

**Contaminación lumínica en áreas protegidas
de la Patagonia andina: caracterización mediante
imágenes de luces nocturnas Suomi NPP-VIIRS**

*Trabajo final presentado para optar al título de
Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al
estudio de los recursos naturales y la producción agropecuaria*

Soledad Tiranti

Licenciada en Geografía - Universidad de Buenos Aires - 2015



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires

TUTOR

Germán Baldi

Licenciado en Ciencias Biológicas (Universidad de Buenos Aires)

Magister en Recursos Naturales (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO DE TRABAJO FINAL

Fernando Biganzoli

Licenciado en Ciencias Biológicas (Universidad Nacional de La Plata)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Fernando O. Miñarro

Licenciado en Ciencias Biológicas (Universidad de Buenos Aires)

Agradecimientos

A mi tutor, Germán Baldi, quien me acompañó en todo momento durante el proceso del presente trabajo, siempre con predisposición y dedicación, a Julieta Straschnoy por su excelente coordinación durante la carrera y apoyo emocional y, por último, pero no menos importante, a mi familia, que siempre cree posible todo lo que puedo lograr tanto a nivel profesional como humano.

Declaración

"Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución".

Índice General

Resumen	9
1. Introducción.....	10
1.1. Contaminación lumínica.....	10
1.2. Fundamentos de la teledetección nocturna	12
2. Área de estudio y materiales	17
2.1. Área de estudio	17
2.2 Materiales	19
2.2.1. VIIRS Stray Light Corrected Nighttime Day/Night Band Composites V1	20
2.2.2. Infraestructura de las áreas protegidas	20
2.2.3. Límites de áreas protegidas, áreas urbanas y localidades	21
3. Metodología.....	21
3.1. Adquisición del producto de luces nocturnas Suomi NPP-VIIRS	21
3.2. Determinación del umbral de luminosidad de referencia	22
3.3. Generación de polígonos píxeles y extracción de áreas urbanas	24
3.4. Estimación de métricas de contaminación lumínica	28
3.5. Análisis de las fuentes de origen de la luminosidad nocturna en las áreas protegidas	29
4. Resultados	31
4.1. Métricas de contaminación lumínica en las áreas protegidas	31
4.2. Análisis de las fuentes de origen de la luminosidad nocturna en las áreas protegidas	34
5. Discusión	37
5.1. Resultados de la contaminación lumínica en APs de la Patagonia andina argentina	37
5.2. Propuesta metodológica de detección de fuentes de luz artificial mediante análisis topológico.....	37

5.3. Heterogeneidad de la contaminación lumínica en las APs	38
5.4. Limitaciones de método y del producto NPP-VIIRS	38
6. Conclusión	39
7. Bibliografía	40
8. Anexo	43

Índice de Tablas

Tabla 1: Principales productos de luces nocturnas. Fuente: modificado de Zhao et al (2019)	15
Tabla 2: Tipos de productos empleados en el análisis de luminosidad nocturna	19
Tabla 3: Áreas urbanas detectadas para cada área protegida.	27
Tabla 4: Criterios topológicos de determinación de fuentes de luminosidad interna en las APs.	30
Tabla 5: Superficies iluminadas internas/externas y proporciones de área iluminada para cada AP .	31
Tabla 6: Proporción y número de píxeles iluminados discriminados por fuente de luminosidad nocturna.....	36

Índice de Figuras

Figura 1: Parámetros ambientales nocturnos detectados en condiciones de	12
Figura 2: Fuentes de luz nocturna y distintos ángulos de visualización satelital	13
Figura 3: Fotografías capturadas por tripulantes de la ISS..	14
Figura 4: Luces de ciudades, pueblos y vías de circulación cerca de Delhi (India) captadas por DMSP/OLS VIIRS DNB	16
Figura 5: Localización de las áreas protegidas.	18
Figura 6: Ejemplos de productos empleados en los análisis de contaminación lumínica.	19
Figura 7: Ejemplo de procedimiento de generación de área de estudio efectiva y recorte de imagen NPP- VIIRS	21
Figura 8: Sistemas de referencia aplicados en las imágenes satelitales de las APs.....	22
Figura 9: RNS Isla de los Estados	23
Figura 10: Histograma de frecuencia absoluta para los valores de los píxeles de la imagen NPP- VIIRS – RNS Isla de los Estados.....	23
Figura 11: Transformación de píxeles de la imagen a polígonos.	24
Figura 12: Binarización de las imágenes Suomi NPP-VIIRS de las APs empleando el umbral de luminosidad de referencia 0,43 nW/cm ² /sr.	25
Figura 13: Ejemplo de áreas urbanas internas y externas detectadas con OSM para el PN Los Alerces	26
Figura 14: Ejemplo de capas de información empleadas en el análisis de las fuentes de la luminosidad artificial nocturna	29
Figura 15: Proporciones de superficies iluminadas internas y externas para cada AP	32
Figura 16: Estadísticas de luces nocturnas para cada AP	33
Figura 17: Proporciones de fuentes de luminosidad nocturna respecto del total de píxeles iluminados del área de estudio.....	35
Figura 18: Proporciones de fuentes de luminosidad nocturna respecto del total de píxeles iluminados de cada AP.	36

Anexo

Anexo 1: Efectos de la contaminación lumínica en la fauna	43
Anexo 2: N° de habitantes y distancias de núcleos poblacionales cercanos a las APs y cantidad de visitantes.....	44
Anexo 3: Mapa de luminosidad de la Reserva Natural Silvestre Isla de los Estados	44
Anexo 4: Mapa de luminosidad del Parque Nacional Los Glaciares.	45
Anexo 5: Mapa de luminosidad del Parque Nacional Los Alerces	46
Anexo 6: Mapa de luminosidad del Parque Nacional Perito Moreno	46
Anexo 7: Mapa de luminosidad del Parque Nacional Lago Puelo	47
Anexo 8: Mapa de luminosidad del Parque Nacional Tierra del Fuego	48
Anexo 9: Mapa de luminosidad del Parque Nacional Lanín	49
Anexo 10: Mapa de luminosidad del Parque Nacional Nahuel Huapi y Los Arrayanes	50

Resumen

El cielo se encuentra alterado en gran medida por la iluminación artificial durante las horas de oscuridad, fenómeno que aumenta anualmente en concordancia con los procesos de urbanización acelerados. La luz artificial afecta no solo a regiones urbanas e industriales sino también a aquellas con actividades humanas limitadas. En este último grupo se encuentran las áreas protegidas (APs), cuyo propósito es la conservación a largo plazo de la naturaleza al minimizar las intervenciones antropogénicas, tales como la misma contaminación lumínica. Este fenómeno interfiere con distintas funciones fisiológicas de las especies y conduce a problemas de alimentación, orientación, comunicación, reproducción, senescencia y supervivencia.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar, analizar y comparar el nivel de contaminación lumínica que afecta a las APs de la Patagonia andina Argentina mediante el procesamiento de imágenes satelitales de luces nocturnas Suomi NPP-VIIRS. El análisis del fenómeno se derivó, en primera instancia, de determinar el umbral de luminosidad del área de estudio para que se considere que existe contaminación lumínica, para luego poder estimar, mediante métricas, la magnitud de dicha contaminación y tipificar sus fuentes de origen en cada AP.

Encontramos que, a pesar que la Patagonia andina se considera una de las regiones del país y del mundo con menor intervención antrópica, sólo dos de las ocho APs analizadas no presentaron contaminación lumínica (RNS Isla de los Estados y PN Perito Moreno), mientras que las seis restantes exhibieron niveles variables. El PN Tierra del Fuego presentó la mayor proporción de área iluminada, tanto dentro como fuera de sus límites jurisdiccionales (3,26% y 10,13% respectivamente), en cambio el PN Los Glaciares tuvo los menores niveles de iluminación interna (0,07%) y externa (0,16%) así como también la más baja intensidad de luz artificial, con valores homogéneos. Por el contrario, la mayor intensidad lumínica se encontró en el PN Nahuel Huapi y Los Arrayanes mientras que el PN Tierra del Fuego exhibió la mayor dispersión en sus valores de luminosidad. Finalmente, en cuanto a las fuentes de contaminación lumínica nocturna dentro de las APs, la influencia indirecta de la luz proveniente de núcleos urbanos fue la de mayor peso identificado.

Palabras claves:

Áreas protegidas, Patagonia andina, contaminación lumínica, teledetección nocturna, Suomi NPP-VIIRS, umbral de luminosidad, fuentes de luminosidad nocturna.

1. Introducción

1.1. Contaminación lumínica

La Asociación Internacional del Cielo Oscuro (IDA) define la contaminación lumínica como “el uso inadecuado o excesivo de la luz artificial”. En Longcore et al. (2004) se distinguen dos tipos de contaminación lumínica: la *astronómica*, que provoca la degradación de la visión del cielo nocturno debido a la luz que es dirigida o reflejada hacia el cielo y la *ecológica*, que altera los regímenes o patrones naturales de luz y oscuridad en los ecosistemas terrestres y acuáticos por deslumbramiento directo, aumento crónico de la iluminación y fluctuaciones temporales e inesperadas en la iluminación. Las fuentes que perturban en grados variables a los ecosistemas incluyen el resplandor del cielo, iluminación exterior e interior de edificios, industrias y espacios recreativos, luces de transportes, barcos pesqueros, plataformas petroleras, etc.

La contaminación lumínica a su vez presenta una serie de componentes, enunciados en Mc Colgan (2003):

- **Deslumbramiento:** es el exceso de brillo que provoca molestias visuales y reduce la visibilidad. El destello es causado por el uso e instalación incorrecta de la iluminación artificial. Puede afectar tanto a humanos como a animales.
- **Resplandor del cielo:** es generado por la introducción de iluminación artificial, la cual aumenta el nivel de brillo en el cielo nocturno. La luz ingresa al cielo por emisión directa o por reflejo desde el suelo hacia la atmósfera a través de la dispersión de partículas como el gas y el polvo.
- **Traspaso/intrusión de luz:** es el resultado de la instalación de dispositivos de iluminación artificial que alcanza objetivos no deseados. Un caso ejemplificador sería la instalación de iluminación para alumbrar un camino a través de un bosque y que genera en consecuencia que los bosques circundantes reciban también luz artificial.
- **Desorden:** agrupaciones de fuentes de luz brillantes, confusas y excesivas que originan altas concentraciones de iluminación artificial en un área y puede provocar confusión y desorientación en muchas especies animales. La iluminación desordenada es común en las áreas urbanas.

Los componentes mencionados anteriormente provocan que el brillo de las luces artificiales nocturnas se disperse dentro de la atmósfera y pueda ser visible a decenas o incluso cientos de kilómetros de distancia de la fuente de emisión. Debido a esto, la contaminación lumínica no solo afecta a las regiones urbanas e industriales, sino también a áreas con actividades humanas limitadas (Sordello et al. 2022). Dentro de esta última categoría se encuentran las áreas protegidas (APs), cuyo propósito es conservar a largo plazo la naturaleza en su conjunto dentro de un determinado territorio

al amortiguar las presiones antropogénicas como lo es la contaminación lumínica (Jägerbrand et al. 2021).

Las APs sufren la interferencia humana tanto a través de actividades prohibidas (ej.: deforestación, caza), como permitidas (pequeños asentamientos, sitios educativos y actividades turísticas). Se ha informado que para el año 2018 el 32,8% de las APs del mundo estaban expuestas a intensas presiones humanas y más del 50% había experimentado un aumento de las mismas en comparación con años previos (Jones et al. 2018). La luz artificial dentro y alrededor de las APs ha aumentado significativamente debido a la rápida urbanización global y esto significa una amenaza para la biodiversidad (Mu et al. 2021).

Los impactos de la contaminación lumínica en especies animales y vegetales han sido el foco de muchos estudios. Las consecuencias de la iluminación nocturna abarcan tanto a especies nocturnas como diurnas ya que la luz artificial prolonga involuntariamente su fase de actividad hacia la noche (Sordello et al. 2022).

En relación a los animales, aproximadamente el 30 % de todos los vertebrados y el 60 % de los invertebrados son nocturnos, lo cual significa que una alteración en el régimen de luz genera un amplio impacto en la biodiversidad (Longcore et al. 2004). Además, las consecuencias de la iluminación nocturna se presentan en diferentes niveles de vida (genes, individuos, poblaciones, ecosistemas) y en diferentes características de la historia de vida de la especie. A partir de estudios previos se ha encontrado que la iluminación artificial afecta a las especies animales de diferentes maneras, incluidas alteraciones en sus comportamientos de alimentación, reproducción, comunicación, orientación y relaciones presa/depredador (Longcore et al. 2004)¹. Los impactos encontrados no son exclusivos de un hábitat, registrándose tanto en ambientes marinos como terrestres (Sordello et al. 2022).

En cuanto a los efectos en las plantas uno de los más importantes es la alteración del proceso de fotosíntesis. Un estudio de Raven et al. (2006) encontró que la fotosíntesis durante las horas de brillo nocturno aumenta en presencia del resplandor del cielo y la luz de la luna. Por otro lado, la iluminación artificial genera también impactos sobre el crecimiento de las plantas (Bennie et al. 2015). Los árboles que están expuestos a una iluminación continua pueden mostrar un follaje de mayor tamaño en comparación con los árboles que reciben iluminación natural. Según Chaney (2022) el follaje puede ser propenso a la contaminación del aire y al estrés como resultado de que los poros de los estomas estén abiertos durante largos períodos de tiempo (Daly, 2016).

Finalmente, todos estos efectos eco-fisiológicos conllevan a la disminución de riqueza de especies, la degradación de funciones y servicios de los ecosistemas (Sordello et al. 2022). Ejemplo de ello es que la luz artificial durante la noche puede interrumpir la polinización nocturna y las redes de polinización, lo cual lleva a consecuencias negativas para el éxito reproductivo de las plantas (Jägerbrand et al. 2021).

¹ En Anexo 1 se detallan los impactos de la contaminación lumínica en la fauna.

1.2. Fundamentos de la teledetección nocturna

La teledetección nocturna representa una fuente de datos para mejorar el entendimiento de la interacción entre la sociedad y el medio ambiente ya que las imágenes satelitales nocturnas capturan señales principalmente humanas, como la iluminación artificial, así como también algunas fuentes de luz naturales (vulcanismo, bioluminiscencia, etc.).

La iluminación nocturna medida desde el espacio no solo está altamente correlacionada con los asentamientos humanos y la dinámica económica, sino que también proporciona perspectivas únicas para revelar problemas ambientales y socioeconómicos, con un gran potencial para monitorear las actividades humanas y comprender los impactos ambientales relacionados (Zhao et al, 2019).

La luz visible es omnipresente durante la noche, pero presenta intensidades muy bajas en comparación con el día. Por ejemplo, el brillo típico de una escena iluminada por la luna es aproximadamente de cinco a seis órdenes de magnitud más débil que el de una escena iluminada por el sol. Sin embargo, la noche nunca es realmente oscura ya que está repleta de fuentes de luz visible como la luz lunar, la luz emitida directamente por una fuente y la luz dispersada por el suelo y la infraestructura (ej., edificios y transporte). Además, la teledetección de datos nocturnos varía según la presencia o ausencia de luz lunar (Figura 1). Con luz de luna se detecta, entre otros fenómenos, la reflectancia del manto de nieve y las nubes. Por otro lado, la ausencia de luz de luna permite la detección de luces artificiales (calles, edificios, etc.), barcos pesqueros, llamaradas de gas, incendios, auroras, bioluminiscencia, resplandor nocturno, etc. (Miller et. al, 2013).

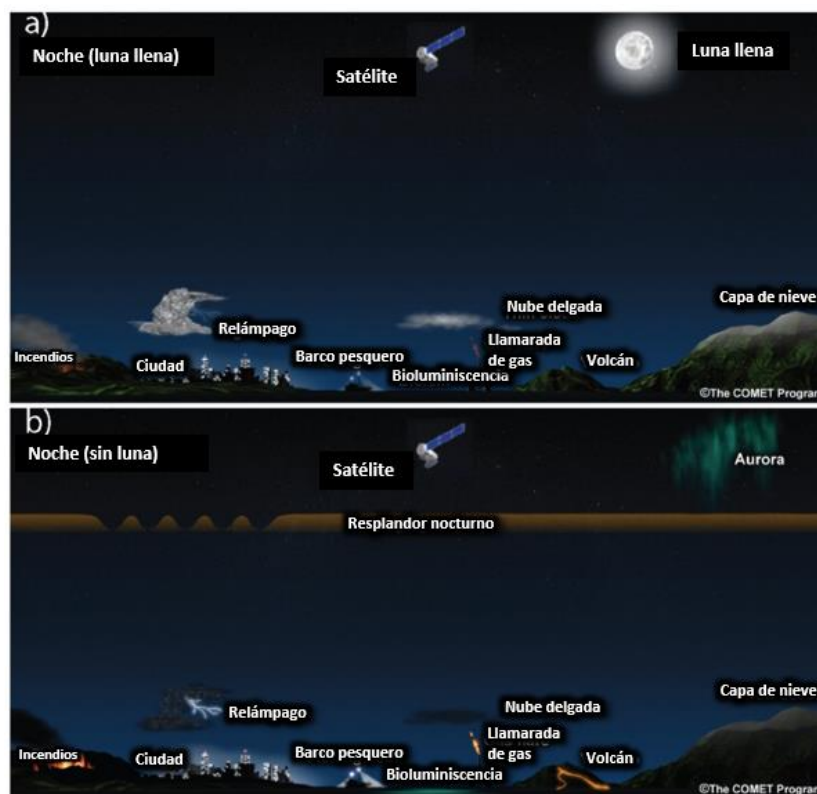


Figura 1: Parámetros ambientales nocturnos detectados en condiciones de (a) iluminación lunar y (b) en noches sin luna. Fuente: extraído de Miller et al, 2013.

Las características del relieve pueden bloquear la fuente de luz durante diferentes periodos de tiempo. La nieve (tanto con luz de luna como en condiciones sin luna) también puede incrementar la señal durante el invierno (Román, 2020).

A su vez, la morfología de las ciudades también afecta a la teledetección nocturna. Las fuentes de luz tienen diferentes perfiles angulares de emisión y reflexión. Un ángulo de visualización diferente del satélite puede cambiar las fuentes de luz que se capturan. Por ejemplo, en áreas donde hay rascacielos, la señal va a ser más potente cuando el satélite esté en el ángulo nadir (observando directamente hacia abajo) mientras que cuando el ángulo de visión es mayor (el satélite se acerca al horizonte), la influencia de las luces de la ciudad como las de las calles, ornamentales, entre otras, no estarán incluidas en la señal (Figura 2).

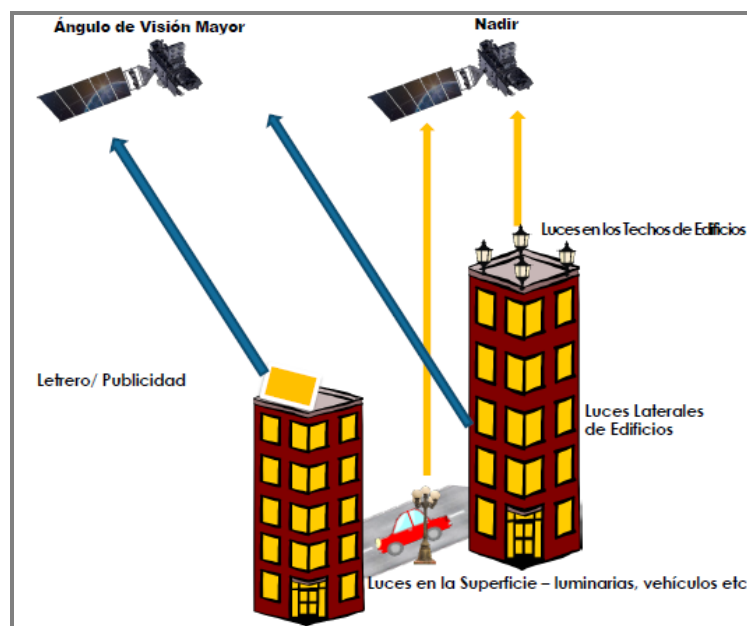


Figura 2: Fuentes de luz nocturna y distintos ángulos de visualización satelital. Fuente: Román, 2020.

Durante las últimas décadas, los sensores se actualizaron de manera continua y mejoraron significativamente sus funciones nocturnas (Zhao et al, 2019). En la Tabla 1 se listan los principales productos de luces nocturnas disponibles en la actualidad.

Entre los primeros productos se encuentran las fotografías de la Estación Espacial Internacional (ISS – siglas en inglés) capturadas de noche por los astronautas (Figura 3). Estas brindan información en las 3 bandas espectrales del visible (RGB) y poseen una resolución de 10 m a partir del año 2012, debido a la incorporación del instrumento NightPod. Debe aclararse que estas fotografías no pueden considerarse como datos científicos ya que carecen de georreferenciación y consistencia a lo largo del espacio y del tiempo por cambios en instrumentación (Román, 2020).



Figura 3: Fotografías capturadas por tripulantes de la ISS. La de la izquierda fue capturada en abril de 2015 y la de la derecha en octubre de 2014, ambas con una cámara digital Nikon D4. Fuente: Román, 2020.

En contraposición con las fotografías nocturnas, cuyos datos carecen de validez científica, las imágenes satelitales nocturnas que presentan mayor impronta en estudios científicos de luces artificiales y sus procesos relacionados son aquellas generadas por los satélites/sensores DMPS-OLS y Suomi NPP-VIIRS. Hasta el presente existen innumerables trabajos de investigación que toman como fuente de datos a ambos productos debido a la posibilidad de realizar estudios de fenómenos derivados de la luminosidad nocturna a largo plazo.

En la década de los setenta, Estados Unidos comenzó el Programa de Satélites Meteorológicos de Defensa (*Defense Meteorological Satellite Program, DMSP*). Algunos de los satélites estaban equipados con el sistema de escaneo lineal operativo (*Operational Linescan System, OLS*) para capturar la débil radiación de luz durante la noche, como luces de ciudades, áreas residenciales a pequeña escala, luces de barcos pesqueros e incendios, entre otros (Zheng, 2019). DMSP-OLS es el sistema satelital de detección de luces nocturnas a nivel mundial de mayor trayectoria. La captura de datos comenzó en 1992 y finalizó en 2013. Los productos derivados se han empleado en el monitoreo de luces artificiales desde el espacio y en el estudio de la relación entre las actividades humanas y variables socioeconómicas con la luminosidad nocturna. Una gran limitación del producto es la falta de calibración a bordo, la cual se producía en ese entonces de manera relativa, estableciéndose una comparación entre un sensor de referencia con otros sensores. Esto generó que la consistencia de las medidas fuese relativa. Una ventaja es que permite realizar estudios a largo plazo (Román, 2020).

Tabla 1: Principales productos de luces nocturnas. Fuente: modificado de Zhao et al (2019)

Sensor/Satélite	Tipo de producto	Accesibilidad	Periodo disponible	Resolución espacial	Bandas espectrales	Resolución Radiométrica
DMSP-OLS	Datos de series temporales	Libre https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html	1992-2013 anual	30 arcos de segundo ²	Pancromático 400–1100 nm	6 bit
	Datos de radiancia calibrada		1996-1999-2000-2003-2004-2006-2010-2011			
	Datos diarios y mensuales	No libre	Requiere pedido especial			
Suomi NPP-VIIRS	Compuestos mensuales VIIRS/DNB	Libre https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html	2012/04–presente - mensuales	15 arcos de segundo	Pancromático 505–890 nm	14 bit
	Compuestos anuales VIIRS/DNB		2015, 2016			
	Producto estándar Black Marble	Libre (VNP46A1) https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/	2012/01–presente - diarios	500 m		
	Producto HD Black Marble	Bajo experimento	Desconocido	Estimada < 30 m		
ISS	Fotografías nocturnas capturadas por astronautas de la Estación Espacial Internacional (ISS- siglas en inglés)	Libres (no calibradas y sin georreferenciación) https://eol.jsc.nasa.gov/ https://citiesatnight.org/	2003–presente Fotografías capturadas irregularmente	5 - 200 m	RGB	8-14 bit
EROS-B	Imágenes de luces nocturnas (NTL) de alta resolución espacial	Comercial	Mediados de 2013	0.7 m	Pancromático	16 bit
JL1-3B	Imágenes multiespectrales (RGB) NTL	Comercial	Lanzado en 2017	0.92 m	430-512nm (B), 489-585nm (G) 580-720nm (R)	8 bit
JL1-07/08	Imágenes con banda pancromática y bandas multiespectrales mejoradas	Comercial	Lanzado en 2018	****	Pancromático y Multiespectral (RGB - Red Edge y IRC)	****
LJ1-01	Imágenes de alta resolución espacial	Libre http://59.175.109.173:8888/app/login.html	Lanzado en 2018 Tiempo de revisita de 15 días	130 m	Pancromático 480-800 m	Valores DN

² 1 arco de segundo equivale aproximadamente a 30 metros en el Ecuador.

En el año 2011 surgieron nuevos datos de teledetección nocturna a partir del lanzamiento del satélite Suomi NPP (*NASA/NOAA Suomi National Polar-orbiting Partnership*), de tipo heliosincrónico (824 km de altura), órbita ascendente y resolución temporal de 12 hr. La plataforma lleva a bordo cinco instrumentos, entre los cuales se encuentra el radiómetro VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) que compensó las deficiencias de DMSP-OLS, ya que cuenta con una resolución radiométrica de 14 bits y no presenta problemas de saturación. En la Figura 4 se compara el nivel de visualización de los productos de luces nocturnas derivados de los instrumentos OLS y VIIRS, destacándose el mayor nivel de detalle de NPP-VIIRS.

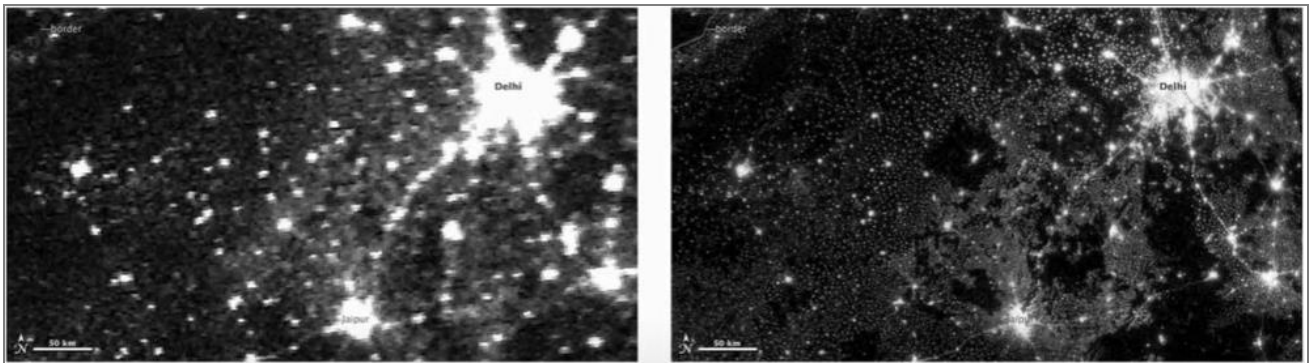


Figura 4: Luces de ciudades, pueblos y vías de circulación cerca de Delhi (India) captadas por DMSP/OLS (izquierda) y VIIRS DNB (derecha). Fuente: Extraído de Román, 2020.

El NPP-VIIRS presenta un ancho de barrido de 3040 km y cuenta con un total de 21 bandas dentro de un rango espectral que se extiende de 4 a 12,5 μm . **Day/Night Band (DNB)** es la banda de NPP-VIIRS que se utiliza para detectar la intensidad de luces nocturnas. Opera durante las porciones de la órbita tanto diurnas como nocturnas (por eso su nombre "Día/Noche"). La operación diurna es muy importante, ya que permite que el DNB aproveche la calibración a bordo empleando el difusor solar, que se usa para calibrar todas las bandas reflectantes del VIIRS (Miller et al, 2013).

La banda DNB tiene un rango de longitud de onda de 0,5-0,9 μm , una resolución espacial de aproximadamente 750 m y es capaz de captar ligeras variaciones de brillo en la superficie terrestre durante la noche, permitiendo componer imágenes de radiancias nocturnas de alta calidad, libres de artefactos causados por nubosidad, cambios en el relieve, nieve, la luna y la luz errante (luz semi-permanente, o persistente, a largo plazo temporal). El rango de imagen cubre un área de 65° de Latitud Sur a 70° de Latitud Norte.

Con su paso elevado nocturno a las 0130 hora local (nodo descendente), Suomi-NPP observa "noches lunares" (noches en las que la luna está sobre el horizonte en el momento del paso elevado del satélite) durante la mitad del ciclo lunar de ~29,5 días. Hay suficiente iluminación lunar disponible desde ~2 días después de la fase del primer cuarto, a través de la luna llena, hasta ~2 días después del último cuarto. Durante este período de aproximadamente dos semanas, la sensibilidad del DNB es más que suficiente para utilizar la irradiancia lunar reflejada (del orden de $10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ en luna llena) y producir imágenes que recuerdan una escena iluminada por el día (Miller et al, 2013).

Otro aspecto importante a destacar es que el satélite Suomi-NPP llega a la misma órbita y al mismo ángulo de visualización cada 16 días. Esto significa que el satélite estará mirando la misma superficie a distintos ángulos en un periodo de 16 días.

A diferencia de los datos DMSP-OLS, los NPP-VIIRS no cuentan con el fenómeno de sobresaturación ya que el sensor presenta calibración a bordo. Esta mejora en calidad conlleva ciertos problemas ya que el sensor, al ser muy sensible a las luces nocturnas, capta cierto nivel de "ruido" en los datos, como las luces de barcos pesqueros o anomalías numéricas causadas por la alta reflexión del hielo y la nieve, entre otros factores (Zheng, 2019).

El presente trabajo presentó como objetivo general caracterizar, analizar y comparar el nivel de contaminación lumínica que afecta a las áreas protegidas de la Patagonia andina argentina mediante el procesamiento de imágenes satelitales de luces nocturnas Suomi NPP-VIIRS. Los objetivos específicos consistieron en determinar, en primera instancia, el umbral de luminosidad del área de estudio para que se considere que existe contaminación lumínica, para luego poder estimar, mediante métricas, la magnitud de dicha contaminación y tipificar sus fuentes de origen en cada área protegida.

2. Área de estudio y materiales

2.1. Área de estudio

El área de estudio está constituida por ocho áreas protegidas de la Patagonia andina argentina³ (Figura 5). Éstas se distribuyen a lo largo de una franja de aproximadamente 2.500 km de extensión que presenta mayormente una dirección Norte-Sur con excepción del extremo sur cuya orientación es Este-Oeste. El relieve es montañoso, representado por el extremo sur de la Cordillera de los Andes y el tipo de cobertura predominante son los bosques andinos patagónicos.

En cuanto al supuesto grado de conservación de las APs estudiadas resulta necesario puntualizar que la presión poblacional sobre dichas áreas es variable (desde 0 a 189.000 habitantes) así como también sus niveles de aislamiento en cuanto a distancias a núcleos urbanos, desde APs que presentan poblaciones contiguas a sus límites (ej. PN Nahuel Huapi-Los Arrayanes) hasta aquellas con ciudades a más de 10 km de distancia desde su límite externo (PN Perito Moreno y RNS Isla de los Estados). Además, exhiben cantidades diversas de visitantes registrados por año, como el caso de 2018 que evidenció entre 968 a 687.190 visitantes (Anexo 2).

En cuanto a categorías de conservación, la mayoría de las APs estudiadas son del tipo Parque Nacional y Reserva Nacional, lo cual determina que la presencia antrópica esté sujeta únicamente a objetivos recreativo-turísticos, educativos y científicos compatibles con la conservación de la biodiversidad y excluye el asentamiento permanente de personas (Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina, 1980). Por otra parte, la Isla de los Estados pertenece a la categoría Reserva

³ Por motivos de simplificación metodológica se decidió incluir al PN Los Arrayanes (17.53 km²) dentro del área del PN Nahuel Huapi constituyendo en conjunto una única unidad de análisis denominada "PN Nahuel Huapi y Los Arrayanes".

Natural Silvestre cuyo objetivo principal es la protección integral estableciendo máxima restricción al ingreso de personas, limitado a personal de control e investigadores (Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina, 1994).

Independientemente del grado de conservación de la naturaleza que presenten las APs debe tenerse en cuenta que el fenómeno de contaminación lumínica no solo puede presentar fuentes de origen locales o internas (dentro de los límites jurisdiccionales de las APs) sino que también pueden existir presiones externas que generan o agravan al fenómeno. En este sentido, un estudio de McDonald et al. (2009) menciona que los efectos de la contaminación lumínica proveniente de las áreas urbanas resultan biológicamente significativos si las urbanizaciones se encuentran localizadas alrededor de 10 kilómetros de distancia de las APs. Debido a esto, el presente análisis de contaminación lumínica se llevó a cabo sobre el territorio de cada AP y una zona de influencia de 10 kilómetros (buffer) determinada a partir de sus límites externos para poder incorporar de este modo posibles efectos de luminosidad externa.

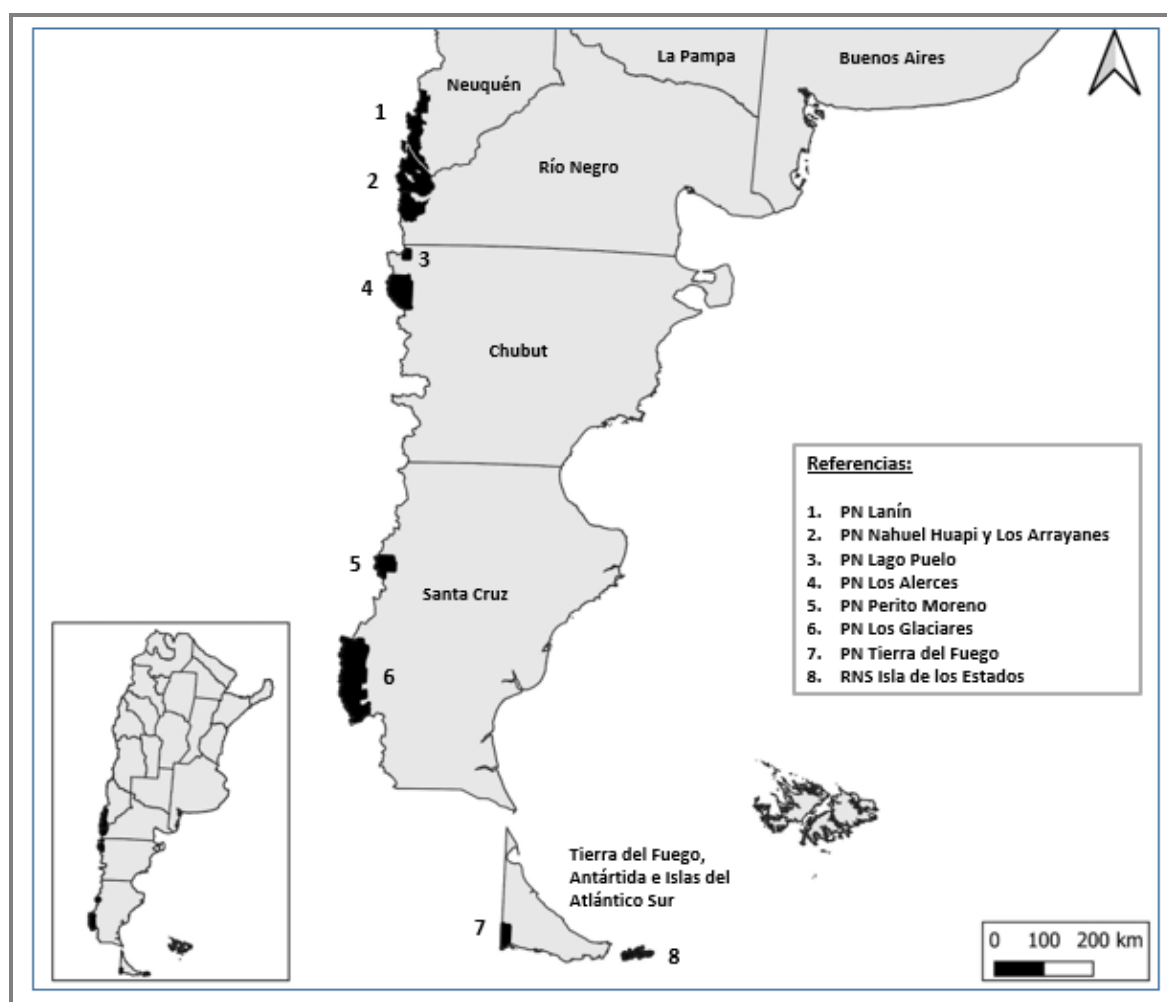


Figura 5: Localización de las áreas protegidas.

2.2. Materiales

Para el desarrollo del presente trabajo se emplearon distintos tipos de productos, los cuales se detallan en la Tabla 2 y en la Figura 6 y se describen a continuación.

Tabla 2: Tipos de productos empleados en el análisis de luminosidad nocturna

Producto	Tipo de archivo	Fuente de descarga
VIIRS Stray Light Corrected Nighttime Day/Night Band Composites Version 1	Ráster – Compuesto de radiancia promedio mensual	Plataforma Google Earth Engine
Límites de áreas protegidas	Vectorial - polígono	Capas SIG – Instituto Geográfico Nacional (IGN)
Infraestructura de servicios de áreas protegidas	Vectorial - punto	Capas SIG – Administración de Parques Nacionales (APN)
Infraestructura de circulación de áreas protegidas	Vectorial – línea	Capas SIG – Administración de Parques Nacionales (APN)
Localidades	Vectorial - punto	Capas SIG - Base de Asentamientos Humanos de la República Argentina (BAHRA)
Límites de áreas urbanas	Vectorial – polígono	Open Street Map (Complemento OSM - QGIS)

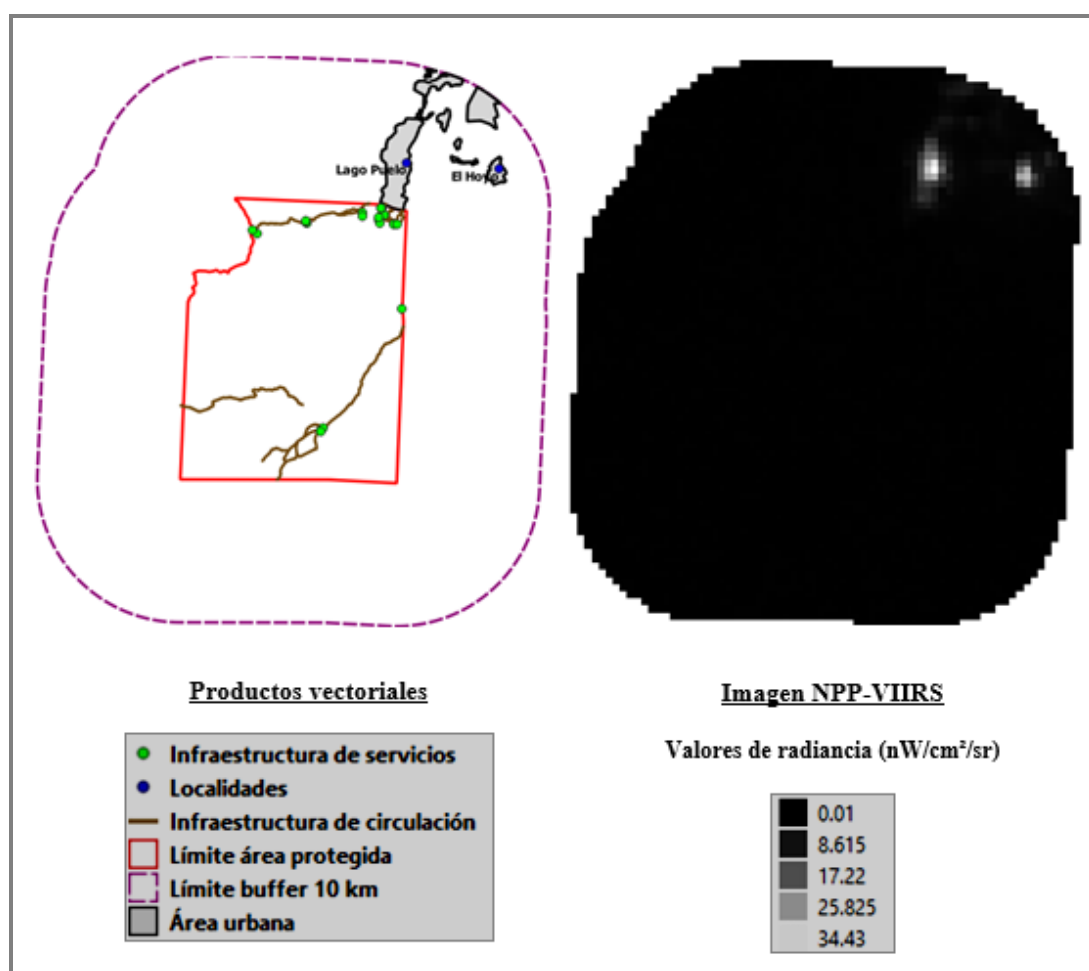


Figura 6: Ejemplos de productos empleados en los análisis de contaminación lumínica.

2.2.1. VIIRS Stray Light Corrected Nighttime Day/Night Band Composites Version 1

El producto mensual *VIIRS Stray Light Corrected Nighttime Day/Night Band Composites Version 1* es de dominio público y se encuentra disponible desde el 01 de enero de 2014 T00:00:00.

Consiste en imágenes compuestas de radiancia promedio mensual que surgen de los datos nocturnos registrados en la banda diurna/nocturna (DNB) del radiómetro VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*). El proveedor del producto es el Grupo de Observación de la Tierra (NOAA National Geophysical Data Center).

A diferencia de los datos diarios, cuya resolución espacial es de 750 m y se encuentran muy afectados por la cobertura de nubes, la resolución de los datos sintéticos mensuales es de aproximadamente 500 m. El compuesto presenta un procedimiento para corregir la luz parásita (luz que incide directamente sobre el objetivo del sensor de forma no controlada), el cual extiende las áreas visibles más cerca de los polos y mejora el rango dinámico. A su vez, excluye los datos afectados por las nubes. Por el contrario, no cuenta con filtros que eliminen luces de auroras, incendios, barcos y otras luces temporales. El producto está compuesto por dos tipos de bandas de información:

- avg_rad (“Average radiance”): contiene los valores promedio de radiancia de la banda DNB. Las unidades de los valores son en nanoWatts/cm²/sr, presentando un mínimo de -1,5 y un máximo de 193.564,92 nW/cm²/sr.
- cf_cvg (“Cloud-free coverages”): número total de observaciones por pixel, cuyo valores mínimo y máximo son 0 y 84 respectivamente.

2.2.2. Infraestructura de las áreas protegidas

En líneas generales el término infraestructura engloba al conjunto de instalaciones, servicios y medios técnicos que soportan el desarrollo de actividades. En este trabajo se realiza la distinción entre dos tipos de infraestructura susceptibles de generar iluminación nocturna en las APs:

Infraestructuras de servicios: consiste en todos aquellos servicios que ofrecen las APs dentro de sus límites jurisdiccionales. Dentro de este concepto pueden nombrarse a modo general: alojamientos (hoteles, hostales, cabañas, campamentos, etc.), escuelas, estacionamientos, muelles, puertos, miradores, pasarelas, postas de seguridad (intendencias, seccionales, comisarias, gendarmería, aduanas, etc.), postas sanitarias, puntos de excursiones y centros de informes, puntos de venta (acceso a área protegida/proveedurías/artesanías), restaurantes/comedores, sanitarios, entre otros.

Infraestructuras de circulación: son los elementos o rasgos físicos que permiten el acceso y la circulación dentro de los límites de las APs, por ejemplo: caminos, sendas, senderos, pasarelas, rutas, infraestructura ferroviaria.

2.2.3. Límites de áreas protegidas, áreas urbanas y localidades

Los archivos vectoriales de límites de las áreas protegidas se emplearon en la definición espacial de la jurisdicción de las mismas para poder efectuar luego los cálculos de áreas iluminadas internas y diversas estadísticas de luminosidad. A su vez, a partir de estos límites se generaron las áreas de influencia de luminosidad de 10 kilómetros de extensión (buffers) que permitieron el análisis de la contaminación lumínica externa a las áreas protegidas.

Las localidades y sus respectivas áreas urbanas ubicadas dentro del área de estudio (AP más buffer de 10 km) se detectaron a partir del complemento Open Street Map del software de código libre QGIS y de la información vectorial de localidades.

3. Metodología

3.1. Adquisición del producto de luces nocturnas Suomi NPP-VIIRS

El producto satelital de luces nocturnas (VIIRS Stray Light Corrected Nighttime Day/Night Band Composites Version 1) fue adquirido a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE). Se emplearon las imágenes con datos sintéticos del mes de marzo de 2019 y la banda *avg_rad* de las mismas. Se procedió luego en la plataforma al recorte de las imágenes, tomando como máscara las áreas de estudio efectivas de cada AP, es decir, la unión de la superficie del AP más el área buffer de 10 km (Figura 7). Por último, se descargaron los recortes con una resolución espacial de 500 metros y los sistemas de referencia de coordenadas proyectadas que se especifican en la Figura 8, de manera tal que los cálculos posteriores de superficies fuesen precisos.

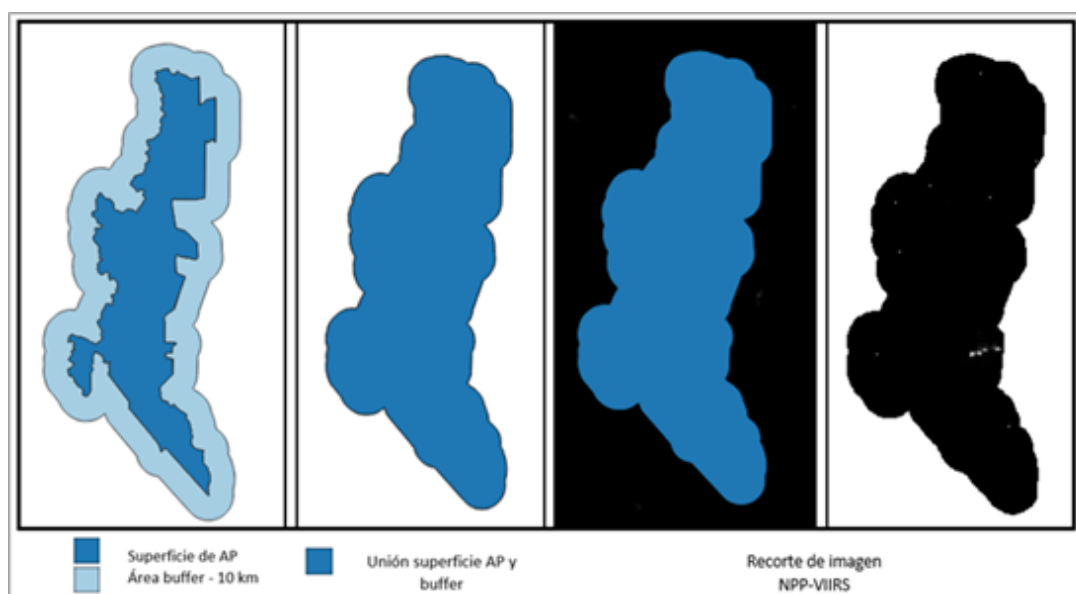


Figura 7: Ejemplo de procedimiento de generación de área de estudio efectiva y recorte de imagen NPP- VIIRS

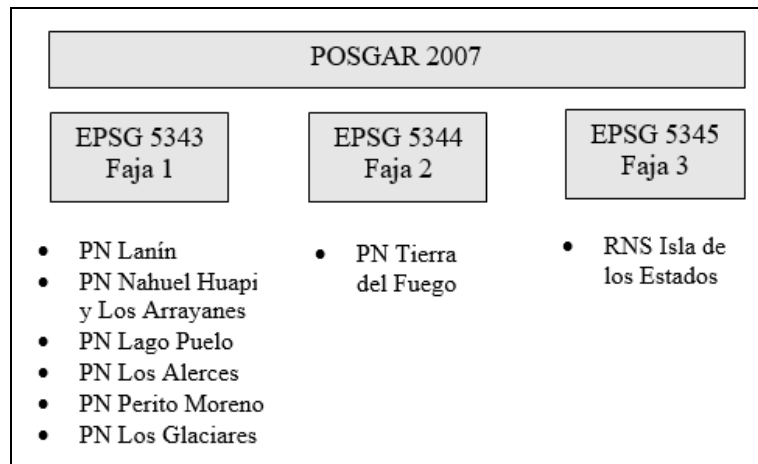


Figura 8: Sistemas de referencia aplicados en las imágenes satelitales de las APs.

3.2. Determinación del umbral de luminosidad de referencia

La determinación del umbral de luminosidad de referencia del producto NPP-VIIRS de luces nocturnas fue un paso crucial previo al cálculo de métricas a partir de las cuales se derivó la estimación de los niveles de luminosidad de las áreas protegidas.

Si bien las imágenes NPP-VIIRS son productos procesados a los cuales se les ha aplicado filtros de cobertura nubosa y no presentan sobresaturación, no es posible afirmar que los valores de radiancia mayores a 0 nW/cm²/sr representen píxeles iluminados durante el periodo nocturno y, en consecuencia, 0 nW/cm²/sr no podría designarse como umbral de luminosidad. Debido a esto fue necesario determinar un umbral de luminosidad de referencia que pueda ser aplicado en todas las imágenes de las APs y de esta manera lograr comparar los niveles de luminosidad resultantes.

El umbral de luminosidad de referencia se determinó a partir de un análisis exploratorio de los valores de radiancia del compuesto NPP-VIIRS para la Isla de los Estados ya que es un territorio que, en comparación con el resto de las APs analizadas, no presenta núcleos poblacionales ni infraestructura en su interior ni en sus alrededores (exceptuando el denominado “*Faro del Fin del mundo*”, Figura 9) y por ende se encuentra libre de luz artificial nocturna. Es por ello que se decidió elegir este caso como referencia de ausencia de contaminación lumínica. Tal como se observa en el histograma de frecuencia absoluta del ráster de la Isla de los Estados (Figura 10), el AP presenta como valor máximo de luminosidad 0,43 nW/cm²/sr. Esto significa que todos los píxeles de la imagen presentan valores por debajo de 0,43 nW/cm²/sr, los cuales podrían considerarse como ausencia de luz y por ende de contaminación lumínica ya que la isla no presenta fuentes de luminosidad nocturna artificial. A partir de lo analizado se determinó como **umbral de luminosidad de referencia** el valor **0,43 nW/cm²/sr**, a partir del cual se deriva que los valores mayores al mismo se consideran píxeles iluminados o con indicios de contaminación lumínica.



Figura 9: RNS Isla de los Estados. Fuente: Google Maps

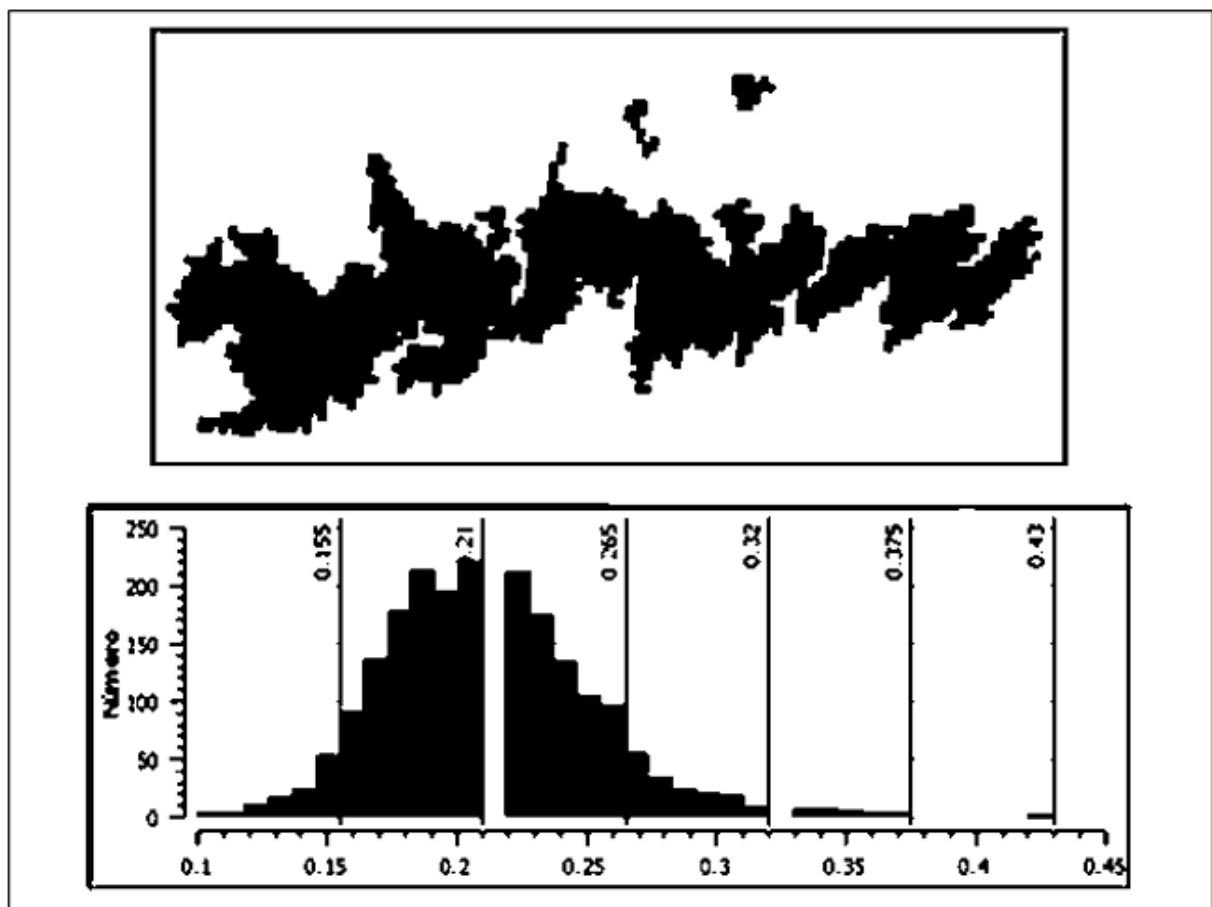


Figura 10: Histograma de frecuencia absoluta para los valores de los píxeles de la imagen NPP-VIIRS – RNS Isla de los Estados.

Una vez determinado el umbral de luminosidad de referencia se realizó la binarización de las imágenes NPP-VIIRS de cada AP. La binarización consiste en la reducción de información de una imagen digital a partir del establecimiento de un umbral en la que los únicos valores posibles son verdadero y falso (1 y 0) y los mismos se corresponden con los colores blanco y negro respectivamente. Éste proceso se realizó mediante la Calculadora Ráster de QGIS. La expresión “*rasterAP > 0,43*” se empleó para convertir las imágenes de luces nocturnas en binarias. De esta manera, aquellos valores de píxeles por encima de 0,43 nW/cm²/sr determinaron píxeles iluminados o con indicios de contaminación lumínica mientras que los valores iguales o por debajo de ese umbral se corresponden con píxeles no iluminados o sin indicios de contaminación lumínica durante la noche. La Figura 12 muestra los resultados de las imágenes binarizadas de cada AP.

3.3. Generación de polígonos píxeles y extracción de áreas urbanas

Una vez obtenidos los recortes de las imágenes NPP-VIIRS para cada AP se transformaron los píxeles a polígonos regulares de 500 m de lado (polígonos píxeles) empleando la herramienta de QGIS *Píxeles ráster a polígonos* (Figura 11). Cada polígono generado guardó información del valor de luminosidad de su píxel de origen correspondiente. Cualquier píxel sin datos (No data) se omitió de la salida del producto. Una vez obtenidos los polígonos píxeles, mediante la aplicación del umbral de referencia en los mismos se determinaron los polígonos píxeles iluminados y no iluminados.

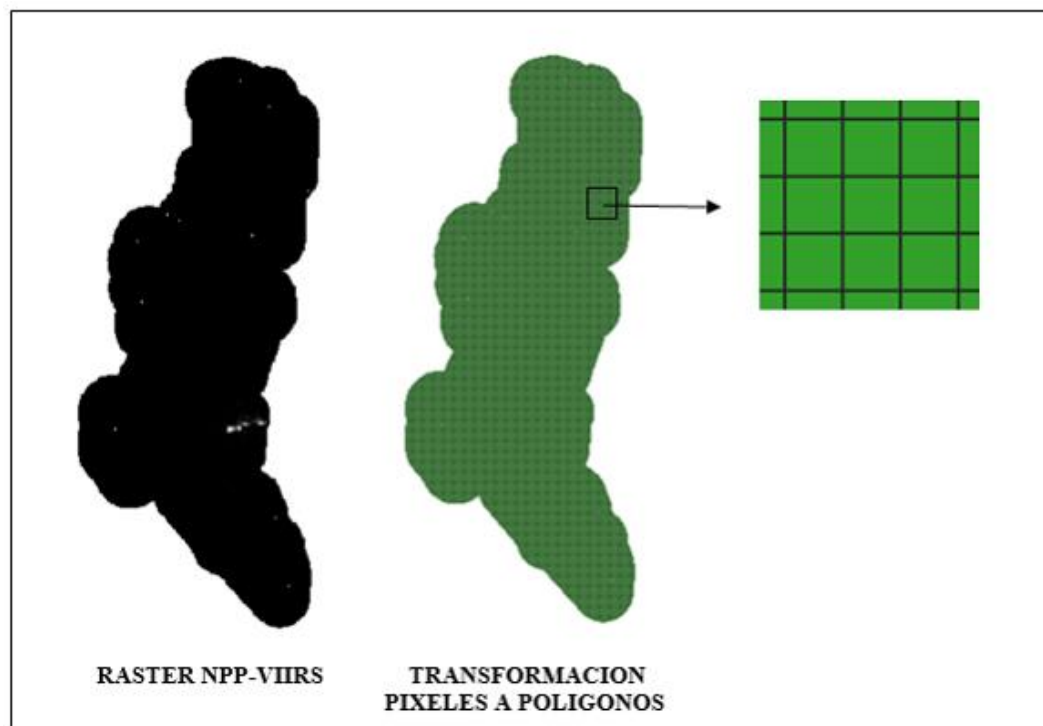


Figura 11: Transformación de píxeles de la imagen a polígonos.

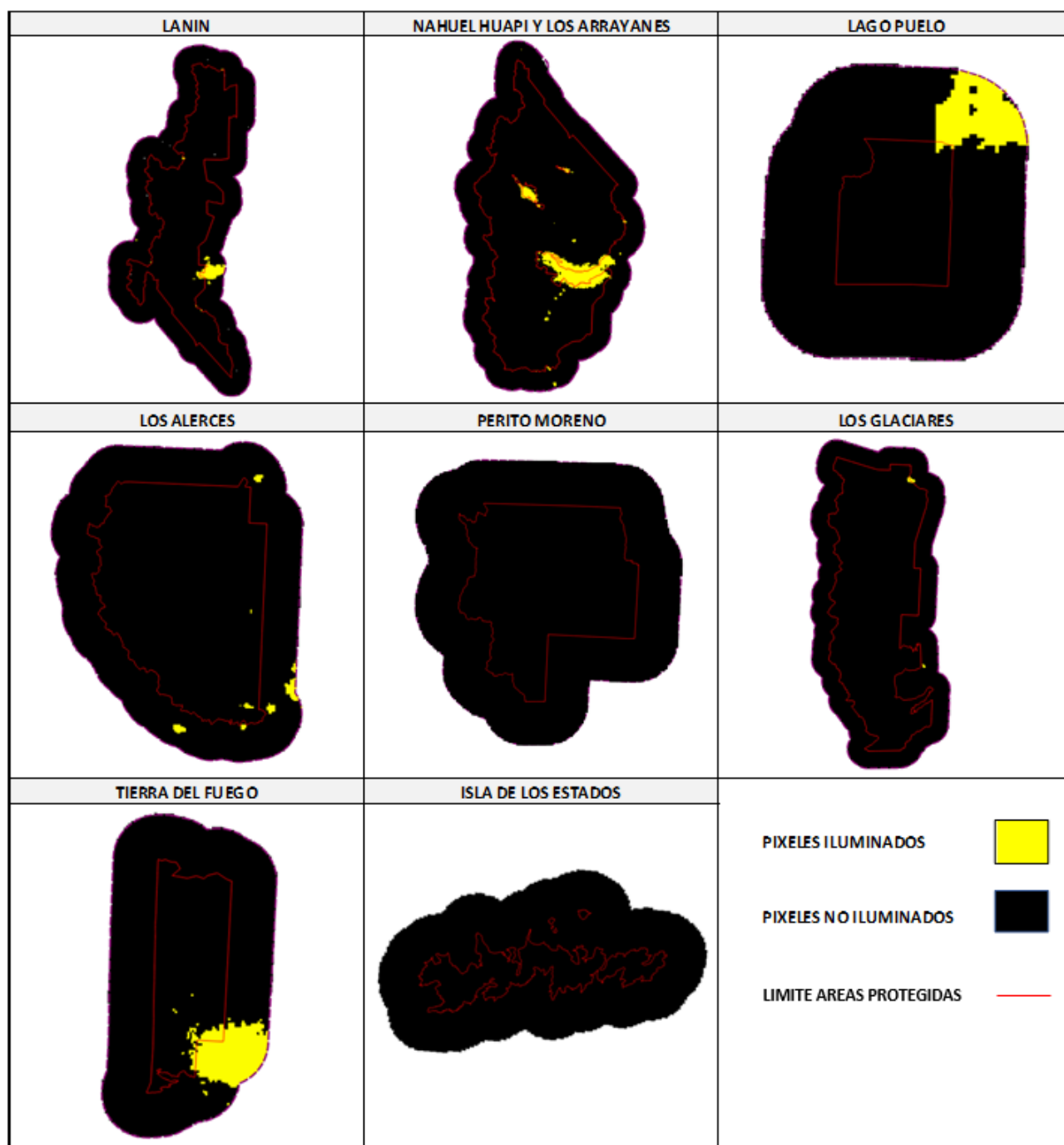


Figura 12: Binarización de las imágenes Suomi NPP-VIIRS de las APs empleando el umbral de luminosidad de referencia 0,43 nW/cm²/sr.

Por otro lado, se realizó la detección y extracción de las áreas urbanas (o núcleos poblacionales) con el complemento *Open Street Map* (OSM) de QGIS, el cual presenta una capa de información denominada *Multipolígono – Zoom 3* que cuenta con las superficies correspondientes a áreas urbanas de la zona de interés que se requiera. Los núcleos poblacionales que se encontraron dentro de los límites jurisdiccionales de las APs fueron denominados **áreas urbanas internas**, mientras que las que se localizaron dentro del radio de

influencia establecido de 10 km constituyeron **áreas urbanas externas** (Figura 13). En la Tabla 3 se detallan las áreas urbanas detectadas para cada AP, discriminándose su tipo de localización (interna o externa).

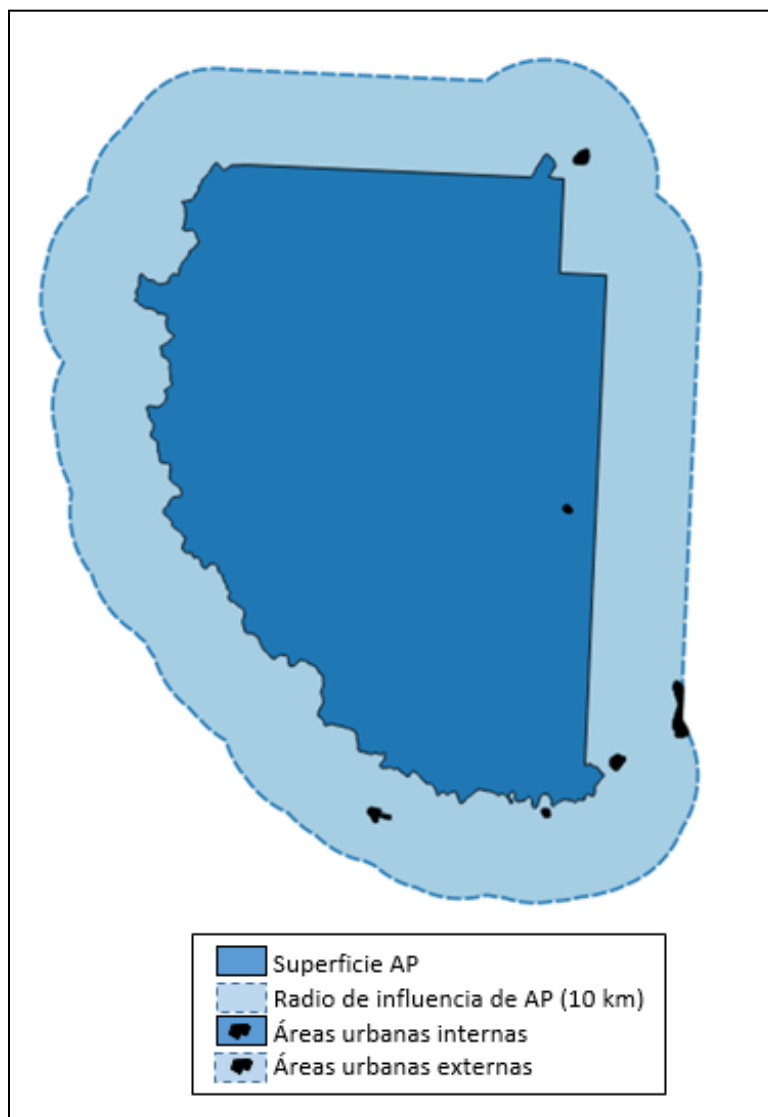


Figura 13: Ejemplo de áreas urbanas internas y externas detectadas con OSM para el PN Los Alerces.

Tabla 3: Áreas urbanas detectadas para cada área protegida.

AREA PROTEGIDA	AREA URBANA	MUNICIPIO/DPTO	PROVINCIA	LOCALIZACION
LANIN	San Martín de los Andes	San Martín de los Andes/Dpto Lácar	Neuquén	EXTERNA
	Curruhuinca	Dpto Lácar	Neuquén	INTERNA
	Las Pendientes	Dpto Lácar	Neuquén	EXTERNA
	Villa Lago Lolog	San Martín de los Andes/Dpto Lácar	Neuquén	EXTERNA
	Villa Río Quilquihue	Junín de los Andes/Dpto Huiliches	Neuquén	EXTERNA
	Lago Ñorquinco	Dpto Aluminé	Neuquén	EXTERNA
	Villa Lago Meliquina	Villa Lago Meliquina/Dpto Lácar	Neuquén	EXTERNA
NAHUEL HUAPI Y LOS ARRAYANES	San Carlos de Bariloche	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	Villa Catedral	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	Colonia Suiza	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	Arelauquen	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	Barrio El Pilar	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	Aeropuerto Int Tte L. Candelaria	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	INTERNA
	Aeródromo Lago Nahuel Huapi	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	Villa Don Orione	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	Valle Escondido	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	Villa Campanario	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	Valle del Sol	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	Villa Llao Llao	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	El Trébol	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	Las Cartas	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	Bahía López	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	Villa Tacúl	San Carlos de Bariloche / Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	Dina Huapi	Dina Huapi / Dpto Pilcaniyeu	Río Negro	EXTERNA
	Villa Mascardi	Dpto Bariloche	Río Negro	INTERNA
	Río Villegas	Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	El Foyel	Dpto Bariloche	Río Negro	EXTERNA
	Villa Llanquín	Dpto Pilcaniyeu	Río Negro	EXTERNA
	Villa La Angostura	Villa La Angostura/ Dpto Los Lagos	Neuquén	EXTERNA
	Villa Trafal	Villa Trafal/ Dpto Los Lagos	Neuquén	EXTERNA
LAGO PUELO	Lago Puelo	Lago Puelo/Dpto Cushamen	Chubut	EXTERNA
	El Hoyo	El Hoyo/Dpto Cushamen	Chubut	EXTERNA
	Las Golondrinas	Lago Puelo/Dpto Cushamen	Chubut	EXTERNA
	Paraje Currumahuida	El Hoyo/Dpto Cushamen	Chubut	EXTERNA
	Terrazas del Radal	Lago Puelo/Dpto Cushamen	Chubut	EXTERNA
	Cerro Radal	Lago Puelo/Dpto Cushamen	Chubut	EXTERNA
	Paraje Entre Ríos	Lago Puelo/Dpto Cushamen	Chubut	EXTERNA
LOS ALERCES	Futaleufú (Chile)	***	***	EXTERNA
	Los Cipreses	Trevelín/ Dpto Futaleufú	Chubut	EXTERNA
	Aldea Escolar (Los Rápidos)	Trevelín/ Dpto Futaleufú	Chubut	EXTERNA
	Trevelín	Trevelín/ Dpto Futaleufú	Chubut	EXTERNA
	Villa Futalaufquen	Dpto Futaleufú	Chubut	INTERNA
	Villa Lago Rivadavia	Cholila/Cushamen	Chubut	EXTERNA
PERITO MORENO	No se detectaron núcleos poblacionales dentro del área de análisis			
LOS GLACIARES	Puerto Bandera	Dpto Lago Argentino	Santa Cruz	EXTERNA
	El Chaltén	Dpto Lago Argentino	Santa Cruz	INTERNA
TIERRA DEL FUEGO	Ushuaia	Ushuaia/Dpto Ushuaia	Tierra del Fuego	EXTERNA
ISLA DE LOS ESTADOS	No se detectaron núcleos poblacionales dentro del área de análisis			

3.4. Estimación de métricas de contaminación lumínica

Luego de la determinación del umbral de luminosidad de referencia y la detección de polígonos píxeles iluminados y no iluminados se procedió al cálculo de la superficie con contaminación lumínica dentro de los límites de cada AP (superficie iluminada interna) así como también aquella correspondiente al área de influencia de 10 km (superficie iluminada externa).

Los cálculos de superficies iluminadas internas y externas se determinaron contabilizando, respectivamente, la cantidad de polígonos píxeles con luz que se encontraban completamente dentro de los límites del área protegida (píxeles iluminados internos) y aquellos localizados parcial o totalmente dentro del área buffer de 10 km (píxeles iluminados externos). Luego de obtener el número de píxeles correspondientes a cada caso se calcularon las áreas iluminadas en unidades de kilómetros cuadrados (km^2) así como también en porcentajes⁴.

Por otra parte, se generaron estadísticas con los valores de luminosidad obtenidos. Las estadísticas, conjuntamente con los cálculos de superficies iluminadas, permitieron establecer una comparación del nivel de luminosidad y distribución de las luces nocturnas junto con la consecuente contaminación lumínica que afecta a las áreas protegidas en estudio.

En estudios previos se han empleado una serie de estadísticas basadas en los valores de las luces nocturnas (Xu et al. 2019; Jiang et al. 2017). En este trabajo se analizaron los siguientes indicadores:

- **TNL (*Total Night Light*) o SOL (*Sum Of Light*):** es la suma del conjunto de los valores de luz que se encuentran en un área determinada. Indica la intensidad de la luz total del área de estudio.
- **MNTL (*Mean Value of Nighttime light*) o NTM (*Nighttime light Mean*):** refiere al valor medio de la luz nocturna que se encuentra en un área determinada.
- **NTSD (*Nighttime light Standard Desviation*):** cuantifica la variación o dispersión del conjunto de datos de luz nocturna de una determinada región.

Las estadísticas mencionadas anteriormente se calcularon empleando como área total de análisis para cada AP la superficie del AP más la zona de influencia de la misma (buffer de 10 km). Esto permitió analizar el nivel de contaminación que afecta a las APs no solo dentro de sus límites sino también el peso que otorga la influencia externa de las luces nocturnas provenientes de núcleos urbanos, es decir, cómo la continuidad espacial del fenómeno traspasa los límites jurisdiccionales de las APs.

⁴ Para el cálculo de áreas iluminadas se tomó en cuenta que 1 píxel equivale a 0.25 Km^2 , ya que la resolución espacial de las imágenes NPP-VIIRS es de 500 metros. Los porcentajes se calcularon en relación al área total (interna o externa, según el caso) de cada AP.

3.5. Análisis de las fuentes de origen de la luminosidad nocturna en las áreas protegidas

El estudio de las fuentes que originan la luminosidad nocturna dentro de los límites de las áreas protegidas y su consecuente contaminación lumínica requirió de un análisis topológico entre las capas de información intervinientes: polígonos píxeles iluminados internos y externos, puntos de infraestructura de servicios, líneas de infraestructura de circulación y polígonos de áreas urbanas. Los polígonos píxeles iluminados generan, si presentan continuidad espacial, parches iluminados. Este es el caso del parche de iluminación urbana como continuidad espacial de la iluminación proveniente de áreas urbanas. En relación a lo anterior es importante aclarar que, en el caso puntual del AP Tierra del Fuego, aproximadamente la mitad del parche de iluminación urbana se corresponde con superficie de agua, con lo cual la iluminación artificial nocturna en este caso puede provenir particularmente de dos fuentes: luces de núcleos urbanos y luces de embarcaciones, como barcos pesqueros y cruceros.

En la Tabla 5 se detallan los criterios topológicos definidos para determinar las distintas fuentes de iluminación artificial nocturna dentro de los límites de las APs y en la Figura 14, las capas de información empleadas.

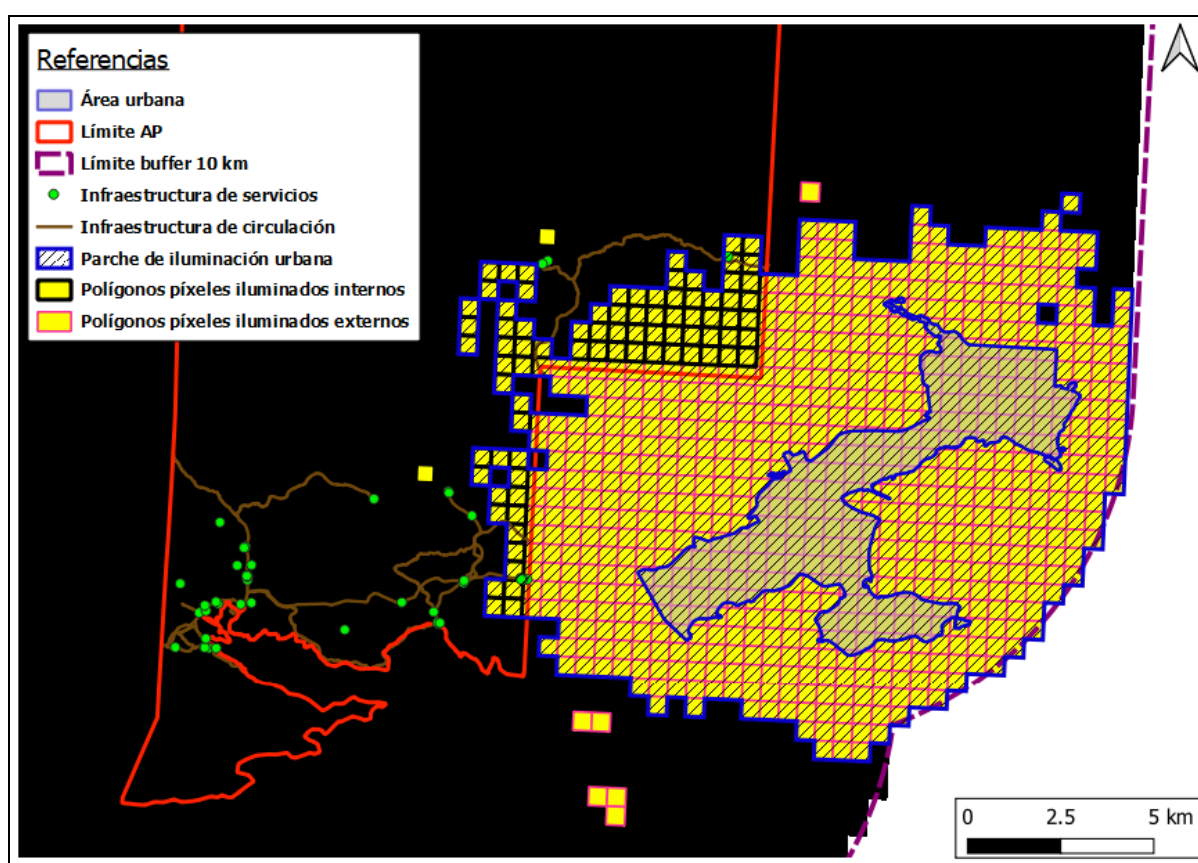
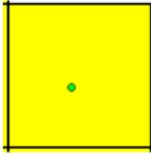
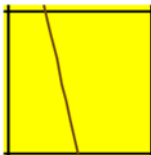
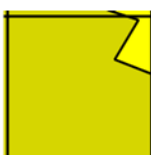
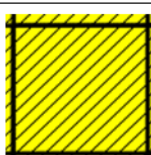
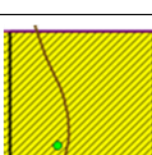


Tabla 4: Criterios topológicos de determinación de fuentes de luminosidad interna en las APs.

FUENTES DE LUMINOSIDAD	CRITERIOS TOPOLOGICOS	EJEMPLO	FUENTES DE LUMINOSIDAD	CRITERIOS TOPOLOGICOS	EJEMPLO
INFRAESTRUCTURA DE SERVICIOS (IS)	Polígonos píxeles iluminados internos que contienen o intersectan elementos de la capa infraestructura de servicios.		IS – URBANO DIRECTO	Polígonos píxeles iluminados internos que se superponen con la capa de área urbana y contienen o intersectan elementos de la capa IS.	
INFRAESTRUCTURA DE COMUNICACION (IC)	Polígonos píxeles iluminados internos que contienen o intersectan elementos de la capa infraestructura de circulación.		IC – URBANO DIRECTO	Polígonos píxeles iluminados internos que se superponen con el parche de iluminación urbana y contienen o intersectan elementos de la capa IC.	
URBANO DIRECTO	Polígonos píxeles iluminados internos que se superponen con la capa de área urbana.		IS – IC- URBANO DIRECTO	Polígonos píxeles iluminados internos que se superponen con la capa de área urbana y contienen o intersectan elementos de las capas IS e IC.	
URBANO INDIRECTO	Polígonos píxeles iluminados internos que se superponen con el parche de iluminación urbana.		IS – URBANO INDIRECTO	Polígonos píxeles iluminados internos que se superponen con el parche de iluminación urbana y contienen o intersectan elementos de la capa IS.	
DESCONOCIDA	Polígonos píxeles iluminados internos que no poseen una fuente de origen determinada.		IC – URBANO INDIRECTO	Polígonos píxeles iluminados internos que se superponen con el parche de iluminación urbana y contienen o intersectan elementos de la capa IC.	
IS - IC	Polígonos píxeles iluminados internos que contienen o intersectan elementos de las capas IS e IC.		IS – IC – URBANO INDIRECTO	Polígonos píxeles iluminados internos que se superponen con el parche de iluminación urbana y contienen o intersectan elementos de IS e IC.	

4. Resultados

4.1. Métricas de contaminación lumínica en las áreas protegidas

La contaminación lumínica en las ocho APs de la Patagonia andina resultó dispar. El PN Tierra del Fuego exhibió los mayores niveles con los porcentajes de superficies iluminadas internas y externas más altas (Tabla 6 y Figura 15). Luego siguió en magnitud de luminosidad interna el PN Nahuel Huapi y Los Arrayanes mientras que el PN Lago Puelo es el que presentó la mayor influencia lumínica externa luego del PN Tierra del Fuego.

Los menores niveles (no nulos) de luminosidad interna y externa se evidenciaron en el PN Los Glaciares.

Los porcentajes nulos de áreas iluminadas, tanto internas como externas, se encontraron en PN Perito Moreno y la RNS Isla de los Estados, los cuales no presentaron luminosidad nocturna dentro de sus límites jurisdiccionales, así como tampoco en sus áreas de influencia. En ambos casos la ausencia de contaminación lumínica externa resulta lógica ya que, en el caso del PN Perito Moreno, no existen núcleos poblacionales dentro del radio de análisis de 10 km mientras que, en la Isla de los Estados, si bien su exterior está conformado completamente por superficie oceánica, en la misma podían existir fuentes de luminosidad (barcos pesqueros, plataformas petroleras, cruceros, etc.) que no fueron detectadas en este caso (Tabla 6).

Tabla 5: Superficies iluminadas internas/externas y proporciones de área iluminada para cada AP

ÁREA PROTEGIDA	INTERIOR				EXTERIOR			
	N° píxeles iluminados	Área total AP km ²	Área iluminada Km ²	Área iluminada %	N° píxeles iluminados	Área total Buffer km ²	Área iluminada km ²	Área iluminada %
Perito Moreno	0	1220	0	0,00	0	2321,75	0	0,00
Isla de los Estados	0	394,25	0	0,00	0	2009,5	0	0,00
Los Glaciares	19	7074	4,75	0,07	35	5621,75	8,75	0,16
Los Alerces	14	2528,5	3,5	0,14	146	2560	36,5	1,43
Lanín	33	3916,5	8,25	0,21	389	5561,25	97,25	1,75
Lago Puelo	3	254,75	0,75	0,29	346	1009,25	86,5	8,57
Nahuel Huapi y Los Arrayanes	539	6937,5	134,75	1,94	1309	5198,75	327,25	6,29
Tierra del fuego	86	659,5	21,5	3,26	679	1675,25	169,75	10,13

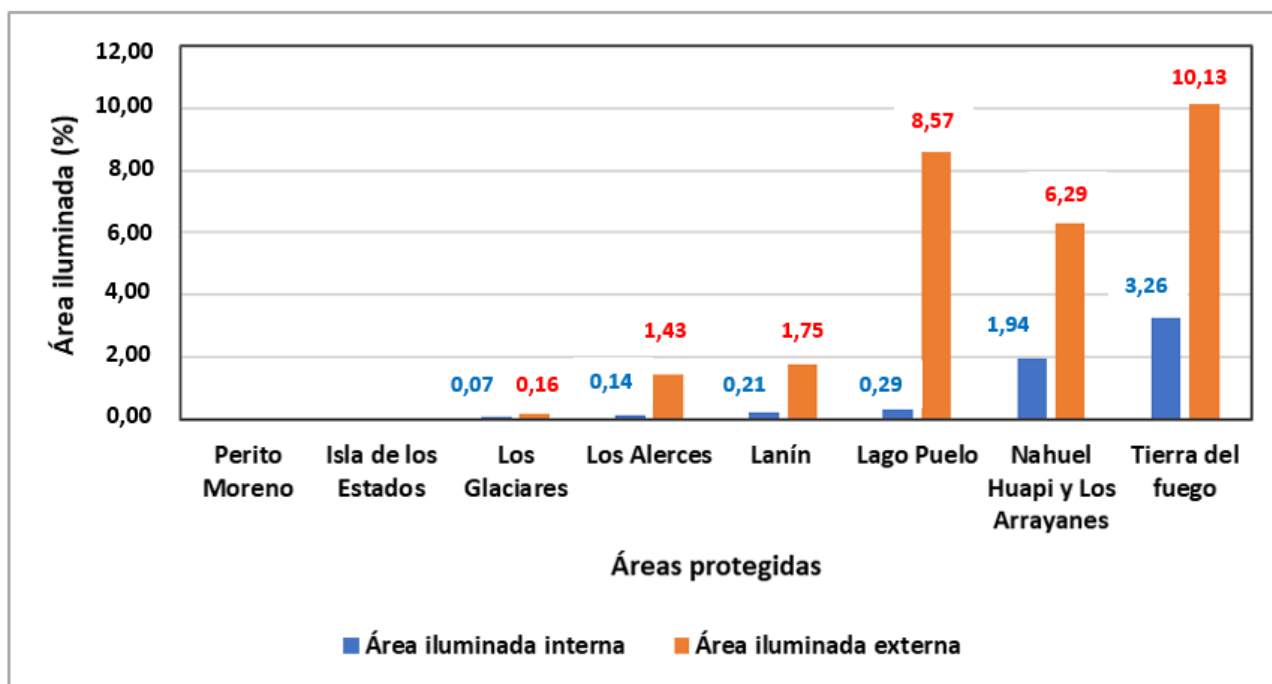


Figura 15: Proporciones de superficies iluminadas internas y externas para cada AP

Además de las métricas anteriores, el cálculo de estadísticas a partir de los valores de luces nocturnas calculadas para el total de píxeles iluminados de cada AP⁵ permitió profundizar el análisis de los niveles de contaminación lumínica (Figura 16). La mayor intensidad de luz total (TNL) se presentó en el PN Nahuel Huapi y Los Arrayanes (9.866,7 nW/cm²/sr) mientras que la menor se encontró en el PN Los Glaciares con 195,4 nW/cm²/sr totales. En cuanto a los valores medios de luminosidad (MNTL), el PN Tierra del Fuego presentó el mayor valor, próximo a 0,6 nW/cm²/sr, mientras que el mínimo se encontró en PN Los Glaciares, con 0,004 nW/cm²/sr.

El análisis de la variación del conjunto de valores de luz nocturna resultantes (NTSD) permitió identificar al PN Tierra del Fuego como el AP con mayor dispersión en sus valores de luminosidad mientras que los valores más homogéneos se encontraron en el PN Los Glaciares.

Para el caso del PN Perito Moreno y la RNS Isla de los Estados no se realizaron estadísticas de luminosidad ya que no presentaron píxeles iluminados dentro de sus límites internos ni externos.

⁵ Los cálculos estadísticos se realizaron tomando en cuenta el total de los píxeles iluminados internos y externos de cada AP y se relativizaron en base al total de píxeles que componían las áreas de análisis de cada AP (área interna + buffer).

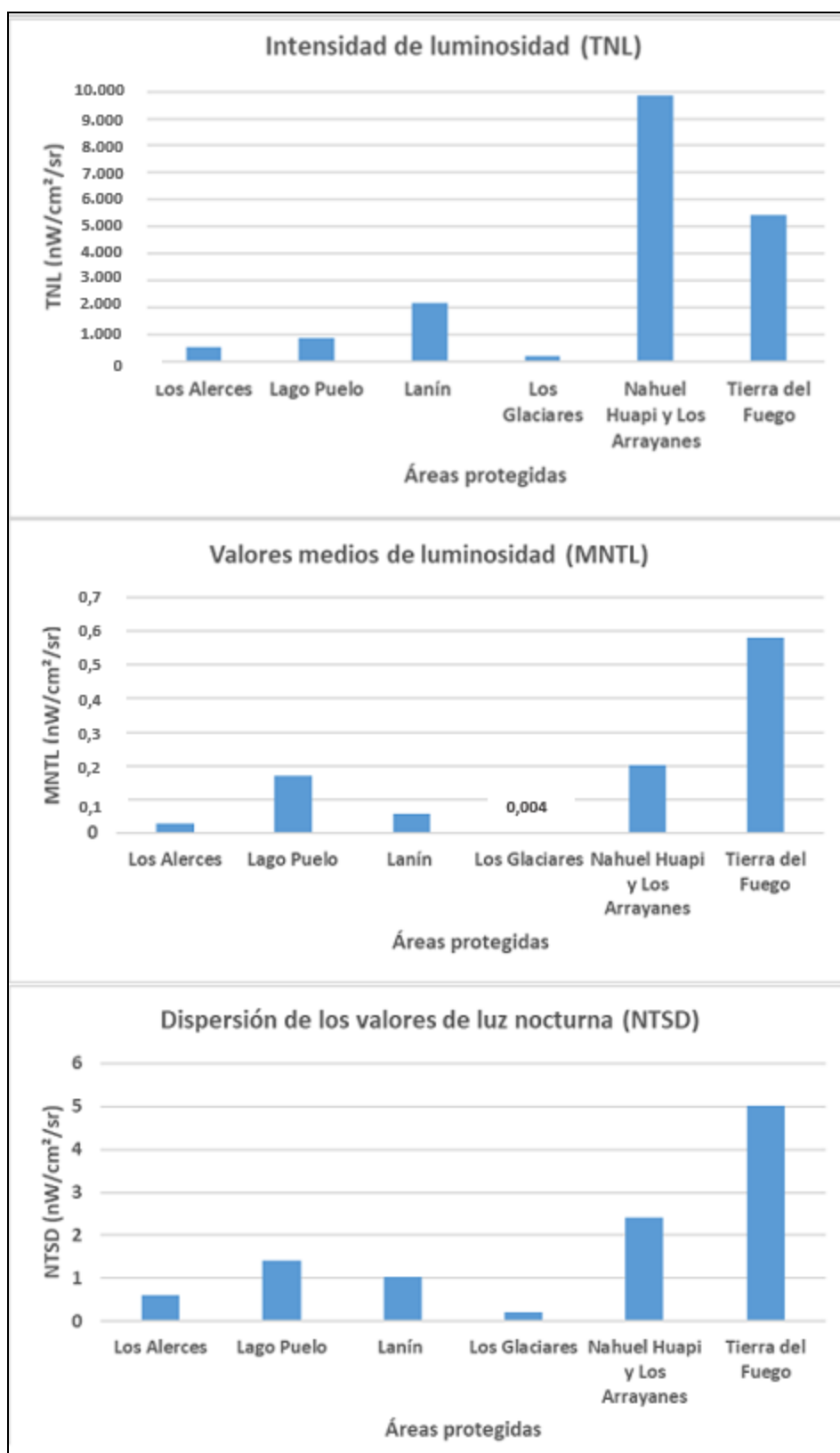


Figura 16: Estadísticas de luces nocturnas para cada AP

4.2. Análisis de las fuentes de origen de la luminosidad nocturna en las áreas protegidas.

En primer lugar, en el análisis del total de píxeles iluminados contabilizados en el conjunto de las APs de la Patagonia andina⁶ se determinó que la fuente de origen de luz nocturna de mayor porcentaje (79,4% del total de los píxeles iluminados) fue aquella generada indirectamente por la luminosidad que se extiende a partir de los parches de continuidad de iluminación de las áreas urbanas (Urbano indirecto). Este resultado demostró la influencia de los componentes de la contaminación lumínica (deslumbramiento, resplandor del cielo, intrusión de luz y desorden) que provocan que este tipo de polución se convierta en un fenómeno que se extiende espacialmente y trasciende los límites jurisdiccionales de las áreas protegidas.

Las fuentes de origen de luminosidad que contaron con la menor proporción del conjunto de datos analizados (0,14%) se corresponden con la infraestructura de servicios y ésta última en conjunción con urbano directo.

Alrededor de un 5% de los píxeles iluminados presentó una fuente de origen desconocida ya que no se relacionaron topológicamente con ningún elemento de infraestructura ni con orígenes urbanos directo o indirectos (Figura 17).

En el análisis particular del comportamiento de las fuentes de luminosidad en cada una de las APs, el PN Los Alerces presentó la mayor proporción de fuente de luminosidad nocturna de tipo desconocida y continuaron en magnitud el PN Tierra del Fuego y Nahuel Huapi - Los Arrayanes mientras que el resto de las áreas protegidas no presentaron fuentes desconocidas de luz (Figura 18 y Tabla 7).

La categoría de fuente de iluminación detectada en la mayor parte de las áreas protegidas fue la correspondiente a infraestructura de comunicación en conjunción con urbano indirecto y continuaron por debajo en orden de magnitud la fuente urbano indirecto y las infraestructuras de servicios y comunicación en unión con urbano indirecto.

⁶ El total de píxeles con luz contabilizado en el conjunto de las áreas protegidas fue de 694, según el umbral de referencia de luminosidad de 0.43 nW/cm²/sr empleado en el análisis.

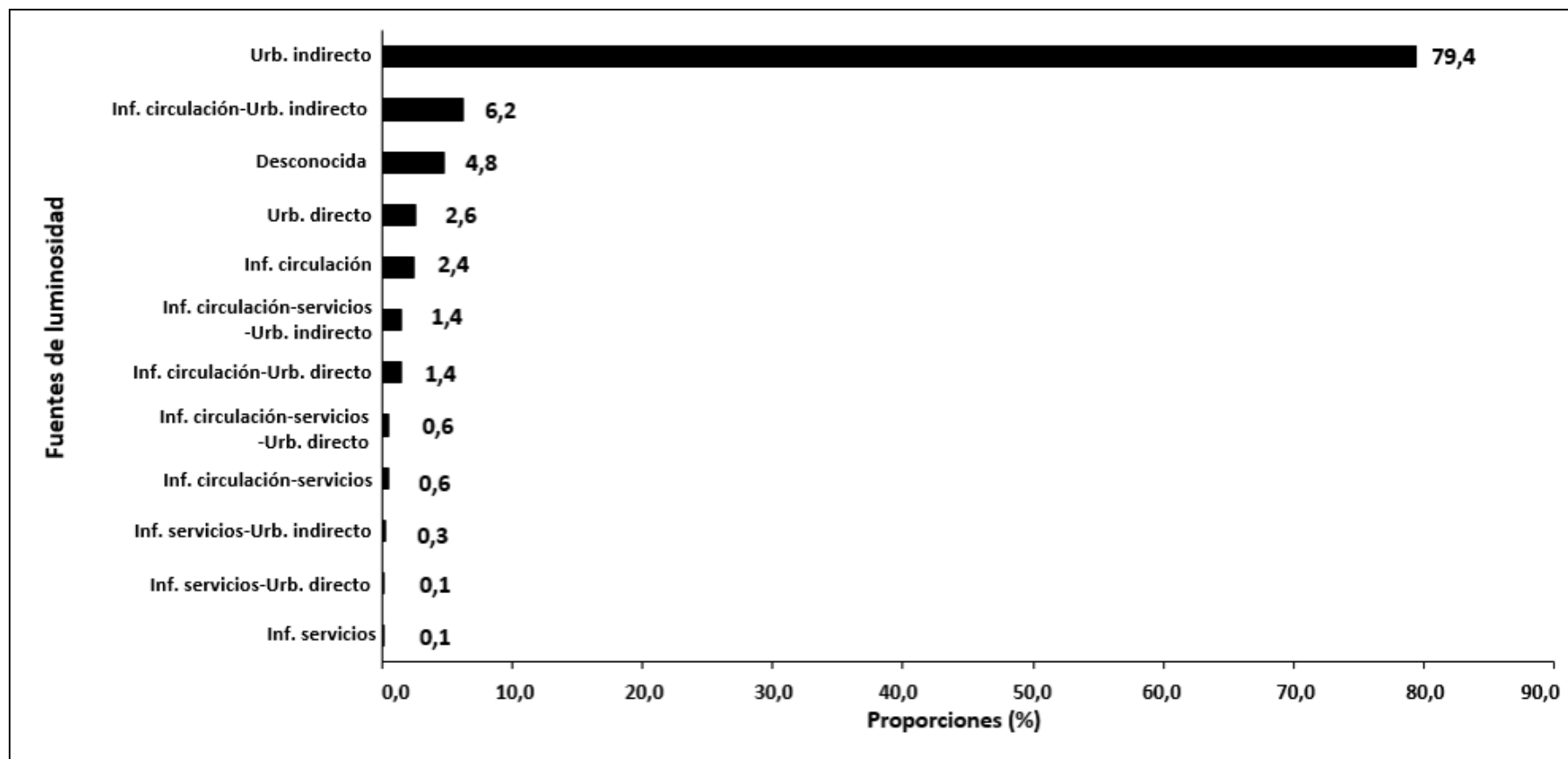


Figura 17: Proporciones de fuentes de luminosidad nocturna respecto del total de píxeles iluminados del área de estudio.

Tabla 6: Proporción (%) y número de píxeles iluminados discriminados por fuente de luminosidad nocturna

ÁREA PROTEGIDA	FUENTE DE LUMINOSIDAD												TOTAL PÍXELES ILUMINADOS
	IS	IC	UD	UI	IS - IC	IS - UD	IS - UI	IC - UD	IC - UI	IS - IC - UD	IS - IC - UI	DESCONOCIDA	
PN Los Alerces	7,1 (1)	7,1 (1)	0	0	0	7,1 (1)	0	0	7,1 (1)	0	0	71,4 (10)	100 (14)
PN Lago Puelo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100 (3)	0	100 (3)
PN Lanín	0	3,0 (1)	0	39,4 (13)	9,1 (3)	0	0	6,1 (2)	36,4 (12)	6,1 (2)	0	0	100 (33)
PN Los Glaciares	0	0	0	31,6 (6)	0 (0)	0	0	31,6 (6)	26,3 (5)	5,3 (1)	5,3 (1)	0	100 (19)
PN Nahuel Huapi y Los Arrayanes	0	2,8 (15)	3,3 (18)	85,0 (458)	0,2 (1)	0	0,4 (2)	0,4 (2)	3,7 (20)	0,2 (1)	0,7 (4)	3,3 (18)	100 (539)
PN Tierra del fuego	0	0	0	86,0 (74)	0	0	0	0	5,8 (5)	0	2,3 (2)	5,8 (5)	100 (86)

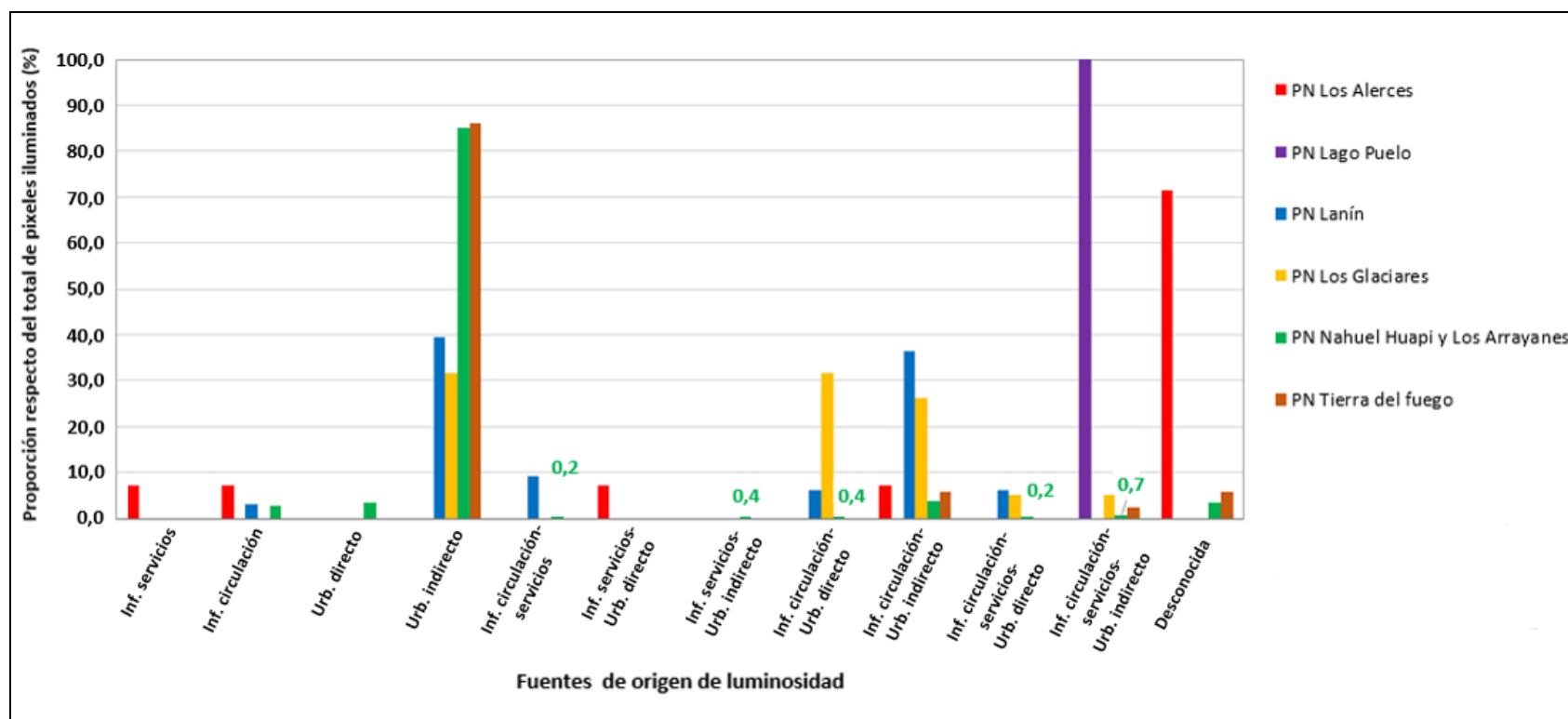


Figura 18: proporciones de fuentes de luminosidad nocturna respecto del total de píxeles iluminados de cada AP. Las etiquetas en verde indican proporciones inferiores a 1%.

5. Discusión

5.1. Resultados de la contaminación lumínica en APs de la Patagonia andina argentina

Aun cuando las motivaciones de la creación de un área protegida sean múltiples (ej., proteger la biota, fomentar el turismo; Baldi et al. 2017) un valor fundamental de éstas es el mantenimiento de las condiciones naturales al prevenir y mitigar posibles impactos biológicos y ambientales de perturbaciones causadas por las actividades humanas (Green et al., 2019). Este valor debe, aunque pueda parecer evidente mencionarlo, mantenerse tanto en el día como en la noche. Sin embargo, en la Patagonia andina argentina, el mantenimiento de dichas condiciones no es alcanzado en todas las APs por igual, al hallarse notables ejemplos de contaminación lumínica tales como el caso de los PNs Tierra del Fuego, Lago Puelo y Nahuel Huapi-Los Arrayanes. A partir de estos resultados sería interesante llevar a cabo estudios específicos de medición de la magnitud de la contaminación lumínica detectada en determinadas especies para poder establecer de este modo la dimensión de la importancia de implementar o incrementar medidas de mitigación tendientes a minimizar las presiones antropogénicas sobre las APs. Asimismo, para entender la magnitud del impacto de esta contaminación, los resultados obtenidos deben ser contextualizados. Con respecto a Argentina, no se encontraron estudios específicos de contaminación lumínica en áreas protegidas ya que la mayor parte de los trabajos basados en imágenes satelitales de luces nocturnas se enfocan en la delimitación de áreas urbanas (Quaini, 2014; Martin Oriol, 2016). No obstante, los aportes a nivel global presentados en Aubrecht et al. (2010) indican que entre un 5 y 10% de las áreas protegidas argentinas evidencian exposición a la luz artificial nocturna. Estos valores resultan comparativamente bajos con respecto a otras regiones más expuestas (más del 20%) tales como Europa, Asia Menor, el Caribe, el sur y este de Asia y este de los Estados Unidos, sin embargo, debemos permanecer alertas a una posible contaminación lumínica creciente producto del crecimiento demográfico actual que exhiben las localidades y áreas urbanas vinculadas a las APs analizadas.

5.2. Propuesta metodológica de detección de fuentes de luz artificial mediante análisis topológico

Los trabajos existentes sobre contaminación lumínica en áreas protegidas se basan fundamentalmente en dos ejes de análisis: la caracterización de los niveles de contaminación lumínica en las APs a través de indicadores y estudios acerca de sus tendencias temporales en cuanto a intensidad y expansión espacial (Jiang et al., 2018; Mu et al., 2021; Xiang et al., 2017; Xu et al., 2019; Zheng et al., 2021). Si bien la mayor parte de dichas investigaciones involucran un análisis tanto interno como externo a las áreas protegidas no se han encontrado estudios que identifiquen las fuentes de origen de la luminosidad nocturna en las áreas protegidas. En particular, la propuesta de análisis topológico entre distintas capas de información para la detección de las fuentes de luz nocturna artificial planteado en el presente trabajo permite involucrar diversos factores (internos y externos a las APs) susceptibles de generar contaminación lumínica. Estos componentes amplían el entendimiento acerca de la heterogeneidad, la continuidad y la influencia espacial del fenómeno. Además, incluir a futuro

variables tales como la actividad humana, las fuentes de luz pública, y las características geográficas de las APs podría proporcionar una comprensión más profunda de la dinámica de la contaminación lumínica. Con esta información, las autoridades podrían implementar regulaciones más efectivas y promover prácticas de iluminación sostenible, lo que contribuiría a la conservación de estos espacios.

5.3. Heterogeneidad de la contaminación lumínica en las APs

La heterogeneidad de la contaminación lumínica en las APs de la Patagonia andina podría responder, en primer lugar, a la existencia de fuentes externas de luminosidad, representadas principalmente por núcleos poblacionales. La magnitud de la influencia de éstos dependería de su población (Anexo 2), del nivel de infraestructura urbana y la tecnología empleada en su iluminación artificial. En segundo lugar, la cercanía de las APs a núcleos urbanos define de alguna forma su nivel de aislamiento, hecho que desempeña un rol fundamental en sus niveles de contaminación. El PN Perito Moreno y la RNS Isla de los Estados representarían los casos extremos de aislamiento ya que la ausencia de núcleos poblacionales cercanos derivó en contaminación lumínica nula. En tercer lugar, vinculada a la presencia de infraestructura urbana y a la accesibilidad del territorio, la heterogeneidad podría estar asociada a la cantidad de visitantes que recibe cada AP (Anexo 2). Esto resalta la importancia de la elección del rango temporal de las imágenes nocturnas analizadas (mes de marzo) ya que para las APs del sur de Argentina la temporada alta de turismo se corresponde con los meses de noviembre a abril (fines de primavera, verano y principios de otoño). Un número alto de visitantes puede traducirse en una mayor demanda en la cantidad de servicios e infraestructura interna, aumentando de esta manera las posibles fuentes internas de contaminación, entre otras presiones. Esto último conformaría un posible eje futuro de investigación donde se evalúe la existencia de correlaciones entre ambas variables. A su vez, la elección del periodo temporal de análisis involucra diferencias en cuanto a la cantidad de horas de luz (o de noche), lo cual impactaría de forma diferencial en los efectos de la contaminación lumínica. Por ejemplo, durante el invierno, las noches son más largas, lo que significa que las especies nocturnas y los ecosistemas en general pueden estar más expuestos a la luz artificial durante un mayor número de horas. Debido a lo mencionado resultaría interesante a futuro analizar cómo varía el impacto de la contaminación lumínica a lo largo del año en diferentes ecosistemas y especies. Además, se podría profundizar en cómo las prácticas humanas, como el uso de iluminación exterior, cambian con las estaciones y cómo esto contribuye a la problemática.

5.4. Limitaciones de método y del producto NPP-VIIRS

En cuanto a limitaciones de método, la determinación del umbral de luminosidad resultó un objetivo desafiante debido a los bajos niveles de luz que se encuentran en general en la región de la Patagonia andina respecto de otros sitios de Argentina (por ejemplo, la región Pampeana). A su vez, el conjunto de las APs analizadas presentan heterogeneidades en los niveles de influencia de fuentes externas de luminosidad que dificultaron aún más la detección de un umbral que sea pueda ser aplicado a todas las áreas estudiadas. En este sentido, el análisis exploratorio de los valores de radiancia para el caso de la Isla de los Estados fue fundamental para establecer un nivel de referencia lógico a partir del cual comparar los niveles de luminosidad de las APs ya que al ser considerado un territorio libre de luz resulta un buen indicador del nivel mínimo de luminosidad de las APs australes estudiadas. Esta

metodología permitió determinar de manera efectiva el umbral de luminosidad de referencia adoptado en el presente trabajo.

Por otra parte, existieron limitaciones propias del producto de luces nocturnas ya que los resultados de este trabajo habrían sido diferentes si, por ejemplo, se cambiara el rango temporal de las imágenes analizadas a un mes que represente temporada baja de turismo. Otros factores que generarían cambios en los resultados serían una resolución espacial más alta, una mayor sensibilidad en la detección de luces por parte del sensor y avances en las correcciones de los valores incorrectos de radiancia de los píxeles. Los ejemplos mencionados representarían no solo una mayor precisión en la determinación del umbral, sino también resultados diferentes respecto de las fuentes de origen de las luces nocturnas ya que estas derivan de la contigüidad de los píxeles de luz y esto depende de la resolución espacial del producto.

Un análisis posterior más detallado y de mayor precisión podría consistir en el procesamiento de productos que presenten mejor resolución espacial, como es el caso del proyecto vigente Luojia 1-01 o el producto Black Marble HD, el cual se encuentra actualmente bajo experimentación y sin acceso público. De esta manera se podría efectuar la comparación de los resultados obtenidos en este trabajo con aquellos derivados de productos que cuentan con mayor nivel de detalle.

6. Conclusión

Las características del cielo nocturno han sido alteradas en gran medida por los humanos mediante la introducción de iluminación artificial durante la noche, fenómeno que está aumentando anualmente y en simultáneo con los procesos de expansión de la urbanización y desarrollo de infraestructura acelerados. Este exceso de luz artificial condujo a un incremento de la contaminación lumínica artificial, tipo de presión antropogénica que está afectando a varias regiones del planeta incluidas las áreas protegidas, las cuales ven perjudicado su propósito de preservar la naturaleza.

En este contexto y luego del análisis de imágenes satelitales nocturnas Suomi NPP-VIIRS puede afirmarse que las áreas naturales localizadas en la Patagonia andina argentina presentan una serie de evidencias de luminosidad artificial nocturna que pueden desencadenar en contaminación lumínica. Estos hallazgos subrayan la necesidad de considerar este fenómeno en los Planes de Gestión de las APs, aspecto que se encuentra omitido en las discusiones y en el desarrollo de dichos planes. Como medida mínima, es fundamental implementar acciones sobre la iluminación en las instalaciones e infraestructura para guardaparques y el uso público dentro de las áreas protegidas. Además, es esencial promover políticas de eficiencia energética, no solo para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el contexto del cambio climático, sino también para disminuir la contaminación lumínica generada por las localidades cercanas a las APs.

Además, resultaría interesante llevar a cabo el estudio de la evolución en el tiempo de la contaminación lumínica en las áreas protegidas analizadas en este trabajo, en función de evaluar escenarios futuros y detectar contextos políticos/económicos u otras condiciones culturales que afectan a este fenómeno.

En relación a lo mencionado, cabe destacar el nuevo acuerdo de la Convención sobre la Diversidad Biológica (CBD) que establece la meta del 30% en cuanto al compromiso de proteger al menos el 30% de la superficie terrestre y marina del planeta para el año 2030. Como iniciativa que se enmarca dentro de un esfuerzo más amplio por frenar la pérdida de biodiversidad y conservar los ecosistemas esenciales que sustentan la vida en la Tierra, la meta del 30% busca aumentar la protección de las áreas naturales bajo algún tipo de protección legal o manejo sostenible, conservar la biodiversidad, mitigar el cambio climático e involucrar a las comunidades locales en la gestión y conservación de los espacios naturales. En relación a lo mencionado, si se integrase la reducción de la contaminación lumínica en las estrategias de conservación, se avanzaría hacia el cumplimiento de los objetivos del acuerdo de la CBD y se protegería la integridad de los ecosistemas en las APs. Por ejemplo, en el caso particular de Argentina, resultaría fundamental que durante las planificaciones de aumento de superficie de las APs del país se considere el posible impacto de la contaminación lumínica como una variable crucial, especialmente en aquellos casos en los que se seleccionen áreas cercanas a grandes núcleos urbanos. Asimismo, es decisivo implementar políticas de ordenamiento ambiental y de planificación espacial marina que aborden esta cuestión.

En concordancia con Mu et al. 2021, es fundamental entender la relación espacial entre las luces artificiales nocturnas y las áreas protegidas para lograr una mejor conservación de los entornos ecológicos globales y comprender las tendencias temporales de la contaminación lumínica dentro y alrededor del área protegida.

7. Bibliografía

Aubrecht, C., Jaiteh, M., & de Sherbinin, A. (2010). Global Assessment of Light Pollution Impact on Protected Areas.

Baldi, G., Texeira, M., Martin, O. A., Grau, H. R., & Jobbágy, E. G. (2017). Opportunities drive the global distribution of protected areas. *PeerJ*, 5, e2989.

Bennie, J., Duffy, J., Davies, T., Correa-Cano, M., & Gaston, K. (2015). Global Trends in Exposure to Light Pollution in Natural Terrestrial Ecosystems. *Remote Sensing*, 7(3), 2715–2730.

Chaney, W.R. (2002) Does Night Lighting Harm Trees. *Purdue University, Forestry and Natural Resources, FAQ*. Vol 17, pp 1-4.

Daly, C.A. (2016). The Ecological Effects of Light Pollution: A Three Site (Bull Island, Trinity College Dublin & Killiney Hill) Comparative Study.

Green, D.S., Zipkin, E.F., Incorvaia, D.C., & Holekamp, K.E. (2019). Long-term ecological changes influence herbivore diversity and abundance inside a protected area in the Mara-Serengeti ecosystem. *Global Ecology and Conservation*.

Jägerbrand, A.K., & Bouroussis, C.A. (2021). Ecological Impact of Artificial Light at Night: Effective Strategies and Measures to Deal with Protected Species and Habitats. *Sustainability*, 13, 5991.

Jiang, W., He, G., Long, T., Wang, C., Ni, Y., & Ma, R. (2017). Assessing Light Pollution in China Based on Nighttime Light Imagery. *Remote. Sens.*, 9, 135.

Jiang, W., He, G., & Ni, Y. (2017). Assessment of light pollution impact on protected areas in china. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1307-1312.

Jones, K.R., Venter, O., Fuller, R.A., Allan, J.R., Maxwell, S.L., Negret, P.J., & Watson, J.E. (2018). One-third of global protected land is under intense human pressure. *Science*, 360, 788 - 791.

Longcore, T., & Rich, C. (2004). Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2, 191-198.

Martin Oriol, J. (2016). Observing changes in urban form through night satellite images in Buenos Aires and Lima. En O. Nel'lo, & R. Mele (Eds.), *Cities in the 21st Century* (págs. 93-95). London and New York: Routledge.

McColgan, M.W. (2003) Lighting Answers- Light Pollution. *Rensselaer*. Vol 7 Issue 2.

McDonald, R.I., Forman, R.T., Kareiva, P., Neugarten, R.A., Salzer, D.W., & Fisher, J.R. (2009). Urban effects, distance, and protected areas in an urbanizing world. *Landscape and Urban Planning*, 93, 63-75.

Miller, S.D., Straka, W.C., Mills, S.P., Elvidge, C.D., Lee, T.F., Solbrig, J.E., Walther, A., Heidinger, A.K., & Weiss, S.C. (2013). Illuminating the Capabilities of the Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band. *Remote. Sens.*, 5, 6717-6766.

Mu, H., Li, X., Du, X., Huang, J., Su, W., Hu, T., Wen, Y., Yin, P., Han, Y., & Xue, F. (2021). Evaluation of Light Pollution in Global Protected Areas from 1992 to 2018. *Remote. Sens.*, 13, 1849.

Quaíni, K. (2014). Procedimiento metodológico para la generación de mapas de interfase urbano-vegetación rural. Córdoba: Proyecto BPR - BID.

Raven, J.A., & Cockell, C.S. (2006). Influence on photosynthesis of starlight, moonlight, planetlight, and light pollution (reflections on photosynthetically active radiation in the universe). *Astrobiology*, 6 4, 668-75.

Román, M. (2020). *Introducción a los Datos de Luces Nocturnas de NASA "Black Marble"* [Webinar]. NASA ARSET. <https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/spanish/arset-introduccion-los-datos-de-luces-nocturnas-de-nasa-black-marble>

Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina (1980). Ley N° 22.351. Título 1: " de los Parques Nacionales, Monumentos Naturales y Reservas Nacionales". Boletín Oficial de la República Argentina.

Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina (1994). Decreto N° 453/1994. Reservas Naturales. Boletín Oficial de la República Argentina.

Sordello, R., Busson, S., Cornuau, J.H., Deverchère, P., Faure, B., Guetté, A., Hölker, F., Kerbirou, C., Lengagne, T., Le Viol, I., Longcore, T., Moeschler, P., Ranzoni, J., Ray, N., Reyjol, Y., Roulet, Y., Schroer, S., Secondi, J., Valet, N., Vanpeene, S., & Vauclair, S.C. (2022). A plea for a worldwide development of dark infrastructure for biodiversity – Practical examples and ways to go forward. *Landscape and Urban Planning*.

Xu, P., Wang, Q., Jin, J., & Jin, P. (2019). An increase in nighttime light detected for protected areas in mainland China based on VIIRS DNB data. *Ecological Indicators*.

Zhao, M., Zhou, Y., Li, X., Cao, W., He, C., Yu, B., Li, X., Elvidge, C.D., Cheng, W., & Zhou, C. (2019). Applications of Satellite Remote Sensing of Nighttime Light Observations: Advances, Challenges, and Perspectives. *Remote. Sens.*, 11, 1971.

Zheng, Q. (2019). La re-extracción de áreas urbanizadas basado en las imágenes de luces nocturnas de alta resolución. Caso de estudio: Shenzhen, Guangdong, China.

Sitios Web consultados

Administración de Parques Nacionales (APN) <https://www.argentina.gob.ar/parquesnacionales>

Base de Asentamientos Humanos de la República Argentina (BAHRA) <http://www.bahra.gob.ar/>

Google Earth Engine (GEE) <https://earthengine.google.com/>

Google Maps <https://www.google.com.ar/maps>

International Dark Sky Association (IDA) <http://darksky.org/light-pollution/>

Instituto Geográfico Nacional (IGN) <https://www.ign.gob.ar/>

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC) <https://www.indec.gob.ar/>

Fundación Aquae <https://www.fundacionaquae.org/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible <https://www.argentina.gob.ar/parquesnacionales>

Ministerio de Cultura de la Nación <https://www.argentina.gob.ar/cultura>

National Institute of General Medical Sciences <https://www.nigms.nih.gov/>

Sistema Federal de Áreas Protegidas (SIFAP) <https://sifap.gob.ar/>

8. Anexo

Anexo 1: Efectos de la contaminación lumínica en la fauna

Contaminación lumínica - Efectos en la fauna
Interferencia en ritmos circadianos⁷ de las especies: los cambios en el comportamiento de descanso y alimentación generan especies débiles y deficientes en nutrientes (Daly, 2016).
Impacto en la producción de melatonina⁸ y gonadotropinas y desregulación genética: En ciertas especies de peces la melatonina se produce durante la oscuridad y se reduce considerablemente durante las horas de brillos. Si existe exceso de luz artificial durante la noche se reducen los niveles de producción de esta hormona. Los cambios en los niveles de melatonina pueden además dificultar e impedir la producción de gonadotropinas, hormonas que desencadenan el proceso de reproducción en los peces (Daly, 2016). Por otro lado, en algunas especies, como el sapo común o europeo, la iluminación nocturna genera una desregulación de genes (Sordello et al., 2022).
Alteración de periodos de migración y desorientación: Algunas especies alteran sus periodos de migración y ven afectada su orientación. Por ejemplo, las tortugas marinas se desorientan en la playa en la búsqueda del mar durante el periodo de anidación debido a que confunden la luz artificial con la de la luna. Ciertas especies de aves, como los petreles, se desorientan por la iluminación artificial y por error vuelan hacia el océano, o muchos de ellos resultan heridos o muertos al volar hacia equipos de iluminación artificial (Daly, 2016). Algunas especies además presentan alteraciones en sus movimientos debido a que las áreas iluminadas y artefactos de luz actúan como barreras físicas (Sordello et al., 2022).
Relaciones depredador-presa y competencia entre especies: La división de especies diurnas, nocturnas y crepusculares evita la competencia excesiva por refugio, espacio y alimento. El aumento del brillo nocturno puede alterar estos patrones y causar perturbaciones en el ecosistema (Daly, 2016). La luz artificial produce cambios en los periodos de alimentación. Algunas especies se alimentan con niveles de iluminación muy bajos mientras que otras prefieren niveles de luz más altos. Un aumento de la luz artificial nocturna puede generar competencia de tiempos de alimentación si las especies comparten un mismo hábitat (Longcore et. al 2004). Además, durante las horas de brillo, las especies depredadas son más vulnerables. Esto genera una reducción en la disponibilidad de presas, así como también que los depredadores ataquen especies que normalmente no consumirían. Por otra parte, existe un efecto indirecto: muchas especies de insectos son atraídos por las fuentes de luz y como éstos son el componente principal de la dieta de muchas especies, se verán influenciados para seguir a los insectos al área donde se encuentra la fuente de luz (Daly, 2016).
Comunicación entre especies: La comunicación visual dentro y entre las especies pueden verse influenciadas por el aumento de las luces artificiales nocturnas ya que ciertas especies usan la luz para comunicarse. Este es el caso de las hembras de luciérnagas que atraen a los machos hasta 45 m de distancia con destellos bioluminiscentes, pero la presencia de iluminación artificial reduce esa visibilidad (Longcore et. al 2004).

⁷ Los ritmos circadianos son cambios físicos, mentales y conductuales que siguen un ciclo de 24 horas. Estos procesos naturales responden, principalmente, a la luz y la oscuridad, y afectan a la mayoría de seres vivos, incluidos los animales, las plantas y los microbios. Un ejemplo de ritmo circadiano relacionado con la luz es dormir en la noche y estar despierto en el día (Fuente: National Institute of General Medical Sciences)

⁸ La melatonina es una hormona que resulta esencial para controlar los patrones de sueño diurno y nocturno.

Anexo 2: N° de habitantes y distancias de núcleos poblacionales cercanos a las APs y cantidad de visitantes

AREA PROTEGIDA	N° de hab. en núcleos poblacionales ubicados hasta 10 km del AP (Censo 2022) ⁹	Rangos de distancias de núcleos poblacionales desde límite externo de AP ¹⁰	Presencia de núcleos poblacionales internos	N° de visitantes promedio (2018) ¹¹
Perito Moreno	0	>10 km	No	968
Isla de los Estados	0	>10 km	No	0
Los Glaciares	1.627	0 – 10 km	Sí	687.190 ¹²
Los Alerces	11.097	0 – 10 km	Sí	155.102
Lanín	39.990	0 – 10 km	Sí	114.884
Lago Puelo	19.217	0 – 10 km	No	251.766
Nahuel Huapi - Los Arrayanes	189.097	0 – 10 km	Sí	417.873
Tierra del fuego	82.615	0 – 10 km	No	351.880



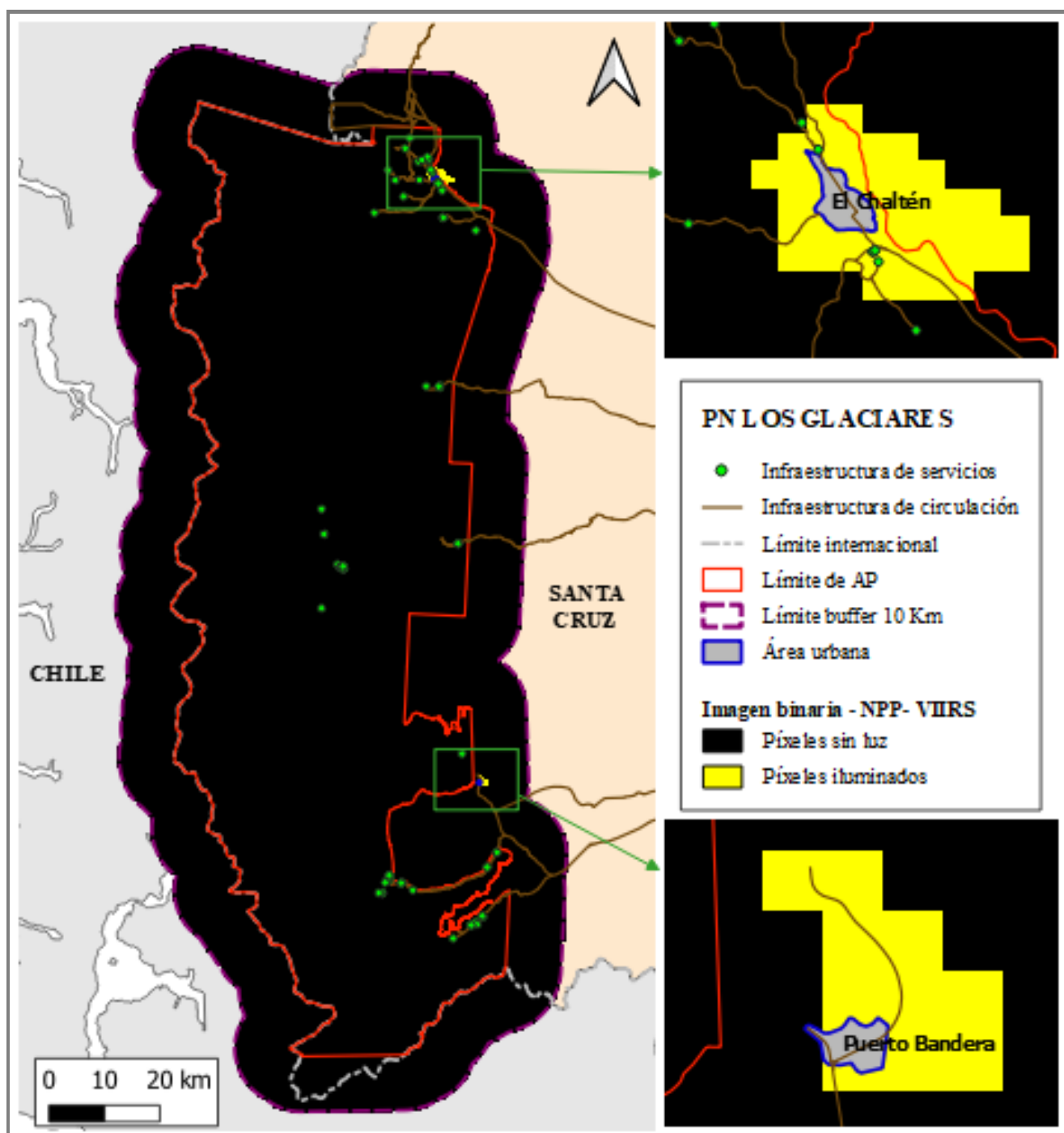
Anexo 3: Mapa de luminosidad de la Reserva Natural Silvestre Isla de los Estados

⁹ Según los resultados provisionales del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022 (<https://www.indec.gob.ar/>)

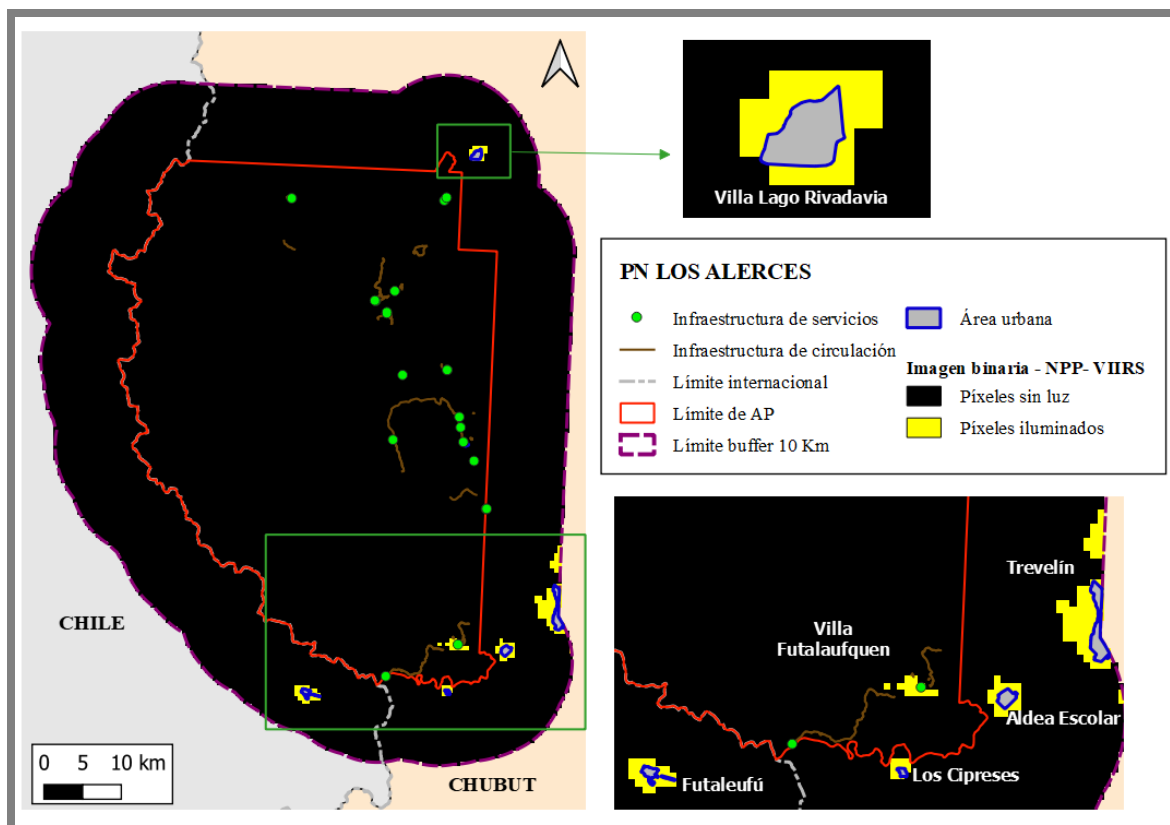
¹⁰ Cálculos generados mediante análisis espacial entre capas de información vectorial.

¹¹ Según las estadísticas de visitantes de las APs nacionales de Argentina (<https://sib.gob.ar/institucional/visitantes-apn>).

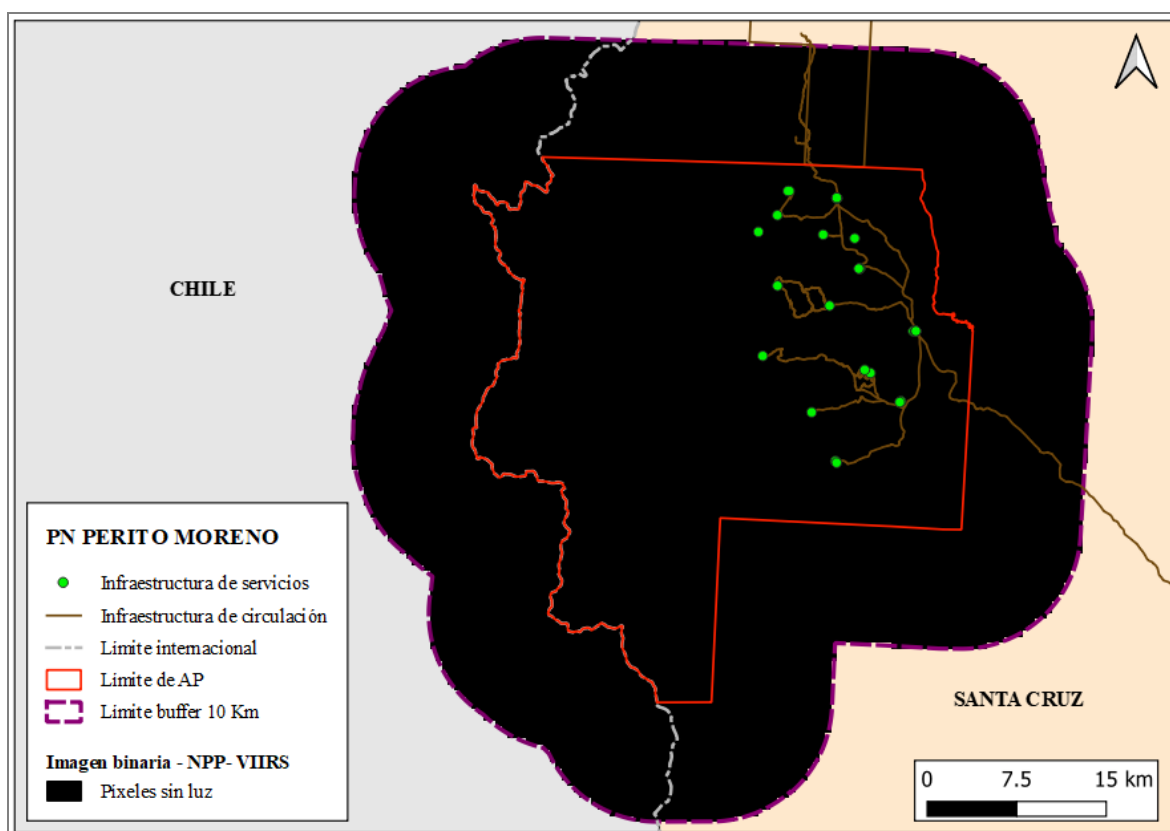
¹² El PN Los Glaciares tiene siempre el mayor promedio de visitantes respecto del resto de las APs y ese nivel de visitantes no se correspondería con el bajo nivel de contaminación que tiene. Hay que tener en cuenta que es el parque de mayor extensión del país y el único que tiene una extensa área de glaciares, lo que explica el gran número de visitantes. Por otra parte, la mayor parte de los visitantes están concentrados en un espacio muy reducido (miradores del glaciar), en cambio, en el resto de las APs analizadas, la distribución de los visitantes es más dispersa, ocupando todo el territorio.



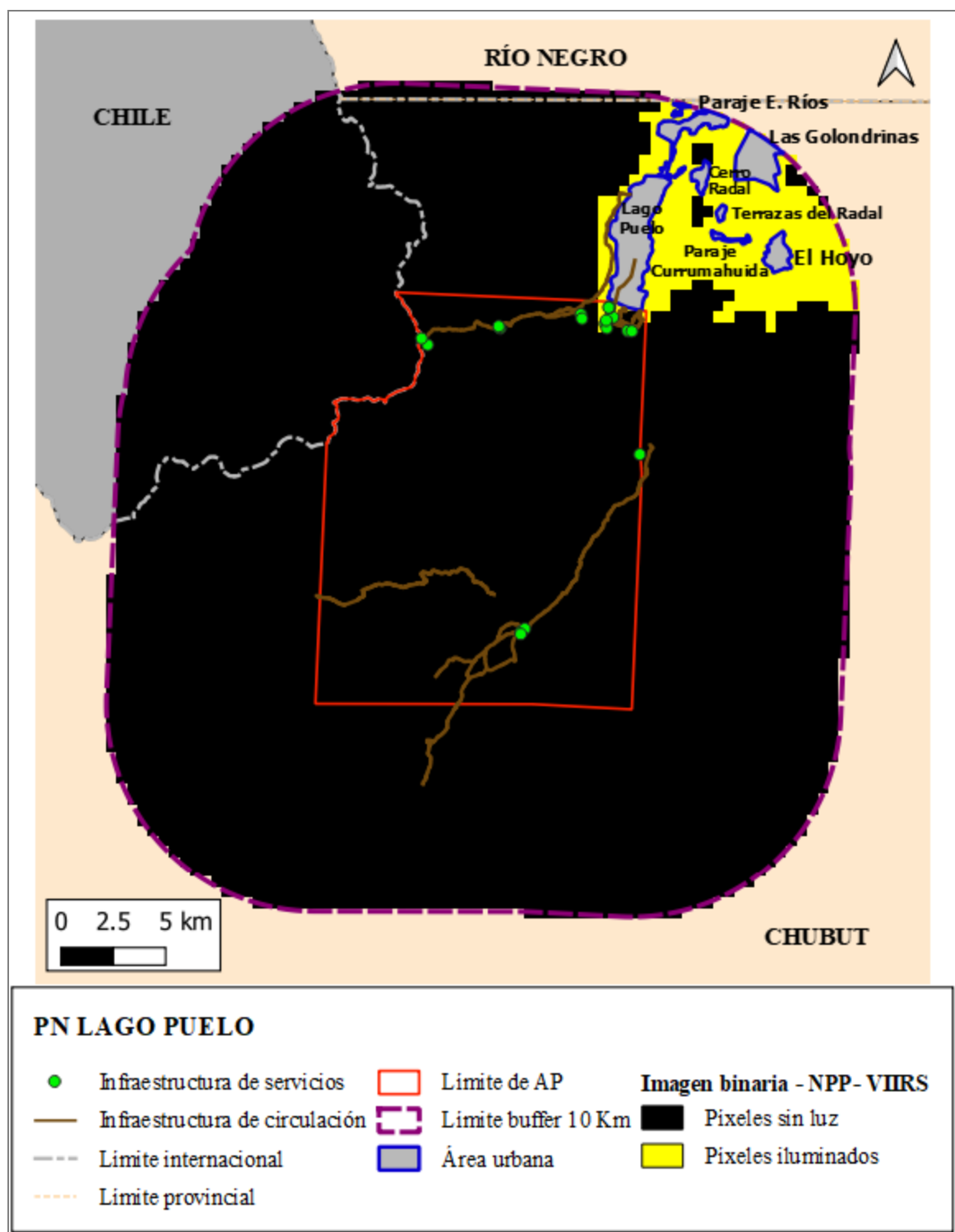
Anexo 4: Mapa de luminosidad del Parque Nacional Los Glaciares.



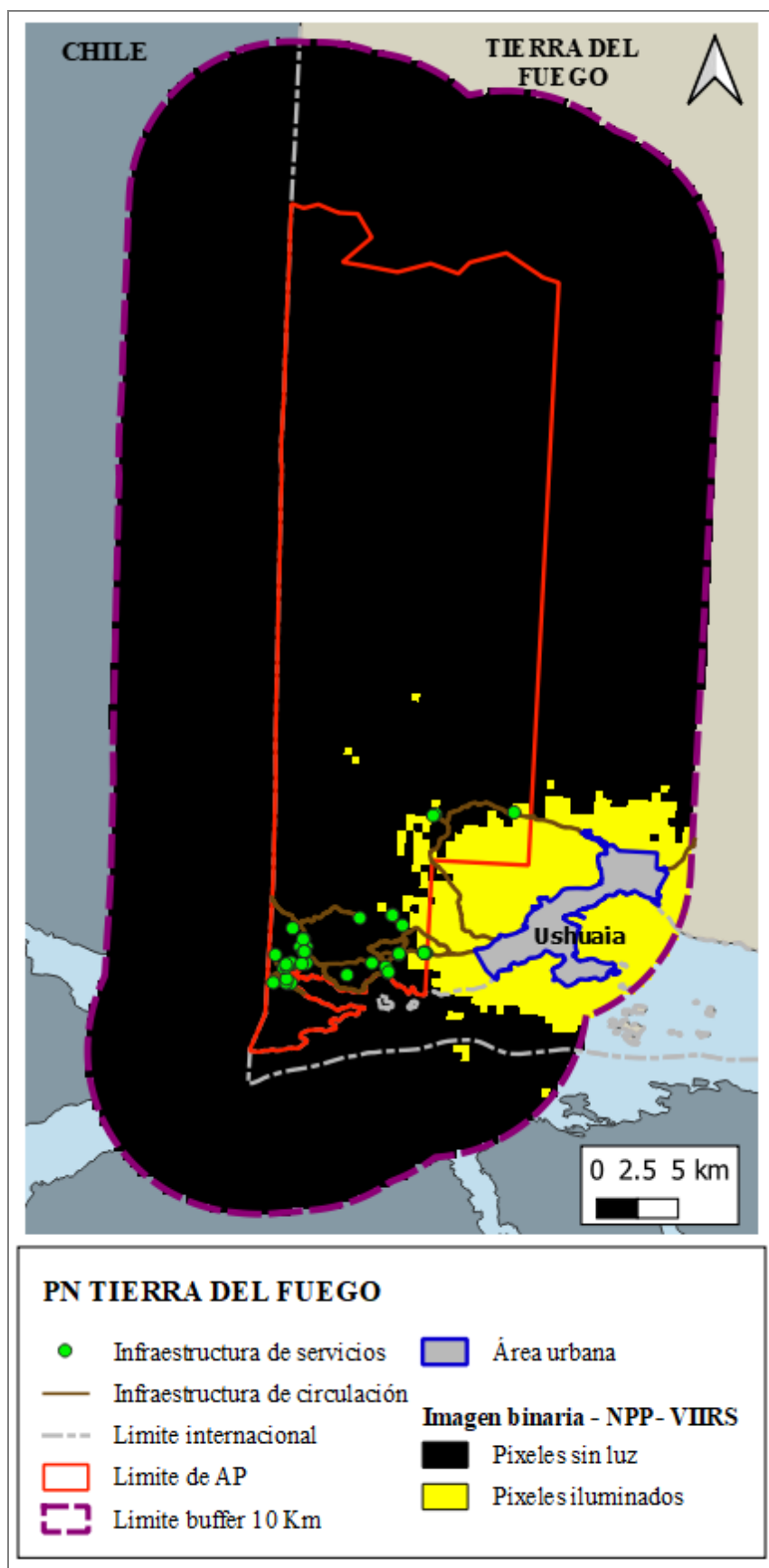
Anexo 5: Mapa de luminosidad del Parque Nacional Los Alerces



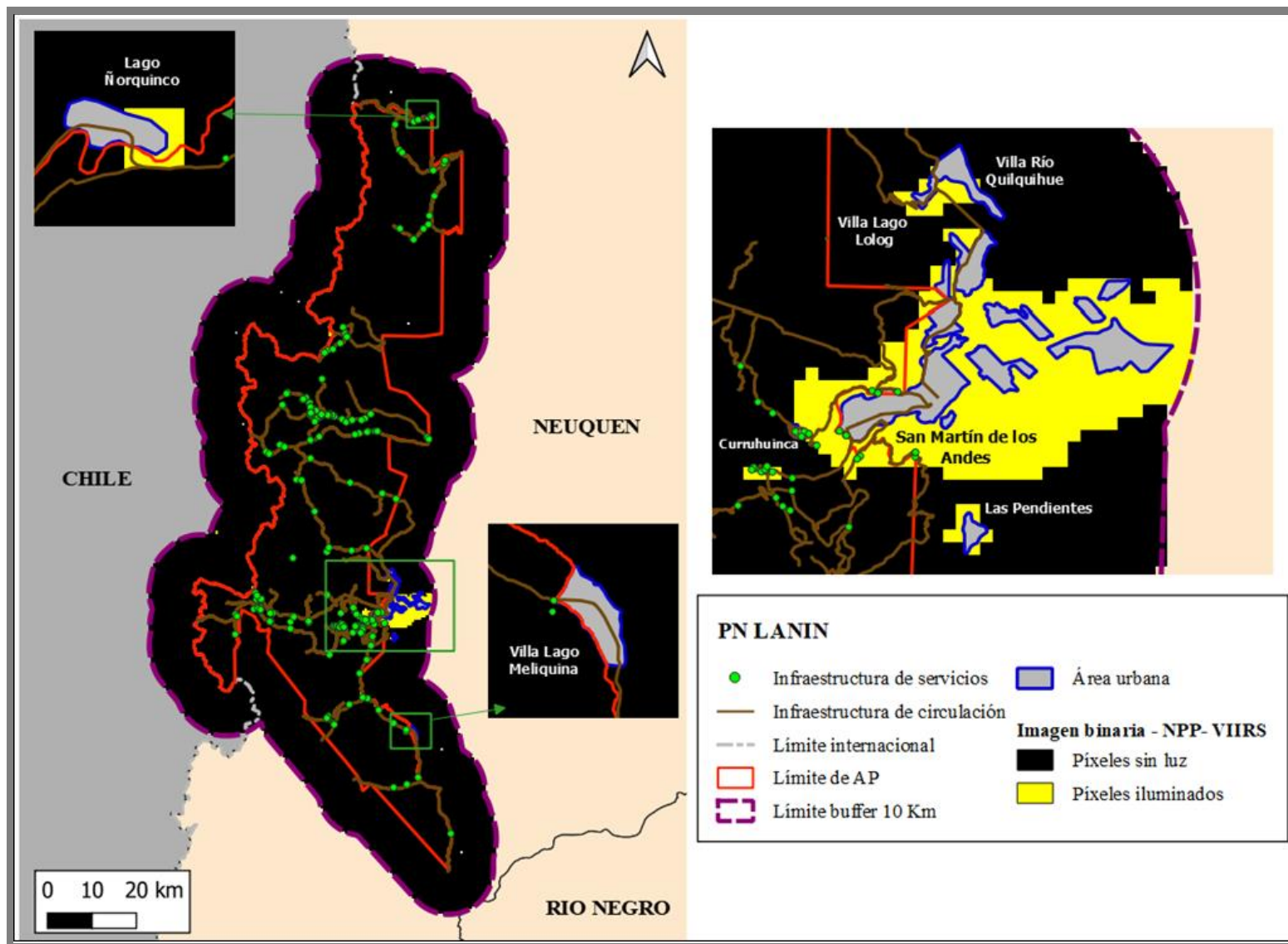
Anexo 6: Mapa de luminosidad del Parque Nacional Perito Moreno



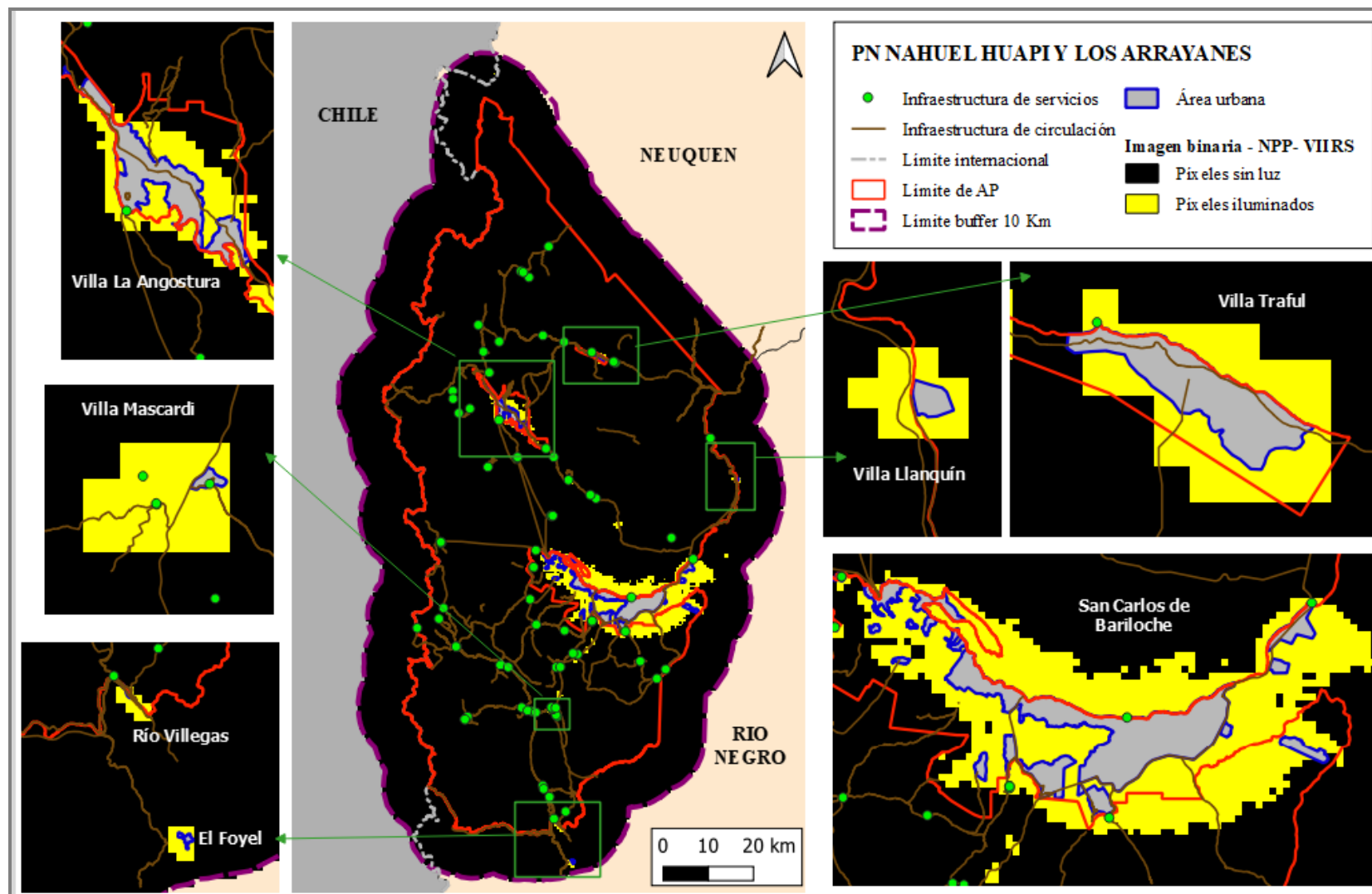
Anexo 7: Mapa de luminosidad del Parque Nacional Lago Puelo



Anexo 8: Mapa de luminosidad del Parque Nacional Tierra del Fuego



Anexo 9: Mapa de luminosidad del Parque Nacional Lanín



Anexo 10: Mapa de luminosidad del Parque Nacional Nahuel Huapi y Los Arrayanes