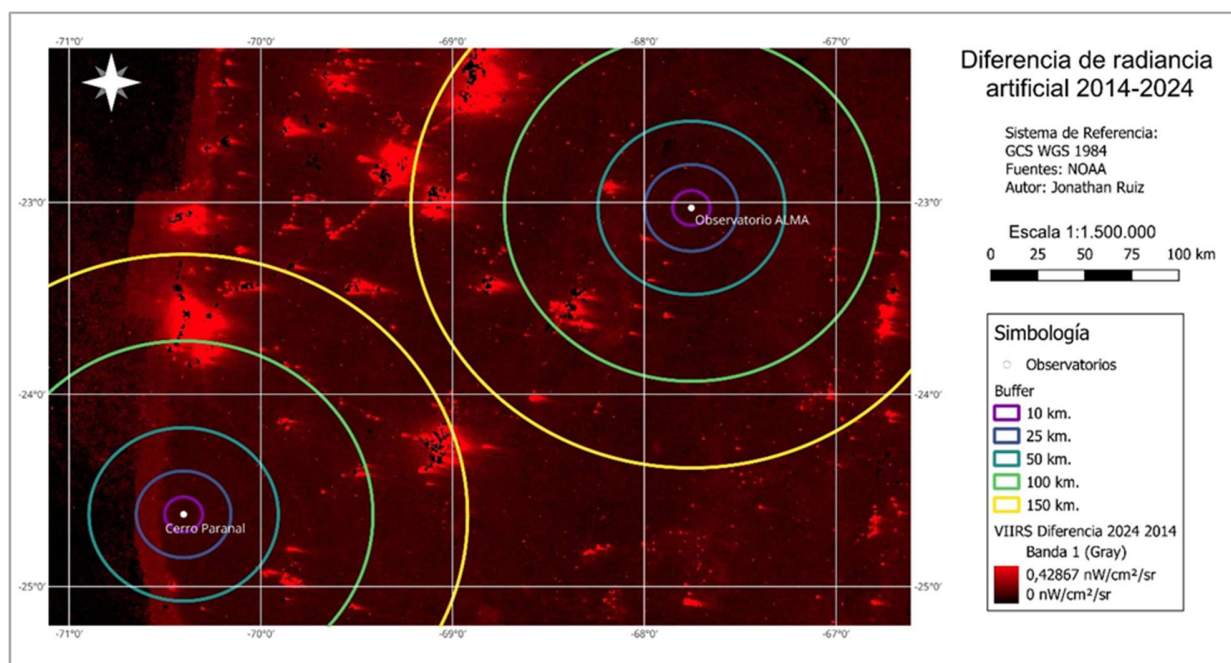


Figura 4: Mapa de diferencia de radiancia artificial entre los años 2014 y 2024. Fuente: NOAA, elaboración propia, 2025.

La Figura 4 permite observar el contraste espacial entre los mapas de radiancia artificial promedio de 2014 y 2024. Destaca el aumento de intensidad cromática en las zonas aledañas a ALMA, lo cual sugiere una presión creciente sobre su entorno inmediato. A su vez, ilustra gráficamente la evolución comparativa de los cinco buffers por observatorio, se aprecia que los intervalos entre 10 y 50 km. concentran los cambios más abruptos. Este patrón refuerza lo planteado en modelos previos sobre la relación no lineal entre intensidad lumínica y distancia en ecosistemas de cielos oscuros (Falchi et al., 2016).

Adicionalmente, el análisis estadístico descriptivo reveló un incremento sostenido de la desviación estándar (σ) en la radiancia corregida, especialmente evidente en los buffers de 100 km. y 150 km. Esta tendencia fue observada tanto en el Observatorio Paranal como en ALMA, donde σ pasó de $0,15 \text{ nW/cm}^2 \cdot \text{sr}$ en 2014 a más de $0,25 \text{ nW/cm}^2 \cdot \text{sr}$ en 2024 en el buffer de 150 km. (Figura 5).

Este comportamiento indica una mayor dispersión y heterogeneidad en la distribución espacial de las fuentes luminosas, lo que sugiere una pérdida progresiva de uniformidad en los niveles de iluminación artificial en el entorno de ambos observatorios. Tal variabilidad creciente podría estar asociada tanto al surgimiento de nuevos focos emisores como a la intensificación de los existentes, particularmente en áreas periurbanas y de desarrollo industrial. Estos hallazgos refuerzan la necesidad urgente de implementar estrategias de monitoreo continuo, planificación territorial y mitigación de la contaminación lumínica para proteger la calidad del cielo nocturno en zonas científicamente sensibles.

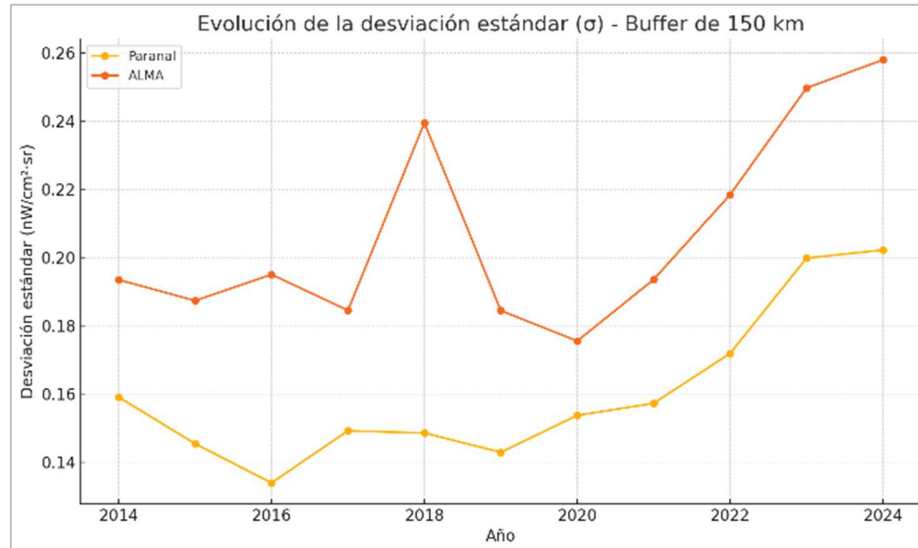


Figura 5: Gráfico de la evolución de la desviación estándar de los datos de radiancia artificial. Fuente: NOAA, elaboración propia, 2025.

En síntesis, los resultados obtenidos permiten caracterizar con precisión la expansión de la contaminación lumínica en dos de los principales polos astronómicos del hemisferio sur. La magnitud de los aumentos, especialmente en las zonas más sensibles, evidencia una amenaza directa al desempeño de los instrumentos científicos emplazados en dichos observatorios. Estos hallazgos constituyen una base empírica sólida para la formulación de políticas públicas y regulaciones específicas orientadas a proteger el patrimonio astronómico nacional, en línea con los lineamientos internacionales vigentes sobre protección de cielos oscuros.

4. DISCUSIÓN

Los hallazgos de esta investigación evidencian un aumento sostenido y espacialmente heterogéneo de la radiancia artificial nocturna en los alrededores de los observatorios Cerro Paranal y ALMA entre los años 2014 y 2024. Este crecimiento, particularmente acentuado en los buffers de 10 y 25 km., plantea una amenaza concreta a la calidad de los cielos nocturnos, cuya oscuridad es esencial para la operatividad de la astronomía profesional. La interpretación de estos resultados requiere no solo un análisis técnico, sino también un contraste con la literatura científica y una reflexión sobre las limitaciones metodológicas y las implicancias para la gestión territorial.

En el caso del Observatorio Cerro Paranal, el incremento absoluto observado de 0,1014 nW/cm²/sr en el buffer de 10 km (equivalente a un 10.140% bajo una base mínima referencial de 0,0010 nW/cm²/sr) puede explicarse, en parte, por la aparición de nuevas fuentes de luz artificial no reguladas asociadas a megaproyectos industriales y energéticos, localizados en las cercanías. Este resultado es coherente con los modelos de propagación de luz artificial en atmósferas limpias propuestos por Garstang (1989) y Cinzano et al. (2001), quienes demostraron que fuentes localizadas a menos de 20 km. pueden contribuir significativamente al aumento del brillo de cielo medido en observatorios astronómicos. La ausencia de valores positivos en Paranal antes de 2020 podría explicarse por una combinación de baja emisión real y sensibilidad limitada del sensor VIIRS-DNB, la cual fue mejorada tras las actualizaciones técnicas del sistema (Román et al., 2018).

En contraste, ALMA exhibió una radiancia inicial superior, con una progresión menos abrupta pero igualmente preocupante. El aumento absoluto de 0,1010 nW/cm²/sr en el buffer de 10 km (equivalente a un 12.525%, calculado sobre el valor inicial observado de 0,0008 nW/cm²/sr) se relaciona con el crecimiento acumulativo de zonas urbanas como San Pedro de Atacama y la actividad minera e industrial en el Salar de Atacama. Estudios como los de Falchi et al. (2016) han reportado patrones similares en entornos cercanos, confirmando que el avance de la infraestructura turística y extractiva sin criterios astronómicos de iluminación representa una amenaza directa a la calidad del cielo.

Al comparar ambos observatorios, se advierte que la tasa de incremento fue mayor en Paranal, lo que confirma la hipótesis de que las fuentes de luz cercanas son más perjudiciales que aquellas ubicadas a mayor distancia, incluso si estas últimas tienen una emisión absoluta superior. Esta relación inversa entre distancia y afectación ha sido documentada en modelos como el propuesto por Garstang (1989), quien expresó la luminancia como una función inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, corregida por la turbidez atmosférica :

$$L = \frac{I}{r^2} * e^{-Tr}$$

donde I es la intensidad de la fuente, r la distancia, y T el coeficiente de extinción atmosférica. En zonas de baja turbidez, como el Desierto de Atacama, este efecto es particularmente marcado.

Los resultados de este estudio, que revelan tasas de incremento de la radiancia de varios cientos por ciento en una década, sitúan al norte de Chile como uno de los hotspots de contaminación lumínica más preocupantes a nivel mundial. Al comparar estas cifras con las de otros grandes emplazamientos astronómicos, la magnitud del problema se hace evidente. Por ejemplo, estudios en los alrededores de los observatorios de Mauna Kea en Hawái han mostrado aumentos, pero las estrictas ordenanzas de iluminación del condado han logrado mantener las tasas de crecimiento por debajo del 10% por década (Bely, 2002). De manera similar, aunque los observatorios de Arizona y las Islas Canarias enfrentan la presión de la urbanización, las políticas activas de mitigación y el uso generalizado de luminarias de Sodio de Baja Presión han moderado el impacto (Duriscoe et al., 2007). La situación en Chile contrasta marcadamente, sugiriendo que el rápido desarrollo económico en la región, combinado con una normativa menos restrictiva o con menor fiscalización, está creando una amenaza de una escala y velocidad superiores a las observadas en otros enclaves astronómicos de primer nivel.

El quiebre en la pendiente de crecimiento observado a partir de 2020 (Figura 1, Figura 2) no puede atribuirse a un único factor, sino a una probable convergencia de causas. Por un lado, coincide con la fase de construcción y puesta en marcha de varios megaproyectos energéticos y expansiones mineras en la Región de Antofagasta, cuyas operaciones nocturnas intensivas requieren una vasta iluminación. Por otro lado, es fundamental considerar la evolución técnica del propio sensor. El producto VIIRS-DNB ha experimentado mejoras continuas en su calibración y algoritmos de procesamiento para mejorar la detección de luces tenues y la corrección de artefactos atmosféricos (Román et al., 2018). Por tanto, es plausible que parte del "salto" detectado a partir de 2020 se deba a que el sensor se volvió más sensible y capaz de registrar fuentes de luz que antes estaban por debajo de su umbral de detección. No obstante, esta mejora técnica no invalida la tendencia; al contrario, refuerza la idea de que la contaminación lumínica real de bajo nivel ya estaba presente y el satélite ahora es simplemente más capaz de cuantificarla, revelando la verdadera magnitud de una degradación que ya estaba en curso.

No obstante, es necesario considerar las limitaciones del presente estudio. Si bien el uso del sensor VIIRS-DNB constituye una fuente valiosa y sistemática de información, su resolución espacial de aproximadamente 750 metros restringe la capacidad de detección de focos de emisión pequeños o dispersos. Esto implica que fuentes luminosas de baja intensidad podrían haber quedado subrepresentadas en el análisis, especialmente en zonas periurbanas o rurales. Además, aunque se utilizaron composiciones mensuales para minimizar sesgos, la cobertura satelital puede verse afectada por condiciones meteorológicas como nubosidad alta o presencia de aerosoles, alterando la calidad de algunos registros. Otro aspecto relevante es la dependencia

de la calibración radiométrica interanual del sensor, la cual, pese a estar controlada por NOAA, puede introducir pequeñas variaciones no atribuibles a cambios reales en el terreno.

Consideraciones sobre sesgo espectral

Una limitación metodológica adicional de relevancia para este estudio radica en el sesgo espectral intrínseco del sensor VIIRS-DNB. La curva de respuesta espectral de este instrumento está centrada aproximadamente en los 700 nm (regiones roja e infrarroja cercana), con una sensibilidad decreciente hacia longitudes de onda cortas, particularmente en el rango azul-violeta (~400-500 nm) (Román et al., 2018; Elvidge et al., 2017). Esta característica tiene implicaciones directas sobre la capacidad del sensor para detectar la radiancia asociada a luminarias de tecnología LED de espectro blanco-azulado, las cuales han experimentado una expansión acelerada tanto en infraestructura pública como industrial en Chile durante el período de estudio. Las luminarias LED blanco-azules emiten fuertemente en la banda espectral del azul (~400-500 nm), que es precisamente la región donde el VIIRS-DNB presenta una sensibilidad reducida. Esta banda azul, además, corresponde a la longitud de onda más dispersada por la atmósfera terrestre (dispersión de Rayleigh $\sim \lambda^{-4}$) y, por tanto, a la más dañina para la astronomía observacional, ya que genera un brillo de cielo residual que se extiende a mayores distancias de las fuentes emisoras (Bará, 2016). La menor sensibilidad del sensor en esta región espectral implica que el impacto real de la transición tecnológica hacia LED podría ser significativamente mayor que el registrado por las mediciones satelitales presentadas en este estudio. Esta limitación metodológica constituye un sesgo conservador: las magnitudes de radiancia artificial reportadas aquí probablemente subestiman la degradación real de la calidad del cielo nocturno, especialmente en lo que respecta a la contribución del componente azul del espectro lumínico. La adopción generalizada de LED de alta temperatura de color (CCT > 4000 K) en infraestructuras urbanas, mineras y energéticas del norte de Chile representa, por tanto, una amenaza cuya cuantificación satelital puede no reflejar completamente su magnitud física y astronómica. Esta consideración sugiere cautela al interpretar las magnitudes reportadas en este estudio como valores conservadores del impacto real. Se recomienda que futuras investigaciones aborden explícitamente este sesgo espectral mediante: (i) el despliegue de fotómetros terrestres calibrados (Sky Quality Meter) equipados con filtros espectrales diferenciados que permitan discriminar la contribución del componente azul; (ii) la incorporación de sensores satelitales de mayor resolución espectral, tales como las futuras misiones hiperspectrales nocturnas, cuya capacidad de discriminar bandas espectrales individuales permitiría una caracterización más precisa de la composición espectral de la radiancia artificial; y (iii) la integración de modelos de transferencia radiativa atmosférica (como MODTRAN o libRadtran) combinados con mediciones espectrales in situ, que permitan estimar teóricamente la contribución del componente azul a partir de las mediciones satelitales disponibles y de los espectros de emisión característicos de las fuentes lumínicas predominantes en la zona de estudio.

Desde un enfoque práctico, los resultados obtenidos respaldan la necesidad urgente de revisar y ampliar los radios de protección astronómica establecidos por la normativa chilena. Actualmente, estos márgenes de resguardo son insuficientes frente a la expansión urbana y energética en el norte del país, como lo evidencian las zonas de mayor crecimiento en radiancia localizadas entre los 10 y 50 km. de los observatorios. Asimismo, es imperativo fortalecer las exigencias de evaluación ambiental para nuevos proyectos, incorporando métricas específicas de contaminación lumínica y promoviendo el uso de tecnologías de iluminación direccionada, con espectros compatibles con la astronomía.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la evolución espacial y temporal de la contaminación lumínica en las inmediaciones de los observatorios Cerro Paranal y ALMA durante el período 2014–2024, utilizando imágenes del sensor satelital VIIRS-DNB (Elvidge et al., 2017). Se buscó no solo cuantificar la intensidad del brillo artificial nocturno, sino también identificar las zonas de mayor vulnerabilidad y contrastar la evolución del fenómeno entre ambos observatorios astronómicos, en función de la proximidad a fuentes emisoras de luz artificial y la expansión de actividades industriales, turísticas o energéticas en sus entornos inmediatos.

Los resultados obtenidos permiten afirmar con claridad que existe una tendencia ascendente sostenida en los niveles de radiancia nocturna artificial en ambas zonas de estudio, consistente con las tendencias globales reportadas por Kyba et al. (2017) y actualizadas por Kyba et al. (2023). En particular, el Observatorio Paranal experimentó un incremento absoluto detectado de 0,1014 nW/cm²/sr en su buffer de 10 km (pasando de 0,0000 a 0,1014 nW/cm²/sr), lo cual, bajo una base mínima referencial de 0,0010 nW/cm²/sr, equivale a un 10.140%, mientras que ALMA mostró un incremento absoluto de 0,1010 nW/cm²/sr en el mismo rango (de 0,0008 a 0,1010 nW/cm²/sr), equivalente a un 12.525% (calculado sobre el valor inicial observado de 0,0008 nW/cm²/sr, distinto de cero, a diferencia de Paranal donde se utilizó la base referencial de 0,0010 nW/cm²/sr). Estos valores fueron calculados mediante la metodología de corrección por fondo natural propuesta por Cao & Bai (2014) y aplicando los filtros de calidad estandarizados del producto VIIRS-DNB (Román et al., 2018). Los incrementos porcentuales aquí reportados deben interpretarse como métricas secundarias de carácter comparativo, subordinadas siempre a los valores absolutos de radiancia. Estos incrementos evidencian un deterioro considerable de la oscuridad natural del cielo en ambos sitios, confirmando empíricamente la hipótesis inicial del estudio y cumpliendo con los objetivos específicos de identificar cuantitativamente los niveles de radiancia, evaluar su evolución temporal y contrastar ambos observatorios.

Es importante señalar que los incrementos reportados en este estudio corresponden a incrementos detectados por satélite y no necesariamente a incrementos físicos puros de la radiancia artificial en el territorio. El sensor VIIRS-DNB experimentó mejoras significativas en su sensibilidad y calibración a partir de aproximadamente 2020 (Román et al., 2018), lo cual implica que parte del aumento observado en el período post-2020 podría atribuirse a una mayor capacidad del instrumento para registrar fuentes de luz que previamente se encontraban por debajo de su umbral de detección, además del crecimiento real de fuentes lumínicas en el territorio. En consecuencia, se recomienda cautela interpretativa al atribuir el 100% del incremento observado exclusivamente a nuevas emisiones artificiales. Las magnitudes presentadas constituyen, por tanto, una estimación de los incrementos observados por satélite, cuya desagregación en componente instrumental y componente físico requiere investigación complementaria con instrumentación terrestre calibrada.

Uno de los hallazgos más relevantes es que la intensidad del impacto no depende exclusivamente de la densidad poblacional o de la magnitud industrial de las zonas cercanas, sino de la distancia efectiva a las fuentes de emisión y de la topografía local, concordando con los modelos de propagación lumínica desarrollados por Garstang (1989). En el caso de Paranal, el surgimiento de nuevos proyectos energéticos en la región ha provocado aumentos abruptos en la radiancia detectada, incluso superando la tasa de crecimiento de zonas más urbanizadas como las cercanas a ALMA. Este patrón confirma lo reportado por modelos teóricos (Garstang, 1989; Cinzano et al., 2001), los cuales señalan que fuentes luminosas a menos de 20 km. pueden generar un impacto desproporcionado en zonas astronómicas, fenómeno que también ha sido documentado en otros observatorios internacionales (Walker, 1987).

En términos de implicancias para la gestión ambiental y territorial del norte de Chile, los resultados plantean desafíos importantes que requieren una respuesta coordinada entre instituciones científicas y gubernamentales. El análisis sugiere que los radios de protección actualmente contemplados en la legislación chilena vigente —establecidos en el Decreto Supremo N° 686/1998 y sus modificaciones (Ministerio del Medio Ambiente, 2012)— resultan claramente insuficientes frente a la propagación real de la luz artificial documentada en este estudio. En línea con las recomendaciones internacionales de la IAU Commission B7 sobre protección de sitios astronómicos (IAU Commission B7, 2020), se propone una reformulación de estas áreas de resguardo, extendiéndolas a un mínimo de 50 km. alrededor de los observatorios, criterio que encuentra sustento en los modelos de dispersión atmosférica validados para atmósferas de baja turbidez como la del Desierto de Atacama (Patat et al., 2011).

Asimismo, resulta imperativo integrar indicadores específicos de contaminación lumínica en los procesos de evaluación de impacto ambiental (EIA) y de permisos sectoriales para proyectos industriales, turísticos o energéticos, siguiendo las directrices establecidas en la Declaración Starlight sobre la Defensa del Cielo Nocturno (UNESCO-MAB, 2007) y las experiencias internacionales documentadas en la literatura especializada (Marín & Jafar, 2008). La integración de herramientas de teledetección satelital, como la metodología VIIRS-DNB implementada en este estudio, debe convertirse en un componente estándar de los

Evaluación de la contaminación lumínica en zonas astronómicas críticas del norte de Chile mediante teledetección satelital y análisis masivo de datos.

sistemas de monitoreo ambiental, aprovechando las capacidades de plataformas como Google Earth Engine para el procesamiento automatizado de grandes volúmenes de datos geoespaciales (Gorelick et al., 2017).

El estudio revela además la necesidad urgente de implementar políticas públicas de carácter preventivo y no solo correctivo, basadas en evidencia científica sólida. La instalación de sistemas de iluminación con espectro controlado —preferentemente en rangos ámbar (580-595 nm) o rojo (>620 nm) que minimizan la dispersión atmosférica— junto con luminarias direccionadas hacia el suelo y horarios restringidos de funcionamiento, debe constituir un eje articulador de los instrumentos de planificación territorial y de diseño urbano en regiones astronómicamente sensibles (Bará, 2016). Estas medidas técnicas encuentran respaldo en las recomendaciones de la Oficina para la Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile (OPCC, 2019) y en las mejores prácticas internacionales para la preservación de cielos oscuros.

A nivel institucional, se recomienda fortalecer significativamente la fiscalización nocturna mediante la implementación de sistemas de monitoreo automatizado que combinen sensores ópticos terrestres con plataformas satelitales de observación continua. Esta estrategia debe desarrollarse en colaboración estrecha entre la OPCC, los municipios locales, las autoridades ambientales regionales y los propios observatorios astronómicos, estableciendo protocolos de respuesta rápida ante la detección de fuentes de contaminación lumínica no autorizadas o fuera de norma.

Desde una perspectiva académica y de investigación futura, se propone continuar esta línea investigativa mediante la integración complementaria de sensores satelitales VIIRS-DNB con fotómetros terrestres calibrados, siguiendo estándares internacionales como los del Sky Quality Meter (Kyba & Lolkema, 2012), y modelos de propagación atmosférica de alta resolución. Esta aproximación multi-escalar permitiría validar las mediciones remotas, corregir posibles sesgos derivados de la resolución espacial nominal de 750 metros del sensor VIIRS o de variaciones en la calibración radiométrica interanual, y desarrollar modelos predictivos más precisos para escenarios futuros de desarrollo territorial.

Adicionalmente, se sugiere incorporar un enfoque socioambiental que permita evaluar cómo las comunidades locales perciben los cambios en la calidad del cielo nocturno, qué nivel de conciencia tienen respecto del fenómeno de contaminación lumínica, y cuál es su disposición a adoptar medidas de mitigación. Esta dimensión participativa, documentada en experiencias internacionales de ciencia ciudadana (Kyba et al., 2023), podría enriquecer tanto las estrategias de conservación como las campañas de educación ambiental, generando un mayor compromiso social con la protección del patrimonio astronómico nacional.

Es fundamental reconocer que las limitaciones metodológicas del presente estudio, particularmente la resolución espacial del sensor VIIRS-DNB, su dependencia de composiciones mensuales que pueden verse afectadas por condiciones meteorológicas, y el sesgo espectral hacia longitudes de onda largas con menor sensibilidad en el rango azul (~400-500 nm), requieren ser abordadas en futuras investigaciones mediante la incorporación de sensores de mayor resolución espacial y espectral, así como la validación sistemática con mediciones terrestres. En particular, debe explicitarse que la menor sensibilidad del sensor VIIRS-DNB frente a emisiones en el rango azul del espectro puede generar una subestimación del impacto asociado a determinadas fuentes de iluminación LED de espectro blanco-azulado, cuya adopción se ha expandido aceleradamente en el territorio durante el período analizado; este sesgo condiciona la detección de dichas emisiones y, por consiguiente, la interpretación de los resultados, por lo que deberá ser considerado y, en lo posible, corregido en investigaciones futuras más específicas, mediante instrumentación terrestre con discriminación espectral y sensores satelitales de mayor resolución espectral. Las magnitudes reportadas deben considerarse, en este sentido, como estimaciones conservadoras del impacto real.

En síntesis, el presente estudio no solo evidencia un problema creciente y poco visibilizado en su magnitud real, sino que entrega insumos empíricos concretos y metodológicamente robustos para la toma de decisiones en materia de protección astronómica, ordenamiento territorial y gestión ambiental sustentable. La contaminación lumínica documentada en torno a observatorios de clase mundial como Paranal y ALMA no constituye únicamente una amenaza para la investigación científica de frontera, sino también una señal de alerta crítica sobre los límites del crecimiento urbano e industrial sin planificación integrada, evidenciando

la urgente necesidad de reconocer y proteger el cielo oscuro como patrimonio natural, cultural y estratégico de alcance nacional e internacional.

Los hallazgos de esta investigación proporcionan una base empírica para la actualización de la normativa nacional sobre contaminación lumínica, la ampliación de los perímetros de protección astronómica, y el establecimiento de criterios más rigurosos en la evaluación ambiental de nuevos proyectos de desarrollo. La implementación efectiva de estas recomendaciones resulta esencial para preservar las condiciones excepcionales que han posicionado a Chile como líder mundial en astronomía terrestre, asegurando que las inversiones multimillonarias en infraestructura científica de vanguardia puedan continuar contribuyendo al avance del conocimiento astronómico global en las décadas venideras.

BIBLIOGRAFÍA

Patat, F. (2003). Systematic optical atmospheric extinction at Paranal: First results from the FORS1 Exposure Time Calculator. *The Messenger*, 114, 20-23.

Bará, S. (2016). Anthropogenic disruption of the night sky darkness in urban and rural areas. *Royal Society Open Science*, 3(10), 160541. <https://doi.org/10.1098/rsos.160541>

Bely, P. Y. (2002). *The design and construction of large optical telescopes*. Springer Science & Business Media.

Cao, C., & Bai, Y. (2014). Quantitative analysis of VIIRS DNB nightlight point source for light power estimation and stability monitoring. *Remote Sensing*, 6(12), 11915-11935. <https://doi.org/10.3390/rs61211915>

Chepesiuk, R. (2009). Missing the dark: health effects of light pollution. *Environmental Health Perspectives*, 117(1), A20-A27.

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. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04882.x>

Duriscoe, D. M., Luginbuhl, C. B., & Moore, C. A. (2007). Measuring night-sky brightness with a wide-field CCD camera. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119(852), 192-213.

Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Zhizhin, M., & Hsu, F. C. (2017). VIIRS night-time lights: A global view of Earth at night. *International Journal of Remote Sensing*, 38(21), 5860-5879. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1342050>

Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Zhizhin, M., Hsu, F.-C., & Ghosh, T. (2016). Methods for global survey of natural gas flaring from visible infrared imaging radiometer suite data. *Energies*, 9(1), 14. <https://doi.org/10.3390/en9010014>

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

Garstang, R. H. (1989). Night-sky brightness at observatories and sites. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 101(637), 306-329. <https://doi.org/10.1086/132436>

Gaston, K. J., Bennie, J., Davies, T. W., & Hopkins, J. (2013). The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biological Reviews*, 88(4), 912-927.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine:

Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

IAU Commission B7. (2020). Guidelines for the protection of astronomical sites from light pollution. International Astronomical Union Division A.

Kyba, C. C. M., & Lolkema, D. E. (2012, September 20). A standard format for measurements of skyglow: Definition of the standard data format for skyglow observations (SDF v1.0) [Versión 1.0]. Unihedron.

Kyba, C. C. M., Altintas, O., Walker, C. E., & Newhouse, M. (2023). Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022. *Science*, 379(6629), 265-268. <https://doi.org/10.1126/science.abq7781>

Kyba, C. C. M., Kuester, T., Sánchez de Miguel, A., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., ... & Guanter, L. (2017). Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. *Science Advances*, 3(11), e1701528. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701528>

Marín, C., & Jafar, J. (Eds.). (2008). *Starlight: A common heritage*. Instituto de Astrofísica de Canarias - UNESCO.

Ministerio del Medio Ambiente. (2012). Decreto Supremo N° 43: Norma de emisión para la regulación de la contaminación lumínica. *Diario Oficial de la República de Chile* (publicado en 2013).

Moyano, R., & Uribe, C. (2012). El volcán Chiliques y el "morar-en-el-mundo" de una comunidad atacameña del norte de Chile. *Estudios Atacameños*, (43). <https://doi.org/10.4067/S0718-10432012000100010>

Oficina para la Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile (OPCC). (2019). *Manual de buenas prácticas para la prevención de la contaminación lumínica en zonas astronómicas*. CONICYT - Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

República de Chile. (1998). Decreto Supremo N° 686: Norma de emisión para la regulación de la contaminación lumínica. Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción.

Román, M. O., Wang, Z., Sun, Q., Kalb, V., Miller, S. D., Molthan, A., ... & Shrestha, R. (2018). NASA's Black Marble nighttime lights product suite. *Remote Sensing of Environment*, 210, 113-143. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.017>

Sanhueza, P. (2021, 4 de octubre). Light Pollution: The Chilean Norm [Presentación]. Taller de las Naciones Unidas/Chile sobre las Aplicaciones de los GNSS.

Patat, F., Moehler, S., O'Brien, K., Pompei, E., Bensby, T., Carraro, G., de Ugarte Postigo, A., Fox, A., Gavignaud, I., James, G., Korhonen, H., Ledoux, C., Randall, S., Sana, H., Smoker, J., Stefl, S., & Szeifert, T. (2011). Optical atmospheric extinction over Cerro Paranal. *Astronomy & Astrophysics*, 527, A91. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015537>

Rowse, E. G., Lewanzik, D., Stone, E. L., Harris, S., & Jones, G. (2016). Dark Matters: The Effects of Artificial Lighting on Bats. In C. C. Voigt & T. Kingston (Eds.), *Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World* (pp. 187-213). Springer, Cham.

UNESCO-MAB. (2007). *Declaración de La Palma en Defensa del Cielo Nocturno y el Derecho a Observar las Estrellas*. Programa el Hombre y la Biosfera (MAB) - Iniciativa Starlight. La Palma, Islas Canarias.

Walker, M. F. (1977). The effects of urban lighting on the brightness of the night sky. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 89(529). <https://doi.org/10.1086/130142>

Evaluación de la contaminación lumínica en zonas astronómicas críticas del norte de Chile mediante teledetección satelital y análisis masivo de datos.

Walker, M. F. (1987). Site testing and the development of large optical telescopes. In R. L. Millis, O. G. Franz, H. D. Ables, & C. C. Dahn (Eds.), *Identification, Optimization and Protection of Optical Telescope Sites* (pp. 128-140). Lowell Observatory.

ANEXO N°1 Código Google Earth Engine

```
// === CONFIGURACIÓN GENERAL ===
var viirs = ee.ImageCollection('NOAA/VIIRS/DNB/MONTHLY_V1/VCMSLCFG')
    .select('avg_rad')
    .filter(ee.Filter.date('2014-01-01', '2025-01-01'));

var observatorios = ee.FeatureCollection([
    ee.Feature(ee.Geometry.Point(-70.40417, -24.62722), {Observatorio:
'Paranal'}),
    ee.Feature(ee.Geometry.Point(-67.75500, -23.02900), {Observatorio:
'ALMA'})
]);

var buffers = [10000, 25000, 50000, 100000, 150000];

// === PROCESAMIENTO DE RADIANCIA Y CONTROL DE CALIDAD ===
var procesarObs = function(feat) {
    var name = feat.get('Observatorio');
    var point = feat.geometry();
    var years = ee.List.sequence(2014, 2024);

    return years.map(function(yr) {
        yr = ee.Number(yr);
        var start = ee.Date.fromYMD(yr, 1, 1);
        var end = ee.Date.fromYMD(yr.add(1), 1, 1);

        var annual = viirs.filterDate(start, end).mean();
        annual = ee.Algorithms.If(
            annual.bandNames().size().gt(0),
            annual,
            ee.Image.constant(0).rename('avg_rad').toFloat()
        );
        annual = ee.Image(annual);
        var corrected = annual.subtract(0.2).max(0).rename('rad');

        var stats = corrected.reduceRegion({
            reducer: ee.Reducer.mean().combine({
                reducer2: ee.Reducer.stdDev(),
                sharedInputs: true
            }),
            geometry: point.buffer(150000),
            scale: 1000,
            bestEffort: true
        });
    });
};
```

```
var meanVal = ee.Number(stats.get('rad_mean'));
var stdVal = ee.Number(stats.get('rad_stdDev'));
var upperBound = meanVal.add(stdVal.multiply(3));

corrected = corrected.updateMask(corrected.lte(upperBound));

var props = {
  'Observatorio': name,
  'Año': yr
};

buffers.forEach(function(d) {
  var buf = point.buffer(d);
  var mean = corrected.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean(),
    geometry: buf,
    scale: 1000,
    bestEffort: true
  }).get('rad');
  var rawVal = ee.Number(ee.Algorithms.If(mean, mean, 0));
  props['ELE_' + d + 'm'] = rawVal;
});

return ee.Feature(null, props);
});

var lista = observatorios.toList(observatorios.size());
var resultados = ee.FeatureCollection(
  lista.map(function(f) {
    return ee.List(procesarObs(ee.Feature(f)));
  }).flatten()
);

// === GRÁFICOS COMPARATIVOS AVANZADOS ===
buffers.forEach(function(d) {
  var chartComparativo = ui.Chart.feature.groups({
    features: resultados,
    xProperty: 'Año',
    yProperty: 'ELE_' + d + 'm',
    seriesProperty: 'Observatorio'
  }).setOptions({
    title: 'Comparación ELE (' + d/1000 + ' km.) entre Paranal y ALMA',
```

```
hAxis: {title: 'Año'},
vAxis: {title: 'Radiancia corregida (nW/cm²·sr)'},
lineWidth: 3,
pointSize: 5
});
print(chartComparativo);
});

['Paranal', 'ALMA'].forEach(function(obs) {
  var datos = resultados.filter(ee.Filter.eq('Observatorio', obs));
  var chartTendencia = ui.Chart.feature.byFeature({
    features: datos,
    xProperty: 'Año',
    yProperties: buffers.map(function(d) { return 'ELE_' + d + 'm'; })
  }).setOptions({
    title: 'Tendencia ELE por buffers - ' + obs,
    hAxis: {title: 'Año'},
    vAxis: {title: 'Radiancia corregida (nW/cm²·sr)'},
    lineWidth: 3,
    pointSize: 5
  });
  print(chartTendencia);
});

// === MAPAS DE COMPARACIÓN ===
[2014, 2024].forEach(function(y) {
  observatorios.evaluate(function(list) {
    list.features.forEach(function(f) {
      var nombre = f.properties.Observatorio;
      var geom = ee.Geometry.Point(f.geometry.coordinates);
      var area = geom.buffer(150000);

      var img = viirs.filterDate(ee.Date.fromYMD(y, 1, 1), ee.Date.fromYMD(y
+ 1, 1, 1)).mean();
      img = ee.Algorithms.If(
        img.bandNames().size().gt(0),
        img,
        ee.Image.constant(0).rename('avg_rad')
      );
      img = ee.Image(img).visualize({
        min: 0.1,
        max: 5,
        palette: ['000000', '0022FF', '00FFFF', 'FFFF00', 'FF0000', 'FFFFFF']
      });
    });
  });
});
```

Evaluación de la contaminación lumínica en zonas astronómicas críticas del norte de Chile mediante teledetección satelital y análisis masivo de datos.

```
        Map.addLayer(img.clip(area), {}, nombre + ' ' + y);  
    });  
});  
});  
  
Map.centerObject(observatorios, 7);
```