

# Análisis Histórico Tendencia Vegetación

Nicolás Sanhueza Bogados Ingeniería

27 de mayo de 2023

## 1. Introducción

<https://smallpdf.com/pdf-to-word>

Este informe, preparado por la consultora Bogados Ingeniería para la compañía minera Peñoles, se enfoca en la evaluación del comportamiento histórico de la vegetación en los humedales de altura (definidos por Pliscoff como "herbazales de altitud") en la región de Atacama de la Cordillera de los Andes, Chile. La intención es generar una línea base de imágenes satelitales detallada y realizar un monitoreo continuo de la vegetación en esta región susceptible a los impactos de la actividad minera y el cambio climático, una creciente amenaza global.

En el caso de Chile, las evidencias apuntan a que el cambio climático ya está afectando los ecosistemas y la biodiversidad, modificando la dinámica de la vegetación en varias regiones.<sup>1</sup> La actividad minera, una fuerza importante impulsora del cambio de uso del suelo, tiene el potencial de exacerbar estos efectos. Las operaciones mineras a gran escala, según diversos estudios, pueden provocar pérdida de biodiversidad, alteración de los ecosistemas y cambios en la calidad del agua y del suelo.

Para mitigar estos impactos y diferenciar entre los efectos del cambio climático y los de la actividad minera, este estudio propone el uso de imágenes satelitales Landsat, que abarcan desde 1984 hasta 2022. El objetivo

---

<sup>1</sup>Informe de la mesa Biodiversidad. (Diciembre 2019). Impactos del cambio climático en la biodiversidad y las funciones ecosistémicas en Chile.

es establecer una línea base detallada del comportamiento histórico de la vegetación y la cobertura de nieve en la región utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Nieve (NSI o NDSI).

Al analizar y monitorear la vegetación y las condiciones climáticas en el largo plazo, se pueden identificar y mitigar los impactos dañinos potenciales causados por la actividad minera. De esta manera, la compañía minera Peñoles puede planificar sus operaciones de manera sostenible, garantizando la conservación del ecosistema local y minimizando su huella ambiental.

Las actividades humanas, como la minería, junto con el cambio climático, están provocando cambios significativos en los ecosistemas. La frecuencia e intensidad crecientes de incendios, derrames, sequías y otros desastres naturales y humanos, potenciados por el cambio de uso del suelo, pueden tener múltiples impactos ecológicos y socioeconómicos.

El seguimiento continuo y análisis de los datos históricos permitirá a la compañía minera Peñoles, y a la sociedad en su conjunto, anticipar y mitigar los impactos negativos del cambio climático y de la actividad minera en la biodiversidad y los ecosistemas. Este esfuerzo de investigación de largo plazo y monitoreo de los ecosistemas resulta vital en el contexto del cambio climático, cuyos efectos a menudo se manifiestan en periodos de tiempo más largos.

## 2. Metodología

### 2.1. Selección de la Región de Interés

Se seleccionó una región de interés (ROI) en la Región de Atacama, ubicada en la Cordillera de los Andes en Chile. Esta región se sitúa a aproximadamente entre 3.800 y 4.150 metros de altura, abarcando un área total de 800 hectáreas, centrada en las coordenadas geográficas -69.400, -28.139. Este sitio es el lugar donde se realizan las prospecciones del proyecto "Nemesis" de la compañía minera Peñoles.

La elección de esta área se justifica en base a varios criterios que garantizan su relevancia y aptitud para los propósitos de este estudio:

- **Cobertura de humedales:** La ROI incorpora todos los humedales que

rodean la actividad de prospección, permitiendo un análisis detallado de los posibles impactos de la actividad minera en estos ecosistemas sensibles.

- **Adecuada extensión:** El tamaño de la región es suficientemente amplio para incluir humedales potencialmente afectados por la actividad minera. Asimismo, la superficie no es excesivamente grande como para incluir variables de otros sectores que podrían introducir ruido en los datos o sesgar los resultados.
- **Presencia de nieve:** La altitud y las condiciones geográficas de la región garantizan la presencia de nieve durante los meses de invierno, lo que es esencial para analizar las interacciones entre el cambio climático, la cubierta de nieve y la vegetación.
- **Relevancia histórica:** Dado el tamaño del dataset (imágenes desde 1984), el estudio tiene datos suficientes para analizar, con significancia estadística, las tendencias históricas en las variables de vegetación y nieve, lo que permite un análisis robusto de los cambios a lo largo del tiempo.

Por tanto, la elección de esta región de interés permite un estudio de los impactos potenciales de la actividad minera y el cambio climático en el ecosistema de los humedales de altura y cómo estos impactos pueden interactuar con los cambios en el clima y la cubierta de nieve a lo largo del tiempo.

## 2.2. Recopilación de imágenes Landsat.

Para la adquisición de las imágenes satelitales, se aprovecharon las capacidades de Google Earth Engine (GEE), una plataforma geoespacial basada en la nube que ofrece un vasto repositorio de imágenes satelitales y conjuntos de datos geoespaciales.

Se utilizaron las imágenes del satélite Landsat, concretamente Landsat 5 para el período 1984-2011, y Landsat 8 desde 2013 hasta 2022. Cabe señalar que en el año 1987 no se pudo encontrar imágenes apropiadas para el periodo de invierno (imágenes con menos del 20 por ciento de cobertura de nubes) mientras que el 2012 no existió cobertura del área de estudio por una misión Landsat, debido a la transición entre las misiones Landsat 5 y Landsat 8.

Las imágenes Landsat presentan una resolución espacial de 30 metros y poseen varias bandas espectrales, que abarcan desde el azul y el verde, hasta el infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta. Además, contienen una banda térmica con

una resolución de 120 metros. Las imágenes Landsat son particularmente útiles para la investigación de la vegetación, ya que las diferentes bandas pueden ser utilizadas para calcular índices de vegetación, como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Se desarrolló un algoritmo en Python para conectarse a la API de GEE y automatizar el proceso de recopilación y procesamiento de imágenes satelitales. La ventaja de usar Python en lugar de JavaScript (que se puede usar directamente en la plataforma GEE) radica en la facilidad de integración con otros paquetes y herramientas científicas en Python. Además, Python es ampliamente utilizado en la comunidad científica, lo que facilita la reproducibilidad del estudio y la colaboración con otros investigadores.

El algoritmo implementado en Python se encarga de filtrar las imágenes Landsat disponibles en GEE por fecha y ubicación, adecuándose a las necesidades específicas de este estudio. Posteriormente, las imágenes filtradas son descargadas y procesadas, aplicando correcciones atmosféricas y generando índices de vegetación y nieve para cada imagen. Finalmente, se calculan diversas estadísticas descriptivas de las imágenes, que se utilizan posteriormente en el análisis y la interpretación de los resultados.

### **2.3. Cálculo de la mediana para la estación de verano y de invierno**

Una vez recopiladas y procesadas las imágenes Landsat, se realizó un cálculo crucial para este estudio: la mediana de los valores de los píxeles para cada estación del año, es decir, verano e invierno. Este cálculo se aplicó a todas las bandas espectrales de las imágenes para cada año del período de estudio.

Las medianas estacionales se eligieron en lugar de las medianas mensuales por varias razones. En primer lugar, una mediana estacional proporciona un resumen más robusto de la condición de la vegetación y la cobertura de nieve en un período de tiempo más largo. Esto ayuda a minimizar la influencia de eventos extremos y temporales que podrían distorsionar los valores si se considerara un solo mes.

En segundo lugar, la variabilidad intrínseca en la vegetación y la nieve a lo largo del año hace que el análisis estacional sea más relevante y representativo que el mensual. Los cambios estacionales en las condiciones climáticas tienen un fuerte

impacto en la vegetación y la nieve, y al analizar los datos en una base estacional, se puede capturar mejor esta variabilidad.

Para la estación de verano, la mediana de los valores de los píxeles se utilizó para representar la salud y la densidad de la vegetación, calculando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Para la estación de invierno, la mediana de los valores de los píxeles se utilizó para calcular el Índice de Nieve (NSI), proporcionando una medida de la cobertura de nieve.

El uso de la mediana en lugar de la media también tiene sus ventajas. La mediana es menos sensible a los valores extremos y, por lo tanto, proporciona una mejor medida central en los datos con distribución asimétrica, como a menudo se encuentra en las imágenes de teledetección.

En resumen, el cálculo de las medianas estacionales de los valores de los píxeles en todas las bandas espectrales de las imágenes Landsat es una parte esencial de la metodología de este estudio, ya que proporciona una representación robusta y representativa de las condiciones de la vegetación y la nieve en la región de estudio.

## **2.4. Desarrollo de imágenes NDVI**

Posteriormente, se desarrollaron imágenes del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), una medida comúnmente utilizada para la cantidad y salud de la vegetación en un área. Para cada imagen en la colección, se calculó el NDVI utilizando las bandas roja e infrarroja cercana.

## **2.5. Cálculo de la mediana de una ventana de tres años**

Con el fin de atenuar las variaciones anuales y resaltar las tendencias a largo plazo, se calculó la mediana del NDVI para una ventana móvil de tres años. Esto implicó seleccionar todas las imágenes que se encontraban dentro de una ventana móvil de tres años y calcular la mediana de los valores NDVI. En otras palabras los datos que se analizarán posteriormente irán desde el año 1985 al 2021; donde el primer año de la serie, 1985 representa la mediana de los años 1984, 1985 y 1986, y el último año de la serie, 2021 representa la mediana entre los años 2020, 2021 y 2022.

## 2.6. Paso 6: Cálculo de las estadísticas y análisis de correlación

Una vez obtenidas las medianas de las imágenes NDVI para cada ventana de tres años, se realizaron cálculos de diversas estadísticas para cada imagen. En particular, se calculó el valor medio, la mediana, el valor mínimo, el valor máximo y la desviación estándar.

### 2.6.1. Cálculo de estadísticas

Para cada imagen NDVI, se calcularon las siguientes estadísticas:

- **Media:** Se calculó la media aritmética de los valores de NDVI en la imagen, utilizando la fórmula:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

- **Valor mínimo y máximo:** Se identificaron el menor y el mayor valor de NDVI en la imagen, respectivamente.
- **Desviación estándar:** Se calculó la desviación estándar de los valores de NDVI, utilizando la fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

### 2.6.2. Correlación entre variables

Para examinar las relaciones entre las estadísticas calculadas, se realizó un análisis de correlación. En particular, se calculó una matriz de correlación que incluye la correlación de Pearson entre cada par de variables. La correlación de Pearson se calcula de la siguiente manera:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

### 2.6.3. Pruebas estadísticas

Finalmente, se llevaron a cabo pruebas estadísticas para determinar la significancia de las correlaciones observadas. Para cada par de variables, se calculó un valor p utilizando la prueba t de Student. Esta prueba se basa en la hipótesis nula

de que no existe correlación entre las dos variables. La estadística de prueba  $t$  se calcula de la siguiente manera:

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (4)$$

donde  $r$  es la correlación de Pearson y  $n$  es el número de observaciones. El valor  $p$  asociado se obtiene al comparar el valor observado de  $t$  con una distribución  $t$  que tiene  $n - 2$  grados de libertad.

Las pruebas de tendencia son técnicas estadísticas que se utilizan para determinar la existencia de una tendencia o un patrón sistemático en un conjunto de datos a lo largo del tiempo. Estas pruebas son especialmente útiles para series de tiempo, ya que proporcionan una indicación estadística de si los cambios observados en una variable son el resultado de una variación aleatoria o de una tendencia real.

Un ejemplo común de prueba de tendencia es la prueba de Mann-Kendall. Esta es una prueba no paramétrica que se utiliza para identificar tendencias en series de tiempo. La prueba de Mann-Kendall es útil porque no requiere que los datos sigan una distribución normal y puede manejar datos con valores faltantes.

El resultado de la prueba de Mann-Kendall es un valor de " $S$ " y un valor de  $p$ . " $S$ " es una medida de la magnitud de la tendencia, donde un valor de " $S$ " positivo indica una tendencia ascendente y un valor de " $S$ " negativo indica una tendencia descendente. El valor de  $p$  es una medida de la significancia estadística de la tendencia. Un valor de  $p$  menor a 0.05 generalmente se considera como una indicación de que la tendencia es estadísticamente significativa.

Es importante tener en cuenta que, aunque una prueba de tendencias puede indicar la presencia de una tendencia, no proporciona información sobre las causas de esta tendencia. Además, aunque una prueba de tendencias puede proporcionar evidencia de una tendencia estadísticamente significativa, siempre existe la posibilidad de que la tendencia observada sea el resultado de la variabilidad aleatoria.

## 2.7. Visualización de las tendencias temporales

Para suavizar las variaciones anuales y resaltar las tendencias a largo plazo, se optó por un enfoque de ventanas de tres años para calcular la mediana del NDVI y el NSI. Este enfoque implicó seleccionar todas las imágenes que se encontraban dentro de cada ventana de tres años y calcular la mediana de los valores de NDVI

y NSI.

Una ventaja clave de este método es que permite atenuar las fluctuaciones anuales y los posibles eventos extremos que podrían influir en la señal del NDVI y NSI de un año particular. Al promediar a lo largo de tres años, estos eventos extremos y las variaciones anuales se suavizan, lo que permite una visión más clara de las tendencias a largo plazo.

Además, las ventanas de tres años ofrecen un equilibrio entre la resolución temporal y la robustez de las tendencias detectadas. Un período más corto podría ser demasiado susceptible a las fluctuaciones anuales, mientras que un período más largo podría diluir demasiado las tendencias y ocultar cambios importantes en el tiempo.

Por lo tanto, en este estudio, cada ventana de tres años genera una sola mediana para el NDVI y el NSI, que se utiliza para analizar las tendencias a largo plazo en la vegetación y la cobertura de nieve. Este enfoque de ventana móvil es flexible y puede desplazarse de año en año, proporcionando una visión continua de las tendencias a lo largo del tiempo.

Cabe destacar que, aunque se utilizan medianas en lugar de medias, este método sigue siendo válido y robusto. Al igual que antes, la mediana proporciona una medida más estable de la tendencia central, especialmente en presencia de valores extremos o anomalías, que son comunes en las imágenes de teledetección.

## 3. Resultados

### 3.1. Identificación de la Región de Interés.

En la sección "Selección del Área de Interés", se identifica y delinea la Región de Interés (ROI) para el estudio. Esta región está ubicada en la Región de Atacama, dentro de la Cordillera de los Andes, en Chile. La región se ubica a una altura que varía entre 3800 y 4150 metros sobre el nivel del mar, cubriendo un área total de 800 hectáreas.

La ROI está específicamente delimitada por las coordenadas geográficas -69.41452, -28.15194 y -69.38542, -28.126071. Esta ubicación exacta corres-



ponde al sitio donde se llevan a cabo las actividades de exploración del proyecto "Nemesis" por medio de sondeos, operado por la compañía minera Peñoles.

En términos de características, la región incorpora una serie de humedales que están en proximidad directa a la actividad de exploración minera. Además, debido a su altitud y condiciones geográficas, la región experimenta la presencia de nieve durante los meses de invierno. Este sitio, por su tamaño y ubicación, también permite el análisis de tendencias históricas en las variables de vegetación y nieve.

### **3.2. Imágenes con la composición del índice NDVI y NSI:**

Se presentan visualmente los resultados de las mediciones NDVI y NSI a lo largo del tiempo, basadas en las imágenes satelitales Landsat.

El NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) se obtiene de la combinación normalizada de las bandas 3 y 4 de las imágenes Landsat, y el NSI (Índice de Nieve Normalizado) se obtiene de la combinación normalizada de las bandas 2 y 3 de las mismas imágenes.

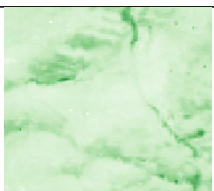
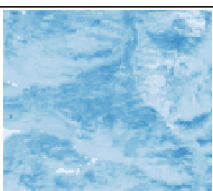
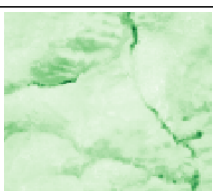
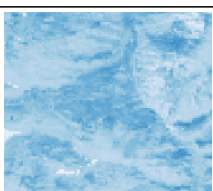
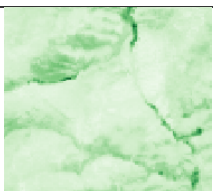
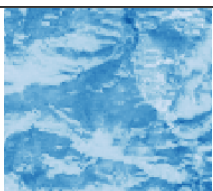
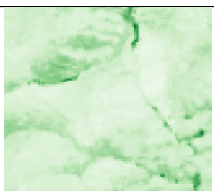
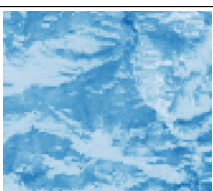
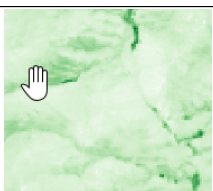
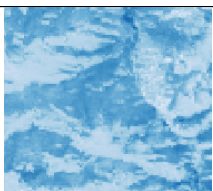
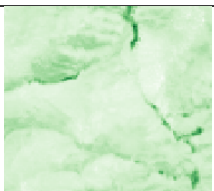
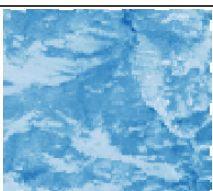
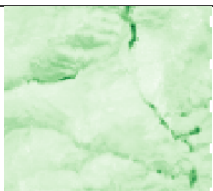
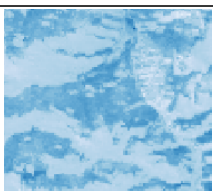
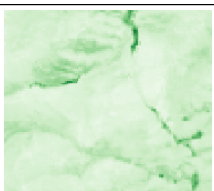
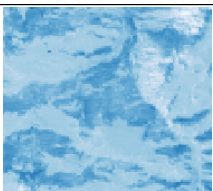
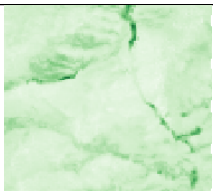
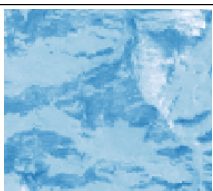
Los resultados se presentan como imágenes anuales que abarcan desde 1985 hasta 2021, utilizando una ventana móvil de 3 años. Debido a la utilización de la ventana móvil, no se muestran las imágenes para los años 1984 y 2022 ya que estos años están contenidos en las ventanas de los años 1985 y 2021 respectivamente.


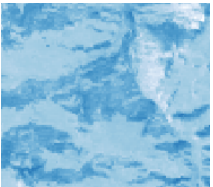
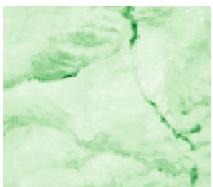
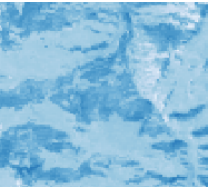
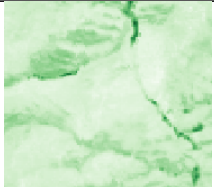
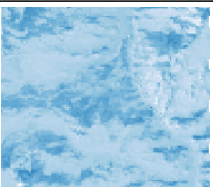

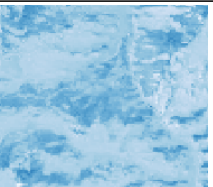
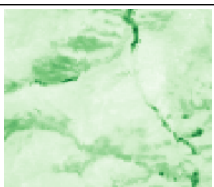
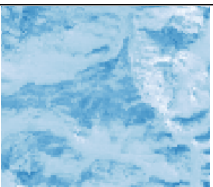
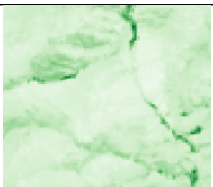
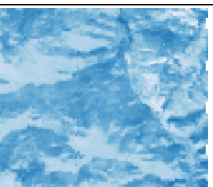
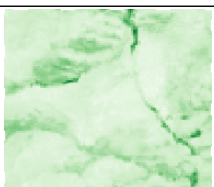
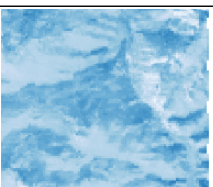
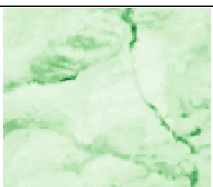
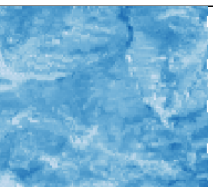
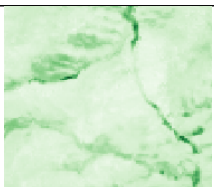
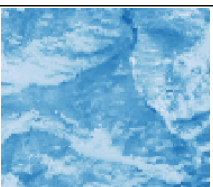
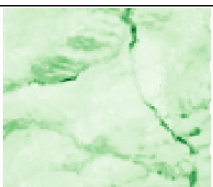
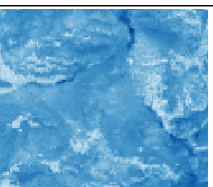
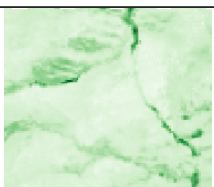
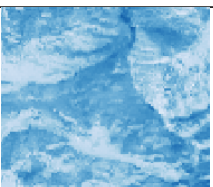
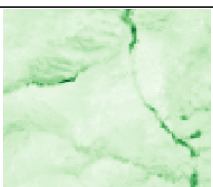
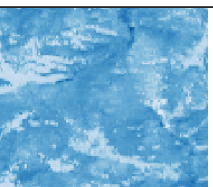
En estas imágenes, se observan algunos patrones notables. En particular, se aprecia una intensidad más alta en el índice NDVI en las quebradas durante el verano, coincidiendo con las ubicaciones de los humedales en la región. Este patrón indica una mayor presencia o densidad de vegetación en estas zonas durante esta época del año.

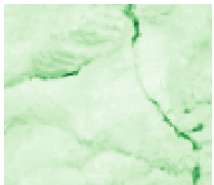
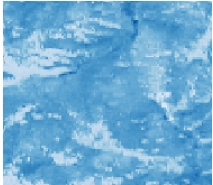

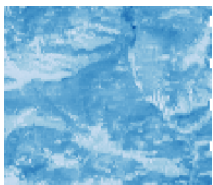
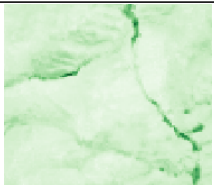
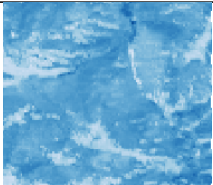
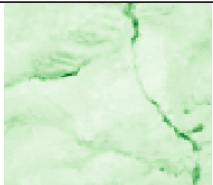
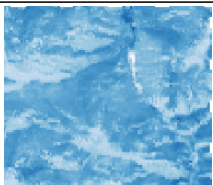
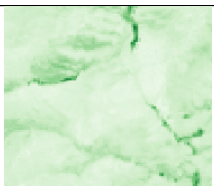
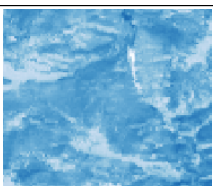
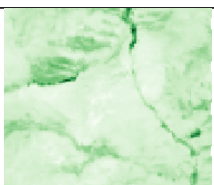
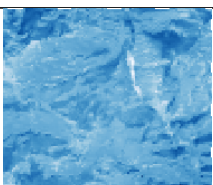
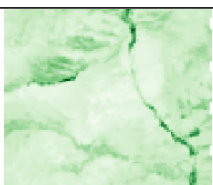
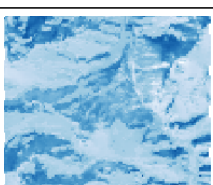
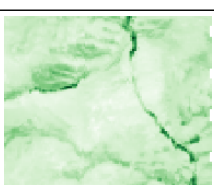
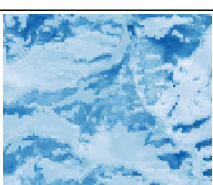
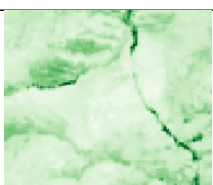
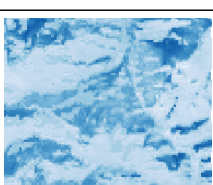
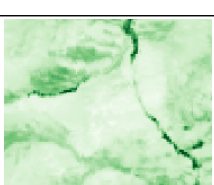
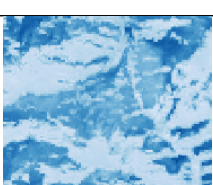
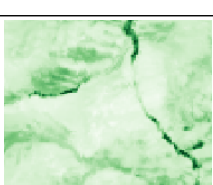
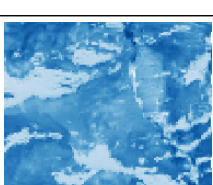
En cuanto al índice NSI, se nota una mayor intensidad durante el invierno en las quebradas. Este patrón sugiere una mayor presencia de nieve en estas zonas durante la estación invernal.


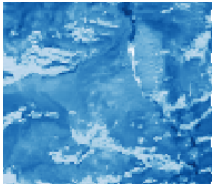

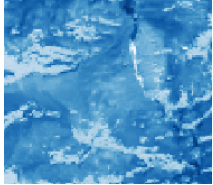
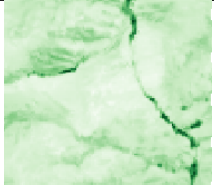
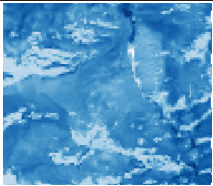

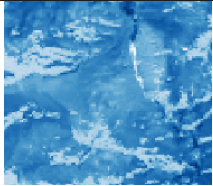
Estos resultados visuales ofrecen una perspectiva inicial de los patrones estacionales de vegetación y nieve en la región, y su relación con las características topográficas como las quebradas y los humedales.

Cuadro 1: Evolución historica imágenes NDVI y NSI

Año	Imagen NDVI	Imagen NSI	Año	Imagen NDVI	Imagen NSI
1985			1986		
1987	NO DATA	NO DATA	1988		
1989			1990		
1991			1992		
1993			1994		

Año	Imagen NDVI	Imagen NSI	Año	Imagen NDVI	Imagen NSI
1995			1996		
1997			1998		
1999			2000		
2001			2002		
2003			2004		
2005			2006		

Año	Imagen NDVI	Imagen NSI	Año	Imagen NDVI	Imagen NSI
2007			2008		
2009			2010		
2011			2012	NO DATA	NO DATA
2013			2014		
2015			2016		
2017			2018		

Año	Imagen NDVI	Imagen NSI	Año	Imagen NDVI	Imagen NSI
2019			2020		
2019			2020		

### 3.3. Resultados Estadísticas por Año.

En la sección "Tablas de estadísticas para cada imagen por año", se presenta una serie de estadísticas derivadas de las mediciones del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y del Índice de Nieve Normalizado (NSI) a lo largo de los años.

Cada fila de la tabla representa un año distinto, que va desde 1985 hasta 2021. Para cada año, se calculan varias estadísticas para ambos índices, incluyendo la media, la desviación estándar, el valor mínimo y el valor máximo.

Las estadísticas del NDVI dan una visión general de la densidad de la vegetación en la región de interés durante cada año. A lo largo del tiempo, se puede observar una variación en los valores medios del NDVI, oscilando desde 0,0686 en 2011 hasta 0,1063 en 2017. La desviación estándar también presenta variaciones, indicando que la densidad de vegetación no es uniforme a lo largo del área y del tiempo.

Las estadísticas del NSI, por otro lado, proporcionan una idea de la presencia de nieve en la región a lo largo de los años. Los valores medios del NSI varían de 0,0239 en 1999 hasta 0,1644 en 2019, y la desviación estándar muestra una variación similar, reflejando la variabilidad en la cubierta de nieve.

Por último, el rango de valores, representado por el mínimo y máximo para cada índice y año, nos da una idea de la dispersión de las mediciones en cada periodo. En el caso del NDVI, los valores máximos muestran una tendencia general al alza desde 0,5366 en 1985 hasta 0,6686 en 2018, mientras que para el NSI los valores máximos varían de 0,1848 en 1985 hasta 0,4082 en 2020.

En conjunto, estas estadísticas ofrecen una visión detallada y cuantitativa de las tendencias a largo plazo en la densidad de la vegetación y la cubierta de nieve en la región de interés.

Cuadro 2: Estadísticas de las imagenes

Año	mean NDVI	stddev NDVI	min NDVI	max NDVI	mean NSI	stddev NSI	min NSI	max NSI
1985	0.096263	0.057588	-0.027277	0.536563	0.031462	0.047977	-0.174510	0.184793
1986	0.099113	0.062193	-0.027277	0.542233	0.031462	0.047977	-0.174510	0.184793
1988	0.088367	0.058485	-0.027590	0.542029	0.108024	0.051442	-0.103631	0.278255
1989	0.083763	0.055783	-0.048387	0.542029	0.079008	0.073153	-0.111615	0.311475
1990	0.083863	0.054442	-0.048387	0.551853	0.070757	0.068725	-0.111615	0.305343
1991	0.082345	0.052842	-0.034673	0.551853	0.065865	0.069211	-0.129046	0.305343
1992	0.079993	0.051247	-0.026103	0.514689	0.085383	0.063263	-0.129046	0.305343
1993	0.078426	0.050234	-0.026103	0.508556	0.037900	0.059793	-0.156916	0.281859
1994	0.081826	0.052099	-0.030928	0.508556	0.055836	0.058714	-0.201351	0.230404
1995	0.088023	0.054850	-0.036304	0.502358	0.054626	0.058487	-0.219512	0.230222
1996	0.092122	0.055706	-0.036304	0.502358	0.056858	0.055252	-0.149327	0.230222
1997	0.095284	0.061570	-0.031682	0.522075	0.024726	0.051657	-0.196685	0.199150
1998	0.087817	0.058860	-0.018225	0.522075	0.027903	0.050898	-0.180464	0.206907
1999	0.095901	0.069512	-0.033716	0.533603	0.023936	0.057906	-0.211004	0.214585
2000	0.084066	0.057569	-0.025725	0.509402	0.074641	0.066704	-0.192067	0.254864
2001	0.089655	0.060779	-0.020355	0.517510	0.042767	0.058754	-0.232652	0.225000
2003	0.080137	0.060655	-0.022652	0.553300	0.098413	0.051099	-0.134860	0.316974
2004	0.079954	0.062625	-0.059322	0.555007	0.077692	0.069163	-0.172227	0.301299
2005	0.080983	0.061424	-0.030530	0.555007	0.136145	0.062779	-0.172227	0.370106
2006	0.072828	0.054146	-0.046863	0.555007	0.070451	0.072892	-0.142325	0.301299
2007	0.071206	0.053521	-0.046863	0.517546	0.100146	0.063552	-0.117615	0.320847
2008	0.070293	0.053127	-0.042303	0.530632	0.084033	0.060944	-0.214867	0.320847
2009	0.072027	0.053116	-0.024315	0.537978	0.108818	0.060639	-0.103504	0.320847
2010	0.069392	0.050169	-0.026953	0.537978	0.096089	0.063455	-0.222120	0.285869
2011	0.068617	0.049260	-0.029806	0.499324	0.097689	0.063077	-0.222859	0.269955
2013	0.087995	0.064653	-0.063735	0.638094	0.120609	0.060311	-0.184541	0.371420
2014	0.091166	0.064824	-0.055546	0.618061	0.049963	0.087218	-0.249169	0.346636
2015	0.095457	0.070242	-0.048171	0.650983	0.048308	0.087035	-0.149120	0.345846
2016	0.101752	0.076100	-0.048171	0.650834	0.034190	0.088726	-0.149120	0.342955
2017	0.106304	0.082600	-0.052771	0.668613	0.059726	0.101359	-0.133595	0.345846
2018	0.105001	0.081864	-0.052771	0.668613	0.141320	0.095650	-0.171782	0.377778
2019	0.096551	0.071553	-0.049908	0.626652	0.164428	0.087119	-0.199741	0.408190
2020	0.091125	0.063066	-0.049908	0.604941	0.161718	0.087406	-0.199741	0.408190
2021	0.089626	0.061294	-0.050851	0.583714	0.143477	0.089564	-0.201038	0.372990

### 3.4. Graficas comparativas NDVI y NSI.

Los datos presentados aquí graficados representan valores promedio anuales, mínimos, máximos y desviación estándar de los índices de vegetación NDVI y NSI desde 1985 hasta 2021. En general, vemos fluctuaciones en estos valores a lo largo del tiempo, con algunas tendencias y anomalías notables.

Examinando los datos, vemos que no siempre hay una correlación directa entre los valores promedio de NDVI y NSI en un año determinado. Por ejemplo, en 1988, el valor promedio de NDVI disminuyó en comparación con 1986, mientras que el valor promedio de NSI aumentó significativamente. Este tipo de discrepancias podrían ser el resultado de diferentes respuestas de los dos índices a las condiciones ambientales específicas de ese año.

Además, hay algunos años que destacan por tener valores que difieren significativamente de los años circundantes. Por ejemplo, en 2018, el valor promedio de NSI es notablemente más alto que en los años anteriores y posteriores. Si bien estos datos no nos dicen la causa exacta de estas anomalías, sugieren que hubo cambios en la vegetación o en las condiciones ambientales durante estos años que merecen una investigación más detallada.

En cuanto a la variabilidad anual de los valores de NDVI y NSI, medida por la desviación estándar, vemos que hay variaciones significativas de un año a otro. Un mayor valor de desviación estándar indica que hubo una mayor variabilidad en los valores de NDVI o NSI dentro de ese año. Por ejemplo, en 2017, el valor de desviación estándar del NDVI es particularmente alto, lo que sugiere una amplia gama de valores de NDVI en las imágenes capturadas, como ventana, ese año. Esta variabilidad puede estar relacionada con factores como variaciones estacionales o cambios en las condiciones ambientales.

En resumen, estos datos proporcionan una visión útil de cómo los valores de NDVI y NSI han fluctuado a lo largo del tiempo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos índices son solo una representación de la vegetación y pueden ser influenciados por una variedad de factores. Además, los patrones y tendencias observados en estos datos nos permiten formular hipótesis para futuras investigaciones



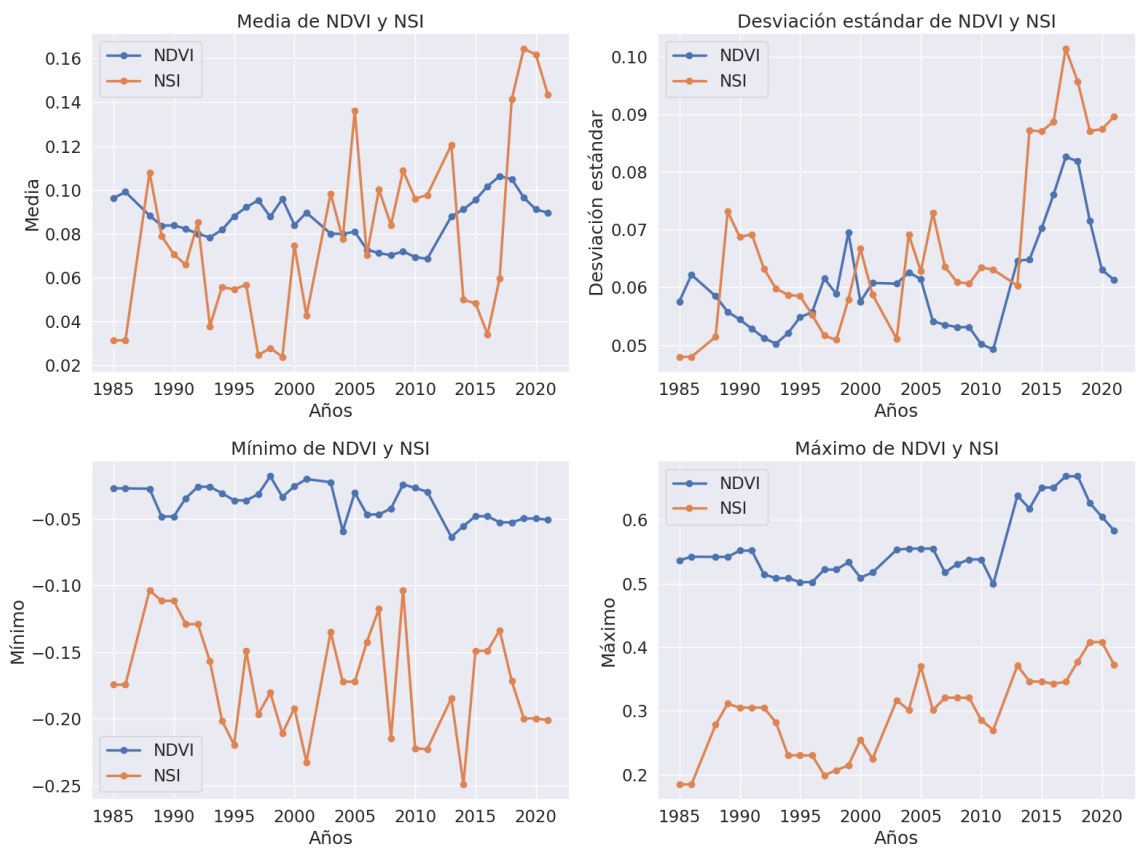


Figura 1: Comparativos estadísticas NDVI y NSI

### 3.5. Correlaciones entre las variables

Hemos realizado un análisis de correlación para investigar la relación entre las diferentes variables de nuestro conjunto de datos. Los resultados se presentan en la matriz de correlación.

La correlación entre dos variables puede variar entre -1 y 1. Un valor de correlación cercano a 1 indica una fuerte correlación positiva, lo que significa que si una variable aumenta, la otra también tiende a aumentar. Por otro lado, un valor cercano a -1 indica una fuerte correlación negativa, lo que significa que si una variable aumenta, la otra tiende a disminuir. Un valor cercano a 0 indica una correlación débil o inexistente entre las variables.

Los valores de NDVI y NSI muestran algunas correlaciones interesantes con respecto al tiempo y entre sí. Algunas de las observaciones clave de esta matriz de correlación son:

1. **Desviación estándar de NDVI y valor máximo de NDVI (0.839):** Se observa una fuerte correlación positiva, sugiriendo que en años con mayor variabilidad en la vegetación, es más probable que veamos valores de NDVI más altos. Esto podría indicar que las condiciones que llevan a una mayor diversidad de vegetación también permiten la existencia de áreas con una vegetación excepcionalmente vigorosa.
2. **Desviación estándar de NDVI y año (0.525728):** La correlación positiva aquí sugiere que la variabilidad en la vegetación ha aumentado con el tiempo. Esto podría ser un reflejo de cambios más amplios en las condiciones climáticas o de la tierra.
3. **Valor máximo de NSI y año (0.741803):** Esta fuerte correlación positiva indica que los niveles máximos de nieve han ido en aumento a lo largo de los años. Esto podría reflejar tendencias más amplias en las condiciones climáticas, como aumentos en las precipitaciones invernales.

4. **Valor máximo de NSI y valor medio de NSI (0.763314):** Esta fuerte correlación positiva implica que los años con un valor medio más alto de nieve también tienden a tener un valor máximo más alto. Esto puede sugerir que los factores que influyen en el nivel medio de nieve también afectan la probabilidad de experimentar niveles de nieve extremadamente altos
5. **Desviación estándar de NSI y año (0.736978):** Esta correlación fuerte y positiva indica que la variabilidad en los niveles de nieve ha aumentado a lo largo del tiempo. Esto puede reflejar la influencia de los cambios climáticos, que pueden estar aumentando la variabilidad en las precipitaciones de nieve.
6. **Valor máximo de NSI y desviación estándar de NSI (0.749685):** Esta correlación fuerte y positiva sugiere que en los años con una mayor variabilidad en los niveles de nieve, también es más probable que se vea un valor máximo más alto de NSI. Esto podría indicar que las condiciones climáticas más variables también aumentan la probabilidad de experimentar niveles de nieve extremadamente altos
7. **Máximo de NDVI y la desviación estándar de NSI (0.797) :** Esta fuerte correlación positiva indica que en los años con una mayor variabilidad en los niveles de nieve (medida por la desviación estándar de NSI), también se tiende a ver un valor máximo más alto de NDVI, que es una medida de la vegetación.

En general, estos resultados muestran que existen algunas relaciones interesantes entre las variables de NDVI y NSI y cómo han cambiado a lo largo del tiempo. Sin embargo, se necesitaría más investigación para entender completamente las causas detrás de estas correlaciones.

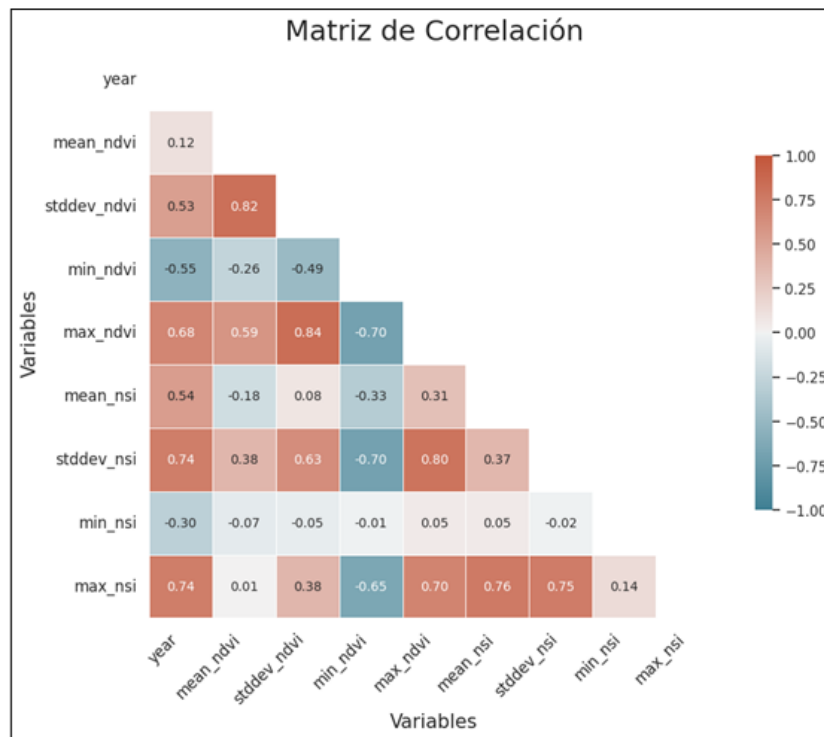


Figura 2: Matriz de correlación

### 3.6. Resultados del Test de Tendencias Temporales

#### 1. Media NDVI:

Pendiente: 0,000109

Valor p: 0,514211

La pendiente es positiva, lo que indica una tendencia ascendente en la media del NDVI a lo largo del tiempo. Sin embargo, el valor p es mayor a 0.05, lo que sugiere que esta tendencia no es estadísticamente significativa.

#### 2. Desviación estándar NDVI:

Pendiente: 0,000415

Valor p: 0,001407

La pendiente es positiva, lo que indica que la variabilidad del NDVI está aumentando a lo largo del tiempo. El valor p es menor a 0.05, lo que sugiere que esta tendencia es estadísticamente significativa.

#### 3. Mínimo NDVI:

Pendiente:  $-0,000638$

Valor p: 0,000697

La pendiente es negativa, lo que indica una tendencia descendente en el valor mínimo del NDVI a lo largo del tiempo. El valor p es menor a 0.05, lo que sugiere que esta tendencia es estadísticamente significativa.

#### 4. Máximo NDVI:

Pendiente: 0,003235

Valor p:  $9,133e - 06$

La pendiente es positiva, lo que indica una tendencia ascendente en el valor máximo del NDVI a lo largo del tiempo. El valor p es muy pequeño, lo que sugiere que esta tendencia es altamente estadísticamente significativa.

#### 5. Media NSI:

Pendiente: 0,001978

Valor p: 0,001058

La pendiente es positiva, lo que indica una tendencia ascendente en la media del NSI a lo largo del tiempo. El valor p es menor a 0.05, lo que sugiere que esta tendencia es estadísticamente significativa.

#### 6. Desviación estándar NSI:

Pendiente: 0,000995

Valor p:  $6,682335e - 07$

La pendiente es positiva, lo que indica que la variabilidad del NSI está aumentando a lo largo del tiempo. El valor p es muy pequeño, lo que sugiere que esta tendencia es altamente estadísticamente significativa.

#### 7. Mínimo NSI:

Pendiente:  $- 0,0010974$

Valor p: 0,090237

La pendiente es negativa, lo que indica una tendencia descendente en el valor mínimo del NSI a lo largo del tiempo. Sin embargo, el valor p es mayor a 0.05, lo que sugiere que esta tendencia no es estadísticamente significativa.

#### 8. Máximo NSI:

Pendiente: 0,004314

Valor p:  $5,163803e - 07$

La pendiente es positiva, lo que indica una tendencia ascendente en el valor máximo del NSI a lo largo del tiempo. El valor p es muy pequeño, lo que sugiere que esta tendencia es altamente estadísticamente significativa.

## 4. Conclusiones

**1. El NDVI promedio** a lo largo de los años no presenta una tendencia significativa, con una pendiente cercana a cero y un valor  $p$  alto (0.51), indicando que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de que la pendiente es cero. Esto sugiere que la vegetación en promedio no ha experimentado cambios significativos desde 1985 hasta 2021.

**2. la desviación estándar** del NDVI muestra una tendencia significativa al alza (pendiente = 0.0004, valor  $p$  = 0.0014). Esto sugiere que la variabilidad de la vegetación ha ido aumentando con el tiempo.

**3. El NDVI mínimo** ha mostrado una tendencia significativa a la baja (pendiente = -0.0006, valor  $p$  = 0.0007), indicando que las áreas de menor vegetación han ido disminuyendo en vegetación a lo largo del tiempo.

**4. Por otro lado, el NDVI máximo** muestra una fuerte tendencia al alza (pendiente = 0.0032, valor  $p$  =  $9.13 \times 10^{-6}$ ). Esto indica que las áreas de mayor vegetación han ido incrementando su vegetación a lo largo del tiempo.

**5. Al respecto del NSI**, el promedio ha mostrado una tendencia al alza significativa (pendiente = 0.0019, valor  $p$  = 0.0010), lo cual sugiere un incremento en la cobertura de nieve a lo largo del tiempo.

**6. Similar a la desviación estándar** del NDVI, la desviación estándar del NSI también muestra una tendencia significativa al alza (pendiente = 0.00099, valor  $p$  =  $6.68 \times 10^{-7}$ ), indicando que la variabilidad de la cobertura de nieve ha aumentado con el tiempo.

**7. El NSI mínimo** no muestra una tendencia significativa (pendiente = -0.0011, valor  $p$  = 0.09), mientras que el NSI máximo muestra una fuerte tendencia al alza (pendiente = 0.0043, valor  $p$  =  $5.16 \times 10^{-7}$ ), sugiriendo que las áreas de mayor cobertura de nieve han ido incrementando su cobertura de nieve a lo largo del tiempo.

**8. Por último, en la matriz de correlación**, destaca la alta correlación positiva entre el año y el NDVI máximo (0.68) y el NSI máximo (0.74), lo que respalda los resultados de las pruebas de tendencia. También se puede notar una correlación positiva entre la desviación estándar del NDVI y del NSI (0.63), lo que indica que cuando hay mayor variabilidad en la vegetación, también hay mayor

variabilidad en la nieve.

**9. Correlacion entre máximo de NDVI y la desviación estándar de NSI (0.79)**, Esta fuerte correlación positiva indica que en los años con una mayor variabilidad en los niveles de nieve (medida por la desviación estándar de NSI), también se tiende a ver un valor máximo más alto de NDVI, que es una medida de la vegetación.

Esta correlación puede sugerir varias cosas. Por ejemplo, podría indicar que en los años con una mayor variabilidad en los niveles de nieve, también se ven condiciones más favorables para la vegetación en ciertos momentos o lugares, lo que da lugar a valores máximos más altos de NDVI. Es posible que estos años tengan periodos de derretimiento de la nieve que proporcionan agua adicional para la vegetación, permitiendo que alcance niveles más altos de vigor.

Alternativamente, también podría ser que en los años con una mayor variabilidad en los niveles de nieve, también se vean variaciones más grandes en las condiciones de la vegetación, lo que da lugar a valores máximos más altos de NDVI.

Es importante tener en cuenta que esta es una correlación y no necesariamente indica una relación causal. Sería necesario realizar más investigaciones para entender mejor las razones subyacentes de esta correlación y si hay un mecanismo directo que vincule la variabilidad de la nieve con los valores máximos de NDVI. También es posible que esta correlación se deba a otros factores subyacentes no medidos en este estudio que afectan tanto a la nieve como a la vegetación.

**10. Tendencia del NDVI:** Se observa un leve incremento en el NDVI medio (índice de vegetación) a lo largo de los años, especialmente a partir del 2013. Sin embargo, la variabilidad anual también parece aumentar, lo que sugiere que aunque la vegetación puede estar aumentando en promedio, también está experimentando fluctuaciones más extremas.

**11. Tendencia del NSI:** En contraste, no se aprecia una tendencia clara en el NSI medio (índice de nieve) a lo largo de los años. Sin embargo, a partir del 2007, los valores máximos de NSI parecen aumentar, lo que podría indicar años con mayor presencia de nieve.

**12. Desviación estándar:** Los valores de desviación estándar para NDVI y NSI están incrementando levemente, lo que sugiere que la variabilidad interanual en ambas medidas está aumentando. Esto podría estar relacionado con la variabi-



lidad climática o con cambios en las prácticas de gestión del terreno.

**Rangos:** Los valores mínimo y máximo de NDVI y NSI muestran una amplia gama a lo largo de los años. Esto indica que aunque las medias pueden estar aumentando, todavía hay momentos de baja vegetación y nieve.

### **Conclusión General:**

Se observa que a lo largo del período de estudio (1985 a 2021), hubo variaciones significativas tanto en el índice de vegetación normalizado (NDVI) como en el índice de nieve normalizado (NSI) en la zona de estudio, situada a 3500 mts de altura en la cordillera del norte de Chile.

En particular, la desviación estándar del NDVI, el valor mínimo de NDVI, el valor máximo de NDVI, la media del NSI, la desviación estándar del NSI y el valor máximo del NSI mostraron tendencias significativas a lo largo del tiempo ( $p < 0.05$ ). Estos resultados indican que la variabilidad de la vegetación y la nieve ha aumentado con el tiempo, lo que podría sugerir un ecosistema en cambio y probablemente en respuesta a factores externos como el cambio climático.

Es importante destacar que el valor medio de NDVI no mostró una tendencia significativa, lo que podría sugerir que la productividad total de la vegetación ha permanecido relativamente constante a pesar de la mayor variabilidad observada. Por otro lado, la media del NSI sí mostró una tendencia significativa, sugiriendo un cambio en la cobertura de nieve en la región a lo largo del tiempo.

Además, el análisis de correlación reveló asociaciones fuertes entre varias métricas. Por ejemplo, una correlación positiva fuerte entre el valor máximo de NDVI y el año sugiere un aumento en la máxima productividad de la vegetación observada cada año. De manera similar, una fuerte correlación positiva entre la media del NSI y el año sugiere un aumento en la cobertura promedio de nieve a lo largo del tiempo.

## **5. bibliografía**

@mischatarilabs2019, author = Montoya, Saul, title = NDVI calculation from Landsat8 images with Python 3 and Rasterio - Tutorial, year = 2019, howpublished = <https://www.hatarilabs.com/ih-en/ndvi-calculation-from-landsat8-images-with-python-3-a>

@miscusgs, title = Normalized Difference Snow Index, howpublished = <https://www.usgs.gov/land-resources/land-remote-sensing/remote-sensing-data-products/normalized-difference-snow-index>

//www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-normalized-difference-snow-index