



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Análisis de la severidad del incendio forestal suscitado en la Granja
Porcón, a través de imágenes Sentinel - 2 – Periodo 2019 - 2021,
Cajamarca

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniera Ambiental

AUTORA:

Benavides Aguilar, Natali Marimar (ORCID: 0000-0002-7639-462X)

ASESOR:

Dr. Rubén Víctor Munive Cerrón (ORCID: 0000-0001-8951-2499)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y gestión de los recursos naturales

CHICLAYO – PERÚ

2021

Dedicatoria

A Dios, por darme salud, guardarme y bendecirme en todo momento para así poder terminar mi meta trazada.

A mis padres, Lucy y Esteban por el amor y apoyo incondicional, por siempre impulsarme a ser mejor y lograr con éxito mi carrera.

A mí amado hijo Eliezer por ser mi fuente de motivación para poder superarme día a día para un futuro mejor.

A mi esposo Alberto por todo el apoyo en los proyectos trazados.

A todas las personas que hicieron posible este trabajo.

Natali Marimar

Agradecimiento

A mi asesor el Dr. Rubén Víctor Munive Cerrón, por guiarnos en el proceso de las diferentes etapas del presente estudio.

A la Universidad César Vallejo, por refugiarnos y por ofrecernos los conocimientos imprescindibles para formarnos como Ingenieros Ambientales.

Natali Marimar

Índice de contenidos

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	3
III. METODOLOGÍA	14
3.1. Tipo y diseño de investigación	14
3.2. Variables y operacionalización	14
3.3. Población, muestra y muestreo	15
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	15
3.5. Procedimientos	16
3.6. Método de análisis de datos.....	19
3.7. Aspectos éticos	20
IV. RESULTADOS.....	21
V. DISCUSIÓN.....	31
VI. CONCLUSIONES.....	35
VII. RECOMENDACIONES	36
REFERENCIAS.....	37
ANEXOS	48

Índice de tablas

Tabla 1. Rangos del índice espectral NDVI	12
Tabla 2. Rangos del índice espectral SAVI.....	13
Tabla 3. Rangos del índice espectral NBR	13
Tabla 4. Caracterización de la cobertura terrestre de los años 2019 – 2021 en la Granja Porcón	22
Tabla 5. Cuantificación del índice NBR de los años 2019– 2021 en la Granja Porcón	24
Tabla 6. Cuantificación del índice NDVI de los años 2019 – 2021 en la Granja Porcón.....	26
Tabla 7. Cuantificación del índice SAVI de los años 2019 – 2021 en la Granja Porcón.....	28
Tabla 8. Precisión de los índices espectrales	29

Índice de figuras

<i>Figura 1.</i> Fórmula del NBR.....	17
<i>Figura 2.</i> Fórmula del NDVI.....	17
<i>Figura 3.</i> Fórmula del SAVI	18
<i>Figura 4.</i> Diagrama de flujo del procedimiento metodológico.....	19
<i>Figura 5.</i> Caracterización del área de estudio antes y después del incendio.....	21
<i>Figura 6.</i> Índice normalizado de área quemada (NBR) para los años 2019 y 2021 en la Granja Porcón	23
<i>Figura 7.</i> Índice normalizado de vegetación diferenciada (NDVI) para los años 2019 y 2021 en la Granja Porcón.....	25
<i>Figura 8.</i> Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) para los años 2019 y 2021 en la Granja Porcón	27
<i>Figura 9.</i> Promedio mensual de precipitación en el periodo 2019 – 2021	30

Resumen

La presente investigación se realizó en la Granja Porcón, con el objetivo de evaluar mediante imágenes Sentinel – 2 la severidad del incendio forestal suscitado en la Granja Porcón, en el Periodo 2019 – 2021, Cajamarca. Para lo cual se descargó y procesó imágenes satelitales en el software QGIS 3.10, con la finalidad de caracterizar las zonas forestales y calcular los índices espectrales: Índice Normalizado de Área quemada (NBR), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). La investigación fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, diseño no experimental transversal descriptivo. La población estuvo conformada por el área geográfica del distrito de Cajamarca, como muestra se tomó el área geográfica de la Granja Porcón, la cual abarca doce mil hectáreas aproximadamente. Obteniéndose como resultado tres clases de zonas forestales: zona de bosque, zona agrícola y zona sin vegetación, evidenciándose una expansión en el área de las dos primeras zonas, a causa de actividades antrópicas entre los años 2019 y 2021. Se concluye que el índice espectral NBR fue el que permitió identificar con mayor precisión el área siniestrada por el incendio forestal en la Granja Porcón.

Palabras clave: Imagen satelital, severidad de incendio forestal, NBR, NDVI, SAVI.

Abstract

This present research was realized at the Porcón farm, with the objective of evaluating through Sentinel 2 pictures- the severity of the forest fire arose at the Porcón farm, in the Period 2019-2020, Cajamarca. For which satellite images were downloaded and processed in the QGIS 3.10 software, in order to characterize forest areas and calculate spectral indexes: Normalized Burn Ratio (NBR), Normalized Difference Moisture Index (NDVI) and Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI). The research was applied type with the quantitative approach, descriptive non-experimental cross-sectional design. The population was composed by geographic area of Cajamarca district; the Porcón farm geographic area took as sample which it contains around 12,000 hectares. Resulting three types of forested areas: forest zones, agricultural area and area without vegetation, evidencing an expansion in the area of the first two zones, because the anthropic activities between the years 2019 and 2021. It concludes that the NBR spectral index it was the one that allowed identifying with greater precision in the affected area by the forest fire at the Porcón farm.

Keywords: satellite image, severity of the forest fire, NBR, NDVI, SAVI

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se vive un problema grande en relación a los incendios y su impacto en el ambiente, esto se agravó durante el 2019, año en el que se registró la tasa más elevada de incendios forestales (Urquijo, 2020, p. 1). La cobertura vegetal y la biodiversidad que alberga el Perú tienen como amenaza permanente a los incendios forestales, los cuales tienen una recurrencia cada vez mayor en el territorio peruano y han ido ocasionando efectos adversos en los diferentes ecosistemas del país. De acuerdo con el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) los incendios han ocasionado la afectación de 198 000 hectáreas de bosque solo en el 2019.

Muchos de los incendios producidos en los últimos tiempos en nuestro país son antrópicos, ya que por las variaciones climáticas que se venían suscitando, la creencia de muchos agricultores es quemar pastizales para así atraer a la lluvia, mito antiguo que es parte de sus creencias tradicionales. Desconociendo así el gran impacto que causan no solo a sus suelos, si no a la población en general; recordando que estos impactos alteran la continuidad de los ciclos biogeoquímicos que son necesarios para la vida.

Dado el caso en la Granja Porcón, en el mes de septiembre del año 2019, se produjo un incendio forestal, el cual devoró más de 150 hectáreas de pastizal y plantaciones de pinos, llevando a la degradación de los bosques, suelos, pérdida de flora y fauna; con efectos destructivos a nivel socioeconómico y ambiental. Cabe mencionar que esta zona, es una granja donde se practica la conservación y cuidado de la diversidad biológica y cultural, contribuyendo de esta forma con el desarrollo de la población y con el cuidado de nuestro ambiente.

Estas áreas impactadas necesitan ser identificadas y remediadas, oportunamente. Es por ello que este escenario nos lleva a plantear el tema a investigar ¿Cuál es la severidad del incendio en la zona forestal de la Granja Porcón en el periodo 2019 - 2021 medido con imágenes Sentinel - 2? y como problemas específicos: ¿Cuáles son los cambios en las zonas forestales en la Granja Porcón en el periodo 2019 – 2021 medido con imágenes Sentinel - 2?, ¿Que índices espectrales permiten evaluar la severidad del incendio forestal en la Granja Porcón periodo 2019 – 2021?

y ¿Cuál índice espectral es más efectivo para evaluar el incendio de la zona forestal de la Granja Porcón en el periodo 2019 – 2021?

Desde el ámbito ambiental, esta investigación buscó analizar la severidad del incendio forestal ocasionado en la Granja Porcón mediante el uso de los fundamentos de la teledetección, además, se descargó y procesó imágenes satelitales Sentinel - 2 con la finalidad de conocer el impacto forestal suscitado en la localidad en mención, esto tendrá como beneficio la identificación de zonas impactadas y por ende zonas que necesitan intervención, con el fin de proteger el ambiente y mejorar la calidad de vida.

Así mismo, desde el ámbito social, este estudio beneficiará en primera instancia a la población de la Granja Porcón y zonas aledañas, ya que, esta indagación puede ser la base para desarrollar proyectos de restauración ecológica, con el fin de mejorar el ecosistema involucrado. Por otra parte, desde el ámbito económico la investigación permitió conocer el estado actual de la cobertura terrestre mediante el procesamiento y análisis de imágenes satelitales. Además, pretende promover la utilización de los recursos forestales maderables y no maderables, contribuyendo así al progreso de la población y al desarrollo sostenible.

La investigación tuvo como **objetivo general**: Evaluar mediante imágenes Sentinel - 2 la severidad del incendio forestal suscitado en la Granja Porcón, en el Periodo 2019 – 2021, Cajamarca. Trazándose los siguientes **objetivos específicos**: Caracterizar las zonas forestales en la Granja Porcón mediante imágenes Sentinel - 2, para el período 2019 – 2021, Identificar las zonas impactadas por el incendio forestal en la Granja Porcón mediante imágenes Sentinel - 2 para el periodo 2019 – 2021 y Determinar el índice de clasificación de incendios adecuado para la zona forestal en la Granja Porcón, mediante imágenes Sentinel - 2 para el período 2019 – 2021.

La hipótesis de estudio fue: A través de las imágenes Sentinel - 2 se logró analizar la severidad del incendio forestal suscitado en la Granja Porcón y la H0: A través de las imágenes Sentinel - 2 no se logró analizar la severidad del incendio forestal suscitado en la Granja Porcón.

II. MARCO TEÓRICO

Para los antecedentes de la presente indagación se alineó las investigaciones que están vinculadas con la variable de estudio severidad del incendio forestal.

Se estableció una relación entre el estudio presentado y los antecedentes nacionales entre los que destaca, Loayza (2020), en su investigación procesó imágenes satelitales haciendo uso de técnicas de teledetección, para identificar los fenómenos que se suscitan en la tierra. Como objetivo tuvo estudiar la vegetación y sus cambios en la Estación Biológica Villa Carmen, Cusco. Consistió en el desarrollo de la diligencia de técnicas digitales y visuales de imágenes satelitales Worldview-3 y C-bers 2, las que fueron sometidas a corrección geométrica y algoritmos de sistematización, se complementó con trabajo de campo, lo que permitió conocer qué actividades afectan el cambio de la vegetación en una proyección al 2050.

A su vez, Jiménez y García (2020), en su indagación mencionaron haber descargado imágenes SENTINEL – 2 del sensor MSI, de septiembre del año 2017 y noviembre del año 2019. Se procesó las imágenes satelitales haciendo uso del software QGIS 3.6, donde se consiguió los índices espectrales NDVI, SAVI y NBRI, se generó las tendencias de reverberación de la cobertura vegetal del área afectada con datos mensuales.

Además, se analizó el registro de precipitaciones meteorológicas de Chulucanas, con el fin de darle relación con el estado de la cobertura vegetal. Se consideraron zonas a muestrear de 0.5 ha en una y otros puntos para determinar la constitución de la flora en múltiples escenas. Se encontró semejanza de la cobertura vegetal en 2 años. La flora de la zona impactada por el incendio forestal y su composición muestra semejanza con el área testigo en abundancia, estos resultados indican que hay una semejanza en ambos tiempos de estudio.

Por su parte, en el plano de los antecedentes internacionales, Rosero (2021), en su investigación realizó un análisis multitemporal y empleó la teledetección para obtener evidencias sobre los cambios que ocurren en el suelo, su uso y la vegetación presente, sabiendo cual fue la resiliencia del ambiente y la del hombre.

Se utilizaron técnicas de análisis espacial a imágenes satelitales provenientes de los sensores Landsat TM (1991), Aster L1T (2001) y Sentinel - 2B (2017) en 3 fechas diferentes; se clasificaron, supervisaron y finalmente se obtuvieron firmas espectrales entre ellas vegetación abundante y biomásas. Lo que indica un cambio de uso del suelo y vegetación, producto de la ganadería y la agricultura en el año 2017, además, del aumento de la población urbana. Por lo tanto, la tasa de deforestación estimada es de 0,63 % aproximadamente, equivalente a 300 ha anualmente, lo cual está evidenciado en el mapa, donde se señala que continuaría así hasta el año 2050 y por derivación la desintegración de ecosistemas naturales, si no se toma medidas correspondientes.

Así mismo, Moraes *et al.* (2021), monitorearon y evaluaron la dinámica espacio temporal de la vegetación en un bioma exclusivo de Brasil, a través, de la teledetección. La investigación se desarrolló utilizando imágenes del satélite Landsat – 8, entre los años 2013 – 2018, por medio del algoritmo SEBAL se elaboraron mapas temáticos, para calcular índices espectrales, entre los que tenemos índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) e índice de área foliar (LAI). Los resultados señalaron que en la temporada seca se producirá mayor degradación del ambiente.

Además, Li, Liu y Xinxin (2021), utilizaron la teledetección para evaluar el nivel de deforestación bajo diferentes condiciones de riego, para ello descargaron y procesaron imágenes satelitales, mediante diferentes índices en relación a los parámetros ambientales. Los resultados indicaron la factibilidad del uso de un algoritmo, para analizar e interpretar los efectos de la desertificación.

Por otro lado, Niño (2020), en su estudio llevó a cabo el análisis multitemporal de las coberturas y usos del suelo del municipio de San Francisco de Sales, del departamento de Cundinamarca en Colombia, utilizando imágenes de satélite Landsat 4 TM y Sentinel – 2 MSI de los años 1988 y 2018 correspondientemente. Se identificaron cambios de las coberturas terrestres a escala 1:100 000, en dos épocas, a través del uso de la clasificación supervisada y la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia (CLC). Además, se hizo la confirmación de los resultados obtenidos a través del cálculo de la matriz de error, la cual compara

resultados de la clasificación frente a áreas verdes y ofrece el nivel de convicción que se tiene en relación a la clasificación realizada.

Análogamente, Delegido *et al.* (2018), estimaron la severidad de incendios forestales en una provincia del sur de Argentina, en la zona mencionada predominan los arbustales xerófilos y pastizales. Se visitó el área afectada por el incendio, se georreferenció las zonas incendiadas y se categorizó la severidad del fuego. El objetivo de este trabajo fue evaluar el impacto de los incendios forestales en el ambiente a partir de imágenes Sentinel-2 y Landsat-8 antes y después del evento. Los resultados evidenciaron que las imágenes de ambos satélites, son útiles para estimar la recuperación de la cobertura vegetal y la seriedad del incendio.

De igual forma, Medrano (2017), en su estudio ejecutó el análisis multitemporal de los suelos y sus cambios en la parte sur del cantón Samborondón, para ello se generó mapas, indicando la transición a la cual ha sido expuesta la ciudad en los últimos 17 años. Para generar los mapas se procedió con la categorización de las imágenes: agropecuaria, suelo desnudo, vegetación y urbanización. Los resultados obtenidos demostraron que las zonas urbanas pasaron del 21 % de has en el año 2000, mientras que en el 2017 se incrementa al 59,12 %. Por el contrario, la cobertura vegetal desciende considerablemente pasando de un 11,04 % (2000) al 2,93% de has en el año 2017.

Del mismo modo, Guerrero, Pineda, Palá y Corbera (2017), analizaron la severidad del incendio forestal producido en la comunidad Macizo de Bonastre en el año 2016. En este estudio se examinó la severidad del área quemada. Se consideró un punto de partida para la evaluación y monitoreo de dinámicas de recuperación de la extensión quemada. Se obtuvo el índice dNBR (Delta Normalized Burn Ratio) a partir de imágenes satelitales SENTINEL – 2, con la intención de comparar los resultados obtenidos con el trabajo de campo.

De igual manera, Vidal, De Santis, Pérez y Honeyman (2017), utilizaron la teledetección para analizar la severidad y estimación de gases de efecto invernadero, en incendios forestales suscitados en un bosque nativo. El objetivo de esta investigación fue analizar la intensidad del incendio y estimar la emisión de

gases de efecto invernadero, a partir, de imágenes satelitales Landsat 5 TM y 7 ETM+. Los resultados señalaron que 16.783 ha fueron degradadas con un determinado grado de severidad y se estimó que el dióxido de carbono, fue el principal GEI emitido durante el suceso.

De forma semejante, Ariza (2017), analizó en su indagación las alteraciones en el paisaje provocadas por incendios forestales, haciendo uso de técnicas de teledetección, se trabajó con imágenes Landsat TM, ETM+ y OLI, con la finalidad de examinar los patrones espacio temporales originados por la severidad del incendio. Se analizó la sensibilidad espectral mediante el índice normalizado de vegetación NDVI, el índice normalizado de área quemada NBR, sus versiones diferenciadas o temporales dNDVI y dNBR, el índice relativizado de área quemada RdNBR y su versión modificada RBR, con la intención de obtener cartografía de severidad.

Diversos análisis han sido practicados para establecer la severidad de los incendios en bosques naturales mediante teledetección, siendo usados índices tales como EGI, NDVI o NDRE. Carvajal *et al.* (2019), por ejemplo, demuestra que el NDVI muestra una mayor estimación para severidad de incendios, a diferencia de Tran *et al.* (2018) que yendo más allá establece que los bosques abiertos y arbolados rebrotadores tienen mayor relación con el NBR, teniendo el NDVI mayor relación con los bosques abiertos con respuestas mixtas (rebrotos y sembrados), además determina que los bosques cerrados se estiman mejor con el NDWI. Mckenna *et al.* (2017) mencionan que el índice EGI es capaz de discriminar las áreas quemadas de elevada gravedad, baja gravedad y no quemadas con precisión mayor al 50%.

Adicionalmente, Lydersen *et al.* (2016) mencionan que el NBR brinda una mejor representación del cambio estructural en bosques de coníferas después de un incendio de elevada severidad. Gerrevink y Veraverbeke (2021), también mencionan que índice NBR cumple un mejor desempeño de correlación que el NDVI, sin embargo, menciona que el NDVI es más útil en zonas de largas extensiones.

Por su parte, Papiá, Buddhika, y Yijun (2018), obtienen desempeños aún mayores con los índices dNBR y RdNBR. No obstante, el NBR se vuelve poco preciso

cuando se debe evaluar gramíneas debido a que la banda SWIR se ve influenciada mayormente por arbustos. Chen, Lara y Sheng (2020), sostienen que los valores de NBR van a depender de las fechas de adquisición de imágenes, pues según Chen, Loboda y Hall (2020), el valor de NBR aumenta en 0.1 cuando solo hay una diferencia de 1 año entre las imágenes.

Otros autores como, Parks *et al.* (2019), mencionan que los índices espectrales a pesar de tener una relación fuerte con la gravedad del incendio, no presentan unidades estandarizadas, lo que los hace de difícil interpretación.

Shvetsov *et al.* (2019), menciona que los factores de mayor influencia en la recuperación del incendio son las frecuencias de los incendios, la severidad del incendio y las anomalías de la temperatura, además, precisa que los suelos con quemaduras más graves tienen tasas de recuperación más elevadas. Por su parte, Meng *et al.* (2018), afirman que los pinos presentan mayor resistencia y elevada recuperación después de un incendio, en comparación con los robles, lo cual, es similar al estudio de Viedma *et al.* (2020), quien menciona que la menor severidad de incendio ocurre en especies madura de Pinos y la mayor severidad en bosques heterogéneos.

La recuperación de la vegetación después de un incendio depende tanto del tipo de bosque como del tiempo, tal como menciona Fernández *et al.* (2018), quien determina que la recuperación del verdor a corto plazo (2 años) se debe a la recurrencia e intervalo de retorno del incendio, a diferencia de Viana, Aguado y Martínez (2017), quienes mencionan que la regeneración vegetal se prolonga a corto plazo (5 años) mientras mayor es la severidad del incendio. Por su parte, Mathews y Kinoshita (2021), determinaron que la vegetación nativa tiende a tener una afectación mayor por el incendio, además, de una menor tasa de recuperación, siendo en varios casos sustituidas por vegetación no nativa de rápido crecimiento, esto se relaciona con el estudio de Christopoulou *et al.* (2019), quienes aseguran que posterior al incendio la mayoría de rodales se convierten en pastizales y matorrales, siendo solo la especie *Pinus nigra* quien se regenera a su cobertura anterior al incendio.

Chu, Guo y Takeda (2016), hacen referencia a que el dosel de bosques de alerces

se recupera a su condición previa al incendio solo después de 30 años mientras que otras especies arbustivas, pastizales, árboles intolerantes a la sombra se recuperan luego de 5 a 6 años, para este mismo periodo de estudio un método factible y preciso de medir la recuperación progresiva de las áreas quemadas, es el índice NDVI y SAVI (Tonbul, Kavzoglu y Kaya, 2016).

Los factores atmosféricos como la precipitación y la temperatura superficial también influyen en la recuperación de las zonas vegetales posterior a un incendio Adagbasa, Adelabu y Okello (2020), pero a la vez influyen en el verdor de la vegetación anterior al incendio que según, García *et al.* (2019), es el factor más afectado después de los incendios. Adicionalmente, García *et al.* 2020, menciona que en algunas zonas el factor climático condiciona más la severidad del incendio que el factor topográfico.

De la misma forma, Jae-Hyun *et al.*, (2018), mencionan que la humedad superficial se recupera al estado natural, en la mitad de tiempo que la salud de la vegetación y, Méndez y Núñez (2021), que la evapotranspiración presenta altos grados de correlación con la severidad del incendio, no obstante, diversos autores mencionan que la severidad del fuego se ve influenciada por la pendiente del terreno Ndalia, Williamson y Bowman (2018); Sobrino *et al.* (2019); Mathews y Kinoshita (2021).

Existen diversos sensores remotos con los cuales se realiza el estudio de la severidad del fuego, sin embargo, existe diferencia entre la resolución de captura de imagen, Edwards, Russel y Maier (2018), mencionan mayor confiabilidad en el mapeo con imágenes Landsat para zonas de sabana.

Por el contrario, otros autores encontraron mayor precisión en el mapeo de incendio con Sentinel - 2A. Mallinis, Mitsopoulos y Chryafi (2017); Montorio *et al.* (2020); Sobrino *et al.* (2019). Sin embargo, las imágenes ópticas no siempre son precisas ya que muchas veces la nubosidad no permite determinar la severidad de los incendios, es ahí, donde las imágenes de radar cumplen una función importante para la medición de severidad de incendios, dando resultados con mayor confiabilidad (Addison y Oommen, 2018). No obstante, García *et al.* (2019), nos dicen que las correlaciones de las imágenes satelitales siempre serán mayores mientras se tenga incorporada la banda SWIR.

En otras ocasiones se ha visto viable la combinación de la toma de imágenes satelitales con detección LiDAR, permitiendo evaluar el grado de combustión de los árboles y obteniendo información más relevante sobre los procesos ecológicos (Viedma, Almeida y Moreno, 2020, p. 1).

Debido al no control que se tiene sobre los incendios forestales, se han venido implementando nuevos tratamientos de conservación y resistencia ante incendios tal es el caso de SPLAT que ha conseguido reducir a más de la mitad la afectación de un área quemada (Tubbesing *et al.*, 2019, p. 1). Yendo más allá, Bartalev *et al.* (2017), informan de la necesidad de desarrollar técnicas que permitan determinar la muerte de los árboles posterior a suscitado los incendios.

La severidad del fuego, se refiere al grado de cambios ecológicos provocados por los incendios en el medio, siendo este un factor clave para estimar el impacto del fuego en el paisaje, la evaluación de la severidad del fuego se puede medir por índice capaz de estimar múltiples valores de gravedad en la capa de la vegetación (Montorio, Pérez, García, Vlassova y De la Riva, 2014, p. 428).

Los incendios forestales, se conocen como incendios que afectan los bosques, las selvas y la vegetación de los bosques, zonas áridas o semiáridas, preferentemente zonas boscosas, ya sea por motivos naturales o inducidos, con ocurrencia incontrolada y diseminación o reserva. Los incendios forestales pueden ocurrir desde la superficie inicial hasta miles de hectáreas, provocando diversos efectos en el suelo, la flora, la fauna, como el agua disponible en el subsuelo, capturan carbono, emisiones de oxígeno. A escala global, provocan el cambio climático a través de emisiones a la atmósfera (Mejía, 2017, p. 15).

Es el fuego sin control en un espacio natural que podrían ser, bosques, pastizales, matorrales, praderas. Casi siempre su inicio es inadvertido. Su propagación es inmediata y tiene como consecuencia daños en recursos naturales, destruir viviendas presentes y es una amenaza para los habitantes aledaños y el cuerpo de bomberos (Biblioteca Nacional de Medicina de los EE. UU., 2020, p. 1).

El impacto, se designa este término al choque entre dos cuerpos. También es utilizado en temas ecológicos, como definición a consecuencia del cambio climático

y contaminación del ambiente, temas económicos, sociales y políticos (Minam, 2012, p. 80).

Impacto ambiental, es el cambio positivo o negativo de los componentes ambientales; a causa de la acción antrópica y natural (Minam, 2012, p. 80).

Las imágenes Sentinel - 2, los satélites gemelos iniciaron su funcionamiento completo en el 2017, y ahora brindan datos satelitales con una resolución de 10 a 60 m, con una capacidad de resolución temporal de 5 días, estas imágenes son proporcionadas por un satélite en el que se observan los cambios que suceden en la tierra. Cuentan con un scanner multiespectral que facilita la obtención de imágenes en las dos longitudes de onda, visibles e infrarrojos. Estas permiten monitorear los cambios suscitados en la vegetación terrestre (Zhanzhang, 2019, p. 4).

La teledetección, es una tecnología que permite obtener imágenes e información de la superficie de la tierra, a partir, de sensores instalados en plataformas espaciales. Los sensores son instrumentos que pueden detectar señales electromagnéticas (radiación reflejada o emitida) que les llegan desde la tierra y la atmósfera y convertirlas en cantidades físicas que pueden procesarse y registrarse. El sensor convierte la señal electromagnética en un formato analógico (imagen) o digital. La señal captada por el sensor se amplifica, cuantifica y registra, pudiendo transmitirse directamente a tierra mientras se adquiere o almacena en el satélite esperando que pase por la estación receptora (Sabuco, 2013, p. 4).

El uso de la teledetección en incendios forestales, ha abierto nuevas posibilidades para la detección temprana, un mejor control y gestión de los incendios provocados en el medio forestal. Esto es difícil y complicado con los métodos tradicionales, aunque la observación sobre el terreno siempre será una parte importante de la gestión de incendios.

La zona en cuestión es demasiado grande o está ubicada en un área de difícil acceso, lo que a menudo significa que solo la observación in situ no puede proporcionar información lo suficientemente precisa y regular como para proporcionar una base confiable. Por lo tanto, los datos satelitales se utilizan

ampliamente para la investigación de incendios, porque brindan información sobre la cobertura geográfica y la frecuencia de los incendios (Sabuco, 2013, p. 5).

Índice de vegetación, principalmente son utilizados para la observación e identificar variables físicas y bioquímicas de la clorofila del dosel, basándose en dos principios, siendo la clorofila un absorbente de las bandas rojas y una gran parte del azul, existiendo una alta reflectancia en la banda infrarrojo cercana y verde (Zhanzhang, 2019, p. 3).

La firma espectral de la vegetación sana muestra un contraste en la banda roja e infrarrojo cercano. Mientras en la región visible los pigmentos de las hojas absorben la mayor parte de la luz en el infrarrojo cercano, estas sustancias son transparentes, por esta razón, la vegetación sana tiene baja reflectividad en la banda roja y alta en el infrarrojo cercano (Chuvieco, 1991, como se citó en Bravo, 2017, p. 32).

El NDVI, es un indicador numérico de la diferencia entre la máxima absorción de radiación en rojo por los pigmentos clorofílicos y la máxima reflexión en infrarrojo próximo debido a la estructura de la hoja y el suelo, la variación del rango es de -1 y +1, solo los valores positivos corresponden a zona de vegetación y los valores negativos pertenece a nubes, agua, nieve, roca y suelo desnudo. Los valores del NDVI, varían según el uso del suelo, ambientes climáticos de la zona, estación fenológica e hidrología (Max Polyakov 2021, p. 2). El NDVI se calcula de acuerdo con la fórmula $(NIR-RED) / (NIR+RED)$ donde NIR representa la banda infrarrojo cercano y RED a la banda rojo del espectro.

Se puede decir que el NDVI sirve para medir el estado de salud de las plantas. La clorofila siendo un indicador de salud absorbe fuertemente la luz visible y la carcasa de las hojas refleja fuertemente la luz infrarroja, mostrándose en como la planta refleja la luz a ciertas frecuencias (algunas ondas se absorben y otras se reflejan) (Polyakov, 2021, p. 8).

Tabla 1. Rangos del índice espectral NDVI

Actividad fotosintética	Rango NDVI
Nula	< 0
Muy baja	0 – 0.1
Baja	0.1 – 0.3
Media	0.3 – 0.5
Media – alta	0.5 – 0.6
Alta	0.6 – 0.8
Muy alta	> 0.8

Fuente: Elaboración propia

Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), en los diferentes índices de vegetación se han desarrollado la combinación de bandas espectrales siendo las más comunes a utilizar el rojo e infrarrojo cercano. En lugares donde se encuentran variaciones del brillo de suelo ya sea por, rugosidad, humedad, sombra y materia orgánica.

Este índice ha sido diseñado principalmente para detectar zonas semi áridas, referidas aquellas zonas las cual la precipitación no alcanza cubrir las necesidades de crecimiento de la vegetación, permite diferenciar entre suelo y vegetación, con el resultado del índice se va a poder visualizar una correcta simbología y clasificación entre lo que es vegetación y suelo, por último, nos ayuda a la toma de decisiones para aplicar procesos de regeneración de suelos, así, evitar la probabilidad de problemas de desertificación o erosión del mismo.

Tabla 2. Rangos del índice espectral SAVI

Clases	Rango SAVI
Agua	< 0
Suelo expuesto	0.001 – 0.226
Vegetación poco densa	0.227 – 0.341
Vegetación medio densa	0.342 – 0.405
Vegetación muy densa	0.406

Fuente: Elaboración propia

El índice de áreas quemadas NBRI son relacionadas por la banda infrarroja próxima y la banda infrarroja corta, es por ello que es positivo en zonas de alta actividad fotosintética y negativo en zonas sin vegetación. (Key and Benson, 2006; como se citó en Montealegre, Lamelas, Tanase, y De la Riva, 2017, p. 13).

El NBR relaciona la banda infrarroja próxima y la banda infrarroja corta, es por ello que es positivo en zonas de alta actividad fotosintética y negativo en zonas sin vegetación.

Tabla 3. Rangos del índice espectral NBR

Nivel	Rango NBR
Alta severidad	< - 0.25
Baja severidad	- 0.25 a - 0.1
Zona estable sin quemar	- 0.1 a 0.1
Baja regeneración	0.1 a 0.27
Media regeneración	0.27 a 0.44
Alta generación	0.44 a 0.66
Muy alta regeneración	> 0.66

Fuente: Elaboración propia

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

Tipo

Esta investigación fue de tipo aplicada y estuvo dirigida a determinar a través del conocimiento científico, los medios (metodologías, protocolos y tecnologías) por los cuales se puede cubrir una necesidad reconocida y específica (CONCYTEC, 2018, p. 2).

El enfoque de esta investigación fue cuantitativo, se utilizó la estadística descriptiva para el análisis de los datos recogidos (Sánchez, 2019, p. 104).

Diseño

Este estudio se realizó sin la manipulación deliberada de variables, por el contrario, solo se observó el fenómeno en su ambiente natural para analizarlo (Hernández y Mendoza, 2018, p. 174).

Esta investigación fue transversal descriptiva, ya que se indagó el estado de la variable de estudio en un tiempo único (Hernández y Mendoza, 2018, p. 177).

3.2. Variables y operacionalización

Univariable: Severidad del incendio forestal, sirve para evaluar la resiliencia y adaptación de la cobertura terrestre. Para dicho análisis se puede usar índices vegetales como NBR, NDVI y SAVI, además se puede identificar las variaciones suscitadas en el área, a través, del cálculo de la expansión de las coberturas terrestres.

La operacionalización de variable, tiene por finalidad mostrar las dimensiones e indicadores necesarios para el desarrollo de la investigación, está se presenta en el Anexo 01.

3.3. Población, muestra y muestreo

Población: La población estuvo conformada por el área geográfica del distrito de Cajamarca, Provincia Cajamarca, tiene como criterio de inclusión toda el área geográfica ubicada dentro de la Granja Porcón y como criterios de exclusión el área geográfica ubicada fuera de la Granja Porcón.

Muestra: Área geográfica de la Granja Porcón, esta cuenta con una extensión de 12 mil ha.

Muestreo: El muestreo fue de tipo no probabilístico, ya que, fue elegido a criterio del investigador, por lo cual fue necesario identificar con suma claridad la zona siniestrada por el evento meteorológico suscitado en la Granja Porcón.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnicas

Esta investigación estuvo basada únicamente en el trabajo de gabinete, para ello se empleó las siguientes técnicas: **Observación Indirecta**, se utilizó esta técnica con el objetivo de recolectar información y obtener un diagnóstico del lugar donde se desarrolló la investigación. **Investigación bibliográfica**, se consultó información de revistas científicas y repositorios institucionales para consolidar esta investigación y por último se utilizó la **teledetección**, para calcular los índices espectrales NBR, NDVI y SAVI.

Instrumentos

Se realizó un **informe de ensayo**, en el que se determinó la severidad del incendio forestal suscitado en la Granja Porcón, por lo cual se calculó los siguientes índices NBR, NDVI y SAVI de las imágenes satelitales Sentinel - 2 del año 2019 y 2021. El instrumento usado en el estudio se puede divisar en el anexo 02.

3.5. Procedimientos

3.5.1. Primera etapa: Obtención de datos

Los datos necesarios para el desarrollo de la presente investigación fueron obtenidos a partir de fuentes secundarias debidamente acreditadas como las imágenes satelitales Sentinel – 2, de la plataforma Earth Explorer.

Para empezar, se ingresó a la plataforma Earth Explorer, se cargó el polígono de la Granja Porcón, para descargar imágenes satelitales de la zona en estudio de los años 2019 y 2021, se seleccionó imágenes satelitales del satélite Sentinel – 2 con resolución de 10 metros, las cuales fueron seleccionadas con un porcentaje de nubosidad \leq al 20 %.

3.5.2. Segunda etapa: Procesamiento de imágenes satelitales

Se cargó las imágenes satelitales en el software QGIS 3.10, para realizar la corrección atmosférica con el método de Chávez, seguido, se proyectó las imágenes satelitales a un sistema de coordenadas UTM zona 17 sur, para posteriormente realizar la combinación y composición de bandas.

Luego se realizó una clasificación supervisada del área de estudio con el fin de evaluar las variaciones en la extensión de las categorías de cobertura terrestre consideradas, las cuales fueron zona sin vegetación, zona de bosques y zona agrícola. Posteriormente se procedió a obtener los índices de vegetación NBR, SAVI y NDVI, de acuerdo, a los siguientes rangos y clasificaciones.

Obtención del NBR

Para determinar el área siniestrada por el incendio forestal, se halló el NBR, este índice combina las bandas del infrarrojo cercano y onda corta, para identificar extensiones afectadas por incendios forestales, para ello se utilizó la calculadora ráster del software QGIS 3.10, donde se empleó la siguiente fórmula:

$$NBR = \frac{(Banda\ 8 - Banda\ 12)}{(Banda\ 8 + Banda\ 12)}$$

Figura 1. Fórmula del NBR

Fuente: Elaboración propia

En la figura 2 se muestra la fórmula usada para hallar el NBR, en el software QGIS 3.10, haciendo uso de la herramienta calculadora ráster.

El índice NBR fue representado mediante, (<-0.25) alta severidad (-0.25 a -0.1) baja severidad, (-0.1 a 0.1) zona estable sin quemar, (0.1 a 0.27), baja regeneración, (0.27 a 0.44), media regeneración, (0.44 a 0.66), alta generación (> 0.66) muy alta regeneración.

Obtención del NDVI

Índice de vegetación de diferencia normalizada Utilizando las imágenes satelitales previamente pre procesadas, se procedió a realizar el procesamiento respectivo, para determinar el índice espectral NDVI, por medio del software QGIS 3.10, haciendo uso de la herramienta calculadora ráster. Para ello se cargaron las imágenes de las bandas 8 (visible e infrarrojo cercano) y 4 (rojo), así mismo se utilizó la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{(Banda\ 8 - Banda\ 4)}{(Banda\ 8 + Banda\ 4)}$$

Figura 2. Fórmula del NDVI

Fuente: Elaboración propia

En la figura 2 se observa la fórmula utilizada para obtener el NDVI, en el software QGIS 3.10, donde se utilizó la calculadora ráster.

Así mismo el NDVI tomo valores de, (< 0) sin actividad fotosintética (AF), (0 – 0.1) muy baja AF, (0.1 a 0.3) baja AF, (0.3 – 0.5) media AF, (0.5 – 0.6) media-alta AF, (0.6 – 0.8) alta AF, (> 0.8) muy alta AF.

Obtención del SAVI

Mediante el software QGIS 3.10 se obtuvo este índice, para ello se utilizó la calculadora ráster, donde se ingresó la siguiente fórmula:

$$SAVI = \frac{(Banda\ 8 - Banda\ 4)}{(Banda\ 8 + Banda\ 4 + L)} * (1 + L)$$

Figura 3. Fórmula del SAVI

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3 podemos observar la fórmula utilizada para calcular el SAVI, donde L es un parámetro que ajusta la línea entre vegetación y suelo.

Por su parte, el índice SAVI se representará, (<0) agua, (0.001 – 0.226) suelo expuesto, (0.227 – 0.341) vegetación poco densa, (0.342 - 0.405) vegetación media densa, (0.406 <) vegetación muy densa.

Por último, las imágenes satelitales fueron recortas al formato shapefile de la Granja Porcón otorgadas por el MIDAGRI, para posteriormente diseñar los mapas temáticos desde la vista de impresión del software QGIS 3.10 y exportarlos para su seguida interpretación.

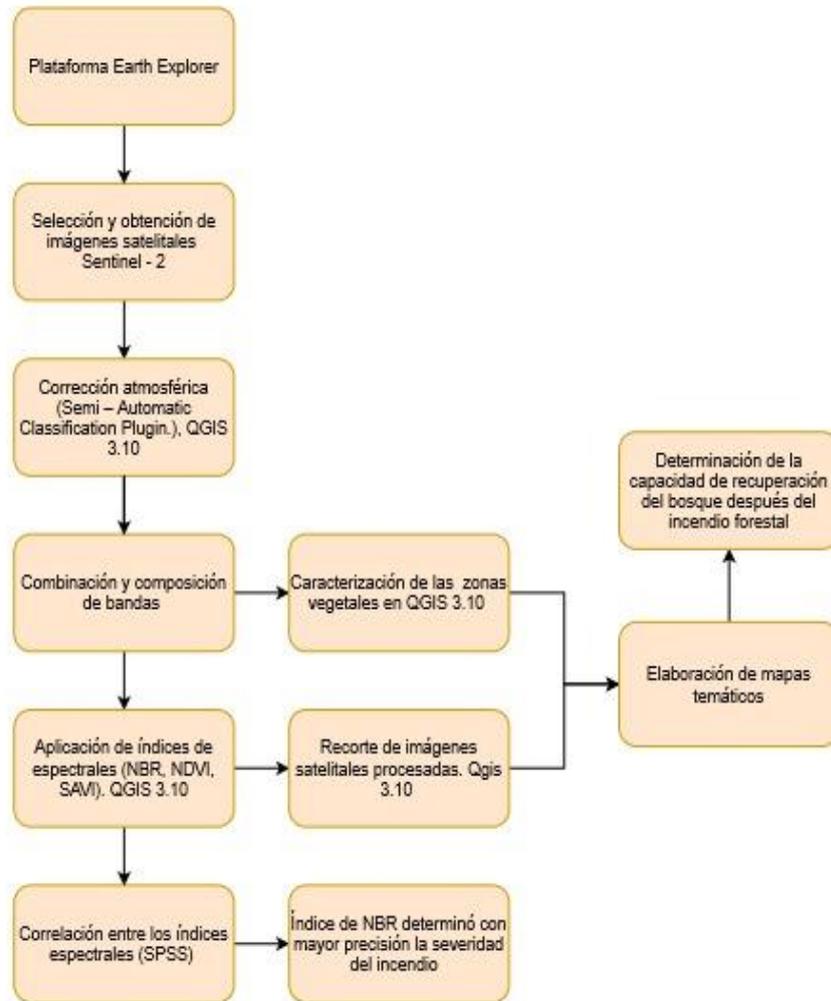


Figura 4. Diagrama de flujo del procedimiento metodológico

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4 se observa el diagrama de flujo del procedimiento metodológico empleado en esta exploración.

3.6. Método de análisis de datos

Se utilizó el software QGIS 3.10 para realizar mapas temáticos de los índices de vegetación NBR, NDVI y SAVI y calcular la extensión en hectáreas para cada categoría de los índices mencionados, con el fin de determinar las variaciones suscitadas antes y después del incendio. Posteriormente, se procedió a hacer análisis estadísticos, con el propósito de evaluar la correlación entre la severidad de incendio y los índices espectrales hallados,

además, esto permitió ver cual índice tuvo mayor efectividad para determinar las zonas quemadas.

3.7. Aspectos éticos

La presente investigación ofrece la seguridad de mantener la autenticidad y honestidad desde su formulación hasta su ejecución, con este fin fue sometido al software antiplagio Turnitin. El estudio respeta la información otorgada por los antecedentes citados y referenciados correctamente según la ISO 690, el mismo que está dentro de los lineamientos de investigación establecidos por la Universidad César Vallejo. Además, la investigación se rige a los lineamientos del código de ética de la Resolución N° 0262-2020/UCV.

IV. RESULTADOS

Con el fin de resolver los objetivos se obtuvieron los resultados siguientes:

4.1 Caracterización de las zonas forestales en la Granja Porcón

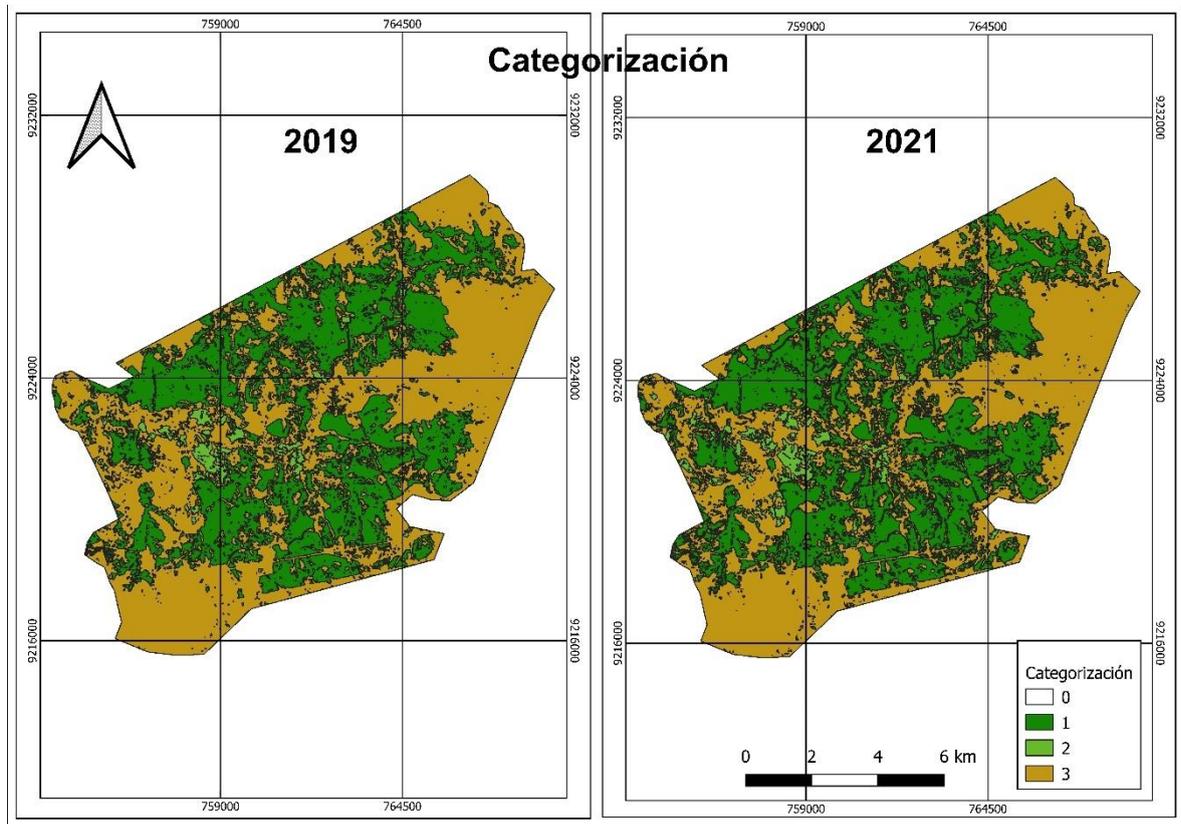


Figura 5. Caracterización del área de estudio antes y después del incendio

Fuente: Elaboración propia

La zona involucrada de la granja Porcón fue caracterizada de acuerdo a 3 clasificaciones como se observa en la figura 5, el valor que presenta mayor extensión en ambos años es el suelo desnudo o zona sin vegetación representada por el valor 3, seguido del valor 1 que representa a bosques y valor 2, zona agrícola. A simple vista se observa que de 2019 a 2021 el valor de bosque y zona agrícola aumentan ligeramente.

Tabla 4. Caracterización de la cobertura terrestre de los años 2019 – 2021 en la Granja Porcón

Categoría	Símbolo	2019		2021	
		ha	%	ha	%
Bosque	1	4828.24	39.14	5005.105	40.57
Agrícola	2	498.477	4.04	850.556	6.9
Suelo desnudo	3	7008.703	56.82	6479.974	52.53
Total		12335.42	100	12335.635	100

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4 se observan las categorías de clasificación y su representación en el área y periodo de estudio determinado. Se observa que la categoría bosque aumento en 176.87 ha esto se relacionaría a los esfuerzos de reforestación anual que se lleva en Porcón, por otra parte, también se observa el aumento de la categoría zona agrícola que para el año 2021 aumento su expansión en 352 ha. La categoría que tuvo una reducción fue la zona sin vegetación que disminuyo su expansión en más de 500 ha de 2019 a 2021, esto indicaría que los programas de desarrollo agrícola y reforestación en la Granja Porcón vienen dando resultados.

4.2. Identificación de las zonas impactadas por el incendio

La presente investigación pretende identificar la severidad del incendio y la resiliencia del bosque ubicado en la zona de estudio a través de la comparación de los índices NDVI, SAVI Y NBR, antes y después del evento suscitado.

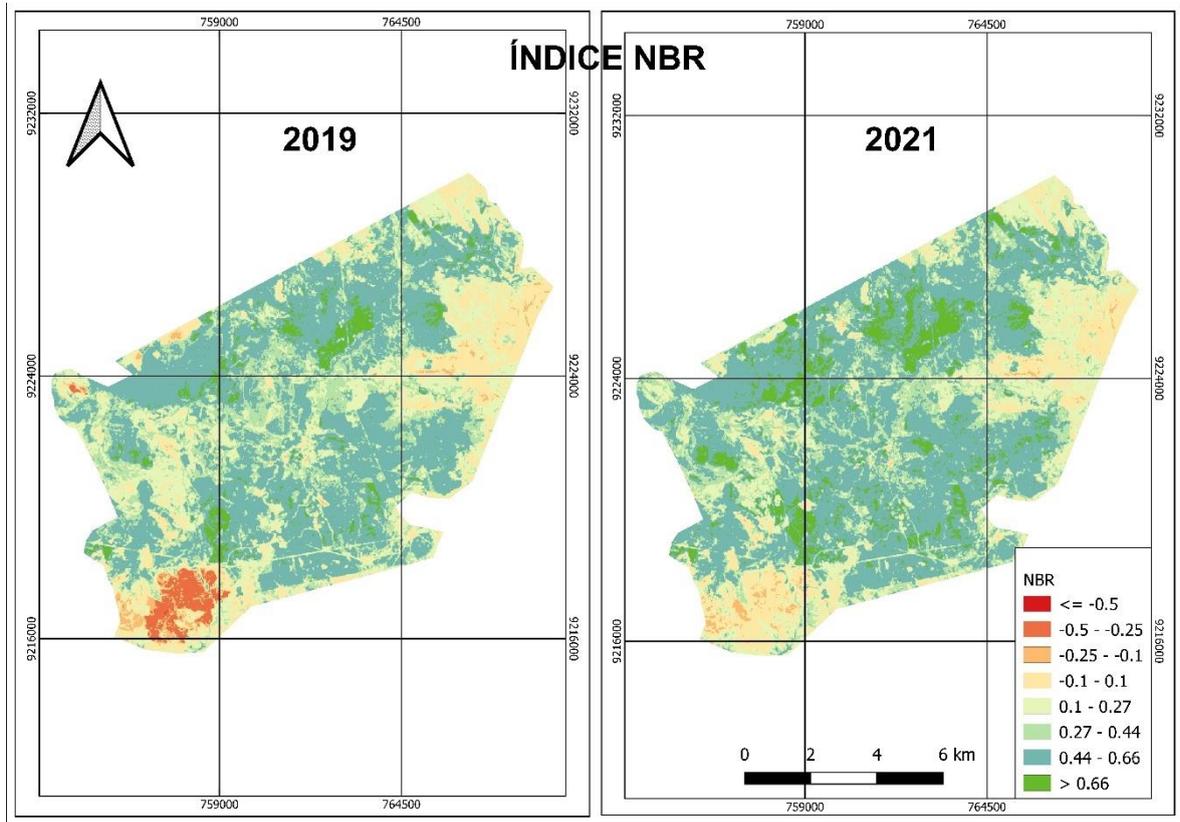


Figura 6. Índice normalizado de área quemada (NBR) para los años 2019 y 2021 en la Granja Porcón

Fuente: Elaboración propia

Diversos autores coinciden en la efectividad de medición que posee el índice espectral NBR, el cual discrimina con una tonalidad roja a las zonas severamente quemadas tal como se observa en la figura 6. Se puede evidenciar que las zonas severamente quemadas (valor ≤ -0.5) se encuentran en la parte inferior de los límites del área de estudio y en la parte superior del margen derecho en pequeñas proporciones para el año 2019, sin embargo, en el año 2021 se recuperan a valores de mediana y baja severidad y baja regeneración lo cual indica el valor de resiliencia del ecosistema.

Por otra parte, se observa un aumento en el valor de regeneración muy alto (valor > 0.66) para el año 2021. Además, el índice NBR muestra con precisión los valores nulos que fueron ocupados por suelos desnudos, instalaciones mineras y zona poblacional sin ninguna interacción con incendios en los últimos años.

Tabla 5. Cuantificación del índice NBR de los años 2019– 2021 en la Granja Porcón

NBR	Rango	2019		2021	
		ha	%	ha	%
Severidad alta	< -0.5	0.36	0.003	0	0
Severidad media	-0.5 a -0.25	232.56	1.884	0.32	0.003
Severidad baja	-0.25 a -0.1	193.2	1.565	91.07	0.738
Severidad nula	-0.1 a 0.1	1477.27	11.956	1219.75	9.880
Regeneración baja	0.1 a 0.27	2455.2	19.886	2119.36	17.166
Regeneración media	0.27 a 0.44	2390.48	19.362	2277.21	18.445
Regeneración alta	0.44 a 0.66	5202.51	42.139	5761.99	46.670
Regeneración muy alta	>0.66	394.53	3.196	876.41	7.099
Total		12346.11	100	12346.11	100

Fuente: Elaboración propia

Tal como mostraba la figura 6 y en la tabla 5 se puede observar la disminución del área afectada con severidad alta de 0.36 ha a 0 ha, y severidad media de 232.56 ha a 0.32 ha, además, se observa que las demás categorías también presentan una disminución a excepción de regeneración alta y muy alta que aumentan su extensión en los dos años posteriores al incendio en 559 ha y 481 ha respectivamente.

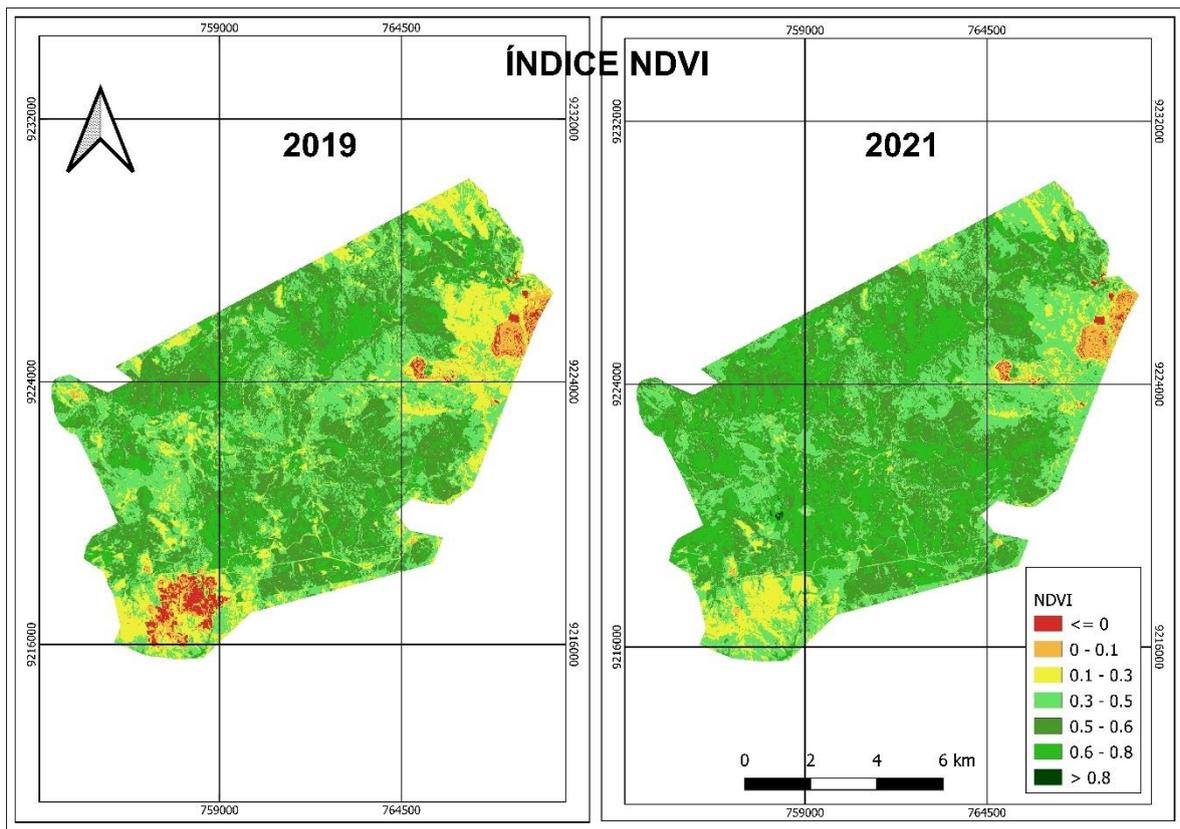


Figura 7. Índice normalizado de vegetación diferenciada (NDVI) para los años 2019 y 2021 en la Granja Porcón

Fuente: Elaboración propia

El índice de vegetación NDVI permite visualizar la actividad fotosintética (AF) de la vegetación durante el periodo de estudio tal como se muestra en la figura 7. Se muestra que coincide con el índice de NBR en la ubicación de la zona afectada por el incendio donde se muestran valores menores a 0 representados por sin AF, sin embargo, estos valores también ocupan áreas donde no hubo incendio y pertenecen a zonas de infraestructuras mineras. Por otra parte, se puede observar que las zonas afectadas presentaron valores de baja actividad fotosintética y media actividad fotosintética lo cual indicaría la recuperación de la zona boscosa luego de dos años del incendio. En general, el índice NDVI mostró un aumento de la actividad fotosintética en el área de estudio después del incendio.

Tabla 6. Cuantificación del índice NDVI de los años 2019 – 2021 en la Granja Porcón

NDVI	RANGO	2019		2021	
		ha	%	ha	%
Sin AF	< 0	225.55	1.827	60.13	0.487
Muy baja AF	0 - 0.1	306.65	2.484	172.24	1.395
Baja AF	0.1 - 0.3	2088.66	16.918	1012.04	8.197
Media AF	0.3 - 0.5	4158.97	33.686	4112.81	33.313
Media - alta AF	0.5 - 0.6	3860.13	31.266	3754.33	30.409
Alta AF	0.6 - 0.8	1705.86	13.817	3229.72	26.160
Muy alta AF	> 0.8	0.29	0.002	4.84	0.039
TOTAL		12346.11	100	12346.11	100

Fuente: Elaboración propia

La tabla 6 muestra la representación en extensión de área de estudio con la aplicación del índice NDVI. Se puede observar que existe una disminución del valor “Sin AF “en 165 ha valor cercano a la extensión de 150 ha quemadas reportadas por el SERFOR. Así mismo, los valores de muy baja, baja, media y media-alta AF disminuyeron después del incendio para darle mayor extensión a alta y muy alta AF, esto indica que después del incendio se han originado interacciones favorables para el ecosistema en Porcón.

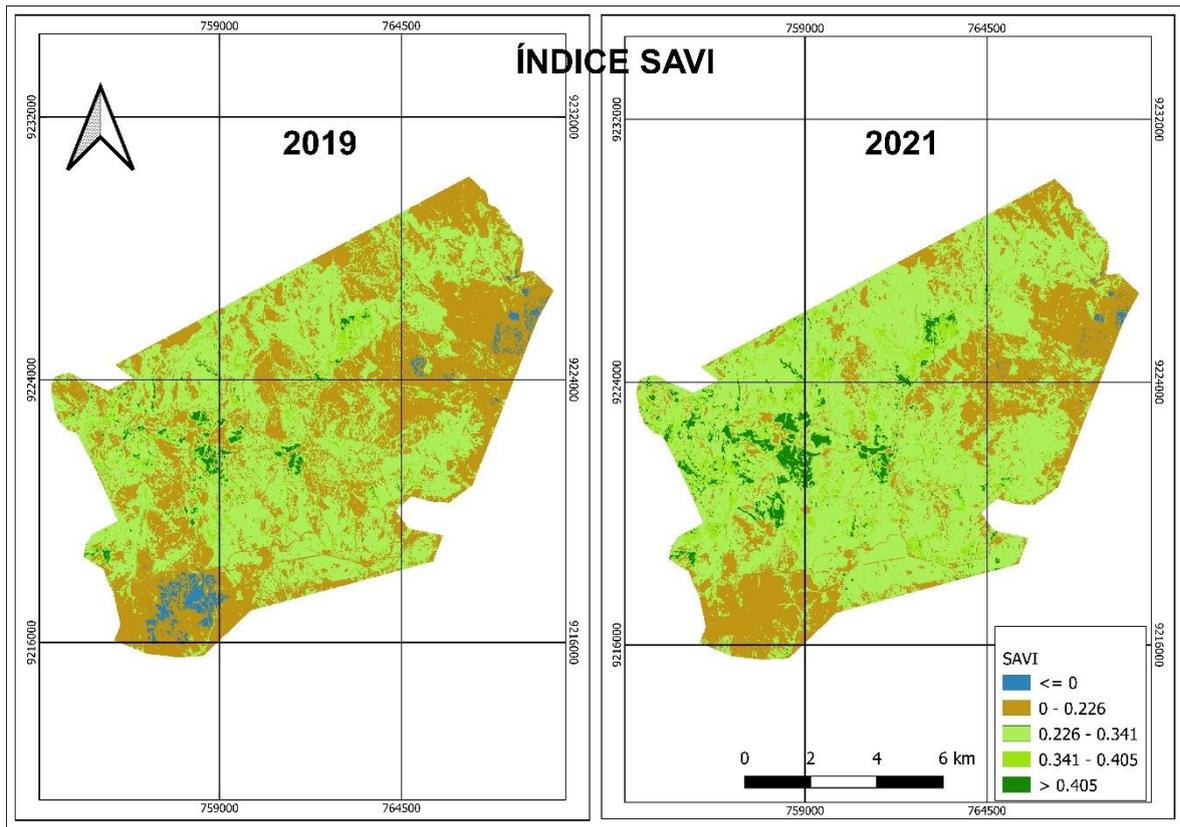


Figura 8. Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) para los años 2019 y 2021 en la Granja Porcón

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8 se expresa el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) con un factor de ajuste de $L= 0.5$, que a diferencia del NDVI permite tener una mayor visualización y análisis de la zona de estudio de acuerdo a sus características fisiográficas. Se observa que el área quemada fue representada por valores menores de 0 que en el índice de SAVI representan las zonas de agua, así mismo, se observa que zonas pertenecientes a las infraestructuras mineras también se encuentran dentro de estos rangos de valores. No obstante, al igual que en los anteriores índices espectrales este valor cambio para el año 2021, en este caso, a zonas de suelo desnudo y vegetación poco densa, también se puede observar el aumento en la extensión de vegetación densa para el año 2021.

Tabla 7. Cuantificación del índice SAVI de los años 2019 – 2021 en la Granja Porcón

SAVI	Rango	2019		2021	
		ha	%	ha	%
Agua	< 0	232.94	1.887	31.06	0.252
Suelo desnudo	0 a 0.226	5541.77	44.887	3469.09	28.099
V. poco densa	0.226 a 0.341	5966.88	48.330	7362.4	59.633
V. semi densa	0.341 a 0.405	451.4	3.656	1042.58	8.445
V. densa	> 0.405	153.12	1.240	440.98	3.572
total		12346.11	100	12346.11	100

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la tabla 7 se observa la variación del índice SAVI después de 1 año del incendio. En la tabla se observa la disminución de la categoría agua en 201.88 ha, este tomo valores del suelo quemado del año 2019, de igual forma se divisa la reducción de suelo desnudo en 2072.68 ha y el aumento de vegetación poco densa, semi densa y densa en 1395.52, 591.18 y 287.86 ha respectivamente, indicando al igual que los índices espectrales anteriores la proliferación y mejoramiento del estado de la vegetación después del periodo de estudio.

4.3. Determinación del índice espectral adecuado

Luego de determinar la normalidad de los datos se determinó estadísticamente en el software SPSS 21 la relación entre los índices espectrales y la severidad del incendio en la zona Porcón con el fin de determinar cual tiene mayor grado de proximidad y por lo tanto discrimina correctamente las zonas afectadas.

Tabla 8. *Precisión de los índices espectrales*

ÍNDICE	Valor de regresión			Medidas simétricas	
	Valor r	Valor r ²	Error	Spearman	Kappa
NBR	0.81	0.655	0.708	0.796	0.81
NDVI	0.6	0.36	0.965	0.54	0.589
SAVI	0.339	0.115	1.135	0.418	0.281

Fuente: Elaboración propia

La tabla 8 muestra los valores de correlación entre los índices espectrales y los datos reales de ubicación del incendio. Se observa que el índice de NBR muestra el mayor acercamiento a los valores reales de incendio con valores de $r^2 = 0.655$, Spearman de 0.796 e índice de Kappa en 0.81 lo que indica una correlación fuerte entre el NBR y la severidad del incendio.

Seguido está el índice NDVI con valores bajos de regresión $r^2 = 0.36$ y correlación moderada según Spearman 0.54 y Kappa 0.589, esto indicaría que el NDVI logra diferenciar las zonas quemadas sin embargo no tiene una alta confiabilidad. Por último, el índice que menos relación ($r^2 = 0.339$) guardo con los valores reales fue el SAVI que presento una correlación media según Spearman 0.418 y una concordancia débil 0.281 de acuerdo al índice de kappa.

Adicionalmente, se evaluaron los datos de precipitación con el fin de evaluar si esta fue significativa o determinante en la recuperación del bosque.

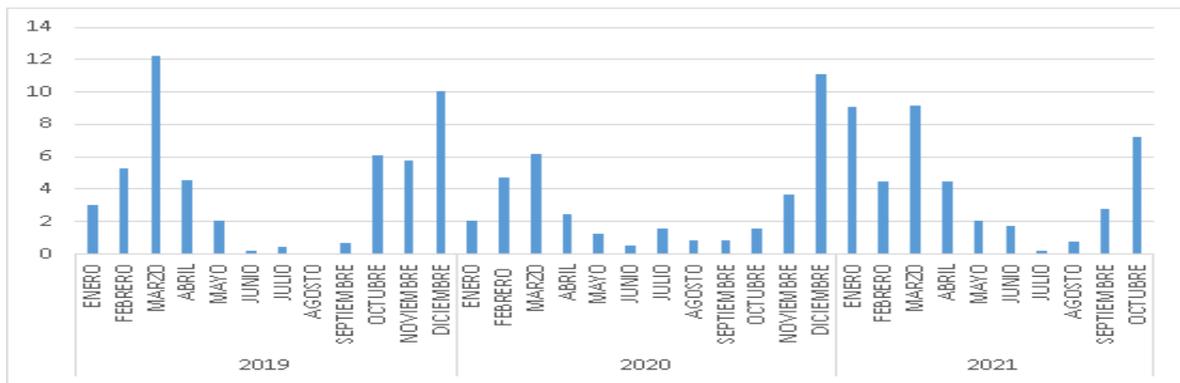


Figura 9. Promedio mensual de precipitación en el periodo 2019 – 2021

Fuente: Elaboración propia

La figura 9 muestra que el promedio mensual de precipitación entre los meses de noviembre a marzo es elevado y regular durante el periodo de estudio.

V. DISCUSIÓN

El primer objetivo específico de esta investigación fue caracterizar las zonas forestales en la Granja Porcón mediante imágenes Sentinel - 2, para el período 2019 – 2021. Para empezar, se clasificó la extensión territorial de la Granja Porcón en tres zonas: zona de bosque, zona agrícola y suelo desnudo o zona sin vegetación, con el fin de establecer una comparativa de la zona boscosa en el periodo de estudio, se mostró un aumento de la zona bosque y agrícola en 176.87 ha y 352 ha, indicando que luego del incendio hubo rebrote de la zona vegetal dentro del área de estudio, como dato adicional se sabe que el bosque se encuentra ocupado en su mayoría por especies de la familia *Pinus*.

Lo mencionado anteriormente tiene relación con lo mencionado por Meng *et al.* (2018) y Viedma *et al.* (2020), quienes aseguran que los bosques de pinos tienen un mayor porcentaje de recuperación anual luego de un incendio, sin embargo, la amplia extensión en tan solo 2 años indicaría influencia antrópica, además, los valores de precipitación son poco significativos y no tienen mucha relación con la recuperación de los bosques en comparación con la frecuencia de incendio y la severidad del incendio según Shvestsov *et al.* (2019).

Así mismo, estos resultados coinciden con los de la investigación de Loayza (2020), en la que se examinó y analizó la variación de la superficie boscosa en una estación biológica del departamento de Cusco. Como resultado se identificó cinco clases de bosque: zona de bosque de terraza alta, zona de bosque de terraza baja, zona de bosque montañoso, zona de pastizales y zona sin vegetación, además, se realizó una proyección, la cual, arrojó que aumentará la superficie boscosa de la zona de estudio para el año 2025.

De igual manera, estos resultados encajan con los del estudio de Rosero (2021), en el que se hizo uso de métodos de teledetección, para evaluar y estimar la cobertura del suelo y la cobertura vegetal, en la subcuenca del río Ambi en el periodo 1991 – 2017. Para ello, se utilizó la clasificación supervisada con muestras creadas, obteniéndose siete firmas espectrales, las cuales son: zonas boscosas, arbustivas, de páramos, de pastizales, de cultivos, de cuerpos de agua y zonas pobladas, dentro de la extensión de la subcuenca. En conclusión, se determinó que

los principios de la teleobservación, son eficientes para indicar el nivel de deforestación y predecir la variación que sufrirá la cobertura vegetal a través del tiempo.

De igual forma, estos resultados son coincidentes con los de la indagación de Moraes *et al.* (2021), en la que se monitoreó y examinó el estado de la cobertura vegetal, en una región de Brasil en el periodo 2013 – 2018, por medio de la teledetección. En síntesis, se diseñaron mapas temáticos en los que se calculó índices espectrales como lo son: NDVI, SAVI y LAI, para vigilar el estado del ambiente en temporada de lluvia y estaciones secas.

Análogamente, estos resultados se asemejan a los de la exploración de Niño (2020), en la que se analizó y clasificó multitemporalmente la cobertura del suelo, en un municipio colombiano, para eso se procesó imágenes satelitales en el periodo 1988 - 2018, a través, de la clasificación supervisada, que forma parte de los procedimientos de la teleobservación. Los hallazgos señalan una modificación en la cobertura terrestre del área en estudio, evidenciándose el avance de la urbanización, los parques industriales y la reducción de las zonas agrícolas.

El segundo objetivo específico de este estudio fue identificar las zonas impactadas por el incendio forestal en la Granja Porcón mediante imágenes Sentinel – 2 para el periodo 2019 – 2021. En cuanto a la identificación de la zona quemada los 3 índices acertaron en la ubicación de la zona del incendio, sin embargo, mostraron resultados de extensión distintos el NBR mostró un área quemada total de 232.92 ha, NDVI, 225.55 ha y SAVI 232.94 ha a pesar que las cifras otorgadas por SERFOR solo determinaron 150 ha.

De acuerdo a lo anterior se podría influir que el índice NDVI muestra los valores más reales, no obstante, este índice no diferenció la zona quemada de las infraestructuras mineras al igual que el índice SAVI, por su parte el NBR diferenció correctamente las 150 ha de la zona quemada y adicionalmente un área quemada que no fue prevista inicialmente, pero se encontraba dentro de los límites del área de estudio.

Lo anterior tendría relación con lo expuesto por Mallinis, Mitsopoulos y Chryafi

(2017), Sobrino *et al.* (2019) y Gerrevink y Veraverbeke (2021), los cuales aseguran que el índice NBR guarda mayor relación con las imágenes Sentinel - 2, y contradeciría a Carvajal *et al.* (2019) que hacen referencia que el índice NDVI muestra las mejores estimaciones para el fuego.

Yendo hacia el ámbito más específico Lydersen *et al.* (2016), establece que la elevada coincidencia del NBR con las áreas quemadas se debe a la zona predominante de coníferas al igual que el área de estudio y Tran *et al.* (2018), a que es un bosque abierto – arbolado y no un bosque abierto con respuestas mixtas donde sería más predominante el NDVI. A pesar del buen desempeño del NBR para discriminar las áreas quemadas no evidenció correctamente la recuperación de la zona de estudio a diferencia del NDVI que visibilizó el rebrote de la vegetación en las zonas afectadas, tal como mencionan Tonbul, Kayzoglu y Kaya (2016).

Por otra parte, estos resultados coinciden parcialmente con los del estudio de Jimenez (2020), donde se determinó la capacidad de adaptación y recuperación de la cobertura vegetal, después de suscitarse un incendio forestal, en un distrito del departamento de Piura, utilizando índices espectrales como el NDVI, SAVI y NBRI, para estimar el estado de la vegetación. Como resultado se calculó que la cobertura vegetal se recuperará en dos años aproximadamente.

Por otro lado, estos resultados son semejantes a los de la exploración de Delegido *et al.* (2018), los mismos que examinaron la seriedad de los incendios forestales, ocurridos en una provincia de Argentina. Se procesó imágenes satelitales de los satélites Sentinel - 2 y Landsat 8, antes y después de ocurrido el evento. Se determinó índices espectrales NDSI, dNDSI y NBR, llegándose a la conclusión que las imágenes de satélite Sentinel - 2 proporcionan resultados más veraces y con menos margen de error, para examinar la agresividad de los incendios forestales y valorar la recuperación de la vegetación a mediano y largo plazo.

Simultáneamente, estos resultados concuerdan con los de la indagación de Guerrero *et al.* (2017), en la que se estudió la severidad del incendio forestal localizado en un municipio de España, partiendo de datos proporcionados por imágenes remotas del satélite Sentinel - 2, para calcular el índice espectral dNBR. Los resultados señalaron que, para obtener datos más fidedignos, es necesario

complementar el procesamiento de la información obtenida mediante la teledetección, con trabajo de campo en la superficie devastada.

También, estos resultados sintonizan de forma parcial con los del estudio de Ariza (2017), donde se analizó la alteración en la estructura paisajística ocurrida a causa de incendios forestales, apoyándose en la teledetección, a través, del uso de índices espectrales, como son el NDVI, NBR, sus versiones derivadas dNDVI y dNBR. Los resultados demostraron que estas técnicas de teledetección, permiten identificar las áreas afectadas por el incendio, en mayor o menor proporción y estimar el tiempo que tardará en regenerarse la vegetación de la zona.

El tercer objetivo específico de esta indagación fue determinar el índice de clasificación de incendios adecuado para la zona forestal en la Granja Porcón, mediante imágenes Sentinel - 2 para el período 2019 – 2021. En cuanto a los valores de correlación se observó que la mayor relación con la severidad del incendio perteneció al índice NBR que obtuvo un valor de distribución de datos $r^2=0.655$ y valores de relación de 0.796 y 0.81 Spearman y Kappa respectivamente, fue seguido del NDVI con 0.54 y 0.589, y por último SAVI con 0.418 y 0.281.

Los valores de correlación de NBR cercanos a 0.8 son similares a los encontrados en el estudio de Mallinis, Mitsopoulos y Chryafi (2017) que encontró valores de 0.87 o al estudio de Papiá, Buddhika y Yijun (2018) con un valor Kappa de 0.82 y $r^2=0.76$, también al estudio de Chen, Lara y Sheng (2020) que alcanzo valores de 0.777 en correlación y Sobrino *et al.* (2019) con valores de $r^2=0.74$ con una clasificación de 5 grados. De la misma manera existe relación entre la relación encontrada por el NDVI y estudios anteriores tal como el índice de Kappa 0.563 de la investigación de Carvajal *et al.* (2019).

La importancia de la actual investigación consistió en demostrar, que se puede realizar un análisis de la severidad del incendio forestal ocurrido en la Granja Porcón, Cajamarca, mediante la teledetección, específicamente índices espectrales, con la finalidad de determinar las áreas impactadas por el evento y plantear alternativas para recuperar las zonas degradadas.

VI. CONCLUSIONES

1. La caracterización del área boscosa de la zona de estudio se clasificó en tres categorías, las cuales son: bosque, zona agrícola y zona sin vegetación, se registró un aumento en la expansión de 176.87 ha y 352 ha para los dos primeros, influenciados principalmente por interacciones antropogénicas, entre los años 2019 a 2021.
2. Los índices espectrales identificaron que la extensión del área quemada total fue de NBR 232.92 ha, NDVI, 225.55 ha y SAVI 232.94 ha, siendo el índice que más claridad tuvo al identificar el área quemada el NBR el cual mostro 0.36 ha para área severamente quemada y 232.56 ha para severidad mediana respectivamente.
3. De acuerdo a las relaciones estadísticas el índice NBR fue el que mejor relación guardó con la severidad del incendio, con valores de distribución $r^2 = 0.655$ y correlación de 0.796 y 0.81 para Spearman y Kappa, según los resultados encontrados el valor de correlación alto se debería a que en la zona boscosa del área en estudio predominan especies de coníferas.
4. Por último, fue posible evaluar mediante imágenes satelitales Sentinel - 2 la severidad del incendio, la cual, se mostró en grado de alta y media severidad según el índice NBR.

VII. RECOMENDACIONES

1. Es necesario caracterizar las diversas coberturas del suelo pertenecientes a la Granja Porcón en distintos periodos, con el fin de evaluar multitemporalmente el grado de afectación de la zona de bosque en el sector de Porcón, causado por la expansión de las fronteras agrícolas y el aumento de la ganadería principalmente.
2. Se recomienda utilizar índices espectrales en otras investigaciones similares, con la intención de identificar las áreas afectadas por incendios forestales y evaluar la capacidad de recuperación y resiliencia de la vegetación de esas zonas.
3. Es necesario complementar este estudio con datos tomados in situ en la zona donde se suscitó el incendio para la correlación, ya que la presente investigación llevó a cabo la correlación mediante observación de imágenes satelitales y reportes oficiales del SERFOR.
4. Para finalizar, en esta indagación se procesó imágenes Sentinel – 2, las cuales tienen una resolución de 10 m, sin embargo, existen sensores remotos de resolución pancromática mucho mayor, como Spot 5 que nos da resoluciones de 5 metros, permitiéndonos determinar y delimitar con mejor precisión las áreas quemadas, el factor limitante es que las imágenes satelitales Spot 5 son en la actualidad un recurso de pago.

REFERENCIAS

ADAGBASA, Efosa, ADELABU, Samuel, OKELLO, Tom. Development of post-fire vegetation response-ability model in grassland mountainous ecosystem using GIS and remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [en línea], Junio 2020, v. 164. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.006>

ISSN: 0924 – 2716

ADDISON, Priscilla y OOMMEN, Thomas. Utilizing satellite radar remote sensing for burn severity estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [en línea]. Diciembre 2018, v. 73. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.002>

ISSN: 0303 – 2434

ARIZA, Alexander. Análisis de los cambios en la estructura del paisaje por incendios forestales mediante teledetección. Tesis (Doctorado en Cartografía). Alcalá: Universidad de Alcalá, Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, 2017. 271 pp.

Disponible en : <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=252456>

BRAVO, Nino. Teoría - Teledetección Espacial, Landsat, Sentinel-2, Aster 1L y Modis. Tingo María. Universidad Nacional Agraria de la Selva, 2017. 105 pp.

Disponible en: https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion_espacial_ArcGeek.pdf

Biblioteca Nacional de Medicina de los EE. UU. Medine Plus. 11 de septiembre de 2020. Disponible en: <https://medlineplus.gov/spanish/wildfires.html>

BARTALEV, Sergei [et al]. Methodology of post-fire tree mortality monitoring and prediction using remote sensing data. *Space Research Institute RAS* [en línea]. Diciembre 2017, n.º 6. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021].

Disponible en en

https://www.researchgate.net/publication/322927403_Methodology_of_post-fire_tree_mortality_monitoring_and_prediction_using_remote_sensing_data

ISSN: 2411 – 0280

CARVAJAL, Fernando [et al]. Evaluation of Fire Severity Indices Based on Pre- and Post-Fire Multispectral Imagery Sensed from UAV. *Remote sensing* [en línea]. Abril 2019, v. 11, n.º 9. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.3390/rs11090993>

ISSN: 2072 – 4292

CHRISTOPOULOU, Anastasia [et al]. Assessing the impact of different landscape features on post-fire forest recovery with multitemporal remote sensing data: the case of Mount Taygetos (southern Greece). *International Journal of Wildland Fire* [en línea]. Septiembre - julio 2019, v. 28, n.º 7. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1071/WF18153>

ISSN: 1448 – 5516

CHEN, Dong, LOBODA, Tatiana y HALL, Joanne. A systematic evaluation of influence of image selection process on remote sensing-based burn severity indices in North American boreal forest and tundra ecosystems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [en línea]. Enero 2020, v. 159. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021].

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.011>

ISSN: 0924 – 2716

CHEN, Yaping, LARA, Mark y SHENG Feng. A robust visible near-infrared index for fire severity mapping in Arctic tundra ecosystems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [en línea]. Enero 2020, v. 159. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.012>

ISSN: 0924 – 2716

CHU, Thuan, GUO, Xulin y TAKEDA Kazuo. Remote sensing approach to detect post-fire vegetation regrowth in Siberian boreal larch forest. *Ecological Indicators* [en línea]. Marzo 2016, v. 62. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.026>

ISSN: 1470 – 160X

DELEGIDO, Jesús [et al]. Estimación del grado de severidad de incendios en el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina, usando Sentinel-2 y su comparación con Landsat-8. *Revista de Teledetección* [en línea]. Noviembre – febrero 2018, n.º 51. [Fecha de consulta: 15 de octubre de 2021].

Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6480503>

ISSN: 1133 – 0953

Earth Observing System. Max Polyakov. 2021. Disponible en: <https://eos.com/make-an-analysis/ndvi/>

EDWARDS A., RUSSEL, Smith y MAIER, S. A comparison and validation of satellite-derived fire severity mapping techniques in fire prone north Australian savannas: Extreme fires and tree stem mortality. *Remote Sensing of Environment* [en línea]. Marzo 2018, v. 206. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.038>

ISSN: 0034 – 4257

FERNÁNDEZ, Victor [et al]. Remote Sensing Applied to the Study of Fire Regime Attributes and Their Influence on Post-Fire Greenness Recovery in Pine Ecosystems. *Remote sensing* [en línea]. Abril - mayo 2018, v. 10, n.º 5. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.3390/rs10050733>

ISSN: 2072 – 4292

GARCÍA, Paula [et al]. Environmental drivers of fire severity in extreme fire events that affect Mediterranean pine forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* [en línea]. Febrero 2019, v. 433. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.051>

ISSN: 0378 – 1127

GARCÍA, Paula [et al]. Evaluation and comparison of Landsat 8, Sentinel-2 and Deimos-1 remote sensing indices for assessing burn severity in Mediterranean fire-prone ecosystems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [en línea]. Agosto 2019, v. 80. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.006>

ISSN: 0303 – 2434

GARCÍA, Paula [et al]. Evaluation of fire severity in fire prone-ecosystems of Spain under two different environmental conditions. *Journal of Environmental Management* [en línea]. Octubre 2020, v. 271. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110706>

ISSN: 0301 – 4797

GERREVINK, Max y VERAVERBEKE, Sander. Evaluating the Near and Mid Infrared Bi-Spectral Space for Assessing Fire Severity and Comparison with the Differenced Normalized Burn Ratio. *Remote sensing* [en línea]. Febrero 2021, v. 13, n.º 4. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.3390/rs13040695>

ISSN: 2072 – 4292

GUERRERO, A. [et al]. Estudio de Severidad en el incendio de Albinyana (Catalunya) a partir de datos SENTINEL-2. *Revista de Teledetección* [en línea]. Enero – junio 2017, n.º 49. [Fecha de consulta: 04 de mayo de 2021].

Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6226392>

ISSN: 1988 – 8740

Glosario de términos para la gestión ambiental peruana. Ministerio del Ambiente. 2012.

Disponible en <http://siar.minam.gob.pe/puno/documentos/glosario-terminos-gestion-ambiental-peruana>

JAE-HYUN, Ryu [et al]. Satellite-Based Evaluation of the Post-Fire Recovery Process from the Worst Forest Fire Case in South Korea. *Remote sensing* [en línea]. Abril - junio 2018, v. 10, n.º 6. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.3390/rs10060918>

ISSN: 2072 – 4292

JIMENEZ, Antoni y GARCÍA, Arbildo. Resiliencia de la cobertura vegetal post incendio forestal aplicando índices espectrales de vegetación – Distrito de Chulucanas – Departamento de Piura, 2019. Tesis (Título Profesional de Ingeniero Forestal y del Medio Ambiente). Tumbes: Universidad Nacional de Tumbes, Facultad de Ciencias Agrarias, 2020. 132 pp.

Disponible en: <http://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/1884>

Ley n.º 30806. Diario oficial El Peruano, Lima, Perú, 05 de julio de 2018. Disponible en: https://portal.concytec.gob.pe/images/renacyt/reglamento_renacyt_version_final.pdf

LI, Juan, LIU, Wei y ZHANG, Xinxin. Evaluation algorithm of alhagi sparsifolia desertification control under different irrigation amounts. *Earth Sciences Research Journal* [en línea]. Octubre – mayo 2021, v. 24, n.º 4. [Fecha de consulta: 01 de mayo de 2021].

Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-61902020000400449&lang=es

ISSN: 1794 – 6190

LOAYZA, Kevin. Análisis multitemporal de los cambios de la cobertura boscosa y su proyección para el 2025 en la Estación Biológica Villa Carmen, Cusco. Tesis (Título Profesional de Ingeniero Ambiental). Lima: Universidad Católica sedes Sapientiae, Facultad de Ingeniería Agraria, 2020. 115 pp.

Disponible en <http://repositorio.ucss.edu.pe/handle/UCSS/827>

LYDERSEN, Jaime [et al]. Relating Fire-Caused Change in Forest Structure to Remotely Sensed Estimates of Fire Severity. *Fire Ecol* [en línea]. Diciembre 2016, n.º 12. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.4996/fireecology.1203099>

ISSN: 1933 – 9747

MALLINIS, G., MITSOPOULOS, I. y CHRYSAFI, I. Evaluating and comparing Sentinel - 2A and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a Mediterranean pine ecosystem of Greece. *GIScience & Remote Sensing* [en línea]. Julio 2017, v. 55. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1354803>

ISSN: 1943 – 7226

MARTÍNEZ, S. [et al]. Severidad y regeneración en grandes incendios forestales: análisis a partir de series temporales de imágenes Landsat. *Revista de Teledetección* [en línea]. Enero – junio 2017, n.º 49. [Fecha de consulta: 15 de octubre de 2021].

Disponible en <https://riunet.upv.es/handle/10251/92734>

ISSN: 1133 – 0953

MENG, Ran [et al]. Measuring short-term post-fire forest recovery across a burn severity gradient in a mixed pine-oak forest using multi-sensor remote sensing techniques. *Remote Sensing of Environment* [en línea]. Junio 2018, v. 210. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.019>

ISSN: 0034 – 4257

MATHEWS, Lauren y KINOSHITA, Alicia. Urban Fire Severity and Vegetation Dynamics in Southern California. *Remote sensing* [en línea]. Noviembre – diciembre 2021, v. 13. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.3390/rs13010019>

ISSN: 2072 – 4292

MEDRANO, Wellington. Análisis de cambio de uso de suelo al sur del cantón Samborondón mediante sistemas de información geográfica y teledetección. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Guayaquil: Universidad De Guayaquil, Facultad de Ciencias Naturales, 2017. 86 pp.

Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/29491>

MEJÍA, Carlos. La zonificación de riesgos a incendios forestales en la cuenca del río Coello en el departamento del Tolima. Tesis (Título de especialista en Sistemas Información Geográfica). Manizales: Universidad de Manizales, Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2017. 80 pp.

Disponible en: <http://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/3226>

MORAES, Jozé [et al]. Spatial-temporal dynamics of Caatinga vegetation cover by remote sensing in the Brazilian semiarid region. *DYNA* [en línea]. Octubre – diciembre 2020, v. 87, n. ° 215. [Fecha de consulta: 01 de mayo de 2021].

Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532020000400109&lang=es

ISSN: 2346 – 2183

MONTORIO, Raquel [et al]. Unitemporal approach to fire severity mapping using multispectral synthetic databases and Random Forests. *Remote Sensing of Environment* [en línea]. Noviembre 2020, v. 249. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112025>

ISSN: 0034 – 4257

MCKENNA, Phill [et al]. Measuring fire severity using UAV imagery in semi-arid central Queensland, Australia. *International Journal of Remote Sensing* [en línea]. Marzo – mayo 2017, v. 38, n.º 14. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1317942>

ISSN: 1366 – 5901

NIÑO, Yuly. Análisis multitemporal mediante imágenes de sensores remotos para la determinación de los cambios de uso de suelo en el municipio de san francisco de sales, Cundinamarca (Colombia) entre los años 90's y 2018. Tesis (Magister en Geomática). La Plata: Universidad Nacional La Plata, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, 2020. 103 pp.

Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/111198>

NDALILA, Mercy, WILLIAMSON, Grant y BOWMAN, David. Geographic Patterns of Fire Severity Following an Extreme Eucalyptus Forest Fire in Southern Australia: 2013 Forcett-Dunalley Fire. *Fire* [en línea]. Octubre 2018, n.º 3. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.3390/fire1030040>

ISSN: 2571 – 6255

PAPIA, Rozario, BUDDHIKA, Madurapperuma y YIJUN, Wang. Remote Sensing Approach to Detect Burn Severity Risk Zones in Palo Verde National Park, Costa Rica. *Remote sensing* [en línea]. Septiembre 2018, v. 10, n.º 9. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.3390/rs10091427>

ISSN: 2072 – 4292

PARKS, Sean [et al]. Giving Ecological Meaning to Satellite-Derived Fire Severity Metrics across North American Forests. *Remote sensing* [en línea]. Julio 2019, v. 11, n.º 14. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.3390/rs11141735>

ISSN: 2072 – 4292

ROSERO, Edwin. Estudio multitemporal de uso del suelo y cobertura vegetal de la subcuenca del río Ambi, provincia Imbabura, Ecuador. Tesis (Magister en Gestión Sustentable de Recursos Naturales). Ibarra: Universidad Técnica del Norte, Instituto de Posgrado. 2021. 80 pp.

Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10902>

SABUCO, Pamela. La problemática de los incendios forestales y bases para su teledetección en el Perú. *Apuntes de ciencia y sociedad* [en línea]. Agosto - septiembre 2013, v. 3, n.º 2. [Fecha de consulta: 15 de octubre de 2021].

Disponible en <http://journals.continental.edu.pe/index.php/apuntes/article/view/198/196>

ISSN: 2225 – 5141

SÁNCHEZ, Fabio. Fundamentos epistémicos de la investigación cualitativa y cuantitativa: Consensos y disensos. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria* [en línea]. Enero – junio 2019, v. 13. [Fecha de consulta: 28 de septiembre de 2021].

Disponible en http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-25162019000100008

ISSN: 2223 – 2516

SHVETSOV, Evgeny [et al]. Assessment of post-fire vegetation recovery in Southern Siberia using remote sensing observations. *Environmental Reserarch Letters* [en línea]. Abril 2019, v. 14, n.º 5. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab083d>

ISSN: 1748 – 9326

SOBRINO, Jose [et al]. Relationship between Soil Burn Severity in Forest Fires Measured In Situ and through Spectral Indices of Remote Detection. *Forests* [en línea]. Abril - mayo 2019, v. 10, n.º 5. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.3390/f10050457>

ISSN: 1999 – 4907

SOTO, Alba, AGUADO, Inmaculada y MARTÍNEZ, Susana. Assessment of Post-Fire Vegetation Recovery Using Fire Severity and Geographical Data in the Mediterranean Region (Spain). *Environments* [en línea]. Octubre – diciembre 2017, v. 4, n.º 4. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.3390/environments4040090>

ISSN: 2076 – 3298

TRAN, Bang [et al]. Evaluation of Spectral Indices for Assessing Fire Severity in Australian Temperate Forests. *Remote sensing* [en línea]. Octubre 2019, v. 10, n.º 11. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.3390/rs10111680>

ISSN: 2072 – 4292

TUBBESING, Carmen [et al]. Strategically placed landscape fuel treatments decrease fire severity and promote recovery in the northern Sierra Nevada. *Forest Ecology and Management* [en línea]. Marzo 2019, v. 436. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.010>

ISSN: 0378 – 1127

TONBUL, H., KAVZOGLU, T. y KAYA, S. Assessment of fire severity and post-fire regeneration based on topographical features using multitemporal landsat imagery: a case study in Mersin, Turkey. *Int. Arco. Photogramm. Sens. Remoto Spatial Inf. Sci* [en línea]. Julio 2016, v. 36, n.º 17. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021].

Disponible en https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B8-763-2016_2016

ISSN: 2220 – 9964

URQUIJO, Elvira. El incendio de Gran Canaria, con más de 10 000 hectáreas quemadas, fue el peor de España en 2019 [en línea]. Canarias ahora. 22 de enero de 2020. [Fecha de consulta: 15 de octubre de 2021].

Disponible en: https://www.eldiario.es/canariasahora/sociedad/incendio-gran-canaria-hectareas-espana-if-2019_1_1064965.html

VIDAL, P. [et al]. Uso de herramientas de teledetección para el análisis de la severidad y estimación de gases de efecto invernadero (GEI) en incendios forestales de gran magnitud. Estudio de caso incendio La Rufina, VI Región del LGB O'Higgins, Chile. *Revista de Teledetección* [en línea]. Noviembre – diciembre 2017, n° 50. [Fecha de consulta: 01 de mayo de 2021].

Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6230370>

ISSN: 1133 – 0953

VIEDMA, O. [et al]. Disentangling the role of prefire vegetation vs. burning conditions on fire severity in a large forest fire in SE Spain. *Remote Sensing of Environment* [en línea]. Septiembre 2020, v. 247. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111891>

ISSN: 0034 – 4257

VIEDMA, Olga, ALMEIDA, Danilo y MORENO, José. Postfire Tree Structure from High-Resolution LiDAR and RBR Sentinel - 2A Fire Severity Metrics in a Pinus halepensis-Dominated Burned Stand. *Remote sensing* [en línea]. Septiembre – octubre 2020, v. 12, n.º 21. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021].

Disponible en <https://doi.org/10.3390/rs12213554>

ISSN: 2072 – 4292

ZHANZHANG, Cai. Vegetation Observation in the Big Data Era: Sentinel - 2 data for mapping the seasonality of land vegetation. Tesis (Doctor en Sistemas de Información geográfica). Escania: Lund University, Faculty of Science, Department of Physical Geography and Ecosystem Science, 2019. 60 pp.

Disponible en: <https://portal.research.lu.se/en/publications/vegetation-observation-in-the-big-data-era-sentinel-2-data-for-ma>

ANEXOS

ANEXO 01. Operacionalización de variables

Variable de estudio	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de medición
Severidad del incendio forestal	Factor crítico en el espacio impactado quemado. Es el fuego sin control en un espacio natural que podrían ser: zonas de bosques, pastizales, matorrales y praderas. Su propagación es inmediata y tiene como consecuencia daños en recursos naturales, destruye viviendas presentes y es una amenaza para habitantes de zonas aledañas (Montorio <i>et al.</i> , 2014, p. 428).	Sirve para evaluar la resiliencia y adaptación de la cobertura terrestre. Para dicho análisis se puede usar índices vegetales tales como: NBR, NDVI y SAVI, además, mediante ellos se puede identificar las variaciones suscitadas en el área, a través, del cálculo del área de las diferentes clases de coberturas de suelo.	Caracterización de la cobertura del suelo en el año 2019	Zona de bosque Zona agrícola Zona sin vegetación	Razón
			Caracterización de la cobertura del suelo en el año 2021	Zona de bosque Zona agrícola Zona sin vegetación NBR NDVI SAVI	Intervalo

Fuente: Elaboración propia

Anexo 02. Instrumento de recolección de datos

Información del investigador			
Apellidos y nombres	Benavides Aguilar, Natali Marimar		
Escuela profesional	Ingeniería Ambiental		
Ciclo	X		
Correo electrónico	nmbenavidesa@ucvvirtual.edu.pe		
Datos de la investigación			
Objetivo	Evaluar mediante imágenes Sentinel la severidad del incendio forestal suscitado en el Granja Porcón, en el periodo 2019 – 2020, Cajamarca		
Ambito	Granja Porcón		
Ubicación	Porcón / Cajamarca / Cajamarca		
Imágenes Sentinel - 2	Bandas infrarrojas cercanas		
Resolución	10 m		
Análisis de la severidad del incendio forestal			
Indicador	Escala	Periodo de estudio	
Imágenes Sentinel - 2	Ha	2019	2021
Zonas quemadas con gravedad baja (NBR)	0.1 – 0.27		
Zonas quemadas con gravedad moderada baja (NBR)	0.27 – 0.44		
Zonas quemadas con gravedad moderada alta (NBR)	0.44 – 0.66		
Zonas quemadas con gravedad alta (NBR)	> 0.66		
Índice de vegetación NDVI	- 0.1 - 01		
Índices de vegetación ajustadas al suelo SAVI	%		

Fuente: Elaboración propia

Anexo 03. Validez del instrumento de recolección de datos



VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres: **Mgtr. CASTRO TENA LUCERO**
 1.2. Cargo e institución donde labora: **Docente de la UCV**
 1.3. Especialidad o línea de investigación: **Especialista en Ecología y Gestión Ambiental**
 1.4. Nombre del instrumento motivo de evaluación: **Análisis de Severidad de Incendio Forestal**
 1.5. Autores del Instrumento: **Benavides Aguilar, Natali Marimar**

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE						MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE			
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible.												X	
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.												X	
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.												X	
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.												X	
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales												X	
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.												X	
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.												X	
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.												X	
9. METODOLOGIA	La estrategia responde una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.												X	
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.												X	

II. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

SI
.....

III. PROMEDIO DE VALORACIÓN:

95%

LUCERO KATHERINE CASTRO TENA
 DNI: 70837735
 CIIP: 162994

Chiclayo, 05 de Julio 2021

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO
I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres: **Mgtr. LUIS HOLGUIN ARANDA**
 1.2. Cargo e institución donde labora: **Docente de la UCV**
 1.3. Especialidad o línea de investigación: **Especialista en cambio climático y desarrollo sostenible.**
 1.4. Nombre del instrumento motivo de evaluación: **Análisis de Severidad de Incendio Forestal**
 1.5. Autores del Instrumento: **Benavides Aguilar, Natali Marimar**

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE						MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE			
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible.										X			
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.										X			
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X			
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.										X			
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X			
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.										X			
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.										X			
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X			
9. METODOLOGIA	La estrategia responde una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.										X			
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.										X			

II. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X
.....

III. PROMEDIO DE VALORACIÓN:

85%



LUIS HOLGUIN ARANDA
INGENIERO AMBIENTAL
 Reg. CIP. N° 111711

Chiclayo, 05 de Julio 2021

VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO
I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres: **Ordoñez Galvez, Juan Julio**
 1.2. Cargo e institución donde labora: **Docente de la UCV**
 1.3. Especialidad o línea de investigación: **Especialista en manejo forestal y recursos hídricos**
 1.4. Nombre del instrumento motivo de evaluación: **Análisis de Severidad de Incendio Forestal**
 1.5. Autores del Instrumento: **Benavides Aguilar, Natali Marimar**

II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE					MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE				
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible.											X		
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.											X		
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X		
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.											X		
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X		
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X		
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X		
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X		
9. METODOLOGIA	La estrategia responde una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X		
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											X		

II. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

SI
.....

III. PROMEDIO DE VALORACIÓN:

90%

Atentamente,

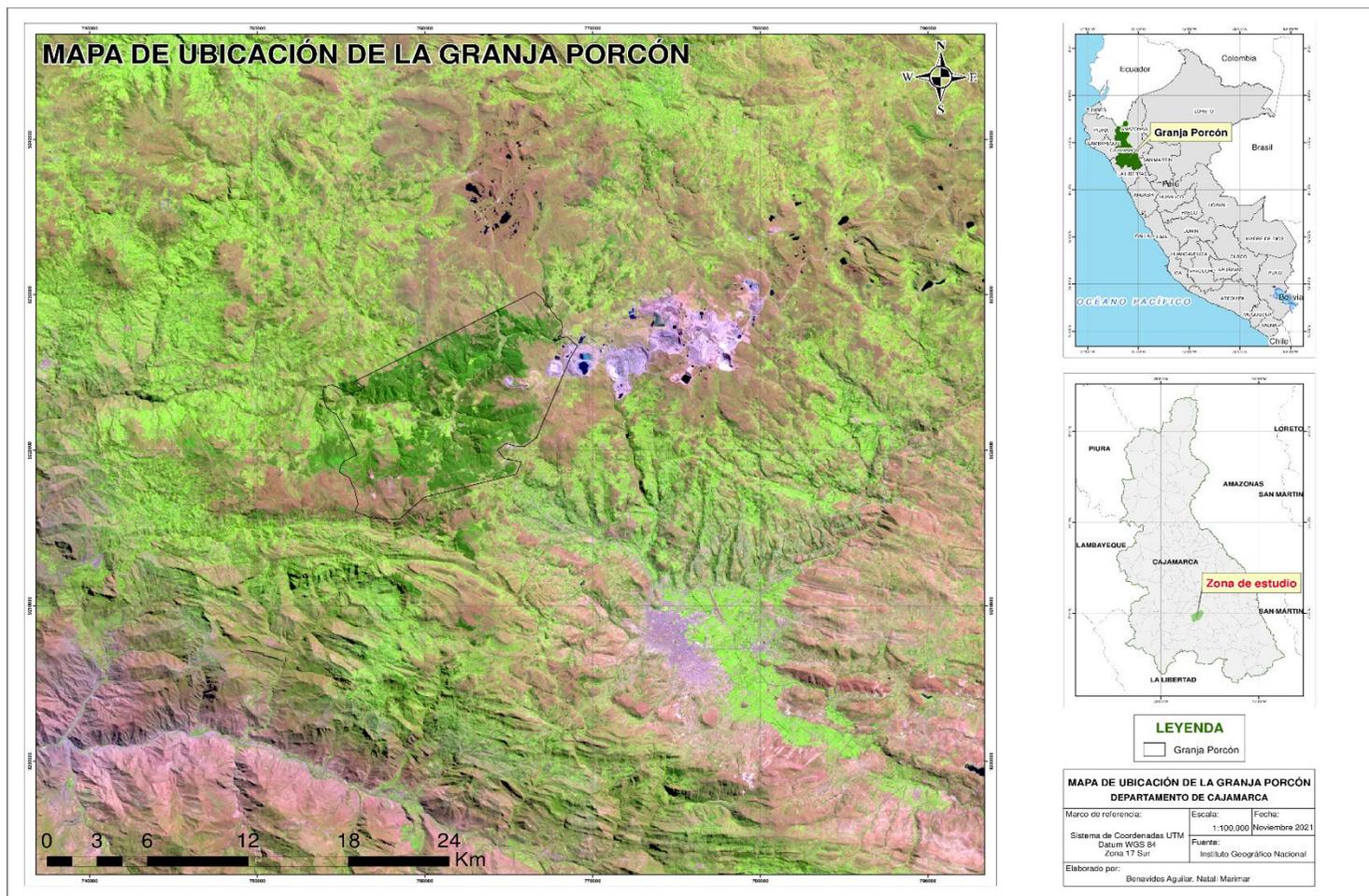


 Juan Julio Ordoñez Galvez

DNI: 08447308

Chiclayo, 05 de Julio 2021

Anexo 04. Mapa de ubicación del lugar donde se desarrolló la investigación



Fuente: Elaboración propia