

UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE DIOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y
MEDIO AMBIENTE



TESIS

**“ANÁLISIS DE LA SEVERIDAD DE QUEMAS MEDIANTE IMÁGENES SANTINEL-2
EN UN PAISAJE HETEROGENEO DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL CORREDOR
VIAL INTEROCEÁNICO SUR DEL DISTRITO DE LAS
PIEDRAS, MADRE DE DIOS PERIODO 2022”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE: INGENIERO
FORESTAL Y MEDIO AMBIENTE**

AUTOR:

Bach: VÁSQUEZ CUBAS,
Jimmy

ASESOR:

Dr. ALARCON AGUIRRE ,
GABRIEL

CO-ASESOR:

M.Sc. GARATE QUISPE,
JORGE SANTIAGO

Puerto Maldonado, julio del 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE DIOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y
MEDIO AMBIENTE



TESIS

**“ANÁLISIS DE LA SEVERIDAD DE QUEMAS MEDIANTE IMÁGENESSANTINEL-2
EN UN PAISAJE HETEROGENEO DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL
CORREDOR VIAL INTEROCEÁNICO SUR DISTRITO DE LAS
PIEDRAS, MADRE DE DIOS PERIODO 2022”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE: INGENIERO
FORESTAL Y MEDIO AMBIENTE**

AUTOR:

Bach: VÁSQUEZ CUBAS,
Jimmy

ASESOR:

Dr. ALARCON AGUIRRE ,
GABRIEL

CO-ASESOR:

M.Sc. GARATE QUISPE,
JORGE SANTIAGO

Puerto Maldonado, julio del 2024

Dedicatoria

A toda mi familia y allegados que colaboraron en mi camino y
metas

Agradecimientos

A mi familia que me ayudaron y permitiera que pueda culminar mis metas y en aportar valor en mi vida cada día, mimás sincero agradecimiento.

TURNITIN_JIMMY VASQUEZ CUBA

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%

INDICE DE SIMILITUD

18%

FUENTES DE INTERNET

8%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unamad.edu.pe Fuente de Internet	3%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
3	acolita.com Fuente de Internet	2%
4	cia.uagraria.edu.ec Fuente de Internet	1%
5	oa.upm.es Fuente de Internet	1%
6	www.mdpi.com Fuente de Internet	<1%
7	zagan.unizar.es Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to Universidad Nacional Amazonica de Madre de Dios Trabajo del estudiante	<1%
9	repositorio.unu.edu.pe Fuente de Internet	

Resumen

Una característica importante de la severidad del fuego es el régimen de incendios con alta relevancia ecológica y del ciclo del carbono. El estudio analizó la severidad de quemaduras en el “área de influencia del corredor vial interoceánico sur, distrito de Las Piedras, Tambopata - Madre de Dios”. Utilizamos imágenes satelitales Sentinel-2 para probar el potencial de usar el índice espectral más común para evaluar la severidad del fuego, la relación de quemadura normalizada diferenciada (dNBR). Para esta evaluación, el dNBR se contrastó con datos de campo del índice de quemadura compuesto (CBI). Se encontró áreas quemadas de 18 388,64 ha en el nivel de Baja severidad, 3 749,70 ha en Moderada-baja, 499,48 ha en Moderada-alta, y 10,66 ha en Alta. El mayor porcentaje de área quemada (4,123%) se obtuvo para el nivel de Baja severidad mientras que el nivel más bajo correspondió a Alto (0,002%). La precisión conjunta de la clasificación de niveles severidad de quema obtenida de la matriz de confusión fue de 78% y una concordancia del estadístico kappa de 0,706 (Considerable). El dNBR fue un predictor relativamente fuerte con una medición de campo que evalúa los cambios en el ecosistema inducidos por quemaduras con mayor peso para los cambios de vegetación inducidos por incendios que los cambios producidos en el suelo, debido a que la relación entre profundidad de quemadura y dNBR no fue lo suficientemente fuerte como para justificar el uso independiente de este índice como predictor de profundidad de quemadura.

Palabras clave: Sensor óptico, Sentinel-2, NBR, dNBR, espacio temporal.

Abstract

An important feature of fire severity is the fire regime, which has high ecological and carbon cycle relevance. The study analyzed fire severity in the "Area of influence of the southern interoceanic road corridor, Las Piedras district, Tambopata - Madre de Dios". Here we used Sentinel-2 satellite imagery to test the potential of using the most commonly used spectral index for assessing fire severity, the differentiated normalized burn ratio (dNBR). For this evaluation, the dNBR was contrasted with field data from the Composite Burn Index (CBI). Burned areas of 18,388.64 ha were found at the low severity level, 3,749.70 ha at moderate-low, 499.48 ha at moderate-high, and 10.66 ha at high. The highest percentage of burned area (4.123%) was obtained for the Low severity level, while the lowest level corresponded to High (0.002%). The joint accuracy of the burn severity classification obtained from the confusion matrix was 78% and the kappa statistic agreement was 0.706 (Considerable). The dNBR was a relatively strong predictor with a field measure that assesses fire-induced ecosystem changes, with greater weight given to fire-induced vegetation changes than to soil changes, because the relationship between burn depth and dNBR was not strong enough to justify the independent use of this index as a predictor of burn depth.

Key words: Optical sensor, Sentinel-2, NBR, dNBR, spacetime.

Introducción

El incendio es uno de principales motores de perturbación en los bosques de la Amazonia (Bonilla-Aldana et al. 2019; de Andrade et al. 2020; Morresi et al. 2022). La frecuencia de incidencia de incendios en la Amazonia muestran un patrón significativo en superficie en la estación seca, presentando una variabilidad en funciones a los factores biofísicos, ambientales y antrópicos (Bonilla-Aldana et al. 2019; de Andrade et al. 2020; Morresi et al. 2022). Las variaciones de las condiciones climáticas como el estrés hídrico asociado al cambio climático son variables importantes en la periodicidad de los incendios en la Amazonia (Liverpool 2020; Dindaroglu et al. 2021; Deutsch y Fletcher 2022). De acuerdo a reportes del Instituto Nacional de Investigación Espacial del Brasil (INPE), se detectaron 72 843 incendios en el 2019, 83% más respecto al 2018 y la más alta desde el inicio de los registros en el 2013 (INPE 2020a; INPE 2020b). En esa tendencia, el bioma Amazónico perdió en el 2021 aproximadamente 2 millones de hectáreas de bosque primario, siendo la mayor perdida por la deforestación (1,57 millones de hectáreas, 78%). Las zonas más afectadas corresponden al “tramo del sur amazónico; sur de Brasil, Bolivia y Perú, como parte del norte de Colombia”. La pérdida de bosque presento una mayor magnitud en Brasil (73%), Bolivia (10%), Perú (8%) y Colombia (6%), mientras que aproximadamente el 22% corresponde a los incendios. Los incendios del 2002 al 2021 provocaron la pérdida de 6,7 millones de hectáreas debido a los incendios (RAISG 2022).

De acuerdo a la magnitud de los incendios en la Amazonia, podemos entender, que la severidad de quemadas es uno de los principales factores que influyen en las respuestas de los ecosistemas, por lo que su evaluación es crucial para orientar de manera efectiva las estrategias de manejo después del incendio orientados a encaminar propuestas de restauración del paisaje impactado (Bonilla-Aldana et al. 2019; de Andrade et al. 2020; Barni et al. 2021; dos Reis et al. 2021; Arjasakusuma et al. 2022). En ese sentido, desde un perspectiva ecológica, la severidad podríamos definirla como el cambio en la magnitud ambiental producido por el fuego (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999c; Key y Benson 1999d; Key y Benson 1999a; Key y Benson

2002; Key y Benson 2005; Key y Benson 2006; Deshpande et al. 2022a). El uso de severidad es un término comúnmente usado en sensoramiento remoto (Key y Benson 2006), y son medidos por diferencia de periodos; antes y después del incendio (Miller y Thode 2007; Liverpool 2020; Mpakairi et al. 2020; Morresi et al. 2022). Este criterio, relaciona las consecuencias del fuego y la resiliencia del entorno (Lutes et al. 2006). El cartografiado de la severidad de quemados con imágenes de satélite previas y posteriores al incendio, usualmente se analiza mediante índices bitemporales basados en la Relación de Quema Normalizada (NBR), como el índice de quemado normalizado diferenciado (dNBR), el dNBR relativo (RdNBR) y el índice de quemado relativizado (RBR) (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999c; Key y Benson 1999d; Key y Benson 2002; Key y Benson 2005; Miller y Thode 2007; Miller et al. 2009; Porcher et al. 2018; Liverpool 2020; Nasery y Kalkan 2020; Llorens et al. 2021; Singh et al. 2021; Afira y Wijayanto 2022; Arjasakusuma et al. 2022; Morresi et al. 2022; Seydi et al. 2022). El uso de índices bitemporales implica una correcta selección de imágenes, las imágenes deben cumplir requisitos temporales de coincidencia y estacionalidad óptima (Morresi et al. 2022).

En la Amazonia, el momento óptimo corresponde al inicio y final de la estacionalidad con mayor temperatura y menor humedad del paisaje, donde la vegetación presenta un estrés hídrico por ausencia de agua (Lutes et al. 2006; Bonilla-Aldana et al. 2019; dos Reis et al. 2021). Por otro lado, los mosaicos de los bosques Amazónicos, presentan una gran variabilidad en función de la fenología vinculada con la fisiografía del terreno (Dindaroglu et al. 2021).

La correcta selección de imágenes, es un desafío para la evaluación de la severidad de las quemados con índices bitemporales (Key y Benson 1999c; Key y Benson 2005; Morresi et al. 2022). Nuestra hipótesis es que la reflectancia de la vegetación en un paisaje heterogéneo mediante índices bitemporales puede incrementar favorablemente el mapeo de la severidad de las quemados, mediante la distinción de alertas tempranas o intermedias durante la estacionalidad seca de áreas afectadas y no afectadas por los incendios.

Para ello, se usó imágenes de satélite Sentinel-2 , considerando la distancia a las nubes y las sombras de las nubes, cantidad de neblina atmosférica, y el potencial de la resolución espacial y radiométrica, con el objetivo de determinar de forma estática compuestos de reflectancia en las áreas a evaluar (Roteta et al. 2019; Roy et al. 2019; Mpakairi et al. 2020).

INDICE

Dedicatoria	iii
Agradecimientos.....	iv
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	vii
INDICE	x
Índice de Tablas.....	xiii
Índice de Figuras	xiv
Índice de anexos.....	xv
CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Formulación del problema	3
1.2.2 Problemas específicos	3
1.3 Objetivos de la investigación.....	3
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Variables de la investigación	4
Variable Dependiente	4
Variable Independiente	4
1.5 Operacionalización de variables.....	4
1.6 Hipótesis.....	5
1.7 Justificación e importancia	6
1.8 Consideraciones éticas	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	8

2.1	Antecedentes de la investigación.....	8
2.2	Base teórica.....	11
2.2.1	Vegetación.....	11
2.2.2	Severidad de las quemaduras para la evaluación del paisaje	12
2.2.3	Debate sobre la gravedad de las quemaduras ecológicas.....	13
2.2.4	Teledetección pasiva	14
2.2.5	Medida de gravedad en el suelo: el índice compuesto de quemaduras	15
2.2.5	Índice compuesto de Quemaduras (CBI).....	16
2.2.6	Ratio de quemado normalizado (NBR)	16
2.2.7	Programa Copérnico.....	17
2.2.8	Sentinel-2.....	17
2.2.9	Software de procesamiento de imágenes SNAP ESA.....	20
	Google Earth Engine.....	20
	ArcGIS Pro.....	21
2.3	Definición de términos	21
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN		23
3.1	Tipo de estudio.....	23
3.2	Diseño del estudio	23
3.3	Delimitación espacial y temporal.....	23
3.3.1	Clima e hidrografía	25
3.4	Población y muestra	25
3.5	Método y técnicas	27
3.6	Tratamiento de datos	28
3.6.1	Procesamiento de datos	28
✓	Tratamiento y análisis de la imagen SAR	29
3.6.2	Precisión de datos	30

3.6.4 Análisis estadístico.....	32
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
4.1 Cuantificación de la superficie deforestada por quemas mediante el sensor óptico Sentinel-2 mediante un enfoque bilateral (dNBR) del Índice de Quemado Normalizado (NBR) en el área de influencia del corredor Vial Interoceánico Sur (distrito de Las Piedras).....	34
4.2 Niveles de severidad de quemas	40
4.3 Precisión de índice (dNBR)	44
CONCLUSIONES.....	46
SUGERENCIAS	47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
ANEXOS	64

Índice de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de variables	19
Tabla 2. Resoluciones radiométricas y espaciales de Sentinel-2.....	32
Tabla 3. Información de adquisición de imágenes Sentinel-2	42
Tabla 4. Escala del Índice Normalizado de Área Quemada (NBR)	43
Tabla 5. Niveles de severidad en incendios obtenidos a partir del dNBR	44
Tabla 6. Niveles de severidad de CBI para comparar con valores de dNBR	45
Tabla 7. Valores del coeficiente kappa	45
Tabla 9. Matriz de precisión (matriz de confusión e Índice de kappa) de datos de dNBR	59

Índice de Figuras

	Pág.
Figura 1. Descripción general de los sensores.	29
Figura 2. Ubicación de área de estudio.....	38
Figura 3. Distribución de muestras distribuidas al azar por estratos en el área de estudio	40
Figura 4. Niveles de severidad según el Índice Compuesto de quemaduras (CBI): sin quemar (a), severidad baja (b), severidad moderada-baja (c), severidad moderada-alta (d) y severidad alta (e).....	46
Figura 5. Perfil de índice NBR pre incendio en el área de estudio	49
Figura 6. Perfil de índice NBR post incendio en el área de estudio.....	50
Figura 7. Severidad de pre quema del área de estudio usando el índice de enfoque monolateral NBR derivado de imágenes Sentinel-2 MSI	51
Figura 8. Severidad de post quema del área de estudio usando el índice de enfoque monolateral NBR derivado de imágenes Sentinel-2 MSI	51
Figura 9. Área quemada antes, después, y diferencia NBR.....	52
Figura 10. Área por nivel de quema antes y después con un enfoque monolateral (NBR)	53
Figura 11. Perfil de índice dNBR en el área de estudio.....	54
Figura 12. Severidad de quema del área de estudio usando el índice de enfoque bilateral dNBR derivado de imágenes Sentinel-2 MSI (tonalidad de grises).....	55
Figura 13. Severidad de quema del área de estudio usando el índice de enfoque bilateral dNBR derivado de imágenes Sentinel-2 MSI (color). ..	56
Figura 14. Área quemada por nivel de severidad de quemas con un Índice de enfoque bilateral dNBR derivado de imágenes Sentinel-2 MSI.	57

Índice de anexos

	Pág.
Anexo 1. Matriz de consistencia.	79
Anexo 2. Ficha de validación de campo.....	80
Anexo 3. Puntos de muestreo distribuidos al azar por estratos en el área de estudio	81
Anexo 4. Panel fotográfico	96

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción del problema

La magnitud del cambio ecológico provocado por el fuego, es definida como severidad de quemaduras (García-Llamas et al. 2019), y es descrita como uno de los factores de mayor impacto en el efecto del ecosistema Amazónico (Tanase et al. 2015a; García-Llamas et al. 2019). El fuego afecta la dinámica de la regeneración de las plantas después de un incendio, la composición y estructura de la comunidad (Dzwonko et al. 2015; García-Llamas et al. 2019), pero también, puede aumentar los procesos de degradación del suelo mediante la alteración de las propiedades físicas y químicas del suelo, la acción microbiana y el deterioro del suelo (Bouaicha et al. 2022). En ese sentido, la generación de cartografía oportuna y confiable de la severidad de las quemaduras reflejen los cambios en la dinámica de la vegetación y las propiedades en el manejo de la restauración del ecosistema después del incendio (Miller et al. 2016; Rivera-Huerta et al. 2016; Morresi et al. 2022).

Generalmente, la evaluación de la severidad de quemaduras se ha realizado levantando información de campo mediante el índice GeoCBI y Índice de Quemaduras Compuesto (CBI) (Key y Benson 1999a; Key y Benson 2005; Miller et al. 2016; Morresi et al. 2022). Sin embargo, ello implica altos costos y procesos lentos con una configuración espacial-temporal restringida de los procesos ecológicos post incendio (Chuvieco et al. 2012). La captura de los impactos y efectos del fuego en el paisaje por sensores de teledetección es posible por los cambios espectrales y térmicos en la superficie terrestre, relacionados a la combustión de la vegetación y la exposición del suelo (Key y Benson 1999c; Fernández-Manso et al. 2016; Roteta et al. 2019; Roy et al. 2019; Bar et al. 2020; Afira y Wijayanto 2022; Arjasakusuma et al. 2022). Sobre esta base física, las técnicas de sensoramiento remoto

proporcionan un método más eficaz y rentable al trabajo de campo para evaluar y cuantificar la severidad de las quemaduras en una amplia gama espacial y temporal del paisaje afectado (Roteta et al. 2019).

En la actualidad, los sensores multiespectrales de Sentinel-2 (10 m, 20 m, y 60 m) proporcionan colecciones de imágenes de resolución espacial, espectral adecuada disponibles gratuitamente, y temporal (5 días) (Brown et al. 2018). Por otro lado, existe un número limitado de estudios con Sentinel-2 para evaluar la severidad de las quemaduras, por lo que el análisis con estos sensores siguen siendo un área atractiva de investigación para detectar y mejorar los procedimientos de medición de los efectos posteriores a la quema (Morresi et al. 2022).

Los métodos más comunes como los índices espectrales basados en las “bandas de Infrarrojo Cercano (NIR) e Infrarrojo de Onda Corta (SWIR)”, específicamente el Índice de Quemado Normalizado (NBR) y sus enfoques bitemporales, como el Índice de Quemado Normalizado Diferenciado (dNBR) y el Quemado Normalizado Diferenciado Relativizado (RdNBR), se han mostrado como técnicas óptimas de la severidad de las quemas (Miller y Thode 2007; Miller et al. 2009; Miller et al. 2016). Estas características se comportan adecuadamente para las zonas no afectadas o muy afectadas por el fuego, pero muestran una menor eficacia a la hora de discriminar los niveles de gravedad intermedios, donde interactúan múltiples factores (Alarcon-Aguirre et al. 2022).

En consecuencia, a pesar de que existe el índice quemas y sus variantes bilaterales para la severidad de quemas, no hay una uniformidad de los índices de teledetección óptimos (Miller y Thode 2007; Miller et al. 2009; Miller et al. 2016; Liverpool 2020; Mpakairi et al. 2020; Nasery y Kalkan 2020; Alarcon-Aguirre et al. 2022). Es necesario realizar más estudios que evalúen el mejor comportamiento de los índices espectrales y los sensores satelitales, en nuestro estudio, el comportamiento del Sentinel-2 en la detección de la severidad de quemas.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál será el nivel de severidad de las quemaduras mediante el sensor óptico Sentinel-2 mediante un enfoque bilateral (dNBR) del Índice de Quemado Normalizado (NBR) en un paisaje heterogéneo del área de influencia del corredor Vial Interoceánico Sur Tramo III del distrito de Las Piedras - Madre de Dios, periodo 2022?

1.2.2 Problemas específicos

P.E.1 ¿Cuánto será la superficie de quemaduras mediante imágenes de Sentinel-2 a través de un enfoque bilateral (dNBR) del Índice de Quemado Normalizado (NBR) en el periodo 2022?

P.E.2 ¿Cuánto son los niveles de severidad de quemaduras mediante imágenes de Sentinel-2 a través de un enfoque bilateral (dNBR) del Índice de Quemado Normalizado (NBR) en el periodo 2022?

P.E.3 ¿Cuál será la precisión de los mapas de severidad de quemaduras basados en la relación del índice bitemporal (dNBR) y datos del Índice de Quemaduras Compuesto (CBI)?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Analizar la severidad de las quemaduras mediante imágenes Sentinel-2 mediante un enfoque bilateral (dNBR) del Índice de Quemado Normalizado (NBR) en un paisaje heterogéneo del área de influencia del corredor Vial Interoceánico Sur Tramo III del distrito de Las Piedras - Madre de Dios, periodo 2022.

1.3.2 Objetivos específicos

- O.E.1 Cuantificar la superficie de quemas mediante imágenes de Sentinel-2 a través de un enfoque bilateral (dNBR) del Índice de Quemado Normalizado (NBR) en el periodo 2022.
- O.E.2 Estimar los niveles de severidad de quemas mediante imágenes de Sentinel-2 a través de un enfoque bilateral (dNBR) del Índice de Quemado Normalizado (NBR) en el periodo 2022.
- O.E.3 Validar los mapas de severidad de quemas basados en la relación del índice bitemporal (dNBR) y datos del Índice de Quemaduras Compuesto (CBI).

1.4 Variables de la investigación

1.4.1 Identificación de variables

Variable Dependiente

- ✓ Severidad de quemas en el periodo 2022.

Variable Independiente

- ✓ Quemas en la unidad mínima de la imagen (píxel) en la imagen óptica Sentinel-2.

1.5 Operacionalización de variables

Las variables y su operacionalización de detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Operacionalización de variables

Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Ítems
Variable independiente				
En enfoque monolateral NBR de la cobertura en la unidad mínima de la imagen (píxel) en la imagen óptica Sentinel-2 permite cuantificar el Índice de Quemado Normalizado.	Determinar el pre Índice de Quemado Normalizado (NBR) en el periodo 2022.	Área de cicatriz de quema a través de NBR.	NBR	P.E.1
El enfoque bilateral (dNBR) permite medir el nivel de severidad de quemas.	Estimar los niveles de severidad de quemas mediante un enfoque bilateral (dNBR)	Área de cicatriz de quemas por categoría de severidad.	Superficie total (ha).	P.E.1 P.E.2
La relación del índice bitemporal (dNBR) y datos del Índice de Quemaduras Compuesto (CBI) permite validar el nivel de precisión de los mapas de severidad de quemas.	Validar los mapas de severidad de quemas basados en la relación del índice bitemporal (dNBR) y datos del Índice de Quemaduras Compuesto (CBI).	Nivel de precisión de resultados mediante la matriz de confusión y Kappa.	Matriz de confusión e índice de Kappa.	P.E.3
Variable dependiente				
Comportamiento de la severidad de quemas mediante el enfoque bilateral dNBR en NBR y dNBR en el periodo 2022.	Severidad de quemas mediante NBR y dNBR.	Rango espectral de índices ópticos Sentinel-2.	Unidades de índice.	P.E.1 P.E.2 P.E.3

1.6 Hipótesis

Hipótesis nula (H₀): La reflectancia de la vegetación en un paisaje heterogéneo del área de influencia del corredor Vial Interoceánico Sur Tramo III del distrito de Las Piedras en el año 2022 mediante índices bitemporales, no favorece el mapeo de la severidad de las quemas ni la distinción de alertas tempranas o intermedias durante la estacionalidad seca de área afectadas y no afectadas por los incendios.

Hipótesis alterna (H₁): La reflectancia de la vegetación en un paisaje heterogéneo del área de influencia del corredor Vial Interoceánico Sur Tramo III del distrito de Las Piedras en el año 2022 mediante índices bitemporales, puede incrementar favorablemente el mapeo de la severidad de las quemadas y la distinción de alertas tempranas o intermedias durante la estacionalidad seca de áreas afectadas y no afectadas por los incendios.

1.7 Justificación e importancia

El sensoramiento remoto es una de las tecnologías más utilizadas para evaluar el impacto de los incendios, es utilizado antes, durante y después, si como la detección de incendios. El monitoreo permite planificar una restauración o rehabilitación debido al alcance inmediato del estado del paisaje (Arjasakusuma et al. 2022). Las observaciones se realizan mediante plataformas de teledetección óptica y de RADAR con diferentes características técnicas con imágenes de observaciones repetidas (Brown et al. 2018; Bar et al. 2020). Uno de los sensores más utilizados son del programa Landsat, sin embargo, en los últimos años el programa Copernicus viene proporcionando imágenes ópticas (Sentinel-2) y SAR (Sentinel-1) muy útiles en la detección de las quemadas y su severidad (Brown et al. 2018; Bar et al. 2020). Para ello, el análisis y procesamiento espectral de imágenes ópticas como el Sentinel-2 se ha plasmado en métodos basados en índices espectrales, como el índice de quemado normalizado (NBR) y sus variantes bilaterales (como dNBR) como los más usados y precisos para identificar la gravedad de las quemadas (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999c; Fernández-Manso et al. 2016; Roy et al. 2019; Arjasakusuma et al. 2022; Morresi et al. 2022; Seydi et al. 2022).

Los umbrales diferenciados de los niveles de severidad mediante índices espectrales previo y posterior permite resaltar el cambio de los impactos del fuego y detectar de manera efectiva los perímetros de áreas quemadas (Key y Benson 1999c; Key y Benson 1999a; Bar et al. 2020; Nasery y Kalkan 2020; Afira y Wijayanto 2022). Es innegable la gran ventaja que ofrecen estas técnicas, dependerá de los diferentes tipos de vegetación; como la

regeneración asociada a los tiempo de la evaluación (antes, durante y después del incendio) (Dzwonko et al. 2015). Sin embargo, Sentinel-2 al tratarse de un sensor óptico, la captura de información puede verse limitada por la interferencia de la nube y la sombra de la nube, la misma que puede superarse obteniendo imágenes con la menor presencia de anomalías climáticas (Fernández-Manso et al. 2016; Brown et al. 2018; Roteta et al. 2019; Roy et al. 2019; Bar et al. 2020).

A pesar de todas las ventajas de la percepción remota en la detección de quemas, es necesario explorar más a fondo el rendimiento de los datos ópticos (Sentinel-2) (Arjasakusuma et al. 2022) y refinar el método en diferentes coberturas, como el bioma Amazónico para aumentar la precisión de la detección de áreas quemadas. Ello posibilitará su aplicación en futuros estudios tratando de mejorar el método y de aplicación en el monitoreo de la Amazonia con fines de gestión del territorio.

1.8 Consideraciones éticas

La investigación utilizó criterios metodológicos sobre procesamiento de imágenes Sentinel-2, para ello se empleó los softwares “SNAP ESA y Google Earth Engine de plataforma abierta, así como el ArcGisPro 2,9®, ArcGIS 10,8® del CETEGERN”, licencias que fueron adquiridas en marco del proyecto del Consorcio Madre de Dios (ICAA-USAID).

En cuanto a normas nacionales, Este estudio da cumplimiento a las políticas marco del “Consejo Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA) creado mediante Decreto N° 20643”.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

Afira y Wijayanto (2022) aplicaron enfoques monotemporales y multitemporales Sentinel-2 para la medición de áreas quemadas en Rokan Hilir Regency, Indonesia. Los enfoques multitemporales utilizaron dos algoritmos de aprendizaje automático de conjunto diferentes (Random Forest y XGBoost) y usaron seis índices espectrales compuestos de la “relación de quema normalizada diferenciada (dNBR)”, “la relación de quema normalizada 2 diferenciada (dNBR2)”, “el índice de vegetación de diferencia normalizada” como entradas del modelo. Los índices dNBR, dMIRBI y dNBR2 son los que más contribuyen al modelo XGBoost. En general, tanto los enfoques monotemporales como los multitemporales detectan satisfactoriamente el área quemada.

Arjasakusuma et al. (2022) realizaron el mapeo mensual de áreas quemadas utilizando la integración de sensores múltiples de Sentinel-1 y Sentinel-2 y aprendizaje automático de incendios en la provincia de Sumatra del Sur, Indonesia (2019), donde la integración de datos espectrales con Sentinel-2 redujo la fuente de clasificación errónea de áreas quemadas a la detección falsa de la conversión de cobertura terrestre no relacionada con incendios, como las actividades de tala, con una precisión de 76,69% a 89,80%.

Morresi et al. (2022) mapearon la severidad de las quemaduras en los Alpes italianos occidentales a través de compuestos de reflectancia fenológicamente coherentes derivados de las imágenes de Sentinel-2. El estudio se centró en 10 incendios forestales ocurridos en zonas montañosas de la región de Piamonte (Italia) durante el otoño de 2017 tras un período de sequía severo y prolongado. Los datos del índice compuesto de quemaduras y los índices bitemporales exhibieron una fuerte relación no lineal ($R^2 > 0,85$) usando

imágenes emparejadas o compuestos de reflectancia. Los mapas de gravedad de quemaduras lograron una precisión de clasificación general que fue del 76,9 % al 83,7 % (Kappa entre 0,61 y 0,72) y el NBR diferenciado relativo (RdNBR) logró los mejores resultados en comparación con otros índices bitemporales (NBR diferenciado y relación de quemado relativizado).

Fernández et al. (2021) La región suroeste de la Amazonía peruana (desde 2011, 2013 y 2016 en el distrito de Las Piedras, Madre de Dios) se caracterizó por focos de calor e incendios forestales. Utilizaron imágenes Landsat-5 y -8 para para 2011 y 2013, mientras que para 2016 Sentinel-2, todas adaptadas al cociente normalizado de quema (NBR). El nivel precisión con datos de campo mostraron 85,57% de manera general y un índice de Kappa de 0,8101. Las áreas afectadas fueron de 2 535, 91 ha, 1 720,80 ha, y 7 081,74 ha para 2011, 2013 y 2016, respectivamente.

Llorens et al. (2021) trazaron una metodología para determinar áreas quemadas por incendios forestales y los grados de severidad de las quemaduras utilizando datos de Sentinel-2 en el incendio de octubre de 2017 en la Península Ibérica. Se obtuvo una extensión mayor a 250 000 ha y 4 “niveles de severidad de quemaduras (baja, moderada, alta y muy alta)”. En cuanto a los niveles de gravedad de las quemaduras, el índice de separabilidad (SI) y el estadístico Kappa (k) muestran una alta correlación entre Sentinel-2 y EFFIS (valores SI superiores a uno en todos los casos y k superior a 0,69, respectivamente).

Singh et al. (2021) cartografiaron los residuos de arroz que se queman y generan contaminantes utilizando datos de Sentinel-2 en la parte norte de la India. Se tomaron conjuntos de datos que abarcan desde antes de la quema (septiembre) hasta después de la quema (noviembre) para el año 2018 y se evaluaron la variación en el color y los espectros de las superficies quemadas y no quemadas. Dos índices ampliamente aceptados para la evaluación del área quemada; el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y la Normalized Burn Ratio (NBR) se comparó como indicadores numéricos para superficies quemadas. NBR se encontró mejor en la discriminación espectral

de la superficie quemada y no quemada con una precisión general del 91,38% en comparación con NDVI (precisión = 75,86%).

van Dijk et al. (2021) analizaron la firma espectral de falsos positivos en la estimación de quemas de cosechas agrícolas utilizando datos de Sentinel-2 de 2017 y 2018 en California y Utah, EE. UU. Los índices que combinaron las bandas 11 y 12 de Sentinel-2 (SSWIR y LSWIR) fueron los mejores para distinguir entre áreas quemadas y no quemadas. Curiosamente, esta no es una combinación de las mejores bandas individuales de Sentinel-2 para la discriminación, lo que probablemente tenga que ver con el hecho de que la región espectral infrarroja de onda corta es menos sensible a la variabilidad en las características de la vegetación antes del incendio y los residuos de combustión en comparación la región espectral NIR.

Valdez-Zavala et al. (2019) evaluaron áreas quemadas mediante el índice Normalized Burn Ratio (NBR) de imágenes Landsat en el suroeste de Chihuahua (México) entre los años 2013-2017. El NBR cuantificó 1 260,73 ha de áreas quemadas y 1 030,12 ha mostraron cambio de cobertura y uso del suelo; la diferencia permaneció intacta.

Anaya et al. (2018) en su estudio, consideraron áreas propensas a incendios como la selva amazónica colombiana, la transición del bosque chiquitano al bosque amazónico en Bolivia y El Chaco en Argentina. Utilizaron imágenes Landsat 5-TM y 8-OLI mediante el Índice quema normalizada (NBR) y el enfoque bilateral dNBR y su variante relativa RdNBR mediante la plataforma Google Earth Engine. El análisis reveló que el modelo predijo con precisión el 85% de las áreas quemadas en el Bosque Chiquitano de Bolivia, el 63% en los bosques amazónicos de Colombia y el 69% en El Chaco de Argentina.

Fuentes (2015) realizó un monitoreo de las quemas en la Amazonia de Bolivia (Pando) en el año 2015 con datos Landsat 8 OLI (Operacional Land Imager), para ello aplicó el Cociente Normalizado de Quema (NBR) con enfoque bilateral. La tasa de precisión fue del 88%, la tasa de error fue del 9% y el error de comisión fue del 3%. El reporte cuantificó 38 519 hectáreas por incendios, que representa 0,60% de la superficie del departamento.

Miller y Thode (2007) cuantificaron la gravedad de las quemaduras en un paisaje heterogéneo con una versión relativa de la relación de quema normalizada delta (dNBR). Las comparaciones de clasificaciones derivaron de umbrales de dNBR y datos relativos de dNBR para incendios individuales. Las clasificaciones de datos relativos de dNBR produjeron en promedio, precisiones más altas para la categoría de gravedad de quema alta que las clasificaciones de dNBR derivadas de un conjunto universal de umbrales aplicados a varios incendios.

Epting et al. (2005) evaluaron índices de detección remota de la severidad de las quemaduras en el interior de Alaska utilizando Landsat TM y ETM+, los índices incluyeron bandas simples, índices de vegetación y componentes multivariados, donde evaluaron los valores de índice post-quemaduras y pre/post-quemaduras diferenciados. Los índices se evaluaron mediante el examen de la correlación entre cada índice de detección remota y los valores del índice compuesto de quemaduras (CBI) basados en el campo. La relación de quemado normalizado (NBR), que incorpora bandas de infrarrojo cercano y medio, se clasificó entre los tres índices principales para cada uno de los cuatro quemados usando imágenes de post-quemado, y para tres de los cuatro quemados usando pre y post-quemado. El NBR tuvo altas correlaciones con el CBI basado en el campo en clases de bosques cerrados de hoja ancha, mixtos y latifoliados.

2.2 Base teórica

2.2.1 Vegetación

La vegetación, el elemento biótico más predominante en la biosfera, es un término general para la vida vegetal de una región. Se refiere a la cobertura del suelo que proporcionan las plantas (Rangel-Ch y Velázquez 1997). Los científicos dividen la tierra de la Tierra en lo que se llama regiones de vegetación. Estas áreas tienen distintos tipos de plantas, suelos y patrones climáticos (Rangel-Ch y Velázquez 1997).

2.2.2 Severidad de las quemaduras para la evaluación del paisaje

Hay que admitir que todavía hay cierta discrepancia en la forma en que los investigadores y los gestores utilizan el término "gravedad o severidad de las quemaduras". El hecho de que estos conceptos se conviertan en una práctica estándar depende de la repetición de las pruebas y la aceptación. Algunas de las discrepancias surgen de la incoherencia en la combinación de los términos relevantes: fuego, quemadura gravedad e intensidad. Por lo tanto, es útil definirlos primero para los métodos de detección. Los significados son breves según la literatura basado en los matices del incendio forestal (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999c; Key y Benson 1999d; Key y Benson 1999a; Key y Benson 2002; Key y Benson 2005; Key y Benson 2006; Liverpool 2020; Arjasakusuma et al. 2022).

Fuego: La luz, las llamas y el calor son signos del fenómeno de la combustión. Un momento en el que hay combustión lenta y actividad de llama. Quemadura: Lesión, daño o efecto causado por el calentamiento. las secuelas de un incendio o un lugar donde uno ha ocurrido previamente. Severidad: la cantidad de calor que produjo el fuego. La magnitud del cambio ambiental provocado por el incendio o el costo socioeconómico resultante. Intensidad: La cantidad de fuerza o energía gastada se llama intensidad. Esto nos permite desarrollar más algunas ideas:

Intensidad del fuego: La magnitud del calor producido por el fuego es una medida empírica que calibra el estado del fuego durante la combustión. Se suele definir en referencia a la intensidad de la línea de fuego, que es igual a la producción de energía por longitud del frente de fuego por unidad de tiempo. Puede medirse mediante lecturas de termopares en series temporales, como en situaciones experimentales, o más comúnmente en incendios forestales, en proporción a la longitud de la llama observada y a la velocidad de propagación. La intensidad del fuego puede dividirse en dos componentes de calor: hacia abajo penetración en el suelo y la transferencia ascendente a la vegetación y a la atmósfera. Estos dependen del tiempo de la llama residual dependen del tiempo residual de la llama y son una función de las características del combustible y del clima. Una analogía con la intensidad del

fuego es la intensidad de la tormenta intensidad de las tormentas, que utiliza parámetros como la velocidad del viento y la tasa de precipitación para describir la fuerza de una tormenta (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999c; Key y Benson 1999d; Key y Benson 1999a; Key y Benson 2002; Key y Benson 2005; Key y Benson 2006; Liverpool 2020; Arjasakusuma et al. 2022).

Severidad de quemas: Los impactos socioeconómicos asociados a los incendios pueden medirse directamente en términos de como el costo de supresión, el costo de rehabilitación, la pérdida de propiedades o la causalidad humana. Para esta discusión, sin embargo, nos centramos en el grado de cambio ambiental causado por el fuego. Este resultado del fuego es el resultado de los incendios como efecto acumulativo del fuego en las comunidades ecológicas que componen el paisaje (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999c; Key y Benson 1999d; Key y Benson 1999a; Key y Benson 2002; Key y Benson 2005; Key y Benson 2006; Liverpool 2020; Arjasakusuma et al. 2022).

2.2.3 Debate sobre la gravedad de las quemas ecológicas

No ha surgido ninguna norma común para medir la gravedad de las quemaduras desde el punto de vista ecológico. De hecho, puede haber muchas formas válidas de ver la gravedad de las quemaduras, dependiendo de la escala y de los medios particulares disponibles para medirla. para medirla. Por otro lado, un concepto fundamental de gravedad de las quemaduras como la magnitud de cambios puede llevar a diseñar medidas de severidad que sean al menos compatibles en múltiples escalas (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999c; Morresi et al. 2022).

La forma en que los investigadores deciden medir la gravedad de las quemaduras ecológicas está estrechamente relacionada con los objetivos de la evaluación de las quemaduras. En la mayoría de los casos, depende de la escala, por lo que las definiciones reflejan el detalle y la complejidad de los sistemas descritos. Por ejemplo, puede estar interesado principalmente en un solo factor, como el potencial de recuperación herbácea, en ese sentido, la

severidad puede entenderse y escalarse directamente por una sola medida, como la profundidad de la carbonización o el chamuscado en el suelo, y esta medida puede ser muy adecuada para evaluar áreas pequeñas, pero el método sería difícil de aplicar en áreas grandes. Hay literalmente miles de componentes ecológicos individuales que podrían utilizarse para indicar la gravedad hasta cierto punto, en cierta medida, cada especie responde potencialmente de forma única al fuego y, dependiendo de los objetivos, el cambio en la abundancia de una sola especie puede ser lo más relevante para describir la severidad (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999c; Morresi et al. 2022).

En la ecología del paisaje, se debe considerar la gravedad de las quemaduras de forma holística, de manera que representa un de los efectos en grandes áreas. Esto permite cartografiar y comparar quemas enteras compuestas por muchas comunidades que ocupan diversas situaciones topográficas, climáticas y edáficas. Aquí, la gravedad es tridimensional, repartida entre múltiples componentes y estratos de la comunidad y a través de unidades de que casi siempre muestran una considerable heterogeneidad (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999c; Morresi et al. 2022).

2.2.4 Teledetección pasiva

A diferencia de los sensores activos, que transmiten su propia energía a la superficie u objeto que se está estudiando, los sensores pasivos no lo hacen. Los rayos del sol que se reflejan en el objetivo se utilizan en la teledetección pasiva. Debido a esto, sólo se puede utilizar cuando hay suficiente luz solar; de lo contrario, nada se reflejará. Utilizando sensores multiespectrales o hiperespectrales, la teledetección pasiva mide la cantidad obtenida utilizando varias combinaciones de bandas. El número de canales (dos longitudes de onda o más) distingue estas combinaciones (Kerle et al. 2004; Jensen 2009).

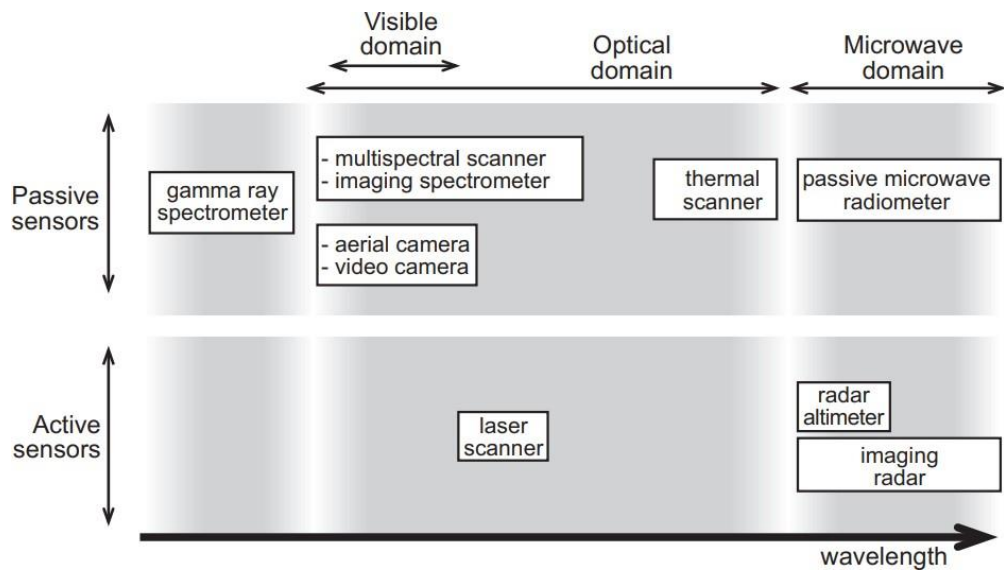


Figura 1. Descripción general de los sensores.

Fuente: Kerle et al. (2004).

2.2.5 Medida de gravedad en el suelo: el índice compuesto de quemaduras

Estos métodos se utilizan para derivar valores de índice que resumen los efectos generales del fuego dentro de un área, es decir, el estado medio de las quemaduras en una parcela. Están diseñados para aplicaciones de teledetección de resolución moderada, asumiendo una perspectiva de paisaje de regiones quemadas enteras. Como tal, las parcelas son bastante grandes y muy espaciadas (>90 metros de distancia). Los datos de campo son relativamente rápidos de recoger (unos 30 minutos por parcela), basándose principalmente en la estimación y el juicio ocular. Esto permite muestrear eficazmente un número representativo de parcelas muestrear eficazmente un número representativo de parcelas en grandes áreas. La tarea principal es abarcar el rango de variación encontrado dentro de las quemaduras, abarcando el mayor número posible de efectos del fuego y entornos biofísicos (Key y Benson 1999a; Afira y Wijayanto 2022; Arjasakusuma et al. 2022; Morresi et al. 2022).

Una característica del muestreo es que las condiciones medias de muchos factores se consideran en múltiples estratos para obtener el valor de gravedad

de una parcela. Como tal, el enfoque se ha denominado Índice Compuesto de Quemaduras (CBI). Lógicamente, es paralelo a la forma en que los sensores del satélite Landsat promedian todas las características dentro de un píxel para registrar los valores de brillo multiespectrales utilizados para modelar la gravedad de las quemaduras (Key y Benson 1999a; Afira y Wijayanto 2022; Arjasakusuma et al. 2022; Morresi et al. 2022).

2.2.5 Índice compuesto de Quemaduras (CBI)

El CBI ofrece un índice para representar la gravedad de los efectos del fuego cuando se suman todos los estratos en el área de muestra de una comunidad. Las calificaciones toman en cuenta aspectos como la salud y el color del suelo, cuánto combustible o vegetación se usó, qué tan rápido volvieron a crecer las plantas quemadas, qué tan rápido nuevas especies colonizaron el área y qué tan rápido los árboles se volvieron negros o se quemaron (Key y Benson 1999a; Afira y Wijayanto 2022; Arjasakusuma et al. 2022; Morresi et al. 2022).

2.2.6 Ratio de quemado normalizado (NBR)

Los datos multiespectrales de los sensores ópticos contienen una gran cantidad de información sobre las características de la Tierra. Cada banda espectral presenta un comportamiento diferente según las características de la superficie, estructura de la vegetación, composición mineral, contenido de agua, y la productividad. Se pueden utilizar algoritmos matemáticos para combinar valores de brillo de diferentes bandas para mejorar, aislar y analizar datos sobre características particulares. El NBR integra dos bandas que más responden a la quema; la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la segunda banda de infrarrojos de onda corta (SWIR) para obtener la NBR. Para medir la diferencia se usa la variante bilateral dNBR, que proporciona una medida del proceso del antes y después de la quema (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999c; Key y Benson 2006; Miller y Thode 2007; Miller et al. 2009; Miller et al. 2016; Bar et al. 2020; Barni et al. 2021; Afira y Wijayanto 2022; Arjasakusuma et al. 2022; Morresi et al. 2022).

2.2.7 Programa Copérnico

El programa Copérnico es uno de los programas emblemáticos europeos que proporciona datos e información gratuitos y abiertos basándose en imágenes satelitales, modelos y datos in situ. Más que solo datos e información, el programa Copérnico proporciona modelos de última generación para ser utilizados con fines sociales y medioambientales. Basado en datos de sensores in situ (no espaciales) y satélites de observación de la Tierra, el programa Copernicus proporciona servicios de información. La Comunidad Europea (CE) supervisa y gestiona el programa. Se están implementando con la asistencia de la Agencia Espacial Europea (ESA), la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT), el Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Plazo Medio (ECMWF), las agencias de la Unión Europea (UE), y Océano Mercator (Torres et al. 2012; Li et al. 2020).

Copernicus ha sido creado específicamente para satisfacer las necesidades de los usuarios. La familia Sentinel de satélites dedicados y los satélites comerciales y gubernamentales actualmente operativos contribuyen a Copernicus. Los satélites Sentinel están fabricados especialmente para satisfacer las demandas de los servicios de Copernicus y sus clientes. La UE ha iniciado un proceso para poner en órbita una constelación de casi 20 satélites adicionales para 2030 desde el lanzamiento de Sentinel-1A en 2014. El llamado componente espacial Copernicus consta de Sentinel-1: servicios terrestres y marítimos (Sentinel-1A lanzado en 2014, Sentinel-1B lanzado en 2016), Sentinel-2: monitoreo terrestre (Sentinel-2A lanzado en 2015, Sentinel-2B lanzado en 2017), Sentinel-3: pronóstico oceánico, monitoreo ambiental y climático (Sentinel-3A lanzado en 2016, Sentinel-3B lanzado en 2018), Sentinel-4: carga útil de monitoreo atmosférico (2019) (Torres et al. 2012; Li et al. 2020).

2.2.8 Sentinel-2

Los datos para la teledetección terrestre los proporciona la flota de satélites Sentinel. La misión Sentinel-2 se desarrolló en estrecha colaboración con la

Agencia Espacial Europea (ESA), la Comisión Europea, empresas, proveedores de servicios y usuarios de datos. La misión, cuyo objetivo es mejorar la calidad de la imagen y las comunicaciones ópticas, fue diseñada y desarrollada por un grupo de unas 60 empresas, lideradas por Airbus Defence and Space. También prestaron apoyo el Centro Aeroespacial Alemán DLR y la agencia espacial francesa CNES (Torres et al. 2012; Li et al. 2020).

A través de dos satélites se monitorea la cobertura terrestre. El 23 de junio de 2015, la ESA lanzó con éxito el satélite Sentinel-2A, que ahora se encuentra en una órbita heliosincrónica con un ciclo de repetición de 10 días. El 7 de marzo de 2017 se lanzó Sentinel-2B, primo hermano de Sentinel 2A (Torres et al. 2012; Li et al. 2020).

El instrumento multiespectral (MSI) Sentinel-2 recopila 13 bandas de ondas que van desde el visible y el infrarrojo cercano (VNIR) hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR) en una franja orbital de 290 km (Torres et al. 2012; Li et al. 2020).

Los datos del sensor MSI son una adición a los datos recopilados por el Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM) y el Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) del Servicio Geológico de EE. UU (USGS) (Comparación de Sentinel-2 y Landsat). Además del acceso directo de los usuarios desde ES, una empresa conjunta entre la ESA y el USGS ofrece acceso público gratuito y redistribución de las adquisiciones globales de datos Sentinel-2 de la ESA a través de portales secundarios en los EE. UU (Torres et al. 2012; Li et al. 2020).

Tabla 2. *Resoluciones radiométricas y espaciales de Sentinel-2*

Sentinel-2A – Sensor: MSI				
Nro.	Nombre de banda	Longitud de onda (nm)	Ancho de onda (nm)	Resolución (m)
1	Coastal aerosol	443.9	27	60

2	Blue	496.6	98	10
3	Green	560	45	10
4	Red	664.5	38	10
5	Vegetation Red Edge	703.9	19	20
6	Vegetation Red Edge	740.2	18	20
7	Vegetation Red Edge	782.5	28	20
8	NIR	835.1	145	10
8a	Narrow NIR	864.8	33	20
9	Water vapour	945	26	60
10	SWIR – Cirrus	1373.5	75	60
11	SWIR	1613.7	143	20
12	SWIR	2202.4	242	20
Sentinel-2B – Sensor: MSI				
Nro.	Nombre de banda	Longitud de onda (nm)	Ancho de onda (nm)	Resolución (m)
1	Coastal aerosol	442.3	45	60
2	Blue	492.1	98	10
3	Green	559	46	10
4	Red	665	39	10
5	Vegetation Red Edge	703.8	20	20
6	Vegetation Red Edge	739.1	18	20
7	Vegetation Red Edge	779.7	28	20

8	NIR	833	45	10
8a	Narrow NIR	864	32	20
9	Water vapour	943.2	27	60
10	SWIR – Cirrus	1376.9	76	60
11	SWIR	1610.4	141	20
12	SWIR	2185.7	238	20

Fuente: Serrano et al. (2015).

2.2.9 Software de procesamiento de imágenes

SNAP ESA

SNAP son las siglas de Sentinels Application Platform y es una arquitectura de software común en la que está disponible gratuitamente para comunidad científica en la exploración de la tierra. SNAP es un desarrollo de la ESA, técnicamente dirigido por Brockmann Consult y disponible a través del sitio web de la ESA. SNAP apoya a misiones científicas de ERS-ENVISAT, las misiones Sentinels 1/2/3, Proba-V y una variedad de misiones nacionales y de terceros. SNAP contiene las funcionalidades de cajas de herramientas históricas como ENVISAT BEAM, NEST y Orfeo Toolbox que se desarrollaron en los últimos años (Zuhlke et al. 2015).

Google Earth Engine

Plataforma en la nube de Google para trabajos geoespaciales de vanguardia creada principalmente para el análisis de datos ambientales a escala planetaria, es una de las aplicaciones más nuevas lanzadas por Google. Permite a los usuarios ver, manipular, editar y crear datos espaciales rápida y fácilmente combinando una amplia data de sensores de teledetección y datos geoespaciales (Gorelick et al. 2017).

ArcGIS Pro

Es un sólido programa SIG de escritorio para crear impresionantes mapas 2D y 3D, analizar datos y ampliar el conocimiento geográfico. Para investigar relaciones espaciales, pronosticar resultados y mejorar las decisiones basadas en datos, utilice aplicaciones de mapeo y análisis. (Shaner y Wrightsell 2000).

2.3 Definición de términos

Teledetección: La teledetección es la adquisición de información a distancia mediante sensores instalados en satélites (Chuvieco 1996).

Sensores ópticos: La función de un sensor óptico es medir una cantidad tangible de luz y, dependiendo del tipo de sensor, convertir esa medición en una forma que pueda ser leída por un dispositivo de medición integrado en el sensor (Booyesen et al. 2021)

Programa Copérnico: El programa más ambicioso de observación de la Tierra hasta la fecha es Copérnico. Ofrece información precisa, oportuna y de fácil acceso, ayuda a mejorar la gestión ambiental, comprender y atenuar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad pública (Torres et al. 2012; Li et al. 2020).

Sentinel-2: Es una misión operativa de imágenes multiespectrales que forma parte del programa GMES (Monitoreo Global para el Medio Ambiente y la Seguridad) (Serrano et al. 2015).

Fuego: La luz, las llamas y el calor son signos del fenómeno de la combustión. (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999d; Key y Benson 2006).

Quemar: Daño, destrucción o efecto relacionado con el calentamiento (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999d; Key y Benson 2006).

Intensidad: La fuerza o la cantidad de energía gastada. El nivel de calor producido del fuego (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999d; Key y Benson 2006).

Severidad: Calidad o estado de aflicción infligida por una fuerza (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999d; Key y Benson 2006).

Severidad de quemas: La conversión de vegetación y combustibles en carbono inorgánico, así como los cambios estructurales o de composición provocan cambios físicos y químicos en el suelo (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999d; Key y Benson 2006).

Relación de quemado normalizada (NBR): NBR es un índice que utiliza las diferencias en la forma en que la vegetación verde saludable y la vegetación quemada reflejan la luz para encontrar el área quemada. Se calcula utilizando las bandas del Infrarrojo Cercano y el Infrarrojo de Onda Corta (Key y Benson 1999c; Key y Benson 1999d).

Relación de quemado normalizada delta (dNBR): El cambio en el índice de quemado normalizado, también llamado dNBR, se calcula restando el valor de NBR posterior al incendio del valor de NBR de referencia (Key y Benson 1999c; Key y Benson 1999d).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo de estudio

El estudio desarrolló el índice espectral NBR y su variante bilateral dNBR con imágenes del sensor Sentinel-2 en el análisis de la severidad de quemas en un paisaje heterogéneo del área de influencia del corredor Vial Interoceánico Sur Tramo III del distrito de Las Piedras del año 2022. Para ello, se aplicó una investigación de tipo descriptiva y correlacional” porque se describirá atributos y se predecirá las variables sin alterarlas (Castro 2003; Baray 2006; Cazau 2006; Hernández et al. 2010; Iglesias 2021).

3.2 Diseño del estudio

La aplicación de índices monotemporales y bilaterales con Sentinel-2 en el análisis de la severidad de quemas en un paisaje heterogéneo en el año 2022 se enmarcó a un diseño Transaccional (transversal) y tendencial porque estudian un tiempo específico y a lo largo del tiempo (Castro 2003; Baray 2006; Cazau 2006; Hernández et al. 2010; Iglesias 2021).

3.3 Delimitación espacial y temporal

Nuestro estudio se enfocó en el área de influencia del corredor Vial Interoceánico Sur Tramo III del distrito de Las Piedras (Figura 2 y Tabla 3), donde se obtuvo imágenes de las fechas previas y posterior de cada quema del año 2022 (Tabla 5). Según el mapa Forestal del Perú producido en el 2000 (INRENA 2000), el área de estudio están cubiertas en su mayoría por Bosque Húmedo Tropical de terraza alta.

La extensión del área es aproximadamente 4 460,30 km² (446 030,1618 ha) de la región de Madre de Dios (Figura 2), que es una región de importancia mundial para la conservación (Myers et al. 2000). Geográficamente se localiza entre los paralelos 11° 44' 45" y 12° 39' 60" de latitud Sur y los meridianos 68° 39' 60" y 69° 29' 21" de longitud Oeste; altitud entre 250 m y 300 msnm (GOREMAD y IIAP 2009; Chávez et al. 2013; Perz et al. 2013; Alarcón et al. 2016; Perz et al. 2016)

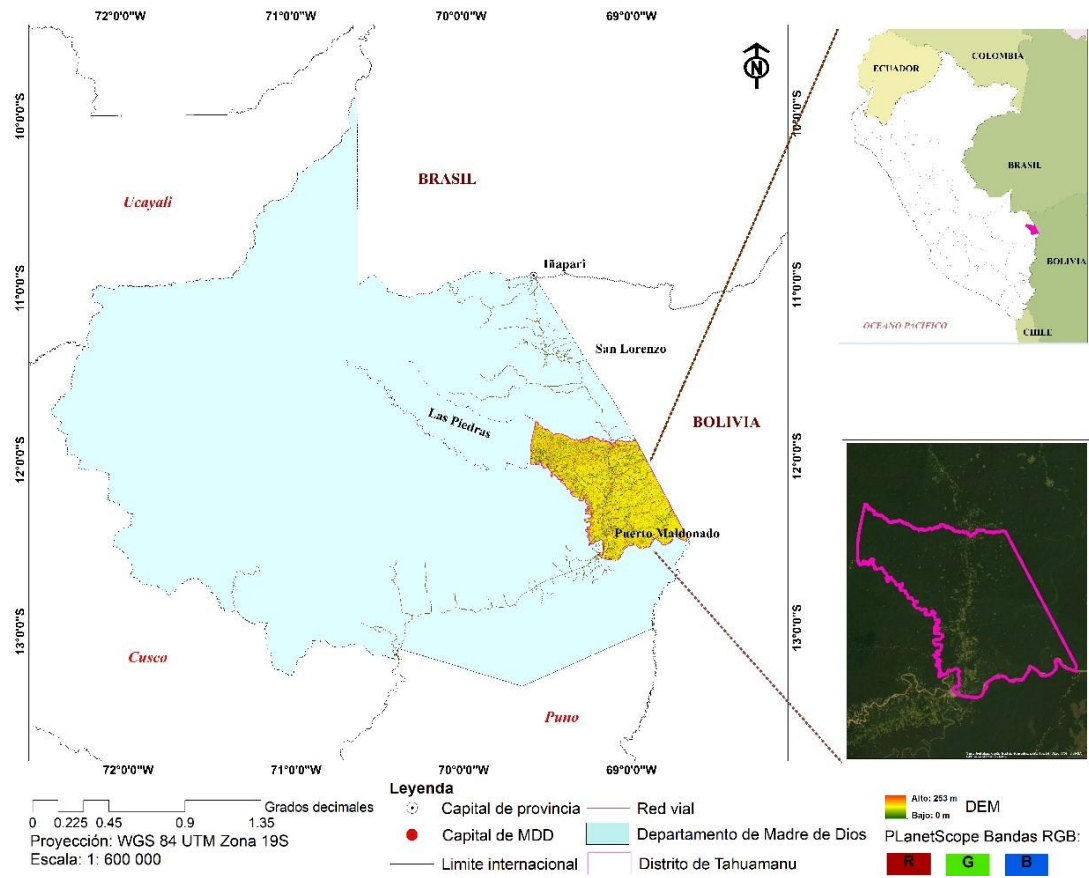


Figura 2. Ubicación de área de estudio.

El corredor vial Interoceánico Sur del tramo III conecta el área de estudio y conecta la región de Madre de Dios con el estado brasileño de Acre y la ciudad de Cobija, Bolivia (Southworth et al. 2011; Alarcon et al. 2021).

Respecto a la evaluación temporal, el análisis de la severidad de quemas se realizará en el periodo 2022.

3.3.1 Clima e hidrografía

Según Holdridge (1967), la temperatura es semicálida con variaciones promedios anuales de 25°C a 27°C. Los meses de septiembre a abril son épocas estacionales de temperatura más bajas, y de mayo a septiembre los más altos, llegando hasta 10°C. La precipitación es de menor intensidad en los meses de mayo a septiembre, entre 20 al 25% anual (GOREMAD y IIAP 2009). El rango de la evapotranspiración se encuentra entre 598,4 mm y 652,6 mm, mientras que la humedad relativa con variaciones de 63% y 90%” (GOREMAD y IIAP 2009; Perz et al. 2016). La hidrografía principal y mayor fujo es el río de Las Piedras (GOREMAD y IIAP 2009; Perz et al. 2016).

3.4 Población y muestra

El área de estudio se localiza en el área de influencia del distrito de Las Piedras de la provincia de Tambopata y comprende un área de 4 460,30 km² (446 030, 1618 ha).

Para validar el índice espectral NBR y su variante bilateral dNBR con imágenes del sensor Sentinel-2 en análisis de la severidad de quemas en un paisaje heterogéneo del área de influencia del corredor Vial Interoceánico Sur Tramo III del distrito de Las Piedras, se utilizó la distribución binomial de probabilidad mediante de datos de campo (Anaya y Chuvieco 2010; Chuvieco y Hantson 2010; Ochoa y Páez 2019). El número de muestras se obtendrá con el siguiente algoritmo (Ecuación 1):

$$n = \frac{Z^2 p(qN)}{(N-1)E^2 + Z^2 pq} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde:

Z: Es el valor de la curva normal estandarizada para un nivel determinado de probabilidad, 1,96 (95%).

p: indica el porcentaje de aciertos estimado, 0,50 (50%).

q: Indica el porcentaje de errores (q = 1 – p), 0,50 (50%).

N: Tamaño de la población.

E: El error permitido, 0,05 (5%).

$$= \frac{(1,96)^2 * 0,5(0,5 * 4\ 460,30)}{(4\ 460,30 - 1) * 0,05^2 + 1,96^2 * (0,5 * 0,5)}$$

$n = 353,77 = 354$

La muestra fue distribuida de manera representativa en el área de estudio, para ello, se aplicó un muestreo aleatorio estratificado mediante un método probabilista, “donde todas las unidades de muestreo presentes en el área tuvieron la posibilidad conocida superior a cero de ser seleccionadas (inclusión) (Ochoa y Páez 2019).

La distribución consideró 354 muestras levantadas en campo: (1) 89 muestras en la categoría “Baja severidad”, (2) 89 en “Severidad moderada-baja”, (3) 88 en “Severidad moderada-alta” y (4) 88 en “Severidad alta” (Miller y Thode 2007; Olivares y López-Beltrán 2019).

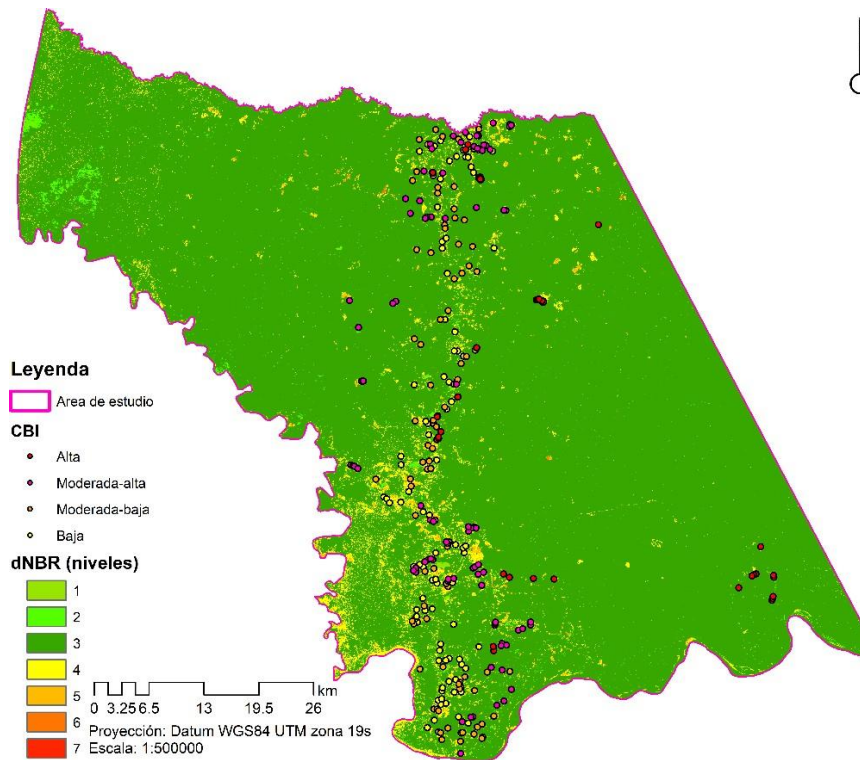


Figura 3. Distribución de muestras al azar por estratos en el área de estudio.

3.5 Método y técnicas

El estudio se basó en fases: la cuantificación de la quema y el mapeo de la severidad de la quema, la cartografía de la severidad permitió desarrollar un diseño de muestreo para levantar información de CBI en las áreas quemadas. Para ello, se aplicó métricas de imágenes antes y después de incendio donde se obtuvo compuestos de reflectancia (Arjasakusuma et al. 2022; Morresi et al. 2022).

Se realizó un análisis mediante el empleo de datos adquiridos por el Instrumento de Sensor Multiespectral (MSI) a bordo de los satélites Sentinel-2A (S2A) y/o -2B (S2B). Se utilizó imágenes de Sentinel-2 (S2) con valores de reflectancia corregido en la parte inferior de la atmósfera (BOA) nivel 2A en el sistema geodésico de coordenadas geográficas (WGS84) basado en el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM). Se eliminó los píxeles interferidos por nubosidad, sombras de nubes, para ello, se enmascaro en el software de la Plataforma de aplicaciones Sentinel (SNAP) y/o Google Earth Engine (GEE) (Gorelick et al. 2017).

Las bandas de Sentinel-2 fueron remuestreadas a una resolución espacial de 10 m. El mapeo de las quemaduras y su severidad fueron mediante imágenes adquiridas entre junio y septiembre de 2022 (Tabla 3). Se calculó el NBR previa y después del incendio (Ecuación 2 y Tabla 4) utilizando la banda del infrarrojo cercano (NIR) (MSI B8A) y la segunda banda de infrarrojos de onda corta (SWIR) (MSI B12) para obtener la dNBR (Tabla 7). Finalmente se clasificó el índice bitemporal (dNBR) (Ecuación 3) mediante umbrales desarrollados por Key y Benson (1999c); Key y Benson (2006) .

Se empleó el protocolo basado en el Índice de Quemaduras Compuesto (CBI) (Key y Benson 2006; Arjasakusuma et al. 2022; Morresi et al. 2022) para clasificar y validar los índices bitemporales derivados del mapeo de la gravedad de las quemaduras. La calificación del CBI se fundamenta en criterios que asocian factores en cinco estratos verticales: tres en el sotobosque y dos en la vegetación del dosel (Key y Benson 2006; Arjasakusuma et al. 2022; Morresi et al. 2022). La valoración del CBI final determina las parcelas en un intervalo [0, 3], donde cero es un estado

inalterado y tres un cambio máximo por impacto del fuego. Las parcelas del CBI fueron rectangulares de 20 m x 20 m (Key y Benson 2006). Para el estudio se consideró cinco categorías de severidad, sin embargo, sin cambios (CBI=0) no entro en la medición de la precisión, quedando: Baja (CBI $>0,10$ y ≤ 1), moderada-baja (CBI $> 1,00$ y $\leq 1,50$), moderada-alta (CBI $> 1,50$ y $\leq 2,00$), y alto (CBI $> 2,00$) (Tabla 6) como se propone en otros estudios (Miller y Thode 2007; Miller et al. 2009; Miller et al. 2016; Arjasakusuma et al. 2022; Morresi et al. 2022).

3.6 Tratamiento de datos

3.6.1 Procesamiento de datos

Los materiales cartográficos fueron proporcionados por el Centro de Teledetección para el Estudio y Gestión de Recursos Naturales (CETEGERN) de la UNAMAD (Alarcón et al. 2016). Las imágenes S2 se obtuvieron del portal web de Sentinel Hub, Alaska Satellite Facility (ASF) (Bouvet et al. 2018; Holtgrave et al. 2020; Puzzi et al. 2020; Niro et al. 2021; Puzzi et al. 2021) y Google Earth Engine (GEE) (Mutanga y Kumar 2019) para el periodo 2022 (Tabla 3).

Tabla 3. *Información de adquisición de imágenes Sentinel-2*

Temporalidad	Sensor	Fecha de imagen
Pre incendio	Sentinel-2B	2022-06-13 14:57:29
	Sentinel-2A	20220615 14:47:41
	Sentinel-2A	2022-06-25 14:47:41
Post incendio	Sentinel-2B	2022-09-01 15:06:18
	Sentinel-2A	2022-09-03 14:47:41
	Sentinel-2A	2022-09-06 14:57:41

Fuente: Plataforma en la nube de Google Earth Engine (GEE).

✓ Tratamiento y análisis de la imagen SAR

Tratamiento digital consistió en la corrección de datos Sentinel-1 descargados de Sentinel Hub, ASF y GEE en tres (3) fases:

1. **Pre-Procesamiento.** En primer lugar, todas las bandas de Sentinel-2 utilizadas para el cálculo de los índices espectrales se han vuelto a muestrear (de 60 m y 20m a 10 m) y se han recortado con el software SNAP. Seguidamente las imágenes S2 en el nivel 2A fueron corregidos atmosféricamente con el algoritmo Sen2Cor (256) y modelo de elevación digital (PlanetDEM) (Varghese et al. 2021). La presencia de efectos atmosféricos fueron minimizados mediante la máscara SCL (Scene Classifications Image (Kaufman y Sendra 1988; Llorens et al. 2021)).
2. **Procesamiento.** Se clasificó; 1) índice espectral monotemporal NBR de S2 y 2) el índice bitemporal en base a NBR (dNBR) de S2. Para ello, se calculó el NBR previa y después del incendio (Ecuación 2 y Tabla 4) utilizando la banda del infrarrojo cercano (NIR) (MSI B8A) y la segunda banda de infrarrojos de onda corta (SWIR) (MSI B12) para obtener la dNBR (Ecuación 3 y Tabla 5). Posteriormente, se clasificó el índice bitemporal (dNBR) mediante umbrales (Tabla 5) desarrollados por Key y Benson (1999c); Key y Benson (2006).

$$\text{NBR} = (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde **NIR** es luz infrarroja de onda cercana 8A (0,86 μm) y **SWIR** es luz de infrarroja de onda corta 12 (2,19 μm).

Tabla 4. *Escala del Índice Normalizado de Área Quemada (NBR)*

NBR	Severidad de quema
< -0,50	Alta
-0,50 – 0,25	Media
-0,25 a 0,10	Baja
> 0,10	Nula

Fuente: Key y Benson (2006).

$$dNBR = R_{antes\ del\ fuego} - NBR_{despues\ del\ fuego} \times 1000 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Tabla 5. Niveles de severidad en incendios obtenidos a partir del dNBR

Rango de dNBR (sin escala)	Rango de dNBR (con escala x10 ³)	Severidad de quema
-0,500 a -0,251	-500 a -251	Repoblación mejorada, alta (después del incendio)
-0,250 a -0,101	-250 a -101	Repoblación mejorada, baja (después del incendio)
-0,100 a 0,99	-100 a 99	Sin quemar
0,100 a 0,269	100 a 269	Baja severidad
0,270 a 0,439	270 a 439	Severidad moderada-baja
0,440 a 0,659	440 a 659	Severidad moderada-alta
0,660 a 1,300	660 a 1300	Severidad alta

Fuente: Key y Benson (2006).

3.6.2 Precisión de datos

La precisión de las imágenes Sentinel-2 se abordaron mediante operaciones estadísticas; se aplicó una matriz de precisión general y el coeficiente kappa (κ) (Tabla 7) (Cohen 1960; Cohen et al. 2003; Cerda y Villarroel 2008; Alarcón et al. 2016). Donde al índice bitemporal dNBR se realizó un test de validación con la información levantada en campo (CBI) (Townsend 1971; Elijah y Jensen 1996; Chuvieco 2002; Chuvieco y Hantson 2010; Kuhn y Johnson 2013; Alarcón et al. 2016; Addison y Oommen 2018). Los valores de CBI fueron asignadas en tres categorías de severidad (Tabla 6 y Figura 4): sin cambios (CBI=0), baja (CBI >0,10 y ≤ 1), moderada; baja y alta (CBI > 1,00 y $\leq 2,00$) y alta (CBI > 2,00) como se propone en otros estudios (Key y Benson 1999a; Miller y Thode 2007; Miller et al. 2009; Miller et al. 2016; Arjasakusuma et al. 2022; Morresi et al. 2022).

Tabla 6. Niveles de severidad de CBI para comparar con valores de dNBR

Categoría	CBI	Descripción
Sin quemar	0	La ubicación no experimentó ningún incendio. Esto también puede incluir una ubicación que se recupere rápidamente después de los incendios.
Baja	>0 - ≤1	Consumo mínimo de vegetación; fragmentos de vegetación afectado.
Moderada - baja	1 - ≤1,5	El paisaje exhibe condiciones de transición entre las características de severidad baja y moderada – alta descritas.
Moderada - alta	>1,5 - ≤2	El paisaje exhibe condiciones de transición entre las características de severidad moderada - baja y alta descritas.
Alta	>2	~ 90% al consumo total de vegetación. Los sitios normalmente exhiben más del 50% de cobertura de suelo mineral o fragmentos de roca recién expuestos.

Fuente: Key y Benson (1999a).

Los resultados fueron interpretados de acuerdo a los niveles de concordancia cualitativa (Tabla 7) (Cohen 1960; Cohen et al. 2003; Cerda y Villarroel 2008; Kuhn y Johnson 2013; Alarcón et al. 2016),

$$Precision\ general = \frac{VP + VN}{VP + FP + VN + FN} \quad (\text{Ecuación 4})$$

donde: “VP es verdadero positivo, VN verdadero negativo, FP falso positivo, y FN falso negativo”,

$$Kap(k) = \frac{f_o - f_c}{N - f_c} \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde: “ f_o : proporción de unidades concordantes, y f_c : proporción de unidades para las que se espera una concordancia al azar”,

Tabla 7. Valores del coeficiente kappa

Coeficiente Kappa	Fuerza de la Concordancia
“0,00”	“Pobre (<i>Poor</i>)”
“0,01 – 0,20”	“Leve (<i>Slight</i>)”
“0,21 – 0,40”	“Aceptable (<i>Fair</i>)”
“0,41 – 0,60”	“Moderada (<i>Moderate</i>)”
“0,61 – 0,80”	“Considerable (<i>Substantial</i>)”
“0,81 – 1,00”	“Casi perfecta (<i>Almost perfect</i>)”

Fuente: Cerda y Villarroel (2008); Cohen (1960); (Cohen et al. 2003); Landis y Koch (1977).

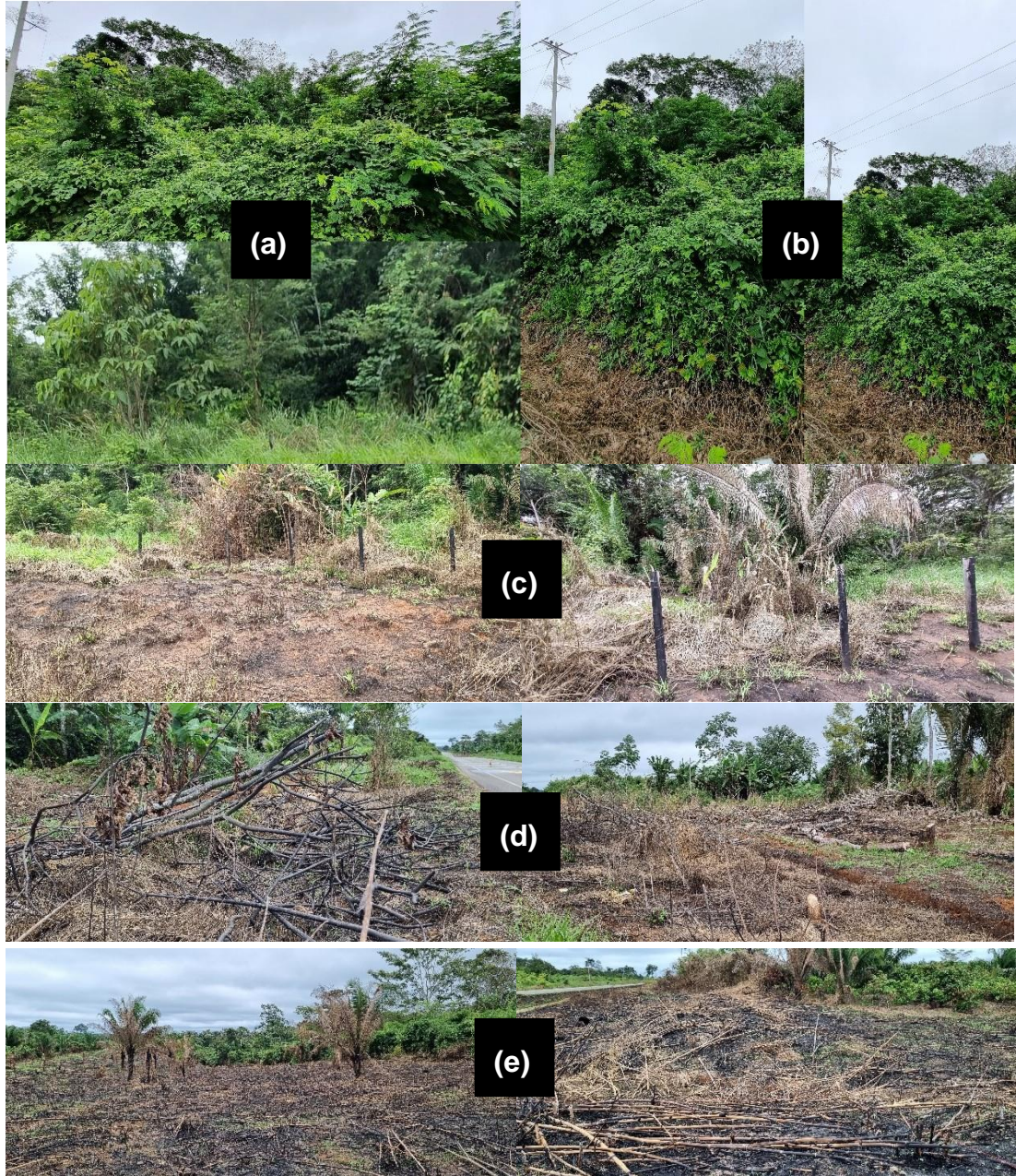


Figura 4. Niveles de severidad según el Índice Compuesto de quemaduras (CBI): sin quemar (a), severidad baja (b), severidad moderada-baja (c), severidad moderada-alta (d) y severidad alta (e).

3.6.4 Análisis estadístico

Para la evaluación cartográfica se aplicó la geoestadística descriptiva e inferencial, para ello, se empleó softwares libres y con licencia; “GeoDa, SigmaPlot, Microsoft Excel, ArcGis 10,5®, ArcGisPro 2,9®, SNAP ESA, y el Google Earth Engine”.

Para el primer y segundo objetivo, sobre cuantificar la superficie y niveles de severidad de quemas mediante imágenes de Sentinel-2 a través de un enfoque bilateral (dNBR) del Índice de Quemado Normalizado (NBR) en el periodo 2022 se procesó en los softwares SNAP ESA, GEE, GeoDa, SigmaPlot, Microsoft Excel, ArcGis 10,5®, ArcGisPro 2,9® (Key y Benson 1999c; Key y Benson 2006; Fernández-Manso et al. 2016; Roy et al. 2019; Bar et al. 2020; Afira y Wijayanto 2022; Arjasakusuma et al. 2022).

Respecto al tercer objetivo, sobre validar los mapas de severidad de quemas basados en la relación del índice bitemporal (dNBR) y datos del Índice de Quemaduras Compuesto (CBI), se empleó una matriz de precisión general y el coeficiente kappa (κ) (Cohen 1960; Cohen et al. 2003; Cerda y Villarroel 2008; Alarcón et al. 2016).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Cuantificación de la superficie deforestada por quemas mediante el sensor óptico Sentinel-2 mediante un enfoque bilateral (dNBR) del Índice de Quemado Normalizado (NBR) en el área de influencia del corredor Vial Interoceánico Sur (distrito de Las Piedras)

El estudio utilizó seis escenas de imágenes de Sentinel-2 de acuerdo a las especificaciones de la tabla 3 descargadas de la plataforma Google Earth Engine (GEE) (Mutanga y Kumar 2019).

Para detectar áreas quemadas, las regiones espectrales de Infrarrojo Cercano (NIR) e Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) son relevantes: NIR resalta los cambios en la cobertura del dosel y el brillo de la quema de hojas, mientras que SWIR detecta cambios en la sequedad del paisaje (Alcaras et al. 2022). Después de un incendio, con la destrucción de la vegetación, la reflectancia NIR disminuye fuertemente y, por otro lado, la reflectancia SWIR aumenta debido a que el fuego elimina la vegetación que retiene el agua (Alcaras et al. 2022). Para mapear áreas quemadas, varios algoritmos usan una combinación de regiones espectrales NIR y SWIR, aunque también se han desarrollado otras variantes (Anaya et al. 2018; Bar et al. 2020; Alcaras et al. 2022; Arjasakusuma et al. 2022).

El estudio demuestra la aplicación de los datos de Sentinel-2 en la evaluación de áreas quemadas mediante índices de enfoque monolateral y bilateral para el año 2022. Un estudio de gran relevancia ampliamente utilizado en la literatura para resaltar las áreas quemadas en grandes zonas de incendios es el índice de quemado normalizado de enfoque monolateral (NBR) y su variante con enfoque bilateral (dNBR), que se considera un estándar para las

evaluaciones de la severidad de los incendios. La fórmula de índice de quemado normalizado combina el uso de longitudes de onda NIR (B8A) y SWIR (B12) (Anaya et al. 2018; Bar et al. 2020; Alcaras et al. 2022; Arjasakusuma et al. 2022).

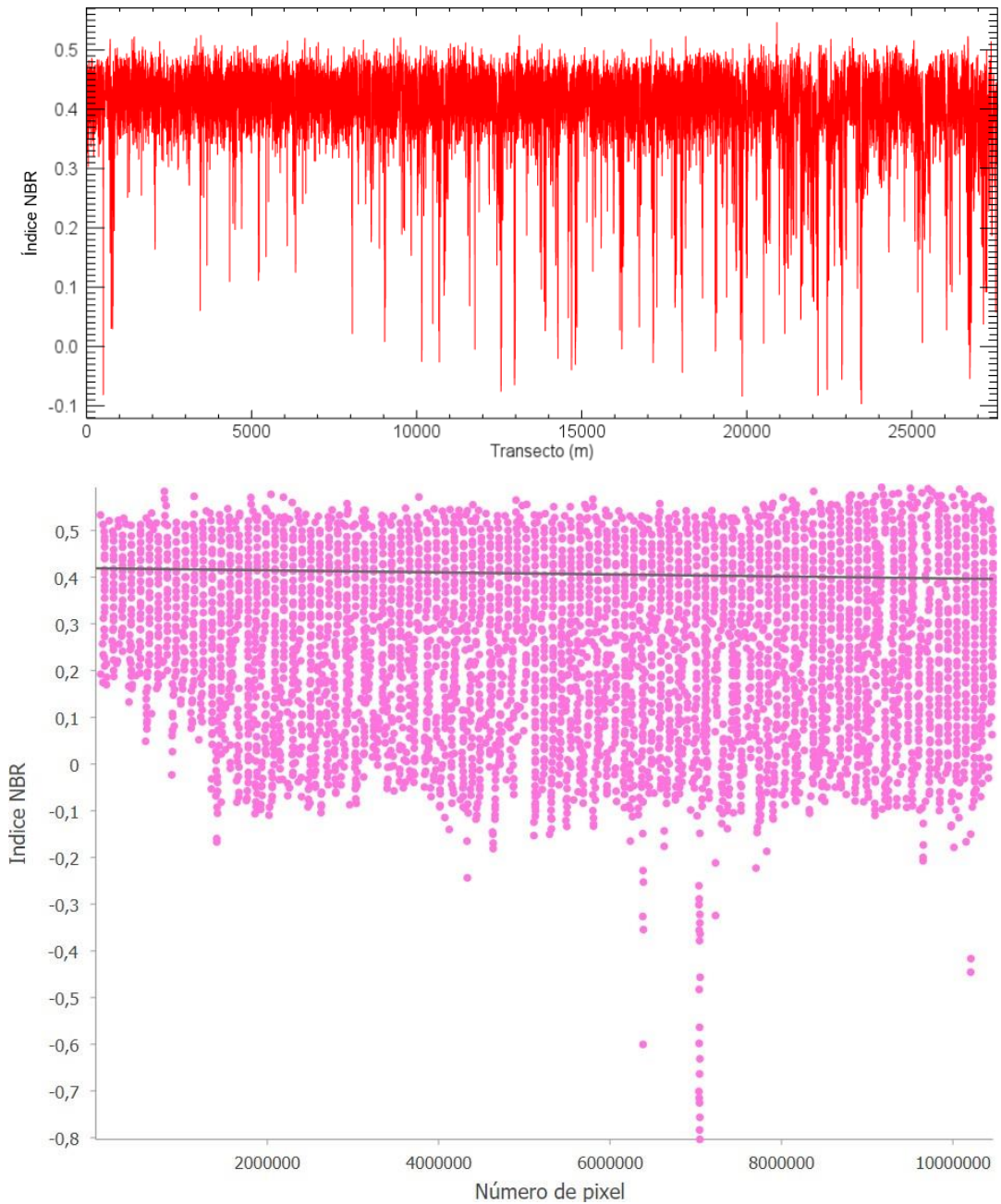


Figura 5. Perfil de índice NBR pre incendio en el área de estudio.

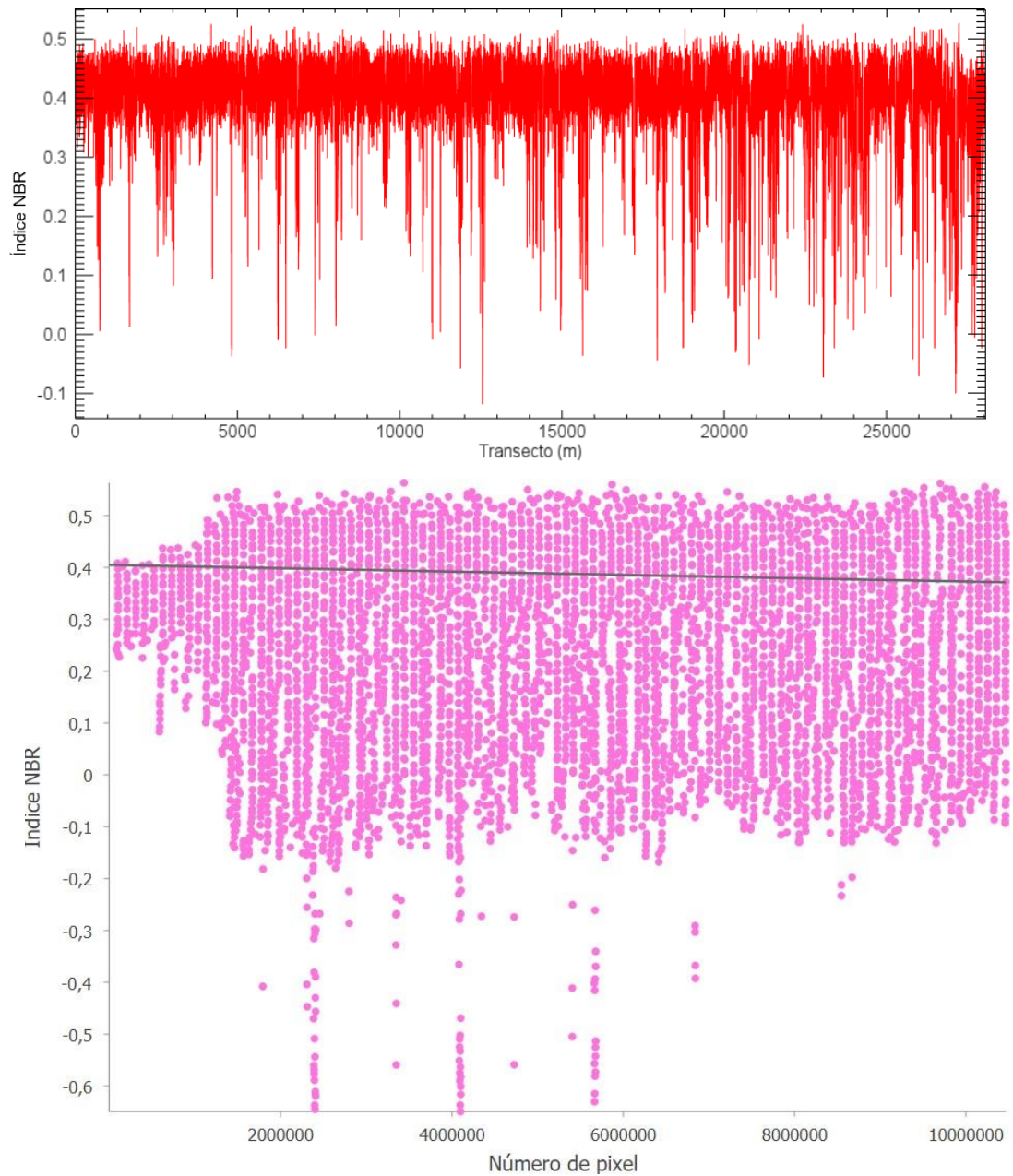


Figura 6. Perfil de índice NBR post incendio en el área de estudio.

La característica espectral de los índices en el área de estudio (antes y después de la quema) y la vegetación saludable fueron muy diferente entre sí. Las figuras 5 y 7 muestran la distribución del índice NBR de la imagen previa al incendio. El valor de esos índices es mayor en las clases no quemado, con vegetación a sin vegetación y con vegetación. Generalmente, el valor del índice NBR es alto en vegetación sana, mientras que el valor de NBR es bajo en vegetación quemada (Afira y Wijayanto 2022). Esa misma

tendencia, aunque con un mayor grado sigue el índice NBR de la imagen posterior al incendio (Figura 6 y 8), ello se debe a que los incendios causan daños a la vegetación, por lo que el valor del índice posteriores al incendio aumenta significativamente en la clase quemada.

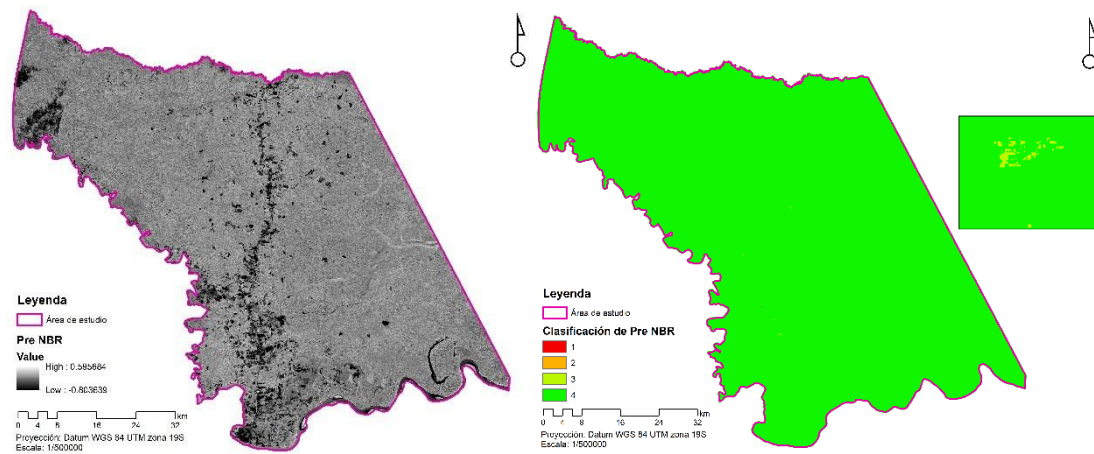


Figura 7. Severidad de pre quema del área de estudio usando el índice de enfoque monolateral NBR derivado de imágenes Sentinel-2 MSI.

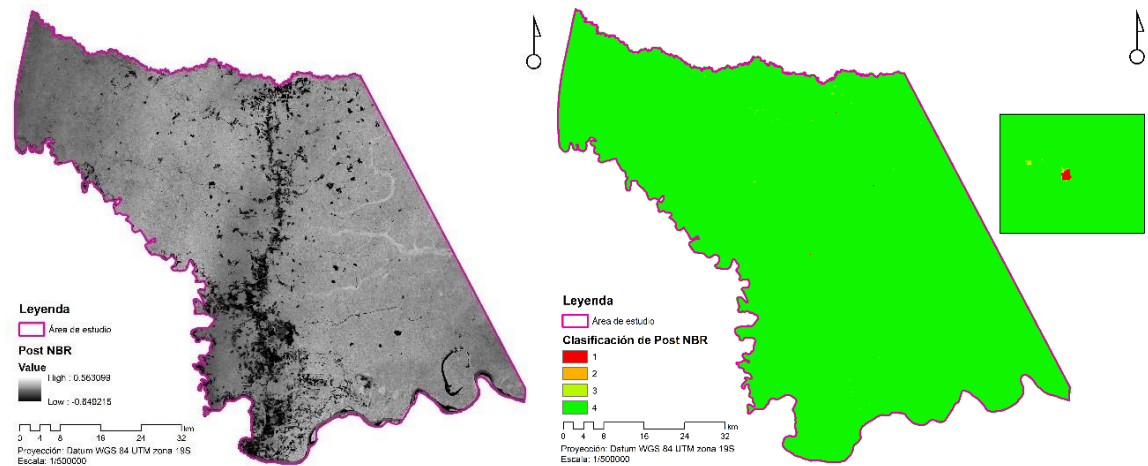


Figura 8. Severidad de post quema del área de estudio usando el índice de enfoque monolateral NBR derivado de imágenes Sentinel-2 MSI.

La figura 9 muestra el área quemada del área de estudio (distrito de Las Piedras), que se produce mediante umbralización dinámica de imágenes de

NBR y de dNBR obtenidas antes y después del incendio. El índice NBR antes del incendio reporto un área de 30,38 ha mientras que el NBR después del incendio cuantifico 745,60 ha, incrementándose aproximadamente 25 veces.

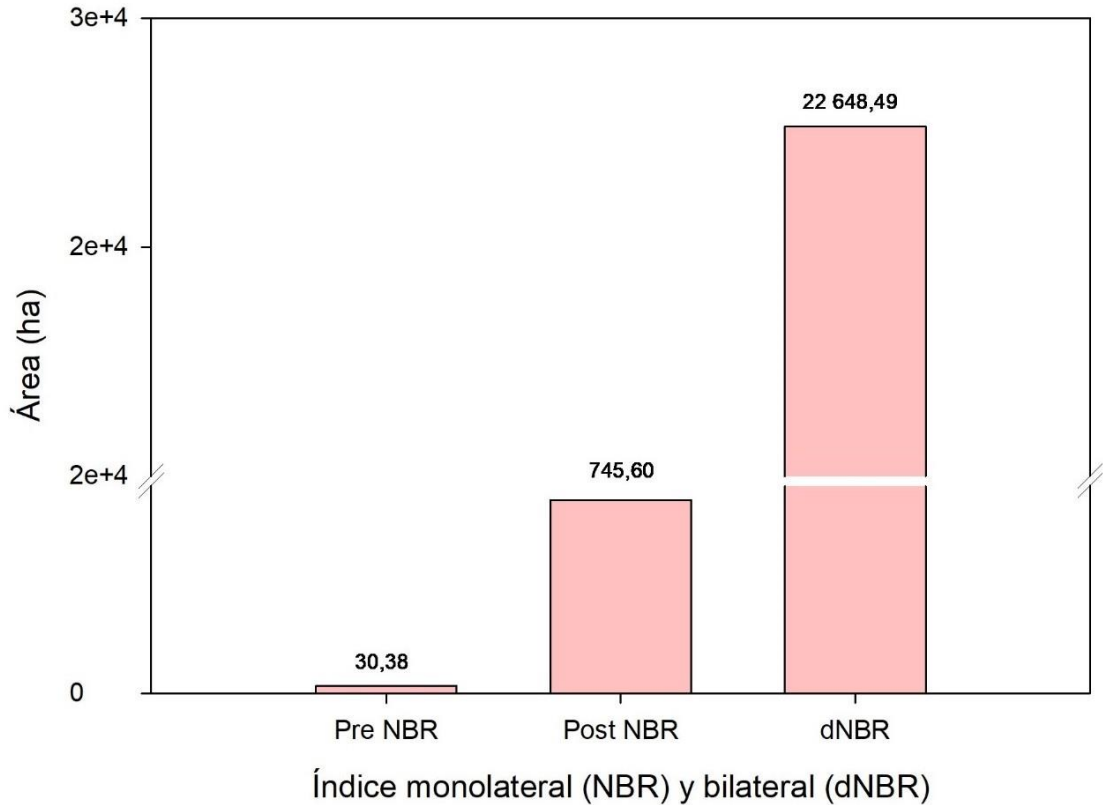


Figura 9. Área quemada antes, después, y diferencia NBR.

Adicionalmente en el caso de los resultados de la superficie de quema, la figura 10 muestra los resultados de los niveles de severidad de las quemas antes y después del incendio. Como era de esperar y por la época, a nivel de pre NBR; severidad alta muestra un valor muy inferior al resto de categorías (0,53 ha), seguido de severidad media con 1,60 ha, severidad baja con 28,25 ha y 445 999,79 ha sin quemar. Esta situación cambia respecto a post NBR; con severidad alta de 69,41 ha, severidad media con 246,53 ha, severidad baja con 399,66 ha y 445 284,57 ha sin quemar. El incremento porcentual de un periodo a otro es aproximadamente de 132% para Alta, 172% para Media, 14% para baja y una disminución de 1% para áreas no afectadas.

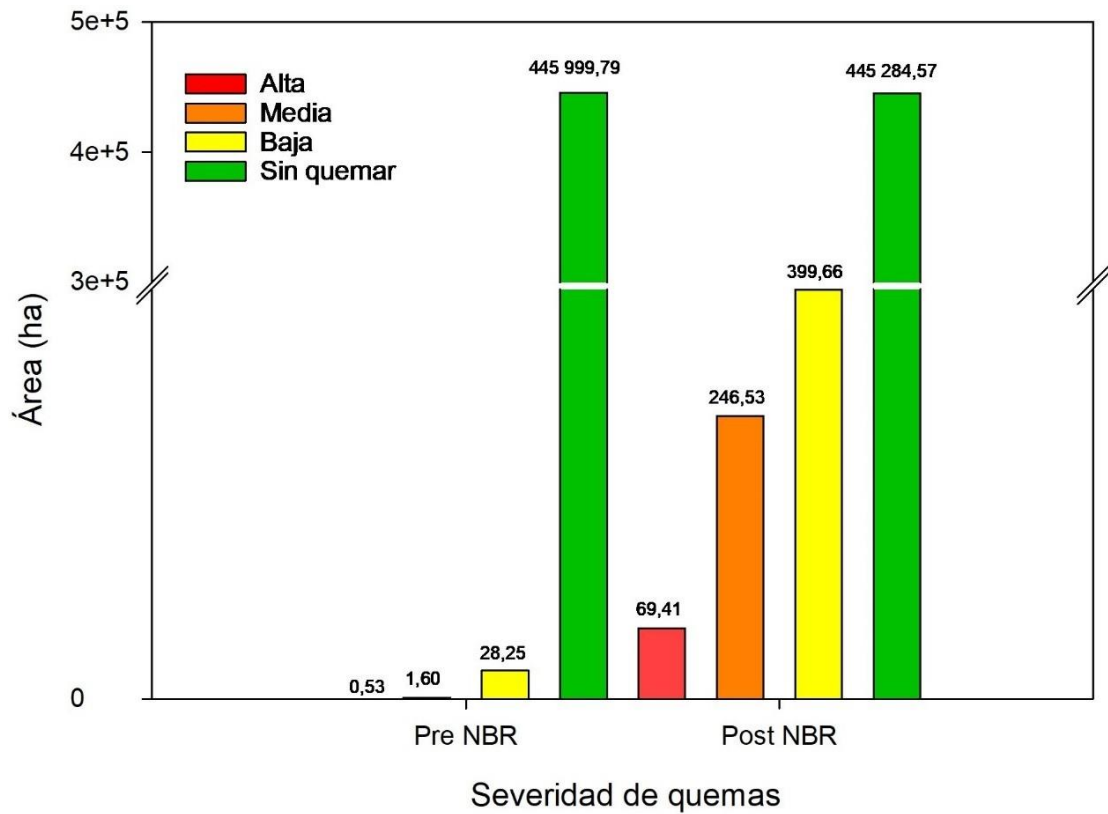


Figura 10. Área por nivel de quema antes y después con un enfoque monolateral (NBR).

A pesar de que el empleo del índice NBR monotemporal ayuda a proporcionar una evaluación más precisa de la gravedad de las quemaduras en sistemas heterogéneos (Anaya et al. 2018; Brown et al. 2018; Bar et al. 2020; de Andrade et al. 2020; Barni et al. 2021; Delcourt et al. 2021; dos Reis et al. 2021; Llorens et al. 2021; Singh et al. 2021; van Dijk et al. 2021; Afira y Wijayanto 2022; Arjasakusuma et al. 2022; Deshpande et al. 2022a; Deshpande et al. 2022b; Deutsch y Fletcher 2022; Morresi et al. 2022; Seydi et al. 2022), esto se ve afectada debido a una atenuación de los errores asociados con las diferencias en la fenología y

la cobertura de la vegetación cuando se realiza la diferencia (dNBR) (Afira y Wijayanto 2022; Arjasakusuma et al. 2022; Bouaicha et al. 2022; Deshpande et al. 2022a; Deshpande et al. 2022b; Deutsch y Fletcher 2022; Seydi et al. 2022).

4.2 Niveles de severidad de quemas

El enfoque bilateral compara las imágenes mediante la reducción de los valores de las imágenes anteriores y posteriores al incendio utilizando índices compuestos que consisten en dNBR, donde la selección de parámetros es algo que debe ser considerado fundamental en el modelo, los intervalos obtenidos se clasificaron según la clasificación de Key y Benson (1999b).

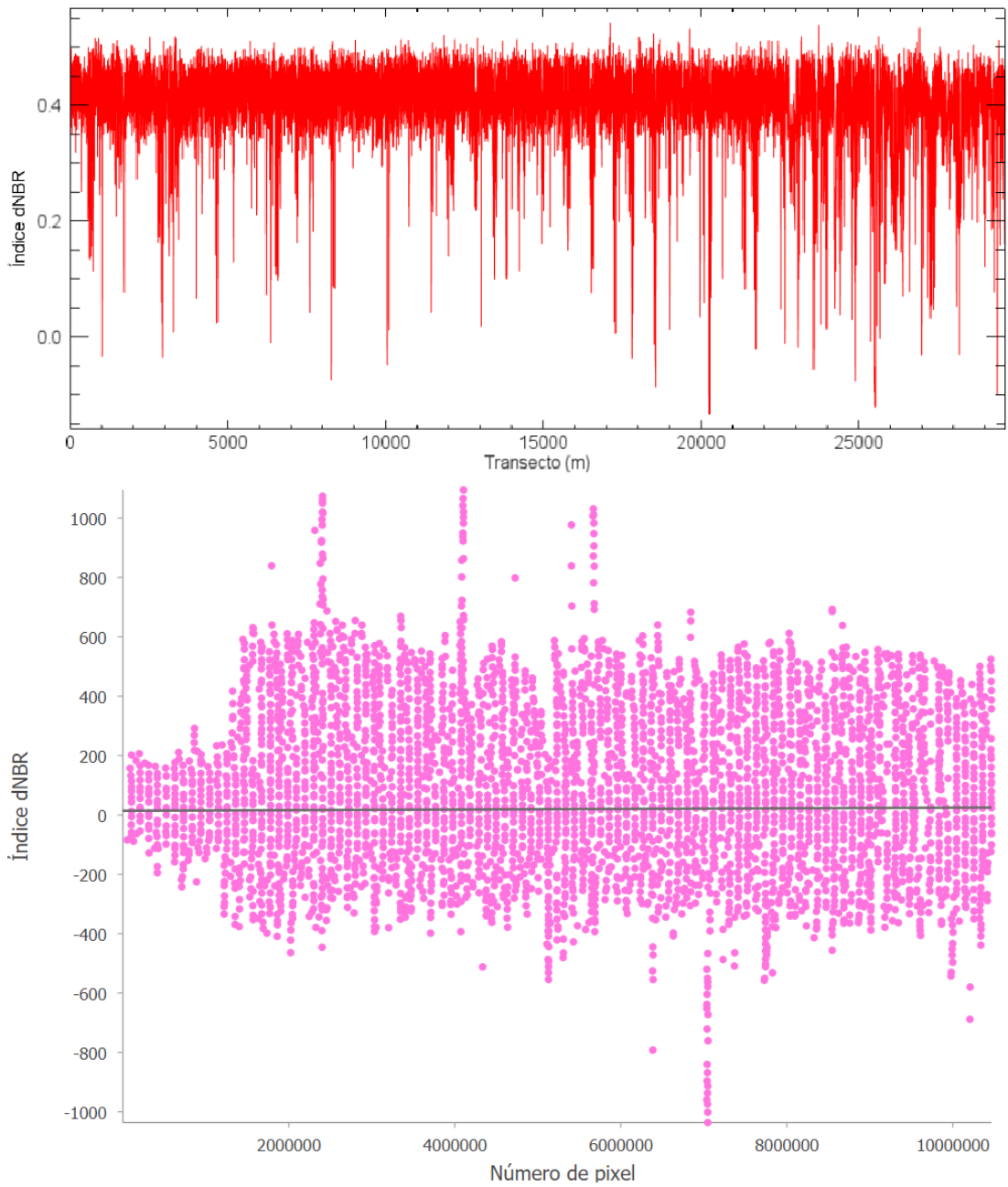


Figura 11. Perfil de índice dNBR en el área de estudio.

Las figuras 11-14 muestran la distribución del índice dNBR compuesta de la imagen previa y posterior al incendio. El valor de esos índices es mayor en las clases quemadas, de vegetación a sin vegetación y sin vegetación. Generalmente, el valor del índice dNBR es bajo en vegetación sana, mientras que el valor de dNBR es alto en vegetación quemada (Afira y Wijayanto 2022).

Se encontró áreas quemadas de 18 388,64 ha en el nivel de Baja severidad, 3 749,70 ha en Moderada-baja, 499,48 ha en Moderada-alta, y 10,66 ha en Alta. Los umbrales utilizados en el estudio fueron dinámicos en el espacio temporal y también han sido verificados por los valores de umbral dinámico representados en la tabla 5 obtenidos de las estadísticas de la imagen obtenidas en las fechas representadas en la tabla 3 (Singh et al. 2021).

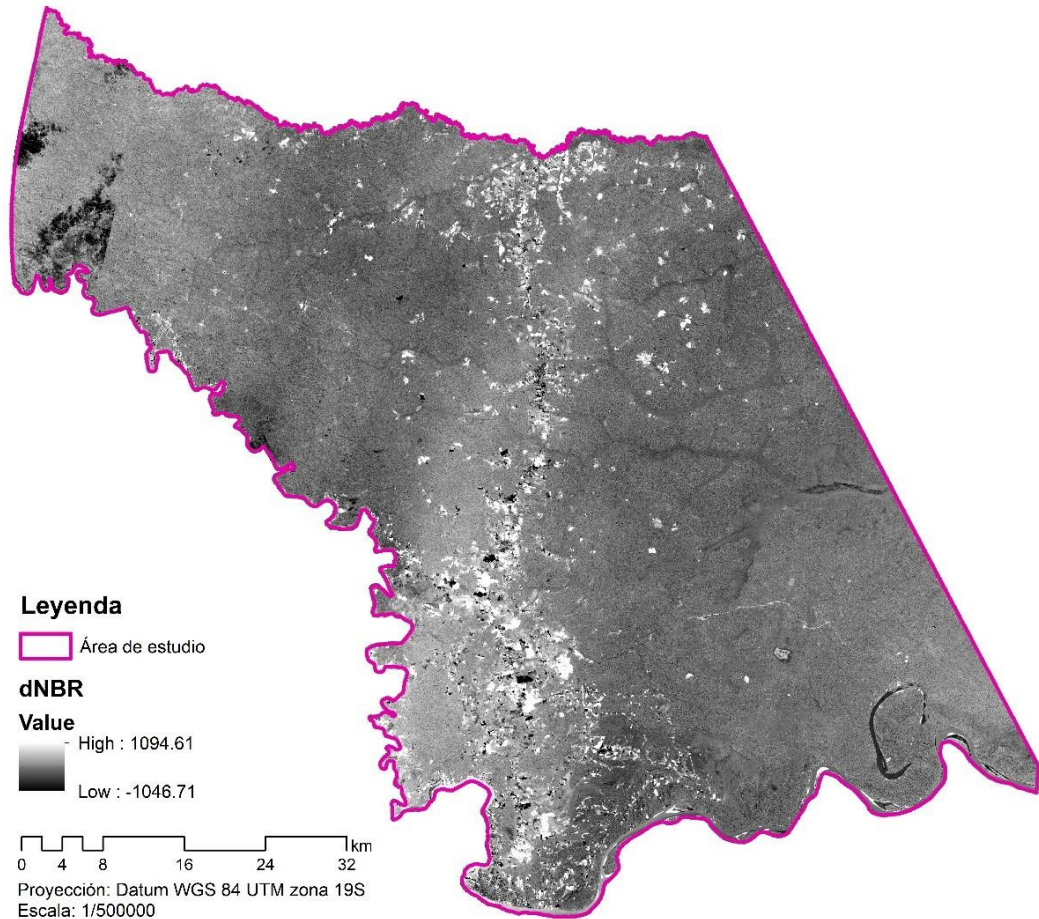


Figura 12. Severidad de quema del área de estudio usando el índice de enfoque bilateral dNBR derivado de imágenes Sentinel-2 MSI (tonalidad de grises).

El mayor porcentaje de área quemada (4,123%) se obtuvo para el nivel de Baja severidad mientras que el nivel más bajo correspondió a Alto (0,002%). La distribución espacial y el patrón de quema se representan en la figura 12 y 13. Se observó que el número de eventos de incendios y el porcentaje de quema se produce con mayor incidencia en un rango de aproximado de 10 km de la vía principal y 2 km de vías secundarias (Figura 12 y 13). Esto hace deducir que los agricultores están practicando la quema de rastrojos en sus campos y en algunos casos producto de la tala para apertura de nuevas áreas agrícolas.

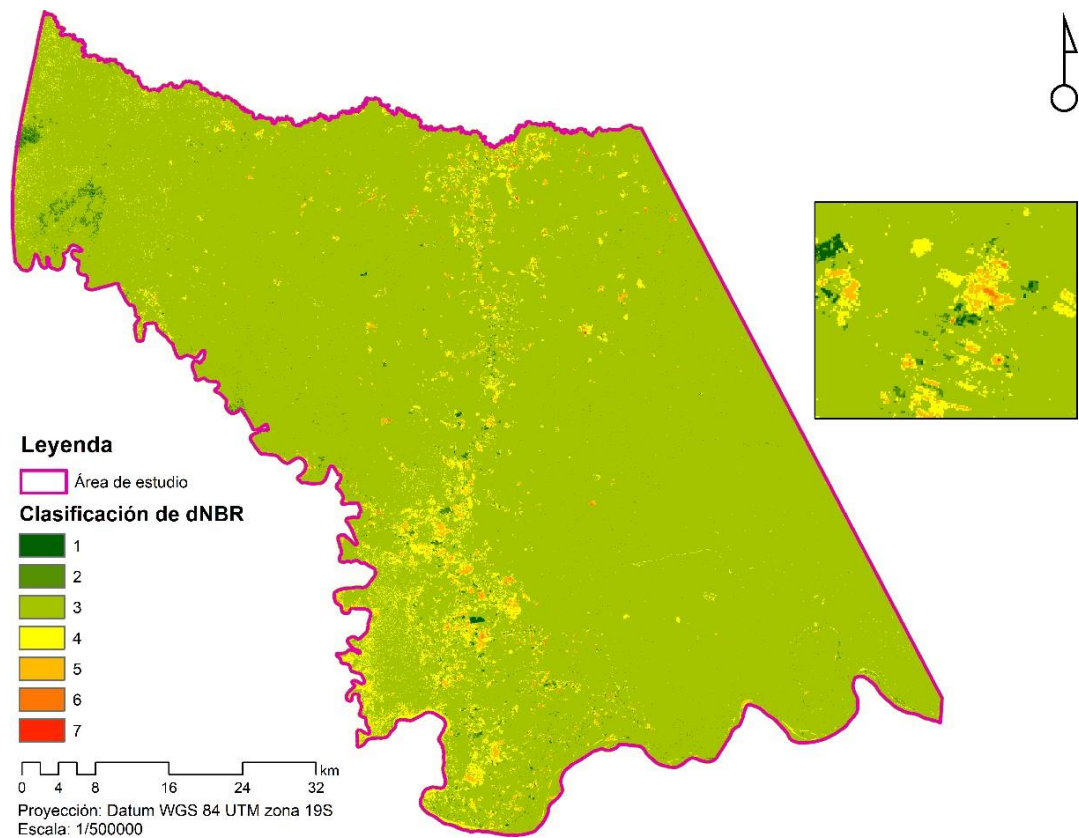


Figura 13. Severidad de quema del área de estudio usando el índice de enfoque bilateral dNBR derivado de imágenes Sentinel-2 MSI (color).

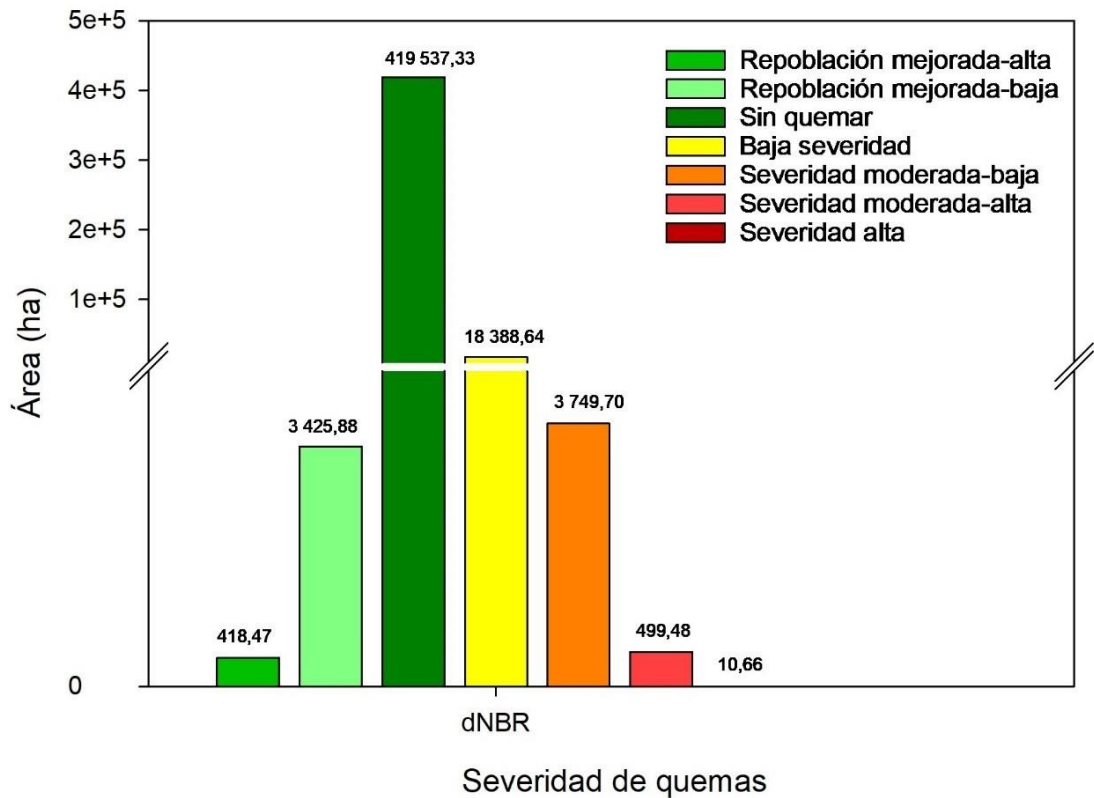


Figura 14. Área quemada por nivel de severidad de quemas con un Índice de enfoque bilateral dNBR derivado de imágenes Sentinel-2 MSI.

Los resultados, reflejan los índices reflectantes basados en NBR derivados de Sentinel-2 MSI corroborados con mediciones de campo de la severidad de las quemaduras. La eficacia de estos índices para discriminar los cambios producidos por el fuego está bien establecida (Key y Benson 1999b; Key y Benson 1999c; Key y Benson 1999d; Key y Benson 1999a; Key y Benson 2002; Key y Benson 2005; Key y Benson 2006; Miller y Thode 2007; Miller et al. 2009; Miller et al. 2016; Arjasakusuma et al. 2022; Deshpande et al. 2022a; Deutsch y Fletcher 2022), debido principalmente a la reducción de la reflectancia NIR, sensible al contenido de clorofila, y al aumento de reflectancia SWIR, relacionada con una disminución en el contenido de agua en la vegetación y el suelo (Miller y Thode 2007; García-Llamas et al. 2019).

A pesar del buen desempeño general de las métricas basadas en NBR y dNBR la respuesta de los índices individuales difirió entre la severidad de los incendios por estrato, sin embargo, el dNBR coincidentemente con Tanase et al. (2013) y Alarcon-Aguirre et al. (2022) presentaron una buena consistencia

con la severidad de la quema del sitio, pero más débilmente con la severidad de la quema del suelo, probablemente debido al efecto protector de la vegetación en el suelo y las deficiencias de los sensores pasivos para ver debajo del dosel (Tanase et al. 2010a; Tanase et al. 2010b; Tanase et al. 2013; Tanase et al. 2015b; Tanase et al. 2015a; Tanase et al. 2020). Por tanto, nuestros resultados corroboran ciertas limitaciones de los datos de teledetección para analizar los efectos del fuego en el suelo (Fernández-Manso et al. 2016; García-Llamas et al. 2019; Fernández et al. 2021). Esto podría explicarse por la heterogeneidad de los tipos de vegetación antes del incendio en la Amazonia, con diferente contenido de clorofila y cubierta de dosel, lo que puede sesgar las estimaciones de la severidad de la quema utilizando dNBR debido a la fuerte influencia de la vegetación antes del incendio sobre la magnitud de este índice (Colson et al. 2018; Bonilla-Aldana et al. 2019; Barni et al. 2021; Dindaroglu et al. 2021; Llorens et al. 2021; Afira y Wijayanto 2022; Arjasakusuma et al. 2022; Deshpande et al. 2022a; Deshpande et al. 2022b)

4.3 Precisión de índice (dNBR)

La precisión conjunta de la clasificación de niveles severidad de quema obtenida de la matriz de confusión fue de 78% y una concordancia del estadístico kappa de 0,706 (Considerable) (Tabla 7 y 9) (Cohen 1960; Cohen et al. 2003).

Los datos obtenidos en campo del Índice Compuesto de Quemaduras (CBI) utilizados en la validación (n=354) para el periodo anual 2022 (Tablas 9) fueron significativos para medir el nivel de severidad de quema (Cohen 1960; Cohen et al. 2003; Yaghobi et al. 2019). El criterio utilizado fue de periodicidades (frecuencias). Los valores de las diagonales presentan una concordancia relevante para los demás cálculos.

Tabla 8. *Matriz de precisión (matriz de confusión e Índice de kappa) de datos de dNBR*

Categoría		CBI				
		Baja (1)	Moderada-baja (2)	Moderada-alta (3)	Alta (4)	$f_{\text{Sentinel-2}}$
dNBR (Sentinel-2)	Baja (1)	68 (20)	13	6	0	87
	Moderada-baja (2)	10	65 (23)	13	0	88
	Moderada-alta (3)	3	10	67 (24)	9	89
	Alta (4)	0	4	10	76 (22)	90
	f_{CBI}	81	92	96	85	354
$f_o=$	276		$f_c=$ 89			
$k=$	0,706		$k_M=$ 0,627			
$\sigma_k=$	0,0294		$\sigma_{k_o}=$ 0,0307			
$z=$	23,010		Matriz de confusión= 0,780			

El valor de $k = 0,706$, muestra que más de la mitad de las muestras verificadas están de acuerdo (excluyendo el azar) respecto a la dNBR de Sentinel-2. k_M fue de 0,627, donde una fracción considerable de las disconformidades es producto de las diferencias marginales. Con un 95% probabilidad la x como valor poblacional se encuentre entre 0,649 y 0,764 (Cohen 1960; Cohen et al. 2003). Con una probabilidad de $(P) < 0,001$, el valor de z (23,010) es significativo (Tabla 9) (Yaghibi et al. 2019; Koley y Chockalingam 2022).

A pesar de las diferentes especies de vegetación por cobertura y regímenes de incendios en la Amazonia de Madre de Dios, nuestro estudio mostró que el dNBR es especialmente útil como predictor de la gravedad de la quema, haciendo que este estudio presente relación con trabajos anteriores que demostraron relaciones estadísticamente significativas en la precisión conjunta (Key y Benson 2006; Miller y Thode 2007; Miller et al. 2009; Dzwonko et al. 2015; Miller et al. 2016; Delcourt et al. 2021; Dindaroglu et al. 2021; Afira y Wijayanto 2022; Alcaras et al. 2022; Arjasakusuma et al. 2022; Seydi et al. 2022).

CONCLUSIONES

El NBR y dNBR capturó la variabilidad de incendios de gravedad baja a alta dentro de las cicatrices de quemaduras. Antes de la quema el NBR cuantificó 30,38 ha y 745,60 ha posterior a ella.

El área de estudio cuantificó la mayor proporción en el nivel de severidad baja con 18 388,64 ha seguido de severidad moderada-baja con 3 749,70 ha. En total obtuvo 22 648,49 ha.

La precisión conjunta de la clasificación de la matriz de confusión fue de 78% y una concordancia de kappa de 0,706 (Considerable).

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna, donde la reflectancia de la vegetación en un paisaje heterogéneo del área de influencia del corredor Vial Interoceánico Sur Tramo III del distrito de Las Piedras en el año 2022 mediante índices bitemporales, puede incrementar favorablemente el mapeo de la severidad de las quemaduras y la distinción de alertas tempranas o intermedias durante la estacionalidad seca de áreas afectadas y no afectadas por los incendios.

SUGERENCIAS

La teledetección espacial en los últimos años se ha convertido en una tecnología de uso transversal de la mayoría de las disciplinas, por consiguiente, su amplio uso facilitaría el monitoreo de la vegetación por acciones antrópicas, en este caso la acción oportuna ante eventos ocasionados por el fuego. Sin embargo, debe probarse otras técnicas de las variantes del enfoque monolateral que apliquen imágenes de mayor resolución y permita obtener un mayor rendimiento en cuanto precisión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISON, P. Y OOMMEN, T. Utilizing satellite radar remote sensing for burn severity estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 73, 292-299. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.002>

AFIRA, N. Y WIJAYANTO, A. W. Mono-temporal and multi-temporal approaches for burnt area detection using Sentinel-2 satellite imagery (a case study of Rokan Hilir Regency, Indonesia). *Ecological Informatics*, 2022/07/01/2022, 69, 101677. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101677>

ALARCON-AGUIRRE, G., MIRANDA FIDHEL, R. F., RAMOS ENCISO, D., CANAHUIRE-ROBLES, R., RODRIGUEZ-ACHATA, L. Y GARATE-QUISPE, J. Burn Severity Assessment Using Sentinel-1 SAR in the Southeast Peruvian Amazon, a Case Study of Madre de Dios. *Fire*, 2022, 5(4). doi:10.3390/fire5040094

ALARCON, G., CANAHUIRE, R. R., GUEVARRA, F. M. G., RODRIGUEZ, L., GALLEGOS, L. E. Y GARATE-QUISPE, J. Dinámica de la pérdida de bosques en el sureste de la Amazonia peruana: un estudio de caso en Madre de Dios. *Ecosistemas*, 2021, 30(2), 2175-2175. doi:<https://doi.org/10.7818/ECOS.2175>

ALARCÓN, G., DÍAZ, J., VELA, M., GARCÍA, M. Y GUTIÉRREZ, J. Deforestación en el sureste de la amazonia del Perú entre los años 1999-2013; caso Regional de Madre de Dios (Puerto Maldonado–Inambari). *Journal of High Andean Research*, 2016, 18(3), 319-330. doi:<http://dx.doi.org/10.18271/ria.2016.221>

ALCARAS, E., COSTANTINO, D., GUASTAFERRO, F., PARENTE, C. Y PEPE, M. Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): A New Index for Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing* [Type of Work]. 2022, vol. 14, no. 7. ISSN 2072-4292. doi:10.3390/rs14071727.

ANAYA, J. A. Y CHUVIECO, E. Validación para Colombia de la estimación de área quemada del producto L3JRC en el periodo 2001-2007/Validation of the L3JRC burned area product estimation in Colombia from 2001 to 2007. *Actualidades Biológicas*, 2010, 32(92), 29.

ANAYA, J. A., SIONE, W. F. Y RODRÍGUEZ-MONTELLANO, A. M. Identificación de áreas quemadas mediante el análisis de series de tiempo en el ámbito de computación en la nube. *Revista de Teledetección*, 2018, (51), 61-73. doi:<https://doi.org/10.4995/raet.2018.8618>

ARJASAKUSUMA, S., KUSUMA, S. S., VETRITA, Y., PRASASTI, I. Y ARIEF, R. Monthly Burned-Area Mapping using Multi-Sensor Integration of Sentinel-1 and Sentinel-2 and machine learning: Case Study of 2019's fire events in South Sumatra Province, Indonesia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2022/08/01/ 2022, 27, 100790. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100790>

BAR, S., PARIDA, B. R. Y PANDEY, A. C. Landsat-8 and Sentinel-2 based Forest fire burn area mapping using machine learning algorithms on GEE cloud platform over Uttarakhand, Western Himalaya. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2020/04/01/ 2020, 18, 100324. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100324>

BARAY, H. L. Á. *Introducción a la metodología de la investigación*. Edtion ed.: Juan Carlos Martínez Coll, 2006. ISBN 8469019996.

BARNI, P. E., REGO, A. C. M., SILVA, F. D. C. F., LOPES, R. A. S., XAUD, H. A. M., XAUD, M. R., BARBOSA, R. I. Y FEARNSIDE, P. M. Logging Amazon forest increased the severity and spread of fires during the 2015–2016 El Niño. *Forest ecology and management*, 2021/11/15/ 2021, 500, 119652. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119652>

BONILLA-ALDANA, D. K., SUÁREZ, J. A., FRANCO-PAREDES, C., VILCARROMERO, S., MATTAR, S., GÓMEZ-MARÍN, J. E., VILLAMIL-

GÓMEZ, W. E., RUÍZ-SÁENZ, J., CARDONA-OSPINA, J. A., IDARRAGA-BEDOYA, S. E., GARCÍA-BUSTOS, J. J., JIMENEZ-POSADA, E. V. Y RODRÍGUEZ-MORALES, A. J. Brazil burning! What is the potential impact of the Amazon wildfires on vector-borne and zoonotic emerging diseases? – A statement from an international experts meeting. *Travel Medicine and Infectious Disease*, 2019/09/01/ 2019, 31, 101474. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2019.101474>

BOOYSEN, R., GLOAGUEN, R., LORENZ, S., ZIMMERMANN, R. Y NEX, P. A. M. Geological Remote Sensing. In D. ALDERTON Y S.A. ELIAS eds. *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*. Oxford: Academic Press, 2021, p. 301-314.

BOUAICHA, O., MIMMO, T., TIZIANI, R., PRAEG, N., POLIDORI, C., LUCINI, L., VIGANI, G., TERZANO, R., SANCHEZ-HERNANDEZ, J. C., ILLMER, P., CESCO, S. Y BORRUSO, L. Microplastics make their way into the soil and rhizosphere: A review of the ecological consequences. *Rhizosphere*, 2022/06/01/ 2022, 22, 100542. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100542>

BOUVET, A., MERMOZ, S., BALLÈRE, M., KOLECK, T. Y LE TOAN, T. Use of the SAR Shadowing Effect for Deforestation Detection with Sentinel-1 Time Series. *Remote Sensing*, 2018, 10(8). doi:10.3390/rs10081250

BROWN, A. R., PETROPOULOS, G. P. Y FERENTINOS, K. P. Appraisal of the Sentinel-1 & 2 use in a large-scale wildfire assessment: A case study from Portugal's fires of 2017. *Applied Geography*, 2018/11/01/ 2018, 100, 78-89. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.10.004>

CASTRO, F. El proceso de investigación y su esquema de elaboración. Editorial Uyapar. Caracas, 2003.

CAZAU, P. Introducción a la investigación en ciencias sociales. Lima. Editorial Universidad Ricardo Palma, 2006.

CERDA, J. Y VILLARROEL, L. Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. Revista chilena de pediatría, 2008, 79(1), 54-58. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0370-41062008000100008>

CHÁVEZ, A., HUAMANI, L., FERNANDEZ, R., BEJAR, N., VALERA, F., PERZ, S., BROWN, I., DOMÍNGUEZ, S., PINEDO, R. Y ALARCÓN, G. Regional Deforestation Trends within Local Realities: Land-Cover Change in Southeastern Peru 1996–2011. Land, 2013, 2(2), 131. doi:<https://doi.org/10.3390/land2020131>

CHUVIECO, E. Empleo de imágenes de satélite para medir la estructura del paisaje: análisis cuantitativo y representación cartográfica. Serie Geográfica, 1996, 6, 131-147.

CHUVIECO, E. Teledetección espacial: la observación de la Tierra desde el espacio 2002.

CHUVIECO, E., CIFUENTES, Y., HANTSON, S., LÓPEZ, A. A., RAMO, R. Y TORRES, J. Comparación entre focos de calor MODIS y perímetros de área quemada en incendios mediterráneos. Revista Española de Teledetección, 2012, 37, 9-22.

CHUVIECO, E. Y HANTSON, S. Procesamiento estándar de imágenes Landsat. Documento técnico de algoritmos a aplicar. Version1. Plan Nacional de Teledetección. Instituto Geográfico Nacional. En línea; http://www.ign.es/PNT/pdf/especificacionestecnicas-pnt-mediatar-landsat_v2-2010.pdf, 2010.

COHEN, J. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. Educational and Psychological Measurement, 1960/04/01 1960, 20(1), 37-46. doi:<https://doi.org/10.1177/001316446002000104>

COHEN, J., MANION, L. Y MORRISON, J. Designing a qualitative study. In.: Newsbury Park: CA Sage, 2003.

COLSON, D., PETROPOULOS, G. P. Y FERENTINOS, K. P. Exploring the Potential of Sentinels-1 & 2 of the Copernicus Mission in Support of Rapid and Cost-effective Wildfire Assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018/12/01/ 2018, 73, 262-276. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.011>

DE ANDRADE, D. F. C., RUSCHEL, A. R., SCHWARTZ, G., DE CARVALHO, J. O. P., HUMPHRIES, S. Y GAMA, J. R. V. Forest resilience to fire in eastern Amazon depends on the intensity of pre-fire disturbance. *Forest ecology and management*, 2020/09/15/ 2020, 472, 118258. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118258>

DELCOURT, C. J. F., COMBEE, A., IZBICKI, B., MACK, M. C., MAXIMOV, T., PETROV, R., ROGERS, B. M., SCHOLTEN, R. C., SHESTAKOVA, T. A., VAN WEES, D. Y VERAVERBEKE, S. Evaluating the Differenced Normalized Burn Ratio for Assessing Fire Severity Using Sentinel-2 Imagery in Northeast Siberian Larch Forests. *Remote Sensing*, 2021, 13(12). doi:10.3390/rs13122311

DESHPANDE, M. V., PILLAI, D. Y JAIN, M. Agricultural burned area detection using an integrated approach utilizing multi spectral instrument based fire and vegetation indices from Sentinel-2 satellite. *MethodsX*, 2022/01/01/ 2022a, 9, 101741. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101741>

DESHPANDE, M. V., PILLAI, D. Y JAIN, M. Detecting and quantifying residue burning in smallholder systems: An integrated approach using Sentinel-2 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022/04/01/ 2022b, 108, 102761. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102761>

DEUTSCH, S. Y FLETCHER, R. The 'Bolsonaro bridge': Violence, visibility, and the 2019 Amazon fires. *Environmental Science & Policy*, 2022/06/01/ 2022, 132, 60-68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.02.012>

DINDAROGLU, T., BABUR, E., YAKUPOGLU, T., RODRIGO-COMINO, J. Y CERDÀ, A. Evaluation of geomorphometric characteristics and soil properties after a wildfire using Sentinel-2 MSI imagery for future fire-safe forest. *Fire Safety Journal*, 2021/06/01/ 2021, 122, 103318. doi:<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103318>

DOS REIS, M., GRAÇA, P. M. L. D. A., YANAI, A. M., RAMOS, C. J. P. Y FEARNSIDE, P. M. Forest fires and deforestation in the central Amazon: Effects of landscape and climate on spatial and temporal dynamics. *Journal of Environmental Management*, 2021/06/15/ 2021, 288, 112310. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112310>

DZWONKO, Z., LOSTER, S. Y GAWROŃSKI, S. Impact of fire severity on soil properties and the development of tree and shrub species in a Scots pine moist forest site in southern Poland. *Forest ecology and management*, 2015/04/15/ 2015, 342, 56-63. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.01.013>

ELIJAH, R. Y JENSEN, J. R. Remote sensing of mangrove wetlands: relating canopy spectra to site-specific data 1996. doi:https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1996journal/aug/1996_aug_939-948.pdf

EPTING, J., VERBYLA, D. Y SORBEL, B. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sensing of Environment*, 2005/06/30/ 2005, 96(3), 328-339. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.002>

FERNÁNDEZ-MANSO, A., FERNÁNDEZ-MANSO, O. Y QUINTANO, C. SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. *International Journal of Applied Earth Observation and*

Geoinformation, 2016/08/01/ 2016, 50, 170-175.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.03.005>

FERNÁNDEZ, R., ALARCÓN, G., CANAHUIRE, R. Y GARATE-QUISPE, J. Caracterización espacio temporal de focos de calor e incendios forestales en el suroeste de la Amazonía peruana. In A. EDITORA ed. *Aspectos e impactos ambientais: o que geram as atividades do homem?* : Atena Editora Ponta Grossa – Paraná –Brasil, 2021.

FUENTES, H. L. Monitoreo de Quemas en el departamento de Pando–Bolivia año 2015 mediante Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. In., 2015.

GARCÍA-LLAMAS, P., SUÁREZ-SEOANE, S., FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J. M., FERNÁNDEZ-GARCÍA, V., FERNÁNDEZ-MANSO, A., QUINTANO, C., TABOADA, A., MARCOS, E. Y CALVO, L. 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*, 2019/08/01/ 2019, 80, 137-144. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.006>

GORELICK, N., HANCHER, M., DIXON, M., ILYUSHCHENKO, S., THAU, D. Y MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202, 18-27.

(IIAP). Macro Zonificación Ecológica Económica de Madre deDios. In G.D.R.N.Y.M. AMBIENTE. Madre de Dios - Perú, 2009, p. 208.

HERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ, C. Y BAPTISTA, P. *Metodología de la Investigación (Quinta edición ed.)*.(J. Mares Chacón, Ed.) Mexico, México DF. Edtion ed.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, SA de CV, 2010.

HOLDRIDGE, L. R. Life zone ecology. Life zone ecology., 1967, (rev. ed.).

HOLTGRAVE, A.-K., RÖDER, N., ACKERMANN, A., ERASMI, S. Y KLEINSCHMIT, B. Comparing Sentinel-1 and -2 Data and Indices for Agricultural Land Use Monitoring. *Remote Sensing*, 2020, 12(18). doi:10.3390/rs12182919

IGLESIAS, M. E. *Metodología de la investigación científica: diseño y elaboración de protocolos y proyectos*. Edtion ed.: Noveduc, 2021. ISBN 987538464X.

(INPE). Amazon program—monitoring the Brazilian Amazon by satellite: the PRODES, DETER, DEGRAD and terraclass systems. 2020a.

(INPE). Projeto PRODES: Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira porsatélite. 2020b.

(INRENA). Mapa Forestal del Perú. In M.D.T.M.Y.R.D.L.B.D.D.L.D.D.I.Y.C.F.Y.D.F.S.D.L. DGFFS. *Mapa Forestal del Perú elaborado por el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA)*. Lima - Perú: Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre, 2000.

JENSEN, J. R. *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e*. Edtion ed.: Pearson Education India, 2009. ISBN 8131716805.

KAUFMAN, Y. J. Y SENDRA, C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery. *International journal of remote sensing*, 1988/08/01 1988, 9(8), 1357-1381. doi:10.1080/01431168808954942

KERLE, N., JANSSEN, L. L. F. Y HUURNEMAN, G. C. Principles of remote sensing. ITC, Educational textbook series, 2004, 2, 250.

KEY, C. H. Y BENSON, N. C. The composite burn index (CBI): field rating of burn severity. Geological Survey, US, 1999a.

KEY, C. H. Y BENSON, N. C. Measuring and remote sensing of burn severity. In.: University of Idaho and International Association of Wildland Fire Moscow, ID, 1999b, vol. 2, p. 284.

KEY, C. H. Y BENSON, N. C. The Normalized Burn Ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity. United States Geological Survey, Northern Rocky Mountain Science Center: Bozeman, MT, USA, 1999c.

KEY, C. H. Y BENSON, N. C. The Normalized Burn Ratio, a Landsat TM radiometric index of burn severity incorporating multi-temporal differencing. US Geological Survey, 1999d, 2000.

KEY, C. H. Y BENSON, N. C. Remote sensing measure of severity, the normalized burn ratio. Fire effects monitoring and inventory protocol, landscape assessment. Retrieved March, 2002, 30, 2003.

KEY, C. H. Y BENSON, N. C. Landscape assessment: ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system, 2005, 2004.

KEY, C. H. Y BENSON, N. C. Landscape assessment (LA). In: Lutes, Duncan C.; Keane, Robert E.; Caratti, John F.; Key, Carl H.; Benson, Nathan C.; Sutherland, Steve; Gangi, Larry J. 2006. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. LA-1-55, 2006, 164.

KOLEY, S. Y CHOCKALINGAM, J. Sentinel 1 and Sentinel 2 for cropland mapping with special emphasis on the usability of textural and vegetation indices. *Advances in Space Research*, 2022/02/15/ 2022, 69(4), 1768-1785. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.10.020>

KUHN, M. Y JOHNSON, K. *Applied predictive modeling*. Edtion ed.: Springer, 2013.

LANDIS, J. R. Y KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics*, 1977, 159-174. doi:<https://doi.org/10.2307/2529310>

LI, X., ZHOU, Y., GONG, P., SETO, K. C. Y CLINTON, N. Developing a method to estimate building height from Sentinel-1 data. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 240, 111705. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111705>

LIVERPOOL, L. Burning of Amazon may get a lot worse. *New Scientist*, 2020/01/18/ 2020, 245(3265), 16. doi:[https://doi.org/10.1016/S0262-4079\(20\)30106-8](https://doi.org/10.1016/S0262-4079(20)30106-8)

LLORENS, R., SOBRINO, J. A., FERNÁNDEZ, C., FERNÁNDEZ-ALONSO, J. M. Y VEGA, J. A. A methodology to estimate forest fires burned areas and burn severity degrees using Sentinel-2 data. Application to the October 2017 fires in the Iberian Peninsula. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021/03/01/ 2021, 95, 102243. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102243>

LUTES, D. C., KEANE, R. E., CARATTI, J. F., KEY, C. H., BENSON, N. C., SUTHERLAND, S. Y GANGI, L. J. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 1 CD., 2006, 164.

MILLER, J. D., KNAPP, E. E., KEY, C. H., SKINNER, C. N., ISBELL, C. J., CREASY, R. M. Y SHERLOCK, J. W. Calibration and validation of the relative differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) to three measures of fire severity in the Sierra Nevada and Klamath Mountains, California, USA. *Remote*

Sensing of Environment, 2009/03/16/ 2009, 113(3), 645-656.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.009>

MILLER, J. D. Y THODE, A. E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). Remote Sensing of Environment, 2007/07/12/ 2007, 109(1), 66-80.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>

MILLER, M. E., ELLIOT, W. J., BILLMIRE, M., ROBICHAUD, P. R. Y ENDSLEY, K. A. Rapid-response tools and datasets for post-fire remediation: Linking remote sensing and process-based hydrological models. International Journal of Wildland Fire, 2016, 25(10), 1061-1073.

MORRESI, D., MARZANO, R., LINGUA, E., MOTTA, R. Y GARBARINO, M. Mapping burn severity in the western Italian Alps through phenologically coherent reflectance composites derived from Sentinel-2 imagery. Remote Sensing of Environment, 2022/02/01/ 2022, 269, 112800.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112800>

MPAKAIRI, K. S., NDAIMANI, H. Y KAVHU, B. Exploring the utility of Sentinel-2 MSI derived spectral indices in mapping burned areas in different land-cover types. Scientific African, 2020/11/01/ 2020, 10, e00565.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00565>

MUTANGA, O. Y KUMAR, L. Google earth engine applications. In.: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019.

MYERS, N., MITTERMEIER, R. A., MITTERMEIER, C. G., DA FONSECA, G. A. B. Y KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature, 2000, 403(6772), 853-858. doi:<https://doi.org/10.1038/35002501>

NASERY, S. Y KALKAN, K. Burn area detection and burn severity assessment using Sentinel 2 MSI data: The case of Karabağlar district, İzmir/Turkey. Turkish Journal of Geosciences, 2020, 1(2), 72-77.

NIRO, F., GORYL, P., DRANSFELD, S., BOCCIA, V., GASCON, F., ADAMS, J., THEMANN, B., SCIFONI, S. Y DOXANI, G. European Space Agency (ESA) calibration/validation strategy for optical land-imaging satellites and pathway towards interoperability. *Remote Sensing*, 2021, 13(15), 3003.

OCHOA, C. Y PÁEZ, O. Inferencia estadística: probabilidad, variables aleatorias y distribuciones de probabilidad. *Evid Pediatr*, 2019, 15, 27.

OLIVARES, B. O. Y LÓPEZ-BELTRÁN, M. A. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada aplicado al territorio indígena agrícola de Kashaama, Venezuela. *Cuadernos de Investigación UNED*, 2019, 11, 112-121. doi:<http://dx.doi.org/10.22458/urj.v11i2.2299>

PERZ, S., CASTRO, W., ROJAS, R., CASTILLO, J., CHÁVEZ, A., GARCÍA, M., GUADALUPE, Ó., GUTIÉRREZ, T., HURTADO, A., MAMANI, Z., MAYNA, J., MELLO, R., PASSOS, V., REYES, J., SAAVEDRA, M., DE WIT, F., ACUÑA, N., ALARCÓN, G. Y ROJAS, D. La Amazonia como un sistema socio-ecológico: Las dinámicas de cambios complejos humanos y ambientales en una frontera trinacional. In J. POSTIGO Y K. YOUNG eds. *Naturaleza y sociedad: Perspectivas socio-ecológicas sobre cambios globales en América Latina*. Lima-Perú: desco, IEP e INTE-PUCP, 2016, p. 444.

PERZ, S., QIU, Y., XIA, Y., SOUTHWORTH, J., SUN, J., MARSIK, M., ROCHA, K., PASSOS, V., ROJAS, D., ALARCÓN, G., BARNES, G. Y BARALOTO, C. Trans-boundary infrastructure and land cover change: Highway paving and community-level deforestation in a tri-national frontier in the Amazon. *Land Use Policy*, 2013, 34, 27-41. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.01.009>

PORCHER, V., THOMAS, E., CORVERA GOMRINGER, R. Y BARDALES LOZANO, R. Fire- and distance-dependent recruitment of the Brazil nut in the Peruvian Amazon. *Forest ecology and management*, 2018/11/01/ 2018, 427, 52-59. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.052>

PUZZI, A., FLORES-ANDERSON, A., GRIFFIN, R., HERNDON, K. Y MEYER, F. J. Assessing SAR C-band data to effectively distinguish modified land uses in a heavily disturbed Amazon forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 94, 102-214.

PUZZI, A., FLORES-ANDERSON, A., GRIFFIN, R., HERNDON, K. Y MEYER, F. J. Assessing SAR C-band data to effectively distinguish modified land uses in a heavily disturbed Amazon forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021/02/01/ 2021, 94, 102214. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102214>

RED AMAZÓNICA DE INFORMACIÓN SOCIOAMBIENTAL GEORREFERENCIADA (RAISG). Destrucción del Amazonas: las principales amenazas para la mayor selva tropical del mundo en los 9 países que la comparten (2001-2018). 2022.

RANGEL-CH, J. O. Y VELÁZQUEZ, A. Métodos de estudio de la vegetación. Colombia diversidad biótica II. Tipos de vegetación en Colombia, 1997, 59-82.

RIVERA-HUERTA, H., SAFFORD, H. D. Y MILLER, J. D. Patterns and trends in burned area and fire severity from 1984 to 2010 in the Sierra de San Pedro Mártir, Baja California, Mexico. *Fire Ecology*, 2016, 12(1), 52-72.

ROTETA, E., BASTARRIKA, A., PADILLA, M., STORM, T. Y CHUVIECO, E. Development of a Sentinel-2 burned area algorithm: Generation of a small fire database for sub-Saharan Africa. *Remote Sensing of Environment*, 2019/03/01/ 2019, 222, 1-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.011>

ROY, D. P., HUANG, H., BOSCHETTI, L., GIGLIO, L., YAN, L., ZHANG, H. H. Y LI, Z. Landsat-8 and Sentinel-2 burned area mapping - A combined sensor multi-temporal change detection approach. *Remote Sensing of Environment*, 2019/09/15/ 2019, 231, 111254. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111254>

SERRANO, M. A. M., CATANIA, M., SÁNCHEZ, J., VASCONCELOS, A., KUIJPER, D. Y MARC, X. Sentinel-1A flight dynamics LEOP operational experience. In., 2015.

SEYDI, S. T., HASANLOU, M. Y CHANUSSOT, J. Burnt-Net: Wildfire burned area mapping with single post-fire Sentinel-2 data and deep learning morphological neural network. *Ecological Indicators*, 2022/07/01/ 2022, 140, 108999. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108999>

SHANER, J. Y WRIGHTSELL, J. *Editing in arcMap*. Edtion ed.: Esri, 2000. ISBN 1879102978.

SINGH, D., KUNDU, N. Y GHOSH, S. Mapping rice residues burning and generated pollutants using Sentinel-2 data over northern part of India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2021/04/01/ 2021, 22, 100486. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100486>

SOUTHWORTH, J., MARIK, M., QIU, Y., PERZ, S., CUMMING, G., STEVENS, F., ROCHA, K., DUCHELLE, A. Y BARNES, G. Roads as Drivers of Change: Trajectories across the Tri-National Frontier in MAP, the Southwestern Amazon. *Remote Sensing*, 2011, 3(5), 1047-1066. doi:<https://doi.org/10.3390/rs3051047>

TANASE, M. A., BELENGUER-PLOMER, M. A., ROTETA, E., BASTARRIKA, A., WHEELER, J., FERNÁNDEZ-CARRILLO, Á., TANSEY, K., WIEDEMANN, W., NAVRATIL, P. Y LOHBERGER, S. Burned area detection and mapping: Intercomparison of Sentinel-1 and Sentinel-2 based algorithms over tropical Africa. *Remote Sensing*, 2020, 12(2), 334.

TANASE, M. A., KENNEDY, R. Y APONTE, C. Fire severity estimation from space: A comparison of active and passive sensors and their synergy for different forest types. *International Journal of Wildland Fire*, 2015a, 24(8), 1062-1075. doi:<https://doi.org/10.1071/WF15059>

TANASE, M. A., KENNEDY, R. Y APONTE, C. Radar Burn Ratio for fire severity estimation at canopy level: An example for temperate forests. *Remote Sensing of Environment*, 2015b, 170, 14-31.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.025>

TANASE, M. A., SANTORO, M., APONTE, C. Y DE LA RIVA, J. Polarimetric properties of burned forest areas at C-and L-band. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 7(1), 267-276. doi:10.1109/JSTARS.2013.2261053

TANASE, M. A., SANTORO, M., DE LA RIVA, J., FERNANDO, P. Y LE TOAN, T. Sensitivity of X-, C-, and L-band SAR backscatter to burn severity in Mediterranean pine forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010a, 48(10), 3663-3675. doi:10.1109/TGRS.2010.2049653

TANASE, M. A., SANTORO, M., WEGMÜLLER, U., DE LA RIVA, J. Y PÉREZ-CABELLO, F. Properties of X-, C-and L-band repeat-pass interferometric SAR coherence in Mediterranean pine forests affected by fires. *Remote Sensing of Environment*, 2010b, 114(10), 2182-2194. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.021>

TORRES, R., SNOEIJ, P., GEUDTNER, D., BIBBY, D., DAVIDSON, M., ATTEMA, E., POTIN, P., ROMMEN, B., FLOURY, N. Y BROWN, M. GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120, 9-24. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>

TOWNSEND, J. T. Theoretical analysis of an alphabetic confusion matrix. *Perception & Psychophysics*, 1971, 9(1), 40-50. doi:<https://doi.org/10.3758/BF03213026>

VALDEZ-ZAVALA, K. M., BRAVO-PEÑA, L. C. Y MANZO-DELGADO, L. L. Áreas quemadas y cambio de uso del suelo en el suroeste de Chihuahua (México) durante el periodo 2013-2017: Identificación con el índice Normalized Burn Ratio (NBR). *Acta universitaria*, 2019, 29.

VAN DIJK, D., SHOAIE, S., VAN LEEUWEN, T. Y VERAVERBEKE, S. Spectral signature analysis of false positive burned area detection from agricultural harvests using Sentinel-2 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021/05/01/ 2021, 97, 102296. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102296>

VARGHESE, D., RADULOVIĆ, M., STOJKOVIĆ, S. Y CRNOJEVIĆ, V. Reviewing the potential of sentinel-2 in assessing the drought. *Remote Sensing*, 2021, 13(17), 3355. doi:<https://doi.org/10.3390/rs13173355>

YAGHOBI, S., HEIDARIZADI, Z. Y MIRZAPOUR, H. Comparing NDVI and RVI for forest density estimation and their relationships with rainfall (Case study: Malekshahi, Ilam Province). *Environmental Resources Research*, 2019, 7(2), 117-128. doi:10.22069/IJERR.2019.4819

ZUHLKE, M., FOMFERRA, N., BROCKMANN, C., PETERS, M., VECI, L., MALIK, J. Y REGNER, P. SNAP (sentinel application platform) and the ESA sentinel 3 toolbox. *ESASP*, 2015, 734, 21.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia.

Título: Análisis de la severidad de quemaduras mediante imágenes Sentinel-2 en un paisaje heterogéneo del área de influencia del corredor Vial Interoceánico Sur Tramo III del distrito de Las Piedras - Madre de Dios, periodo 2022.

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES/INDICADORES	METODO
¿Cuál será el nivel de severidad de quemaduras a través del sensor óptico Sentinel-2 mediante un enfoque bilateral (dNBR) del Índice de Quemado Normalizado (NBR) en un paisaje heterogéneo del área de influencia del corredor Vial Interoceánico Sur Tramo III del distrito de Las Piedras - Madre de Dios, periodo 2022?	Analizar la severidad de quemaduras a través del sensor óptico Sentinel-2 mediante un enfoque bilateral (dNBR) del Índice de Quemado Normalizado (NBR) en un paisaje heterogéneo del área de influencia del corredor Vial Interoceánico Sur Tramo III del distrito de Las Piedras - Madre de Dios, periodo 2022.	La reflectancia de la vegetación en un paisaje heterogéneo del área de influencia del corredor Vial Interoceánico Sur Tramo III del distrito de Las Piedras en el año 2022 mediante índices bitemporales, no favorece el mapeo de la severidad de las quemaduras ni la distinción de alertas tempranas o intermedias durante la estacionalidad seca de área afectadas y no afectadas por los incendios.	<p>Variable Dependiente</p> <p>Reflectancia antes y después del incendio de la cobertura en la unidad mínima de la imagen (píxel) en la imagen óptica Sentinel-2.</p> <p>Indicadores: Severidad de quemaduras</p> <p>Variable Independiente</p> <p>Cicatrices de quemaduras en el periodo 2022.</p> <p>Indicadores:</p> <ol style="list-style-type: none"> Superficie total (ha). Superficie por nivel de severidad de quemaduras. Matriz de Confusión (Índice Global) e Índice de Kappa (k). 	<p>Tipo: descriptiva, correlacional y predictivo</p> <p>Método:</p> <ol style="list-style-type: none"> Pre procesamiento de imágenes S2 con la plataforma Google Earth Engine. Cuantificación de Índice de NBR y dNBR S2. Matriz de Confusión e Índice de concordancia (kappa) de la relación de dNBR y CBI. <p>Población y muestra: se empleará la distribución binomial de probabilidad.</p> $n = \frac{Z^2 p(qN)}{(N-1)E^2 + Z^2 pq}$ <p>“Z”: Es el valor de la curva normal estandarizada para un nivel determinado de probabilidad, 1,96 (95%).</p> <p>“p”: indica el porcentaje de aciertos estimado, 0,50 (50%).</p> <p>“q”: Indica el porcentaje de errores (q = 1 – p), 0,50 (50%).</p> <p>“N”: Tamaño de la población”.</p> <p>“E”: El error permitido, 0,05 (5%)”.</p>
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS			
<p>P.E.1 ¿Cuánto será la superficie de quemaduras mediante imágenes de Sentinel-2 a través de un enfoque bilateral (dNBR) del Índice de Quemado Normalizado (NBR) en el periodo 2022?</p> <p>P.E.2 ¿Cuánto son los niveles de severidad de quemaduras mediante imágenes de Sentinel-2 a través de un enfoque bilateral (dNBR) del Índice de Quemado Normalizado (NBR) en el periodo 2022?</p> <p>P.E.3 ¿Cuál será la presión de los mapas de severidad de quemaduras basados en la relación del índice bitemporal (dNBR) y datos del Índice de Quemaduras Compuesto (CBI)?</p>	<p>O.E.1 Cuantificar la superficie de quemaduras mediante imágenes de Sentinel-2 a través de un enfoque bilateral (dNBR) del Índice de Quemado Normalizado (NBR) en el periodo 2022.</p> <p>O.E.2 Estimar los niveles de severidad de quemaduras mediante imágenes de Sentinel-2 a través de un enfoque bilateral (dNBR) del Índice de Quemado Normalizado (NBR) en el periodo 2022.</p> <p>O.E.3 Validar los mapas de severidad de quemaduras basados en la relación del índice bitemporal (dNBR) y datos del Índice de Quemaduras Compuesto (CBI).</p>			

Anexo 2. Ficha de validación de campo.

BURN SEVERITY -- COMPOSITE BURN INDEX (BI)

SEVERIDAD DE LAS QUEMADURAS -- ÍNDICE COMPUESTO DE QUEMADURAS (CBI)

PD - Abridged		Examiners:			Fire Name:		
Registration Code		Project Code		Plot Number			
Field Date mmddyyyy	/ /	Fire Date mmyyyy	/				
Plot Aspect		Plot % Slope		UTM Zone			
Plot Diameter Overstory		UTM E plot center		GPS Datum			
Plot Diameter Understory		UTM N plot center		GPS Error (m)			
Number of Plot Photos		Plot Photo IDs					

BI – Long Form	% Burned 100 feet (30 m) diameter from center of plot =						Fuel Photo Series =		
STRATA RATING FACTORS	BURN SEVERITY SCALE							FACTOR SCORES	
	No Effect	Low		Moderate		High			
	0,0	>0,1	≤1,0	>1,0	2,0	>2,0	3,0		
A. SUBSTRATES									
% Pre-Fire Cover:		Litter =	Duff =	Soil/Rock =	Pre-Fire Depth (inches):		Litter =	Duff =	Fuel Bed =
Litter/Light Fuel Consumed	Unchanged	--	50% litter	--	100% litter	>80% light fuel	98% Light Fuel		Σ =
Duff	Unchanged	--	Light char	--	50% loss deep char	--	Consumed		N =
Medium Fuel, 3-8 in.	Unchanged	--	20% consumed	--	40% consumed	--	>60% loss, deep ch		
Heavy Fuel, > 8 in.	Unchanged	--	10% loss	--	25% loss, deep char	--	>40% loss, deep ch		X =
Soil & Rock Cover/Color	Unchanged	--	10% change	--	40% change	--	>80% change		
B. HERBS, LOW SHRUBS AND TREES LESS THAN 3 FEET' (1 METER):									
Pre-Fire Cover =		% Enhanced Growth =							
% Foliage Altered (blk-brn)	Unchanged	--	30%	--	80%	95%	100% + branch loss		Σ =
Frequency % Living	100%	--	90%	--	50%	< 20%	None		
Colonizers	Unchanged	--	Low	--	Moderate	High-Low	Low to None		N =
Spp. Comp. - Rel. Abund.	Unchanged	--	Little change	--	Moderate change	--	High change		X =
C. TALL SHRUBS AND TREES 3 to 16 FEET (1 TO 5 METERS):									
Pre-Fire Cover =		% Enhanced Growth =							
% Foliage Altered (blk-brn)	0%	--	20%	--	60-90%	> 95%	Signifcant branch loss		Σ =
Frequency % Living	100%	--	90%	--	30%	< 15%	< 1%		
% Change in Cover	Unchanged	--	15%	--	70%	90%	100%		N =
Spp. Comp. - Rel. Abund.	Unchanged	--	Little change	--	Moderate change	--	High Change		X =
D. INTERMEDIATE TREES (SUBCANOPY, POLE-SIZED TREES)									
Pre-Fire % Cover =		Pre-Fire Number Living =			Pre-Fire Number Dead =				
% Green (Unaltered)	100%	--	80%	--	40%	< 10%	None		Σ =
% Black (Torch)	None	--	5-20%	--	60%	> 85%	100% + branch loss		
% Brown (Scorch/Girdle)	None	--	5-20%	--	40-80%	< 40 or > 80%	None due to torch		N =
% Canopy Mortality	None	--	15%	--	60%	80%	% 100		X =
Char Height	None	--	1.5 m	--	2.8 m	--	> 5 m		
Post Fire: %Girdled =		%Felled =			%Tree Mortality =				
E. BIG TREES (UPPER CANOPY, DOMINANT, CODOMNANT TREES)									
Pre-Fire % Cover =		Pre-Fire Number Living =			Pre-Fire Number Dead =				
% Green (Unaltered)	100%	--	95%	--	50%	< 10%	None		Σ =
% Black (Torch)	None	--	5-10%	--	50%	> 80%	100% + branch loss		
% Brown (Scorch/Girdle)	None	--	5-10%	--	30-70%	< 30 or > 70%	None due to torch		N =
% Canopy Mortality	None	--	10%	--	50%	70%	% 100		X =
Char Height	None	--	1.8 m	--	4 m	--	> 7 m		
Post Fire: %Girdled =		%Felled =			%Tree Mortality =				
Community Notes/Comments:				CBI = Sum of Scores / N Rated:		Sum of Scores	N Rated	CBI	
				Understory (A+B+C)					
				Overstory (D+E)					
				Total Plot (A+B+C+D+E)					

Fuente: Tomado y adaptado de Key y Benson (2006).

Anexo 3. Puntos de muestreo distribuidos al azar por estratos en el área de estudio.

N.º	Nivel de severidad	Este	Norte
1	Baja	485746	8613188
2	Baja	485153	8613040
3	Baja	484836	8613548
4	Baja	485259	8613717
5	Baja	485280	8614669
6	Baja	484370	8611177
7	Baja	483557	8610295
8	Baja	484848	8609792
9	Baja	488385	8610831
10	Baja	487245	8611569
11	Baja	486742	8614503
12	Baja	487563	8614519
13	Baja	485351	8615022
14	Baja	486122	8615777
15	Baja	486893	8616011
16	Baja	488100	8617336
17	Baja	487630	8617805
18	Baja	487362	8618409
19	Baja	486138	8618492
20	Baja	485736	8618291
21	Baja	484915	8618258
22	Baja	485015	8619465
23	Baja	489659	8619901

24	Baja	485133	8620219
25	Baja	486658	8622566
26	Baja	482367	8622818
27	Baja	482132	8623237
28	Baja	482283	8623505
29	Baja	482283	8624293
30	Baja	483272	8624209
31	Baja	484127	8624393
32	Baja	483020	8625651
33	Baja	486558	8627528
34	Baja	484697	8627444
35	Baja	484177	8627796
36	Baja	484546	8627914
37	Baja	483104	8629322
38	Baja	482635	8629641
39	Baja	481931	8629423
40	Baja	487932	8631065
41	Baja	487798	8631619
42	Baja	488100	8631870
43	Baja	486893	8632021
44	Baja	484546	8631049
45	Baja	478393	8637687
46	Baja	478729	8637469
47	Baja	479064	8636983
48	Baja	480405	8637067

49	Baja	481344	8638308
50	Baja	483071	8635927
51	Baja	483791	8635525
52	Baja	484663	8642063
53	Baja	480439	8641509
54	Baja	480405	8642499
55	Baja	483708	8645080
56	Baja	483607	8646388
57	Baja	483372	8646673
58	Baja	485837	8648098
59	Baja	486423	8649003
60	Baja	486138	8651300
61	Baja	481998	8650998
62	Baja	487128	8655005
63	Baja	486759	8655021
64	Baja	487848	8654384
65	Baja	485518	8651970
66	Baja	489240	8655122
67	Baja	486826	8657284
68	Baja	485636	8658743
69	Baja	485921	8664225
70	Baja	491453	8667225
71	Baja	485317	8667209
72	Baja	485317	8667997
73	Baja	485770	8668399

74	Baja	484747	8672087
75	Baja	486189	8677569
76	Baja	487010	8678105
77	Baja	488100	8678038
78	Baja	487815	8678843
79	Baja	482618	8678709
80	Baja	485099	8675423
81	Baja	484261	8675825
82	Baja	488150	8678927
83	Baja	488402	8678005
84	Baja	491285	8678726
85	Baja	489022	8676194
86	Baja	488737	8676865
87	Baja	485133	8679966
88	Baja	488552	8680436
89	Baja	484412	8679329
90	Moderada-baja	489642	8681643
91	Moderada-baja	489659	8681341
92	Moderada-baja	489692	8678843
93	Moderada-baja	489072	8678977
94	Moderada-baja	487245	8680151
95	Moderada-baja	483590	8679547
96	Moderada-baja	485351	8680469
97	Moderada-baja	482601	8680117
98	Moderada-baja	484546	8681291

99	Moderada-baja	482283	8676295
100	Moderada-baja	481797	8675239
101	Moderada-baja	484781	8673747
102	Moderada-baja	484797	8674451
103	Moderada-baja	486725	8674535
104	Moderada-baja	485602	8669975
105	Moderada-baja	485652	8669572
106	Moderada-baja	486826	8670796
107	Moderada-baja	486725	8671869
108	Moderada-baja	487949	8670562
109	Moderada-baja	483976	8666689
110	Moderada-baja	488502	8665113
111	Moderada-baja	488905	8667410
112	Moderada-baja	487245	8667678
113	Moderada-baja	486742	8663571
114	Moderada-baja	487664	8664241
115	Moderada-baja	489441	8664426
116	Moderada-baja	482283	8667041
117	Moderada-baja	486021	8659799
118	Moderada-baja	485099	8658743
119	Moderada-baja	482014	8656463
120	Moderada-baja	482769	8655776
121	Moderada-baja	483942	8650948
122	Moderada-baja	486708	8651065
123	Moderada-baja	487144	8651618

124	Moderada-baja	487563	8653529
125	Moderada-baja	488184	8654351
126	Moderada-baja	484311	8646354
127	Moderada-baja	484261	8646790
128	Moderada-baja	484630	8646019
129	Moderada-baja	482115	8646706
130	Moderada-baja	485602	8648349
131	Moderada-baja	483641	8643806
132	Moderada-baja	484177	8643437
133	Moderada-baja	483775	8641945
134	Moderada-baja	483020	8641828
135	Moderada-baja	483574	8640990
136	Moderada-baja	483959	8641057
137	Moderada-baja	481545	8639816
138	Moderada-baja	481646	8638961
139	Moderada-baja	477438	8639783
140	Moderada-baja	482132	8635491
141	Moderada-baja	484479	8634921
142	Moderada-baja	486138	8632340
143	Moderada-baja	485937	8631837
144	Moderada-baja	486004	8627059
145	Moderada-baja	485786	8627411
146	Moderada-baja	484328	8629188
147	Moderada-baja	483272	8628836
148	Moderada-baja	483674	8630261

149	Moderada-baja	483490	8623220
150	Moderada-baja	483188	8624745
151	Moderada-baja	481931	8622616
152	Moderada-baja	481763	8622935
153	Moderada-baja	487999	8616330
154	Moderada-baja	485401	8617520
155	Moderada-baja	482685	8617252
156	Moderada-baja	487413	8615676
157	Moderada-baja	487429	8615274
158	Moderada-baja	487547	8615039
159	Moderada-baja	487379	8614888
160	Moderada-baja	484345	8612508
161	Moderada-baja	484714	8612491
162	Moderada-baja	484864	8612307
163	Moderada-baja	485116	8609691
164	Moderada-baja	485988	8610245
165	Moderada-baja	487563	8609658
166	Moderada-baja	489474	8610362
167	Moderada-baja	490028	8610731
168	Moderada-baja	491436	8611653
169	Moderada-baja	490112	8609172
170	Moderada-baja	490028	8609021
171	Moderada-baja	489089	8609540
172	Moderada-baja	487748	8609708
173	Moderada-baja	487496	8608669

174	Moderada-baja	485267	8608870
175	Moderada-baja	487278	8615475
176	Moderada-baja	490648	8616883
177	Moderada-baja	493330	8616967
178	Moderada-baja	489156	8614704
179	Moderada-alta	487513	8607227
180	Moderada-alta	487697	8610999
181	Moderada-alta	488954	8611569
182	Moderada-alta	488703	8611535
183	Moderada-alta	492642	8613463
184	Moderada-alta	491787	8612960
185	Moderada-alta	493514	8614838
186	Moderada-alta	493514	8614838
187	Moderada-alta	491134	8617453
188	Moderada-alta	492424	8617135
189	Moderada-alta	492391	8620286
190	Moderada-alta	492307	8620018
191	Moderada-alta	492927	8620085
192	Moderada-alta	494352	8621862
193	Moderada-alta	491553	8622466
194	Moderada-alta	491603	8622650
195	Moderada-alta	491637	8622818
196	Moderada-alta	494855	8622046
197	Moderada-alta	495811	8622499
198	Moderada-alta	495811	8622834

199	Moderada-alta	486004	8627696
200	Moderada-alta	486054	8627914
201	Moderada-alta	486674	8628014
202	Moderada-alta	489994	8627193
203	Moderada-alta	489591	8628501
204	Moderada-alta	490228	8628752
205	Moderada-alta	488971	8629238
206	Moderada-alta	489206	8629372
207	Moderada-alta	489608	8629641
208	Moderada-alta	482182	8628752
209	Moderada-alta	482182	8629255
210	Moderada-alta	481897	8628953
211	Moderada-alta	483271	8629993
212	Moderada-alta	484227	8630227
213	Moderada-alta	483959	8630345
214	Moderada-alta	485953	8632172
215	Moderada-alta	485819	8632356
216	Moderada-alta	485819	8632356
217	Moderada-alta	488451	8633614
218	Moderada-alta	489122	8634117
219	Moderada-alta	488937	8633999
220	Moderada-alta	488418	8634150
221	Moderada-alta	489340	8633982
222	Moderada-alta	483892	8634938
223	Moderada-alta	484277	8634770

224	Moderada-alta	482785	8636631
225	Moderada-alta	474487	8641476
226	Moderada-alta	474738	8641392
227	Moderada-alta	474923	8641308
228	Moderada-alta	475308	8641057
229	Moderada-alta	484679	8644477
230	Moderada-alta	486993	8651065
231	Moderada-alta	475744	8651417
232	Moderada-alta	475962	8651434
233	Moderada-alta	479818	8660905
234	Moderada-alta	479466	8660654
235	Moderada-alta	474336	8660989
236	Moderada-alta	475392	8657804
237	Moderada-alta	492860	8671701
238	Moderada-alta	492642	8671735
239	Moderada-alta	489373	8672037
240	Moderada-alta	485669	8670746
241	Moderada-alta	483992	8670897
242	Moderada-alta	483472	8670880
243	Moderada-alta	483305	8670746
244	Moderada-alta	481545	8671349
245	Moderada-alta	480975	8673093
246	Moderada-alta	482651	8672841
247	Moderada-alta	485384	8676144
248	Moderada-alta	483154	8676362

249	Moderada-alta	489826	8675658
250	Moderada-alta	489105	8679279
251	Moderada-alta	487546	8679782
252	Moderada-alta	489625	8680553
253	Moderada-alta	483908	8679564
254	Moderada-alta	490497	8679430
255	Moderada-alta	490228	8679480
256	Moderada-alta	489407	8680553
257	Moderada-alta	491352	8682078
258	Moderada-alta	493313	8681894
259	Moderada-alta	493296	8681659
260	Moderada-alta	493497	8681810
261	Moderada-alta	486624	8680519
262	Moderada-alta	488066	8680938
263	Moderada-alta	490061	8678809
264	Moderada-alta	489491	8679061
265	Moderada-alta	490999	8678927
266	Moderada-alta	484076	8679011
267	Alta	489809	8675390
268	Alta	484227	8676177
269	Alta	503841	8670008
270	Alta	484780	8647226
271	Alta	491419	8619431
272	Alta	491368	8619934
273	Alta	498560	8627931

274	Alta	496129	8627998
275	Alta	493296	8628132
276	Alta	492592	8628551
277	Alta	524635	8628154
278	Alta	524584	8628372
279	Alta	522522	8628540
280	Alta	522254	8628439
281	Alta	522036	8628305
282	Alta	520461	8626897
283	Alta	524400	8625405
284	Alta	524501	8625606
285	Alta	524551	8625874
286	Alta	523076	8631775
287	Alta	484758	8647319
288	Alta	484764	8647276
289	Alta	484738	8647226
290	Alta	484731	8647190
291	Alta	497234	8660929
292	Alta	497290	8660925
293	Alta	497294	8660873
294	Alta	497286	8660790
295	Alta	497214	8660798
296	Alta	497246	8660837
297	Alta	497206	8660861
298	Alta	497159	8660873

299	Alta	497337	8660813
300	Alta	497151	8660980
301	Alta	496460	8661075
302	Alta	496540	8661111
303	Alta	496579	8661063
304	Alta	496631	8661103
305	Alta	496730	8661155
306	Alta	496806	8661183
307	Alta	484167	8676218
308	Alta	484167	8676189
309	Alta	484203	8676157
310	Alta	484229	8676121
311	Alta	484199	8676187
312	Alta	488068	8678897
313	Alta	488366	8679532
314	Alta	489731	8675513
315	Alta	489782	8675531
316	Alta	489700	8675529
317	Alta	489695	8675483
318	Alta	489741	8675476
319	Alta	489741	8675448
320	Alta	489761	8675420
321	Alta	489777	8675386
322	Alta	489826	8675362
323	Alta	489866	8675354

324	Alta	489875	8675308
325	Alta	489904	8675334
326	Alta	489899	8675378
327	Alta	489866	8675404
328	Alta	489819	8675448
329	Alta	489839	8675473
330	Alta	489890	8675472
331	Alta	489891	8675439
332	Alta	489909	8675408
333	Alta	489936	8675406
334	Alta	489663	8675621
335	Alta	489669	8675591
336	Alta	489785	8675461
337	Alta	489834	8675416
338	Alta	489388	8655398
339	Alta	489408	8655396
340	Alta	489388	8655387
341	Alta	489406	8655388
342	Alta	489389	8655380
343	Alta	489406	8655378
344	Alta	489397	8655375
345	Alta	489400	8655392
346	Alta	487144	8649521
347	Alta	487144	8649550
348	Alta	487163	8649567

349	Alta	487193	8649567
350	Alta	487192	8649550
351	Alta	487171	8649550
352	Alta	484894	8644631
353	Alta	484865	8644779
354	Alta	485161	8645422

Anexo 4. Panel fotográfico.



Foto 1. Toma de datos de campo.



Foto 2. Medición de parcela CBI.



Foto 3. Datos de campo.



Foto 4. Verificación de campo.



Foto 5. Instalación de parcela.



Foto 6. Datos de suelo.



Foto 7. Instalación de parcela CBI.



Foto 8. Toma de datos de parcela CBI.