

DOI: 10.35319/acta-nova.202542

ACTA NOVA

Revista de Ciencias y Tecnología

Laboratorio de Hidráulica Av. Petrolera
km 4,2 Universidad Mayor de San
Simón, Cochabamba – Bolivia
fernandoledezma.p@fcyt.umss.edu.bo

CLAS UMSS, Campus Central UMSS.
Edificio Multiacadémico 2do. Piso
(Jordán y Oquendo), Universidad
Mayor de San Simón Cochabamba –
Bolivia
m.sandoval@umss.edu

Autor para correspondencia:
Fernando Arturo Ledezma Perizza
fernandoledezma.p@gmail.com

Monitoreo de Sequías en Bolivia en un Entorno Operativo mediante el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI-1) y el Índice de Condición de Vegetación (VCI) con Google Earth Engine

Drought Monitoring in Bolivia in an Operational Environment using the Standardized Precipitation Index (SPI-1) and the Vegetation Condition Index (VCI) with Google Earth Engine

Fernando Arturo Ledezma Perizza y María Rene Sandoval Gómez

Resumen: La sequía es un fenómeno recurrente con impactos críticos en la agricultura y los recursos hídricos de Bolivia. Para abordar este desafío, el presente estudio evalúa las condiciones de sequía utilizando un enfoque dual: el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI-1) para cuantificar anomalías meteorológicas y el Índice de Condición de Vegetación (VCI) para medir la respuesta y salud de la vegetación. La metodología se implementó en la plataforma Google Earth Engine (GEE), procesando datos de precipitación de CHIRPS y de vegetación (NDVI) de MODIS durante un extenso período (1981-2024). Los resultados indican que, si bien las condiciones normales predominan en aproximadamente el 70% del territorio, se identifican regiones vulnerables a la sequía en el Altiplano, el Chaco y los valles. De particular importancia es la tendencia descendente observada en el VCI, especialmente desde 2010, lo que sugiere un creciente estrés en la vegetación a nivel nacional. Este estudio concluye que el marco metodológico propuesto es una herramienta eficiente y escalable para el desarrollo de un sistema de monitoreo operativo de sequías, al tiempo que reconoce su contexto metodológico y sienta las bases para futuras mejoras.

Palabras clave: Monitoreo de sequías, Bolivia, SPI-1, VCI, Google Earth Engine, variabilidad climática, CHIRPS.

Abstract: Drought is a recurring phenomenon with critical impacts on Bolivia's agriculture and water resources. To address this challenge, this study assesses drought conditions using a dual approach: the Standardized Precipitation Index (SPI-1) to quantify meteorological anomalies and the Vegetation Condition Index (VCI) to measure vegetation health and response. The methodology was implemented on the Google Earth Engine (GEE) platform, processing precipitation data from CHIRPS and vegetation data (NDVI) from MODIS over an extended period (1981-2024). The results indicate that while normal conditions prevail across approximately 70% of the territory, vulnerable regions are identified in the Altiplano, Chaco, and valleys. Of particular significance is the observed descending trend in the VCI, especially since 2010, suggesting growing vegetation stress nationwide. This study concludes that the proposed methodological framework is an efficient and scalable tool for developing an operational drought monitoring system, while acknowledging its methodological context and laying the groundwork for future enhancements.

Key words: Drought monitoring, Bolivia, SPI-1, VCI, Google Earth Engine, climate variability, CHIRPS.

1. Introducción

La sequía es uno de los fenómenos climáticos extremos de mayor impacto en Bolivia, afectando de manera severa a sectores críticos como la agricultura, la seguridad alimentaria y la disponibilidad de recursos hídricos. La creciente variabilidad climática ha intensificado la frecuencia y severidad de estos eventos, lo que exige el

desarrollo de sistemas de monitoreo robustos y oportunos.

Para abordar este desafío, el presente estudio se fundamenta en dos indicadores clave. El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), desarrollado por McKee et al. (1993), es un indicador ampliamente utilizado para caracterizar la sequía meteorológica al cuantificar las anomalías de precipitación en diversas escalas temporales. De forma complementaria, el Índice de

Condición de Vegetación (VCI), propuesto por Kogan (1995), evalúa la sequía agrícola al medir la salud de la vegetación en relación con sus condiciones históricas.

La implementación de este análisis a escala nacional se ve facilitada por la plataforma Google Earth Engine (GEE). Su capacidad para procesar eficientemente vastos archivos de datos satelitales, como los registros de precipitación de CHIRPS y los datos de vegetación de MODIS, la convierte en una herramienta ideal para análisis a gran escala y para el desarrollo de sistemas de monitoreo operativo.

El objetivo principal de este estudio es desarrollar y aplicar un marco de monitoreo de sequías integrado para Bolivia utilizando el SPI-1 y el VCI dentro del entorno GEE. Se busca analizar las tendencias históricas y los patrones espaciales de la sequía para proporcionar una herramienta robusta que apoye la gestión de riesgos y las estrategias de adaptación climática en el país.

En las siguientes secciones se detallan el área de estudio, las fuentes de datos y los procedimientos analíticos específicos empleados para alcanzar estos objetivos.

2. Material y métodos

La metodología del estudio se diseñó para ser transparente y reproducible, abarcando el alcance geográfico, los conjuntos de datos satelitales utilizados y los pasos computacionales precisos para la derivación y el análisis de cada índice de sequía.

2.1 Área de estudio

El área de estudio comprende la totalidad del territorio de Bolivia, definido según los límites administrativos de la base de datos FAO GAUL (Global Administrative Unit Layers). El país se caracteriza por una notable heterogeneidad geográfica y climática, que incluye tres grandes regiones: el Altiplano, una meseta árida con precipitaciones anuales bajas (cercanas a 500 mm); los Valles, con un clima templado y precipitaciones

moderadas (entre 800 y 1,200 mm anuales); y la Llanura Amazónica, una región húmeda con precipitaciones que superan los 2,000 mm anuales y una densa cobertura de bosque tropical.

2.2 Fuentes de Datos

Se utilizaron dos fuentes principales de datos satelitales para este estudio:

- Precipitación: Se empleó el conjunto de datos CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data). Este producto ofrece estimaciones de precipitación con una resolución temporal mensual y una resolución espacial de aproximadamente 5 km, cubriendo el período desde 1981 hasta la actualidad (Funk et al., 2015).
- Vegetación: El VCI se derivó del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Los datos de NDVI se obtuvieron del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), que proporciona información con una resolución espacial de aproximadamente 1 km.

2.3 Métodos de Cálculo de Índices

2.3.1 Índice de Precipitación Estandarizado (SPI-1),

El SPI-1 cuantifica las anomalías de precipitación en una escala temporal mensual, permitiendo identificar déficits o excesos hídricos a corto plazo. La metodología completa, establecida por McKee et al. (1993), implica ajustar la serie temporal de precipitación mensual a largo plazo a una distribución de probabilidad Gamma. Posteriormente, la probabilidad acumulada de esta distribución se transforma a una distribución normal estándar con una media de cero y una desviación estándar de uno. Este procedimiento riguroso garantiza la comparabilidad del índice a través de diferentes regiones climáticas. Los valores del SPI-1 se clasifican como se muestra en la Tabla 1.

			PSI - 1						
			Sequia Extrema	Sequia Moderada	Sequia Leve	Condiciones Normales	Húmedo Leve	Húmedo Moderado	Húmedo extremo
			<-2	-2 a -1.5	-1.5 a -1.0	-1.0 a 1	1 a 1.5	1.5 a 2	>2.0
VCI	Sequia Extrema	0 a 10	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto	Alto	Alto	Moderado	Moderado
	Sequia Severa	10 a 20	Muy Alto	Muy Alto	Alto	Alto	Moderado	Moderado	Bajo
	Sequia Moderada	20 a 30	Muy Alto	Alto	Alto	Moderado	Moderado	Bajo	Bajo
	Sequia Leve	30 a 40	Alto	Alto	Moderado	Moderado	Bajo	Bajo	Muy Bajo
	Condiciones Normales	> 40	Alto	Moderado	Moderado	Bajo	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo

Figura 1. Clasificación de Sequía y Humedad según el SPI-1

Tabla 1. Clasificación de valores de SPI

Clasificación	Rango de Valores SPI
<i>Húmedo Extremo</i>	≥ 2.0
<i>Húmedo Moderado</i>	$1.5 \text{ a } 2.0$
<i>Húmedo Leve</i>	$1.0 \text{ a } 1.5$
<i>Normal</i>	$-1.0 \text{ a } 1.0$
<i>Sequía Leve</i>	$-1.5 \text{ a } -1.0$
<i>Sequía Moderada</i>	$-2.0 \text{ a } -1.5$
<i>Sequía Extrema</i>	≤ -2.0

2.3.2 Índice de Condición de Vegetación (VCI)

El VCI es un indicador de la salud de la vegetación en relación con sus condiciones históricas, lo que permite evaluar el impacto de la sequía en los ecosistemas (Kogan, 1995; Liu et al., 2016). Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$VCI = (NDVI_{act} - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) * 100$$

Donde NDVI_act es el valor de NDVI del mes actual, y NDVI_min y NDVI_max son los valores mínimo y máximo históricos de NDVI para ese mes, respectivamente. Los valores de VCI oscilan entre 0 (estrés extremo) y 100 (condiciones óptimas). La clasificación utilizada se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de Sequía Agrícola según el VCI

Clasificación	Rango de Valores VCI
<i>Sequía Extrema</i>	$0 - 10$
<i>Sequía Severa</i>	$10 - 20$
<i>Sequía Moderada</i>	$20 - 30$
<i>Sequía Leve</i>	$30 - 40$
<i>Normal</i>	> 40

2.3.3 Combinación de Índices (SPI-VCI)

Para obtener una evaluación más completa de las condiciones de sequía, se combinaron el SPI-1 y el VCI

utilizando una matriz de doble entrada. Este enfoque integrado permite una clasificación más matizada al considerar tanto el déficit hídrico meteorológico (reflejado por el SPI-1) como la respuesta del ecosistema a dicho estrés (medida por el VCI).

La lógica de esta clasificación se basa en que la integración de indicadores climáticos y biológicos proporciona una imagen más robusta que cualquiera de los índices por sí solo (Zargar et al., 2011). Por ejemplo, una situación de déficit de precipitación (SPI negativo) puede no traducirse inmediatamente en estrés vegetal (VCI normal) debido a la humedad residual del suelo, mientras que la combinación de ambos indicadores en un estado de sequía sí denota un impacto consolidado.

2.3.4 Análisis de Series Temporales

Se generaron series temporales mensuales para la precipitación (derivada de CHIRPS) y para el índice SPI-1 a nivel nacional, abarcando el período de 1981 a 2024. Este análisis es fundamental para identificar tendencias a largo plazo, estacionalidad y la ocurrencia de eventos extremos de sequía y humedad a lo largo del tiempo, siguiendo enfoques estadísticos estandarizados (Wilks, 2011). La aplicación de estos métodos produjo los resultados espaciales y temporales que se presentan a continuación.

3. Resultados

El análisis de los datos satelitales revela patrones espaciales y temporales significativos de la sequía en Bolivia. A continuación, se presentan los hallazgos principales, desde la precipitación base hasta la evaluación integrada de los índices de sequía.

3.1 Análisis Temporal de la Precipitación (CHIRPS)

La serie temporal de precipitación mensual de CHIRPS para el período 1981-2024 revela una media general de aproximadamente 100 mm/mes. Como se muestra en la Figura 2, el análisis destaca una marcada periodicidad estacional y una ligera tendencia a la disminución en la precipitación a lo largo del período, lo que sugiere un cambio gradual hacia condiciones más secas a nivel nacional.

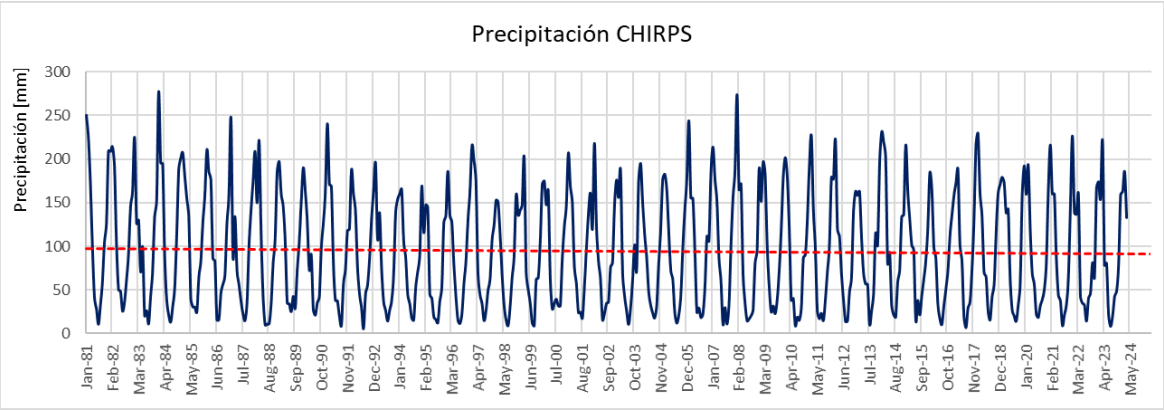


Figura 2. Serie temporal de precipitación mensual CHIRPS

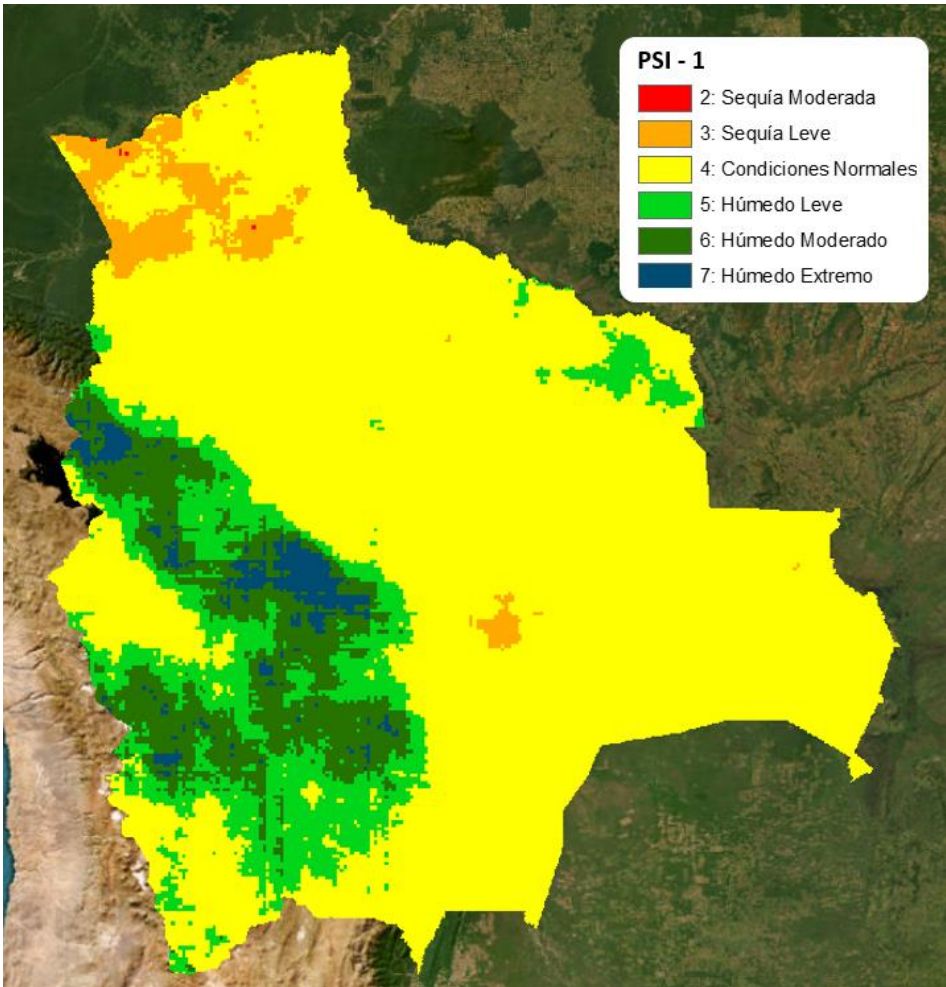


Figura 3. Índice de Precipitación Estandarizado a nivel mensual (SPI-1)

3.2 Análisis Espacial y Temporal del SPI-1

El análisis espacial del SPI-1, ilustrado en la Figura 3, muestra que la mayor parte del territorio boliviano, aproximadamente el 73%, presenta condiciones de

precipitación normales. Las áreas afectadas por sequía representan alrededor del 3.5% del país y se concentran principalmente en el altiplano occidental y sur. En contraste, las zonas con exceso de humedad cubren cerca del 23% del territorio, ubicándose mayormente en las regiones de los valles y el occidente.

La serie temporal del SPI-1 (Figura 5) evidencia episodios recurrentes de sequía, con eventos notables en los años 1987, 1993, 1995 y 2002. Por otro lado, se registraron periodos de humedad significativa en 1985, 1988, 1989, 2015 y 2019. La línea de tendencia de la serie muestra una ligera inclinación descendente, lo que refuerza la observación de una tendencia hacia condiciones más secas.

3.3 Análisis Espacial y Temporal del VCI

La distribución espacial del VCI indica que el 79.3% del territorio muestra condiciones de vegetación normales (Figura 4). Sin embargo, se identifican áreas con un

notable estrés por sequía, abarcando un 10.2% en las categorías de sequía extrema y severa, las cuales se localizan principalmente en la región del Chaco, los valles y el extremo noreste del país.

El análisis de la serie temporal anual del VCI para el período 2000-2023 revela una tendencia general descendente, lo que indica un deterioro progresivo en la salud de la vegetación. Como se aprecia en la Figura 6, se observa un cambio significativo a partir de 2010, con una tendencia hacia valores más bajos, que culmina con un valor mínimo en el año 2023 (52%).

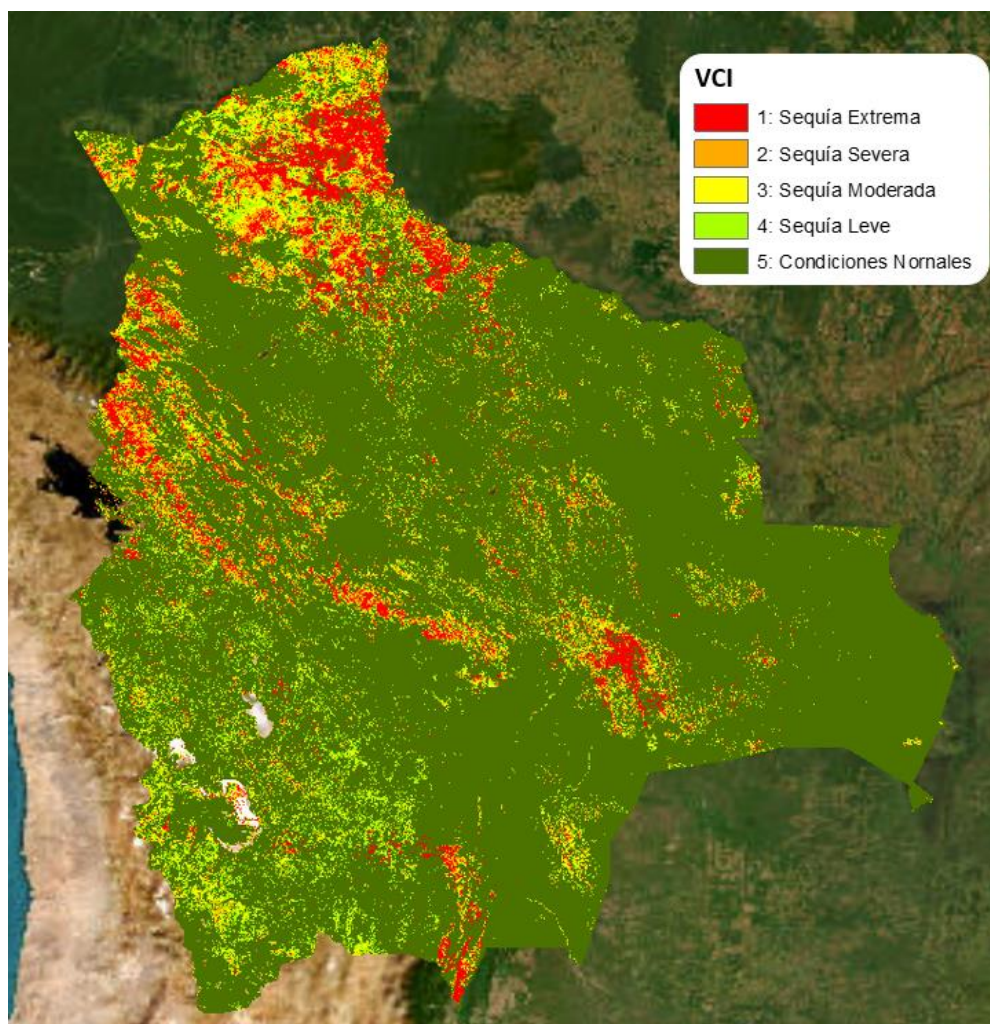


Figura 4. Índice de Condición de Vegetación (VCI)

3.4 Índice Combinado de Sequía (SPI-VCI)

El análisis del índice combinado SPI-VCI muestra que la mayoría del país (71%) presenta condiciones de sequía bajas o muy bajas.

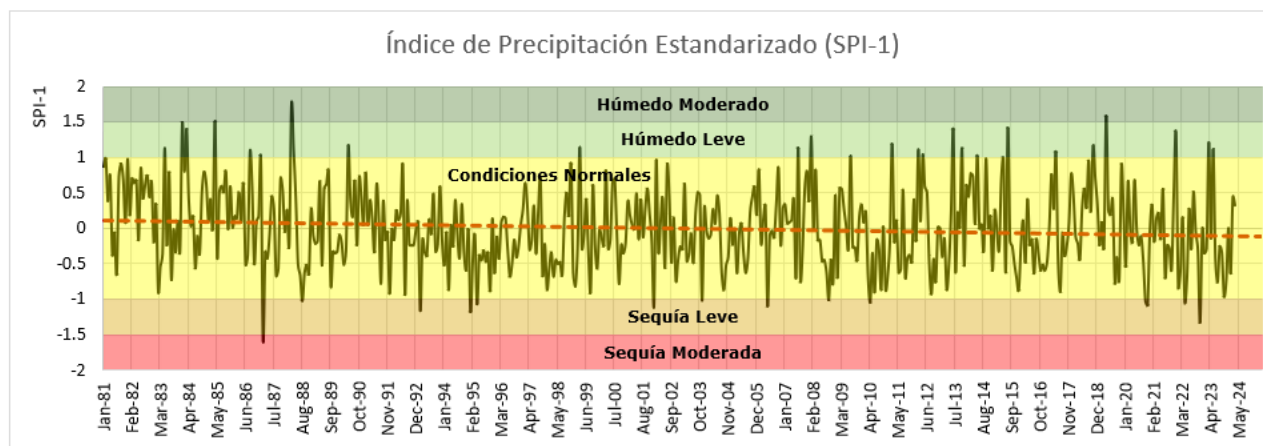


Figura 5. Serie temporal del Índice de Precipitación Estandarizado a nivel mensual (SPI-1)

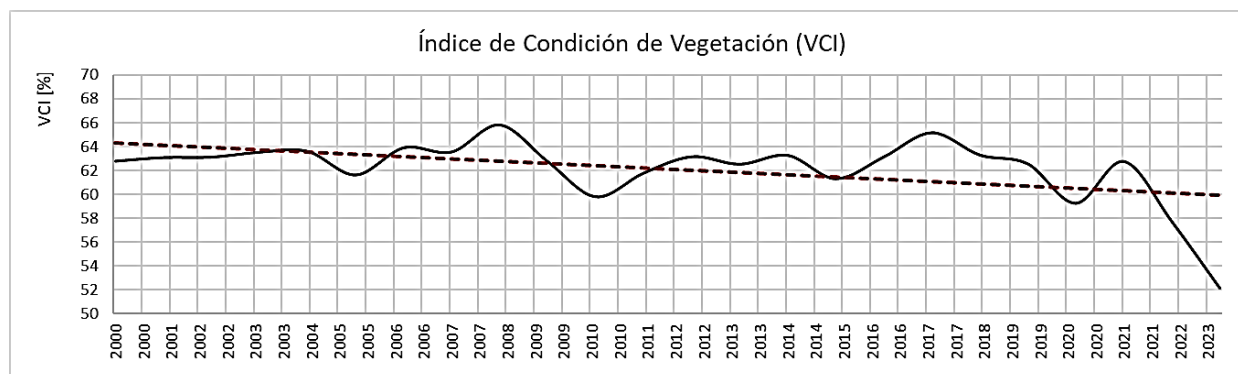


Figura 6. Serie temporal del Índice de Condición de Vegetación (VCI)

3.5 Índice Combinado (PSI-VCI)

La Figura 7 ilustra que las áreas con sequía moderada abarcan el 24% del territorio y se concentran principalmente en la región noroeste. Las zonas con condiciones de sequía severa son limitadas y representan menos del 5% del total. Estos resultados son interpretados en la siguiente sección.

Los hallazgos de este estudio ofrecen una visión integral de la dinámica de la sequía en Bolivia, y su interpretación en el contexto de la literatura científica permite evaluar tanto las tendencias climáticas como las fortalezas y limitaciones de la metodología empleada.

La tendencia a la disminución de la precipitación (datos CHIRPS) y la propensión hacia condiciones más secas (tendencia del SPI-1) son consistentes con investigaciones más amplias sobre la variabilidad climática en la región. Estudios como los de Magrin et al. (2014) y Pabón et al. (2020) han vinculado estos cambios en los patrones de precipitación en Sudamérica con fenómenos climáticos

globales como El Niño/La Niña (ENSO), que intensifican los eventos extremos.

Los patrones espaciales de sequía identificados, que señalan al Altiplano como una zona particularmente susceptible, coinciden con los hallazgos de Rivera et al. (2018), quienes documentaron la vulnerabilidad de esta región a los déficits hídricos. El marcado declive en el VCI desde 2010, con un mínimo en 2023, coincide con estudios que documentan el impacto combinado de sequías prolongadas. Este fenómeno, identificado también por Marengo et al. (2020), sugiere una degradación progresiva de ecosistemas sensibles como el bosque seco del Chaco boliviano.

Sin embargo, este declive del VCI requiere una evaluación crítica. Aunque la sequía es un factor causal importante, este índice es sensible a factores no climáticos. La tendencia observada podría estar influenciada no solo por el estrés hídrico, sino también por cambios en el uso de la tierra, como la deforestación o la expansión agrícola. Para separar estos efectos, es recomendable el uso de índices más avanzados, como el VCI Corregido por Fenología (PVCi), que es superior al alinear las comparaciones de

NDVI con etapas fenológicas equivalentes en lugar de fechas calendáricas fijas, aislando mejor el impacto climático.

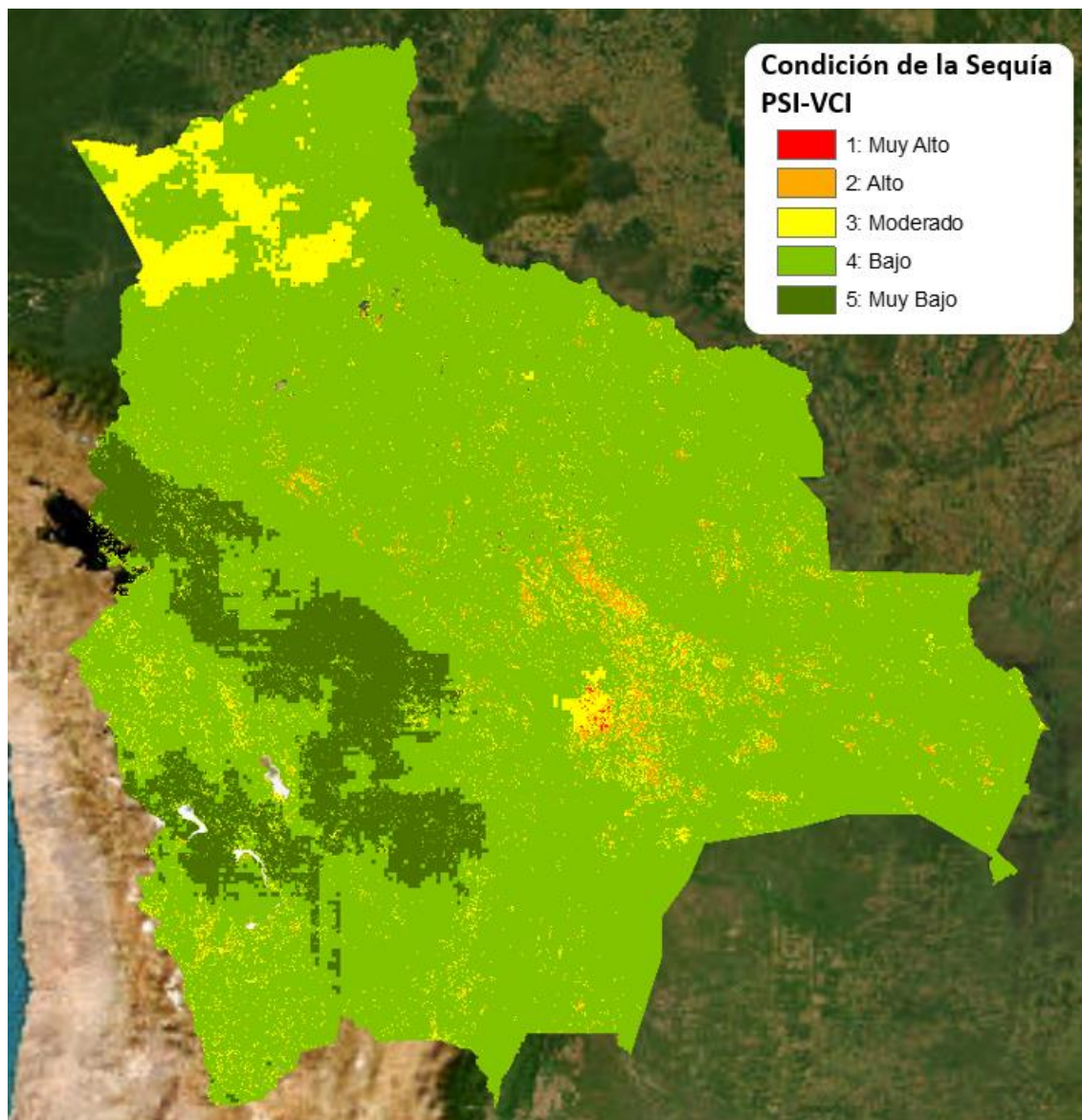


Figura 7. Condición de la sequía PSI-VCI

4. Discusión

Asimismo, es importante reconocer que la correlación entre SPI y VCI puede debilitarse en paisajes heterogéneos y en cultivos irrigados, donde la aplicación de riego puede enmascarar la señal de la sequía meteorológica en la respuesta de la vegetación.

Finalmente, el uso de Google Earth Engine (GEE) demostró ser una fortaleza metodológica clave. Su capacidad para procesar de manera escalable y eficiente grandes volúmenes de datos geospaciales es fundamental para la implementación de sistemas operativos de alerta

temprana de sequía, permitiendo un monitoreo casi en tiempo real a nivel nacional.

5. Conclusiones

Este estudio proporciona una evaluación cuantitativa de las tendencias y patrones de la sequía en Bolivia mediante un enfoque integrado de teledetección. Los hallazgos principales se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. **Tendencias Climáticas:** Los datos de CHIRPS y el análisis del SPI-1 revelan una tendencia gradual hacia condiciones más secas en Bolivia durante las

últimas décadas, lo que indica una creciente presión climática sobre los recursos hídricos y los ecosistemas del país.

2. Vulnerabilidad Espacial: Aunque la mayor parte del territorio boliviano presenta condiciones normales, se han identificado focos de vulnerabilidad a la sequía meteorológica y agrícola en regiones específicas como el Chaco, los valles y el Altiplano.
3. Salud de la Vegetación: La preocupante tendencia descendente del VCI desde 2010 sugiere un aumento generalizado del estrés en la vegetación, un indicador clave del impacto acumulativo de las condiciones climáticas adversas que requiere una investigación más profunda.
4. Utilidad Metodológica: El uso integrado de los índices SPI-1 y VCI, implementado en la plataforma GEE, constituye un marco de análisis eficiente, escalable y potente para el establecimiento de un sistema nacional de monitoreo operativo de sequías.

Estos resultados están en línea con las conclusiones del IPCC (2021), que advierten sobre la intensificación de eventos climáticos extremos en la región sudamericana como consecuencia del cambio climático. El marco desarrollado proporciona una herramienta valiosa para monitorear estas dinámicas y fortalecer las estrategias de adaptación, sentando las bases para futuras investigaciones y mejoras.

6. Recomendaciones

Con base en los hallazgos del estudio y sus limitaciones reconocidas, se proponen las siguientes direcciones para futuras investigaciones destinadas a mejorar la precisión y utilidad de los sistemas de monitoreo de sequías en Bolivia:

- Validación con Datos de Campo: Es fundamental integrar mediciones in-situ (estaciones meteorológicas, sensores de humedad del suelo) para validar y calibrar los índices derivados de satélites, aumentando así su fiabilidad a nivel local.
- Desarrollo de Índices Compuestos (CDI): Se recomienda avanzar hacia el desarrollo de Índices de Sequía Compuestos que integren variables adicionales de gran relevancia, como la humedad del suelo (soil moisture) y la evapotranspiración (ET), para una evaluación más holística.
- Aplicación de Inteligencia Artificial (IA): Sugerimos explorar el uso de técnicas de Aprendizaje Automático (Machine Learning) e IA Explicable (XAI) para optimizar

la ponderación de las diferentes variables dentro de los índices compuestos y mejorar significativamente los modelos de predicción de sequías.

- Mejora de Índices de Vegetación: Para una evaluación más precisa del estrés vegetal, se aconseja investigar y aplicar índices avanzados como el VCI Corregido por Fenología (PVCI), que permite distinguir de manera más efectiva entre el estrés inducido por el clima y los impactos derivados de los cambios en el uso del suelo.

Agradecimientos

Agradecimientos Los autores expresan su agradecimiento a la Agencia Sueca de Desarrollo Internacional (ASDI) por el financiamiento del proyecto "Aplicación de recursos informáticos en línea para apoyar la gestión de riesgos hídricos a través de imágenes satelitales de libre disponibilidad". Este proyecto, desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias y Tecnología, ha sido posible gracias a los fondos de donación de la Cooperación ASDI-UMSS.

Declaración de no conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de interés en la realización de este estudio.

Referencias Bibliográficas

- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, Article 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11), 91–100. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)
- Liu, X., Zhu, X., Pan, Y., Li, S., Liu, Y., & Ma, Y. (2016). Agricultural drought monitoring: Progress, challenges, and prospects. *Journal of Geographical Sciences*, 26(6), 750–767. <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1297-9>
- Magrin, G. O., Marengo, J. A., Boulanger, J.-P., Buckeridge, M., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F. R., & Vicuña, S. (2014). Central and South America. En V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R.

- Mastrandrea, & L. L. White (Eds.), *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects* (pp. 1499-1566). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415386>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. En *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (pp. 179–183). American Meteorological Society.
https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf
- Pabón-Caicedo, J. D., Arias, P. A., Carril, A. F., Espinoza, J. C., Fita, L. B., Goubanova, K., Lavado-Casimiro, W., Masiokas, M., Solman, S., & Villalba, R. (2020). Observed and projected hydroclimate changes in the Andes. *Frontiers in Earth Science*, 8, Article 61.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.00061>
- Rivera, J. A., Molina-Carpio, J., & Seiler, C. (2018). Water availability, climate change and Bolivia: Implications for water security. *Climate and Development*, 10(2), 163–176.
<https://doi.org/10.1080/17565529.2017.1291402>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (3rd ed., Vol. 100). Academic Press.
<https://shop.elsevier.com/books/statistical-methods-in-the-atmospheric-sciences/wilks/978-0-12-385022-5>
- Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., & Khan, F. I. (2011). A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19, 333–349.
<https://doi.org/10.1139/a11-013>