



Régimen de incendios y densidad de la vegetación (NDVI) en la subregión de los Montes de María con énfasis en el bosque seco tropical entre 2012 - 2022

Jose Luis Ospino Rivera

Pregrado de Geología

Departamento de Física y Geociencias

División de Ciencias Básicas

Universidad del Norte, Barranquilla

Septiembre 2022

Régimen de incendios y densidad de la vegetación (NDVI) en la subregión de los Montes de María con énfasis en el bosque seco tropical entre 2012 - 2022

Jose Luis Ospino Rivera

Pregrado de Geología

Departamento de Física y Geociencias

División de Ciencias Básicas

Trabajo de grado presentado como requisito para calificar al título de:

Geólogo

Directoras

Natalia Hoyos Botero, PhD

Marcela Celis Pacheco, PhD

Universidad del Norte, Barranquilla

Septiembre 2022

Agradecimientos

Este trabajo es gracias al aporte motivacional, emocional e intelectual de muchas partes que estuvieron presentes a lo largo de este camino. En primer lugar, agradezco enormemente a mis directoras Natalia Hoyos y Marcela Celis, quienes me acogieron para la elaboración del proyecto, y me compartieron los conocimientos necesarios para lograr culminarlo.

Especiales agradecimientos a mi madre, quien me apoyó en aquellos momentos de estrés en los que me sentía sin salida, y me ayudó con su experiencia y conocimiento sobre la historia de los Montes de María. También quiero agradecer al grupo de los rechazados, Yenika Anaya, Avir Bayeh, y Vanessa Mejía, quienes guerrearon, trasnocharon, y lloraron conmigo en el transcurso de lograr esta meta que se veía lejana, las amo. A Sito, quien me motivó a seguir adelante, y me incentivó a trabajar y culminar el proyecto. A Nahida, cuya historia me acompaña todos los días.

Finalmente quiero agradecer a la Universidad del Norte por aportar las herramientas que permitieron lograr alcanzar los objetivos del trabajo.

Este trabajo va dedicado para todos ustedes.

Resumen

Los incendios afectan alrededor de 371,2 Mha anualmente en el mundo, modificando el suelo, los ciclos hidrológicos y perjudicando a la biota local. Su frecuencia ha incrementado en las últimas décadas debido a la influencia del ser humano, y al cambio climático, generando consecuencias negativas sobre ecosistemas tropicales con regímenes estacionales de precipitación como lo es el BST. Este trabajo presenta una caracterización del régimen de incendios en los Montes de María, haciendo uso de la base de datos de fuegos activos de FIRMS (NASA), y del índice Normalized Burn Ratio (NBR) para estimar el área quemada a partir de imágenes Landsat. Específicamente, se analizó la frecuencia de incendios, y área anual durante la temporada seca para el intervalo 2012-2022. Adicionalmente, se evaluó el cambio en la densidad de la vegetación de BST al final de la temporada seca desde 2014 hasta 2022 usando el índice Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Los resultados muestran un marcado comportamiento estacional en la frecuencia de incendios, relacionado con las precipitaciones, con una mayor frecuencia en los meses de febrero y marzo, y una mayor frecuencia anual durante los años en los que se presentó el fenómeno de El Niño, siendo 2014 y 2018 los años con mayor afectación de incendios. La densidad de la vegetación en el BST muestra un comportamiento relacionado con la precipitación, siendo mayor en aquellos años con altas precipitaciones en la subregión. Además, el NDVI en las manchas de TDF afectadas por el fuego en 2014 muestran un NDVI creciente durante los periodos 2014-2016 y 2020-2022, y un NDVI decreciente constante en los periodos 2016-2018 y 2018-2020.

Palabras clave: NBR, NDVI, Colombia, LANDSAT, índices espectrales

Abstract

Fires affect ~371,2 Mha globally and modify soil properties, the hydrological cycle and, affect local biota. Their frequency has increased in recent decades due to human influence and climate change, generating negative consequences on tropical ecosystems with seasonal precipitation regimes such as the tropical dry forest (TDF). This work presents a characterization of the fire regime in the Montes de María, Colombian Caribbean, using the FIRMS (NASA) active fire database and the Normalized Burn Ratio (NBR) index to estimate burned area extent from Landsat images. Specifically, fire frequency and annual burned area during the dry season were analyzed for the period 2012-2022. Additionally, changes in TDF vegetation density at the end of the dry season from 2014 to 2022 were evaluated using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Results show a marked seasonal behaviour in fire frequency, related intra and inter-annual to rainfall patterns, with higher inter-annual frequency during El Niño (i.e., 2014 and 2018). Vegetation density in TDF shows a behaviour related to precipitation, being higher in those years with high precipitation in the subregion. In addition, NDVI in TDF patches affected by fire in 2014 show an increasing NDVI during the periods 2014-2016 and 2020-2022, and a constant decreasing NDVI in the periods 2016-2018 and 2018-2020.

Key words: Montes de María, tropical dry forest, fires, LANDSAT, spectral indices.

Tabla de Contenidos

1. INTRODUCCIÓN	8
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
3. OBJETIVOS	12
3.1. Objetivo general.....	12
3.2. Objetivos específicos	12
4. METODOLOGÍA	13
4.1. Caracterización de área de estudio.....	14
4.2. Frecuencia de incendios	16
4.3. Extensión de área quemada.....	16
4.4. Patrones temporales de NDVI en áreas quemadas de BST.....	19
5. RESULTADOS.....	21
5.1. Régimen de incendios	21
5.2. Extensión de área quemada durante la estación seca	22
5.3. Cambio en el NDVI entre 2012 y 2022	27
6. DISCUSIÓN	30
6.1. Precipitación como principal factor regulador de incendios.....	30
6.2. Incendios y prácticas de uso del suelo	32
6.3. Cambios en NDVI en BST afectado por incendio	33
7. CONCLUSIONES	35
8. REFERENCIAS.....	37

Índice de Tablas

Tabla 1. Datos de adquisición de imágenes LANDSAT utilizadas en el análisis para los meses considerados como pre-incendio (enero-febrero) y post-incendio (marzo-julio). Las imágenes se listan de la más reciente a la más antigua (%CC corresponde al porcentaje de cobertura de nubes).	17
Tabla 2. Datos de área quemada y sin quemar en los Montes de María. El área total entre los años varía debido a la cobertura de nubes y a la falla del corrector del escáner ETM+ .	18

Índice de Figuras

Figura 1. Área de estudio que incluye los municipios de la subregión de lo Montes de María con presencia de BST. Se incluyen las estaciones climatológicas, parcelas de monitoreo de BST, puntos de incendios (FIRMS) y elevación (NASA). Las estaciones son las siguientes: (1) San Juan Nepomuceno (2) San Jacinto (3) El Carmen de Bolívar (4) Chalán (5) Colosó (6) Córdoba (7) San Onofre (8) Zambrano.	13
Figura 2. Precipitación promedio mensual de las estaciones climatológicas del área de estudio (datos del IDEAM).	16
Figura 3. Funciones de densidad de probabilidad de dNBR para pixeles correspondientes a incendios y no incendios.	19
Figura 4. Densidad de incendios en los Montes de María en el periodo 2012-2022.	21
Figura 5. Número de incendios anuales (izquierda) y mensuales (derecha) en los Montes de María para el período de 2012-2022.	22
Figura 6. Porcentaje de área quemada al finalizar la temporada seca con respecto al total en los Montes de María. El número sobre cada barra, indica el número de días considerados para cada año.	23
Figura 7. Áreas quemadas y sin quemar durante la temporada seca para el periodo 2012 a 2022. .	26
Figura 8. Porcentaje de área quemada con respecto al área total de BST y de no bosque.	27
Figura 9. Porcentaje de cambio de NDVI en área quemada entre 2014 y 2022.	28
Figura 10. Síntesis del porcentaje de cambio bianual de NDVI en área afectada de BST afectadas por incendios en 2014.	28
Figura 11. Serie de tiempo del ONI (Oceanic Niño Index) para el periodo de estudio (datos de NOAA).	31
Figura 12. Precipitación promedio anual para el área de estudio a partir de 8 estaciones del IDEAM pertenecientes a los municipios de San Juan Nepomuceno, San Jacinto, El Carmen de Bolívar, Zambrano, Córdoba, San Onofre, Chalán y Colosó.	31
Figura 13. Persistencia de disminución en el NDVI en San Juan Nepomuceno, dentro de los 4 intervalos analizados (2014-2016, 2016-2018, 2018-2020, 2020-2022) y para aquellas áreas quemadas de BSR en 2014. La categoría “sin disminución” se refiere a pixeles que no presentaron disminución en ningún intervalo, “disminución irregular” a pixeles que presentaron disminución en 1 de los intervalos, “disminución regular” a pixeles que presentaron disminución en 2 intervalos, y “disminución constante” a pixeles que presentaron disminución en 3 intervalos.	34

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales conforman un proceso natural en ecosistemas como el bosque seco tropical (BST), en los cuales modifican ciclos hidrológicos y erosionan el suelo (Chuvieco, et al., 1998), afectando la biota local. Estos eventos han aumentado su frecuencia debido al cambio climático, y al incremento de las influencias antropogénicas desde el siglo XVIII (Pechony, et al, 2010), moldeando no solamente la extensión e intensidad de los incendios, sino alterando los umbrales de resistencia al calor de muchas especies de flora (Armenteras, et al., 2020). Anualmente se queman alrededor de 371,2 Mha en todo el mundo, de las cuales 21,6 Mha corresponden a Sudamérica (Giglio, et al, 2010).

Las causas de los incendios forestales vienen vinculadas a varios factores, como lo son la presencia de materia orgánica como hojarasca, ramas secas y árboles muertos (Golicher & Marcial, 2003), junto a temporadas con temperaturas altas y bajos índices de humedad (Cleetus & Mulik, 2014). Otros factores que inciden en la ocurrencia de un incendio forestal son el oxígeno presente en el aire, la topografía, y las tormentas eléctricas (Palliser, 2012), de tal manera que su acción conjunta da lugar a la chispa que genera estos eventos. Sin embargo, la mayoría de los incendios forestales son ocasionados por factores antropogénicos, pues suelen darse por quema ilegal descontrolada de áreas de vegetación para ganadería o agricultura (Muñoz, 2000).

La ocurrencia de incendios en Colombia se encuentra relacionada con el ciclo anual de precipitación asociado a la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), junto a la variabilidad interanual relacionada con los fenómenos de El Niño y de La Niña (ENOS), los cuales moldean las condiciones para la ocurrencia de incendios forestales (Parra Lara, et al., 2011; Hoyos, et al, 2017). Esta dinámica de lluvias ocasionada por su localización en la ZCIT genera una marcada estacionalidad en la humedad del suelo, dando paso a una temporada seca en la región Caribe entre

los meses de diciembre hasta abril, y una húmeda entre agosto y noviembre según el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). (s.f.). Estudios sobre la frecuencia de los incendios forestales en la región, revelan que el pico de eventos se encuentra en los meses de febrero y marzo (Armenteras, et al., 2017; Hoyos, et al, 2017), que representan el final de la temporada seca. Asimismo, las áreas de la región Caribe con mayor densidad de incendios corresponden a la sección norte y suroccidental del macizo de Santa Marta, la sección oriental del macizo de San Jacinto, y el macizo del Perijá (Hoyos, et al, 2017).

El bosque seco tropical (BST), es un ecosistema de gran importancia debido a sus altos niveles de biodiversidad y endemismo (García & Gonzáles-M, 2019). Además, este ecosistema presenta una de las mayores frecuencias de incendios a nivel global (Pausas & Ribeiro, 2013). En Colombia, este ecosistema ha sido severamente transformado (Dryflor et al., 2016), por lo que se encuentra con un alto nivel de fragmentación (García & Gonzáles-M, 2019) y una notable reducción a tan solo el 8% de su extensión original (9 millones de hectáreas según IAvH (2014)).

Para el caso de la región Caribe colombiana, el BST comprende el 40,9% del total en el país, siendo la zona que cuenta con la mayor extensión de este ecosistema. Sin embargo, el estado de conservación de estas áreas es preocupante ya que la mayor parte de su cobertura está representada por rastrojos y bosques secundarios, y a su vez van disminuyendo las áreas bien conservadas correspondientes a Bosque Primario (García & Gonzáles-M, 2019).

El estado crítico del BST en la región Caribe está relacionado con el crecimiento e industrialización de los núcleos urbanos, áreas agrícolas y ganaderas, que han ocasionado la notable reducción de área de BST (García & Gonzáles-M, 2019). Teniendo en cuenta la gran importancia de este ecosistema, así como su estado actual, es necesario caracterizar procesos que puedan afectar las

áreas remanentes, tales como los incendios forestales, teniendo como objetivo generar información que sea útil para su manejo y conservación.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La subregión de los Montes de María, ubicada en la región Caribe colombiana, es uno de los puntos calientes de incendios en la región (Hoyos et al, 2017), y hace parte de las áreas prioritarias de monitoreo de parcelas permanentes de BST de la Red de investigación Nacional de BST de Colombia (Red BST-Col) (García & Gonzáles-M, 2019; Figura 1). Esta subregión está conformada por 15 municipios, de los cuales hacen parte Chalán, Colosó, Córdoba, El Carmen de Bolívar, El Guamo, Los Palmitos, María La Baja, Morroa, Ovejas, Palmito, San Jacinto, San Juan Nepomuceno, San Onofre, San José de Toluviejo y Zambrano, ubicados en los departamentos de Bolívar y Sucre (Agencia de Renovación del Territorio, 2022). La subregión cuenta con una extensión de BST de 47140,42 Ha, que representa el 7% de su territorio (Agencia de Renovación del Territorio, 2022) y que se considera como Áreas de Especial Importancia Ambiental (AEIA).

De acuerdo con lo anterior, este proyecto pretende caracterizar el régimen de incendios en la subregión de los Montes de María, y en sus áreas remanentes de BST, con el propósito de aportar información para la gestión y conservación de este ecosistema. Las preguntas de investigación son:

¿Cómo es el régimen de incendios en áreas de BST y no bosque en la subregión de los Montes de María?

¿Cómo cambia la densidad de la vegetación en áreas de BST que han sido afectadas por incendios forestales en esta subregión?

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

- Caracterizar el régimen de incendios en la subregión de los Montes de María para áreas de BST y no bosque, y su relación con la densidad de la vegetación dentro del BST para el periodo 2012-2022.

3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la frecuencia anual y mensual de incendios en los Montes de María, y sus variaciones bajo los eventos de El Niño y de La Niña (ENOS).
- Determinar la extensión de los incendios en zonas correspondientes y no correspondientes a BST.
- Evaluar el cambio en la densidad de la vegetación (NDVI) en áreas de BST que han sido afectadas por incendios.

4. METODOLOGÍA

La delimitación del área de estudio dentro de la subregión de los Montes de María se hizo con base en la presencia de BST (IAvH, <http://www.humboldt.org.co/en/research/projects/developing-projects/item/158-bosques-secos-tropicales-en-colombia>). Con base en este criterio, se incluyeron los siguientes municipios: San Juan Nepomuceno, San Jacinto, El Carmen de Bolívar, Ovejas, Colosó, Chalán, Morroa, San Onofre, Zambrano, y Córdoba.

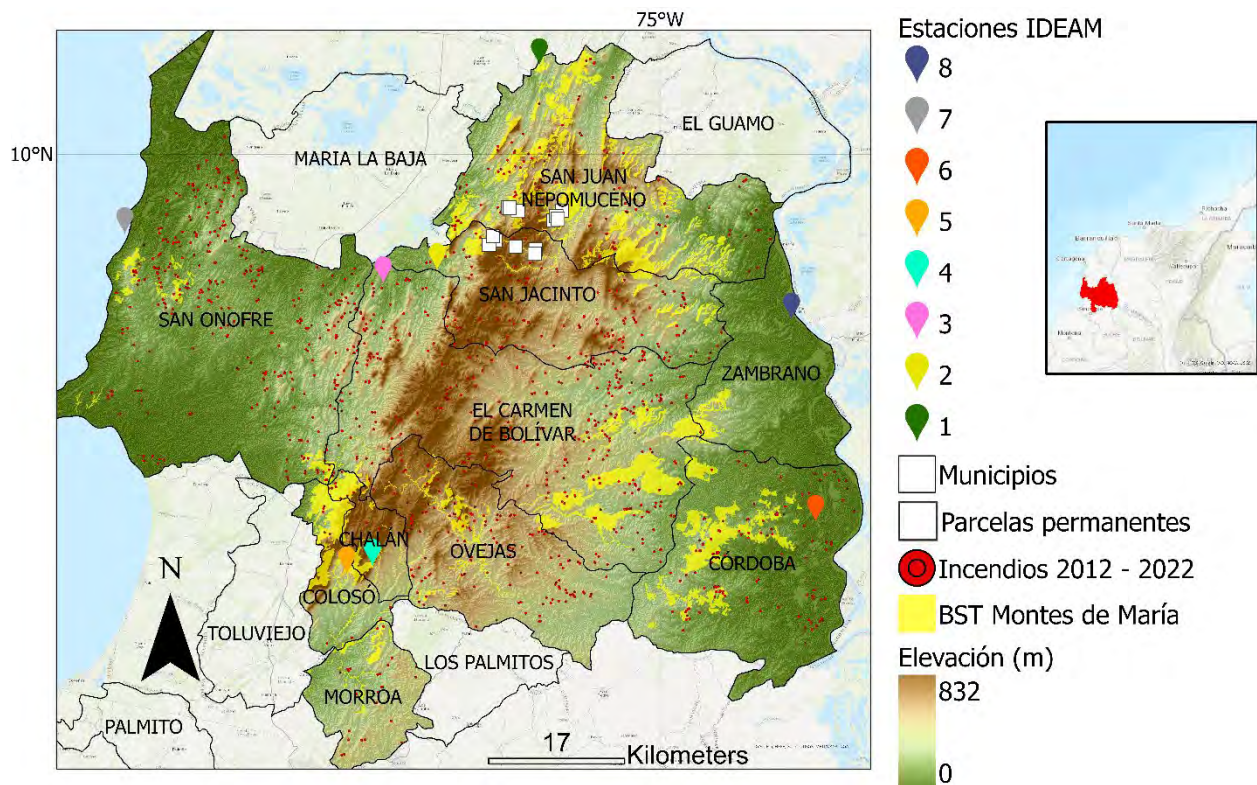
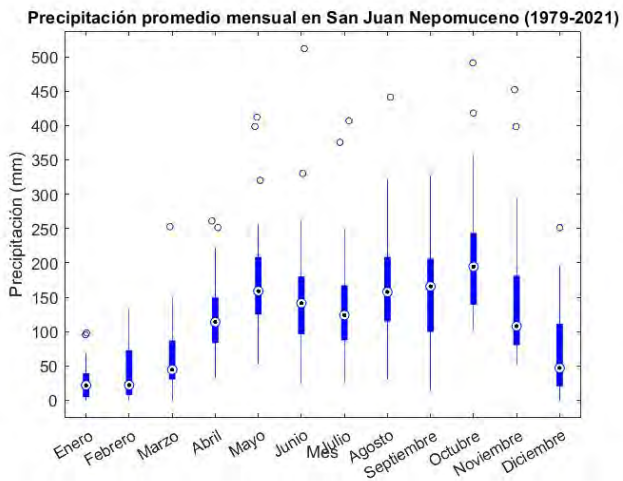
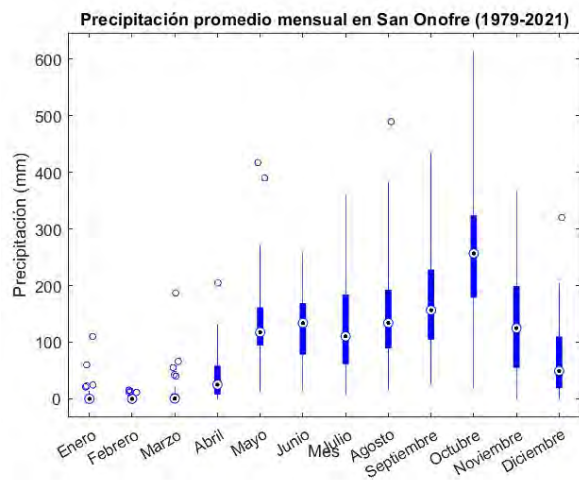
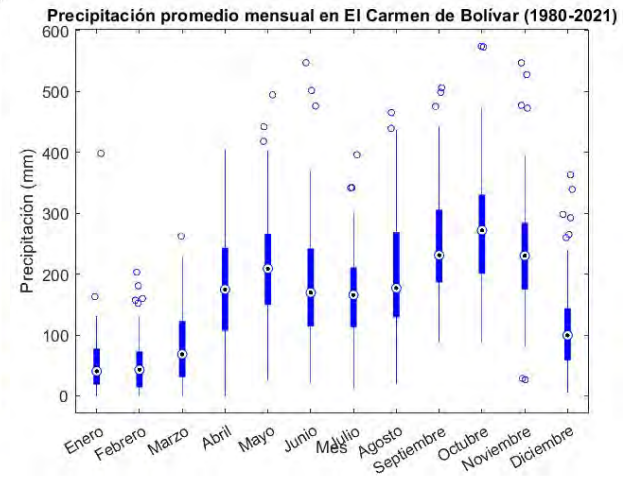
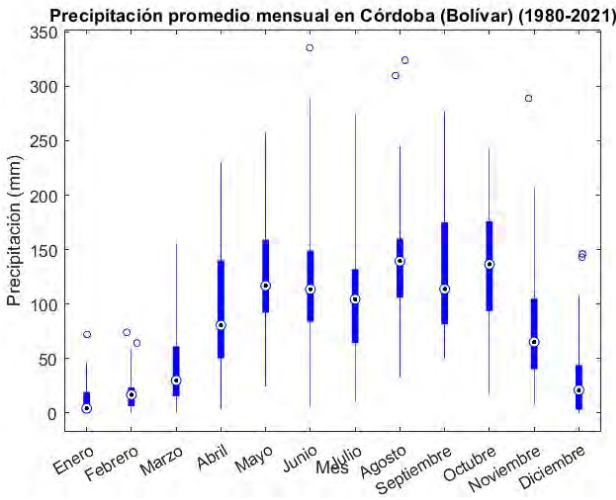
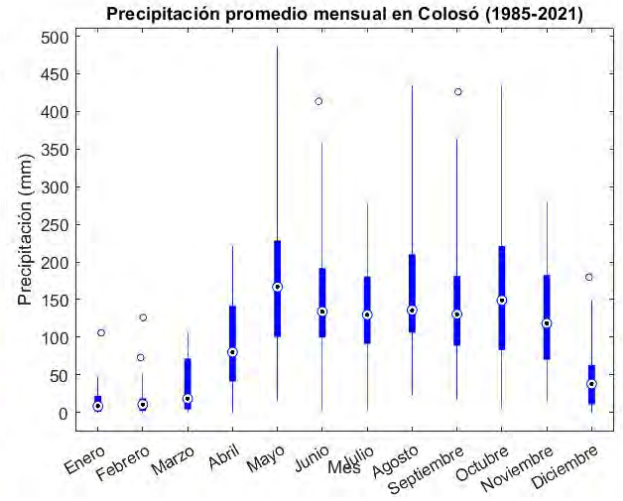
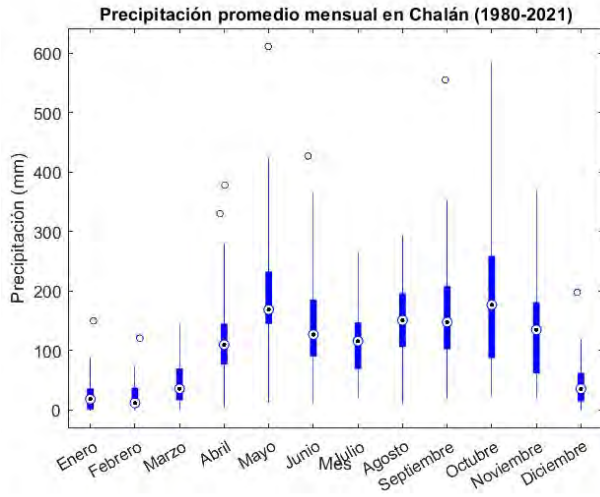


Figura 1. Área de estudio que incluye los municipios de la subregión de los Montes de María con presencia de BST. Se incluyen las estaciones climatológicas, parcelas de monitoreo de BST, puntos de incendios (FIRMS) y elevación (NASA). Las estaciones son las siguientes: (1) San Juan Nepomuceno (2) San Jacinto (3) El Carmen de Bolívar (4) Chalán (5) Colosó (6) Córdoba (7) San Onofre (8) Zambrano.

4.1. Caracterización de área de estudio

El área de estudio tiene estaciones climatológicas del IDEAM en los municipios de San Juan Nepomuceno, San Jacinto, El Carmen de Bolívar, Zambrano, Córdoba, San Onofre, Chalán y Colosó (<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>; Figura 1), de las cuales se tomaron datos entre el periodo 1979 y 2021. El clima de la subregión presenta una temperatura promedio anual de 27°C, precipitaciones promedio anuales de 1234 mm, y humedad relativa de 77% (CARSUCRE, 2014). Las estaciones climatológicas presentan un régimen bimodal con una estación seca entre los meses de diciembre-marzo y una húmeda entre agosto-noviembre. Específicamente, los valores más bajos de precipitación promedio mensual ocurren enero y febrero (<50 mm/mes) mientras que los mayores valores ocurren en mayo y octubre (200-250 mm/mes) (Figura 2). La topografía corresponde a un paisaje de montaña (CARSUCRE, 2014; Agencia para la renovación del territorio, 2022) con elevaciones que alcanzan los 832 m (Figura 1). La cobertura vegetal en la subregión se encuentra dominada por pastos y mosaicos de cultivos (IDEAM, 2017), mientras que el BST ocupa una extensión de 47.140,42 ha.



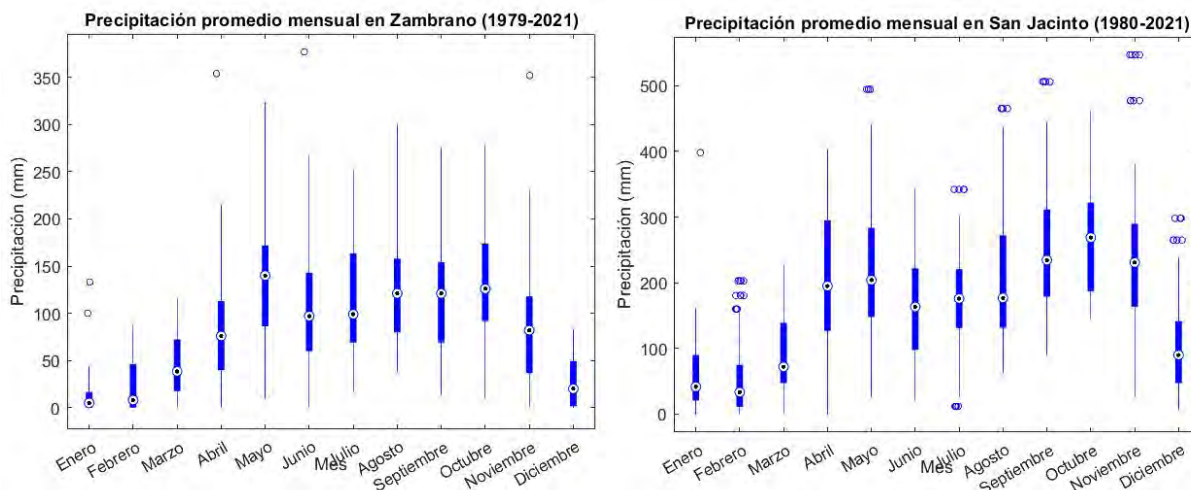


Figura 2. Precipitación promedio mensual de las estaciones climatológicas del área de estudio (datos del IDEAM).

4.2. Frecuencia de incendios

La frecuencia de los incendios se analizó a través de la base de datos de incendios de FIRMS (NASA), usando el sensor de VIIRS (S-NPP) con una resolución espacial de 375 m. Estos datos se filtraron por su rango de confiabilidad de forma que se usaron únicamente aquellos de alta confianza (“h” o high dentro de la base de datos). El patrón temporal se analizó agrupando los incendios por mes y año; posteriormente se comparó su ocurrencia con los eventos de El Niño y La Niña. El patrón espacial se analizó a través de mapas de densidad.

4.3. Extensión de área quemada

La extensión del área quemada se caracterizó mediante imágenes Landsat 7 y 8 para el periodo 2012 – 2022 (USGS), seleccionadas con un porcentaje de nubosidad menor al 15%. Estas imágenes se descargaron desde el portal Earth Explorer de la USGS. Para cada año, se seleccionó una imagen correspondiente al inicio (enero-febrero, pre-incendio) y final (marzo-julio, post-incendio) de la temporada seca (Tabla 1). La variación de los meses para cada temporada se debió a la disponibilidad de imágenes con una cobertura aceptable de nubes. Para cada imagen se

calculó el NBR (Normalized Burned Ratio) usando las bandas del infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR2) (Key & Benson, 2006; Keeley, 2009):

$$\text{NBR} = (\text{NIR} - \text{SWIR2}) / (\text{NIR} + \text{SWIR2}).$$

Posteriormente, se calculó el área quemada mediante el dNBR (Differenced Normalized Burned Ratio) (Arellano, et al., 2017) como la diferencia entre las imágenes pre-incendio y post-incendio:

$$\text{dNBR} = (\text{NBR PreIncendio} - \text{NBR PostIncendio})$$

Tabla 1. Datos de adquisición de imágenes LANDSAT utilizadas en el análisis para los meses considerados como pre-incendio (enero-febrero) y post-incendio (marzo-julio). Las imágenes se listan de la más reciente a la más antigua (%CC corresponde al porcentaje de cobertura de nubes).

Dato	PRE INCENDIO			DATE			%CC	Source	Satellite	Sensor
	ID	Day	Month	Year						
2022	LC09_L2SP_009053_20220106_20220122_02_T1	6	1	2022	0,43	Jan-22	Landsat 8	OLI_TIRS		
2021	LC08_L2SP_009053_20210212_20220526_02_T1	12	2	2021	0,73	Feb-21	Landsat 8	OLI_TIRS		
2020	LC08_L2SP_009053_20200210_20200823_02_T1	10	2	2020	0,05	Feb-20	Landsat 8	OLI_TIRS		
2019	LC08_L2SP_009053_20190207_20200829_02_T1	7	2	2019	1,23	Feb-19	Landsat 8	OLI_TIRS		
2018	LC08_L2SP_009053_20180204_20200902_02_T1	4	2	2018	0,24	Feb-18	Landsat 8	OLI_TIRS		
2017	LC08_L2SP_009053_20170201_20200905_02_T1	1	2	2017	0,91	Feb-17	Landsat 8	OLI_TIRS		
2016	LC08_L2SP_009053_20160114_20200907_02_T1	14	1	2016	2,36	Jan-16	Landsat 8	OLI_TIRS		
2015	LC08_L2SP_009053_20150212_20200909_02_T1	12	2	2015	4,7	Feb-15	Landsat 8	OLI_TIRS		
2014	LC08_L2SP_009053_20140124_20200912_02_T1	24	1	2014	0,43	Jan-14	Landsat 8	OLI_TIRS		
2013	LC08_L2SP_009053_20130401_20200913_02_T1	29	1	2013	0	Jan-13	Landsat 7	ETM		
2012	LE07_L2SP_009053_20120127_20200909_02_T1	27	1	2012	4	Jan-12	Landsat 7	ETM		

	POST INCENDIO			DATE			%CC	Source	Satellite	Sensor
	ID	Day	Month	Year						
	LC09_L2SP_009053_20220412_20220414_02_T1	12	4	2022	1,66	Apr-22	Landsat 8	OLI_TIRS		
	LC08_L2SP_009053_20210706_20210713_02_T1	6	7	2021	11,89	Jul-21	Landsat 8	OLI_TIRS		
	LC08_L2SP_009053_20200329_20200822_02_T1	29	3	2020	0,07	Mar-20	Landsat 8	OLI_TIRS		
	LC08_L2SP_009053_20190428_20200828_02_T1	28	4	2019	14,77	Apr-19	Landsat 8	OLI_TIRS		
	LC08_L2SP_009053_20180409_20200901_02_T1	9	4	2018	12,72	Apr-18	Landsat 8	OLI_TIRS		
	LC08_L2SP_009053_20170406_20200904_02_T1	6	4	2017	2,83	Apr-17	Landsat 8	OLI_TIRS		
	LC08_L2SP_009053_20160521_20200906_02_T1	21	5	2016	5,72	May-16	Landsat 8	OLI_TIRS		
	LC08_L2SP_009053_20150401_20200909_02_T1	1	4	2015	2,31	Apr-15	Landsat 8	OLI_TIRS		
	LC08_L2SP_009053_20140329_20200911_02_T1	29	3	2014	0,04	Mar-14	Landsat 8	OLI_TIRS		
	LC08_L2SP_009053_20130401_20200913_02_T1	1	4	2013	2,6	Apr-13	Landsat 8	OLI_TIRS		
	LE07_L2SP_009053_20120416_20200909_02_T1	16	4	2012	9	Apr-12	Landsat 7	ETM		

Es necesario aclarar que aislar las áreas afectadas de las no afectadas, mejora el proceso de evaluación de incendios forestales, pues en las áreas que no fueron afectadas por quema se pueden tener sesgos en la vegetación al mantenerse estáticas en el tiempo y sufrir alteraciones por sequías

o aumentos en la humedad (Key & Benson, 2006). La discriminación de áreas quemadas y no quemadas requiere establecer un valor umbral de dNBR por encima del cual se considera que el área ha sido afectada por incendios. Para el área de estudio, se realizó una validación local de los valores de dNBR a partir de 2012. Con estos datos se generaron funciones de densidad de probabilidad (Figura 3) que permitieron definir un valor umbral de dNBR de 0,2 por encima del cual se definieron los píxeles afectados por fuego, teniendo en cuenta que dicho valor representa una probabilidad baja (1,2%) de no fuegos. Aquellos píxeles con valores superiores a 0,2 corresponden a áreas quemadas y los menores a áreas sin quemar. Sumado a esto, la disponibilidad de imágenes otorga una cantidad variada de días involucrados en el análisis al momento de la obtención de los datos espectrales de LANDSAT (Tabla1), los cuales fueron cuantificados en la Tabla 2. Los datos del área total tenida en cuenta para el conteo de área quemada y sin quemar muestra una reducción considerable del área total medida para los años 2012 y 2013, lo cual es gracias a la disminución de los datos espaciales recolectados del satélite LANDSAT 7 debido a la falla del corrector del escáner ETM+.

Tabla 2. Datos de área quemada y sin quemar en los Montes de maría. El área total entre los años varía debido a la cobertura de nubes y a la falla del corrector del escáner ETM+.

Año	Área quemada (ha)	Área Sin Quemar (ha)	Total (ha)	# días	Área quemada/día	% Área quemada
2012	440613	318923,37	323329,5	81	54,397	1,36
2013	4441,14	390203,73	394644,87	63	70,494	1,13
2014	18380,79	464180,94	482561,73	65	282,781	3,81
2015	8096,31	474394,14	482490,45	49	165,231	1,68
2016	5621,49	476932,77	482554,26	129	43,577	1,16
2017	7700,04	474850,71	482550,75	64	120,313	1,6
2018	15027,39	467317,44	482344,83	65	231,191	3,12
2019	4621,77	477639,81	482261,58	81	57,059	0,96
2020	6699,33	475620,57	482319,9	49	136,721	1,39
2021	2421,9	480008,16	482430,06	145	16,703	0,5
2022	10228,05	472474,08	482702,13	97	105,444	2,12

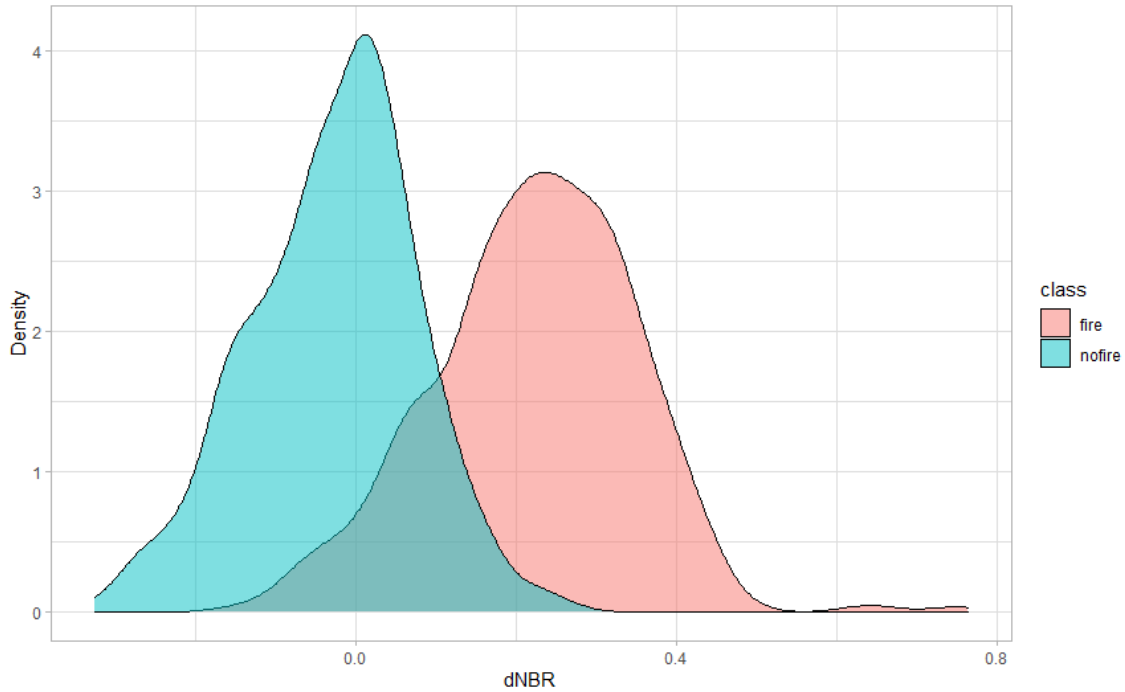


Figura 3. Funciones de densidad de probabilidad de dNBR para pixeles correspondientes a incendios y no incendios.

4.4. Patrones temporales de NDVI en áreas quemadas de BST.

El análisis de la variación temporal de los índices de vegetación permite evaluar el cambio en la densidad de la vegetación en un área, y en este caso áreas que han sido quemadas. Para este análisis se calculó el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada), el cual evalúa la densidad y vigor de la vegetación y se calcula como la diferencia normalizada de reflectancia entre el rojo e infrarrojo cercano.

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}).$$

Para este análisis se estableció como estado inicial el área quemada de 2014 el cual fue el año que presentó mayor extensión de área quemada. A partir de este año, se analizaron los cambios en NDVI de las áreas de BST afectadas por los incendios en el 2014 cada dos años, siempre usando las imágenes post incendio (Tabla 1). Por ejemplo, para el 2014 se usó la imagen del mes

de marzo, para la que se calculó el NDVI en los píxeles de BST afectados por incendios. Este mismo procedimiento se realizó para la imagen de mayo de 2016, usando siempre los píxeles de BST afectados por incendios en el periodo inicial (2014). Para este par de imágenes se calculó porcentaje de cambio en NDVI:

$$\% \text{ Cambio} = ((\text{Período 2} - \text{Período 1}) / \text{Período 1}) * 100$$

De esta forma se establecieron 4 períodos de análisis entre 2014 y 2022: 2014-2016-2018-2020-2022.

Todos los análisis estadísticos y espaciales se realizaron usando los programas Matlab, R Studio, y ArcGIS Pro.

5. RESULTADOS

5.1. Régimen de incendios

Para el periodo 2012-2022 se encontraron 2724 puntos de incendios con una confiabilidad alta (Figura 4). El mapa de densidad muestra tres principales focos de incendios en la zona: sección oriental entre San Jacinto y El Carmen de Bolívar, sección norte entre San Onofre y El Carmen de Bolívar, y en la sección noroccidental de San Onofre.

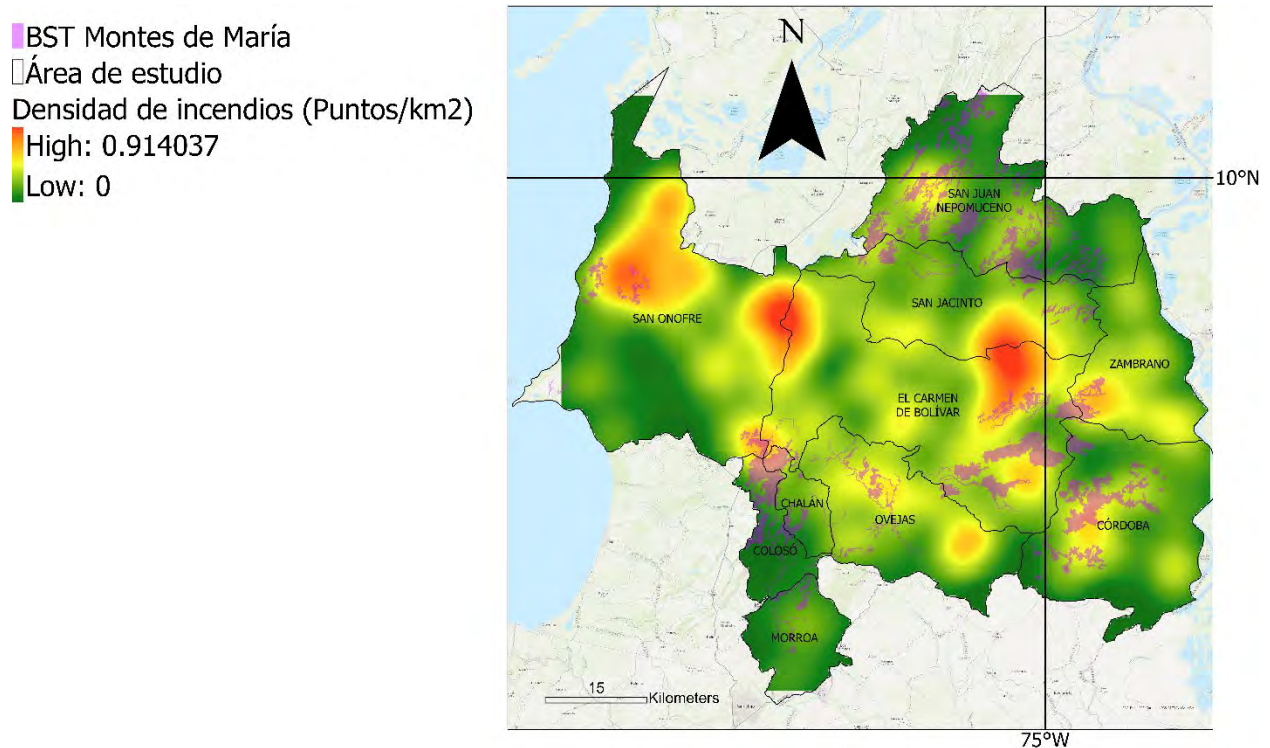


Figura 4. Densidad de incendios en los Montes de María en el periodo 2012-2022.

El comportamiento anual en la subregión para el intervalo 2012 a 2022 (Figura 5), indica que los años con mayor cantidad de incendios fueron 2012, 2014, y 2020, los cuales corresponden al 11,6%, 13,1% y 12,7% del total, respectivamente. Además, los años con menor cantidad de incendios fueron 2017 (6,1%), 2021 (5,6%) y 2022 (3,4%). Su comportamiento exhibe una clara

temporada de incendios en los meses de febrero y marzo, donde se presentan el 78,5% de los incendios (Figura 5).

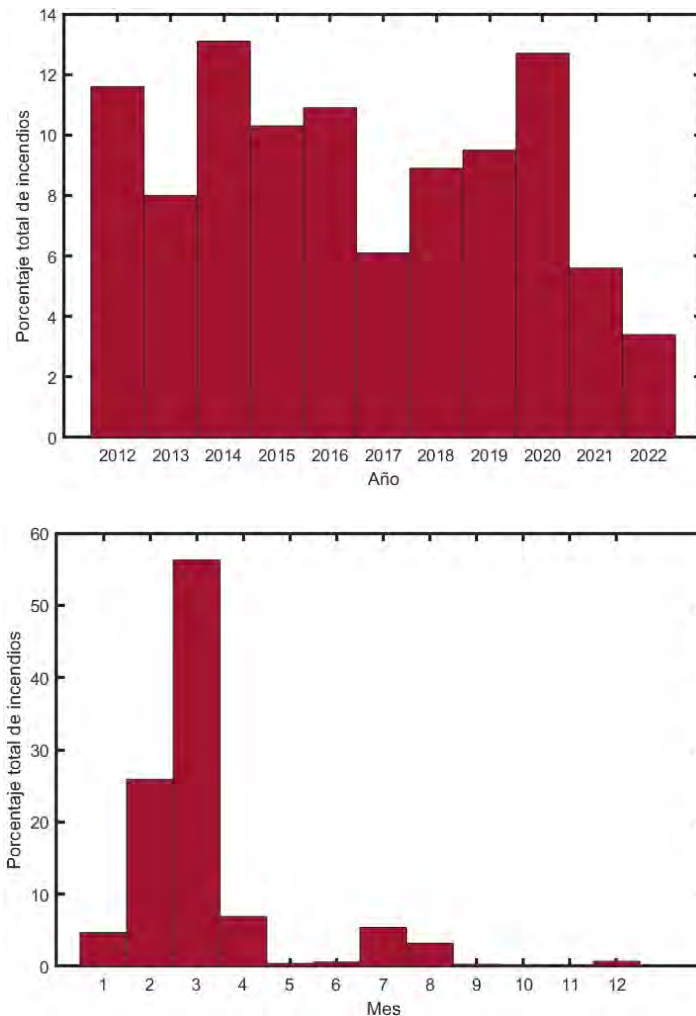


Figura 5. Número de incendios anuales (izquierda) y mensuales (derecha) en los Montes de María para el período de 2012-2022.

5.2. Extensión de área quemada durante la estación seca

Los resultados del área quemada muestran que para el periodo 2012-2022, el área quemada varió entre el 0,5% (2422 ha) y el 3,8% (18381 ha) del área de estudio (Tabla 2), siendo 2014 y 2018 los años con una mayor extensión. Sin embargo, es necesario tener presente que el número de días

entre la imagen pre y post incendio varió entre 49 y 145 días, por lo que fue necesario normalizar el área quemada para poder realizar comparaciones entre años. Siendo así, el año con una mayor área quemada por día fue 2014 (282,78 ha/día), mientras que el año con menor valor fue 2021 (16,7 ha/día).

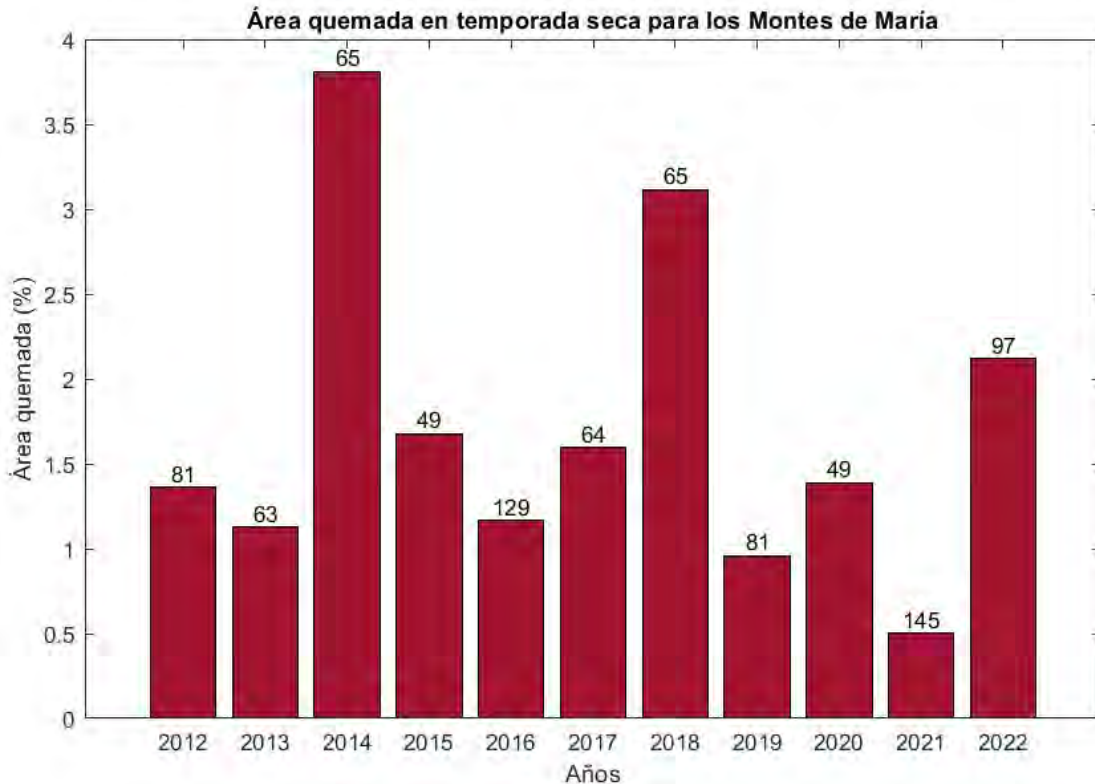
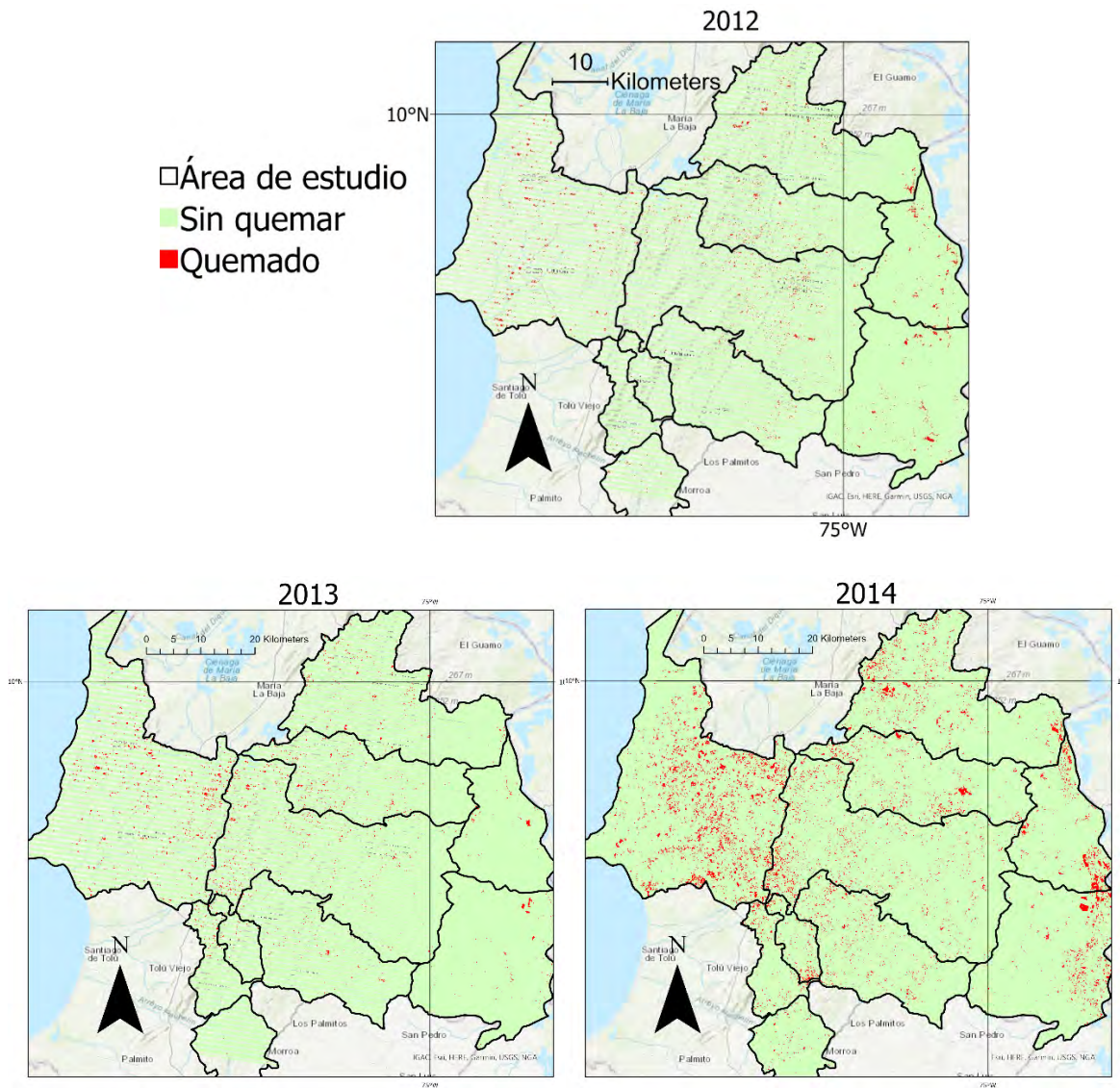


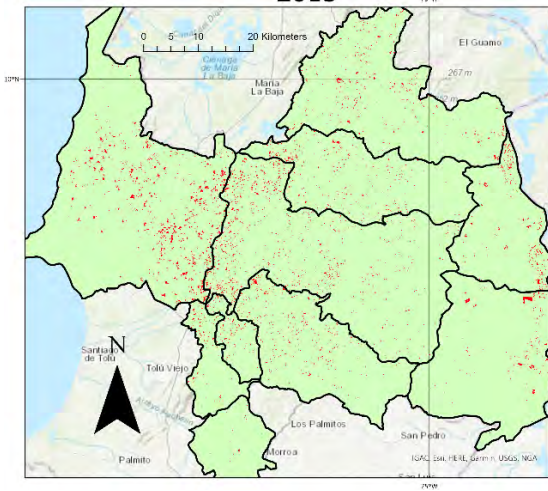
Figura 6. Porcentaje de área quemada al finalizar la temporada seca con respecto al total en los Montes de María. El número sobre cada barra, indica el número de días considerados para cada año.

La Figura 7 presenta la localización de las áreas quemadas para el período analizado. A nivel general se logra apreciar poca extensión de área quemada en las cartografías anuales. Sin embargo, en aquellos años donde se muestra un incremento en la extensión de área quemada, las zonas de afectación se agrupan al occidente, centro, y oriente del área de estudio. Por otro lado, en los años

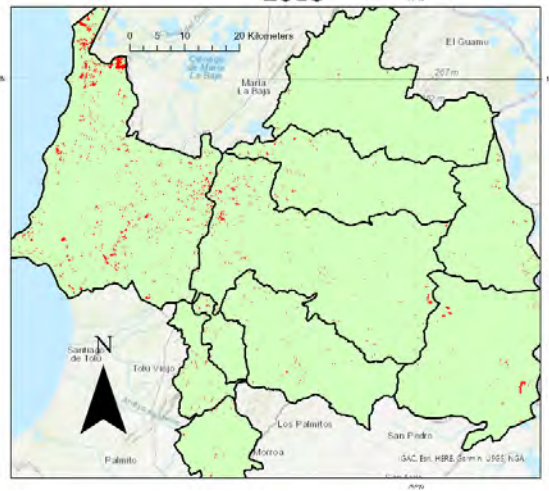
con menor área quemada, estas afectaciones se concentran en el occidente y oriente de los Montes de María.



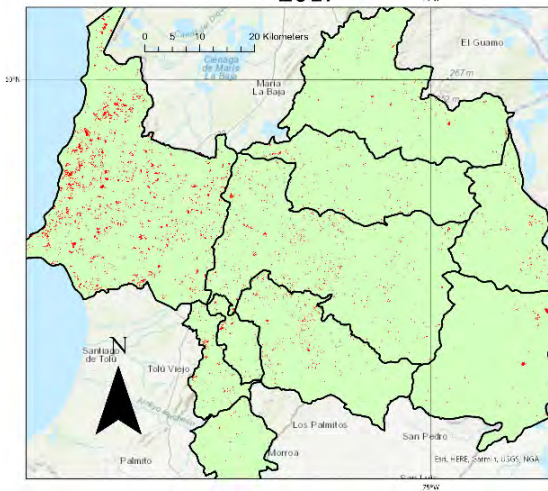
2015



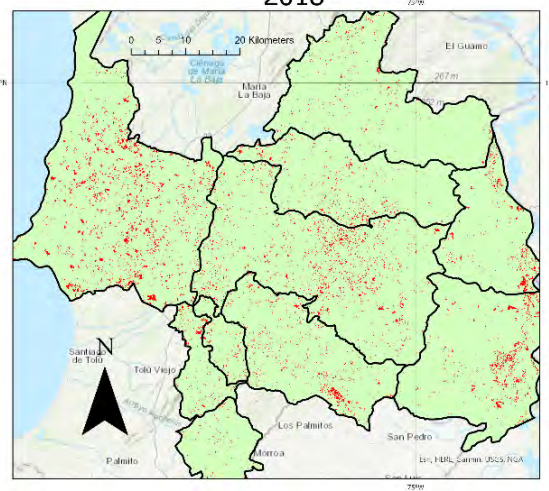
2016



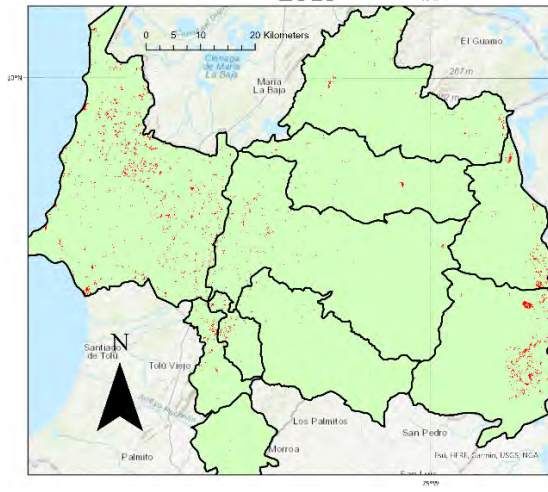
2017



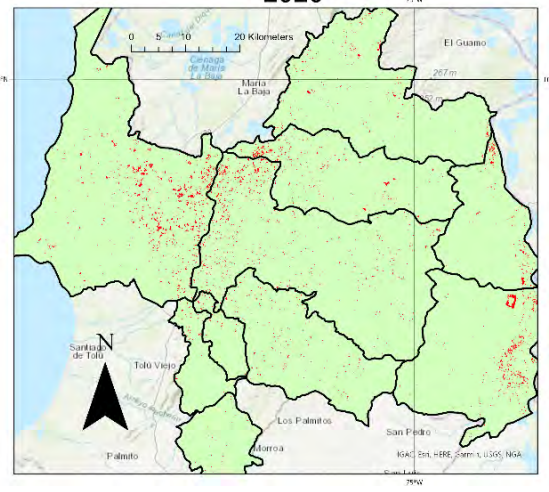
2018



2019



2020



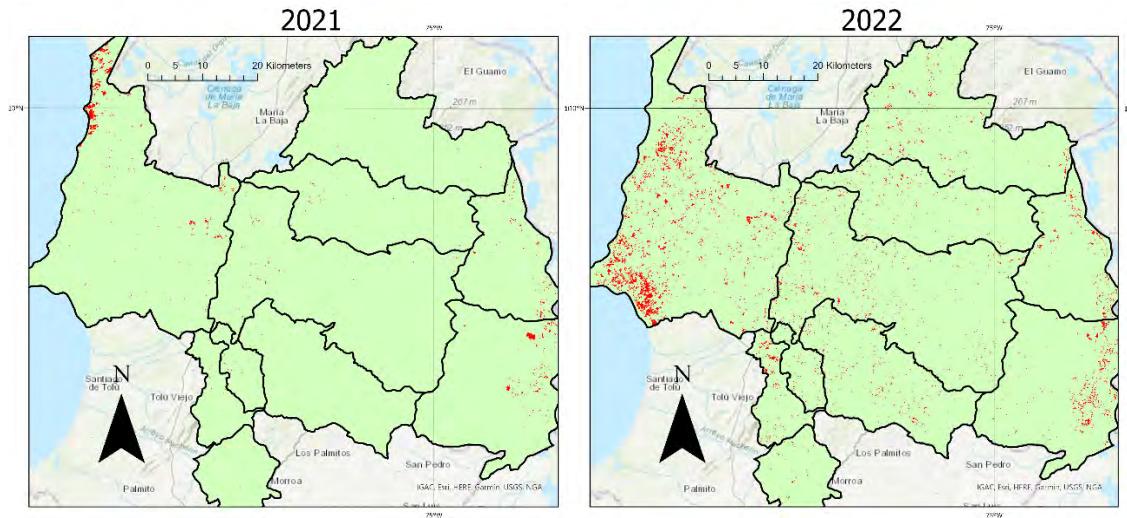


Figura 7. Áreas quemadas y sin quemar durante la temporada seca para el periodo 2012 a 2022.

Los valores correspondientes a área afectada de BST mantienen el mismo comportamiento que las áreas afectadas de no bosque, mostrando porcentajes de afectación congruentes entre sí, y manteniendo la tendencia de área quemada de BST en el total de la subregión (Figura 8). El análisis muestra que las áreas no correspondientes a BST muestran un mayor valor de porcentaje de área quemada con respecto a su total que las zonas del BST. Dentro del BST, la mayoría de los años no superan el 1,5% de área quemada, excepto 2014 y 2018, cuyos valores superan el 2%, coincidiendo con la mayor extensión de área quemada indicada anteriormente.

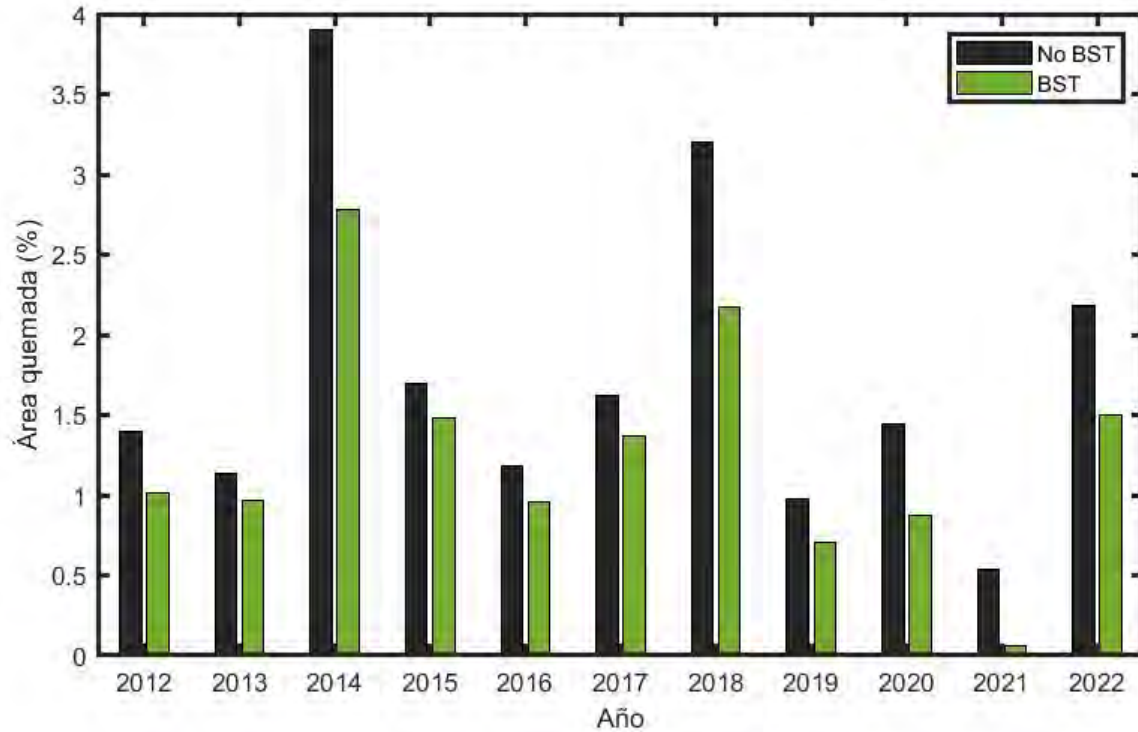


Figura 8. Porcentaje de área quemada con respecto al área total de BST y de no bosque.

5.3. Cambio en el NDVI entre 2012 y 2022

El análisis de cambio de la densidad de la vegetación en las zonas afectadas por incendios en el 2014 exhibe el porcentaje de incremento o descenso de la densidad de la vegetación calculada con NDVI. Así, los resultados muestran que para el primer intervalo analizado (2014-2016) tuvo el mayor porcentaje de cambio positivo, con una media de 201,6%. Por otro lado, el período de 2016 a 2018 muestra un descenso en el NDVI, con una media de -24,38%, tendencia que continúa en el período 2018-2020, con una media de -17,8%. En el último período analizado (2020 – 2022) se presenta un aumento promedio de NDVI de 67,21%.

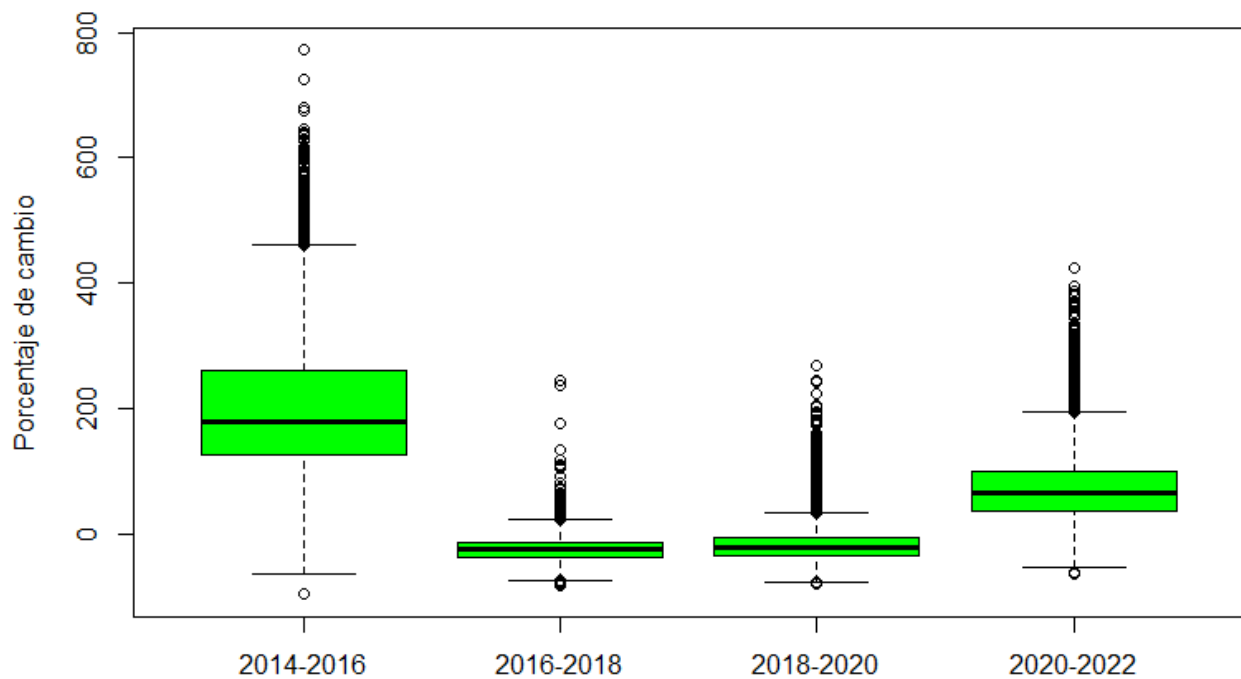


Figura 9. Porcentaje de cambio de NDVI en área quemada entre 2014 y 2022.

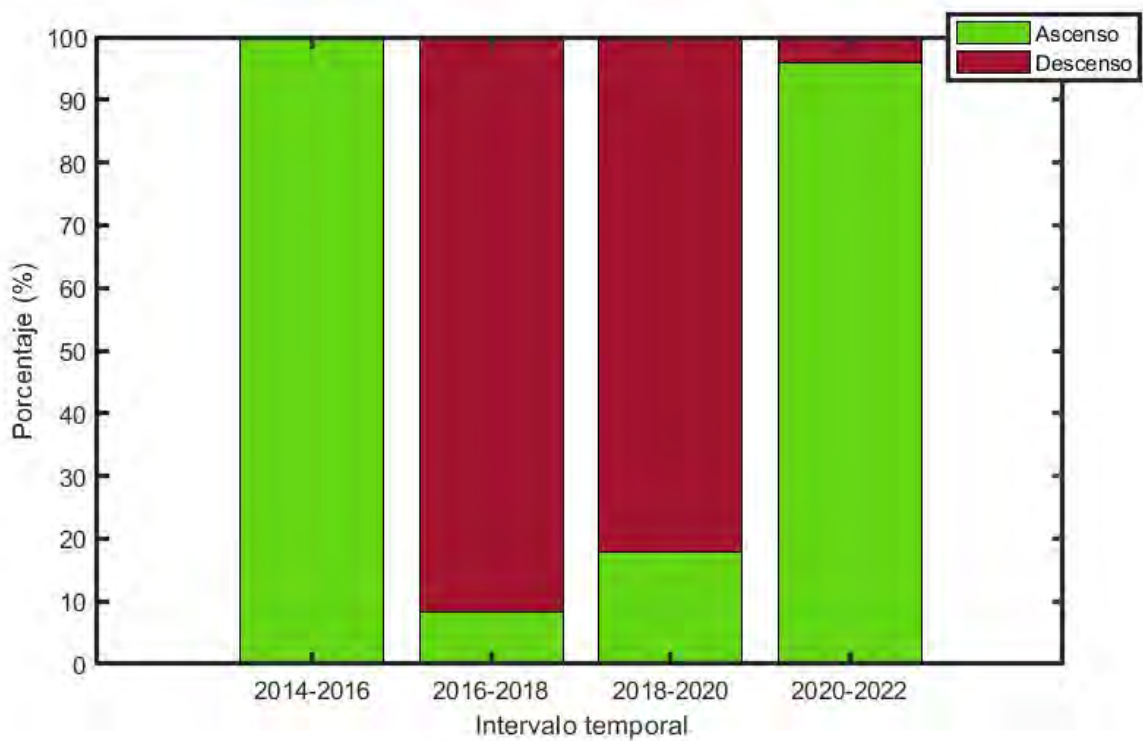


Figura 10. Síntesis del porcentaje de cambio bianual de NDVI en área afectada de BST afectadas por incendios desde 2014 hasta 2022.

La Figura 10 muestra que en el primer intervalo hay un aumento en la densidad de la vegetación en casi la totalidad del área afectada por incendios en el 2014, donde el 99,7% del área exhibe un cambio positivo en el NDVI. Sin embargo, para el segundo y tercer intervalo, se observa una disminución en NDVI, en la mayor parte del área afectada inicialmente, siendo este más grave para el intervalo de 2016-2018, donde un 91,8% del área muestra un descenso del NDVI. Finalmente, el cuarto intervalo muestra un aumento de NDVI, en la mayor parte del área inicial (95,8%).

6. DISCUSIÓN

6.1. Precipitación como principal factor regulador de incendios

Los eventos de incendios en la subregión se encuentran fuertemente ligados con la estacionalidad intra-anual de la precipitación, puesto que se presenta un notable aumento en la frecuencia de estos al final de la temporada seca. Esta dependencia es ocasionada por el estado resultante de la vegetación al pasar por períodos de sequía, donde adquiere una mayor sensibilidad al calor, y junto las condiciones atmosféricas, propician la extensión de los incendios (Holden, et al, 2018). Sumado a esto, los resultados obtenidos también indican una clara variabilidad inter-anual en la frecuencia de incendios, con valores altos en los intervalos 2014-2016 y 2018-2020. Estos periodos coinciden con fases cálidas de ENOS o El Niño (Figura 12). Durante las fases cálidas de ENOS en Colombia, se generan condiciones de sequía que facilitan la creación de incendios forestales, especialmente para la temporada seca intra-anual donde ENOS presenta una mayor incidencia sobre las variaciones de precipitación (Orozco & Escobar, 2008). En esta fase, la pérdida de humedad de los suelos y su alteración al balance hídrico impacta principalmente a las regiones Caribe y Andina, ocasionando pérdida de material vegetal, alteración del bioclima, y disminución en la producción agrícola. (Azcárate & Mejía-Fajardo, 2016).

En la Figura 5, se observan dos grupos de años donde la alta frecuencia de incendios se hizo constante, los cuales corresponden a los intervalos 2014-2016 y 2018-2020. Los períodos previamente mencionados comprenden parte de los períodos clasificados como “Niño” en la Figura 11. El periodo 2014 a 2016, corresponde a un evento de fenómeno de El Niño, fuerte (Azcárate & Mejía-Fajardo, 2016), siendo el evento cálido más grave entre 2012-2022.

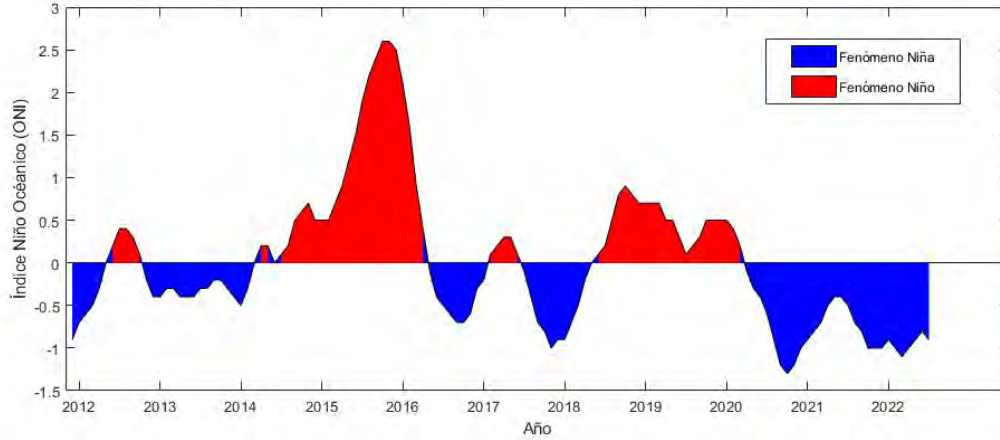


Figura 11. Serie de tiempo del ONI (Oceanic Niño Index) para el periodo de estudio (datos de NOAA).

Por otro lado, para los datos de área quemada total coinciden con lo anterior, siendo los años 2014 y 2018 representan años críticos para la región, en los cuales hubo una disminución de los valores de precipitación con respecto a años previos (Figura 12), llegando en el 2014, año con mayor área quemada, a encontrarse entre los valores más bajos de lluvia en el registro temporal de cada municipio.

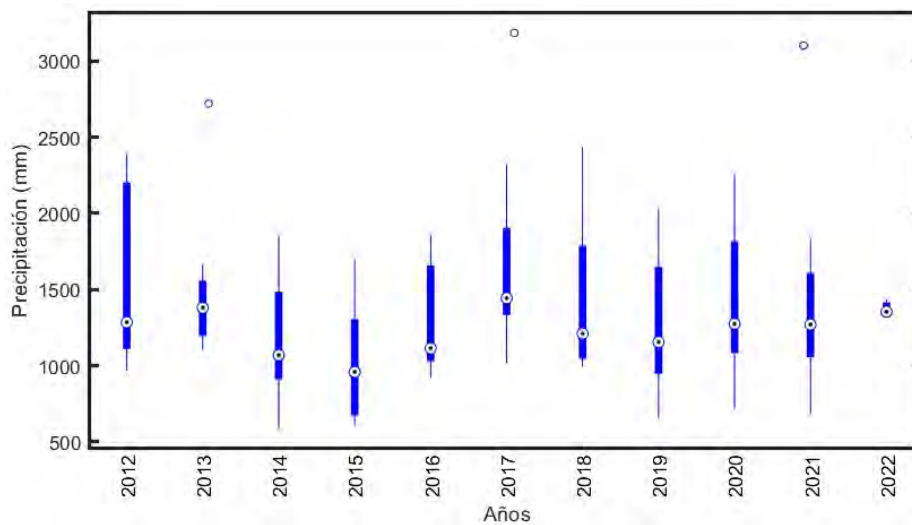


Figura 12. Precipitación promedio anual para el área de estudio a partir de 8 estaciones del IDEAM pertenecientes a los municipios de San Juan Nepomuceno, San Jacinto, El Carmen de Bolívar, Zambrano, Córdoba, San Onofre, Chalán y Colosó.

Estos regímenes de precipitación presentes en los Montes de María regulan también la magnitud del cambio en el estado de la vegetación de BST afectada. Los aumentos o descensos de NDVI se ven fuertemente relacionados con ENOS, dado a que en eventos de El Niño ocasiona una disminución de NDVI, y en eventos de La Niña, un aumento de NDVI (Poveda, et al, 2011). Como era de esperarse, la tendencia de cambios en la densidad de la vegetación de BST afectada por incendios, depende de los períodos de lluvia para mostrar una mejoría en su estado (De la Casa & Ovando, 2006).

6.2. Incendios y prácticas de uso del suelo

Entre finales del siglo XX y comienzos del siglo XXI, el estado ambiental y social bajo el cual se ha visto dominada la subregión, ha sido influenciado por el conflicto armado, donde atentados a campesinos, ocasionaban que sus fincas fueran quemadas por grupos paramilitares (FUCUDE et al, 2020). Sin embargo, estas actividades han disminuido con la reducción de actividades de grupos al margen de la ley en la subregión (FUCUDE et al, 2020). Tras este período, las víctimas del desplazamiento que vuelven han optado por preparar la tierra para cultivos usando técnicas que faciliten su trabajo, haciendo común la quema o *tumba y quema*, usada para “civilizar” el terreno y abrir las zonas boscosas (Rojas, 2015) para construir casas o cultivos. Son estas prácticas las que bajo falta de vigilancia resultan en graves incendios forestales en los Montes de María.

Por otro lado, la sobreutilización del terreno (el uso excesivo de ganadería y agricultura que afecta al suelo) es una preocupación inminente en la subregión. A nivel nacional, en el 2016, los departamentos de Sucre y Bolívar ocuparon las posiciones 6 y 10 respectivamente del ranking de departamentos más sobreutilizados del país (IGAC, 2016). Para la subregión, el 72,7% de su área se encuentra categorizada como áreas de sobreutilización de suelo, siendo San Juan Nepomuceno uno de los municipios mayormente utilizados para prácticas agropecuarias, conteniendo un

64,07% del área total en esta categoría (Agencia de Renovación del Territorio, 2022). Esta forma de uso del suelo ocasiona un incremento en la vulnerabilidad ambiental de la zona que abarca, disminuyendo su resistencia contra incendios forestales.

6.3. Cambios en NDVI en BST afectado por incendio

Teniendo en cuenta lo anterior, se revisó la persistencia de la reducción en NDVI en el municipio de San Juan Nepomuceno para el área de BST afectada por incendios desde el 2014 (Figura 9). Dentro del municipio, un 79% del área de BST afectada por incendios en el 2014, presenta un *descenso casi constante* en los cuatro períodos de tiempo (Figura 13), y un 18% del área presenta un *descenso irregular*. Estos datos revelan que para el periodo 2014-2022, es frecuente que un píxel “quemado”, siga siendo afectado en periodos posteriores, aún en áreas de BST.

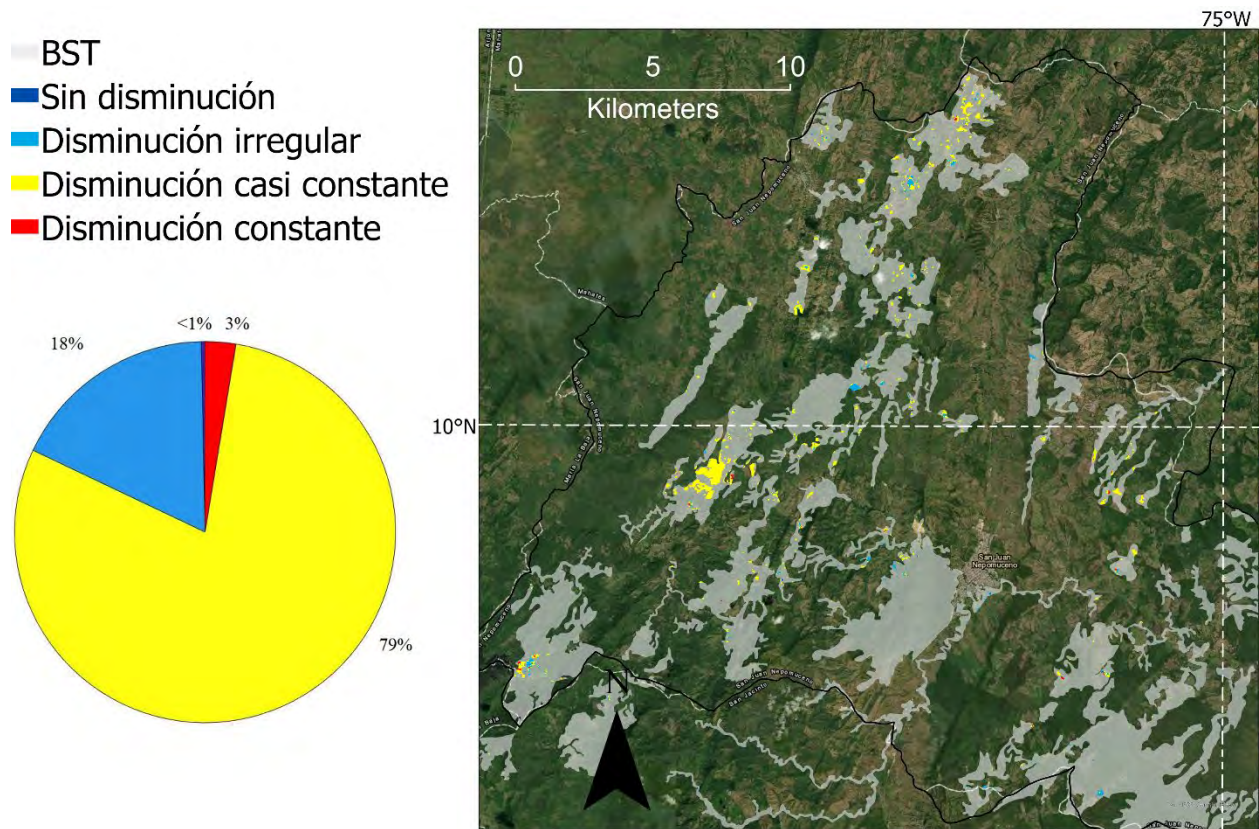


Figura 13. *Persistencia de disminución en el NDVI en San Juan Nepomuceno, dentro de los 4 intervalos analizados (2014-2016, 2016-2018, 2018-2020, 2020-2022) y para aquellas áreas quemadas de BST en 2014. La categoría “sin disminución” se refiere a píxeles que no presentaron disminución en ningún intervalo, “disminución irregular” a píxeles que presentaron disminución en 1 de los intervalos, “disminución regular” a píxeles que presentaron disminución en 2 intervalos, y “disminución constante” a píxeles que presentaron disminución en 3 intervalos.*

Los incendios en el BST presentan impactos negativos como la alteración de la infiltración y escorrentía superficial debido a la erradicación de cubierta vegetal después de los fuegos, cambiando las propiedades del suelo (Ospina, 2017). Específicamente, después de los fuegos la escorrentía tiende a aumentar, mientras que la infiltración tiende a disminuir. Además, la persistencia de los fuegos sobre el ecosistema ocasiona consecuencias negativas como la reducción en la retención de agua en los suelos y copa de los árboles, disminución en la evapotranspiración, y en la calidad del aire y el agua (Vargas-Sanabria & Campos-Vargas, 2020). Por otro lado, algunas especies de BST, cuentan con semillas con la capacidad de germinar en condiciones de incendios de baja intensidad (Pizano & Cárdenas, 2019). Sin embargo, la regeneración de BST a partir de semillas tras los incendios, se ha vuelto cada vez más difícil debido a la presión antropogénica sobre el ecosistema. (Pizano & Cárdenas, 2019). Específicamente las presiones antropogénicas con mayor impacto sobre el BST son: fuegos, construcciones de infraestructura humana, ganadería y agricultura (González-M, et al, 2018).

No es posible determinar si el área afectada por los incendios del 2014 en San Juan Nepomuceno se encuentra en mejor estado haciendo uso de imágenes satelitales, pues después de los fuegos, la generación de plantas herbáceas que presentan un diferente estado sucesional al BST antes de la quema, dificulta registrar cambios leves de NDVI (Arenas & Noy, 2019).

7. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó una descripción del régimen de incendios de los Montes de María, junto a la identificación de las zonas afectadas de BST y de no bosque para el intervalo 2012 a 2022, evaluando además el cambio en la densidad de la vegetación (NDVI) desde el año con más afectación de quema sobre el ecosistema. Así, se logra identificar una dependencia de los eventos de incendios bajo las temporadas de sequía de la subregión, que a nivel mensual se expresan en una mayor ocurrencia en los meses de febrero y marzo (temporada seca), y a nivel inter-anual coinciden con eventos de El Niño. La extensión del área quemada presenta sus valores máximos en los años con menor precipitación anual (2014 y 2018). Esta tendencia se cumple tanto cuando se considera la totalidad del área de estudio, como cuando se considera el área quemada dentro de BST, cuyos resultados se encuentran fuertemente ligados a los polígonos de BST de la red de BST y su nivel de precisión. Estas regiones de BST afectadas por los incendios, muestran mejoras en la densidad de su vegetación para aquellos años donde las precipitaciones incrementan y favorecen la recuperación de las áreas quemadas.

Finalmente, este tipo de proyectos son importantes debido a que permiten priorizar áreas con mayor impacto sobre BST teniendo en cuenta las constantes presiones bajo las cuales se encuentra expuesto, como es el caso de San Juan Nepomuceno, un municipio altamente sobreutilizado. De esta forma, estos aportes al conocimiento de BST, permiten priorizar áreas de estudio para realizar investigaciones detalladas sobre la regeneración vegetal, la afectación de incendios a los bancos de semillas y procesos de restauración que aporten a la conservación del BST en el Caribe. Este proyecto propone profundizar en la revisión de los cambios de densidad de BST en un rango temporal mayor, de forma que sea posible identificar un patrón en los aumentos y descensos de este índice. Además, se recomienda realizar análisis de correlación para las variables que influyan

sobre los cambios en la densidad y en la generación de incendios de la subregión. Sumado a esto, se espera que los resultados encontrados a lo largo del trabajo ayuden a la gestión y vigilancia del BST bajo las temporadas de sequía en los Montes de María, donde la investigación y la atención es necesaria para una mejor conservación.

8. REFERENCIAS

- Agencia de Renovación del Territorio. (2022). *Documento Hoja de Ruta Subregión Montes de María*. https://serviceweb.renovacionterritorio.gov.co/artdev/media/temp/2022-01-17_152446_788161766.pdf
- Arellano, S. & Vega, José & Silva, Francisco & Fernández Filgueira, Cristina & Vega-Nieva, Daniel & Álvarez-González, J.G. & Ruiz-González, Ana. (2017). Validación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para determinar la severidad del fuego en el incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra) en 2013. *Revista de Teledetección*. 2017. 49. 10.4995/raet.2017.7137.
- Arenas, J., & Noy, A. (2019). Análisis de la severidad de un incendio en un relicto de bosque seco tropical en Colombia. *Universidad Distrital Francisco José De Caldas*.
- Armenteras, D., Barreto, J. S., Tabor, K., Molowny-Horas, R., & Retana, J. (2017). Changing patterns of fire occurrence in proximity to forest edges, roads and rivers between NW Amazonian countries. *Biogeosciences*, 14(11), 2755-2765.
- Armenteras, D., González, T. M., Ríos, O. V., Elizalde, M. C. M., & Oliveras, I. (2020). Incendios en ecosistemas del norte de Suramérica - Fire in the ecosystems of northern South America: avances en la ecología del fuego tropical en Colombia, Ecuador y Perú. *Caldasia*, 42(1), 1–16. <https://www.jstor.org/stable/26872745>
- Azcárate, R., & Mejía-Fajardo, A. (2016). Meteorología, socioeconomía y gestión del riesgo de desastres del evento El Niño-Oscilación del Sur en Colombia. *Mutis- Revista De Arte Y Ciencia De La Universidad Jorge Tadeo Lozano*, 6(2), 95-109.
- CARSUCRE (2014). Plan de acción frente al fenómeno de “el niño” 2014 – 2015.: <https://carsucre.gov.co/wp-content/uploads/PLANDECONTINGENCIREIONAL.pdf>
- Carvajal, Y., Jiménez, H., & Materón, H. (1997). Efectos ecológicos del fenómeno ENOS en Colombia. *Revista Peruana de Biología*, 6(3), 152-159.
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). (s.f.). Climatología del Caribe. CIOH. *Recuperado de: https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia.php*
- Chuvieco, E., Martín, M. P., Martínez, J., & Salas, F. J. (1998). Geografía e incendios forestales.

Cleetus, R., & Mulik, K. (2014). Climate Change and Growing Wildfire Risks. In *Playing with Fire: How Climate Change and Development Patterns Are Contributing to the Soaring Costs of Western Wildfires* (pp. 4–10). Union of Concerned Scientists. <http://www.jstor.org/stable/resrep00039.8>

Contreras, D. (2016). El impacto de El Niño en Colombia. *Revista Fasecolda*, (163), 42–46. Recuperado a partir de <https://revista.fasecolda.com/index.php/revfasecolda/article/view/214>

De La Casa, A., & Ovando, G. (2006). Relación entre la precipitación e índices de vegetación durante el comienzo del ciclo anual de lluvias en la provincia de Córdoba, Argentina. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 35(1), 67-85.

Díaz Granados, A. (1988). Resumen del estudio hidrogeológico del flanco nororiental de la serranía de San Jacinto y de la zona litoral del golfo de Morrosquillo. *Boletín Geológico*, 29(1), 3–44. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol29.1.1988.231>

Dryflor, Banda-R, K., Delgado-Salinas, A., Dexter, K.G., Linares-Palomino, R., Oliveira-Filho, A., Prado, D., Pullan, M., Quintana, C., Riina, R., Rodríguez M., G.M., Weintritt, J., Acevedo-Rodríguez, P., Adarve, J., Álvarez, E., Aranguren B., A., Arteaga, J.C., Aymard, G., Castaño, A., Ceballos-Mago, N., Cogollo, Á., Cuadros, H., Delgado, F., Devia, W., Dueñas, H., Fajardo, L., Fernández, Á., Fernández, M.Á., Franklin, J., Freid, E.H., Galetti, L.A., Gonto, R., González-M., R., Graveson, R., Helmer, E.H., Idárraga, Á., López, R., Marcano-Vega, H., Martínez, O.G., Maturo, H.M., McDonald, M., McLaren, K., Melo, O., Mijares, F., Mogni, V., Molina, D., Moreno, N.del P., Nassar, J.M., Neves, D.M., Oakley, L.J., Oatham, M., Olvera-Luna, A.R., Pezzini, F.F., Dominguez, O.J.R., Ríos, M.E., Rivera, O., Rodríguez, N., Rojas, A., Särkinen, T., Sánchez, R., Smith, M., Vargas, C., Villanueva, B., Pennington, R.T., 2016. Plant diversity patterns in neotropical dry forests and their conservation implications. *Science* (80-.) 353, 1383–1387.

Fundación Cultura Democrática FUCUDE, Consultoría para los Derechos Humanos y el Desplazamiento CODHES, Corporación Opción Legal, Universidad Tecnológica de Bolívar Grupo Regional de Memoria Histórica, Mesa de Organizaciones de Población Desplazada de Los Montes de María OPDS (2020). Los Montes de María bajo fuego, voces de las víctimas de la violencia.

García, H. y González-M. Roy. (eds). 2019. Bosque seco Colombia: biodiversidad y gestión. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia. 32 p.

Gibson, R. K., White, L. A., Hislop, S., Nolan, R. H., & Dorrough, J. (2022). The post-fire stability index; a new approach to monitoring post-fire recovery by satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113151.

Giglio, L., Randerson, J. T., van der Werf, G. R., Kasibhatla, P. S., Collatz, G. J., Morton, D. C., & DeFries, R. S. (2010). *Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. Biogeosciences*, 7(3), 1171–1186. doi:10.5194/bg-7-1171-2010

Golicher, D., & Marcial, N. R. (2003). Causas ecológicas de los incendios forestales. *Ecofronteras*, 6-9.

González-Cabán, A. (2013). Memorias del cuarto simposio internacional sobre políticas, planificación y economía de los incendios forestales: cambio climático e incendios forestales; 2012 noviembre 5–11; Ciudad de México, México. *Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-245,(Español)*. Albany, CA: Departamento de Agricultura de los EE. UU., Servicio Forestal, Estación de Investigación del Pacífico Suroeste. 436 p, 245(ES).

González-M, R., García, H., Isaacs, P., Cuadros, H., López-Camacho, R., Rodríguez, N., ... & Pizano, C. (2018). Disentangling the environmental heterogeneity, floristic distinctiveness and current threats of tropical dry forests in Colombia. *Environmental Research Letters*, 13(4), 045007.

Holden, Z. A., Swanson, A., Luce, C. H., Jolly, W. M., Maneta, M., Oyler, J. W., ... & Affleck, D. (2018). Decreasing fire season precipitation increased recent western US forest wildfire activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(36), E8349-E8357.

Hoyos, N., Correa-Metrio, A., Sisa, A., Ramos-Fabiel, M. A., Espinosa, J. M., Restrepo, J. C., & Escobar, J. (2017). The environmental envelope of fires in the Colombian Caribbean. *Applied Geography*, 84, 42-54.

IDEAM (2017). Mapa de Ecosistemas Continentales, Marinos y Costeros de Colombia. <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/mapa-ecosistemas-continentales-costeros-marinos>

IGAC (2016), Suelos afectados por incendios, débiles para afrontar Fenómeno de la Niña. <https://igac.gov.co/es/noticias/suelos-afectados-por-incendios-debiles-para-afrontarfenomeno-de-la-nina>

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, IAvH (2014). Bosque seco tropical en Colombia; generalidades y contexto. *El bosque seco tropical en Colombia*, 37-47.

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (s.f.). Bosques secos tropicales en Colombia. [://www.humboldt.org.co/en/research/projects/developing-projects/item/158-bosquessecos-tropicales-en-colombia](http://www.humboldt.org.co/en/research/projects/developing-projects/item/158-bosquessecos-tropicales-en-colombia)

Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116–126.

Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). 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, 164.*

Muñoz Robles, C. A., Treviño Garza, E. J., Verástegui Chávez, J., Jiménez Pérez, J., & Aguirre Calderón, O. A. (2005). Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México. *Investigaciones geográficas*, (56), 101-117.

Muñoz, R. V. (2000). Las quemas incontroladas como causa de incendios forestales. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (9), 13-26.

Orozco, O. L. P., & Escobar, Y. C. (2008). Incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer. *Ingeniería y Desarrollo*, (23), 104-118.

Ospina Céspedes, L. C. (2017). Efecto de un incendio forestal sobre el microbiota de un suelo de bosque seco tropical, en el departamento del Tolima.

Palliser, J. (2012). Wildfires. *Science Scope*, 36(2), 10–12. <http://www.jstor.org/stable/43184207>

Parra Lara, A. D. C., Bernal Toro, F. H., Armenteras Pascual, D., González Alonso, F., Morales Rivas, M., Pabón Caicedo, D. J., & Páramo Rocha, G. E. (2011). Incendios de la cobertura vegetal en Colombia.

Pausas, J.G. and Ribeiro, E. (2013), Fire and productivity. *Global Ecology and Biogeography*, 22: 728-736. <https://doi.org/10.1111/geb.12043>

Pechony, O., Shindell, D. T., & Chapin, F. S. (2010). Driving forces of global wildfires over the past millennium and the forthcoming century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(45), 19167–19170. <http://www.jstor.org/stable/25748645>

Pizano, Ph.D., Camila, & Cárdenas Salgado, J. (2019). Efecto de temperaturas que simulan incendios sobre la germinación de semillas de un bosque seco tropical. *Colombia Forestal*, 22(2), 55-66.

Poveda, G., Álvarez, D., & Rueda, &. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36(11-12), 2233-2249.

Quijano, E. D. R., & Valest, K. A. T. (2020). *Humanos a la obra en otros lugares* (1st ed.). Editorial Universidad del Norte. <https://doi.org/10.2307/j.ctv103xctn>

Rojas, J. G. (2015). *Hacer el monte paisajes corporales campesinos en montes de María*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/16761>.

Vargas-Sanabria, D., & Campos-Vargas, C. (2020). Comparación multitemporal de áreas quemadas en un bosque seco tropical utilizando el índice de área quemada (IAQ). *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 17(41), 29-36.

Villers, Lourdes & Lopez-Blanco, Jorge. (2004). Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en las áreas forestales de México: un estudio en el Volcán la Malinche.