Revista, Ciencia Tecnología e Innovación (2026) 24:761-773
https://doi.org/10.56469/rcti.v24i38.2414

Evaluación del riesgo de incendios forestales en bosques de Polylepis en la provincia Candarave, Perú

Wildfire risk assessment in Polylepis forests in Candarave Province, Peru

Williams Sergio Almanza Quispe [1] ✉ Mary Luz Apaza Zamata [2]

Rubén Alcides Solis Palacios [3]

Recibido: 7 de agosto 2026 / Revisado: 4 de septiembre 2026 / Aceptado: 29 de octubre 2026 / Publicado: 23 de noviembre 2026

Resumen

Los incendios forestales son uno de los mayores peligros para los ecosistemas de las montañas andinas, debido a sus impactos en la diversidad biológica, la regulación hídrica y la estabilidad ambiental. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el riesgo de incendios forestales en los bosques de Polylepis en la provincia de Candarave, así como identificar áreas clave para la implementación de estrategias preventivas. La investigación se basó en un enfoque cuantitativo, aplicado y un diseño no experimental de tipo transversal. Se utilizaron datos cartográficos, registros históricos de emergencias, variables climáticas, topográficas y de cobertura vegetal, obtenidos de entidades oficiales y combinados a través de Sistemas de Información Geográfica para evaluar los factores de amenaza, vulnerabilidad y exposición. Los hallazgos revelaron que las condiciones de sequía estacional, la acumulación de material inflamable, las pendientes pronunciadas y las actividades agrícolas son los principales elementos que aumentan la probabilidad de ocurrencia y la propagación de incendios. Además, la clasificación del riesgo permitió identificar áreas con niveles altos y muy altos, coincidiendo con zonas de gran relevancia ecológica y escasa capacidad para regenerarse naturalmente. Se concluye que la evaluación espacial del riesgo es una herramienta esencial para guiar la planificación del territorio, mejorar la gestión del riesgo de desastres y priorizar acciones de conservación, monitoreo y restauración ecológica que ayuden a salvaguardar los ecosistemas andinos y sus servicios ecosistémicos.

Palabras clave: Conservación, sistemas de información geográfica, bosques relictos, ecosistema altoandino

✉ Williams Sergio Almanza Quispe/walmanzaq@unjbg.edu.pe
https://orcid.org/0000-0003-0812-7834

Mary Luz Apaza Zamata
https://orcid.org/0009-0002-7414-1386

Rubén Alcides Solis Palacio
https://orcid.org/ 0009-0008-8074-7900

1 Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann Tacna – Perú

2 Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann Tacna – Perú

3 GerenciaRegionaldeRecursosNaturalesyGestiónAmbiental Gobierno Regional de Tacna

Abstract

Forest fires pose a major threat to Andean mountain ecosystems due to their impact on biodiversity, water regulation, and environmental stability. This study aimed to assess the risk of forest fires in Polylepis forests in the province of Candarave and to identify key areas for implementing preventive strategies. The research employed a quantitative,

applied approach using a non-experimental, cross-sectional design. Cartography data, historical emergency records, climate, topography, and vegetation cover were obtained from official sources and integrated using Geographic Information Systems (GIS) to evaluate factors related to hazard, vulnerability, and exposure. The findings revealed that seasonal drought, the accumulation of flammable material, steep slopes, and agricultural activities are the primary factors that increase the likelihood of fire occurrence and propagation. Furthermore, the risk classification identified areas with high and very high-risk levels, which coincide with zones of significant ecological importance and have limited natural regeneration capacity. The study concludes that spatial risk assessment is an essential tool for supporting land-use planning, strengthening disaster risk management, and prioritizing conservation, monitoring, and ecological restoration measures aimed to safeguarding Andean ecosystems and their ecosystem services.

Keywords: Conservation, Geographic Information Systems, relict forests, high-Andean ecosystem.

Introducción

Los incendios forestales ocasionan daños significativos, con consecuencias perjudiciales para los recursos naturales, ya que aniquilan la vegetación, destruyen la fauna autóctona, eliminan la vida del suelo y contaminan los cuerpos de agua (SINIA, 2018). En las últimas décadas, el incremento de las temperaturas, la disminución de la disponibilidad de agua y la mayor incidencia de fenómenos climáticos extremos han elevado tanto la frecuencia como la gravedad de los incendios forestales, especialmente en zonas montañosas que presentan alta vulnerabilidad ecológica (Giorgis et al., 2021). Los incendios forestales constituyen un fenómeno cada vez más frecuente a escala mundial debido a la interacción entre el cambio climático y las actividades humanas. El incremento de la temperatura, la disminución de la humedad del combustible vegetal y la mayor ocurrencia de sequías prolongadas han incrementado la severidad de los incendios en numerosos ecosistemas forestales (IPCC, 2023; FAO, 2022).

Los bosques del género Polylepis, de la familia Rosaceae, constituyen los bosques naturales que se encuentran a mayor altitud en el planeta y son considerados ecosistemas fundamentales para la conservación debido a su notable diversidad biológica, elevado nivel de endemismo y su papel crucial en la regulación hídrica, el resguardo de suelos, secuestro de carbono y la preservación del hábitat de especies de flora y fauna andina (Joseph et al., 2021; Franco-León et al., 2024). Sin embargo, su distribución actual está altamente fragmentada como resultado de la expansión de la frontera agrícola, el sobrepastoreo, la recolección de leña y la frecuente incidencia de incendios forestales, factores que obstaculizan la regeneración natural y disminuyen la conectividad ecológica de estos ecosistemas. En tal sentido, se destaca la importancia de mejorar las tácticas de recuperación ecológica y conservación a través de la inclusión de métodos para evaluar riesgos y planificar el uso del territorio, lo que facilitará la identificación de zonas clave para la gestión ambiental. (Chanove-Manrique y Cárdenas-Pillco, 2024; Cuyckens et al., 2024).

La provincia Candarave del departamento de Tacna contiene valiosos remanentes de bosques relictos de Polylepis, considerados ecosistemas clave para la regulación del agua en las cabeceras de cuenca y para la preservación de especies autóctonas. Sin embargo, las características climáticas del área, que incluyen largos períodos de sequía, acumulación de material inflamable y el uso habitual del fuego en prácticas agrícolas, incrementan el riesgo de incendios forestales, lo que crea amenazas ambientales, sociales y económicas que necesitan ser analizadas mediante enfoques de gestión del riesgo.

En este contexto, la evaluación espacial del riesgo de incendios forestales requiere considerar de manera integrada las condiciones de amenaza, vulnerabilidad y exposición presentes en el territorio. La aplicación de Sistemas de Información Geográfica permite integrar estas dimensiones mediante la superposición y análisis espacial de variables ambientales, climáticas y territoriales, facilitando la identificación de sectores con diferentes niveles de riesgo. Este enfoque resulta particularmente pertinente para los bosques relictos de Polylepis, debido a su distribución espacial fragmentada y a su sensibilidad frente a perturbaciones asociadas al fuego.

En este marco, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el riesgo de incendios forestales en los bosques de Polylepis en la provincia de Candarave a través del estudio conjunto de la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición del área, con el fin de ofrecer información técnica que ayude en la planificación de acciones preventivas enfocadas en la preservación de estos ecosistemas y en el fortalecimiento de la gestión sostenible de los servicios ecosistémicos que brindan.

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se desarrolló en la provincia de Candarave, ubicada en la parte noroccidental del departamento de Tacna, al sur del territorio peruano. Se encuentra comprendida aproximadamente entre las coordenadas 17° 16' 00" de latitud sur y 70° 15' 00" de longitud oeste.

Metodología

Técnica e instrumento

La investigación se desarrolló mediante el análisis documental y espacial a través de Sistemas de Información Geográfica. Se recopiló información de fuentes oficiales, entre ellas el Instituto Nacional de Estadística e Informática, el Instituto Nacional de Defensa Civil, el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, el Gobierno Regional de Tacna, así como archivos históricos de incendios forestales.

Se emplearon como fichas técnicas EDAN (Evaluación de Daños y Análisis de Necesidades) por parte de las autoridades locales, bases de datos georreferenciadas, imágenes satelitales, mapas temáticos y capas digitales procesadas mediante SIG, para identificar las áreas con mayor vulnerabilidad y riesgo de incendios forestales.

En la tabla 1 se sistematiza la procedencia y el formato de las variables que configuran el modelo de riesgo. La información proporcionada por estas instituciones públicas oficiales representa la línea de base oficial para la gestión del riesgo de desastres en el país, lo que garantiza la confiabilidad institucional de los datos de entrada previos a su estandarización y álgebra de mapas en el entorno SIG.

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables para la evaluación del riesgo de incendios en Candarave

Dimensión	*Variable seleccionada*	*Indicadores*	*Fuente oficial*
Amenaza	*FWI (índice de clima de incendios)*	*Datos raster / isolíneas de sequedad atmosférica*	*SENAMHI INDECI*
	Pendiente/ topografía	*Modelos de digitación de elevación (DEM) / grados*	*INGEMMET/ GEO GPS*
Vulnerabilidad	*Cobertura vegetal/ uso de suelo*	*Polígonos vectoriales (shapefile*	*SERFOR/MINAM SERNANP*
Quemaduras	*Áreas urbanas/ centros poblados*	*Puntos y polígonos urbanos*	*INEI*

Población y muestra

La población estuvo conformada por la totalidad de los bosques de Polylepis existentes en la provincia de Candarave y por los registros históricos relacionados con incendios forestales y variables ambientales disponibles para el área de estudio.
Debido a que el estudio se desarrolló sobre la totalidad del ámbito de intervención, no se realizó un procedimiento de muestreo, sino que se consideraron todos los remanentes de bosques de Polylepis identificados dentro de la provincia de Candarave y toda la información cartográfica y documental disponible.

Análisis y tratamiento estadístico

La información recopilada fue estructurada en una base de datos digital para su análisis. Se utilizó estadística descriptiva mediante el cálculo de frecuencias, porcentajes y tablas de distribución, con el fin de ilustrar los registros históricos de incendios y las variables ambientales consideradas. Además, se llevó a cabo un análisis espacial mediante SIG para superponer capas temáticas, clasificar los niveles de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, y crear mapas temáticos mediante el Índice Meteorológico de Incendios (FWI). El análisis y tratamiento de los datos no requirieron modelamiento estadístico inferencial tradicional; en su lugar, se fundamentó en un Análisis Espacial Multicriterio (AEM) ejecutado íntegramente en un entorno cartográfico digital utilizando el software.
La información proveniente de fuentes oficiales (SENAMHI, MINAM, CENEPRED) fue homogeneizada, indexada espacialmente y clasificada bajo la estructura de las dimensiones de amenaza, vulnerabilidad y exposición.
Para la caracterización cuantitativa de las hectáreas afectadas y los registros históricos, se

aplicó análisis espacial descriptivo basado en la base de datos geográfica del proyecto, extrayendo frecuencias acumuladas, áreas de intersección en hectáreas y porcentajes de superposición geográfica. La validación espacial del modelo final de riesgo se realizó mediante una técnica de superposición de capas (overlay analysis), cruzando espacialmente la cartografía predictiva generada frente a la distribución geográfica de los registros históricos oficiales de incendios en los bosques de Polylepis.

$$I(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} S_i(x)$$

Donde:
- I(x) es el índice espacial calculado para la celda o unidad espacial x.
- n es el número de indicadores incorporados.
- Si (x) es el valor estandarizado del indicador i en la ubicación x.
- 1/n representa el peso uniforme asignado a cada indicador.

Teniendo una ponderación uniforme, por tanto, se utilizaron cuatro indicadores independientes y estandarizados, la expresión sería:

$$I(x) = \frac{S_1(x) + S_2(x) + S_3(x) + S_4(x)}{4}$$

Para la integración de los indicadores se propone una escala ordinal común de cinco niveles, con puntuaciones de 1 a 5, en la que los valores superiores representan condiciones relativamente más favorables para la ocurrencia o propagación de incendios, según la naturaleza de cada variable.

La clasificación del riesgo de incendio forestal para los bosques de Polylepis se justificó bajo el enfoque metodológico de CENEPRED, integrando los factores de peligro y vulnerabilidad. Se asignó una categoría de Riesgo Alto y Muy Alto debido a la combinación de una alta susceptibilidad física caracterizada por pendientes pronunciadas y una alta carga de combustible fino junto con un factor desencadenante antrópico recurrente por la práctica de quemas agropecuarias. Esta jerarquización se ve fuertemente respaldada por el valor ecológico crítico del elemento expuesto, dado que las especies que constituyen ecosistemas residuales vulnerables y su pérdida comprometen irreversiblemente la regulación hídrica y el almacenamiento de carbono en las cabeceras de cuenca de Tacna.

Resultados

Valoración del perjuicio económico

La provincia de Candarave se caracteriza por presentar una topografía accidentada, propia de la cordillera andina, con fuertes variaciones altitudinales y pendientes pronunciadas. Existen diferencias de elevación superiores a los 3000 metros dentro de distancias relativamente cortas, configurando un relieve complejo compuesto por montañas, quebradas y laderas escarpadas. Estas condiciones pueden favorecer el ascenso rápido de los incendios y dificultan las operaciones de combate terrestre.

Los bosques de queñual suelen desarrollarse en zonas de alta montaña, frecuentemente asociados a laderas inclinadas y áreas de difícil acceso. En caso de producirse un incendio forestal, estas características topográficas pueden retrasar la llegada de los equipos de respuesta, incrementar el tiempo necesario para la extinción y aumentar el riesgo de afectación a grandes extensiones de vegetación nativa. Además, las quebradas y corredores naturales pueden actuar como canales que modifican la dirección y velocidad del viento, lo que podría generar cambios repentinos en el

comportamiento del fuego.

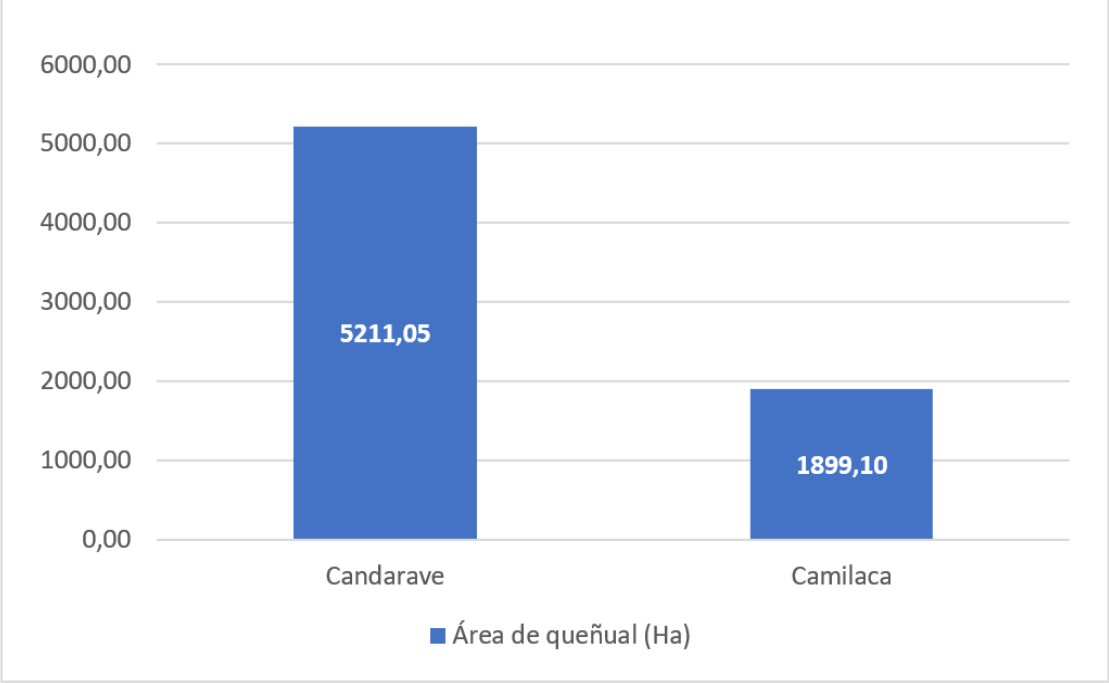
Debido a su lento proceso de regeneración natural, los daños ocasionados por los incendios forestales pueden persistir durante largos periodos, generando costos asociados a la restauración ecológica y a la pérdida temporal de los beneficios ambientales que brindan a las comunidades locales. En este sentido, la afectación de los bosques de queñual representa un perjuicio económico indirecto de importancia para la provincia.

Si bien no resulta factible cuantificar de manera precisa el perjuicio económico derivado de la pérdida de los bosques de Queñual en la provincia de Candarave, la afectación de estos bosques implica la disminución o pérdida de servicios ecosistémicos fundamentales para las poblaciones locales y el equilibrio ambiental de las cuencas altoandinas.

En ese sentido, la valoración del perjuicio potencial se realizó considerando la distribución de la cobertura de queñual dentro del ámbito de intervención. La pérdida de estas áreas no solo representa la reducción de un ecosistema estratégico, sino también la pérdida de décadas de procesos naturales de crecimiento y regeneración.

La Figura 1 muestra la distribución porcentual de la cobertura de bosques de Polylepis en los distritos de la provincia de Candarave. Se observa que la cobertura no se distribuye de manera homogénea y se concentra principalmente en los distritos de Candarave y Camilaca. Esta distribución evidencia que dichos sectores presentan una mayor exposición ante la ocurrencia de incendios forestales, debido a que concentran una mayor superficie de bosque susceptible de ser afectada, la afectación de dichas áreas podría implicar la pérdida temporal o permanente de servicios ecosistémicos esenciales para las cuencas altoandinas de la provincia de Candarave.

Figura 1. Superficie de cobertura de bosques de queñual (Polylepis spp.) por distrito de la provincia de Candarave



Susceptibilidad de la vegetación natural a los incendios forestales

En la provincia de Candarave, la susceptibilidad de la vegetación a los incendios forestales presenta niveles altos a muy altos en las zonas de pajonal de puna, pastizales y bofedales andinos. El riesgo se eleva significativamente durante los meses secos debido a la acumulación de material vegetal inflamable, la presencia de fuertes vientos y déficit de humedad. Los ecosistemas de queñual, aunque presentan mayores niveles de humedad que otras formaciones vegetales, son altamente vulnerables debido a su lento proceso de regeneración y a la importancia ecológica que representan para la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

Riesgo ante incendios forestales

El riesgo de incendios forestales en la provincia de Candarave está determinado por la interacción entre las condiciones de peligro existentes y la vulnerabilidad de los ecosistemas, las actividades productivas y las poblaciones expuestas.

La Tabla 2 presenta la distribución de los niveles de riesgo de incendios forestales sobre la superficie agrícola de la provincia de Candarave. Se observa el predominio de los niveles de riesgo bajo y medio, siendo Cairani (4,220 ha) y Candarave (3,794 ha) los distritos con mayor extensión en nivel bajo. Cabe precisar que esta información, obtenida del SIGRID, corresponde a un análisis a escala distrital sobre áreas agrícolas y no representa la zonificación específica de los parches de Polylepis

Tabla 2. Nivel de riesgo de la superficie agrícola ante incendios forestales, según distritos de la Provincia de Candarave

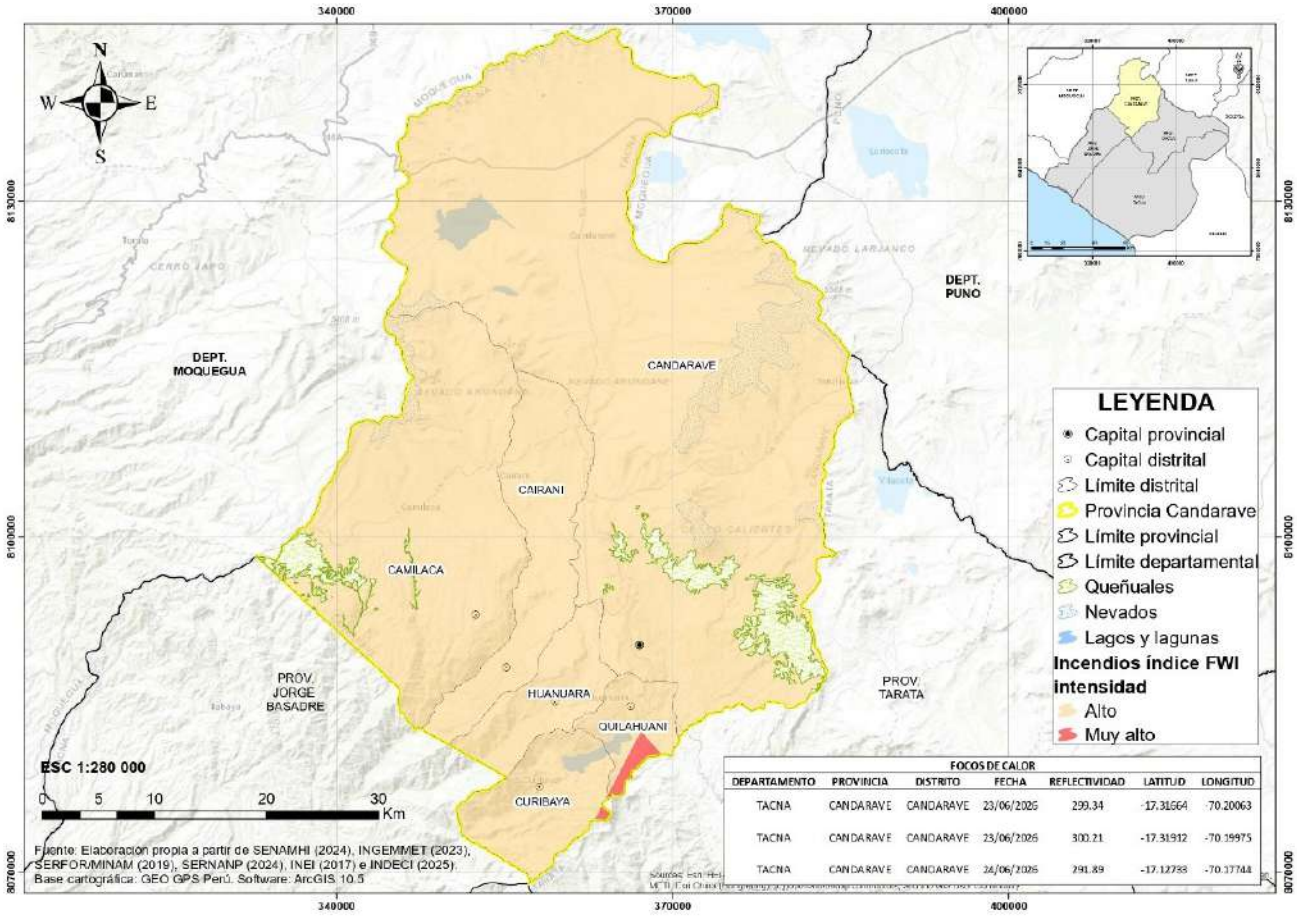
Distrito	*Nivel de riesgo de la superficie agrícola (Ha)*			
	Muy alto	*Alto*	*Medio*	*Bajo*
Candarave	*0*	*5*	*630*	*3,794*
Cairani	*0*	*0*	*326*	*4,220*
Camilaca	*0*	*0*	*295*	*1,947*
Curibaya	*0*	*0*	*9*	*318*
Huanuara	*0*	*0*	*184*	*1,305*
Quilahuani	*0*	*0*	*144*	*1,714*

Fuente: Escenario de riesgo ante incendios forestales en el marco del Plan Multisectorial 2025 – 2027, SIGRID

La Figura 2 muestra la distribución de los puntos de calor que revelan la presencia de áreas donde la actividad térmica ocurre de manera frecuente, sobre todo en zonas con pastizales abundantes y vegetación nativa de zonas montañosas. La existencia de estos puntos señala regiones que podrían ser vulnerables al inicio de incendios forestales, especialmente en la temporada seca, cuando la humedad de la flora disminuye y las condiciones se vuelven propicias para la expansión del fuego.

Los datos ofrecidos por los puntos de calor permiten detectar zonas que necesitan supervisión constante a través de sistemas de alerta anticipada y monitoreo satelital, lo que contribuye a mejorar la respuesta ante incendios forestales y a mitigar los efectos sobre los bosques de Polylepis y otros ecosistemas en la provincia de Candarave.

Figura 2. Focos de calor en la provincia de Candarave



Para determinar la distribución de la susceptibilidad a incendios forestales en los bosques de Polylepis, se realizó la superposición espacial de los polígonos correspondientes a estas formaciones vegetales con la capa de susceptibilidad generada mediante el modelo SIG.

Tabla 3. Categorías de susceptibilidad

Categoría	*Superficie (Ha)*	*Porcentaje (%)*
Muy Bajo	-	-
Bajo	-	-
Medio	-	-
Alto	*7110.15*	*100.00*
Muy Alto	-	-

Fuente: Elaboración propia

Discusión

La evaluación del riesgo de incendios forestales en los bosques de Polylepis en la provincia de Candarave reveló que la vulnerabilidad de ecosistemas está influenciada por la interacción entre las condiciones biofísicas y actividades humanas, pendientes pronunciadas, largos períodos de escasez, acumulación de biomasa seca y el uso del fuego en actividades agrícolas contribuyen al inicio y propagación de incendios, aumentando la vulnerabilidad de los bosques relictos. Este fenómeno concuerda con Bowman & Sharples (2023), quienes argumentan que la dinámica de los incendios forestales es resultado de la interacción entre el clima, disponibilidad de combustible y prácticas humanas, siendo estos elementos los principales factores que determinan el régimen del fuego a nivel global.

La zonificación obtenida mostró que las áreas con niveles de riesgo alto y muy alto se encuentran en sectores donde existen remanentes de bosques de Polylepis. Este hallazgo indica que los ecosistemas de mayor valor ecológico presentan mayor exposición al fuego; la fragmentación de la vegetación incrementa su vulnerabilidad a perturbaciones externas. Senf y Seidl (2021) mencionan que la fragmentación de bosques disminuye su resiliencia ecológica, propiciando procesos de degradación que limitan la rehabilitación natural tras incendios de alta intensidad.

La distribución espacial del riesgo también subraya la necesidad de incorporar herramientas geoespaciales en la planificación ambiental. La combinación de variables topográficas, climáticas y de cobertura vegetal permitió identificar áreas prioritarias para la implementación de medidas preventivas, evidenciando la utilidad de los SIG como apoyo en la toma de decisiones. En este contexto, Hislop et al. (2024) enfatizan que el análisis espacial ayuda a identificar áreas críticas y optimiza la efectividad de las estrategias de manejo del fuego, sobre todo en regiones donde la información de campo escasea.

Los resultados muestran que las condiciones climáticas influyen en incidencias de incendios forestales, la reducción de la humedad del suelo y de la vegetación durante la temporada seca incrementa la inflamabilidad de la biomasa vegetal y favorece la propagación del fuego, esto concuerda con investigaciones realizadas por Nolan et al. (2024) revelaron que el incremento de

temperaturas y la intensificación de sequías son algunos de los principales factores que impulsan el aumento de incendios en ecosistemas montañosos, situación que coincide con las condiciones observadas en la provincia de Candarave.

Los hallazgos también demuestran que los incendios forestales representan un riesgo para la provisión de servicios ecosistémicos, según Fernández-García et al. (2023), los incendios recurrentes alteran la estructura y composición de los ecosistemas forestales, disminuyendo su capacidad de almacenamiento de carbono y perjudicando procesos ecológicos esenciales para el funcionamiento de las cuencas hidrográficas, asimismo Baker (2022) sostiene que los incendios frecuentes pueden provocar alteraciones duraderas en la composición de las especies vegetales.

Asimismo, la existencia de focos de calor en zonas cercanas a áreas de pastoreo respalda la idea de que las actividades humanas son responsables de iniciar incendios, debido a que la quema para renovar pastizales es común en estos ecosistemas y, en condiciones climáticas adversas, puede resultar en incendios de gran magnitud. En este sentido, Moreira et al. (2020) indican que más del 90 % de los incendios forestales observados en el mundo tienen un origen relacionado con la actividad humana, lo que sugiere que las estrategias de prevención deben poner énfasis en la educación ambiental, el fortalecimiento de instituciones y la participación de la comunidad.

Desde la perspectiva de la conservación, los hallazgos permiten identificar que los bosques de Polylepis requieren enfoques de manejo diversos debido a su limitado tamaño, alto nivel de endemicidad y su lenta capacidad para regenerarse. La restauración ecológica también genera beneficios sobre la fauna asociada, Giorgis et al. (2021) demostraron que, después de dos décadas de restauración de bosques de Polylepis en Argentina, aumentaron significativamente la diversidad y abundancia de aves características de estos ecosistemas, lo que evidencia que la recuperación de la cobertura forestal favorece la restauración progresiva de la biodiversidad.

La metodología utilizada permitió integrar datos ambientales procedentes de diferentes fuentes oficiales para elaborar un mapa de focos de calor aplicable a la gestión territorial. Sin embargo, la incorporación de imágenes satelitales con mayor frecuencia temporal y modelos predictivos sobre el comportamiento de incendios podría mejorar la exactitud de futuras evaluaciones. Al respecto, Burton et al. (2023) destacan que la combinación de sensores remotos, inteligencia geoespacial y modelos de simulación podría optimizar la gestión preventiva de incendios forestales.

No obstante, los resultados obtenidos deben interpretarse considerando las limitaciones metodológicas del modelo espacial aplicado, la validación del modelo tuvo un alcance limitado, ya que la comparación con los registros históricos de incendios se realizó mediante superposición espacial y revisión de correspondencia geográfica, sin aplicar métricas estadísticas de desempeño ni realizar una validación independiente con datos de campo. Por ello, el mapa obtenido constituye una herramienta de diagnóstico y priorización territorial que permite identificar sectores que requieren mayor atención preventiva, por lo que no debe interpretarse como una predicción determinística de la ocurrencia o propagación del fuego.

Finalmente, la información generada en este estudio sirve como una base técnica para fortalecer la planificación ambiental en la provincia de Candarave, la identificación de zonas prioritarias facilitará la implementación de programas de restauración ecológica, la creación de sistemas de monitoreo continuo y la optimización de la distribución de recursos destinados a la prevención de incendios forestales. En línea con Stephens et al. (2022), la reducción del riesgo de incendios exige un enfoque integral que combine la gestión

ambiental, la conservación de ecosistemas y la participación activa de las comunidades locales, con el objetivo de aumentar la resiliencia del paisaje frente a los impactos del cambio climático.

Conclusiones

La evaluación espacial ha hecho posible identificar que el peligro de incendios forestales en los bosques de Polylepis de la provincia de Candarave es el resultado de la interacción de factores tanto biofísicos como territoriales, que generan una variedad en la distribución del riesgo a lo largo de la provincia.

Los resultados indicaron que los bosques de Polylepis son áreas de especial significado para la gestión de prevención del riesgo de incendios, debido a su importancia ecológica, su dispersión y su capacidad limitada de regeneración. La localización de áreas con riesgos elevados y muy elevados facilita la identificación de lugares clave para intensificar las acciones de prevención, vigilancia y conservación de estos ecosistemas.

La distribución de los bosques de Polylepis presenta diferencias entre los distritos de la provincia de Candarave. De acuerdo con los resultados de superficie reportados, el distrito de Candarave comprende 5 211,05 ha de cobertura de estos bosques, mientras que Camilaca registra 1 899,10 ha, lo que representa una superficie conjunta de 7 110,15 ha en ambos distritos. Estos resultados evidencian la importancia de identificar y evaluar espacialmente dichas formaciones vegetales para orientar acciones de prevención y conservación. No obstante, esta distribución no determina, por sí sola, el nivel de susceptibilidad de cada bosque frente a los incendios forestales.

El análisis espacial de los puntos de calor ha permitido identificar zonas con actividad térmica en la provincia de Candarave, lo cual es información útil para orientar el monitoreo y supervisión de áreas que podrían ser especialmente propensas a incendios forestales. Sin embargo, la existencia de puntos de calor no puede, por sí sola, establecer el origen o la causa de los incendios, por lo que su análisis debe considerarse como un indicador espacial de la probabilidad de ocurrencia, y no como prueba directa de causalidad.

La aplicación de Sistemas de Información Geográfica ha demostrado ser efectiva para combinar datos ambientales, topográficos y territoriales, además de representar las condiciones relacionadas con el riesgo de incendios forestales. La identificación de áreas prioritarias proporciona un fundamento técnico para guiar las acciones de prevención y manejo del fuego, especialmente en regiones donde se alinean las condiciones propicias para incendios con la presencia de bosques de Polylepis.

Los hallazgos resaltan la importancia de aumentar el monitoreo de los bosques de Polylepis utilizando información geoespacial y satelital con mayor resolución temporal. Asimismo, es fundamental incluir en investigaciones futuras factores vinculados a la humedad de la vegetación y modelos predictivos sobre la propagación del fuego. Estas herramientas ayudarían a mejorar la exactitud de las evaluaciones de riesgo y apoyarían una gestión preventiva centrada en la conservación de estos ecosistemas de alta montaña.

Con respecto a la ponderación, el modelo asumió que todas las variables tienen la misma importancia. Debido a que no se utilizaron métodos matemáticos avanzados, no se calculó el peso exacto de cada factor en los incendios de Candarave. En el caso de la incertidumbre de los datos, toda la información proviene de mapas y registros oficiales a gran escala (regional o nacional). Esto genera cierto margen de error al aplicarla a zonas muy específicas y detalladas, como las quebradas donde crecen los bosques de Polylepis.

Agradecimiento

Los autores expresan su agradecimiento a las instituciones y personas que brindaron apoyo logístico y académico durante el desarrollo de la presente investigación, especialmente al Gobierno Regional de Tacna a través de la Gerencia Regional de Recursos Naturales Gestión del Medio Ambiente por las facilidades otorgadas para la recopilación de información.

La presente investigación fue financiada con recursos propios de los autores y no contó con financiamiento externo.

Bibliografía

Baker, W. L. (2022). The landscapes that burn: Fire, climate, and ecosystem resilience. Oxford University Press

Bowman, D. M. J. S., & Sharples, J. J. (2023). Taming the flame, from local to global extreme wildfires. Science, 381(6658), 616–619. https://doi.org/10.1126/science.adi8066

Burton, C., Cattau, M., Dennison, P., & Wimberly, M. (2023). Remote sensing and geospatial technologies for wildfire monitoring and management: Recent advances and future directions. Remote Sensing, 15(8), 2065.

CENEPRED, (2025). Plan Multisectorial ante Incendios Forestales 2025 - 2027. Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres (SIGRID). https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/18524

Cochrane, M. A., & Bowman, D. M. J. S. (2021). Manage fire regimes, not fires. Nature Geoscience, 14(7), 455–457. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00791-4

Doherty, T. S., Macdonald, K. J., Nimmo, D. G., Santos, J. L., & Geary, W. L. (2024). Shifting fire regimes cause continent-wide transformation of threatened species habitat. Proceedings of the National Academy of Sciences, 121(18), e2316417121. https://doi.org/10.1073/pnas.2316417121

Fernández-García, V., Santín, C., & Pereira, P. (2023). Fire impacts on ecosystem services and post-fire recovery: A global review. Science of the Total Environment, 858, 159898.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). The State of the World's Forests 2022: Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies. FAO. https://doi.org/10.4060/cb9360en

Franco-León, P., Navarro Guzmán, M. A., Oyague Passuni, E., Ignacio Apaza, J., & Jove Chipana, C. (2024). Fragmentation, birds, and conservation of the Polylepis Forest in Southern Peru. Cuadernos de Investigación Geográfica, 50(1), 179–199. https://doi.org/10.18172/cig.5823

Giorgis, M., Zevallos, S., Carbone, L., Zimmermann, H., Wehrden, H., Aguilar, R., Ferreras, A., Tecco, P. Kowaljow, E., Barri, F., Gurvich, D., Villagra, P. & Jaureguiberry, P. (2021). A review of fire effects across South American ecosystems: the role of climate and time since fire. Fire Ecology.

Hislop, S., Bradstock, R., Collins, L., Clarke, H., & Resco de Dios, V. (2024). Spatial modelling of wildfire risk to support landscape management. International Journal of Wildland Fire, 33(2), 145–160.

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2025). Compendio Estadístico de la Gestión Reactiva 2015–2025. Ministerio de Defensa. https://geo.indeci.gob.pe/visorindeci/

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

Jones, M. W., Abatzoglou, J. T., Veraverbeke, S., et al. (2022). Global and regional trends and drivers of fire under climate change. Reviews of Geophysics, 60(3), e2020RG000726. https://doi.org/10.1029/2020RG000726

Joseph, L., et al. (2021). Socioeconomic Conditions and Landowners' Perception Affect the Intention to Restore Polylepis Forests in the Central Andes of Peru. Forests, 12(2), 118.

Kelly, L. T., Fletcher, M. S., Oliveras Menor, I., Pellegrini, A. F. A., Pons, P., Williamson, G. J., &

Bowman, D. M. J. S. (2023). Understanding fire regimes for a better Anthropocene. Annual Review of Environment and Resources, 48, 207–235. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120220-055357

Moreira, F., Ascoli, D., Safford, H., Adams, M. A., Moreno, J. M., Pereira, J. M. C., Catry, F. X., Armesto, J., Bond, W., González, M. E., Curt, T., Koutsias, N., McCaw, L., Price, O., Pausas, J. G., Rigolot, E., Stephens, S. L., Van Wilgen, B. W., Xanthopoulos, G., & Fernandes, P. M. (2020). Wildfire management in Mediterranean-type regions: Paradigm change needed. Environmental Research Letters, 15(1), 011001.

Nolan, R. H., Williamson, G. J., Teckentrup, L., Boer, M. M., & Bowman, D. M. J. S. (2024). Pyrogeography in flux: Reorganization of Australian fire regimes in a hotter world. Global Change Biology. https://doi.org/10.1111/gcb.17130

Senf, C., & Seidl, R. (2021). Mapping the forest disturbance regimes of Europe. Nature Sustainability, 4(1), 63–70.

SINIA (2018). Plan de Prevención y Reducción de Riesgos de Incendios Forestales Periodo 2019-2022

Stephens, S. L., Collins, B. M., Biber, E., & Fulé, P. Z. (2022). U.S. federal fire and forest policy: Emphasizing resilience in dry forests. Journal of Forestry, 120(5), 515–526.