

# Informe técnico sobre la propuesta de proyecto del INNA al SEIA — Resumen ejecutivo

## 1. Antecedentes

El proyecto INNA (INNA - Proyecto Integrado de Infraestructura Energética para la Generación de Hidrógeno y Amoníaco Verde) ha sido admitido por el Servicio de Evaluación Ambiental, II Región de Antofagasta (SEA Antofagasta), al proceso de evaluación de impacto ambiental (EIA) el 27 de diciembre de 2024 mediante resolución número 202402001195 bajo el expediente [2163335618](#).

Los emplazamientos de los observatorios astronómicos profesionales se eligen en función de varias características que los convierten en los lugares más adecuados para albergar los telescopios más grandes, mejores y más caros. Entre estos parámetros se encuentran las características atmosféricas como **la turbulencia óptica**, la velocidad del viento, la longitud de escala exterior, **el seeing**, el ángulo isoplanático, el tiempo de coherencia, la extinción, el **polvo**, la cobertura de nubes, la humedad, el vapor de agua precipitable, la emisión del cielo, **la oscuridad del cielo**, **la contaminación lumínica**, pero también las características del suelo como las propiedades del terreno y la **sismicidad**.

Cerro Armazones fue elegido como el emplazamiento para el ELT de ESO en 2010, en base a una evaluación rigurosa de una variedad de sitios en Chile y en otros lugares del mundo. Está situado a sólo unos 25 km del Observatorio Paranal de ESO, sede del Very Large Telescope (VLT) desde la década de 1990. El extraordinario emplazamiento de Paranal es uno de los mejor caracterizados del mundo y, por tanto, sirve de referencia mundial para comparar los mejores emplazamientos astronómicos.

El extenso valle entre Paranal y Armazones fue elegido como emplazamiento en el hemisferio austral del Observatorio Cherenkov Telescope Array (CTAO-Sur) en 2018 por características similares.

Los dos nuevos observatorios, ELT y CTAO-Sur están actualmente en construcción, mientras que Paranal ha superado su 25º año de funcionamiento. Se prevé que los dos nuevos observatorios tengan una vida útil mínima de 25 años, y que Paranal dure otros 25 años.

Cualquier cambio en las características del emplazamiento de un observatorio astronómico modificará su rendimiento y, con ello, su potencial de descubrimiento científico y su productividad científica. Los observatorios de ESO son ampliamente reconocidos como los telescopios terrestres científicamente más productivos del mundo.

Por consiguiente, este informe se centra en las características de los emplazamientos que son más críticas para el rendimiento de los observatorios de ESO y que podrían verse afectadas por el proyecto INNA, es decir

- la **contaminación lumínica** del cielo nocturno debido a la instalación de fuentes de luz artificiales como parte del proyecto INNA,
- el aumento de los movimientos del suelo (**vibraciones** o ruido microsísmico) debido a la instalación de aerogeneradores como parte del proyecto INNA, y
- el aumento de las **turbulencias ópticas** (turbulencias atmosféricas) en la capa contigua al suelo debido también a la instalación de aerogeneradores.
- la **contaminación por polvo** de las superficies ópticas (como los espejos de los telescopios y las lentes de los instrumentos) debido al polvo generado por la construcción y el funcionamiento del proyecto INNA.

Se han realizado análisis detallados de estos impactos en los tres emplazamientos del observatorio (Paranal, Amazonas y CTAO-Sur). Dichos análisis muestran que el proyecto INNA ejecutado en el emplazamiento propuesto actualmente tendrá un impacto significativo y negativo en el rendimiento de todos los telescopios de ESO en el emplazamiento, de una forma que, debido a la proximidad, no podría mitigarse.

## 2. Resumen ejecutivo

### 2.1. Contaminación lumínica

El emplazamiento del Observatorio Paranal de ESO, en el desierto de Atacama, en el norte de Chile, se encuentra hoy entre los lugares de observación astronómica más oscuros del mundo, como ha confirmado un estudio independiente. Sólo 6 de los 28 observatorios profesionales del mundo se encuentran en un nivel de contaminación del cielo inferior al 1% en el cenit en las longitudes de onda visible (banda V). El segundo en la clasificación es el de Armazones.

La oscuridad del cielo es una característica fundamental de los emplazamientos de un observatorio astronómico, ya que determina el contraste entre el objeto astronómico de interés y la luminosidad del cielo. Cuanto más oscuro es el cielo, más débil es el objeto astronómico que puede examinarse. El brillo del cielo tiene dos componentes. En primer lugar, **el brillo natural del cielo**, determinado por fenómenos naturales como la luz dispersada por la Luna, la eclíptica (la llamada "luz zodiacal"), la Vía Láctea, las estrellas más brillantes y el resplandor natural de la atmósfera. En segundo lugar, **el brillo artificial del cielo**, generado por la actividad humana, al que contribuyen fuentes de luz artificiales como las farolas, los faros de los vehículos, las luces de posición y muchas otras.

La oscuridad real del cielo es determinada por la suma del brillo natural y artificial del cielo, y el telescopio no puede distinguir ambos. Cualquier contribución del brillo artificial del cielo tiene un impacto negativo en las capacidades de un telescopio. Una contaminación lumínica artificial del 1% significa que, en promedio, de cada 100 fotones procedentes del brillo natural del cielo, hay uno que procede de fuentes artificiales y que no puede distinguirse de otro fotón emitido por un objeto débil en el borde del Universo, tal y como lo detectará el telescopio más potente jamás construido —el ELT. **Cada fotón cuenta en la investigación astronómica**.

Aplicando los modelos más avanzados para la medición del brillo natural del cielo ([SkyCalc](#)) y del brillo artificial del cielo ([Illumina](#)):

- Se establece el bajo nivel de brillo artificial del cielo en los emplazamientos de Paranal, Armazones y CTAO-S, lo que hace que sigan siendo los observatorios más oscuros del mundo;
- Sin embargo, se detecta que el brillo artificial del cielo ha aumentado considerablemente en un factor de 3,0 a 3,7 entre 2012 (poco después de que se eligiera el emplazamiento para el ELT de ESO en Armazones), y 2024 debido a un número creciente de nuevas fuentes de luz artificial a distancias de entre 50 y 100 km de los emplazamientos de los observatorios:

Modelo Illumina	Paranal 2012	Paranal 2024	Armazones 2012	Armazones 2024	CTAO-S 2012	CTAO-S 2024
<b>Brillo artificial del cielo en banda V a 45 grados de elevación [mag/arcsec<sup>2</sup>]</b>	<b>27.80</b>	<b>26.60</b>	<b>27.21</b>	<b>25.78</b>	<b>27.75</b>	<b>26.35</b>
Aumento del brillo artificial del cielo en banda V a 45 grados de elevación [mag/arcsec <sup>2</sup> ]		-1.20		-1.43		-1.40
Aumento del brillo artificial del cielo en banda V a 45 grados de elevación		<b>x2.97</b>		<b>x3.71</b>		<b>x3.66</b>
<b>Brillo artificial del cielo en banda V en relación con el brillo natural del cielo a 45 grados de elevación</b>	<b>0.37%</b>	<b>1.10%</b>	<b>0.63%</b>	<b>2.34%</b>	<b>0.38%</b>	<b>1.39%</b>
Aumento del brillo artificial del cielo en banda V en relación con el brillo natural del cielo a 45 grados de elevación	+0.73%		+1.71%		+1.01%	

- Se estima que el proyecto INNA, suponiendo la instalación de luminarias ideales o "perfectas", aumentará el brillo artificial del cielo en otro +5% a +55%.

Modelo Illumina	Paranal 2024	Paranal INNA	Armazones 2024	Armazones INNA	CTAO-S 2024	CTAO-S INNA
<b>Brillo artificial del cielo en banda V a 45 grados de elevación [mag/arcsec<sup>2</sup>]</b>	<b>26.60</b>	<b>26.27</b>	<b>25.78</b>	<b>25.73</b>	<b>26.35</b>	<b>25.88</b>
Aumento del brillo artificial del cielo en banda V a 45 grados de elevación [mag/arcsec <sup>2</sup> ]		-0.33		-0.05		-0.47
Aumento del brillo artificial del cielo en banda V a 45 grados de elevación		<b>+35%</b>		<b>+5%</b>		<b>+55%</b>
<b>Brillo artificial del cielo en banda V en relación con el brillo natural del cielo a 45 grados de elevación</b>	<b>1.10%</b>	<b>1.49%</b>	<b>2.34%</b>	<b>2.45%</b>	<b>1.39%</b>	<b>2.14%</b>
Aumento del brillo artificial del cielo en banda V en relación con el brillo natural del cielo a 45 grados de elevación	+0.39%		+0.11%		+0.75%	

- Habiéndose detectado que el actual diseño de las luminarias de INNA produciría una iluminación de las instalaciones de INNA que sería 5 veces inferior a lo establecido por la norma chilena para el alumbrado de faenas industriales, se repite el cálculo asumiendo un flujo luminoso emitido por INNA 5 veces mayor, llegando a un aumento del brillo artificial del cielo en otro 23% a 269%:

Modelo Illumina	Paranal 2024	Paranal INNAx5	Armazones 2024	Armazones INNAx5	CTAO-S 2024	CTAO-S INNAx5
<b>Brillo artificial del cielo en banda V a 45 grados de elevación [mag/arcsec<sup>2</sup>]</b>	<b>26.60</b>	<b>25.49</b>	<b>25.78</b>	<b>25.56</b>	<b>26.35</b>	<b>24.93</b>
Aumento del brillo artificial del cielo en banda V a 45 grados de elevación [mag/arcsec <sup>2</sup> ]		-1.11		-0.22		-1.42
Aumento del brillo artificial del cielo en banda V a 45 grados de elevación		<b>x2.79</b>		<b>x1.23</b>		<b>x3.69</b>
<b>Brillo artificial del cielo en banda V en relación con el brillo natural del cielo a 45 grados de elevación</b>	<b>1.10%</b>	<b>3.07%</b>	<b>2.34%</b>	<b>2.88%</b>	<b>1.39%</b>	<b>5.12%</b>
Aumento del brillo artificial del cielo en banda V en relación con el brillo natural del cielo a 45 grados de elevación	+1.97%		+0.55%		+3.74%	

- Se estima que, en presencia de cirros delgados, correspondientes al 13% del valioso tiempo de observación de los observatorios, las luminarias cercanas de INNA amplificarán el brillo artificial del cielo en un factor de 1,5 a 2,8:

Illumina Model	Paranal 2024	Paranal INNA clouds	Armazones 2024	Armazones INNA clouds	CTAO-S 2024	CTAO-S INNA clouds
<b>V-band artificial sky brightness at 45 deg elevation [mag/arcsec<sup>2</sup>]</b>	<b>26.60</b>	<b>25.68</b>	<b>25.78</b>	<b>25.33</b>	<b>26.35</b>	<b>25.21</b>
V-band artificial sky brightness at 45 deg elevation increase [mag/arcsec <sup>2</sup> ]		-0.92		-0.45		-1.14
V-band artificial sky brightness at 45 deg elevation increase		<b>x2.33</b>		<b>x1.52</b>		<b>x2.84</b>
<b>V-band artificial sky brightness relative to natural sky brightness at 45 deg elevation</b>	<b>1.10%</b>	<b>2.56%</b>	<b>2.34%</b>	<b>3.54%</b>	<b>1.39%</b>	<b>3.95%</b>
V-band artificial sky brightness increase relative to natural sky brightness at 45 deg elevation	+1.46%		+1.21%		+2.56%	

En presencia de nubes altas más gruesas este factor de amplificación puede aumentar hasta 6,3 (equivalente a un 9% de aumento respecto al brillo natural del cielo a 45 grados de elevación) para CTAO-S.

En el caso de un aumento de 5 veces del flujo luminoso y la presencia de cirros delgados, el factor de amplificación aumentaría a 10,0 (o 12,4% de aumento en relación con el brillo del cielo natural a 45 grados de elevación) para CTAO-S.

Teniendo en cuenta estos resultados, concluimos que el impacto del proyecto INNA en el rendimiento de los observatorios Paranal, Armazones y CTAO-S sería sustancial.

En particular, se considera inaceptable que el Observatorio Paranal, que hoy en día es probablemente el último observatorio del mundo con un nivel de contaminación del cielo del 1% (con respecto a su brillo natural) en la banda V a 45 grados de elevación, sea degradado por el proyecto INNA a un nivel de contaminación del cielo de entre 1,5% y 3,1%.

Asimismo, se considera inaceptable que el mayor telescopio óptico terrestre del mundo, el ELT de ESO en Cerro Armazones (Chile), tenga que funcionar con un nivel de contaminación del cielo del 2,5% (con respecto a su brillo natural) en la banda V a 45 grados de elevación debido al proyecto INNA y a otros proyectos cercanos instalados recientemente.

De hecho, nuestros modelos muestran que, en el caso del ELT de Armazones, unos simples ajustes en las luminarias de las fuentes luminosas cercanas podrían restablecer un nivel de contaminación cercano al 1% (y reducir aún más el nivel de contaminación en Paranal).

## 2.2. Vibraciones

ESO opera en Cerro Paranal desde hace más de 20 años el Interferómetro del VLT (VLTI), que combina de forma coherente la luz recogida por los cuatro Telescopios Unitarios (UT) de 8,2 m del VLT, así como por cuatro Telescopios Auxiliares (AT) adicionales y móviles de 1,8 m.

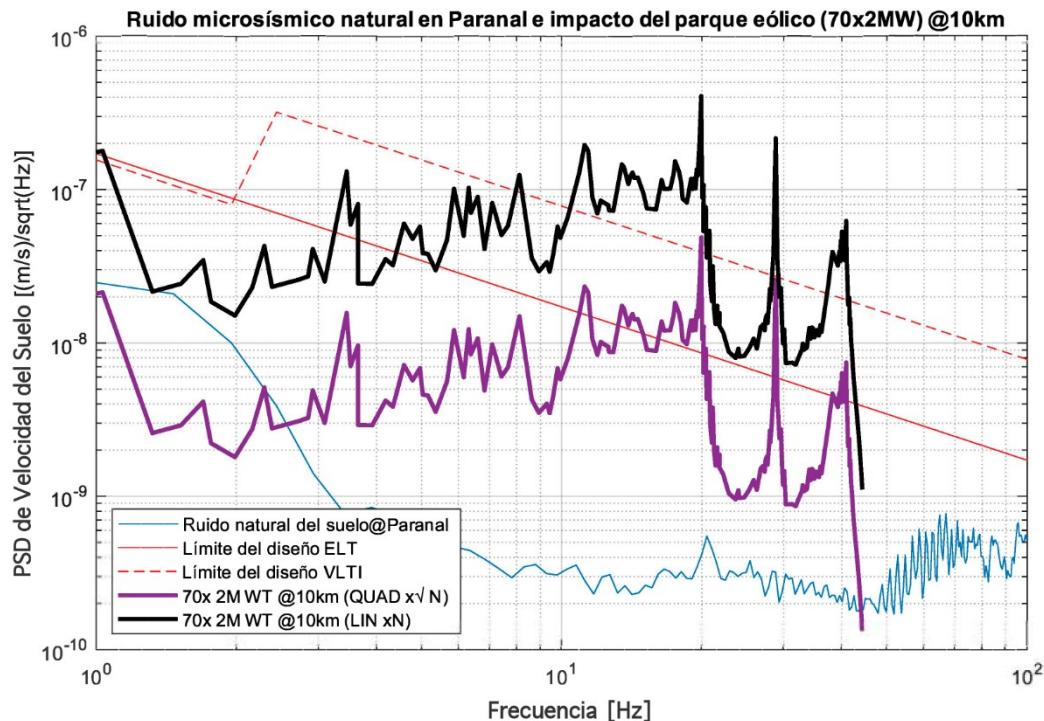
Este conjunto interferométrico es similar a un radiointerferómetro como ALMA, pero funciona en las longitudes de onda ópticas (de 0,6 a 13 $\mu$ m). Esto impone combinar los haces ópticos físicamente en lugar de electrónica y digitalmente (utilizando superordenadores para correlacionar las señales) limitando la posibilidad de corregir las perturbaciones mediante post-procesamiento. Esto exige un entorno muy estable.

El VLTI es la única instalación del mundo en la que podemos estudiar el Universo en el rango óptico con una resolución angular inferior a 1 milisegundo de arco (1 segundo de arco =  $5,10^{-6}$  radianes) con la sensibilidad que proporcionan los telescopios muy grandes.

Además, el futuro ELT de 39 m de diámetro que se está construyendo en Armazones cuenta con un espejo primario segmentado (M1) formado por 798 segmentos hexagonales que debe mantenerse perfectamente alineado (en fase) durante las observaciones para obtener la resolución espacial única que podemos alcanzar con el telescopio óptico más grande del mundo.

En primer lugar, ESO ha establecido la línea de base del **verdadero nivel de vibraciones naturales del suelo en la plataforma del observatorio de Paranal**, que es significativamente inferior a lo que informa la empresa para INNA. El estudio elaborado por ESO aborda únicamente las vibraciones generadas por los aerogeneradores (en particular, las aceleraciones verticales) y que se transmiten a través del suelo. En este estudio se ha utilizado un modelo simplificado, suponiendo un suelo duro (apropiado para el territorio de Paranal), una señal sísmica coherente o incoherente introducida por los 70 aerogeneradores y dos modelos diferentes para la propagación de la densidad espectral de potencia a través del suelo.

Nuestro análisis del impacto del parque eólico INNA sobre las vibraciones del suelo en Paranal muestra que **es probable que se superen los límites definidos por el diseño tanto del Interferómetro del VLT (VLTI) como del Extremely Large Telescope (ELT)**.



Teniendo en cuenta estos resultados, concluimos que el impacto del proyecto INNA en el rendimiento del VLTI de Paranal y del ELT de los observatorios de Armazones sería sustancial.

### 2.3. Turbulencia atmosférica

La turbulencia vuelve borrosas las imágenes producidas por los telescopios. El tamaño de una imagen de larga exposición de una estrella en el detector es proporcional a esta turbulencia y se caracteriza por la anchura total-media-máxima de dicha imagen, que se denomina "seeing" y se mide normalmente en segundos de arco (1/3600 grados o  $5,10^{-6}$  radianes). Cuanto mayor es la turbulencia presente en la atmósfera, mayor es el seeing y más borrosa es la imagen.

El desierto chileno de Atacama es uno de los mejores lugares de la Tierra para la observación astronómica. La razón principal es la corriente fría de Humboldt en el Pacífico que crea una capa de inversión térmica sobre el océano que bloquea la mayor parte de la turbulencia en los pocos cientos de metros sobre el mar. Los observatorios de Paranal y Armazones se encuentran entre los mejores del mundo en términos de seeing, siendo característicos los valores de "buen seeing" entre 0,3 y 0,5. Cualquier degradación del seeing supondría una pérdida dramática de la capacidad científica astronómica del mundo. Esto también es válido cuando se utiliza la óptica adaptativa, ya que esta corrección (imperfecta) es más eficiente cuanto menor es la turbulencia atmosférica.

Las turbinas eólicas y, más aún, los grandes parques eólicos, generan estelas turbulentas. Las investigaciones han encontrado indicios de estelas a distancias cada vez mayores que alcanzan valores de 55 a 100 km. Los 3 emplazamientos del observatorio recibirán energía cinética turbulenta inyectada por las estelas de los parques eólicos. En condiciones de **buen seeing**, las estimaciones muestran **un aumento del 17% para un seeing muy bueno de 0,5 segundos de arco y del 43% para 0,3 segundos de arco**. Esto ocurre precisamente para los vientos procedentes del s sureste, que es precisamente cuando se dan las condiciones de mejor seeing. **Los episodios típicos de "buen seeing" pasarán de estar en el rango de 0,3-0,5 segundos de arco a 0,4-0,6 segundos segundos de arco**. Esto provocará un deterioro sustancial de la capacidad de realizar observaciones del cielo profundo con excelente resolución, para las que telescopios como el VLT y el ELT fueron precisamente diseñados.

Por otra parte, la planta fotovoltaica (FV) de INNA creará un efecto negativo adicional en la calidad de la imagen al aumentar las turbulencias en los emplazamientos del observatorio. Se suelen medir temperaturas de unos 3 grados por encima de los paneles fotovoltaicos, lo que genera energía cinética térmica que se convierte en energía cinética turbulenta, la cual contribuye al seeing. Nuestras estimaciones muestran **valores de dicha energía cinética turbulenta similares a los generados por los parques eólicos, lo que degradará aún más la visión en los emplazamientos del observatorio**.

## 2.4. Polvo

Mediante mediciones directas, se ha establecido que el Observatorio Paranal es un lugar extremadamente limpio, con niveles muy bajos de partículas de polvo:

	Paranal MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Paranal MP2.5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
Calidad del aire medida en 2001-2006 (media anual)	1.74	0.55

No se han observado variaciones ni tendencias a largo plazo, por lo que concluimos que la calidad del aire medida aquí corresponde también a la calidad del aire actual.

La tabla siguiente resume la línea de base actual para la calidad del aire en el Observatorio Paranal y la cantidad de contaminantes adicionales modelizados para el tercer año de construcción del proyecto INNA. Encontramos un aumento de contaminantes de +75% y +73% para MP10 y MP2.5 debido al proyecto INNA, respectivamente.

	Paranal MP10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Paranal MP2.5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
Calidad del aire medida en 2001-2006 (media anual)	1.74	0.55
Calidad del aire modelizada durante el 3er año de construcción de INNA (media anual)	1.30	0.40
Aumento de contaminantes durante el 3er año de la construcción de INNA	+75%	+73%
Calidad del aire modelizada durante el 3er año de construcción de INNA (P98 24 h)	9.50	3.10

Como era de esperar por su proximidad, **el CTAO-S es el telescopio que se verá más afectado por la construcción del proyecto INNA**. En particular, debido a que los espejos de los telescopios del CTAO-S estarán directamente expuestos al polvo al no disponer de edificios de protección.

El impacto de un aumento de +75% del contenido de polvo en el aire debido a la construcción del proyecto INNA, se traduce directamente en una degradación más rápida de la reflectividad de los espejos de los telescopios y, por tanto, en una pérdida de la capacidad de captación de luz de todos los telescopios. Además de una pérdida de superficie colectora efectiva o de transmisión de alrededor del 2,5%, la acumulación de polvo incrementaría los costes de mantenimiento y una pérdida adicional del 2% del tiempo de observación debido a los procedimientos de limpieza que tendrían que realizarse con mayor frecuencia.

Observatorio Paranal	Transmisión Real [%]
Con el actual MP10 durante un periodo de 4 años (semana 1 - 208)	78.2%
Con MP10+75% durante un periodo de 4 años (semana 1 - 208)	74.9%
Reducción de la transmisión durante 4 años de construcción del INNA	-4.1%
Con MP10 actual durante 1 año (semana 1 - 52)	82.3%
Con MP10+75% durante el 3er año de construcción de INNA (semana 1 - 52)	80.2%
Reducción de la transmisión durante el 3er año de construcción de INNA	-2.5%

El aumento masivo de la emisión de partículas sólidas ("polvo") durante la fase de construcción y funcionamiento del proyecto INNA incrementará la deposición de partículas de polvo en los espejos y otras superficies ópticas de los telescopios de ESO en los emplazamientos de Paranal, Armazones y CTAO-S. Las simulaciones han demostrado que el polvo se propagará desde los emplazamientos de INNA a los tres observatorios.

Para mantener el rendimiento de los tres observatorios, habrá que aumentar en consecuencia las actividades de limpieza de los espejos o, en su defecto, aceptar niveles inferiores de rendimiento de los telescopios (es decir, una menor reflectividad).

Teniendo en cuenta estos resultados, concluimos que el impacto del proyecto INNA en el rendimiento de los observatorios Paranal, Armazones y CTAO-S sería sustancial.

### 3. Conclusión

Como conclusión, el proyecto INNA degradaría el rendimiento de todos los telescopios del emplazamiento de Paranal/Armazones (VLT y VLTI en Paranal, ELT en Armazones y CTAO-Sur) hasta niveles inaceptables. El motivo es la corta distancia que separa las instalaciones de INNA del emplazamiento. Como ya se han tomado todas las medidas paliativas, estos impactos negativos e inaceptables no pueden evitarse ni mitigarse, a menos que el proyecto se aleje.

Si se aprobara el proyecto INNA, el valor de los telescopios instalados o previstos por ESO disminuiría considerablemente. Estas pérdidas son múltiples y no recuperables para todo el mundo.