

SISTEMA REMOTO DE MONITOREO DE ÁREAS PROTEGIDAS

Gisela Córdoba y Leonidas Lizárraga

Afiliación Dirección Regional NOA, Administración de Parques Nacionales

Salta, Argentina

gcordova@apn.gob.ar

INTRODUCCIÓN

Las Áreas Protegidas (APs) Nacionales constituyen pequeñas muestras territoriales de ambientes naturales destinadas a la protección y conservación del Patrimonio Natural y Cultural del país, además de ser lugares clave para el turismo, la concientización ambiental y el desarrollo económico local. En ellas, se desarrollan monitoreos y seguimientos para comprender su dinámica, identificar y caracterizar problemas, implementar y medir acciones de manejo, y evaluar si cumplen sus objetivos. En general, estos trabajos que sirven para gestionar las 55 APs bajo la jurisdicción de la Administración de Parques Nacionales (APN), requieren de un gran esfuerzo de tiempo y recursos (Lizárraga y Córdoba, 2024).

En este contexto surge la propuesta de desarrollar un “Sistema Remoto de Monitoreo de Áreas Protegidas (SiRMAP)”, concibiéndolo como un esquema complementario de monitoreo rápido y sencillo para comprender el funcionamiento general de un AP, basado en productos satelitales. El SiRMAP se estructura en cuatro niveles: 1) Caracterización y tendencia de la vegetación y el clima a nivel de AP; 2) Tendencia espacial de la vegetación a nivel de píxel para evaluar el grado de cambio que se está experimentando en cada AP; 3) Evaluación de problemáticas específicas (cambios en las coberturas del suelo, inundaciones, incendios, pastoreo, invasiones de especies exóticas vegetales, entre otras), utilizando imágenes de alta y mediana resolución espacial y temporal según su disponibilidad (Planet, Landsat, Sentinel, entre otras); 4) Estudiar patrones que permitan predecir a partir de pronósticos climáticos el comportamiento de la vegetación para constituir un sistema de alerta temprana de situaciones no deseables en el corto plazo (incendios, por ejemplo) y evaluar medidas de manejo en el largo plazo (Lizárraga y Córdoba, 2024).

En este trabajo se presentan los primeros resultados del Nivel 1, vinculados a patrones y tendencias de la vegetación, temperatura y precipitación para el período 2000-2023, de las APs terrestres de la APN.

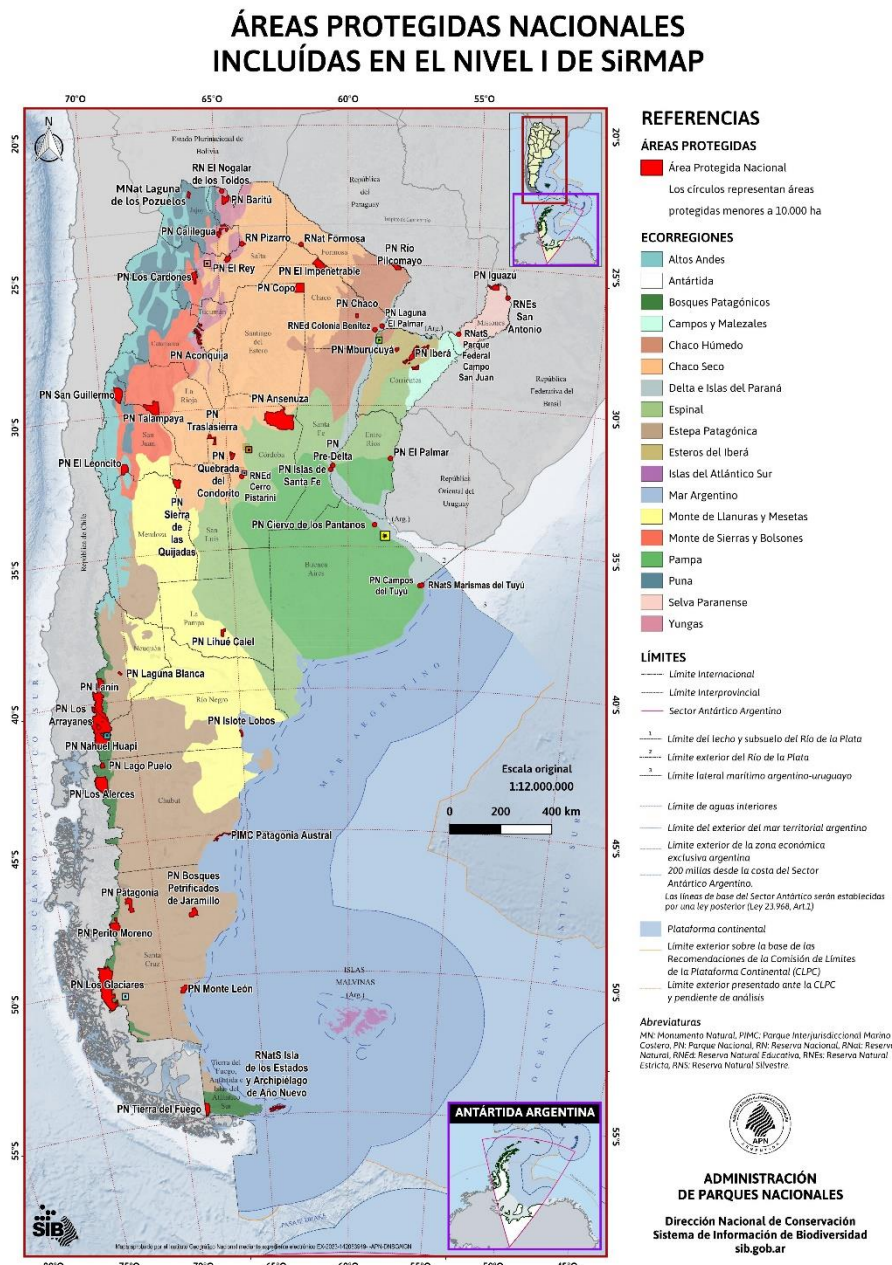
MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El alcance geográfico del presente trabajo incluye los sectores terrestres de 50 APs gestionadas por la APN, las cuales son representativas de 15 ecorregiones: Altos Andes, Bosques Patagónicos, Campos y Malezales, Chaco Húmedo, Chaco Seco, Delta e Islas del Paraná, Espinal, Estepa Patagónica, Esteros del Iberá, Monte de Llanuras y Mesetas, Monte de Sierras y Bolsones, Pampa, Puna, Selva Paranense y Yungas (Figura 1).

Figura 1

Mapa de área de estudio



Metodología

Para caracterizar la vegetación se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Mejorado (EVI, por sus siglas en inglés), calculado a partir de imágenes MODIS (Huete y Justice, 1999). EVI es un índice desarrollado para mejorar la sensibilidad a las diferencias en la cobertura de la vegetación y proporcionar una medición más precisa de la densidad de la vegetación en áreas donde la vegetación es densa. Sus valores varían entre -1 y 1 (Huete y Justice, 1999). Para el clima se utilizaron la precipitación y temperatura, obtenidas a partir de ERA5 (C3S, 2017). Se descargaron los datos mensuales de estas tres variables para el período comprendido entre 01-01-2000 y el 31-12-2023, desde la plataforma Google Earth Engine (Tabla 1) (Gorelick et al. 2017).

Tabla 1

Variables y características de los productos satelitales utilizados

Variable	Producto	Banda	Resolución	Unidad
EVI	MODIS/061/MOD13Q1	EVI	250 m	-
Temperatura	ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY_AGGR	temperature_2m	11132 m	K
Precipitación	ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY_AGGR	total_precipitation_sum	11132 m	m

En el caso de la precipitación se consideró el total de lluvia mensual en el período de análisis, mientras que, para EVI y temperatura, los promedios mensuales. Para la presentación de los datos mensuales y anuales de cada AP, se utilizó la herramienta Power BI (Microsoft, 2019), que proporciona visualizaciones interactivas de la información. La precipitación y temperatura se expresaron en mm y °C, respectivamente.

Para explorar las tendencias de las variables y relaciones entre ellas en el período de análisis, se realizó un análisis de regresión lineal y correlación utilizando el programa R (R Core Team, 2018).

RESULTADOS

Caracterización de la vegetación y el clima

Los promedios anuales más altos de EVI, para el período 2000-2023, se registraron en las APs de la ecorregión Selva Paranense con 0,52 para San Antonio y 0,50 para Iguazú. En orden de magnitud, siguió Campos y Malezales con 0,43 para Campo San Juan; luego, se obtuvieron altos

valores de EVI en las APs de la ecorregión Yungas con 0,45 para Baritú y 0,43 para Calilegua y El Rey. Los menores promedios anuales de EVI se registraron en las APs que cubren principalmente las ecorregiones de Puna, Altos Andes y Monte con 0,05 para San Guillermo y El Leoncito; también se obtuvieron bajos valores en APs de la Estepa Patagónica y Bosques Patagónicos con 0,07 para Laguna Blanca y Perito Moreno.

En cuanto a las variables climáticas, para el período 2000-2023, los valores mayores de precipitación, los cuales superaron los 2300 mm anuales, correspondieron a El Nogalar de los Toldos y Baritú (Yungas) y Los Alerces (Bosques Patagónicos); y los menores a áreas de la Estepa Patagónica, con precipitaciones menores a los 260 mm: Patagonia Austral, Islote Lobos y Bosques Petrificados de Jaramillo. Para temperatura, las áreas de Chaco Seco y Húmedo fueron las más cálidas, superando los 23°C de media anual: Formosa, El Impenetrable, Río Pilcomayo y Copo; y las más frías, con menos de 2°C de media anual, tres de los Bosques Patagónicos: Tierra del Fuego, Los Glaciares y Perito Moreno.

Los resultados de todas las APs se resumen en [SiRMAP v 1.0 beta](#) (Lizárraga et al. 2024).

Tendencia y relación entre la vegetación y el clima

Cuarenta y tres de las 50 APs analizadas (86 %) mostraron tendencia estadísticamente significativa en al menos una variable. Aconquija, Ansenuza, Ciervo de los Pantanos, Mburucuyá y Traslasierra fueron las únicas que presentaron tendencias significativas en las tres variables: positiva (EVI y temperatura) y negativa (precipitación) (Tabla 2).

Dieciséis mostraron tendencia significativa en EVI, solo en Campo San Juan se encontró una negativa. En las otras 15, el comportamiento fue positivo. El 56 % (28 APs) experimentó una disminución significativa en la precipitación y el 54 % (27), un incremento significativo en la temperatura (Tabla 2).

De las APs que experimentaron cambios significativos en EVI, ocho mostraron relaciones entre variables (Aconquija, Bosques Petrificados de Jaramillo, Ibera, Isla de los Estado y AAN, Patagonia, Patagonia Austral, Perito Moreno y San Guillermo). La mayoría mostró una correlación positiva entre EVI y temperatura. En Bosques Petrificados de Jaramillo y Patagonia Austral se detectó una relación positiva entre EVI y precipitación. Iberá fue la única AP que presentó una tendencia negativa entre precipitación y EVI (Tabla 2). Formosa, Lago Puelo, Los Alerces, Los Glaciares, Río Pilcomayo, San Antonio y Tierra del Fuego no mostraron significancia en ninguna variable.

Tabla 2

Áreas protegidas con tendencias o relaciones significativas de EVI, precipitación y temperatura para el período 2000-2023

Área Protegida Nacional	Pendiente (b) de regresión lineal			Coeficiente de correlación	
	EVI	pp (mm)	T (°C)	EVI-pp	EVI-T
Aconquija	0,0011	-19,9400	0,0392	-0,27	0,63
Ansenuja	0,0011	-27,3000	0,0398	-0,38	0,37
Baritú	0,0007	-33,8900	0,0240		
Bosques Petrificados de Jaramillo	0,0004	-1,0340	0,0490	0,50	0,25
Calilegua	0,0003	-28,3600	0,0274		
Campo San Juan	-0,0012	-11,0200	0,0182	0,17	0,02
Campos del Tuyú	0,0952	-12,8000	0,0237		
Cerro Pistarini	-0,0005	-12,4600	0,0292		
Ciervo de los Pantanos	0,0010	-22,0500	0,0342	0,23	0,39
Chaco	-0,0010	-19,8900	0,0318		
Colonia Benítez	0,0004	-20,9200	0,0325		
Copo	0,0003	-13,3000	0,0321		
El Impenetrable	-0,0001	-13,6300	0,0273		
El Leoncito	0,0001	-4,4160	0,0800		
El Nogalar de los Toldos	0,0008	-19,3400	0,0157		
El Palmar	0,0018	-18,3500	0,0180	0,03	0,15
El Rey	-0,0501	-14,4300	0,0493		
Formosa	0,0010	-10,1100	0,0277		
Iberá	0,0013	-21,6900	0,0278	-0,42	0,37
Iguazú	0,0010	-9,2760	0,0223	-0,02	0,18
Isla de los Estado y AAN	0,0010	1,4150	0,0211	-0,16	0,76
Islas de Santa Fe	0,0005	-24,2600	0,0351		
Islote Lobos	0,0007	-0,7113	0,0245		
Lago Puelo	0,0002	-11,3100	0,0288		
Laguna Blanca	0,0001	-4,9160	0,0360		
Laguna de los Pozuelos	0,0002	-1,0400	0,0296		
Laguna El Palmar	-0,0133	-19,9500	0,0310		
Lanín	0,0005	-17,1300	0,0398		
Lihue Calel	0,0007	-4,7420	0,0364		
Los Alerces	-0,0004	-10,2800	0,0259		
Los Arrayanes	0,0004	-14,7500	0,0338		
Los Cardones	0,0002	-6,7930	0,0292	0,20	-0,09
Los Glaciares	0,0002	3,6290	0,0193		
Marismas del Tuyú	-0,0002	-10,7400	0,0121		
Mburucuyá	0,0011	-23,5900	0,0346	-0,17	0,22
Monte León	-0,0183	-2,9350	0,0459		
Nahuel Huapi	0,0002	-13,9200	0,0375		
Patagonia	0,0008	-2,4510	0,0516	-0,20	0,63
Patagonia Austral	0,0005	-0,4609	0,0371	0,45	0,31
Perito Moreno	0,0008	0,6048	0,0331	-0,27	0,79
Pizarro	-0,0016	-11,9300	0,0471		
Pre-Delta	-0,0008	-24,9300	0,0330		
Quebrada del Condorito	-0,0003	-14,9300	0,0353		
Rio Pilcomayo	-0,0004	-10,6600	0,0254		
San Antonio	0,0005	-6,5520	0,0229		
San Guillermo	0,0002	-1,8130	0,0681	-0,26	0,60
Sierra de las Quijadas	-0,0324	-8,3250	0,0502		
Talampaya	0,0004	-6,2320	0,0190	-0,18	0,13
Tierra del Fuego	0,0002	3,6290	0,0193		
Traslasierra	0,0011	-12,4500	0,0393	0,18	0,05

Nota. El verde indica tendencias significativas positivas ($p < 0,05$) y el naranja, tendencias significativas negativas ($p < 0,05$).

CONCLUSIONES

SiRMAP permitió caracterizar y evaluar las tendencias de la vegetación y el clima de las APs nacionales de Argentina de los últimos 23 años, utilizando productos satelitales, Google Earth Engine y PowerBI. Además, de constituir una novedosa herramienta que combina Teledetección Espacial y Cartografía, resulta un poderoso instrumento de gestión fácilmente actualizable, de manejo sencillo y aplicable a nivel país en diversos territorios y situaciones.

A partir de SiRMAP, se pudo identificar que el 32 % de las APs nacionales están experimentando cambios significativos en su vegetación. La tendencia de EVI señaló una relación negativa significativa para Campo San Juan, un área de reciente creación. Al constituirse durante 2022 en un AP de gestión mixta (provincial y nacional) y así lograr mejores condiciones de control; este territorio debería revertir su tendencia en el mediano plazo. Las tendencias positivas de EVI también alertan que no todas se traducen automáticamente en una mejora del estado de su vegetación. El Palmar, ambiente con una creciente invasión de exóticas, es prueba de ello. En cuanto al clima, en un conjunto de 38 APs se debería prestar mayor atención a los cambios en el clima que están ocurriendo y estimar de forma más detallada las consecuencias.

Por último, se pudieron establecer qué áreas presentan relaciones significativas entre variables, siendo la más común la vegetación y la temperatura en ambientes áridos o de altura; pero también se encontró relaciones positivas esperables entre la vegetación y la precipitación (Bosques Petrificados de Jaramillo, ambiente árido) y negativas en ambientes inundables (Iberá).

Como puntos a tener en cuenta para mejorar el sistema, se señalan dos necesidades: 1. Evaluar la confiabilidad de los productos satelitales con datos de estaciones meteorológicas. Para el caso de las precipitaciones, se está trabajando para reemplazar los datos de ERA5 por los de PMRAv1 (Gaitán y Biancari, 2024). 2. Desarrollar una APP que facilite el acceso a la herramienta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017). *ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate*. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), (date of access). <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>

Gaitán, J. y Biancari, L. (2024). Nueva base de datos de precipitaciones mensuales de la República Argentina (PMRAv1), 2000-2022. *Meteorológica* (en prensa). Extensión de chrome://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://lnkd.in/dZcTum_v

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. y Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.

Huete, A. y Justice, C. (1999). *MODIS Vegetation Index (MOD 13) Algorithm Theoretical Basis Document*. https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf

Lizárraga, L. y Córdoba, G. S. (2024). *Sistema Remoto de Monitoreo de Áreas Protegidas*. En Sistema de Información de Biodiversidad (SIB) de la Administración de Parques Nacionales, Argentina. https://sib.gob.ar/archivos/SiRMAP_RESUMEN.pdf

Lizárraga, L., Córdoba, G. S., Herrero J. y Lipori M. (2024). *SiRMAP v 1.0 beta*. En Sistema de Información de Biodiversidad (SIB) de la Administración de Parques Nacionales, Argentina. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiM2Q0MDg2ZWYtZmRiZi00MGY0LTgyODYtNDc4NWViOWU5OGFkIiwidCI6IjY1Y2QxMjA4LWQ4OTU0NDM4MS05OTMwLTlWZmZlY4NjhhMGMwZCIsImMiOiR9>

Microsoft (2019). *Power BI | Interactive Data Visualization BI Tools*. <https://www.microsoft.com/en-us/power-platform/products/power-bi/>

R Core Team (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.

Autores



Gisela Soledad Córdoba. Ingeniera en Recursos Naturales y Medio Ambiente recibida en la Universidad Nacional de Salta y Doctora en Ciencias Sociales con orientación en Geografía recibida en la Universidad Nacional de Tucumán. Actualmente trabaja en la Dirección Regional NOA de la Administración de Parques Nacionales como Especialista de Aplicación Científica. Se desempeña como becaria doctoral y posdoctoral en el Instituto de Bio y Geociencias del NOA (CONICET) indagando sobre los procesos de degradación de tierras en sistemas socio- ecológicos semiáridos y la evaluación de los servicios ecosistémicos.



Leonidas Lizárraga. Ingeniero en Recursos Naturales y Medio Ambiente, recibido en la Universidad Nacional de Salta. Actualmente trabaja en la Dirección Regional NOA de la Administración de Parques Nacionales. Se especializa en gestión de áreas protegidas, procesamiento de imágenes satelitales y análisis espaciales desarrollados en entornos de Sistemas de Información Geográfica.