

**EVALUACIÓN DE MODELOS DE COMBUSTIBLE FORESTAL DEL BOSQUE
SECO TROPICAL DEL PARQUE NATURAL REGIONAL LOS BESOTES -
VALLEDUPAR, CESAR.**



AUTORES:

CARLOS DANIEL CASTILLO DE LUQUE

ARNALDO LUIS CALDERÓN TORRES

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y TECNOLÓGICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL & SANITARIA

VALLEDUPAR / CESAR

2022

**EVALUACIÓN DE MODELOS DE COMBUSTIBLE FORESTAL DEL BOSQUE
SECO TROPICAL DEL PARQUE NATURAL REGIONAL LOS BESOTES -
VALLEDUPAR, CESAR.**

AUTORES:

CARLOS DANIEL CASTILLO DE LUQUE

ARNALDO LUIS CALDERÓN TORRES

DIRECTOR:

KARINA PAOLA TORRES CERVERA

MSC. MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

ASESOR:

PAUL KLEMENT ARIAS RUIDÍAZ

INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y TECNOLÓGICA

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL & SANITARIA

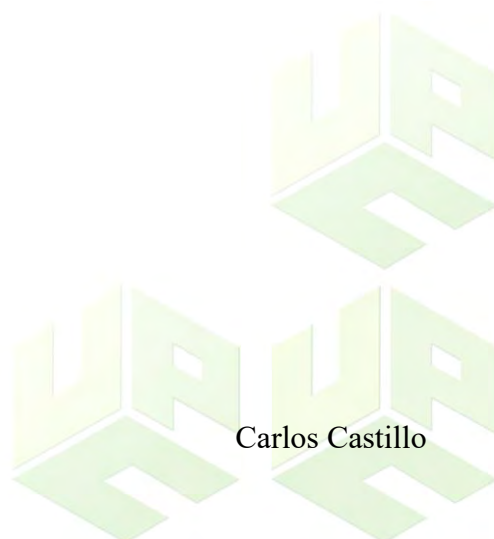
VALLEDUPAR / CESAR

2022

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

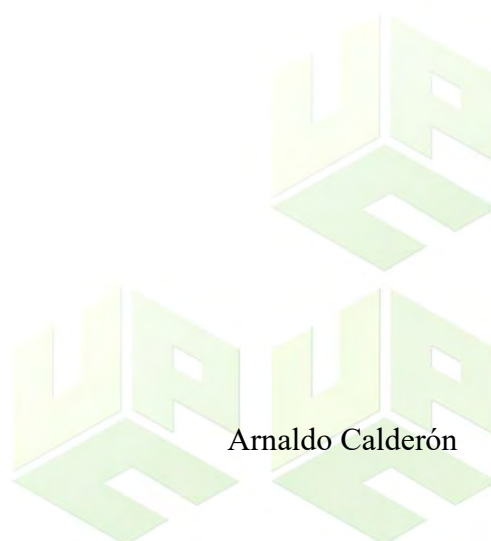
A mi mamá, mi papá y mis dos hermanos quienes han creído en mí y quienes han fomentado en mí el deseo de superación y de triunfo en la vida, lo que ha contribuido la consecución de este logro. Espero contar siempre con su valioso e incondicional apoyo.



Carlos Castillo

DEDICATORIA

Dedico principalmente este logro profesional a Dios, debido a que gracias a él todo esto ha sido posible, a mi familia que siempre ha sido mi apoyo en todo momento, gracias a ellos podré terminar esta etapa de mi vida de la mejor manera, me impulsan a ser cada día mejor persona y de ahora en adelante un mejor profesional.



Arnaldo Calderón

AGRADECIMIENTOS

El principal agradecimiento a Dios, quien me ha guiado y me ha dado la fortaleza para seguir adelante y conseguir el título de INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO.

Agradezco;

A nuestra directora, Karina Torres. Sin usted, sus virtudes y su paciencia este trabajo no lo hubiésemos logrado tan fácil.

A nuestro asesor, Paul Arias. Por sus conocimientos brindados y su disposición en todo el proceso.

A mis papás, Alberto Castillo y Socorro de Luque, ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, siempre han sido mis mejores guías de vida.

A todos los colegas que hicieron parte del proceso, en especial a Greis Arroyo por su amistad, colaboración y apoyo desde el primer día.

Sin olvidar a cada familiar, amigos y personas que ya no hacen parte de mi entorno pero que en su momento fueron de gran apoyo, gracias.


Carlos Castillo

AGRADECIMIENTOS

El primer agradecimiento va dirigido a Dios, por permitir que todo sea posible, por darme las fuerzas y la veracidad de poder superar cada obstáculo presentado en el camino y hoy poder convertirme en INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO.

Agradezco;

A mis padres y mi familia, por estar presente en todo momento y recibir su apoyo incondicional a lo largo de todo este tiempo, sus esfuerzos los cuales permitieron que saliera adelante e inculcándole valores muy valiosos.

A mis amigos, que se convirtieron en una pieza fundamental, formando un gran equipo y apoyándonos en todo momento.

Por último, a los docentes los cuales me guiaron a lo largo de mi carrera por el mejor camino.


Arnaldo Calderón

RESUMEN

El desarrollo de modelos matemáticos han ayudado a explicar comportamiento sociales, económicos y ambientales, para este caso, la construcción de un modelo de combustible de la vegetación del Parque Natural Regional Los Besotes se convierte en fundamental para la toma de decisiones y la gestión del territorio, por lo cual, esta investigación se centró en desarrollarlo mediante imágenes satelitales de la plataforma Landsat 7 ETM+ C2 L1, datos del periodo 2011 a 2020, con el cual se obtuvieron dos modelos de combustibles, resaltando el constituido con los indicadores EVI de Jung, SAVI y ARVI, ya que poseen características atípicas con la morfología del terreno y consideran variables físicas externas en sus fórmulas. Los modelos fueron predichos a una probabilidad inferior a Alpha ($p\text{-value} < 0,05$), lo que indica una excelente predicción de la combustión vegetal.

Palabras Claves: Modelo Matemático, Indicadores Vegetativos, Combustible, EVI, SAVI, ARVI.

ABSTRACT

The development of mathematical models have helped to explain the social, economic and environmental behavior, in this case, the construction of a fuel model of the vegetation of the Los Besotes Regional Natural Park becomes essential for decision-making and management of the territory, therefore, this research focused on developing it through satellite images of the Landsat 7 ETM+ C2 L1 platform, data from the period 2011 to 2020, with which two fuel models were obtained, highlighting the armed with Jung's EVI indicators , SAVI and ARVI, since they have atypical characteristics with the morphology of the terrain and considering external physical variables in their formulas. The models were predictive at a probability lower than Alpha ($p\text{-value} < 0.05$), which indicates an excellent prediction of plant combustion.

Key Words: *Mathematical Model, Vegetative Indicators, Fuel, EVI, SAVI, ARVI.*

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	19
3. OBJETIVOS	20
3.1. OBJETIVO GENERAL	20
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
4. MARCO REFERENCIAL.....	21
4.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
4.2. MARCO TEÓRICO.....	23
4.2.1. Incendios Forestales.....	23
4.2.1.1. Principios Básicos Del Fuego.	23
4.2.1.2. Factores Que Intervienen En El Comportamiento Del Fuego.	23
4.2.1.3. Tipos De Incendios Forestales	24
4.2.2. Indicadores Vegetativos.....	24
4.2.2.1. Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI).....	25
4.2.2.2. Índice De Vegetación Mejorado (EVI).....	25
4.2.2.3. Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI).	25
4.2.2.4. Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI).....	26
4.2.2.5. Índice De Clorofila Verde (GCI).	26
4.2.2.6. Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI).	26
4.2.2.7. Índice De Calcinación Normalizado (NBR).	26
4.2.2.8. Índice De Diferencia De Calcinación Normalizado (dNBR).	27
4.3. MARCO CONCEPTUAL	27

4.4. MARCO CONTEXTUAL	32
4.5. MARCO LEGAL.....	34
5. MARCO METODOLÓGICO.....	47
5.1. LÍNEA Y SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN	47
5.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN	47
5.3. NIVEL DE INVESTIGACIÓN	47
5.4. POBLACIÓN DE ESTUDIO	47
5.5. MUESTRA POBLACIONAL	48
5.6. DESARROLLO METODOLÓGICO	48
5.6.1. Fase 1: Determinación De La Salud Ecosistémica Del Parque Natural Regional Los Besotes Mediante El Cálculo De Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI) Índice De Vegetación Mejorado (EVI), Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI), Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI), Índice De Clorofila Verde (GCI), Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI) Y El Índice De Calcinación Normalizado (NBR).....	48
5.6.1.1. Actividad 1: Obtención Y Especificación Del Insumo Satelital.....	48
5.6.1.2. Actividad 2: Clasificación De Los Índices	48
5.6.1.3. Actividad 3: Estandarización De Los Resultados.....	49
5.6.2. Fase 2: Construcción Del Modelo De Combustible Forestal Del Parque Natural Regional Los Besotes Mediante La Comparación De Los Indicadores NDVI, EVI, SAVI, ARVI, GCI, SIPI, NBR y dNBR	49
5.6.2.1. Actividad 4: Descripción De Las Coberturas Vegetales	49
5.6.2.2. Actividad 5: Análisis De Varianza De Los Indicadores Vegetativos.....	50
5.6.2.3. Actividad 6: Regresión Múltiple De Los Indicadores Vegetativos	50
5.6.3. Fase 3: Zonificación Del Modelo De Combustible Forestal Del Parque Natural Regional Los Besotes Para La Simulación De Propagación De Incendios Como Indicador De Alerta Temprana.....	50
5.6.3.1. Actividad 7: Mapas De Los Indicadores Vegetativos.....	50

5.6.3.2. Actividad 8. Mapas Del Modelo De Combustible.....	51
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	52
6.1. DETERMINACIÓN DE LA SALUD ECOSISTÉMICA DEL PARQUE NATURAL REGIONAL LOS BESOTES MEDIANTE EL CÁLCULO DE ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADO (NDVI) ÍNDICE DE VEGETACIÓN MEJORADO (EVI), ÍNDICE DE VEGETACIÓN AJUSTADO AL SUELO (SAVI), ÍNDICE DE VEGETACIÓN RESISTENTE A LA ATMÓSFERA (ARVI), ÍNDICE DE CLOROFILA VERDE (GCI), ÍNDICE DE PIGMENTACIÓN INSENSIBLE A LA ESTRUCTURA (SIPI) Y EL ÍNDICE DE CALCINACIÓN NORMALIZADO (NBR).....	52
6.1.1. Obtención Y Especificación Del Insumo Satelital.....	52
6.1.2. Clasificación De Los Índices	67
6.1.3. Estandarización De Los Resultados.....	73
6.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE COMBUSTIBLE FORESTAL DEL PARQUE NATURAL REGIONAL LOS BESOTES MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE LOS INDICADORES NDVI, EVI, SAVI, ARVI, GCI, SIPI, NBR Y dNBR	92
6.2.1. Descripción De Las Coberturas Vegetales	92
6.2.2. Análisis De Varianza De Los Indicadores Vegetativos.....	99
6.2.3. Regresión Múltiple De Los Indicadores Vegetativos	101
6.3. ZONIFICACIÓN DEL MODELO DE COMBUSTIBLE FORESTAL DEL PARQUE NATURAL REGIONAL LOS BESOTES PARA LA SIMULACIÓN DE PROPAGACIÓN DE INCENDIOS COMO INDICADOR DE ALERTA TEMPRANA	103
6.3.1. Mapas De Los Indicadores Vegetativos	103
6.3.2. Mapas Del Modelo De Combustible.....	119
7. CONCLUSIONES	121
8. RECOMENDACIONES.....	123
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Factores que intervienen en el comportamiento del fuego.	24
Tabla 2. Marco Legal – compendio de normativas aplicables al contexto de la investigación	34
Tabla 3. Clasificación de los valores de los indicadores vegetativos	49
Tabla 4. Información General de las Imágenes Satelitales	52
Tabla 5. Nociones de las Fórmulas de los Indicadores	68
Tabla 6. Composición de las Bandas y otras Variables	68
Tabla 7. Coberturas Vegetales del Parque Natural Regional Los Besotes	93

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tetraedro del Fuego.....	23
Figura 2. Parque Natural Regional Los Besotes	32
Figura 3. Localización del Parque Natural Regional Los Besotes.....	33
Figura 4. Sitio web EROS del USGS.....	53
Figura 5. Selección de las fechas de interés.....	53
Figura 6. Geovisor de localización del área de interés	54
Figura 7. Plataforma de Interés Seleccionada.....	54
Figura 8. Presentación de Imagen Satelital del Área de Estudio	55
Figura 9. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2011	56
Figura 10. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2012.....	57
Figura 11. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2013	58
Figura 12. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2014.....	59
Figura 13. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2015	60
Figura 14. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2016.....	61
Figura 15. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2017	62
Figura 16. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2018.....	63
Figura 17. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2019	64

Figura 18. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2020.....	65
Figura 19. Polígono del Parque Natural Regional Los Besotes.....	66
Figura 20. Cobertura Vegetal del Parque Natural Regional Los Besotes.....	67
Figura 21. Obtención del indicador GCI mediante implementación de la fórmula.....	69
Figura 22. Representación Extendida del GCI 2011	70
Figura 23. Resultado Equívoco del EVI	70
Figura 24. Resultado oportuno para el EVI	71
Figura 25. Clasificación de la Vegetación por Reflectividad	71
Figura 26. Reclasificación conforme a la Reflectividad de Vegetación	72
Figura 27. Clasificación de categorías manuales	73
Figura 28. Herramienta de Superposición Ponderada del GCI.....	74
Figura 29. Resultado con Bando Satelital	74
Figura 30. Corrección de Bando de la Imagen Satelital.....	75
Figura 31. Imagen Digital corregida en el Bando	76
Figura 32. GCI compilado para el área de estudio.....	76
Figura 33. GCI compilado y reclasificado para el área de estudio	77
Figura 34. Herramienta de Conversión de Imagen Ráster a Vectorial	77
Figura 35. Imagen Vectorial de GCI para el área de estudio.....	78
Figura 36. Categorización por Valores Únicos de la imagen vectorial	79
Figura 37. Resultado de la categorización por colores	79
Figura 38. Inicio de edición de entidades	80
Figura 39. Selección por atributos	81
Figura 40. Selección por código único de pixel.....	81
Figura 41. Atributos fusionados y estimados.....	82
Figura 42. Resultados de la Diferencia del Índice de Calcinación	82
Figura 43. Resultado de la Salud Ecosistémica del Parque Natural Regional Los Besotes	83
Figura 44. Resultado Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI).	84
Figura 45. Resultado Índice De Vegetación Mejorado (EVI).	84
Figura 46. Resultado Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI).....	85
Figura 47. Resultado Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI).	85
Figura 48. Resultado Índice De Clorofila Verde (GCI).....	86
Figura 49. Resultado Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI).....	86

Figura 50. Resultados Índice De Calcinación Normalizado (NBR).....	87
Figura 51. Indicador de Salud Vegetativa.....	87
Figura 52. Categoría del Índice Vegetativo (IV) para Plantas muy Sanas	88
Figura 53. Categoría del Índice Vegetativo (IV) para Plantas Medianamente Sana	88
Figura 54. Categoría del Índice Vegetativo (IV) para Plantas Enfermas	89
Figura 55. Categoría del Índice Vegetativo (IV) para Especies Vegetales en Deceso	89
Figura 56. Clase del NBR sin severidad	90
Figura 57. Clase del NBR Severidad Baja.....	90
Figura 58. Clase del NBR Severidad Moderada.....	91
Figura 59. Clase del NBR Severidad Alta	91
Figura 60. Resultado NBR Multianual	92
Figura 61. Categorías Raster de las unidades vegetativas	93
Figura 62. Análisis de Combustión del Bosque Ripario.....	94
Figura 63. Análisis de Combustión del Bosque Ripario sobre Laderas Fuertemente Escarpadas	95
Figura 64. Análisis de Combustión del Bosque Seco Tropical	95
Figura 65. Análisis de Combustión del Matorral Espinoso Tropical en Recuperación.....	96
Figura 66. Análisis de Combustión del Bosque Seco Tropical en Recuperación.....	96
Figura 67. Análisis de Combustión de Pastos con Árboles y Arbustos.....	97
Figura 68. Análisis de Combustión del Matorral Espinoso Tropical.....	97
Figura 69. Análisis de Combustión de Pajonales.....	98
Figura 70. Análisis de Combustión de los Pastos Manejados	98
Figura 71. Análisis de Combustión de los Varillales.....	99
Figura 72. ANOVA Global.....	100
Figura 73. ANOVA Indicadores EVI_2, SAVI y ARVI	100
Figura 74. ANOVA Indicadores NDVI, GCI y SIPI.....	101
Figura 75. Regresión Lineal Múltiple del Modelo de Combustible N°1	101
Figura 76. Regresión Lineal Múltiple del Modelo de Combustible N°2.....	102
Figura 77. Representación Geográfica del Índice de Vegetación Mejorado – EVI de Jiang del Parque Natural Regional Los Besotes.....	103
Figura 78. Representación Geográfica del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo – SAVI del Parque Natural Regional Los Besotes.....	104

Figura 79. Representación Geográfica del Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – ARVI del Parque Natural Regional Los Besotes.....	105
Figura 80. Representación Geográfica del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado – NDVI del Parque Natural Regional Los Besotes.....	106
Figura 81. Representación Geográfica del Índice de Clorofila Verde – GCI del Parque Natural Regional Los Besotes.....	107
Figura 82. Representación Geográfica del Índice de Pigmentación Insensible a la Estructura – SIPI del Parque Natural Regional Los Besotes.....	108
Figura 83. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2011-2012.....	109
Figura 84. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2012-2013.....	109
Figura 85. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2013-2014.....	110
Figura 86. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2014-2015.....	110
Figura 87. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2015-2016.....	111
Figura 88. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2016-2017.....	111
Figura 89. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2017-2018.....	112
Figura 90. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2018-2019.....	112
Figura 91. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2019-2020.....	113
Figura 92. NBR para cobertura de Bosque Ripario	113
Figura 93. NBR para cobertura de Bosque Ripario en Laderas Fuertemente Escarpadas.....	114
Figura 94. NBR para cobertura de Bosque Seco Tropical.....	114
Figura 95. NBR para cobertura de Matorral Espinoso Tropical en Recuperación	115
Figura 96. NBR para cobertura de Bosque Seco Tropical en Recuperación.....	115
Figura 97. NBR para cobertura de Pastos con Árboles y Arbustos.....	116

Figura 98. NBR para cobertura de Matorral Espinoso Tropical	116
Figura 99. NBR para cobertura de Pajonales	117
Figura 100. NBR para cobertura de Pastos Manejados	117
Figura 101. NBR para cobertura Varillales	118
Figura 102. Representación Geográfica del Índice Vegetativo de Salud Ecosistémica – IVSE del Parque Natural Regional Los Besotes.....	118
Figura 103. Modelo de Combustible (EVI, SAVI y ARVI)	119
Figura 104. Modelo de Combustible 2 (NDVI, GCI y SIPI).....	120



INTRODUCCIÓN

El Cambio Climático ha intensificado los efectos antrópicos que se manifiestan en afectaciones para el desarrollo de la biodiversidad en el planeta, los incendios forestales quizá son los eventos más catastróficos y permanentes porque les toma poco tiempo para lograr una considerable devastación. En referencia a esto, se han desarrollado investigaciones para tratar de gestionar eficientemente el riesgo del desastre y su puesta en práctica requiere primero de demostrar que tan efectivo y eficaz es planificar sobre estas.

Esta investigación trata la temática de construcción de modelo de combustible para el Parque Natural Regional Los Besotes, un espacio que ha sido devastado en muchas ocasiones por los desafortunados incendios provocados en sus límites que terminan alcanzando importantes sitios y puntos del valioso ecosistema que yace allí.

Para esto, se propuso evaluar mediante sistema de información geográfico los cambios de diez años de estudio desde 2011 hasta 2020, especialmente para los meses febrero y marzo, que presentan antecedentes de conflagración para este lugar.

Esta investigación fue desarrollada en tres objetivos específicos, el primero consto en Determinar La Salud Ecosistémica Del Parque Natural Regional Los Besotes Mediante El Cálculo De Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI) Índice De Vegetación Mejorado (EVI), Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI), Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI), Índice De Clorofila Verde (GCI), Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI) Y El Índice De Calcinación Normalizado (NBR).

Seguidamente se propuso Construir El Modelo De Combustible Forestal Del Parque Natural Regional Los Besotes Mediante La Comparación De Los Indicadores NDVI, EVI, SAVI, ARVI, GCI, SIPI, NBR y dNBR.

Por último, se logró Zonificar El Modelo De Combustible Forestal Del Parque Natural Regional Los Besotes Para La Simulación De Propagación De Incendios Como Indicador De Alerta Temprana.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los Bosques Secos Tropicales (BST) es uno de los ecosistemas más amenazados en Colombia, de 9 millones de hectáreas solo queda el 8% de esta (Rico, 2017), siendo las actividades agrícolas y ganaderas y el progresivo aumento de la línea urbanística los principales responsables de su reducción (Perfetti, Balcázar, Hernández, & Leibovich, 2013), pero también se resalta la gran responsabilidad que tienen los incendios forestales y las repercusiones ocasionadas sobre la biodiversidad (Nasi, Dennis, Meijaard, & Moore, 2001).

Los fuegos forestales pueden ser provocados u originados de manera natural, sin embargo, un porcentaje importante de los casos registrados de incendios son antrópicos (Díaz T.), por actividades frecuentes como lo son quemas sobre los ecosistemas para el control de plagas, fuegos no controlados para la preparación del suelo y la acumulación de residuos o basuras que facilitan la ignición vegetal entre otros (IDEAM, 2014); naturalmente se presenta la ignición vegetal a consecuencia de la combinación de biocombustibles por derivados aceitosos, el aire seco y los altos registros de temperatura (FEDEBIOCOMBUSTIBLES, 2007).

Para el año 2020 en Colombia, se registraron más de 1252 incendios forestales los cuales arrasaron con 86.485 hectáreas de vegetación (Rojas H., 2020). Para ese mismo año la ciudad de Valledupar se posicionó entre los primeros del ranking nacional de áreas con focos incendiarios en zonas protegidas y con características culturales, como lo es la región de Murillo y río Seco (CORPOCESAR, 2011).

El Parque Natural Regional (PNR) Los Besotes, ubicado al norte de Valledupar y localizado en las mencionadas regiones ha sufrido consecuencias devastadoras en su flora y fauna a consecuencia de incendios forestales cuyo origen se supone es producto de personas inescrupulosas (Diario El Pílon, 2016). En el año 2016 en este lugar se registró el incendio más devastador de la historia del departamento del Cesar, donde las llamas consumieron más de 2.000 hectáreas de BST y el costo de su atención para el control del fuego tuvo un valor equivalente a los trescientos cuarenta y ocho millones de pesos (CORPOCESAR, 2016).

Considerando las descripciones expuestas, se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué resultados se obtendrá al Evaluar el Modelo de Combustible Forestal del Bosque Seco Tropical del Parque Natural Regional Los Besotes – Valledupar, Cesar?



2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Aunque se han desarrollado estudios importantes que conciernen esta temática, la evaluación de los indicadores Calcinación Normalizado y de Diferencia de Calcinación Normalizada buscan dar profundidad a la problemática y entender mejor como se comporta el Bosque Seco Tropical ante la devastación de la expansión de fuego.

Para ello, se desarrollará cartografía temática con base al análisis multitemporal de imágenes satelitales lo que permitirá generar una representación gráfica legible y entendible de como el ecosistema boscoso del PNR Los Besotes ha sido resiliente ante las llamaradas provocadas, lo que sería un aporte significativo para el futuro de la gestión ante situaciones de emergencia de esta índole.

Con la producción de esta información se permite tener una herramienta o instrumento que ayude a la formulación de planes, programas y proyectos encaminados a prevenir la acción del fuego y mitigar oportunamente posibles focos incendiarios, puesto que los resultados ayudarían significativamente a deducir, mediante modelo de combustible maderable, la propagación del fuego de manera espacial.

Esta investigación se sustenta en que el departamento del Cesar y la región de Valledupar concentran los relictos de BST más importantes del país a causa de su gran biodiversidad y bienestar ambiental, por ende, es necesario evaluar indicadores que permitan mejorar las medidas de control establecidas.

El estudio es pertinente puesto que en estos momentos se han ido mejorando los mecanismos de control contra incendios forestales y los gobiernos locales se han venido reinventando para que los organismos de control puedan operar de manera correcta ante eventualidades de tal magnitud y este documento solo sería un paso importante para avanzar en el conocimiento del comportamiento de la propagación del fuego sobre maderables.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar Un Modelo De Combustible Forestal Del Bosque Seco Tropical Del Parque Natural Regional Los Besotes - Valledupar, Cesar.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar La Salud Ecosistémica Del Parque Natural Regional Los Besotes Mediante El Cálculo De Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI) Índice De Vegetación Mejorado (EVI), Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI), Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI), Índice De Clorofila Verde (GCI), Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI) Y El Índice De Calcinación Normalizado (NBR)

Construir El Modelo De Combustible Forestal Del Parque Natural Regional Los Besotes Mediante La Comparación De Los Indicadores NDVI, EVI, SAVI, ARVI, GCI, SIPI, NBR y dNBR

Zonificar El Modelo De Combustible Forestal Del Parque Natural Regional Los Besotes Para La Simulación De Propagación De Incendios Como Indicador De Alerta Temprana.



4. MARCO REFERENCIAL

4.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Vargas & Campos (2018) desarrollaron el Modelo de vulnerabilidad ante incendios forestales para el Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica, el objetivo de este estudio fue implementar un modelo de vulnerabilidad ante incendios forestales que permita definir áreas prioritarias para el control del fuego en el Área de Conservación Guanacaste (ACG). El modelo se diseñó integrando componentes ecológicos como calidad visual y biodiversidad, y componentes socioeconómicos como infraestructura y servicios ecosistémicos presentes en el ACG. De esta investigación se resalta la clasificación del riesgo para la ecología y la sociedad de acuerdo con la posibilidad de ocurrencia de incendios forestales, siendo un elemento cuya articulación ayudaría significativamente a la investigación para definir los parámetros a considerar.

Jiménez, Urrego & Toro (2016) desarrollaron la Evaluación Del Comportamiento De Incendios De La Vegetación En El Norte De Antioquia (Colombia): Análisis Del Paisaje, cuyo objetivo fue el de crear mapas de susceptibilidad bruta a incendios (SB), basada en características intrínsecas de vegetación, y susceptibilidad neta (SN), SB más variables climáticas y topográficas, a escala regional, pudiendo así determinar que la mayor área afectada por las igniciones estaba dominada por pastos con muy altas SB (27.19%) y SN (18.38%). Así confirman que los patrones espaciales de la susceptibilidad a incendios están relacionados fuertemente con los factores climáticos y topográficos. De este estudio se puede resaltar las variables que utilizaron y la metodología de construcción del modelo de combustible integrando la humedad, biomasa, altura y cobertura como los factores más relevantes para tener en cuenta al evaluar la probabilidad de ocurrencia de incendios.

Fernández (2016) desarrolló la investigación titulada Estimación de modelos de combustible basada en datos de sensores remotos, utilizando imágenes satelitales obtenidas de información radiométrica de LandSat 8, SPOT5 y LiDAR e inclusión de información complementaria en la provincia de Cuenca. Para esto se realizó la segmentación de la zona de estudio, revisaron e identificaron nodos conflictivos, validación de los modelos de combustibles mediante simulador Wildfire Analyst y por último comparar los modelos de combustibles descritos con el Mapa Forestal de España escala 1:50.000. De esta investigación

se destaca la clasificación de los modelos en las clases: incombustibles, combustibles de tipo pastizal, tipo pastizal-matorral, madera-sotobosque, hojarasca de bosque y restos de madera derribada, empleando la evaluación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI); así como el diagrama de procedimiento general para la estimación del modelo en cuatro fases como lo son: la definición de datos de partida, estimación del modelo, etapa de revisión y resultados y validación.

Díaz G-C., Juan J. (2015), desarrolló el Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Los indicadores que se evaluaron fueron el GNDVI (Verde NDVI), RVI (Ratio Vegetation Index), GVI (Green Vegetatio Index), NGRDI (Normalized Red Green Difference Index) y RG (índice relativo banda Rojo-Verde) y correlacionados con el NDVI a partir de imágenes aéreas tomadas con cámaras multiespectrales montadas sobre Sistemas aéreos no pilotados (UAS) y sistemas aéreos pilotados remotamente (RPAS), para desarrollar esta investigación se evaluó la utilidad del Sistema de Información Geográfico apropiado para el tratamiento de las imágenes, la obtención de las imágenes con colaboración de la empresa AereoConsult, continuando con el Estudio de precisiones, resoluciones, productividad y costos de la tecnología aplicada y la emisión de resultados de los posibles beneficios económicos para los agricultores. Mediante esta investigación se puede extraer la metodología de cómo se evaluaron e interpretaron los índices en comparación de cada uno de ellos, siendo una de las etapas del presente estudio.

Sánchez et. Al., desarrollaron (2000) la investigación titulada Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como Indicadores para la Asignación de Modelos de Combustible para la Estimación del Riesgo de Incendios en Andalucía, en la cual estimaron modelos para diez tipos de materia seca en el parque Natural de la Sierra Norte, para cada uno de los indicadores y modelos se le realizó el Análisis de Varianza (ANOVA) logrando determinar aquellas combinaciones que tenían mayor correlación en cuanto a comparación de sus medias teniendo mayor implicancia los modelos 4: Matorral o plantación joven muy densa de más de 2 m de altura;6: Matorral denso y verde de más de 1m de altura, con especies más inflamables que 5 o con restos de corta ;8: Hojarasca compacta en bosque denso de coníferas o frondosas ;9: Hojarasca esponjada poco compacta en bosque denso de coníferas o frondosas, para el NDVI; 2: Pasto fino seco y bajo que recubre completamente el suelo. Plantas leñosas dispersas que

cubren de uno a dos tercios de la superficie ;4,6,8,9, y 10: Arbolado más o menos denso (generalmente repoblaciones) con combustible muerto y ligero en el sotobosque. para el SAVI; 1: Arbolado más o menos denso (generalmente repoblaciones) con combustible muerto y ligero en el sotobosque. 4, 6, 8, ,9 y 10 para el PVI.

4.2. MARCO TEÓRICO

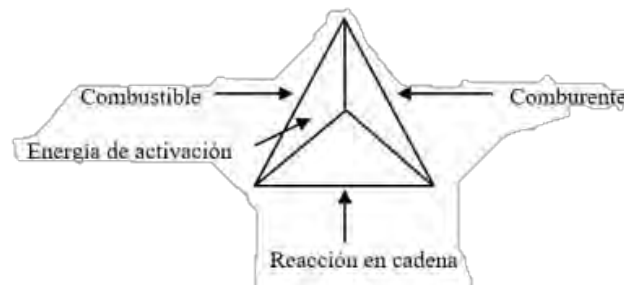
4.2.1. Incendios Forestales

Fuego sobre la cobertura vegetativa que puede ser de origen natural o antrópico y que se propaga sin control, que causa perturbaciones ecológicas afectando o destruyendo una extensión superior a 5.000 m², ya sea en zona urbana o rural, que responde al tipo de vegetación, cantidad de combustible, oxígeno, condiciones meteorológicas, topografía, actividades humanas, entre otras (UNGRD, 2019).

4.2.1.1. Principios Básicos Del Fuego.

Para que se genere fuego es necesario la existencia de tres elementos: un origen de calor, el combustible y el aire. Una vez causado la propagación del incendio, se ve influenciada por tres factores: el tipo de combustible, la climatología y la topografía (UNGRD, 2019).

Figura 1. Tetraedro del Fuego



Nota: Extraído de la página web de SIPECIF, artículo titulado: Problemática de los Incendios Forestales. (SIPECIF, 2007) citado por la TERCERA COMUNICACIÓN NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, “Conocer: El primer paso para adaptarse. Guía básica de conceptos sobre el cambio climático” 2016.

4.2.1.2. Factores Que Intervienen En El Comportamiento Del Fuego.

Una vez que un incendio forestal se ha iniciado, el comportamiento del fuego está determinado por tres factores: topografía, tiempo atmosférico (meteorología) y combustibles. A estos tres factores se les conoce como la gran triada (UNGRD, 2019).

Tabla 1. Factores que intervienen en el comportamiento del fuego.

Factores Permanentes	Condiciones Transitorias	Otros Elementos
Composición de los Combustibles	Temperatura	Fuentes de Calor
Especies Vegetales	Humedad Relativa	Temporada
Topografía	Velocidad y dirección del viento	Asentamientos
	Precipitación pluvial	

Nota: Extraído de La Cartilla “Lo que usted debe saber sobre incendios de Cobertura Vegetal” de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD, 2019).

4.2.1.3. Tipos De Incendios Forestales

Se caracterizan según la forma en que se propagan (EMOL, 2014):

Incendio de superficie: Son aquellos que se propagan sobre la superficie del suelo quemando la vegetación de poca altura, herbazales y los restos de los árboles secos como los troncos, las ramas caídas y la hojarasca.

Incendio de copas o aéreos: También se inician en la superficie, pero en este caso, las llamas o “fuego” avanzan primero sobre el nivel del suelo y se propagan por ascendencia vertical, es decir, quemando la vegetación dispuesta hacia arriba que sirve de combustible en escalera hacia las copas de los árboles. Son los más destructivos, peligrosos y difíciles de controlar, debido a que el fuego consume toda la vegetación.

Incendio de suelos o subterráneos: Son los que avanzan quemando la materia orgánica y las raíces existentes por debajo de la superficie del suelo. Son fuegos lentos y casi no desprenden humo, lo que los hace más difíciles de detectar y de apagar, de este modo se percibe como si aparentemente el fuego estuviera controlado o apagado ya que el fuego no se visualiza. La profundidad de combustión de un incendio subterráneo alcanza 1,5 metros

4.2.2. Indicadores Vegetativos

Mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite, es posible hacer un seguimiento de la evolución de las diferentes comunidades vegetales y de los cultivos agrícolas (Vivancos, Llastarri, Grau, & Vivancos, s.f.). Los Índices de Vegetación son combinaciones de las bandas espectrales registradas por los satélites de Teledetección, cuya función es realzar

la cubierta vegetal en función de su respuesta espectral y atenuar los detalles de otros componentes como el suelo, la iluminación, etc (Muñoz A., 2013).

Los Índices de Vegetación, son pues imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales. El resultado permite obtener una nueva imagen donde se destacan gráficamente determinados píxeles relacionados con parámetros de las coberturas vegetales: densidad, índice de área foliar y actividad clorofílica (Cuenca C., 2019).

4.2.2.1. Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI).

Se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja.

La fórmula de cálculo es la siguiente (Rouse, Haas, Schell, & Deering, 1974):

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS}$$

Dónde el NIR es la Banda de Infrarrojo Cercano y la VIS es la Banda de Visible – Rojo.

4.2.2.2. Índice De Vegetación Mejorado (EVI).

Intenta expresar los efectos atmosféricos calculando la diferencia de radiancia entre las bandas del Azul y Rojo y nos permite monitorizar el estado de la vegetación en caso de altas densidades de biomasa.

La fórmula de cálculo es la siguiente (Huete, Liu, Batchily, & Leeuwen, 1997):

$$EVI = G \times \frac{(NIR - Red)}{(NIR + C1 \times Red - C2 \times Blue + L)}$$

4.2.2.3. Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI).

Fue diseñado para minimizar las influencias del brillo del suelo. Se agrega el factor de ajuste del suelo L a la ecuación de NDVI para corregir los efectos del ruido del suelo (color del suelo, humedad del suelo, variabilidad del suelo a través de la región, etc.), que tienden a afectar a los resultados.

La fórmula de cálculo es la siguiente (Huete, 1998):

$$SAVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red + L)} \times (1 + L)$$

4.2.2.4. Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI).

La fórmula del ARVI está básicamente corregida sobre el NDVI para los efectos de dispersión atmosférica en la reflectancia de la banda Roja mediante el uso de mediciones en longitudes de onda de la banda Azul.

La fórmula de cálculo es la siguiente (Kaufman & Tanré, 1992):

$$ARVI = \frac{[NIR - (2 \times Red) + Blue]}{[NIR + (2 \times Red) + Blue]}$$

4.2.2.5. Índice De Clorofila Verde (GCI).

Se usa para estimar el contenido de clorofila de las hojas en varias especies de plantas. El contenido de clorofila refleja el estado fisiológico de la vegetación; disminuye en plantas estresadas y, por lo tanto, puede usarse como un evaluador de la vigorosidad de las plantas.

La fórmula de cálculo es la siguiente (Gitelson, Gritz, & Merzlyak, 2003):

$$GCI = \frac{NIR}{Green} - 1$$

4.2.2.6. Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI).

Es bueno para el análisis de la vegetación con la estructura variable del dosel. Estima la relación de carotenoides a clorofila: las señales de mayor valor de la vegetación estresada.

La fórmula de cálculo es la siguiente (Peñuelas, Filella, Biel, Serrano, & Savé, 1993):

$$SIPI = \frac{NIR - Blue}{NIR - Red}$$

4.2.2.7. Índice De Calcinación Normalizado (NBR).

Se utiliza para calcular o identificar cuantitativamente las áreas calcinadas. Este índice se focaliza en mediciones en las longitudes de onda NIR y SWIR. La vegetación saludable muestra una alta reflectancia en el NIR, mientras que las áreas de vegetación recientemente quemadas se reflejan altamente en el SWIR.

Este índice se ha vuelto especialmente instrumental en los últimos años a medida que las condiciones climáticas extremas (como la sequía de El Niño) causan un aumento significativo en los incendios forestales que destruyen la biomasa forestal (Key & Benson, 2006).

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

4.2.2.8. Índice De Diferencia De Calcinación Normalizado (dNBR).

Permite calcular la diferencia entre dos imágenes, antes y después del incendio, lo que nos da idea de la gravedad de la calcinación. La fórmula de cálculo es similar a la anterior, sin embargo, incluye imágenes satelitales posteriores o anteriores al incendio, realizando diferencias zonales de las áreas en el momento n respecto al momento m . (Key & Benson, 2006).

$$dNBR = NBR_n - NBR_m$$

4.3. MARCO CONCEPTUAL

Amenaza: Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales (Ley 1523 de 2012).

Amenaza natural: Peligro latente asociado con la posible manifestación de un fenómeno físico cuya génesis se encuentra totalmente en los procesos naturales de transformación y modificación de la tierra y el ambiente, como, por ejemplo: un terremoto, una erupción volcánica, un tsunami o un huracán y que puede resultar en la muerte o lesiones a seres vivos, daños materiales o interrupción de la actividad social y económica en general. Suelen clasificarse de acuerdo con sus orígenes terrestres, atmosféricos, o biológicos (en la biosfera) permitiendo identificar entre otras, amenazas geológicas, geomorfológicas, climatológicas, hidrometeorológica, oceánicas y bióticas (Lavell, 2007).

Amenaza socio-natural: Peligro latente asociado con la probable ocurrencia de fenómenos físicos de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre cuya existencia,

intensidad o recurrencia se relaciona con procesos de degradación o transformación ambiental y/o de intervención humana en los ecosistemas. Ejemplos de estos pueden encontrarse en inundaciones y deslizamientos resultantes de, o incrementados o influenciados en su intensidad, por procesos de deforestación y deterioro de cuencas; erosión costera por la destrucción de manglares; inundaciones urbanas por falta de adecuados sistemas de drenaje de aguas pluviales. Las amenazas socio-naturales se crean en la intersección del ambiente natural con la acción humana y representan un proceso de conversión de recursos naturales en amenazas. Los cambios en el ambiente y las nuevas amenazas que se generan con el Cambio Climático Global son el ejemplo más extremo de la noción de amenaza socio-natural. Las amenazas socio-naturales mimetizan o asumen las mismas características que diversas amenazas naturales (Lavell, 2007).

Bosque: Tierras que se extienden por más de 0,5 hectáreas dotadas de árboles de una altura superior a 5 metros y una cubierta de dosel superior al 10 por ciento, o de árboles capaces de alcanzar esta altura in situ. No incluye la tierra sometida a un uso predominantemente agrícola o urbano. (FAO, 2015)

Cortafuegos: Barreras naturales o artificiales construidas antes del incendio, limpias parciales o completamente de vegetación, hechas para prevenir el avance del fuego o la propagación de un incendio potencial. (ACHS, 1992)

Combustibles: Materiales capaces de entrar en combustión después de calentamiento previo. (ACHS, 1992).

Combustibles inflamables: Sustancias que emiten vapores a temperatura ambiental normal, los cuales pueden arder con el aire y en presencia de fuente calórica. (ACHS, 1992).

Combustión: Proceso químico que produce desprendimiento de calor y que forma, o no, llama. (ACHS, 1992).

Convección: Fenómeno físico que origina propagación de calor mediante movimiento de masas de gases y líquidos calientes que pierden densidad y ascienden provocando desplazamientos. (ACHS, 1992).

Conato (Incendio): Fuego de origen natural o antrópico que afecta o destruye una extensión inferior a 5.000 m², de cualquier tipo de cobertura vegetal, ya sea en zona urbana o rural.

Desastre: Es el resultado que se desencadena de la manifestación de uno o varios eventos naturales o antropogénicos no intencionales que al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en las personas, los bienes, la infraestructura, los medios de subsistencia, la prestación de servicios o los recursos ambientales, causa daños o pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, generando una alteración intensa, grave y extendida en las condiciones normales de funcionamiento de la sociedad, que exige del Estado y del sistema nacional ejecutar acciones de respuesta a la emergencia, rehabilitación y reconstrucción (Ley 1523 de 2012).

Exposición (elementos expuestos): Se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza (Ley 1523 de 2012).

Elementos expuestos: Se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza (Ley 1523 de 2012)

Evento: Es un fenómeno natural, socio-natural o tecnológico que actúa como el detonante de los efectos adversos sobre las vidas humanas, la salud y/o la infraestructura económica y social y ambiental de un territorio (UNGRD, 2017)

Eventos Natech: Los eventos de origen natural (terremotos, tsunamis, inundaciones, etc.) pueden desencadenar emergencias tecnológicas (incendios, fugas de materiales, explosiones, etc.), estos eventos se llaman eventos Natech por sus siglas en inglés Natural Hazard Triggering Technological Disasters. Las consecuencias de estos eventos son mucho más graves para las personas, el medio ambiente y la infraestructura, que las ocasionadas por un evento tecnológico o un evento natural (por separado) (UNGRD, 2018).

Flancos: Costados del incendio, formados generalmente en sentido paralelo a la dirección de avance principal. Presentan velocidad de propagación e intensidad calórica inferior respecto a la cabeza o frente de avance. (ACHS, 1992).

Flanquear un incendio: Establecer líneas de fuego paralelas a los flancos. Deberán irse juntando hasta fusionarse en la cabeza del incendio. (ACHS, 1992).

Foco: Áreas ardientes no reconocidas. También aplicable a cualquier sector del incendio que arde intensamente. (ACHS, 1992).

Fuego: Resultado de la combinación integrada de combustible, calor y oxígeno en una combustión. (ACHS, 1992).

Fuego secundario: Fuego iniciado a partir del incendio principal. (ACHS, 1992)
Incendio de la cobertura vegetal: Fuego sobre la cobertura vegetal de origen natural o antrópico que se propaga sin control, que causa perturbaciones ecológicas afectando o destruyendo una extensión superior a 5.000 m², ya sea en zona urbana o rural, que responde al tipo de vegetación, cantidad de combustible, oxígeno, condiciones meteorológicas, topografía, actividades humanas, entre otras.

Incendio aéreo o de copas: Incendio forestal propagado por las copas de los árboles (altura superior a 1,5 m del suelo). (ACHS, 1992).

Incendio forestal: Originado en zonas rurales cuando el fuego afecta la vegetación, propagándose libre y descontroladamente. (ACHS, 1992).

Incendio subterráneo: Incendio forestal propagando por el humus y material orgánico no incorporado al suelo del bosque. (ACHS, 1992).

Incendio superficial: Incendio forestal que se propaga consumiendo dosel arbustivo, herbáceo y hojarasca en el piso del bosque o terreno rural (entre 0 y 1,5 m del suelo). (ACHS, 1992).

Peligro: Fuente o situación con capacidad de producir daño en términos de lesiones, daños a la propiedad, daños al medio ambiente o una combinación de ellos. (ARL SURA, 2017).

Prevención de riesgo: Medidas y acciones de intervención restrictiva o prospectiva dispuestas con anticipación con el fin de evitar que se genere riesgo. Puede enfocarse a evitar o neutralizar la amenaza o la exposición y la vulnerabilidad ante la misma en forma definitiva para impedir que se genere nuevo riesgo. Los instrumentos esenciales de la prevención son aquellos previstos en la planificación, la inversión pública y el ordenamiento ambiental territorial, que tienen como objetivo reglamentar el uso y la ocupación del suelo de forma segura y sostenible. (Ley 1523 de 2012).

Quema: Fuego generado por el hombre, ya sea en zona urbana o rural, con el propósito de eliminar material vegetal o residuos sólidos no deseados. Las Corporaciones Autónomas Regionales son las únicas entidades que pueden expedir permisos para esta actividad (Ley 1523 de 2012).

Rastrojo: Se refiere aquella vegetación herbácea y arbustiva, que no incluyen cultivos agrícolas, generalmente derivados de la tala del bosque natural para la agricultura migratoria, incluye el sistema de barbecho forestal que corresponde a una clase intermedia entre el uso forestal y no forestal de la tierra (Fao, 1998).

Riesgo de desastres: Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural, tecnológico, bio sanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad (Ley 1523 de 2012)⁵

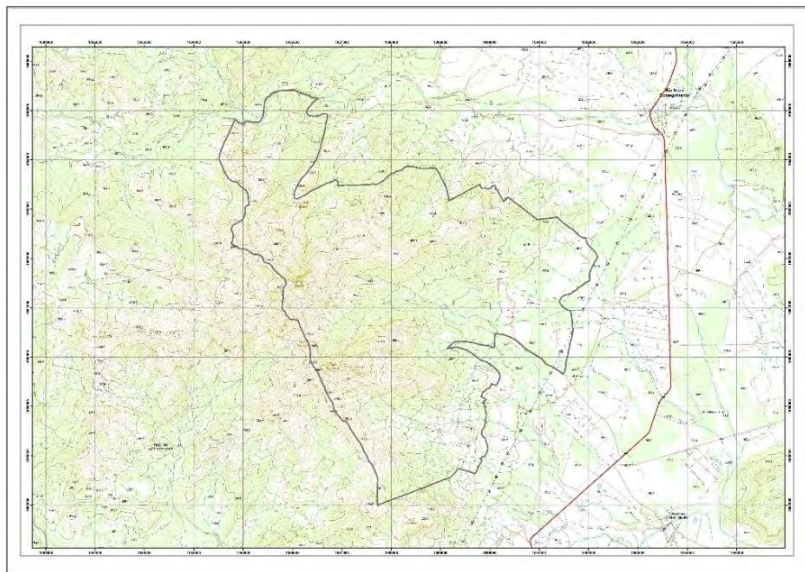
Riesgo: Es una combinación de la probabilidad de que ocurra una o más exposiciones o eventos peligrosos y la severidad del daño que puede ser causada por éstos. (ARL Sura, 2017).

Vulnerabilidad: Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos (Ley 1523 de 2012).

4.4. MARCO CONTEXTUAL

El Parque Natural Regional (PNR) Los Besotes, está ubicado a 10 kilómetros al norte de la ciudad de Valledupar, capital del departamento del Cesar; el cual está comprendido por un área de 4316,3 hectáreas de extensión que fue priorizada por la Corporación Autónoma Regional del Cesar para su eventual declaratoria como área natural protegida, debido tanto a la riqueza e importancia de las poblaciones de flora y fauna allí presentes (CORPOCESAR, 2011), las cuales son representativas de la ecología regional y en la cual se destaca la gran variedad de especies en aves que permiten el turismo ornitológico (aviturismo), este tipo de entornos priorizados cumplen funciones ambientales de prestación de bienes y servicios sin los cuales es inimaginable el bienestar y el desarrollo de la sociedad (Márquez, 2003).

Figura 2. Parque Natural Regional Los Besotes



Nota: Extraído del Estudio Básico Para La Declaratoria De Un Área Natural Protegida En La Región De Los Besotes (Municipio De Valledupar) Y Formulación De Su Plan De Manejo (2011)

Se encuentra ubicado sobre las primeras estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta, alcanzando su máxima altitud en el denominado “Cerro Boquinete” o “Cerro de Los Cóndores” a los 1680 msnm, lugar donde se ubica la divisoria de aguas entre la quebrada Aguas Blancas y el arroyo Sabana de las Minas. Su límite inferior alcanza aproximadamente a 190

msnm, más exactamente en el camino que conduce del Relleno Sanitario de Los Corazones a la finca conocida como “Buenavista”.

En su mayoría el área está cubierta por amplias zonas de “matorrales espinosos” y remanentes de “bosque seco tropical” en diferentes estados sucesionales, y en menor grado por relictos de bosque ripario original, enclavados en zonas de difícil acceso y en las márgenes de las diferentes corrientes hídricas que surcan el área, así como por praderas naturales de gramíneas que se ubican en su porción de mayor altitud.

Figura 3. Localización del Parque Natural Regional Los Besotes



Nota: Elaborado por los Autores (2021) a partir de la referencia presentada en el Estudio Básico Para La Declaratoria De Un Área Natural Protegida En La Región De Los Besotes (Municipio De Valledupar) Y Formulación De Su Plan De Manejo (2011)

Es importante mencionar que esta área se ubica al interior de la Reserva Forestal “Sierra Nevada de Santa Marta” establecida por la Ley 2 de 1959, y que el Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Valledupar y el artículo 92 del código de zonificación y normas urbanísticas de Valledupar la clasifica como “Suelo rural localizado dentro de la reserva forestal”, para su correspondiente ordenación por parte del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. No obstante, a esta disposición municipal, es oportuno observar que la propuesta de CORPOCESAR de establecer la zona de estudio como área natural protegida es totalmente pertinente, a pesar de la existencia de dicha Reserva Forestal.

4.5. MARCO LEGAL

Tabla 2. Marco Legal – compendio de normativas aplicables al contexto de la investigación

Normativa	Descripción / Título	Criterios de Aplicabilidad
CONPES 3947 de 2018	Estrategias De Actuación Y Coordinación Para Reducir Las Afectaciones Ante La Eventual Ocurrencia De Un Fenómeno De Variabilidad Climática: El Niño 2018 - 2019	El Plan Nacional de Prevención de Incendios Forestales y Restauración de Áreas Afectadas elaborado en el 2002 por la Comisión Nacional Asesora para la Prevención y Mitigación de Incendios Forestales, propuso dos subprogramas para (i) conocer el comportamiento de los diferentes tipos de cobertura y los ecosistemas frente a niveles de estrés a causa del verano y otros fenómenos (El Niño); y (ii) realizar un zonificación nacional, basada en la vulnerabilidad y amenaza a la ocurrencia de incendios forestales (Comisión Nacional Asesora para la Prevención y Mitigación de Incendios Forestales, 2002). Según el informe de la Contraloría delegada para el Medio Ambiente, sólo ocho de las treinta y tres corporaciones desarrollaron actividades relacionadas con la elaboración de mapas de vulnerabilidad o susceptibilidad frente a la ocurrencia de incendios forestales. De estas, cuatro no indicaron la escala de los estudios y el resto elaboraron

Normativa	Descripción / Título	Criterios de Aplicabilidad
		mapas en escalas 1:100.000, indicando poca precisión en la información y baja utilidad para los planes de prevención y mitigación de emergencias o desastres causados por la ocurrencia de incendios forestales.
Constitución Política de Colombia 1991	Carta Magna de Colombia: Derechos y Deberes de los colombianos.	<p>Artículo 79: “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano”, “es deber del estado proteger la diversidad e integridad del Ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.”</p> <ul style="list-style-type: none"> • Artículo 80: “El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del	Se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del

Normativa	Descripción / Título	Criterios de Aplicabilidad
	<p>medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.</p>	<p>medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Artículo 1: Principios Generales Ambientales. <p>7. El Estado fomentará la incorporación de los costos ambientales y el uso de instrumentos económicos para la prevención, corrección y restauración del deterioro ambiental y para la conservación de los recursos naturales renovables.</p> <p>9. La prevención de desastres será materia de interés colectivo y las medidas tomadas para mitigar los efectos de su ocurrencia serán de obligatorio cumplimiento.</p> <p>10. La acción para la protección y recuperación ambientales del país es una tarea conjunta y coordinada entre el Estado, la comunidad, las organizaciones no gubernamentales y el sector privado. El Estado apoyará la conformación de organismos no gubernamentales para la protección ambiental y podrá delegar en ellos algunas de sus funciones.</p>

Normativa	Descripción / Título	Criterios de Aplicabilidad
Ley 599 de 2000	Por la cual se expide el Código Penal	<p>Artículo 350: El que con peligro común prenda fuego en cosa mueble, incurrirá en prisión de uno a ocho años y multa de diez a cien SMLV (salarios mínimos legales mensuales vigentes). Si la conducta se realizare en inmueble o en objeto de interés científico, histórico, cultural, artístico o en bien de uso público, la prisión será de dos a diez años y multa de cien a quinientos SMLV. La pena señalada se aumentará hasta en la mitad si la conducta se cometiere en edificio habitado o en inmueble público, o en establecimiento comercial, industrial o agrícola, o en terminal de transporte, o en depósito de mercancías, alimentos, o en materias o sustancias explosiva, inflamables, asfixiantes o similares, o en bosque, recurso florístico o en áreas de especial importancia ecológica.</p>
Ley 1333 de 2009	Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones	<p>Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental.</p> <p>Artículo 1: El Estado es el titular de la potestad sancionatoria. En materia ambiental es a través del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, las corporaciones autónomas</p>

Normativa	Descripción / Título	Criterios de Aplicabilidad
		<p>regionales, las de desarrollo sostenible, las unidades ambientales de los grandes centros urbanos a que se refiere el artículo 66 de la Ley 99 de 1993, los establecimientos públicos ambientales a que se refiere el artículo 13 de la Ley 768 de 2002 y la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales, UAESPNN.</p> <p>Artículo 5: Se considera infracción en materia ambiental toda acción u omisión que viole las normas contenidas en el Decreto-ley 2811 de 1974, en la Ley 99 de 1993, en la Ley 165 de 1994, y en las demás disposiciones ambientales vigentes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Artículo 40: Se impondrán al infractor de las normas ambientales, de acuerdo con la gravedad de la infracción. Las sanciones van de acuerdo con la gravedad de la infracción que pueden ser multas diarias hasta por cinco mil SMLV, restitución de especímenes de especies de fauna y flora silvestre y/o trabajo comunitario según condiciones establecidas por la autoridad ambiental.

Normativa	Descripción / Título	Criterios de Aplicabilidad
Ley 1523 de 2012	Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones	<p>Artículo 1: La gestión del riesgo de desastres, en adelante la gestión del riesgo, es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible.</p> <p>Artículo 2: La gestión del riesgo es responsabilidad de todas las autoridades y de los habitantes del territorio colombiano. En cumplimiento de esta responsabilidad, las entidades públicas, privadas y comunitarias desarrollarán y ejecutarán los procesos de gestión del riesgo, entendiéndose: conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres, en el marco de sus competencias, su ámbito de actuación y su jurisdicción, como componentes del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.</p>

Normativa	Descripción / Título	Criterios de Aplicabilidad
		<p>Por su parte, los habitantes del territorio nacional, corresponsables de la gestión del riesgo, actuarán con precaución, solidaridad, autoprotección, tanto en lo personal como en lo de sus bienes, y acatarán lo dispuesto por las autoridades</p>
Decreto Ley 2811 de 1974		<p>Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Artículo 241: “Se organizarán medidas de prevención y control de incendios forestales y quemas en todo el territorio Nacional, con la colaboración de todos los cuerpos y entidades públicas, que darán especial prioridad a labores de extinción de incendios forestales.” • Artículo 242: “Toda persona está obligada a comunicar inmediatamente la existencia de un incendio forestal a la autoridad más próxima.” • Artículo 243: “Los propietarios, poseedores...están obligados a permitir el tránsito y la permanencia dentro de las fincas a

Normativa	Descripción / Título	Criterios de Aplicabilidad
		<p>los funcionarios, y a todas las demás personas que colaboren en la prevención o extinción del incendio.”</p> <ul style="list-style-type: none"> • Artículo 244: “Los propietarios, poseedores, tenedores y ocupantes de predios rurales están obligados a adoptar las medidas que se determinen para prevenir y controlar los incendios en esos predios.” • Artículo 245: “La administración deberá expedir la reglamentación que considere necesaria para prevenir y controlar incendios forestales y recuperar los bosques destruidos por éstos.” • Artículo 305: “Corresponde a los funcionarios impartir las órdenes necesarias para la vigilancia y defensa de los recursos naturales renovables y del ambiente.” • Artículo 306: “El incendio u otro caso semejante, que amenace perjudicar los recursos naturales renovables o el ambiente se adoptarán las medidas indispensables para evitar,

Normativa	Descripción / Título	Criterios de Aplicabilidad
		<p>contener o reprimir el daño, que durarán lo que dure el peligro.”</p> <ul style="list-style-type: none"> • Decreto 1608 de 1978 en Capítulo II Prohibiciones Generales, el Artículo 220k, numeral 1: <p>“Hacer quemas o incendios para acorralar, hacer huir o dar muerte a la presa. Dentro de esta prohibición se comprende emplear humo, vapores, gases o sustancias o medios similares para expulsar a los animales silvestres de sus guaridas, madrigueras, nidos o cuevas y provocar estampidas o desbandadas.”</p>
Decreto 948 de 1995	Se reglamentan, parcialmente la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9ª de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y protección de calidad del aire.	<p>Artículo 28: Queda prohibida la quema de bosque natural y de vegetación natural protectora en todo el territorio nacional.</p> <p>Artículo 29: Queda prohibido dentro del perímetro urbano de ciudades, poblados y asentamientos humanos, y en las zonas aledañas que fije la autoridad competente, la práctica de quemas abiertas. Las fogatas domésticas o con fines</p>

Normativa	Descripción / Título	Criterios de Aplicabilidad
		<p>recreativos estarán permitidas siempre que no causen molestia a los vecinos.</p> <p>Artículo 30: Las quemas abiertas en áreas rurales que se hagan para la preparación del suelo en actividades agrícolas, el descapote del terreno en actividades mineras, la recolección de cosechas o disposición de rastrojo, estarán controladas y sujetas a las reglas que al efecto establezca el Ministerio del Medio Ambiente”</p>
Decreto 2340 de 1997	Por el cual se dictan unas medidas para la organización en materia de prevención y mitigación de incendios forestales y se dictan otras disposiciones	<p>Se dictan unas medidas para la organización en materia de prevención y mitigación de incendios forestales y se dictan otras disposiciones.</p> <p>Artículo 9: Los departamentos y los municipios, distritos y áreas metropolitanas cuya población urbana sea superior a un millón (1.000.000) de habitantes, deberán crear comisiones para la prevención y mitigación de incendios forestales.</p> <p>La secretaría técnica de estas comisiones será ejercida en los departamentos por una corporación autónoma regional o de desarrollo sostenible y en los municipios, distritos y áreas</p>

Normativa	Descripción / Título	Criterios de Aplicabilidad
		metropolitanas cuya población urbana sea superior a un millón (1.000.000) de habitantes, por la autoridad ambiental.
Decreto 1076 de 2015	Decreto único reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible	Artículo 2.2.2.3.5.1. del Estudio de Impacto Ambiental (EIA). el estudio de impacto ambiental es el instrumento básico para la toma de decisiones sobre los proyectos, obras o actividades que requiere licencia ambiental y se exigirá en todo caso que de acuerdo con la ley y el presente reglamento se requiera. Este estudio deberá ser elaborado de conformidad con la metodología general para la presentación de estudios ambientales de que trata el artículo 14 del presente decreto y los términos de referencia expedidos para el efecto.
Resolución 1415 de 2012	Por la cual se actualiza y modifica el modelo de almacenamiento geográfico (Geodatabase) contenido en la Metodología General para la presentación de Estudios Ambientales adoptada en la resolución 1503 del 04 de agosto de 2010.	Artículo 3. Régimen de Transición. La información geográfica que se haya radicado antes de la entrada en vigor de la presente resolución continuará su trámite dentro del procedimiento administrativo, sin que se les exija a los interesados los términos y condiciones del Modelo de Almacenamiento Geográfico a que se refiere el presente acto administrativo, de manera adicional.

Normativa	Descripción / Título	Criterios de Aplicabilidad
		<p>La información geográfica que se haya realizado según lo dispuesto en las Resoluciones número 1415 de 2012 y 0188 de 2013, para los estudios ambientales (Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA) y Estudio de Impacto Ambiental (EIA)), Plan de Manejo Ambiental Específico (PMAE) e Informes de Cumplimiento Ambiental (ICA), y que no haya sido presentada no se registrarán por el presente acto administrativo, siempre y cuando estos estudios se presenten en un término máximo de seis (6) meses contados a partir de la entrada en vigencia del presente acto administrativo.</p>
Resolución 471 de 2020	<p>Por medio del cual se establecen las especificaciones técnicas mínimas que deben tener los productos de la cartografía básica oficial de Colombia.</p>	<p>Artículo 2. Ámbito de aplicación. Las especificaciones técnicas de los productos de la Cartografía Básica Oficial de Colombia, son de obligatorio cumplimiento para todo aquel que produzca cartografía básica para fines oficiales, así como para los gestores y operadores catastrales en el ejercicio de la gestión catastral.</p>

Normativa	Descripción / Título	Criterios de Aplicabilidad
		<p>La Cartografía Básica Oficial de Colombia puede ser producida por personas naturales, jurídicas, públicas p privadas, de acuerdo con lo previsto en esta resolución.</p> <p>Artículo 3. Alcance. Se definen como productos finales de la Cartografía Básica Oficial de Colombia los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Orto imágenes. b. Modelos digitales del terreno. c. Base de datos cartográfica (Vectorial)

Nota: Elaborado por los Autores (2021) a partir de las normativas referenciadas en la página web de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastre.



5. MARCO METODOLÓGICO

5.1. LÍNEA Y SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Conforme al acuerdo No. 003 del 08 de julio de 2021, la línea de investigación se denomina Sostenibilidad y Gestión Ambiental, y la sub línea de investigación se denomina Gestión integral de la biodiversidad y del patrimonio ambiental del Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad Popular del Cesar.

5.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es cualitativa, que, de acuerdo con los lineamientos de Presentación de Anteproyectos y Proyectos de grado del Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad Popular Cesar (UNICESAR), esta *“se fundamenta la metodología científica de la subjetividad y observación sin límite de control para recopilar datos no numéricos. En general, son todas aquellas distintas a la experimentación”* como también lo es Cuantitativa porque *“se fundamenta en la obtención de información a través de herramientas como encuestas, cuestionarios, etc. Y por lo general permite concluir una relación entre dos o más variables dentro de un público objetivo.”*

5.3. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Es de Nivel descriptivo y explicativo, debido a que los estudios descriptivos por lo general fundamentan las investigaciones correlacionales, las cuales a su vez proporcionan información para llevar a cabo estudios explicativos que generan un sentido de entendimiento y son altamente estructurados (H. Sampieri, 1994).

5.4. POBLACIÓN DE ESTUDIO

Esta corresponde a la clasificación de coberturas vegetativas y forestales establecida por la Corporación Autónoma del Cesar CORPOCESAR, la cual se toma como base para la formulación del modelo de combustible, cuyo alcance de estudio está definido para las zonas de vida (Holdridge, 1982) clasificadas en regiones latitudinales tropical a templada caliente, con pisos altitudinales hasta montano bajo y provincias de humedad semi-árido a sub húmedo, siendo correspondientes con Bosque Seco Espinoso y Bosque Seco Tropical, enmarcada de los límites geográficos de la jurisdicción del municipio de Valledupar, departamento del Cesar, Colombia.

5.5. MUESTRA POBLACIONAL

La muestra poblacional seleccionada es finita no paramétrica y a selección de los autores y se corresponde con una zona cuya área corresponde a 4316,3 hectáreas de extensión denominada Parque Natural Regional Los Besotes incluyendo la reserva forestal Para Ver (conocida popularmente como Ecoparque Los Besotes) y el Santuario de Vida Silvestre para Flora y Fauna Los Besotes, información expuesta en el Estudio Básico Para La Declaratoria De Un Área Natural Protegida En La Región De Los Besotes (Municipio De Valledupar) Y Formulación De Su Plan De Manejo (2011).

5.6. DESARROLLO METODOLÓGICO

5.6.1. Fase 1: Determinación De La Salud Ecosistémica Del Parque Natural Regional Los Besotes Mediante El Cálculo De Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI) Índice De Vegetación Mejorado (EVI), Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI), Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI), Índice De Clorofila Verde (GCI), Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI) Y El Índice De Calcinación Normalizado (NBR)

5.6.1.1. Actividad 1: Obtención Y Especificación Del Insumo Satelital

Descripción: la información para el desarrollo de esta investigación se obtuvieron de plataformas como el Earth Data del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), representativas de un lapso de estudio de diez años a partir del 2011 al 2020. Las imágenes descargadas tenían una resolución con sensor OLI y TIRS de 30 metros. La información complementaria y de referencia espacial del PNR Los Besotes se obtuvo mediante suministro de la Oficina de Subdirección de Ambiente de la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR) donde se especificó la cobertura vegetal, clasificación de los predios y otros elementos que integran su paisaje.

5.6.1.2. Actividad 2: Clasificación De Los Índices

Descripción: para calificar el estado de salud ecosistémica del PNR Los Besotes se realizó la implementación de los Índices NDVI, EVI, SAVI, GCI, SIPI, NBR y dNBR, conforme a las formulaciones matemáticas correspondiente a cada uno de estos y de las bandas satelitales correspondientes a cada uno de estos.

Tabla 3. Clasificación de los valores de los indicadores vegetativos

Clasificación	Valor del Indicador
Especie vegetal muerta u objetos inanimados	-1 – 0
Planta Enferma	0 – 0,33
Planta Medianamente Sana	0,33 – 0,66
Planta Muy Sana	0,66 – 1

Nota: Curso Teledetección Aplicada a la Agricultura de Precisión. Toribio, G. (2019)

5.6.1.3. Actividad 3: Estandarización De Los Resultados

Descripción: con los resultados obtenidos se realizó la calificación de los indicadores vegetativos y también una sumatoria ponderada de factores de los valores del NDVI, EVI, SAVI, GCI, SIPI y NBR para obtener un valor representativo de la salud ecosistémica del PNR Los Besotes.

$$MP = \frac{p_1X_1 + p_2X_2 + \dots + p_NX_N}{p_1 + p_2 + \dots + p_N}$$

Dónde, X_1, X_2, \dots, X_N son el conjunto de datos representativos de los indicadores vegetativos y p_1, p_2, \dots, p_N son los pesos representativos de cada indicador vegetativo.

5.6.2. Fase 2: Construcción Del Modelo De Combustible Forestal Del Parque Natural Regional Los Besotes Mediante La Comparación De Los Indicadores NDVI, EVI, SAVI, ARVI, GCI, SIPI, NBR y dNBR

5.6.2.1. Actividad 4: Descripción De Las Coberturas Vegetales

Descripción: De acuerdo con el Estudio Básico Para La Declaratoria De Un Área Natural Protegida En La Región De Los Besotes (Municipio De Valledupar) Y Formulación De Su Plan De Manejo de CORPOCESAR, se realizó investigación y descripción de las coberturas vegetales del mencionado lugar para poder tener un referente que ayudó a indagar respecto a la probabilidad de focos incendiarios y la densidad vegetativa. Las coberturas vegetales del PNR Los Besotes son:

- Bosque Ripario
- Bosque Ripario sobre laderas fuertemente escarpadas
- Bosque Seco Tropical

- Bosque Seco Tropical en Recuperación
- Matorral Espinoso Tropical
- Matorral Espinoso Tropical en Recuperación
- Pajonales
- Pasto con Árboles y Arbustos
- Pastos Manejados
- Varillales

Cada una de estas coberturas fue evaluada y caracterizada según el resultado de los indicadores vegetativos evaluados en la primera etapa.

5.6.2.2. Actividad 5: Análisis De Varianza De Los Indicadores Vegetativos

Descripción: se realizó el Análisis de Varianza (ANOVA) del Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI) Índice De Vegetación Mejorado (EVI), Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI), Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI), Índice De Clorofila Verde (GCI) y el Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI) y del Índice De Calcinación Normalizado (NBR) para realizar la comparación de media de los modelos (tratamientos).

5.6.2.3. Actividad 6: Regresión Múltiple De Los Indicadores Vegetativos

Descripción: se realizó una regresión múltiple del Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI) Índice De Vegetación Mejorado (EVI), Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI), Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI), Índice De Clorofila Verde (GCI) y el Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI) (como variables independientes) respecto al Índice De Calcinación Normalizado (NBR) (como variable dependiente), para definir el modelo de combustible del PNR Los Besotes.

5.6.3. Fase 3: Zonificación Del Modelo De Combustible Forestal Del Parque Natural Regional Los Besotes Para La Simulación De Propagación De Incendios Como Indicador De Alerta Temprana

5.6.3.1. Actividad 7: Mapas De Los Indicadores Vegetativos

Descripción: se hizo representación gráfica del Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI) Índice De Vegetación Mejorado (EVI), Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI), Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI), Índice De

Clorofila Verde (GCI) y el Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI) y del Índice De Calcinación Normalizado (NBR).

5.6.3.2. Actividad 8. Mapas Del Modelo De Combustible

Descripción: se hizo representación gráfica del Modelo de Combustible conforme a los cambios obtenidos con el Análisis de Varianza (ANOVA) y su análisis de ponderación superpuesta de los indicadores vegetativos presentados.



6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1. DETERMINACIÓN DE LA SALUD ECOSISTÉMICA DEL PARQUE NATURAL REGIONAL LOS BESOTES MEDIANTE EL CÁLCULO DE ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADO (NDVI) ÍNDICE DE VEGETACIÓN MEJORADO (EVI), ÍNDICE DE VEGETACIÓN AJUSTADO AL SUELO (SAVI), ÍNDICE DE VEGETACIÓN RESISTENTE A LA ATMÓSFERA (ARVI), ÍNDICE DE CLOROFILA VERDE (GCI), ÍNDICE DE PIGMENTACIÓN INSENSIBLE A LA ESTRUCTURA (SIPI) Y EL ÍNDICE DE CALCINACIÓN NORMALIZADO (NBR)

6.1.1. Obtención Y Especificación Del Insumo Satelital

Para el desarrollo de esta primera actividad se accedió al servicio de información digital satelital del Servicio Geológico de los Estados Unidos de América del cual se obtuvieron diez imágenes satelitales de la plataforma Landsat 7 ETM+ C2 L1, las cuales cuentan con la siguiente descripción informativa preliminar:

Tabla 4. Información General de las Imágenes Satelitales

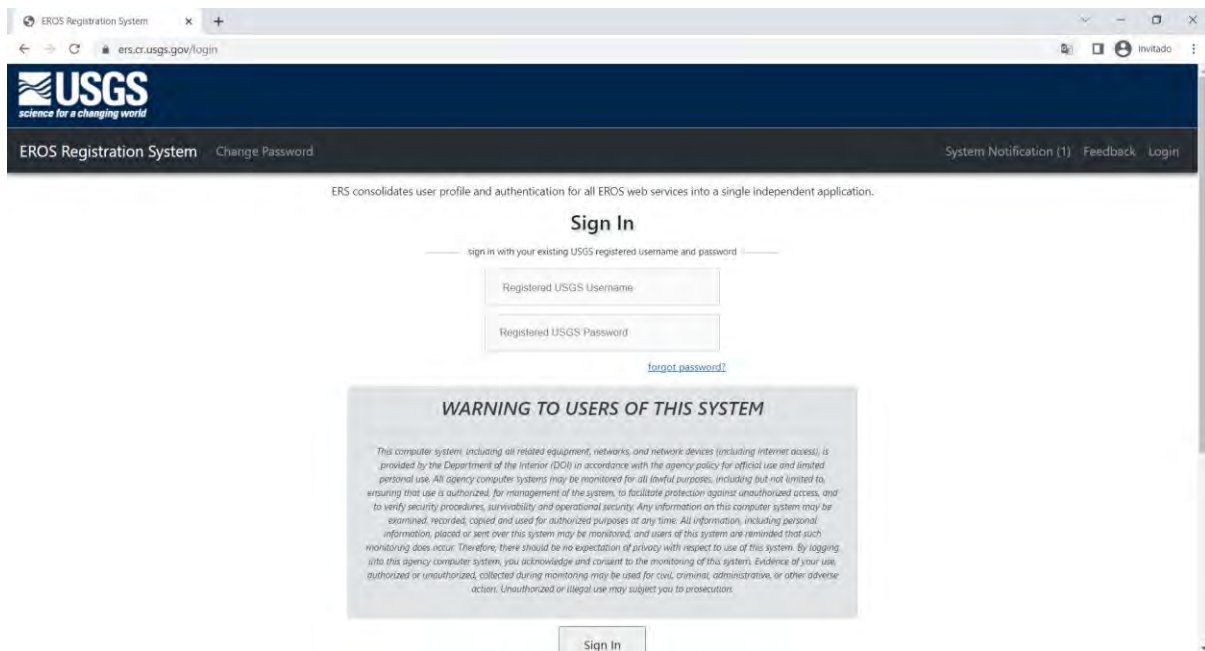
N.º	Fecha	Peso (KB)	ID
1	06 de marzo de 2011	360.315	LE07_L1TP_008053_20110306_20200910_02_T1
2	08 de marzo de 2012	349.113	LE07_L1GT_008053_20120308_20200909_02_T2
3	07 de febrero de 2013	356.521	LE07_L1TP_008053_20130207_20200908_02_T1
4	26 de febrero de 2014	350.988	LE07_L1TP_008053_20140226_20200906_02_T1
5	01 de marzo de 2015	345.126	LE07_L1TP_008053_20150301_20200905_02_T1
6	03 de marzo de 2016	359.313	LE07_L1TP_008053_20160303_20200902_02_T1
7	22 de marzo de 2017	336.147	LE07_L1TP_008053_20170322_20200831_02_T1
8	21 de febrero de 2018	362.078	LE07_L1TP_008053_20180221_20200830_02_T1
9	12 de marzo de 2019	345.129	LE07_L1TP_008053_20190312_20200826_02_T1
10	14 de marzo de 2020	367.789	LE07_L1TP_008053_20200314_20200822_02_T1

Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Y se hizo considerando los eventos de fuego más relevantes sucedidos en la zona de interés, que, por recomendación, se situaban entre febrero y marzo, meses más devastados por conflagraciones incendiarias y fuegos importantes.

Para la descarga de las imágenes satelitales se debe acceder a la página web del Centro de Observación y Ciencia de los Recursos Terrestres (EROS, por sus siglas en inglés), luego de proceder al registro se inicia sesión:

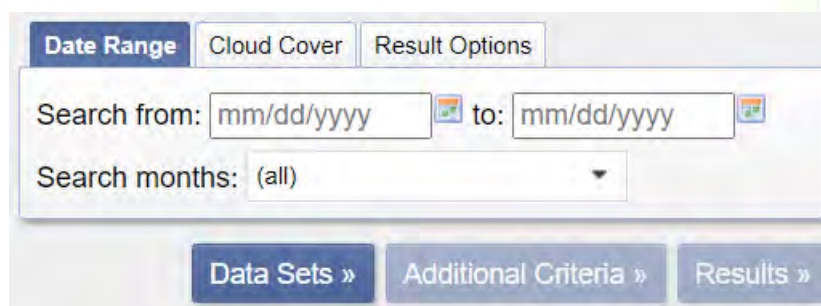
Figura 4. Sitio web EROS del USGS



Nota: Tomado por los Autores (2022) del EROS USGS

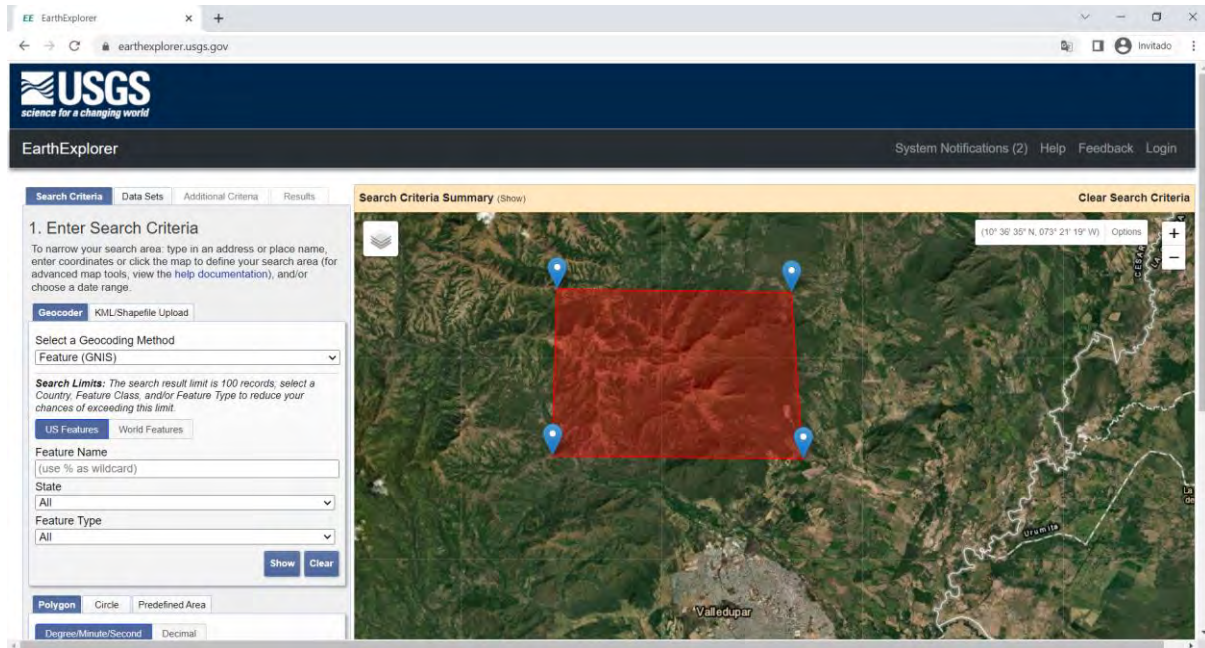
Al acceder a la página web se utiliza el geo visor en el cual se debe poner la localización de interés en el mapa, en este caso se va hacia la zona del Parque Natural Regional Los Besotes, que se encuentra localizado al norte de la ciudad de Valledupar en un enclave de la Sierra Nevada de Santa Marta. (ver Figura 6). Posteriormente, se definen las fechas de búsqueda:

Figura 5. Selección de las fechas de interés



Nota: Tomado por los Autores (2022) del EROS USGS

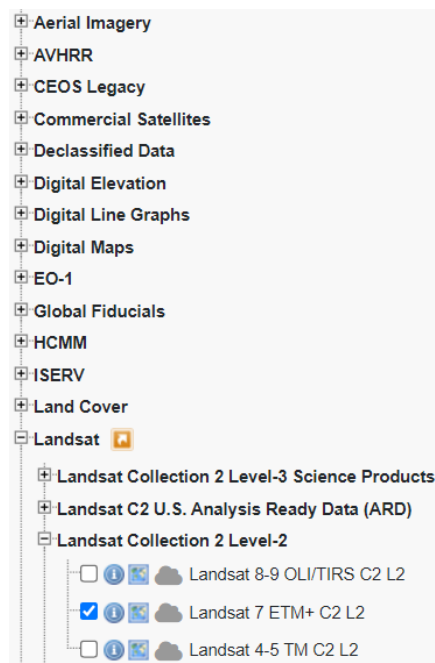
Figura 6. Geovisor de localización del área de interés



Nota: Tomado por los Autores (2022) del EROS USGS

Seguidamente de haber seleccionado el criterio espacial y temporal, se selecciona la plataforma de interés Landsat 7 ETM+ C2 L1:

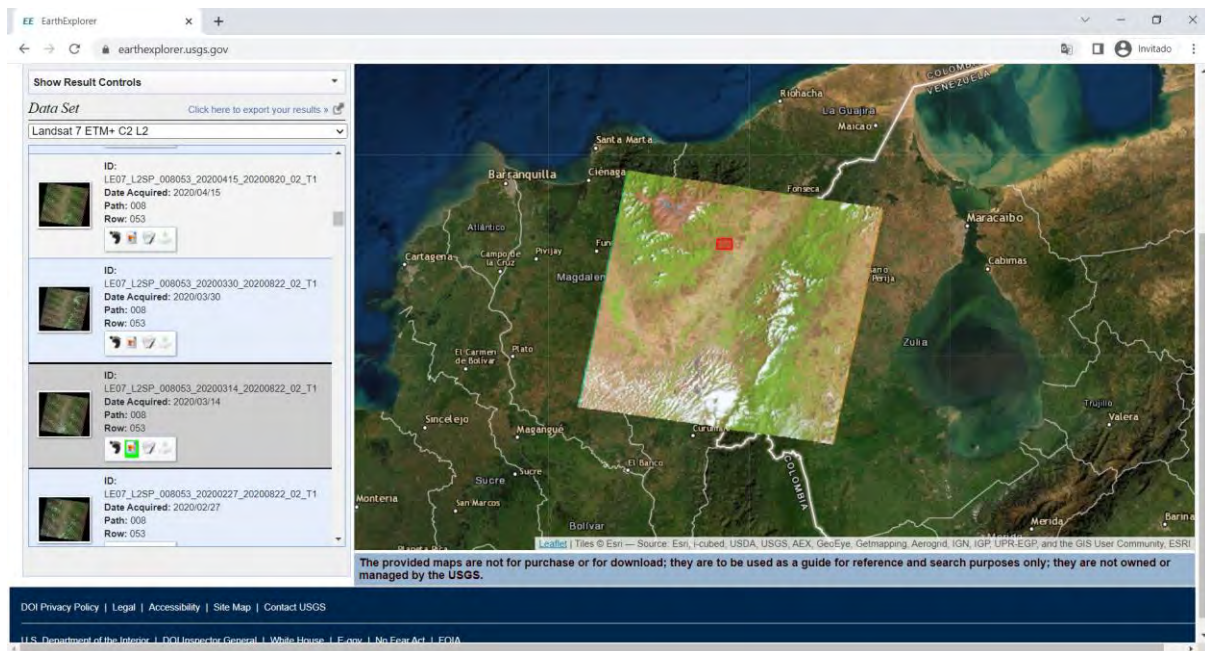
Figura 7. Plataforma de Interés Seleccionada



Nota: Tomado por los Autores (2022) del EROS USGS

Los resultados de aplicar estos filtros permiten tener una galería de imágenes satelitales de la zona seleccionada en varios momentos o tiempos. En la siguiente figura se presenta el resultado:

Figura 8. Presentación de Imagen Satelital del Área de Estudio



Nota: Tomado por los Autores (2022) del EROS USGS

El periodo de estudio seleccionado fue limitado por la ausencia de información referente a años anteriores al año 2011 y posteriores al año 2020, sin embargo, conforme a las investigaciones antecedidas a esta se puede manifestar que las muestras son suficientes para poder explicar la situación que se quiere desarrollar con esta investigación.

En fin, al descargar las imágenes se obtienen los archivos presentados en la Tabla 4, las cuales son representadas en las siguientes cartografías elaboradas mediante la combinación de las bandas 3 (Rojo), 2 (Verde) y 1 (Azul) de la imagen satelital, con la cual se obtiene un color natural, por lo tanto, el resultado es el mostrado a continuación:

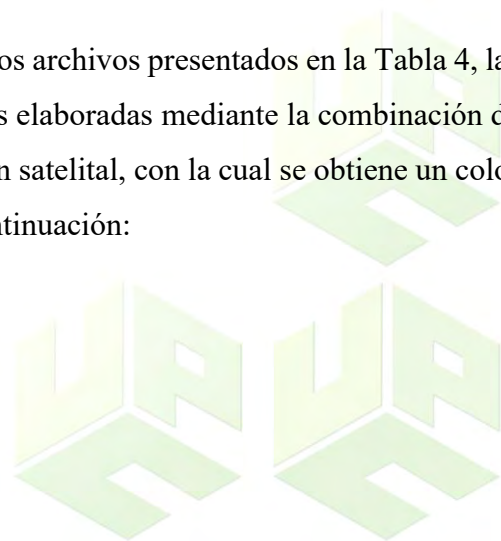
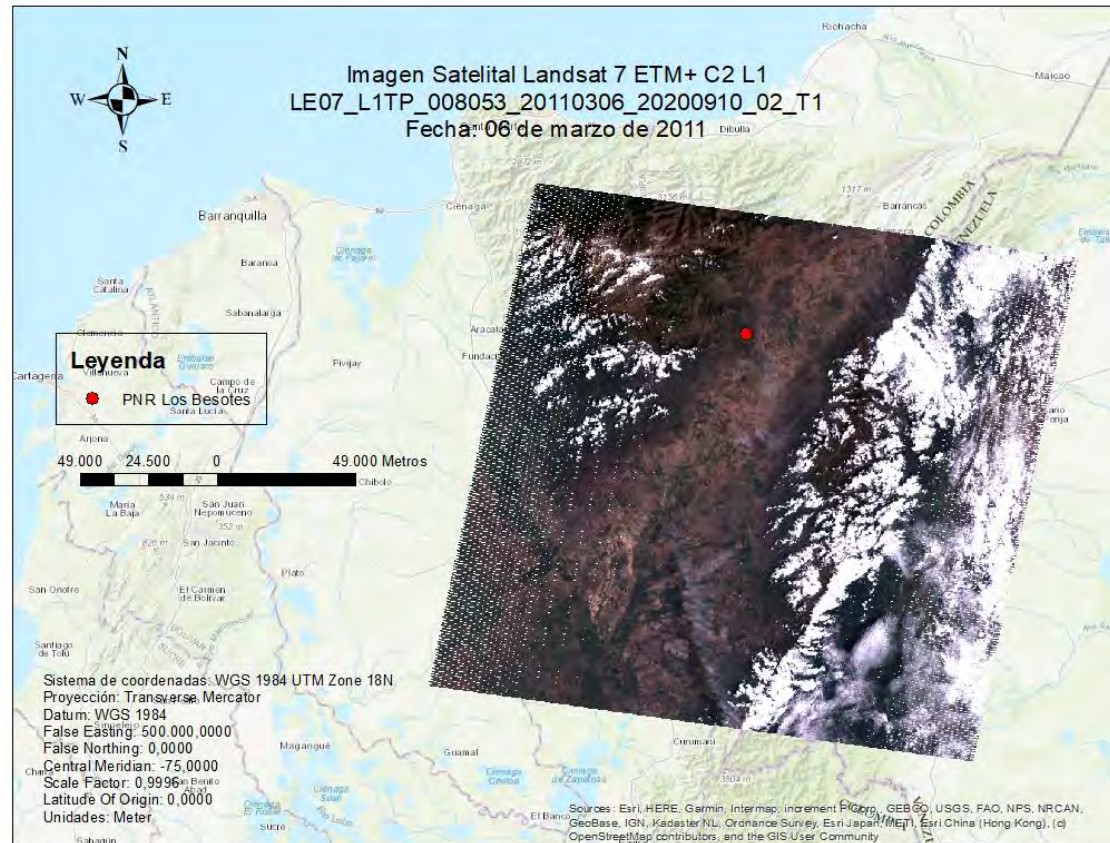
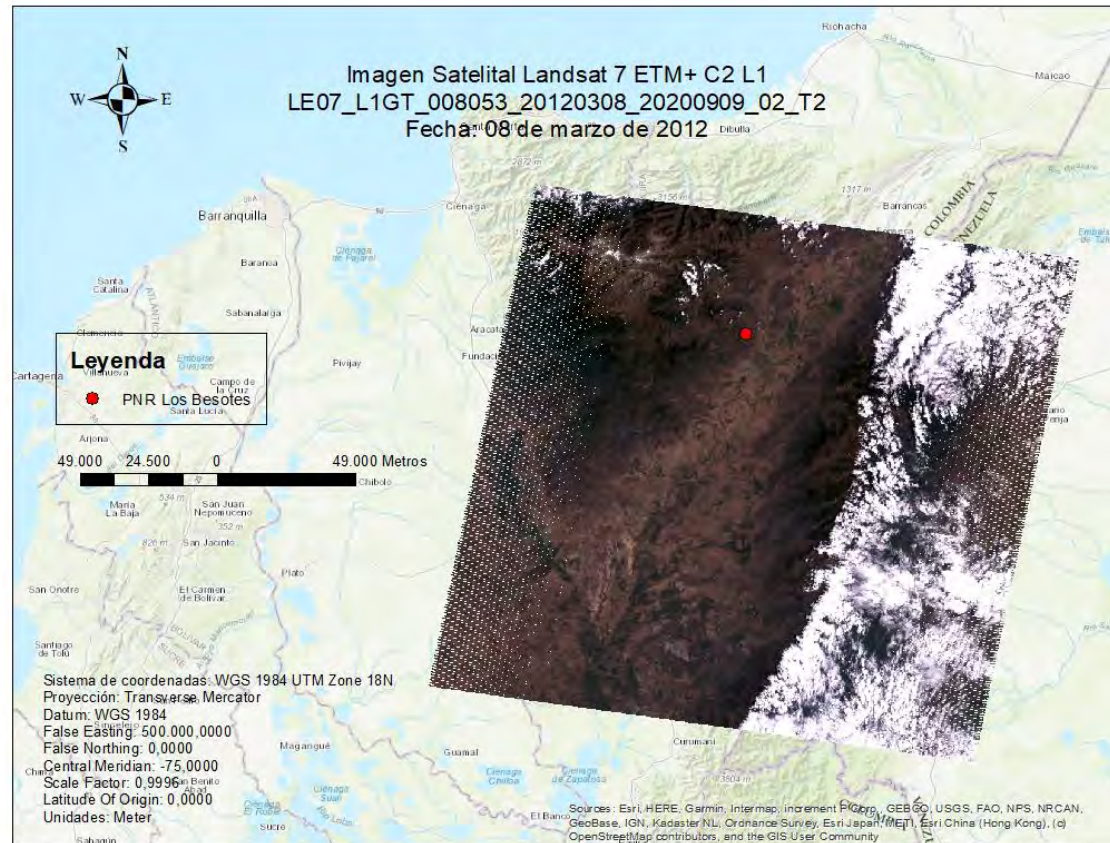


Figura 9. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2011



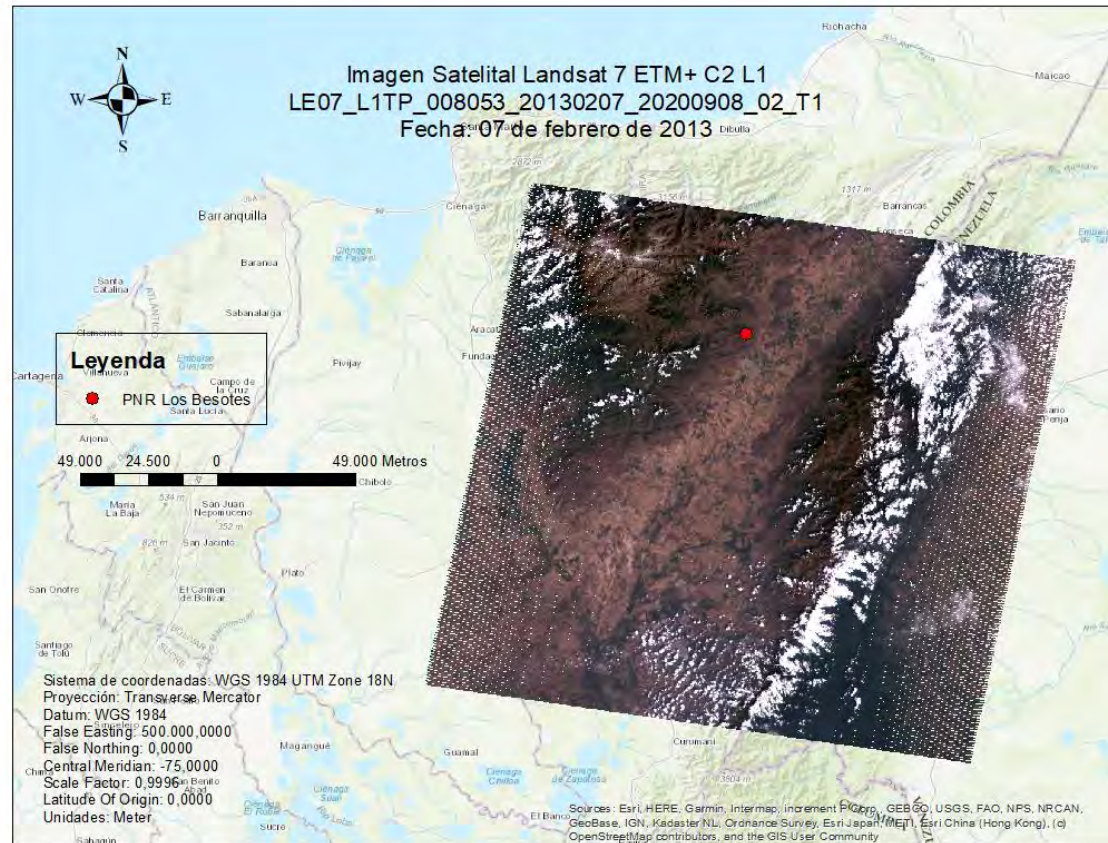
Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Figura 10. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2012



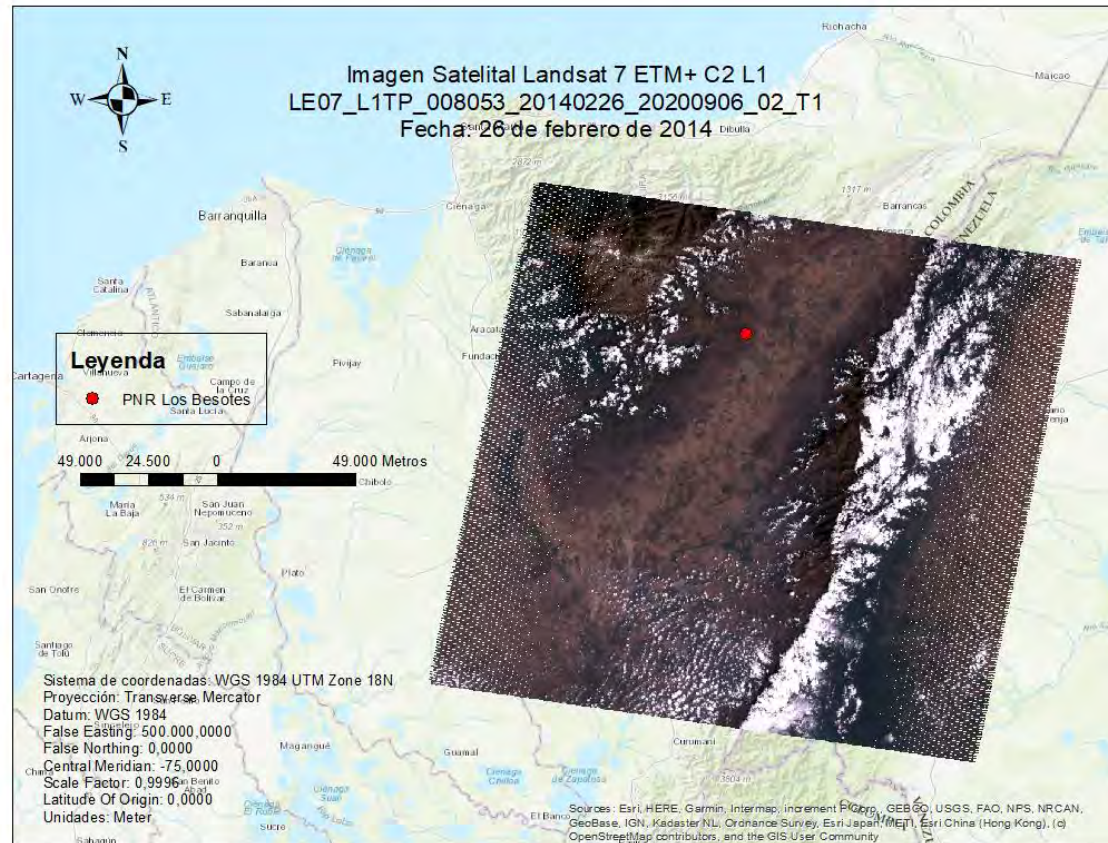
Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Figura 11. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2013



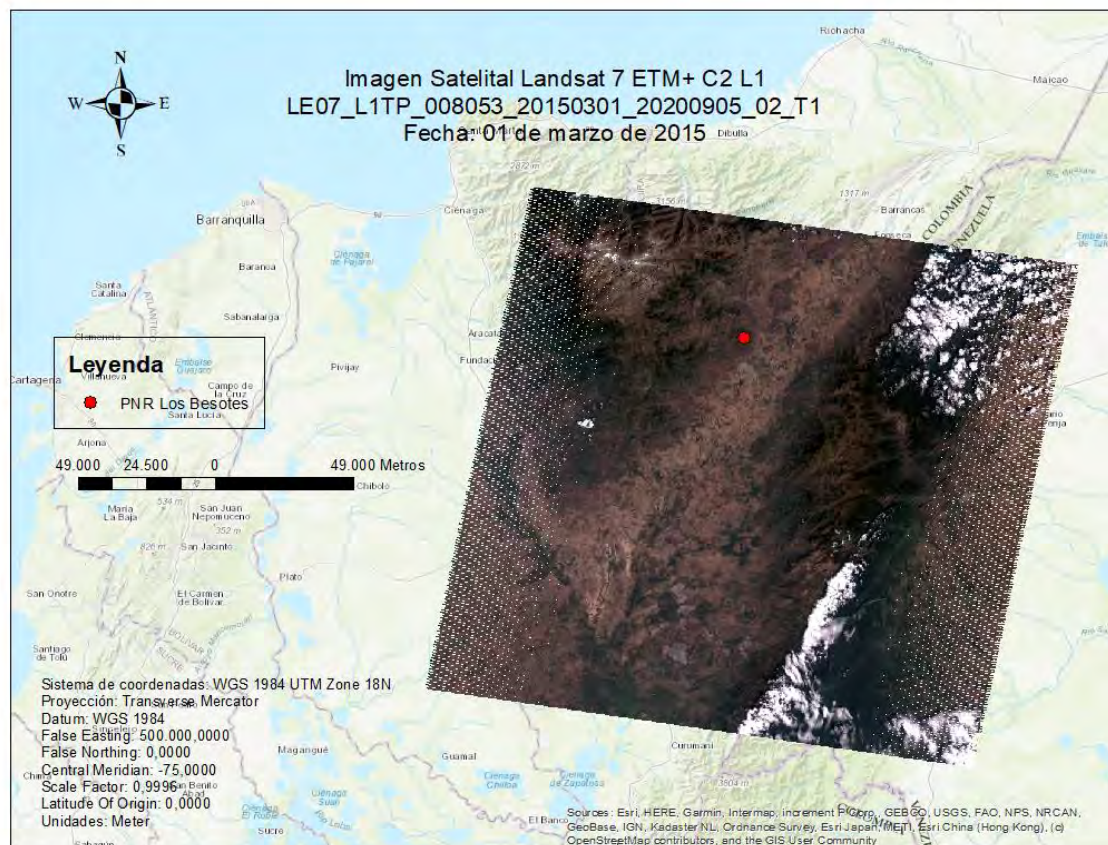
Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Figura 12. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2014



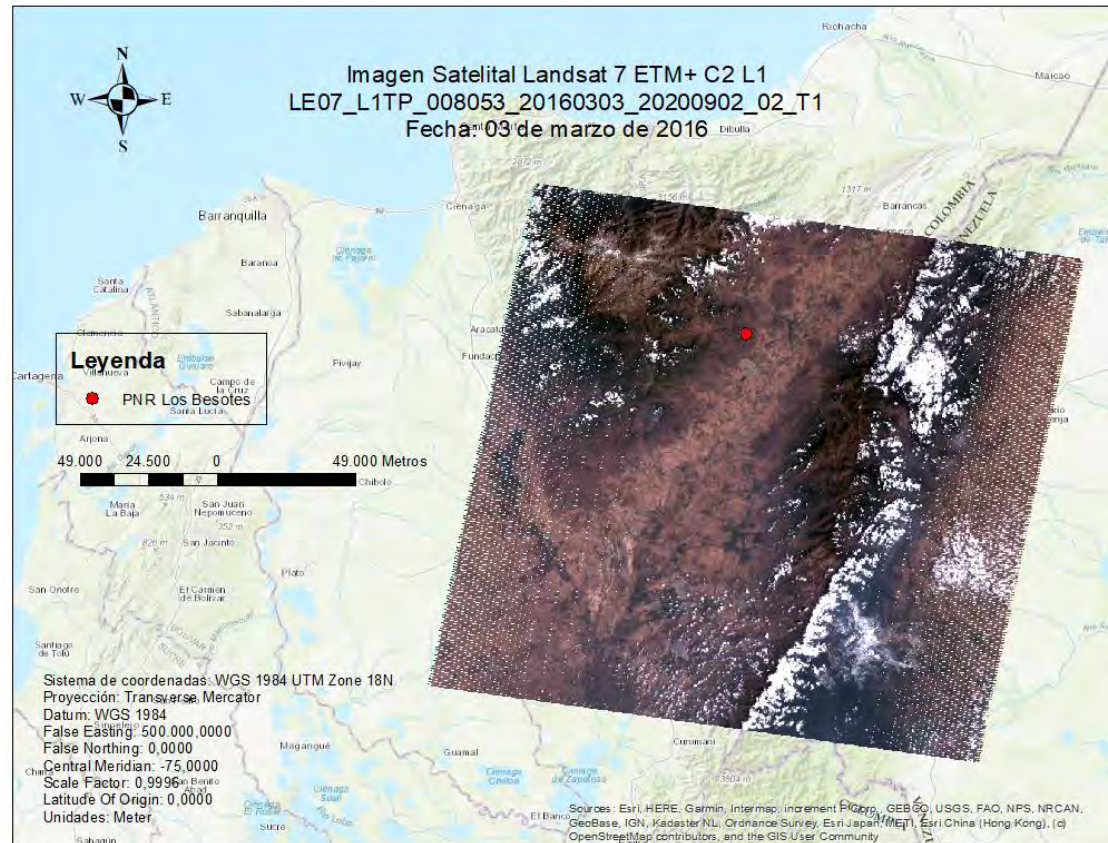
Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Figura 13. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2015



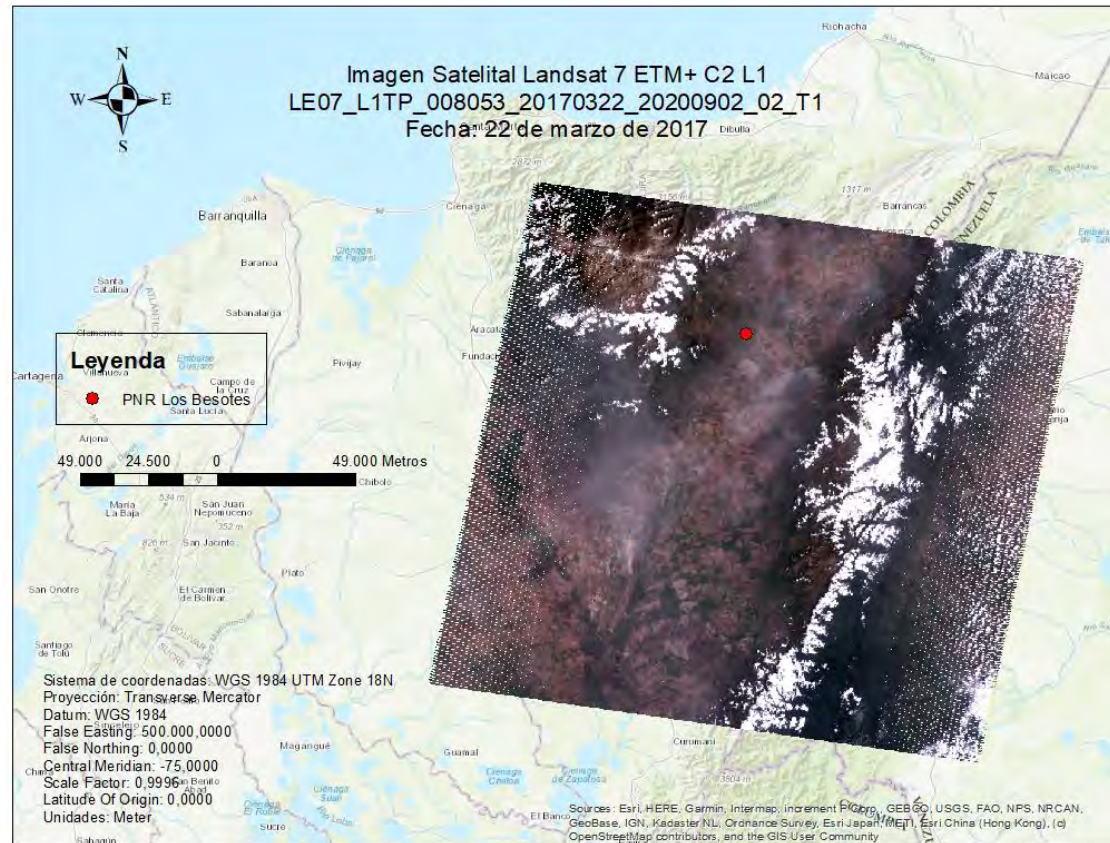
Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Figura 14. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2016



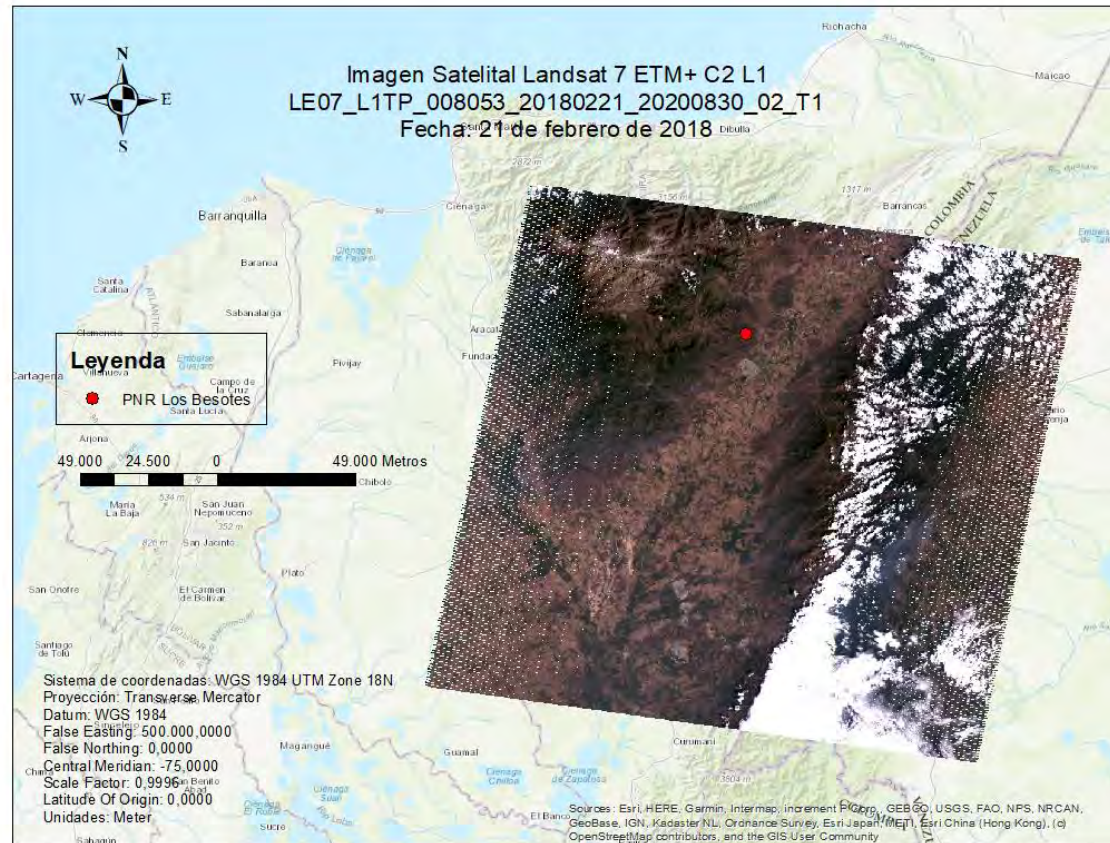
Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Figura 15. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2017



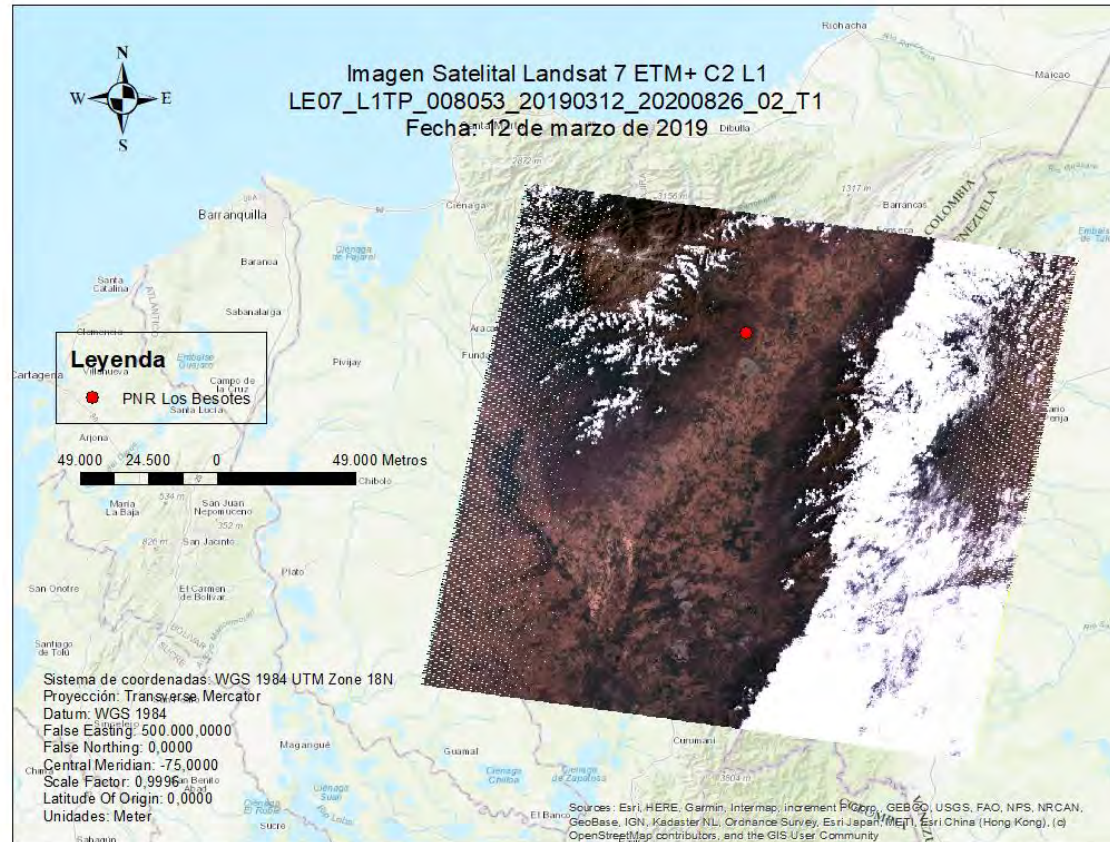
Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Figura 16. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2018



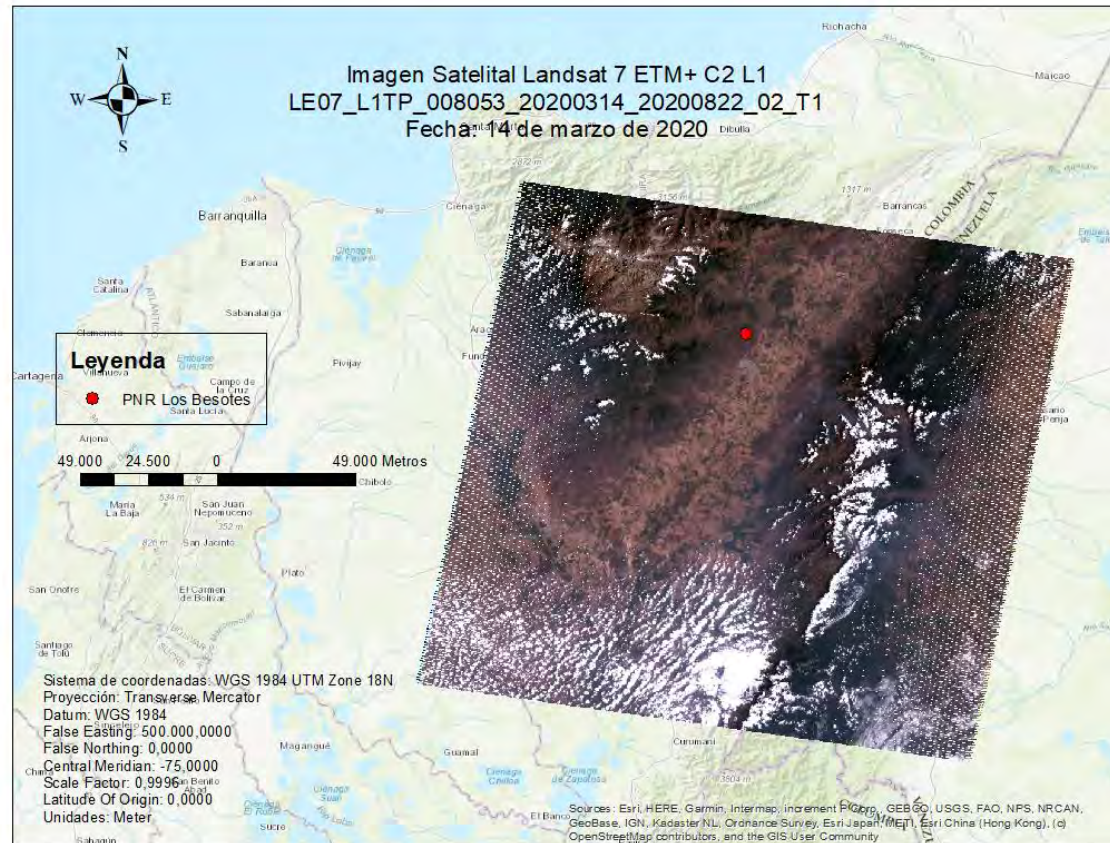
Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Figura 17. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2019



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Figura 18. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2020



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Por otra parte, se obtuvo el polígono del área de interés y la clasificación por coberturas vegetales, tal como se aprecia a continuación:

Figura 19. Polígono del Parque Natural Regional Los Besotes

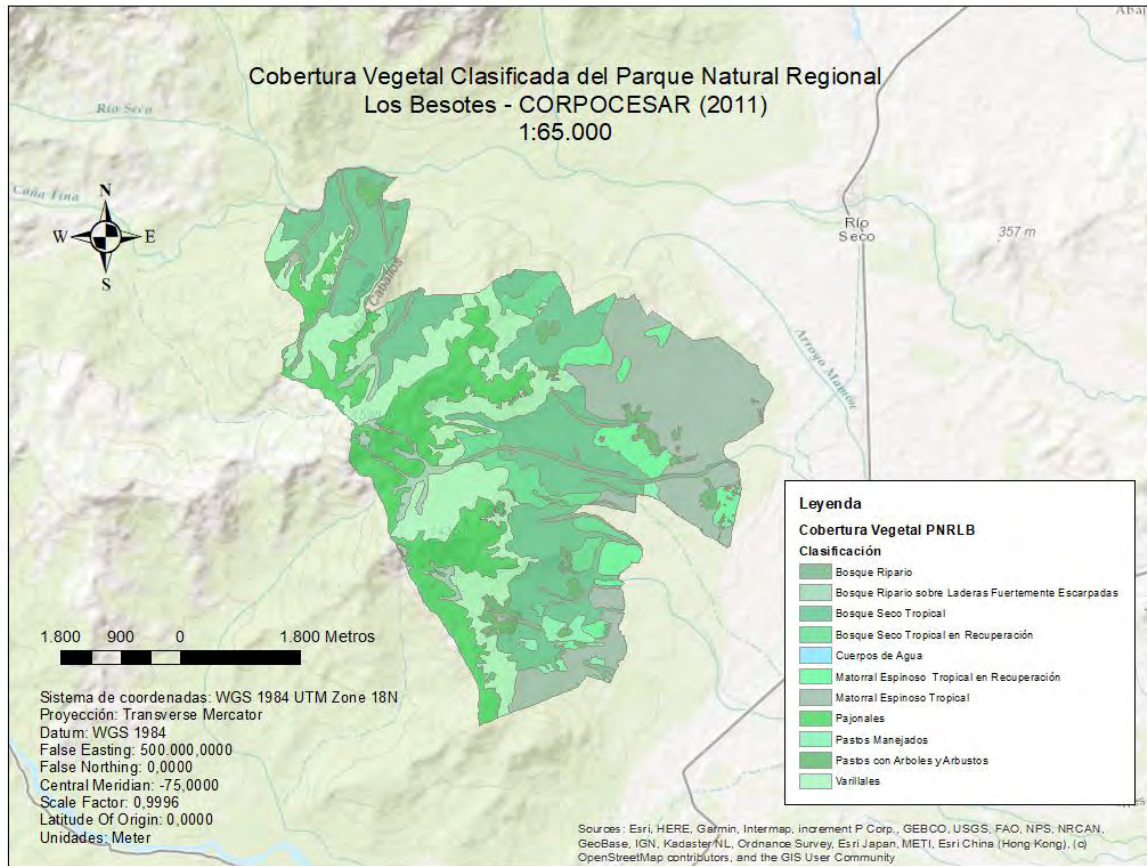


Nota: Tomado por los Autores (2022) de la Oficina de Subdirección de Ambiente de la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR)

Es de aclarar que todas las proyecciones de esta información se trabajaron en un datum geográfico del modelo WGS 1984 localizado en la UTM zona 18 Norte, franja en donde se encuentra localizada el área de interés y que, en parte, facilitó trabajar considerando que las imágenes descargadas, por naturaleza, proceden con el mismo sistema de proyección de coordenadas.

En la siguiente figura se presenta el mapa de coberturas vegetales clasificadas del Parque Natural Regional Los Besotes.

Figura 20. Cobertura Vegetal del Parque Natural Regional Los Besotes



Nota: Tomado por los Autores (2022) de la Oficina de Subdirección de Ambiente de la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR)

Con esto se da por completada la información necesaria para proceder a trabajar en el diseño del modelo de combustible.

6.1.2. Clasificación De Los Índices

Para la clasificación de los índices vegetativos y de combustión vegetal se emplearon las bandas 1 (azul) ,2 (verde) ,3 (rojo),4 (infrarrojo cercano) y 5 (infrarrojo de onda corta), que constituyen las imágenes satelitales del satélite Landsat 7 ETM+ C2 L1.

Como este procedimiento se desarrolló en ArcMap, las expresiones matemáticas expuestas en el marco teórico fueron expresadas en las nociones de escritura del Álgebra de Mapas del ArcTool Box de ArcMap.

Estos se ven así:

Tabla 5. Nociones de las Fórmulas de los Indicadores

N.º	Indic.	Fórmula
1	NDVI	$\text{Float}(B4 - B3) / \text{Float}(B4 + B3)$
2	EVI	$2.5 + (\text{Float}(B4 - B3) / (\text{Float}(B4) + \text{Float}(B3 * 6) - \text{Float}(B1 * 7.5) + 1))$ <i>No funcionó el primer método de A. Huete, K. Didan, T. Miura, EP Rodríguez, X. Gao, LG Ferreira (2002).</i> $2.5 + ((\text{Float}(B4 - B3) / (\text{Float}(B4) + \text{Float}(B3 * 2.4) + 1)))$ <i>Método de Jung (2008). Si funcionó.</i>
3	SAVI	$\text{Float}(B4 - B3) / ((\text{Float}(B4 + B3 + 0.5)) * (1.5))$
4	ARVI	$\text{Float}(B4 - (2 * B3) + B1) / \text{Float}(B4 + (2 * B3) + B1)$
5	GCI	$(\text{Float}(B4) / \text{Float}(B2)) - 1$
6	SIPI	$\text{Float}(B4 - B3) / \text{Float}(B4 - B1)$
7	NBR	$\text{Float}(B4 - B5) / \text{Float}(B4 + B5)$

Nota: Adaptado por los Autores, 2022.

Para mayor precisión de los datos se realizaron los cálculos utilizando números decimales, *Float*.

Las “B” presentadas las tablas anteriores es una sigla equivalente a “Banda”, sin embargo, se observan otras variables en juego, estas se explican en la siguiente tabla:

Tabla 6. Composición de las Bandas y otras Variables

N.º	Indic.	Composición de Bandas
1	NDVI	Composición de Bandas 4 y 3 para obtener NDVI
2	EVI	Composición de Bandas 4, 3 y 1 para obtener EVI con G=2,5; L=1; C1=6; C2=7,5
3	SAVI	Composición de Bandas 4 y 3 para obtener SAVI con L=0,5
4	ARVI	Composición de Bandas 4, 3 y 1 para obtener ARVI
5	GCI	Composición de Bandas 4 y 2 para obtener GCI
6	SIPI	Composición de Bandas 4, 3 y 1 para obtener SIPI
7	NBR	Composición de Bandas 5 y 4 para obtener NBR

Nota: Adaptado por los Autores, 2022.

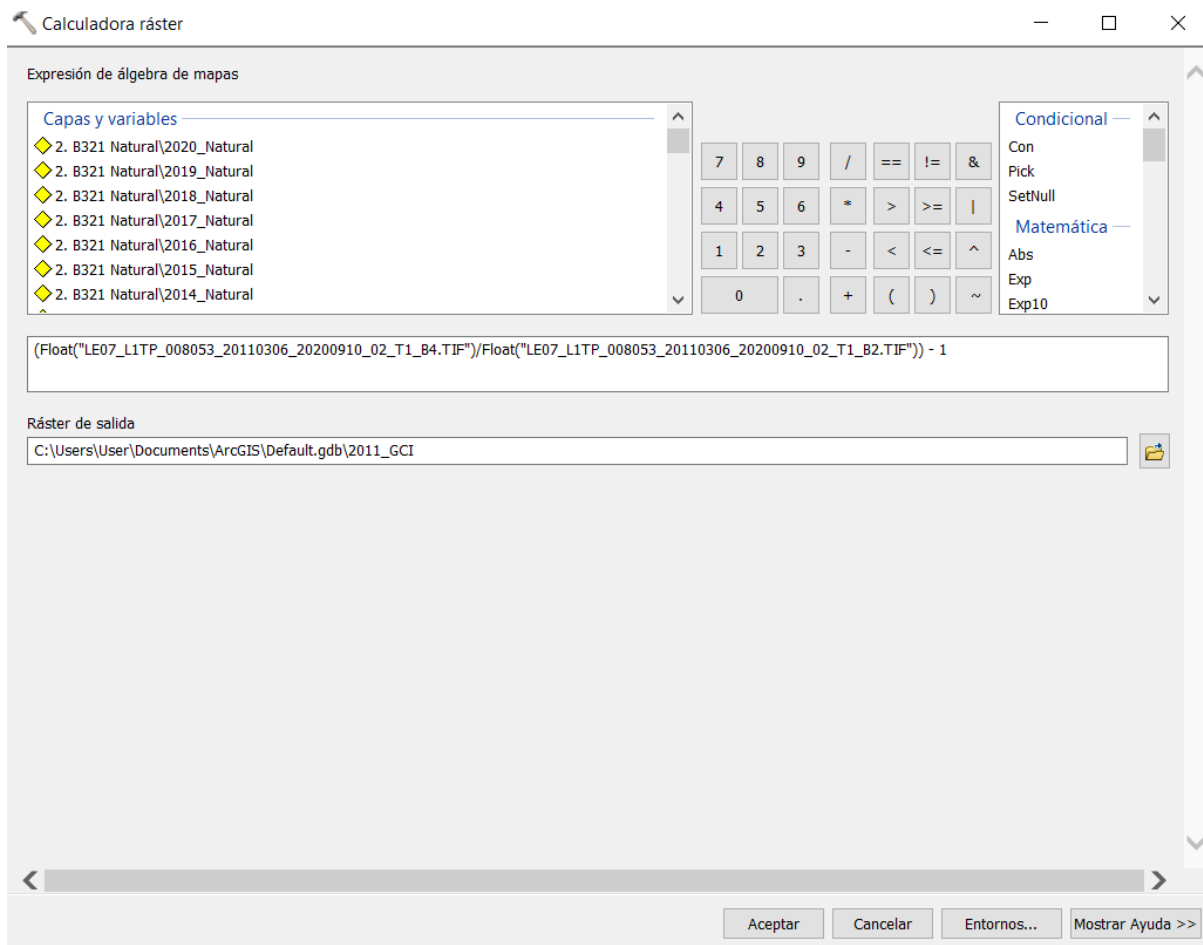
Los valores G, L, C1 y C2, son variables que implican criterios de inclinación y refracción, que son valores obtenidos experimentalmente por los autores de cada indicador.

Hay que tener en cuenta que para cada una de las imágenes que se compilan en los 10 años de estudio se realizó la obtención de los 7 indicadores presentados en las tablas anteriores, por lo tanto, se esperaba inicialmente obtener 70 imágenes, las cuales se compilan en una sola mediante una evaluación multicriterio de sumatoria ponderada que finalmente deriva en 8 indicadores que representan los cambios surtidos en la vegetación.

En este apartado se presenta un ejemplo para la clasificación del índice GCI (periodo 2011). Se agrega las bandas de los satélites para el GCI (Banda 4 y 2) utilizando el ArcCatalog.

Se accede a la calculadora del Álgebra de Mapas mediante el ArcTOOLBOX y se digita el código de cálculo utilizando la función Float para reseñar las bandas satelitales implicadas en el cálculo.

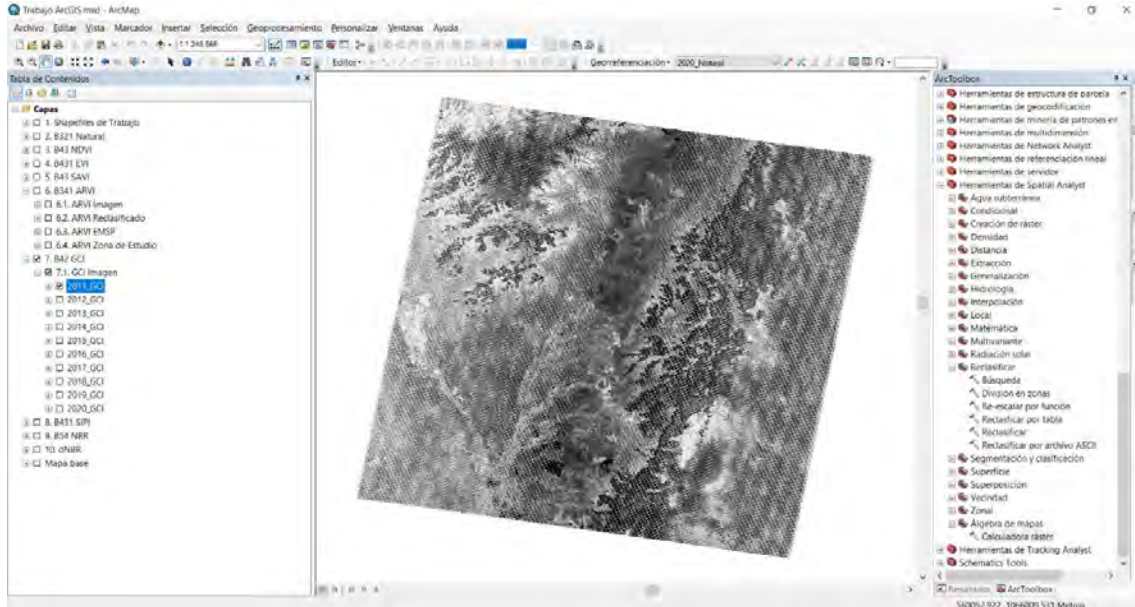
Figura 21. Obtención del indicador GCI mediante implementación de la fórmula



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Se obtiene la imagen satelital correspondiente al GCI 2011 de toda la extensión

Figura 22. Representación Extendida del GCI 2011

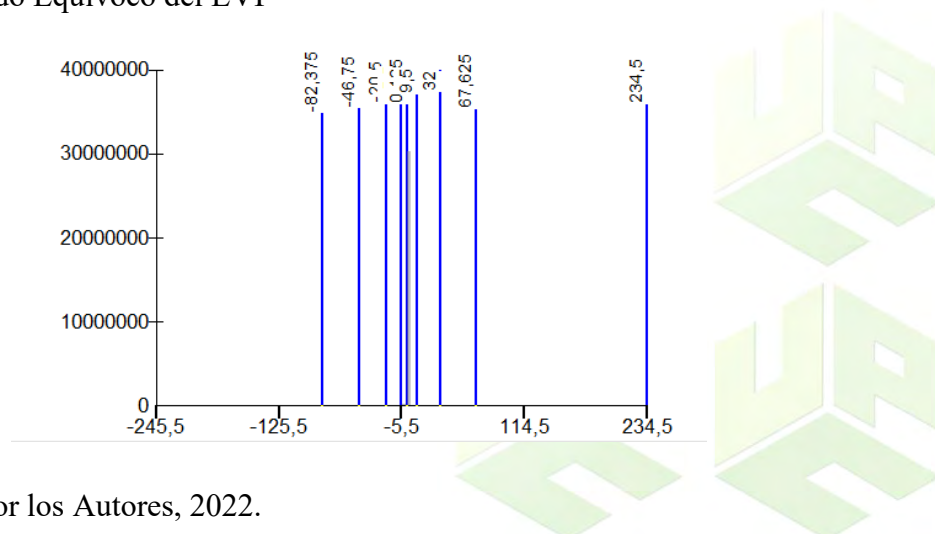


Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Por cada imagen satelital se obtienen siete indicadores (en total se obtienen 70). Luego se realiza una reclasificación de cada uno de los 70 ráster obtenidos.

El EVI se probó inicialmente con método de A. Huete, K. Didan, T. Miura, EP Rodríguez, X. Gao, LG Ferreira (2002) y no funcionó debido a que la expresión de los datos no creaba una campana de Gauss, sino un valor único, como se observa a continuación:

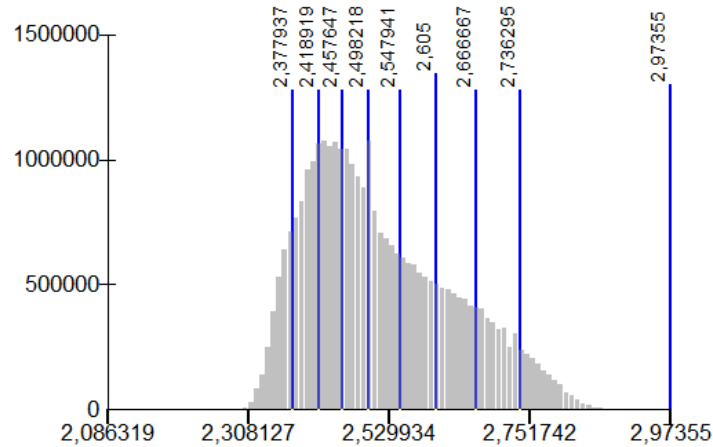
Figura 23. Resultado Equívoco del EVI



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Con el método de cortes naturales de Jenks se consigue mayor dispersión de los datos:

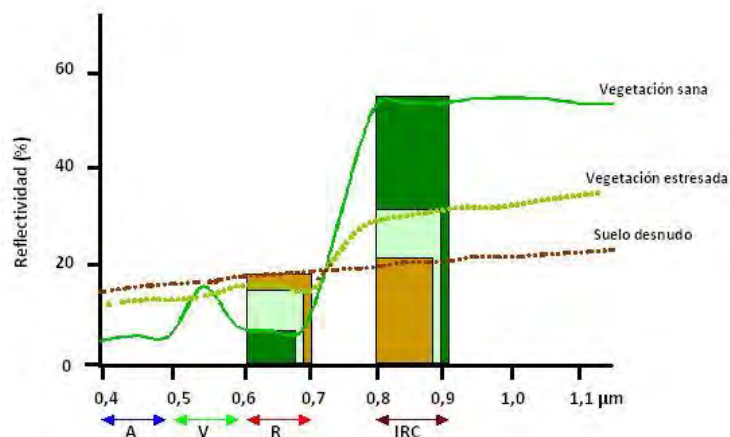
Figura 24. Resultado oportuno para el EVI



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

La clasificación se realiza considerando qué:

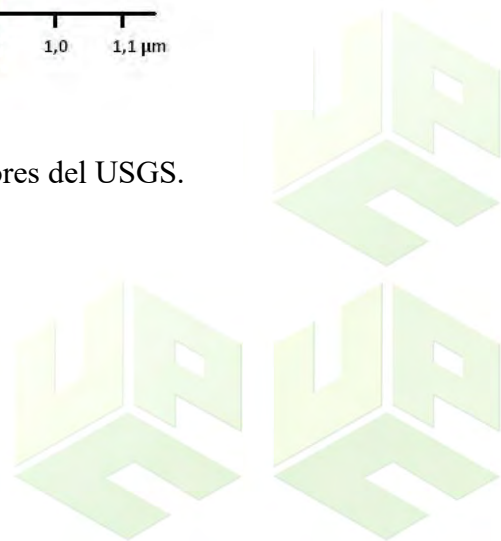
Figura 25. Clasificación de la Vegetación por Reflectividad



Nota: Tomado por los Autores (2022) del EarthExplorers del USGS.

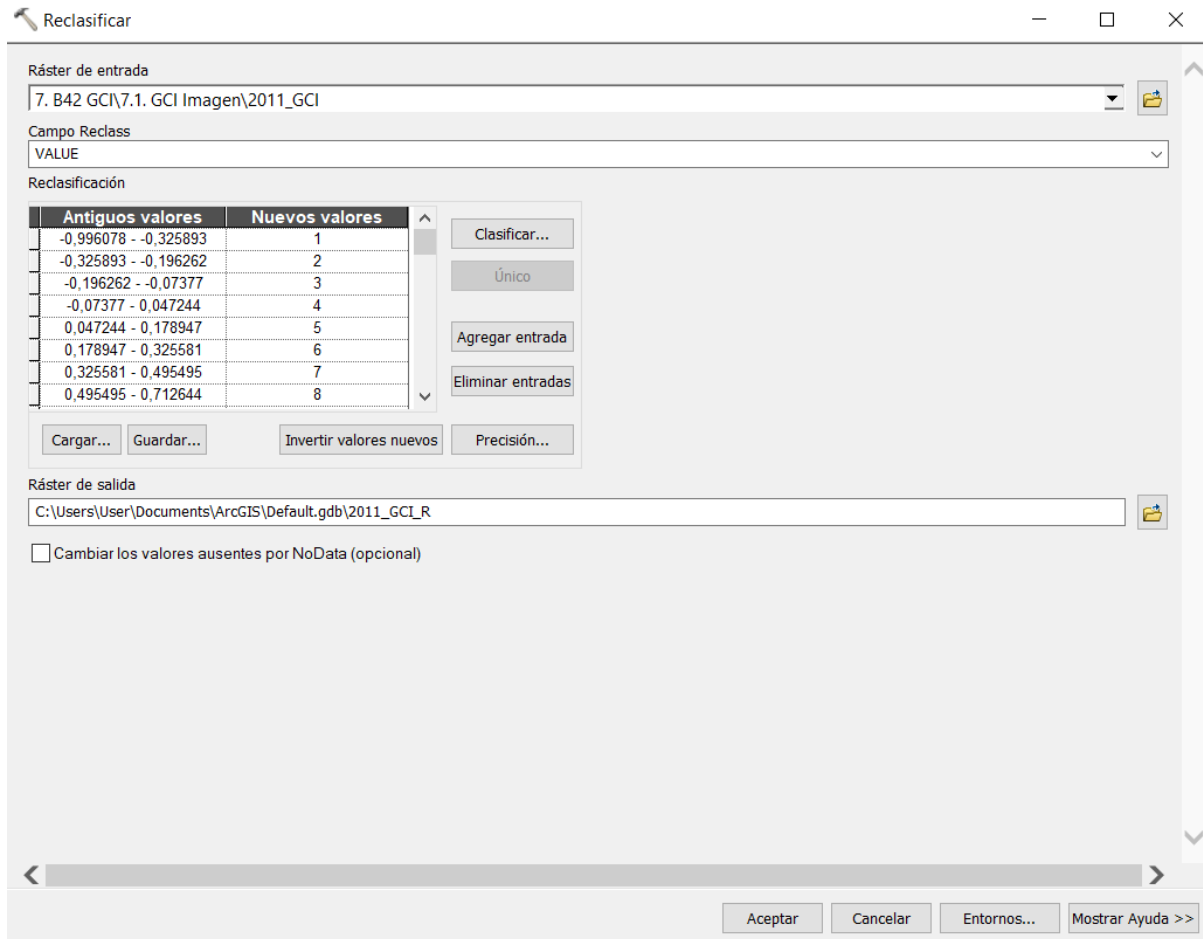
La clasificación observada se resume así:

- >40% vegetación sana
- 20-40% vegetación estresada
- 0-20% vegetación enferma
- <0% vegetación muerta



Para realizar este procedimiento en ArcMap se accede a la herramienta Reclasificar mediante el ArcTOOLBOX y se añade la imagen:

Figura 26. Reclasificación conforme a la Reflectividad de Vegetación

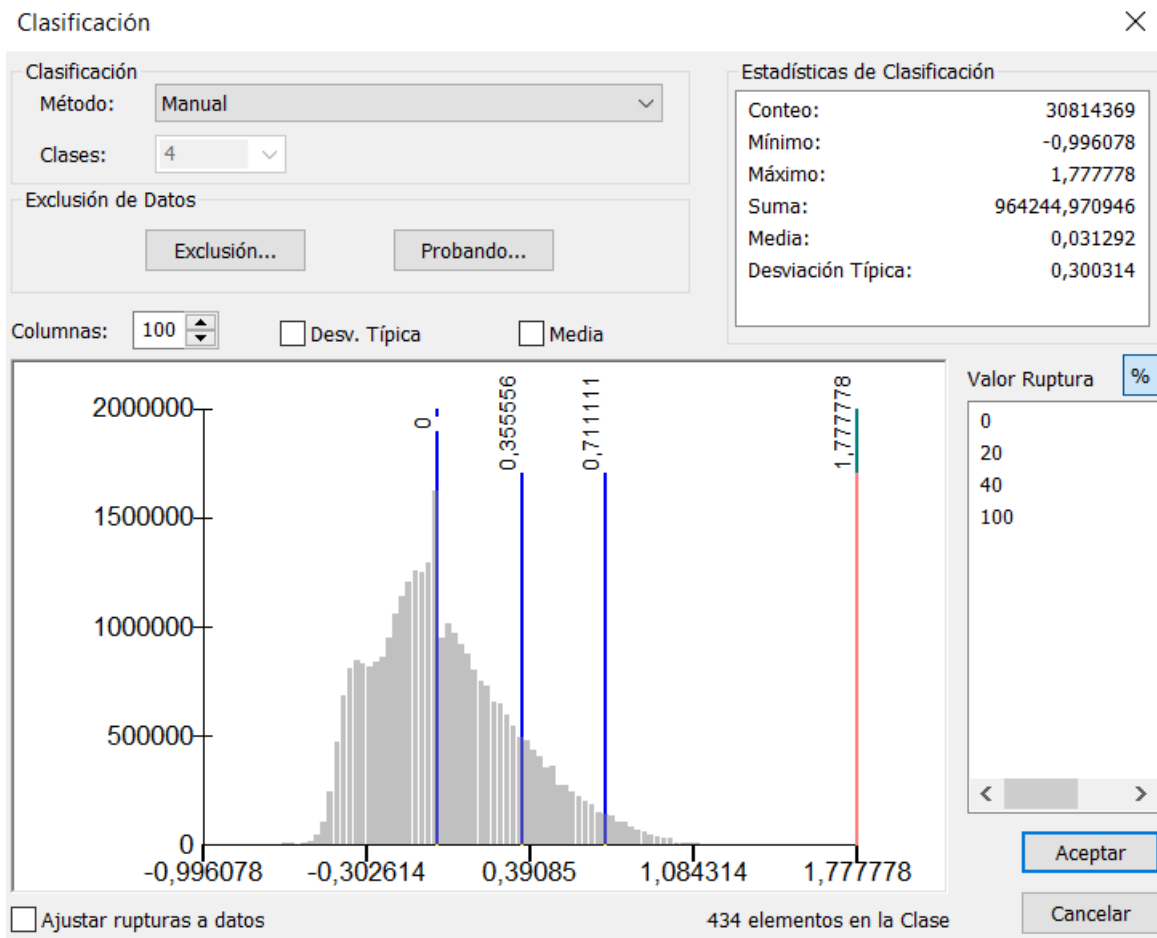


Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Se accede a la opción Clasificar. Con el método manual se clasifica en 4 clases conforme a las categorías presentadas con anterioridad, se aprecia la distribución de la campana de Gauss idónea que significa que hay datos distribuidos, entonces se procede a reclasificar dando en aceptar. Ver Figura 27.

No todas las veces se logra asignar 4 clases, puesto que a veces no hay información disponible en los rangos superiores (40-100) por lo tanto puede disminuir a 3 clases. (esto se hace para todos los archivos desde el 2011 hasta el 2020).

Figura 27. Clasificación de categorías manuales



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Hasta este punto se obtiene una imagen reclasificada para cada uno de los 70 indicadores obtenidos, el siguiente paso sería su estandarización.

6.1.3. Estandarización De Los Resultados

En esta actividad se procede a unificar las 10 imágenes satelitales de los años de estudio por cada uno de los indicadores mediante una Evaluación Multicriterio de Sumatoria Ponderada (EMSP) considerando igual peso de importancia para cada imagen.

Continuando con el ejemplo para el indicador GCI, se procede a acceder a esta herramienta mediante el ArcTool Box.

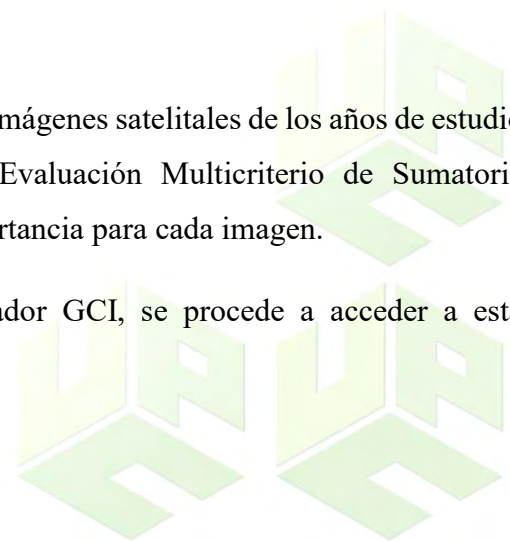
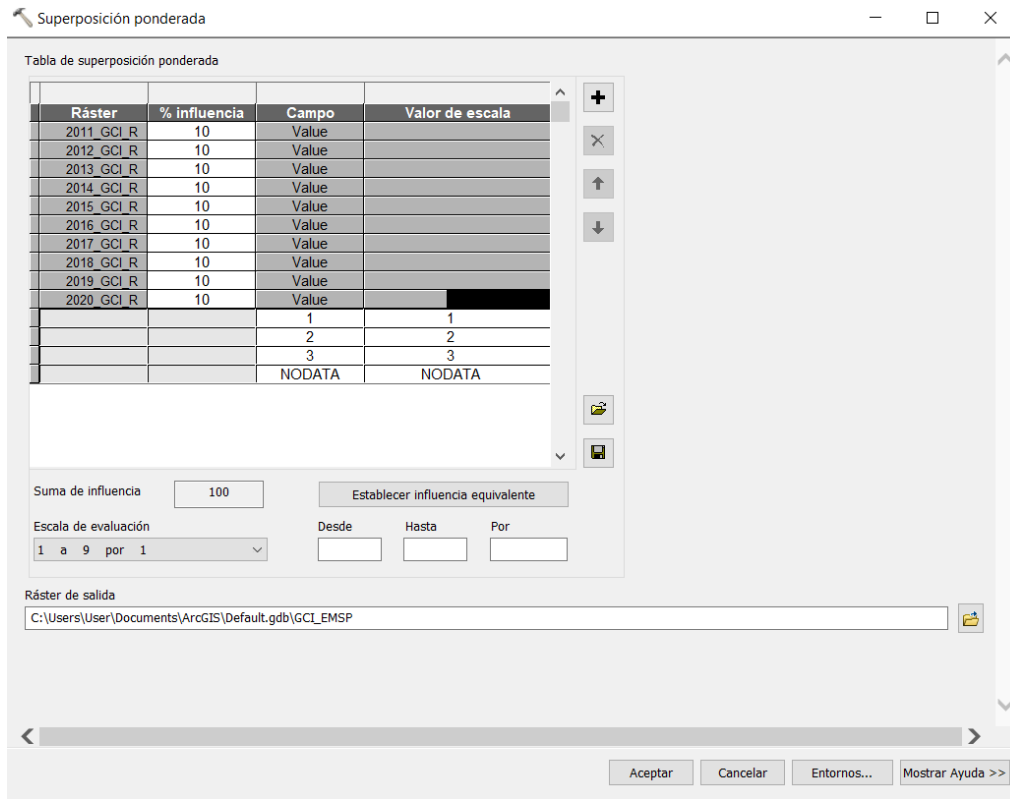


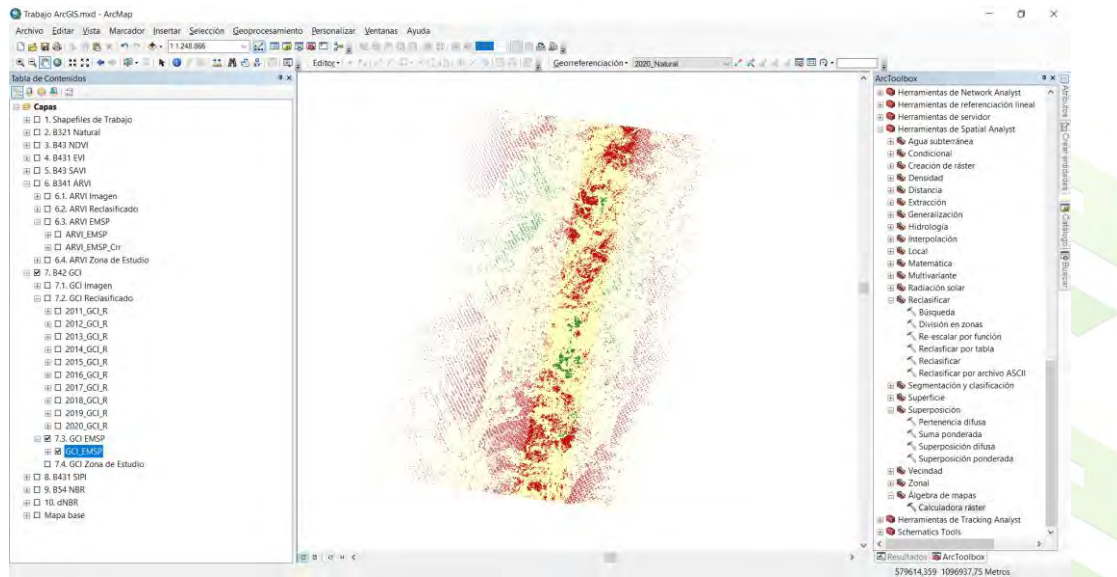
Figura 28. Herramienta de Superposición Ponderada del GCI



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

El resultado de este procedimiento genera la siguiente imagen:

Figura 29. Resultado con Bando Satelital



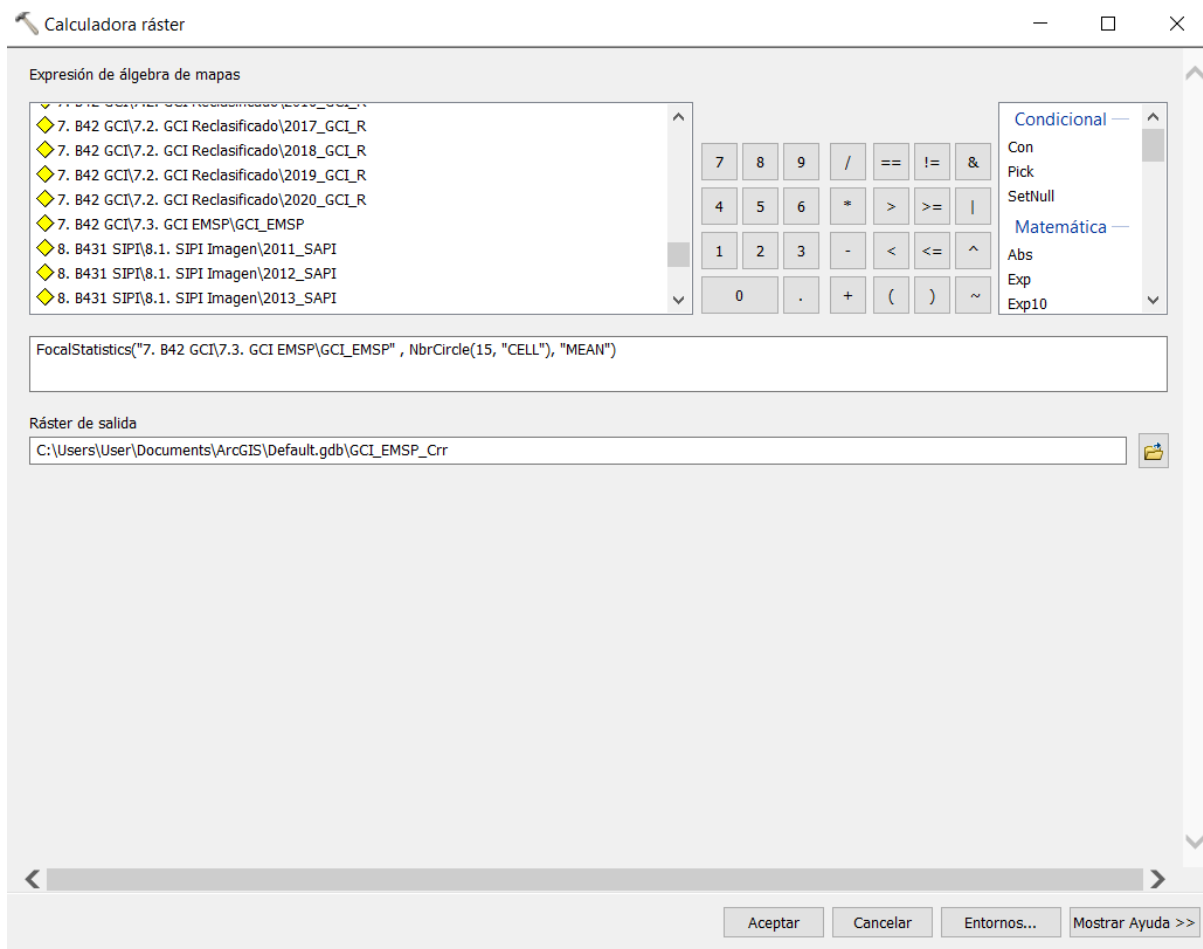
Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

La imagen presenta más notablemente el problema de bandeo satelital, situación que presentó el satélite y sus imágenes por consecuencia de una falla en el equipo, sin embargo, esto puede ser solventado implementado la siguiente noción:

FocalStatistics("Imagen Indicador", NbrCircle(15, "CELL"), "MEAN")

Esto se ejecuta accediendo al algebra de Mapas mediante el ArcToolBox, así:

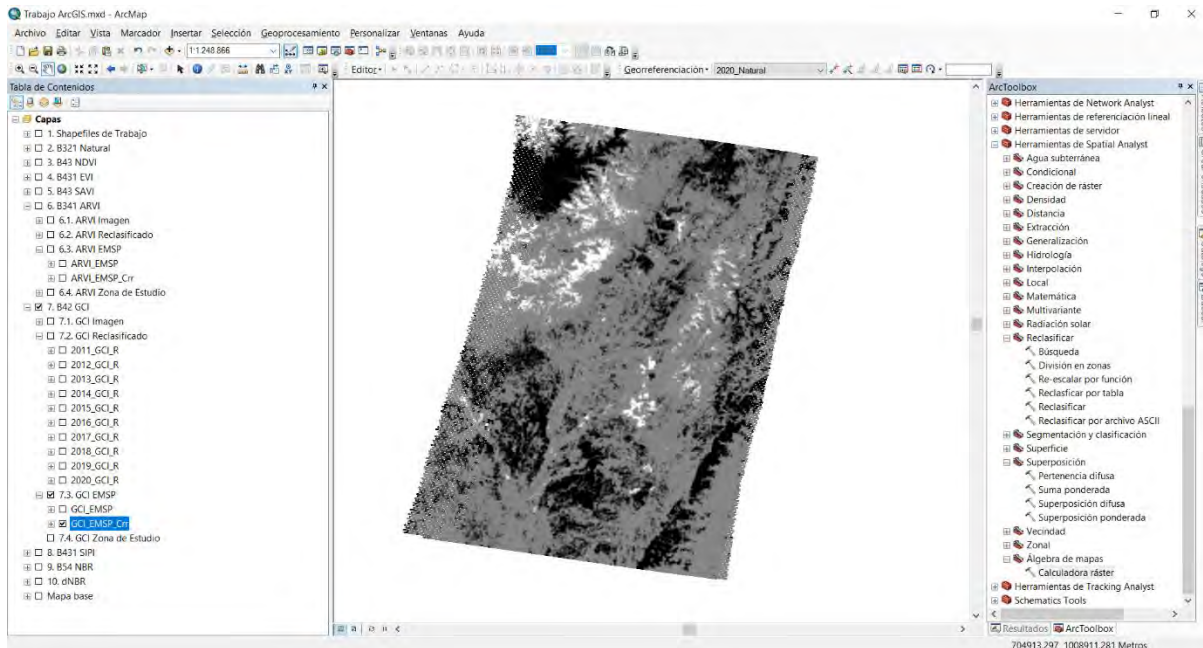
Figura 30. Corrección de Bando de la Imagen Satelital



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

El resultado es una imagen sin los bandeos proporcionales que se aprecian en las figuras anteriores, solventado tal que permite realizar cálculos con valores en todos los pixeles.

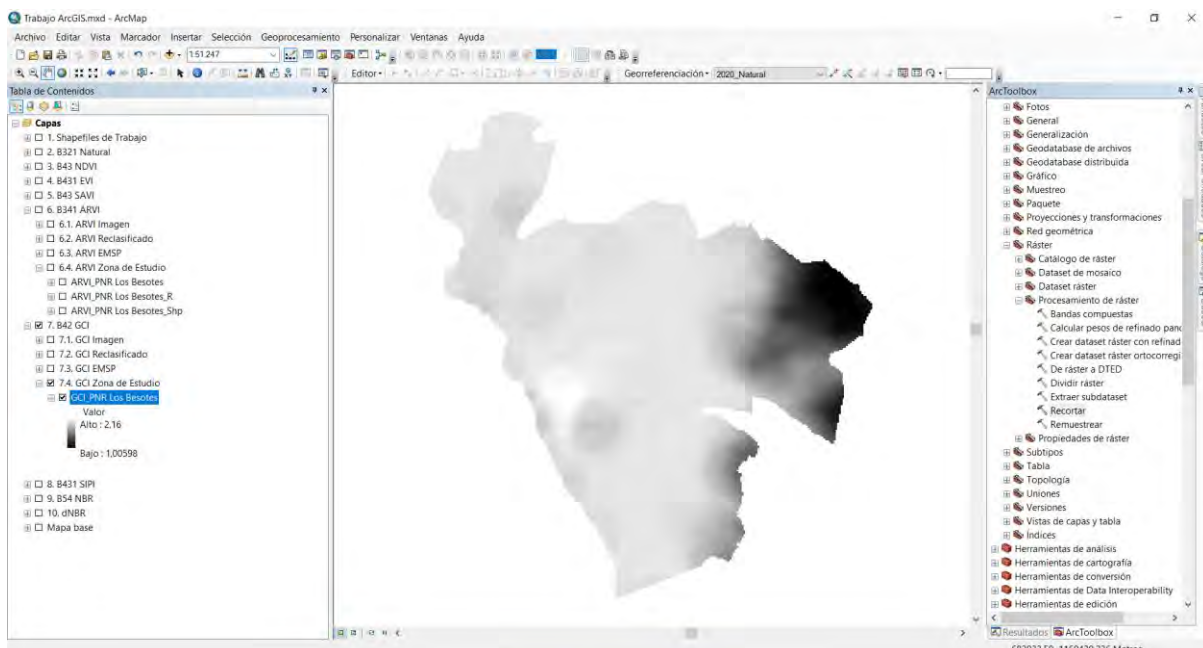
Figura 31. Imagen Digital corregida en el Bando



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Se recorta el ráster con el polígono del área de estudio. Para esto se accede a la herramienta recortar Ráster.

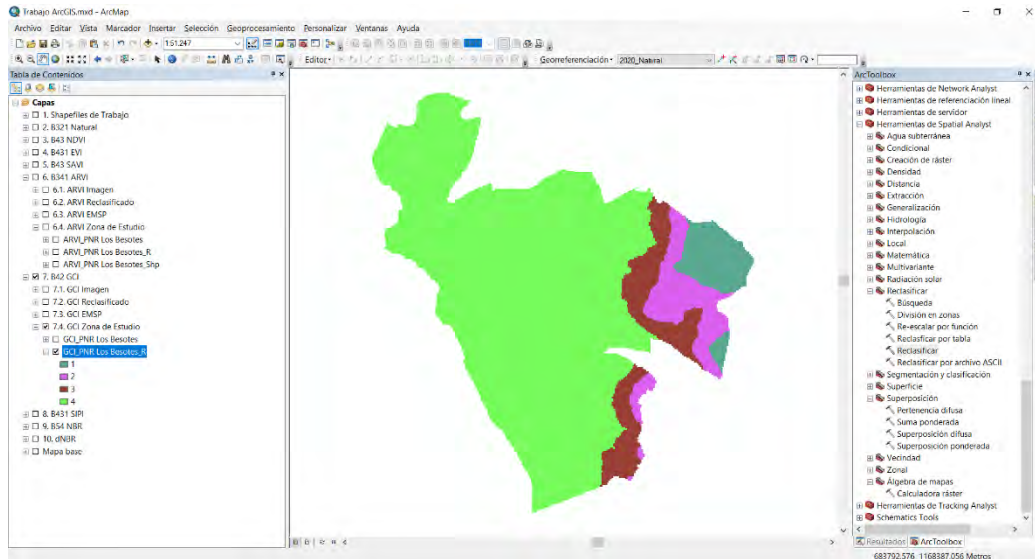
Figura 32. GCI compilado para el área de estudio



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Se procede a realizar la reclasificación como se indicó en un paso anterior, esta vez en cuatro categorías, como automáticamente lo detectó el software:

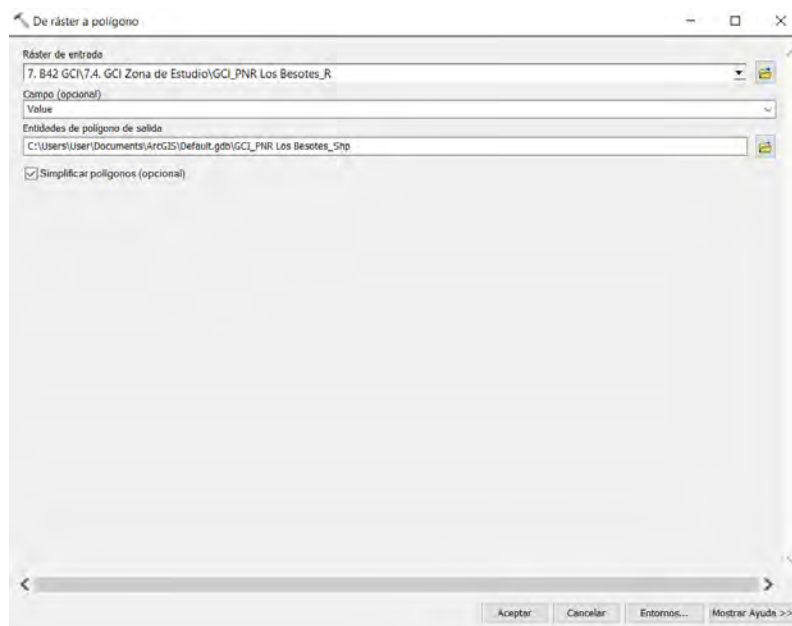
Figura 33. GCI compilado y reclasificado para el área de estudio



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Se convierte el ráster reclasificado a formato Shapefile: Para esto se accede a la herramienta “a Polígono” en el ArcToolBox:

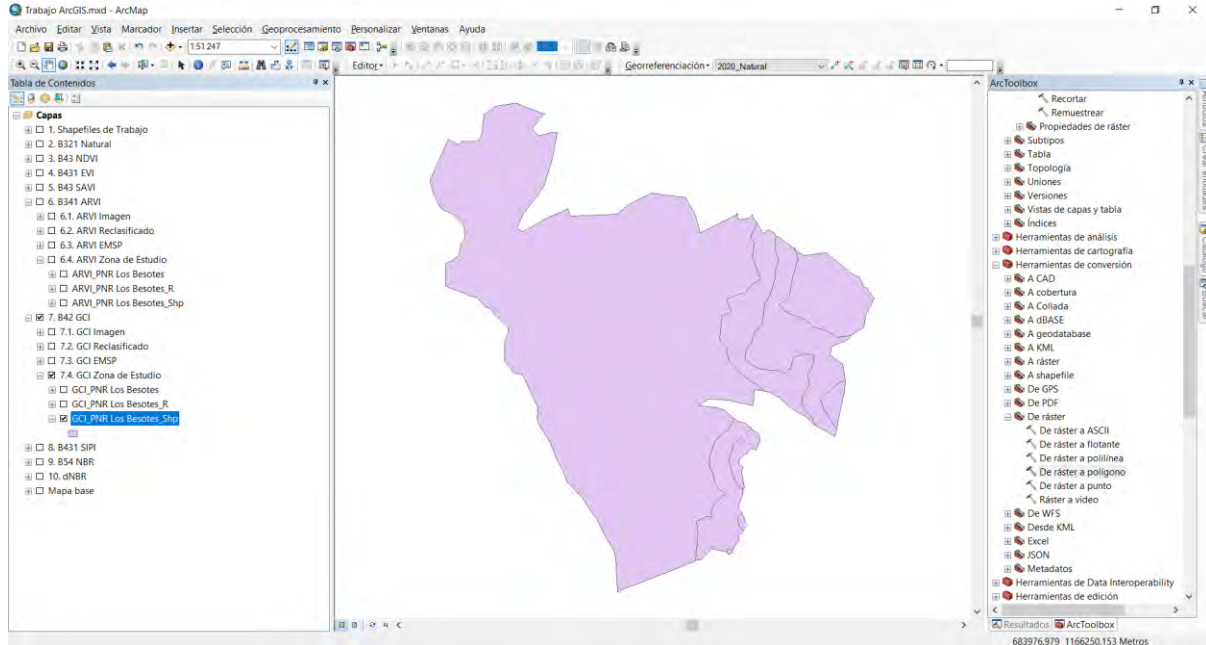
Figura 34. Herramienta de Conversión de Imagen Ráster a Vectorial



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

El resultado es el siguiente:

Figura 35. Imagen Vectorial de GCI para el área de estudio

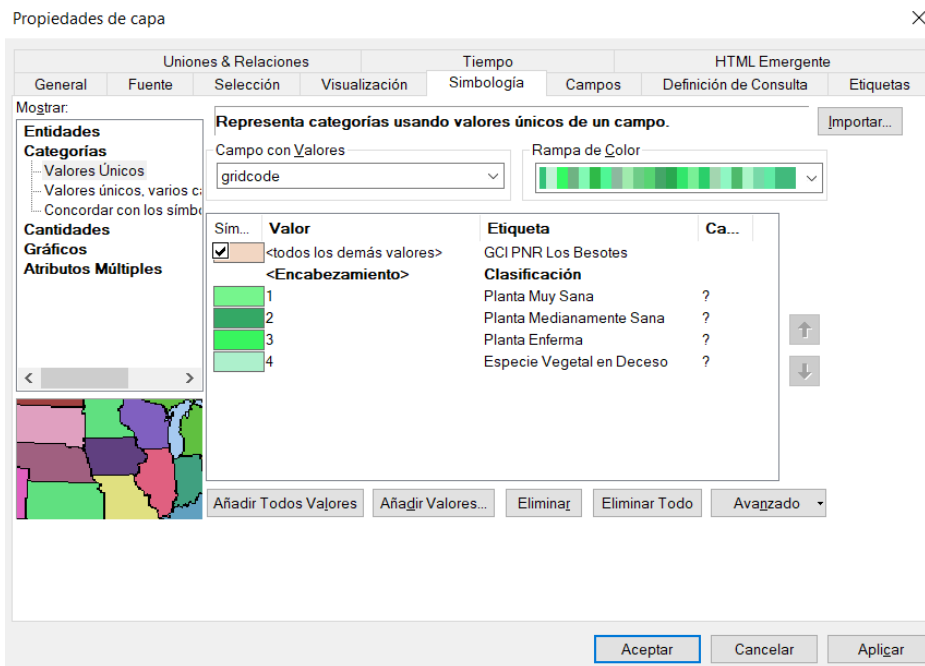


Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Se realiza la clasificación de las categorías del archivo shapefile obtenido. Se accede a propiedades dando doble clic sobre el archivo y se va a la pestaña Simbología, se selecciona Categorías “Valores únicos”, se selecciona el Campo de Valores “Gridcode”, se escoge la rampa de colores a gusto y se da clic a añadir todos valores. Se rellenan las etiquetas para su futura presentación en la plantilla.



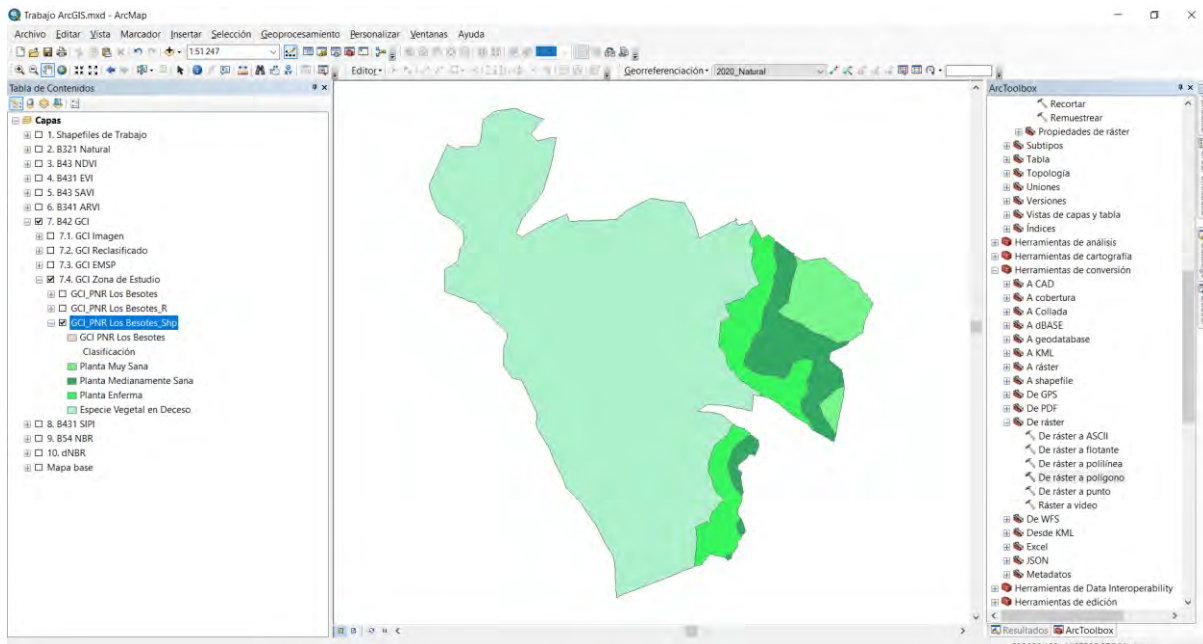
Figura 36. Categorización por Valores Únicos de la imagen vectorial



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Se obtiene la siguiente representación:

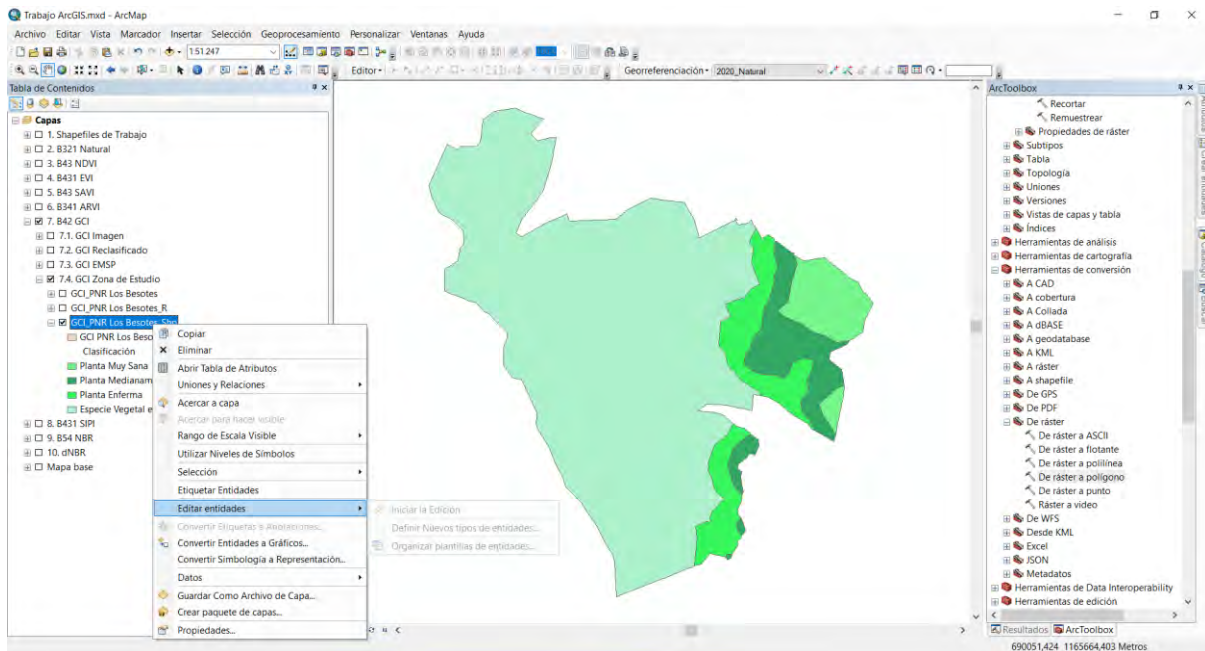
Figura 37. Resultado de la categorización por colores



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Se procede a realizar la combinación del GRIDCODE de las categorías. Para esto se debe editar el polígono, se da clic derecho sobre el archivo y se busca editar entidades y luego se le da iniciar edición:

Figura 38. Inicio de edición de entidades

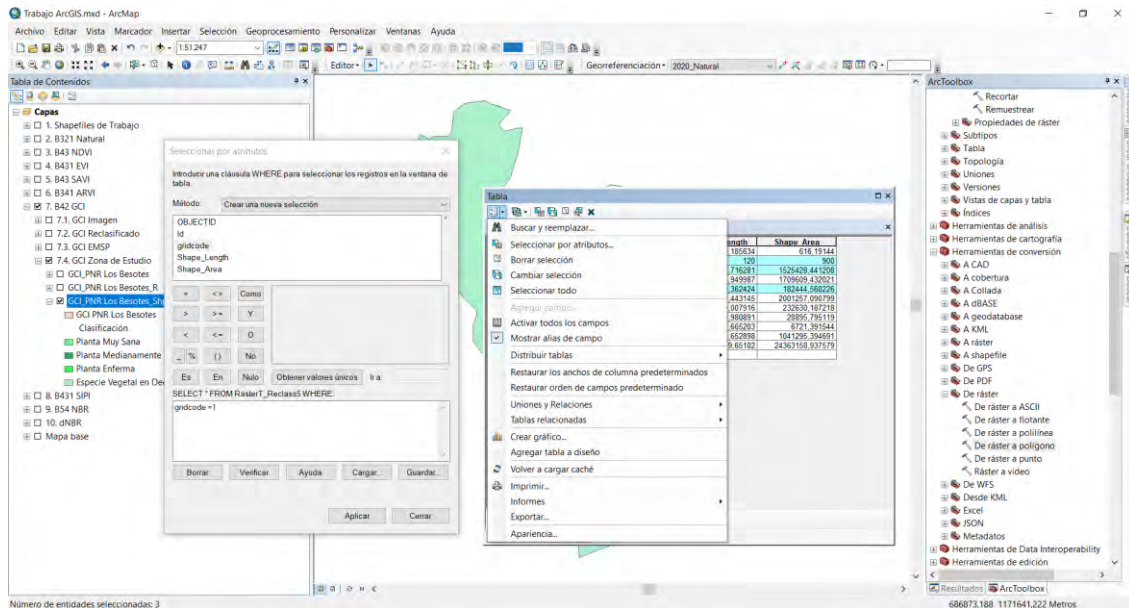


Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Luego se da clic derecho nuevamente en el archivo, se abre la tabla de atributos y en las opciones de esta se accede a la herramienta “Seleccionar por atributos”:



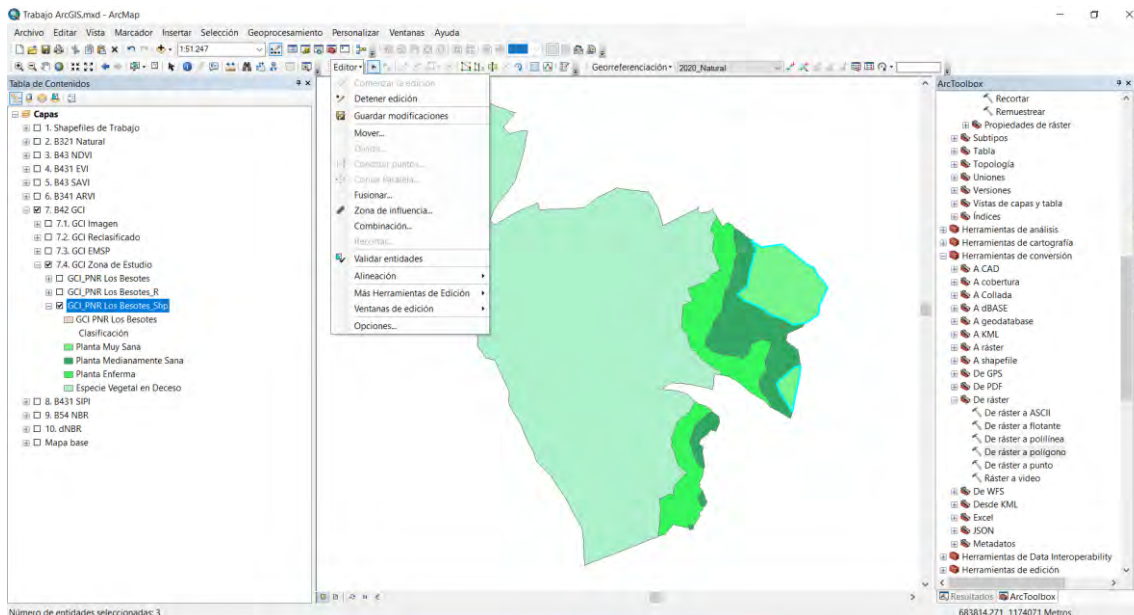
Figura 39. Selección por atributos



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Se selecciona Gridcode y se selecciona el atributo 1 y se da clic en aplicar y automáticamente se seleccionan las capas con el valor 1 asignado. Como se observa aquí:

Figura 40. Selección por código único de pixel



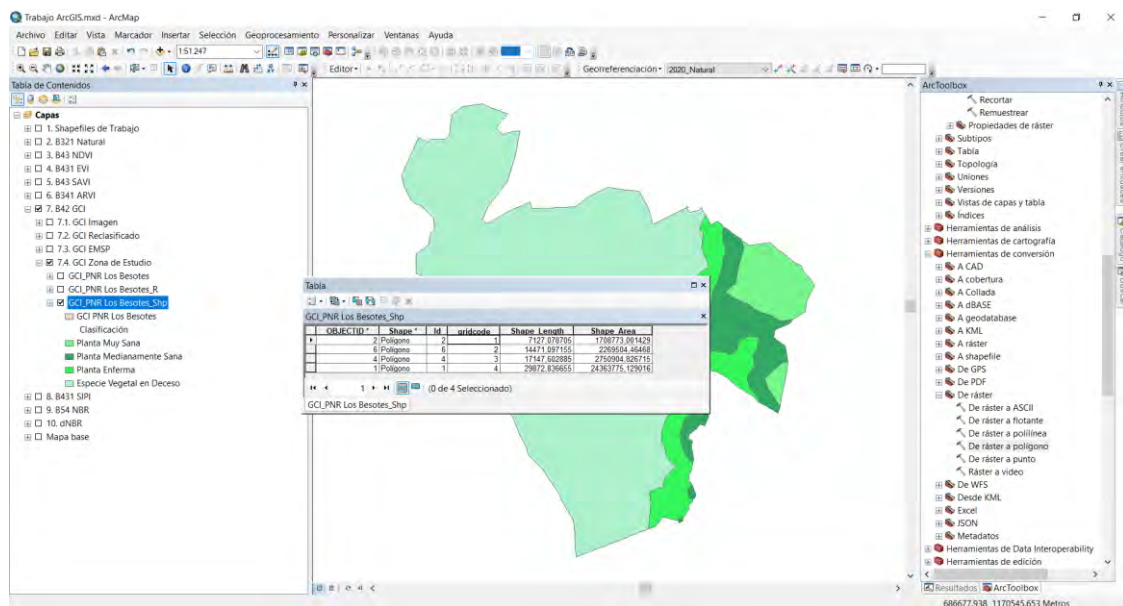
Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Se da clic en la opción editar y se escoge la opción fusionar. Y se obtiene un shapefile reducido para cada categoría. Se repite para el gridcode 2, 3 y 4 y se da clic en editar y se finaliza.

Se realiza cálculos de la geometría: Área de las categorías.

Al dar clic en la tabla de atributos se observa la geometría Área ya calculada:

Figura 41. Atributos fusionados y estimados



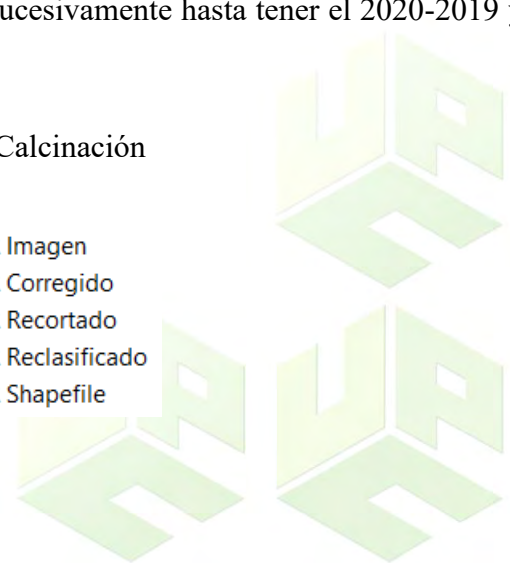
Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Se calcula el índice de diferencia de calcinación normalizado siguiendo un orden distinto, pero con los mismos pasos. Primero se abre el algebra de mapas del ArcTOOLBOX y se restan los ráster 2012-2011, 2013-2011 (...) así sucesivamente hasta tener el 2020-2019 y luego se procede a hacer lo presentado:

Figura 42. Resultados de la Diferencia del Índice de Calcinación

- 10. dNBR
- 10.1. dNBR Imagen
- 10.2. dNBR Corregido
- 10.3. dNBR Recortado
- 10.4. dNBR Reclasificado
- 10.5. dNBR Shapefile

Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

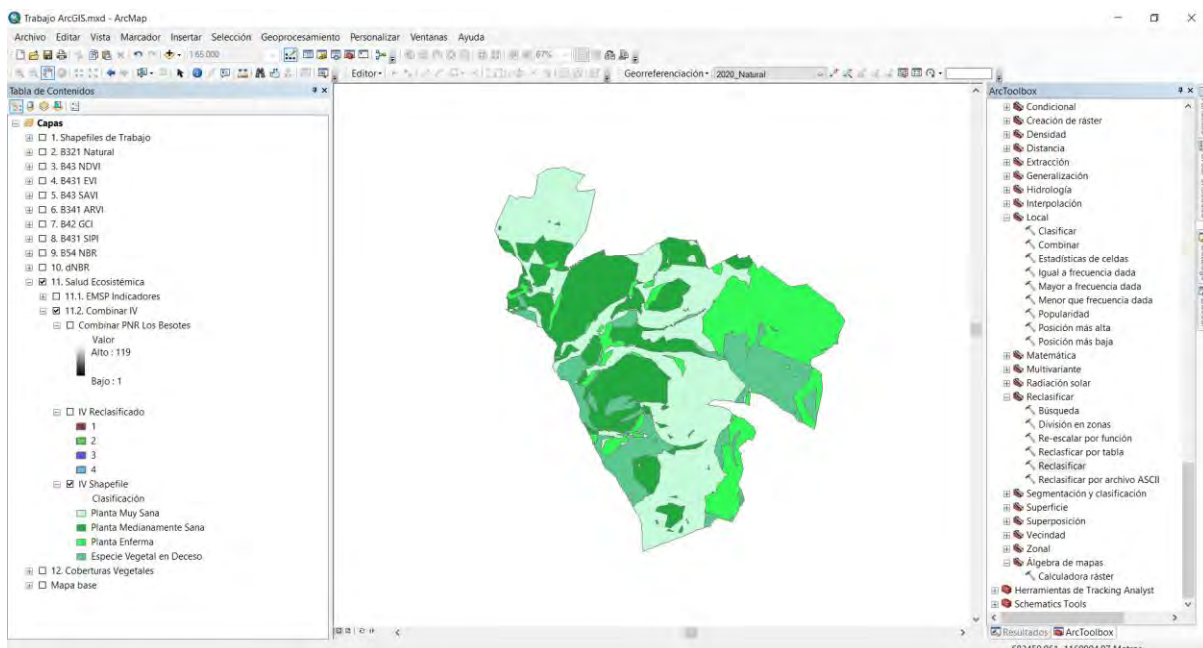


Estos pasos ya habían sido descritos con antelación. Aplicar la corrección, recortarlo con el shapefile del área de estudio, reclasificar el área recortada y luego pasarlo a shapefile y colocar todas las propiedades de simbología y la conglomeración o unión de todas las capas en una sola consolidada.

Por otra parte, se determina la salud ecosistémica así:

Se accede al arctool box y se busca la herramienta Combinar y se añaden el NDVI, EVI, SAVI, ARVI, GCI y el SIPI (no se utiliza el EMSP puesto que no hay alguna consideración puntual que indique que algún indicador tenga mayor valor ponderado que el otro). El resultado es el siguiente:

Figura 43. Resultado de la Salud Ecosistémica del Parque Natural Regional Los Besotes

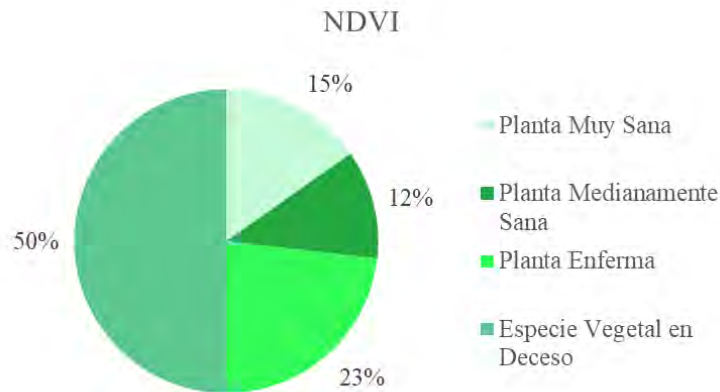


Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Después de esto se reclasifica, se transforma a shapefile y colocar todas las propiedades de simbología y la conglomeración o unión de todas las capas en una sola consolidada.

Los resultados de todos los procedimientos son la cuantificación de las áreas y su expresión porcentual y comparativo con la salud ecosistémica. A continuación, se presentan los resultados de la mencionada cuantificación:

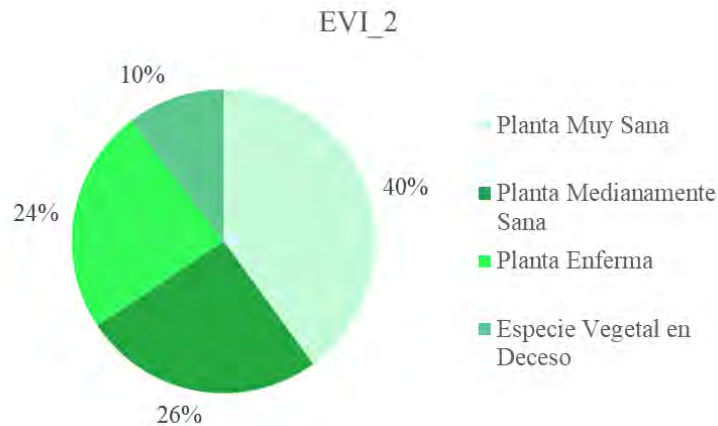
Figura 44. Resultado Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI).



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

De acuerdo con el NDVI, el 50% de la vegetación del área del Parque Natural Regional Los Besotes es una cobertura de especies vegetales en deceso, lo que justamente responde de forma correlativa a las situaciones vividas por las situaciones de conflagración

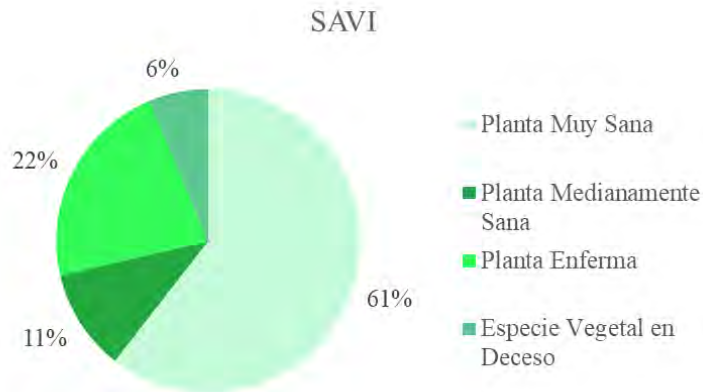
Figura 45. Resultado Índice De Vegetación Mejorado (EVI).



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Conforme al EVI, las especies vegetales en deceso son solo un 10%, por lo cual es un índice que estima mayores valores de calidad vegetativa ya que el 40% de las especies las identifica como muy sanas, pero el otro 50% (repartido en plantas medianamente sana y enferma) indican también una tendencia al deterioro.

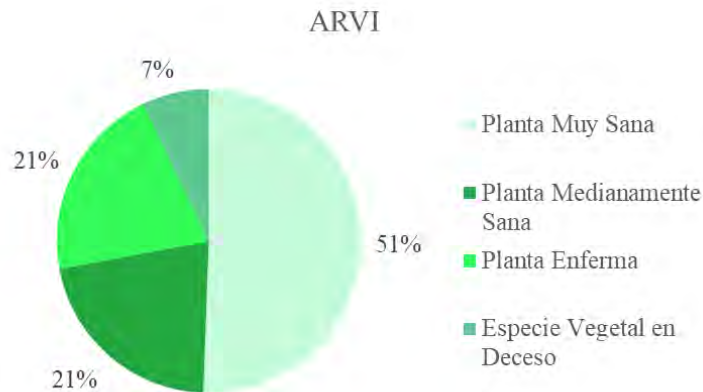
Figura 46. Resultado Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI).



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Por otra parte, el SAVI identifica vegetación cercana al suelo y estima que en eventos incendiarios presentados esta ha sido resistente ya que el 61% de las coberturas son plantas muy sanadas y solo el 6% son especies vegetales en deceso.

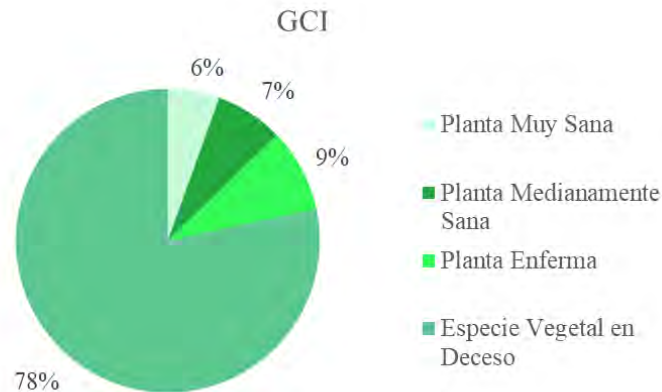
Figura 47. Resultado Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI).



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

El ARVI es un indicador que consigue explicar los efectos atmosféricos sobre la población vegetativa, en este caso particular se explica, que al igual que el EVI de Jung (EVI₂), hay poca incidencia de los efectos de la atmósfera sobre la vegetación y la posible ocurrencia de eventos situacionales de combustión ya que el 51% de las plantas son identificadas como muy sanas y solo el 7% especie vegetal en deceso.

Figura 48. Resultado Índice De Clorofila Verde (GCI).



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Como se aprecia el GCI es un excelente indicador del grado de estrés vegetativo. Para los meses de estudio en los años definidos se encuentra una vegetación con alto grado de estrés por consecuencia de los eventos incendiarios presentados, solo el 6% son plantas muy sanas, por ende, el GCI es un buen indicador para estudiar la ocurrencia de incendios.

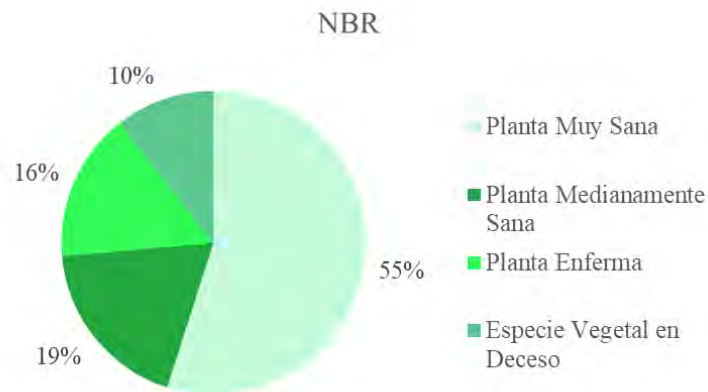
Figura 49. Resultado Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI).



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Quizá el mejor indicador porque relaciona los valores de los carotenoides respecto a la clorofila en el dosel de la vegetación. El SIPI explica un 77% de especies vegetales en deceso y solo un 3% de especies muy sanas para los eventos en los meses distinguidos y los años de estudio.

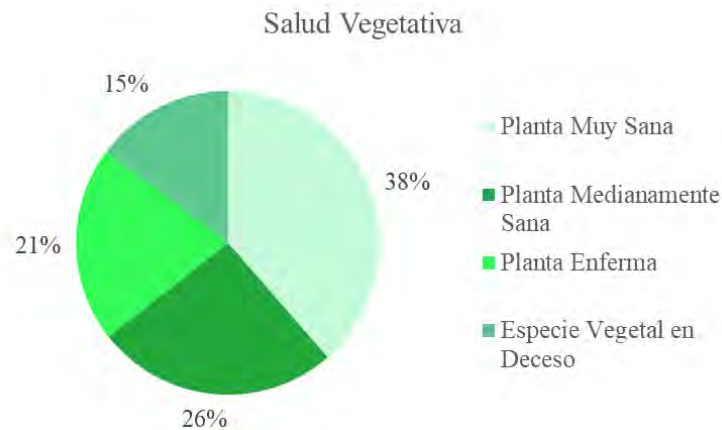
Figura 50. Resultados Índice De Calcinación Normalizado (NBR).



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Al evaluar el NBR se identifica que la mayoría de la vegetación que ha sido objeto de la combustión, durante este periodo de estudio han sido, mayoritariamente, plantas muy sanas. En poca proporción han sido especies vegetales en deceso.

Figura 51. Indicador de Salud Vegetativa

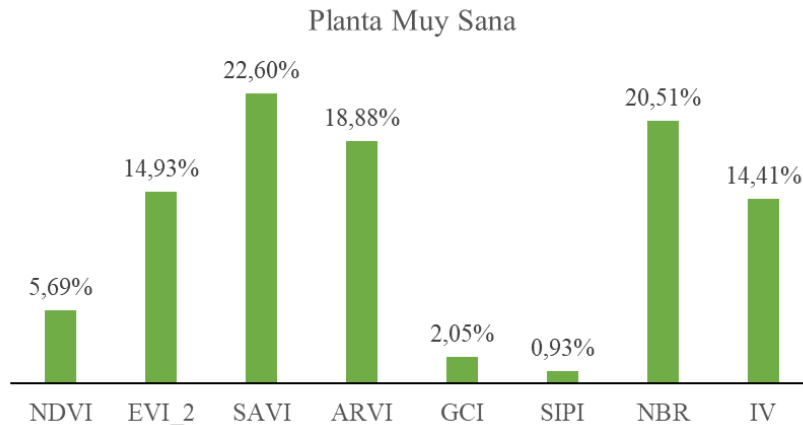


Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Al combinar los Indicadores de estudio, sin contemplar el NBR, se obtiene que el ecosistema del Parque Natural Regional Los Besotes tiene una diferente y proporcionada especificación de la vegetación en donde el mayor porcentaje indica plantas muy sanas pero en contra partida con las demás categorías se queda corta, ya que menos de la mitad de este valor corresponde a especies vegetales en deceso.

Realizando la categorización del Índice de Salud Ecosistémico respecto a los indicadores se obtiene lo siguiente:

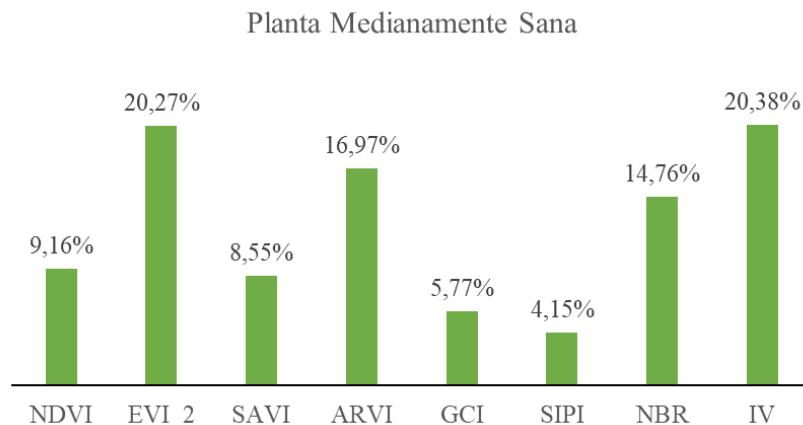
Figura 52. Categoría del Índice Vegetativo (IV) para Plantas muy Sanas



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Indicadores como el SAVI explican mejor el resultado del indicador vegetativo para la categoría de Plantas muy Sanas, aunque también hay importantes tendencias del ARVI y EVI.

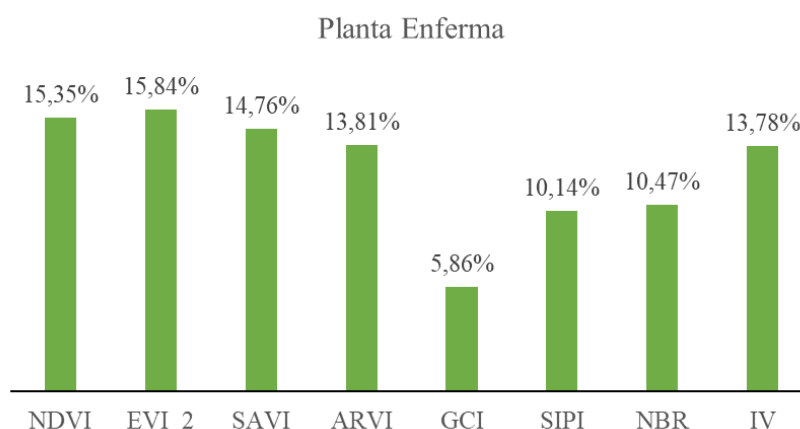
Figura 53. Categoría del Índice Vegetativo (IV) para Plantas Medianamente Sana



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Las plantas medianamente Sanas tienen mayor incidencia del EVI y del ARVI que los demás indicadores, lo que significa que son importantes para explicar esta categoría.

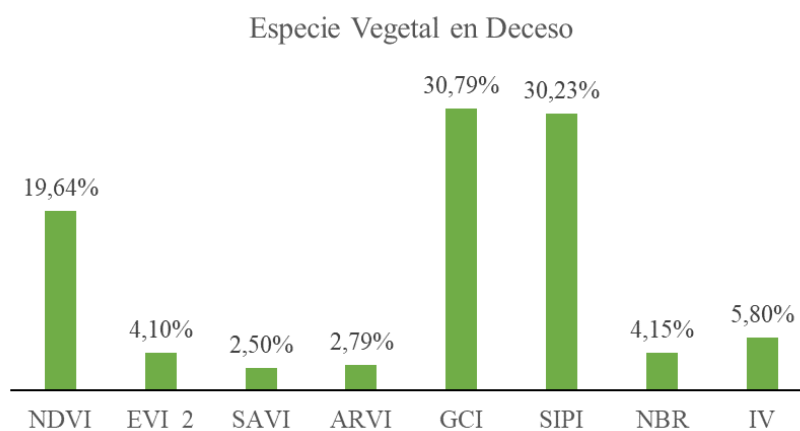
Figura 54. Categoría del Índice Vegetativo (IV) para Plantas Enfermas



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Las plantas enfermas son explicadas notoriamente por la mayoría de los indicadores principalmente por el EVI, NDVI, SAVI y ARVI, por lo cual explicarían bien esta categoría.

Figura 55. Categoría del Índice Vegetativo (IV) para Especies Vegetales en Deceso



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Como se observa, el GCI y el SIPI son los indicadores vegetativos que tienen mayor correlación con la situación de especies vegetales en deceso, por lo tanto, conformar un grupo con estas variables puede ser importante para tratar de explicar esta categoría. Otra variable que exalta es el NDVI, que tiene valor porcentual similar a los valores explicados para las categorías anteriores, este puede ser considerado mediamente, sin embargo, se debe avanzar en el análisis estadístico para conocer la incidencia de estos.

Considerando el análisis de la salud vegetativa, entonces se procede a analizar el NBR y sus diferencias porcentuales para la serie de tiempo de estudio.

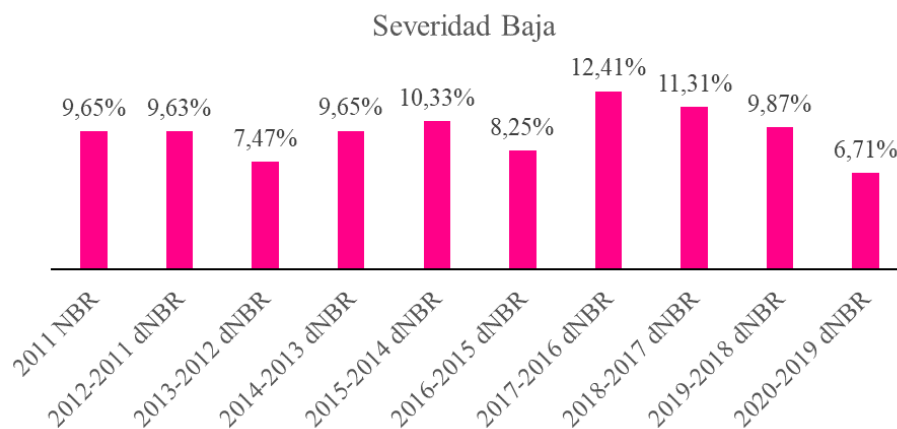
Figura 56. Clase del NBR sin severidad



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Como se aprecia, del año 2011 a 2012 hubo un aumento significativo de áreas sin severidad por devastaciones a consecuencia de eventos incendiarios y de conflagración, sin embargo, ese valor tiene un comportamiento atípico y fue el único reflejo de recuperación.

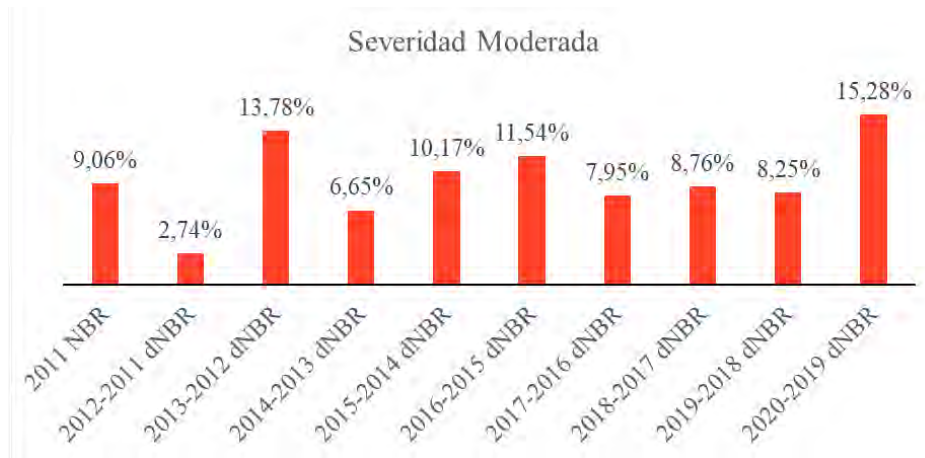
Figura 57. Clase del NBR Severidad Baja



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Estas áreas presentaron cambios significativos entre 2016 a 2016 y fue reduciendo a partir del 2017. Entre 2011 a 2016 hubo cambios atípicos en esta clase, los cuales se observarán en siguiente sección del documento.

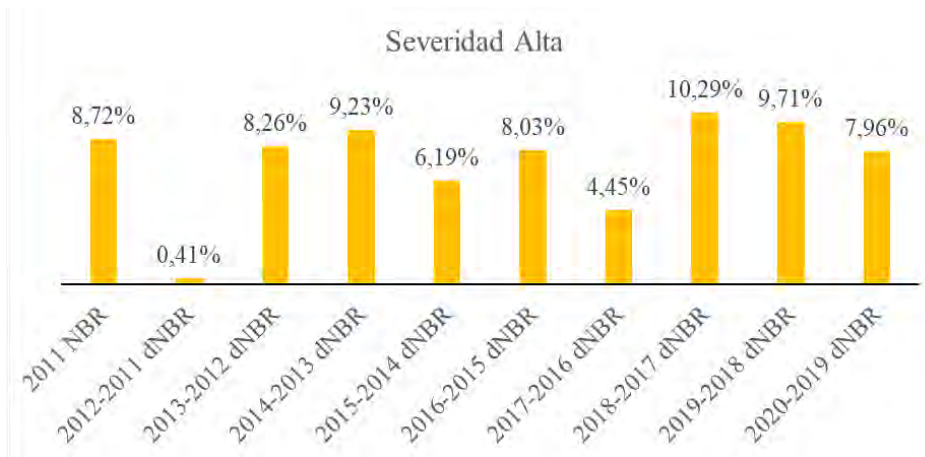
Figura 58. Clase del NBR Severidad Moderada



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Esta clase tiene cambios bastante atípicos, lo que significa que la vegetación tiene una capacidad tendencialmente concentrada y cambiante cuando se clasifica dentro de los rangos del Índice de Calcinación Normalizada NBR.

Figura 59. Clase del NBR Severidad Alta

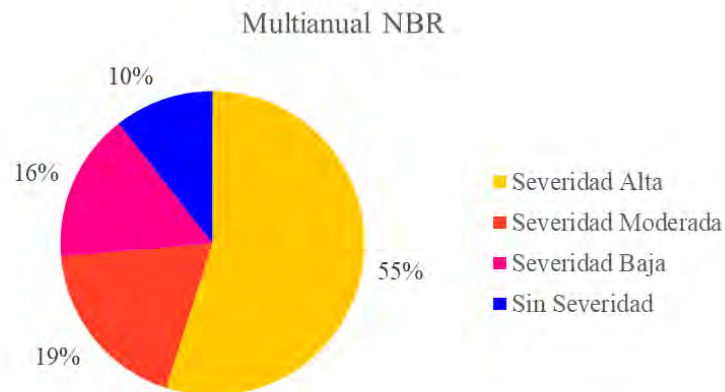


Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

Una de las reducciones importantes se presentó en el periodo 2011 a 2012, sin embargo, en el 2015 a 2016, en el cual se presentó un evento incendiario de categoría relevante mostró mejoras respecto del cambio de 2016 a 2017.

Por otra parte, el análisis multianual del NBR presenta el siguiente resultado:

Figura 60. Resultado NBR Multianual



Nota: Elaborado por los Autores, 2022.

De manera combinada, mayoritariamente la clase predominante sobre las coberturas vegetativas del Parque Natural Regional Los Besotes es de Severidad Alta en un 55%, siendo un reflejo del máximo daño sufrido por la combustión de la biomasa. Solo el 10% de la vegetación de este lugar se mantiene sin severidad.

6.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE COMBUSTIBLE FORESTAL DEL PARQUE NATURAL REGIONAL LOS BESOTES MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE LOS INDICADORES NDVI, EVI, SAVI, ARVI, GCI, SIPI, NBR Y dNBR

6.2.1. Descripción De Las Coberturas Vegetales

Para construir el modelo es necesario definir cual clase de cobertura vegetal es más tendencial a la combustión por sus propiedades intrínsecas de propagar y aumentar las conflagraciones. Este procedimiento se realiza mediante ArcMap de la siguiente manera:

Se procede a trabajar con las capas de cobertura vegetal. Como este es un archivo vectorial se coloca todas las propiedades de simbología y la conglomeración o unión de todas las capas en una sola consolidada y se procede a convertir en Raster usando el ArcTool Box y se obtiene un archivo definido para esto:

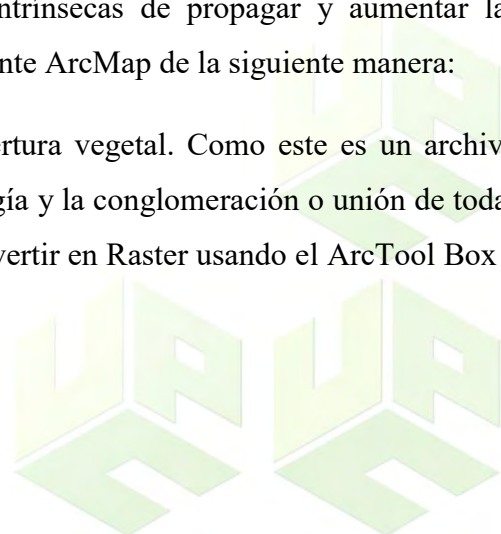
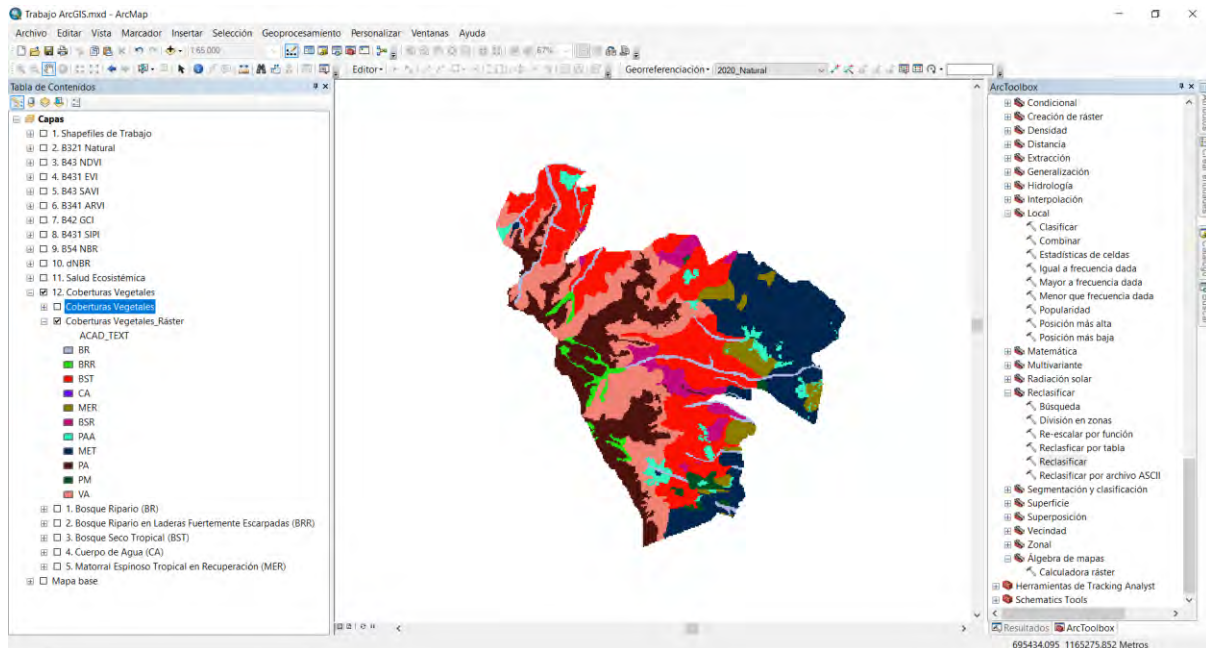


Figura 61. Categorías Raster de las unidades vegetativas



Nota: Elaborado por los Autores (2022) de la Oficina de Subdirección de Ambiente de la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR)

Luego reclasificar, sin embargo, se harán 11 reclasificaciones. Puesto que son 11 categorías, la idea de hacer la reclasificación es obtener 1 raster para cada categoría: 1 para el Bosque Ripario, Bosque Ripario sobre Laderas Fuertemente Escarpadas, Bosque Seco Tropical, Bosque Seco Tropical en Recuperación, Matorral Espinoso Tropical en Recuperación, Matorral Espinoso Tropical, Pajonales, Pastos con Árboles y Arbustos, Pastos Manejados y Varillales. Las áreas de la cobertura vegetal son las siguientes:

Tabla 7. Coberturas Vegetales del Parque Natural Regional Los Besotes

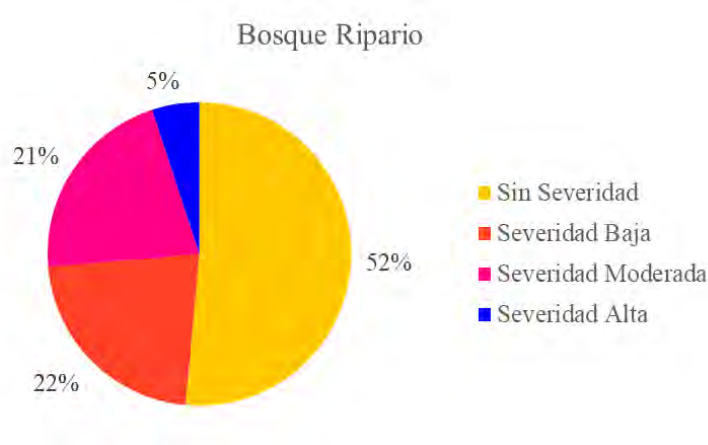
N	Abreviatura	Cobertura Vegetal	Área (Ha)
1	BR	Bosque Ripario	5,43
2	BRR	Bosque Ripario sobre Laderas Fuertemente Escarpadas	11,94
3	BST	Bosque Seco Tropical	93,23
4	BSR	Bosque Seco Tropical en Recuperación	5,09
5	CA	Cuerpos de Agua	0,06
6	MER	Matorral Espinoso Tropical en Recuperación	0,09

N	Abreviatura	Cobertura Vegetal	Área (Ha)
7	MET	Matorral Espinoso Tropical	0,33
8	PA	Pajonales	2,05
9	PAA	Pastos con Árboles y Arbustos	4,96
10	PM	Pastos Manejados	4,5
11	VA	Varillales	0,21

Nota: Elaborado por los Autores (2022) de la Oficina de Subdirección de Ambiente de la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR)

El resultado de la superposición entre los resultados de los modelos de combustible de importante severidad y de las coberturas vegetales se obtienen los siguientes resultados:

Figura 62. Análisis de Combustión del Bosque Ripario

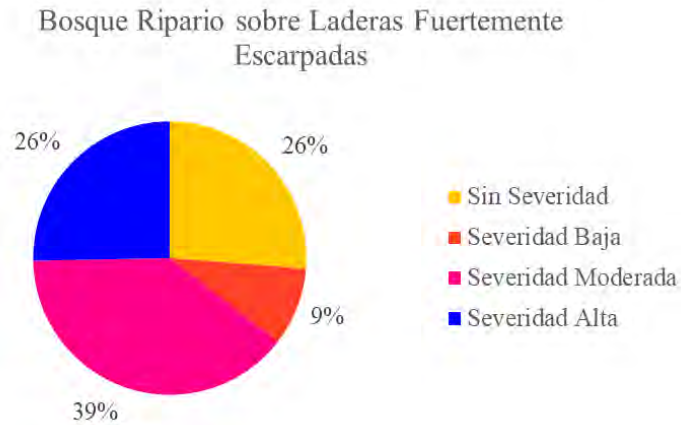


Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Como se aprecia, de acuerdo con el modelo multianual de combustión y su correlación con las coberturas vegetales, el Bosque Ripario tiene un 5% de severidad alta por conflagraciones y fuegos de consumo de biomasa, sin embargo, el Bosque Ripario se correlaciona mayoritariamente con la inexistencia de Severidad.

Este resultado no implica probabilidades, sino la información interpolada de la extensión de conflagraciones conjuntas multianuales en las coberturas del plan de manejo del Parque Natural Regional Los Besotes.

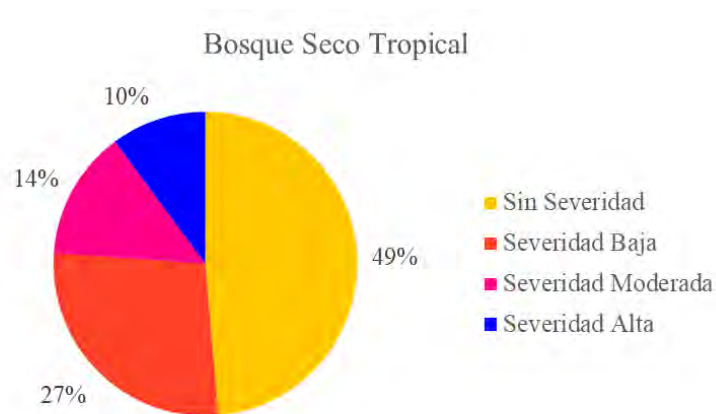
Figura 63. Análisis de Combustión del Bosque Ripario sobre Laderas Fuertemente Escarpadas



Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Como se aprecia, los Bosque Riparios en Laderas fuertemente Escarpadas tienen mayor tendencia a una Severidad Alta, sin embargo, en igual proporción no tienen severidad, pero un porcentaje mayor posee severidad moderada.

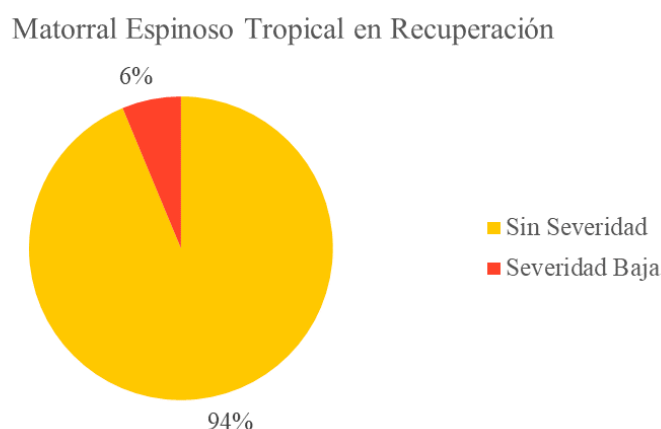
Figura 64. Análisis de Combustión del Bosque Seco Tropical



Nota: Elaborado por los Autores (2022)

El Bosque Seco Tropical posee un porcentaje bajo de severidad alta y alto de cero severidades, sin embargo, existe una proporción importante en la severidad baja y moderada. Este comportamiento es de mucho análisis porque el BST es muy relevante y este es un buen indicador que ayuda a comprender la dinámica de los eventos sucedidos conglomerados en la serie tiempo de estudio.

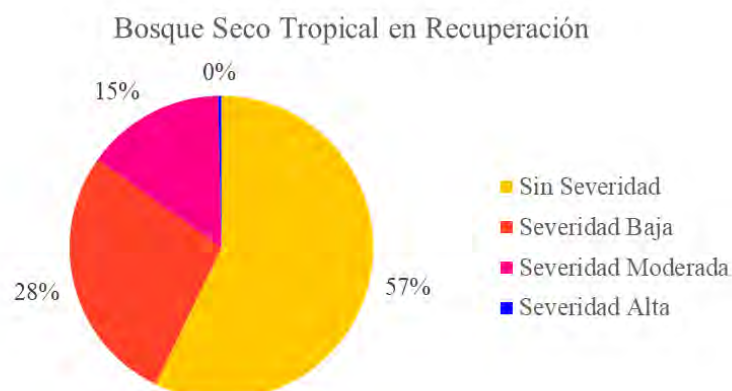
Figura 65. Análisis de Combustión del Matorral Espinoso Tropical en Recuperación



Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Esta cobertura presenta solo dos categorías de correlación, puesto que sus áreas distribuidas se han expuesto a pocos eventos incendiarios. Mayoritariamente posee mayoritariamente poca severidad.

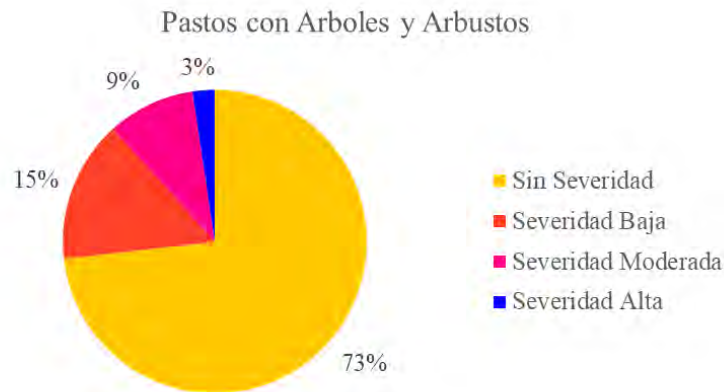
Figura 66. Análisis de Combustión del Bosque Seco Tropical en Recuperación



Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Además, se denota que las coberturas de BST en recuperación se encuentran en espacios seguros para las categorías de severidad alta, sin embargo, no la limita a la exposición de situaciones porque existen otras categorías en donde predomina la severidad baja y parte de la moderada.

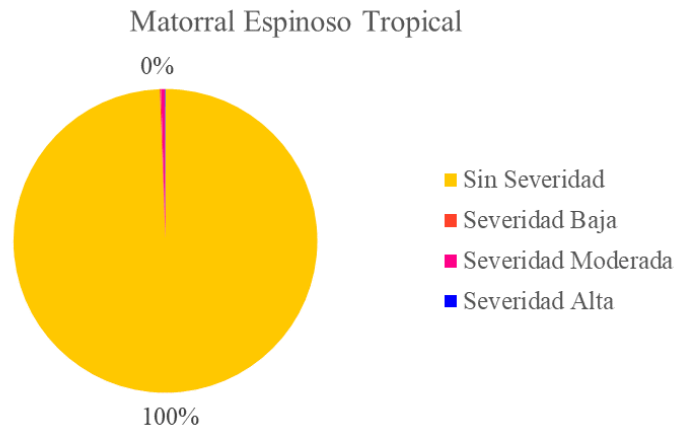
Figura 67. Análisis de Combustión de Pastos con Árboles y Arbustos



Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Esta cobertura tiene un alto porcentaje de no severidad, sin embargo, acumula otro porcentaje alcanzando hasta la categoría de severidad alta, o bien sea, que cabe la probabilidad de combustionar y afectar de manera relevante.

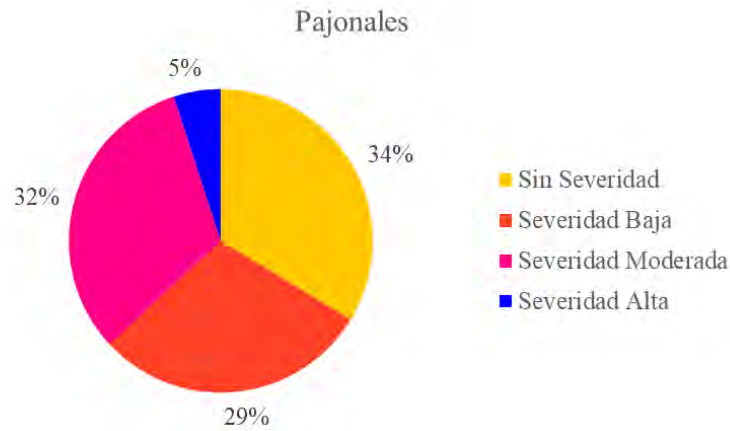
Figura 68. Análisis de Combustión del Matorral Espinoso Tropical



Nota: Elaborado por los Autores (2022)

El Matorral Espinoso Tropical se encuentra absolutamente dentro de la categoría de No Severidad. Este resultado es importante porque esto significaría que este componente estructural ecosistémico es íntegro y funcional en sus aspectos.

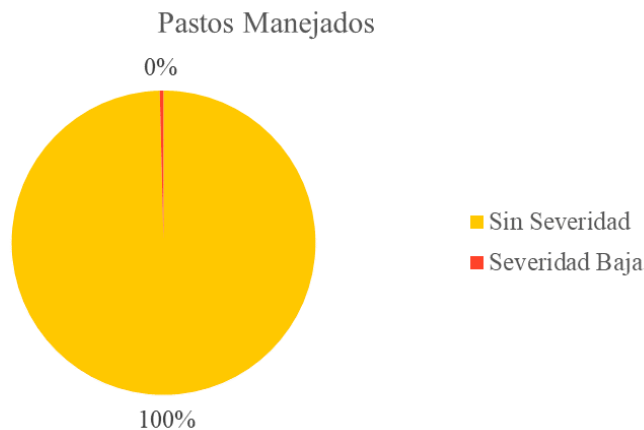
Figura 69. Análisis de Combustión de Pajonales



Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Para esta cobertura se observa similares proporciones entre los valores de no severidad y de severidad moderada, sin embargo, es mayor los casos de eventos que han afectado la vegetación en diferentes categorías de daño. Para severidad alta, solo el 5% de estos han sido impactados.

Figura 70. Análisis de Combustión de los Pastos Manejados



Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Al igual que el Matorral Espinoso Tropical los Pastos Manejados tienen menor impacto por severidad de daños en combustión de biomasa.

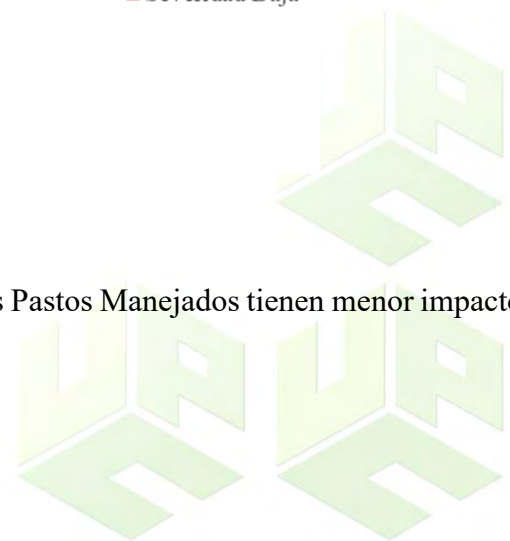
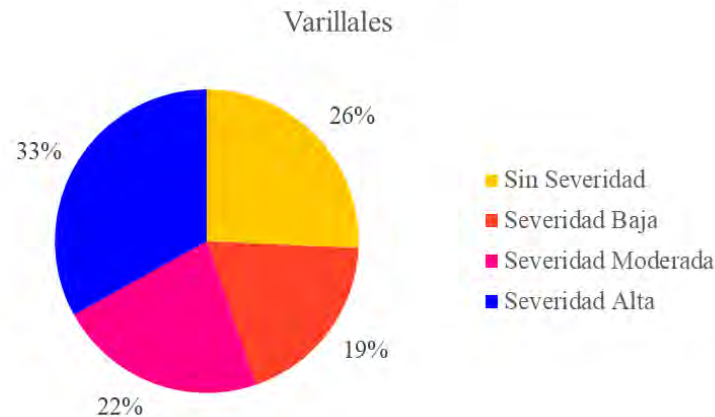


Figura 71. Análisis de Combustión de los Varillales



Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Este relicto es el que tiene mayor contenido de biomasa y por lo tanto tiene una distribución más enriquecida de las categorías de severidad. Por lo tanto, la severidad alta es mayor y es razonable, así como otras categorías como la moderada y la baja.

6.2.2. Análisis De Varianza De Los Indicadores Vegetativos

En principio, se planteó realizar Regresión Lineal Múltiple de la variable dependiente NRB respecto a las variables independientes NDVI, EVI, SIPI, SAVI, ARVI y GCI, sin embargo, se notaron diferencias claves en los datos y también en los aspectos de zonificación geográfica lo cual permitió definir que existen dos modelos de combustible para distintos aspectos de aporte, uno con base al estrés de la biomasa y otro respecto a la funcionalidad por variables físicas externas.

Las relaciones del ANOVA se hicieron para los valores de los indicadores y para los valores de los grupos de los indicadores, logrando significancia del modelo para este aspecto, consiguiendo que el valor crítico de la F-calculada sea menor que el de la F-tabulada a un 95% del intervalo de confianza del modelo de regresión lineal múltiple global. Los resultados se presentan a continuación:

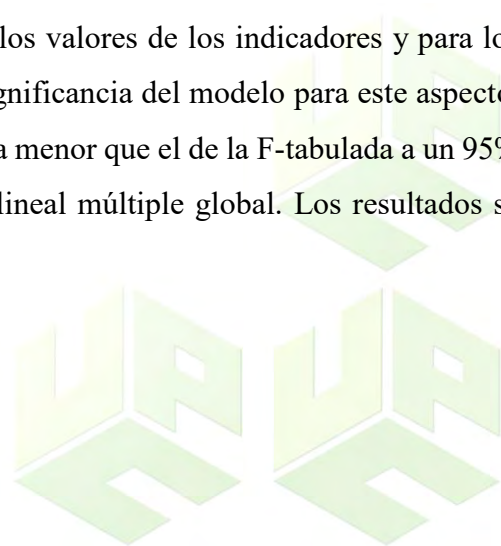


Figura 72. ANOVA Global

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Planta Muy Sana	6	6,908829	1,1514715	0,04656811
Planta Medianamente Sana	6	8,323573	1,387262167	0,05328744
Planta Enferma	6	9,709126	1,618187667	0,05009443
Especie Vegetal en Deceso	6	11,066658	1,844443	0,02668771

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1,60074464	3	0,533581548	12,0830738	9,82813E-05	3,098391212
Dentro de los grupos	0,88318843	20	0,044159421			
Total	2,48393307	23				

Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Por otra parte, al correlacionar las categorías para los indicadores EVI_2, SAVI y ARVI, se obtiene también significancia en el modelo de Regresión Lineal Múltiple:

Figura 73. ANOVA Indicadores EVI_2, SAVI y ARVI

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Planta Muy Sana	3	3,085656	1,028552	0,00016055
Planta Medianamente Sana	3	3,641231	1,213743667	0,00338509
Planta Enferma	3	4,298018	1,432672667	0,0114801
Especie Vegetal en Deceso	3	5,151294	1,717098	0,01747147

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,79042374	3	0,263474581	32,4304318	7,94811E-05	4,066180551
Dentro de los grupos	0,06499441	8	0,008124301			
Total	0,85541815	11				

Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Así mismo, se realizó el ANOVA para los indicadores NDVI, GCI y SIPI, los resultados también fueron significativos para conformar y correlacionar los grupos evaluados, logran la aceptación al 95% del intervalo de confianza.

El resultado de la ANOVA para ese se presenta a continuación:

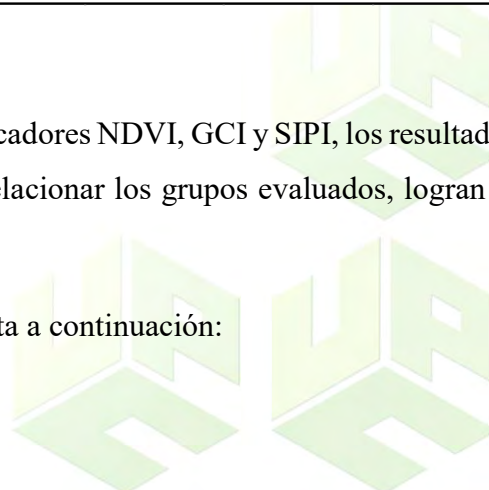


Figura 74. ANOVA Indicadores NDVI, GCI y SIPI

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Planta Muy Sana	3	3,823173	1,274391	0,07093211
Planta Medianamente Sana	3	4,682342	1,560780667	0,03950749
Planta Enferma	3	5,411108	1,803702667	0,01050854
Especie Vegetal en Deceso	3	5,915364	1,971788	0,00059756

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,82855745	3	0,276185816	9,08911865	0,005893553	4,066180551
Dentro de los grupos	0,24309139	8	0,030386424			
Total	1,07164884	11				

Nota: Elaborado por los Autores (2022)

6.2.3. Regresión Múltiple De Los Indicadores Vegetativos

Consiguiendo esto se procedió a realizar la Regresión Lineal Múltiple para constituir los modelos de combustible. El modelo de combustible 1 (creado a partir del EVI_2, SAVI y ARVI) presentó el siguiente resultado:

Figura 75. Regresión Lineal Múltiple del Modelo de Combustible N°1

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	1
Coefficiente de determinación R ²	1
R ² ajustado	65535
Error típico	0
Observaciones	4

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0,268585954	0,089528651	1,36612E-06	0
Residuos	0	0	65535		
Total	3	0,268585954			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	-0,087169509	0	65535	0	-0,08716951	-0,087169509	-0,087169509	-0,087169509
EVI_2	-2,554292171	0	65535	0	-2,55429217	-2,554292171	-2,554292171	-2,554292171
SAVI	0,499654924	0	65535	0	0,499654924	0,499654924	0,499654924	0,499654924
ARVI	3,118217101	0	65535	0	3,118217101	3,118217101	3,118217101	3,118217101

Nota: Elaborado por los Autores (2022)



Se obtienen probabilidades inferiores a $\alpha = 0,05$, lo que indica significancia en la construcción de un modelo regresional con los coeficientes.

El modelo de combustible N°1 está representado por la siguiente ecuación:

$$NBR = -0,0871695089519431 + (-2,55429217115122)*EVI_2 + (0,499654924019293)*SAVI + (3,11821710106315)*ARVI$$

Por otra parte, se tiene el resultado para construir la Regresión Lineal Múltiple para constituir El modelo de combustible 2 (creado a partir del NDVI, GCI y SIPI) presentó el siguiente resultado:

Figura 76. Regresión Lineal Múltiple del Modelo de Combustible N°2

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	1
Coefficiente de determinación R ²	1
R ² ajustado	65535
Error típico	0
Observaciones	4

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0,268585954	0,089528651	1,36612E-06	0
Residuos	0	0	65535		
Total	3	0,268585954			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	2,023532231	0	65535	0	2,023532231	2,023532231	2,023532231	2,023532231
NDVI	0,160299162	0	65535	0	0,160299162	0,160299162	0,160299162	0,160299162
GCI	1,545767473	0	65535	0	1,545767473	1,545767473	1,545767473	1,545767473
SIPI	-1,842900451	0	65535	0	-1,842900451	-1,842900451	-1,842900451	-1,842900451

Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Se obtienen probabilidades inferiores a $\alpha = 0,05$, lo que indica significancia en la construcción de un modelo regresional con los coeficientes.

El modelo de combustible N°2 está representado por la siguiente ecuación:

$$NBR = 2,02353223062401 + (0,160299161764372)*NDVI + (1,54576747267017)*GCI + (-1,84290045076833)*SIPI$$

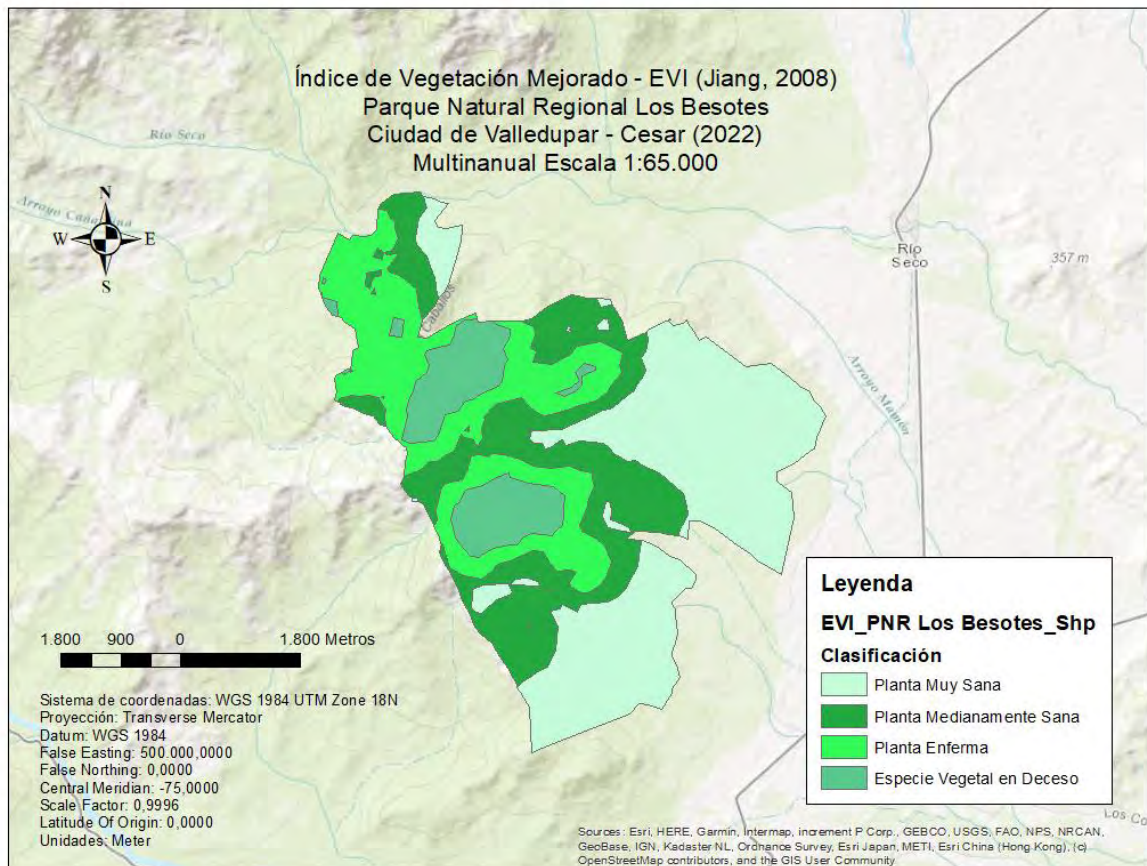
Los dos modelos de combustible creados fueron llevados e implementados en el Sistema de Información Geográfico ArcMap, con los cuales se desarrollaron los mapas de mayor probabilidad de ocurrencia de incendios categorizados por el grado de severidad.

6.3. ZONIFICACIÓN DEL MODELO DE COMBUSTIBLE FORESTAL DEL PARQUE NATURAL REGIONAL LOS BESOTES PARA LA SIMULACIÓN DE PROPAGACIÓN DE INCENDIOS COMO INDICADOR DE ALERTA TEMPRANA

6.3.1. Mapas De Los Indicadores Vegetativos

En esta sección del proyecto se hace la presentación cartográfica de los indicadores vegetativos en escala 1:65.000. El orden de presentación será correspondiente así: primero los indicadores que conformaron el modelo de combustible 1, EVI_2, SAVI y ARVI.

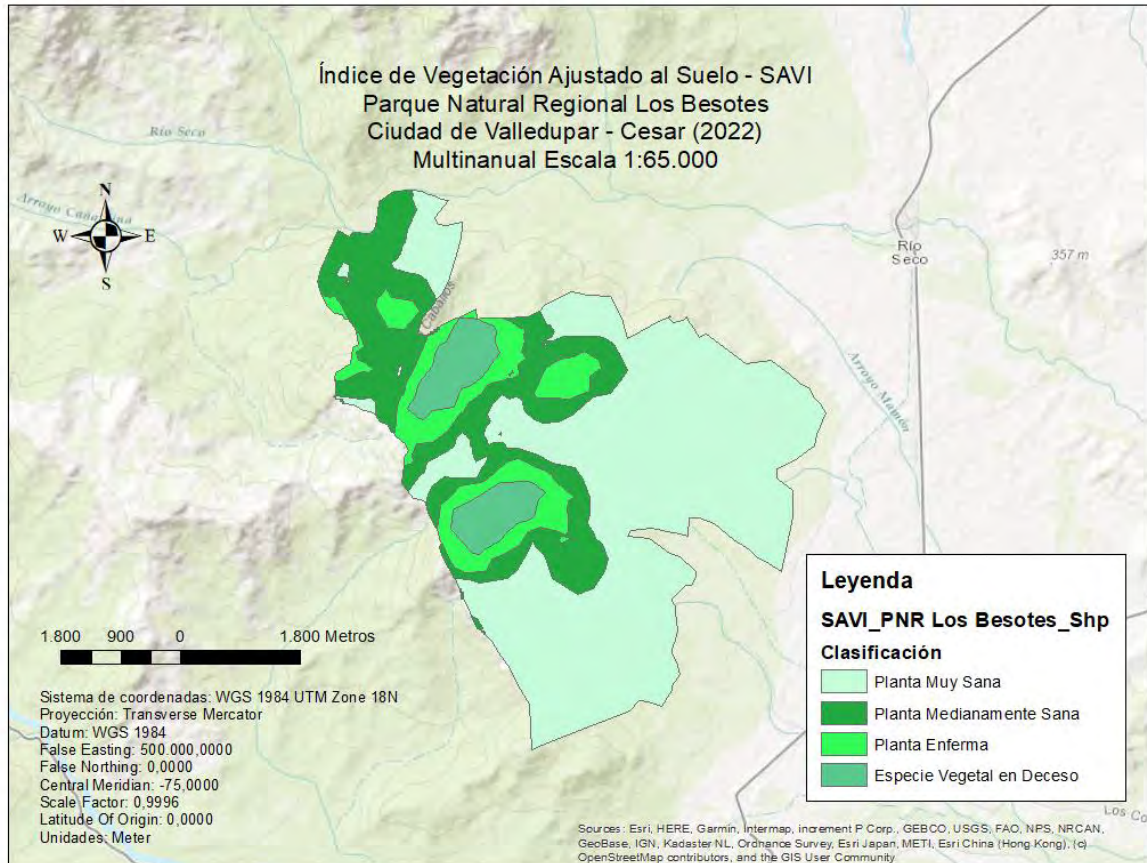
Figura 77. Representación Geográfica del Índice de Vegetación Mejorado – EVI de Jiang del Parque Natural Regional Los Besotes



Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Es de mencionar que la apariencia de extensión de una clase respecto a las otras puede ser irreal, ya que el modelo contempla la geofoma del terreno lo que permite cambiar la realidad que se observa. Esta consideración se tuvo en cuenta para esta investigación.

Figura 78. Representación Geográfica del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo – SAVI del Parque Natural Regional Los Besotes

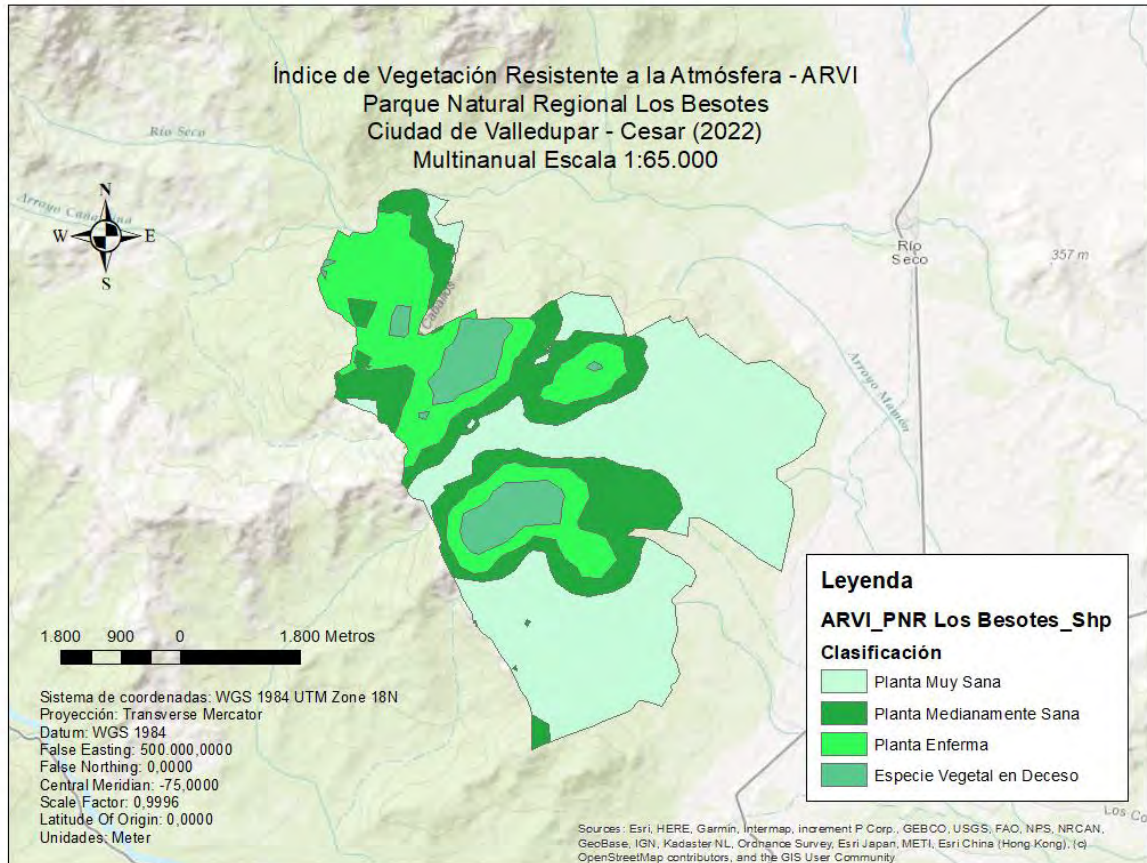


Nota: Elaborado por los Autores (2022)

La primera relación es la similitud que existen entre la zonificación de las clases categóricas, que fue el primer indicio que se tuvo para poder definir que existían dos modelos de combustibles diferentes y que estos razonaban en las consideraciones de variables físicas externas que pueden incidir en la definición del modelo.

Además, siendo que estos tres primeros indicadores tuvieron más influencia en la definición del índice vegetativo, considerando que este último incluyó la variable del Índice de Calcinación Normalizado – NBR, por lo tanto, se considera que este primer modelo tiene una significancia particular para explicar hasta el 14% de la variación de los eventos o situaciones combustibles en la zona de estudio, dato estadístico obtenido de los análisis de relación practicado en la primera fase de esta investigación,

Figura 79. Representación Geográfica del Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – ARVI del Parque Natural Regional Los Besotes

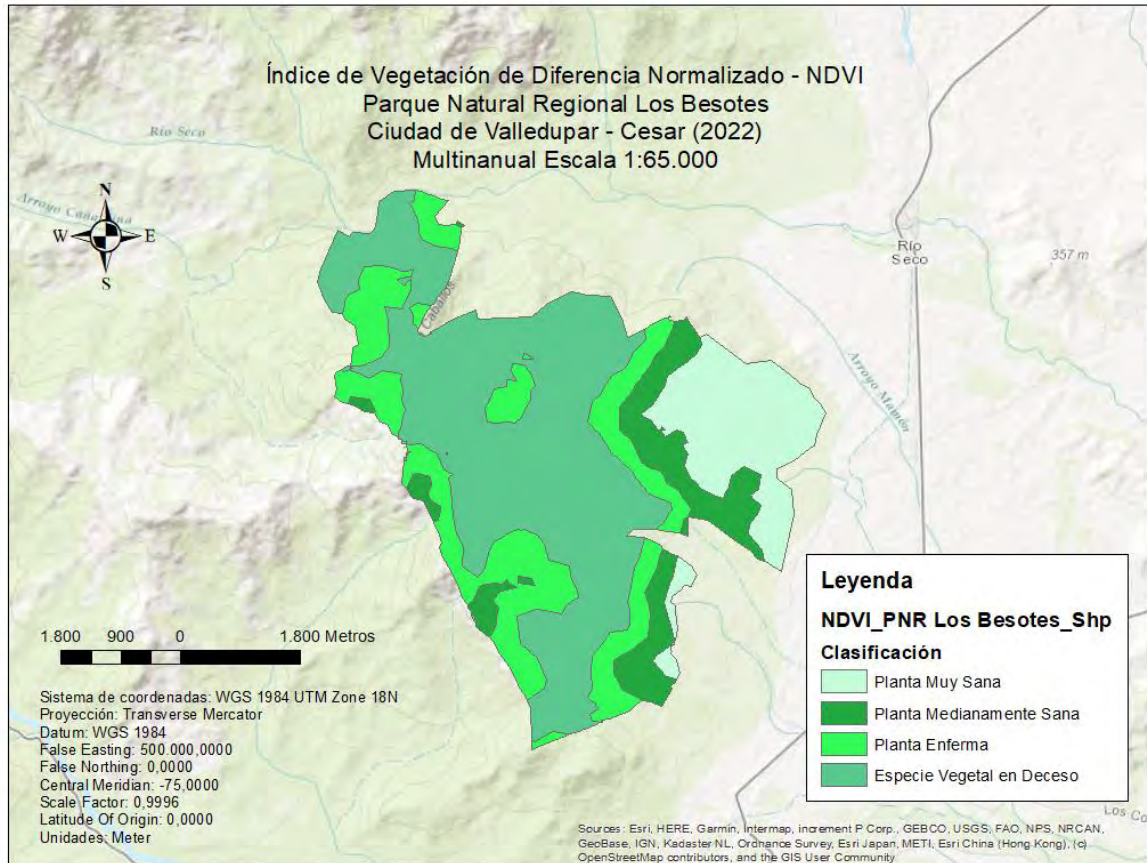


Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Otra característica que se resalta de este primer modelo es que al incluir variables físicas en sus fórmulas matemáticas de aplicación también concentran gran información en zonas correlativamente especiales y difícil acceso por su topografía y pendientes agrestes, esto, en parte también tiene un significado importante porque la mayoría de los eventos se han propagado con mayor frecuencia en esas zonas de distribución donde es posible encontrar plantas más enfermas.

Por otra parte, los Indicadores sobrantes, NDVI, GCI y SIPI, constituyeron el segundo modelo de combustible del Parque Natural Regional Los Besotes, la representación de ellos se presenta a continuación:

Figura 80. Representación Geográfica del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado – NDVI del Parque Natural Regional Los Besotes

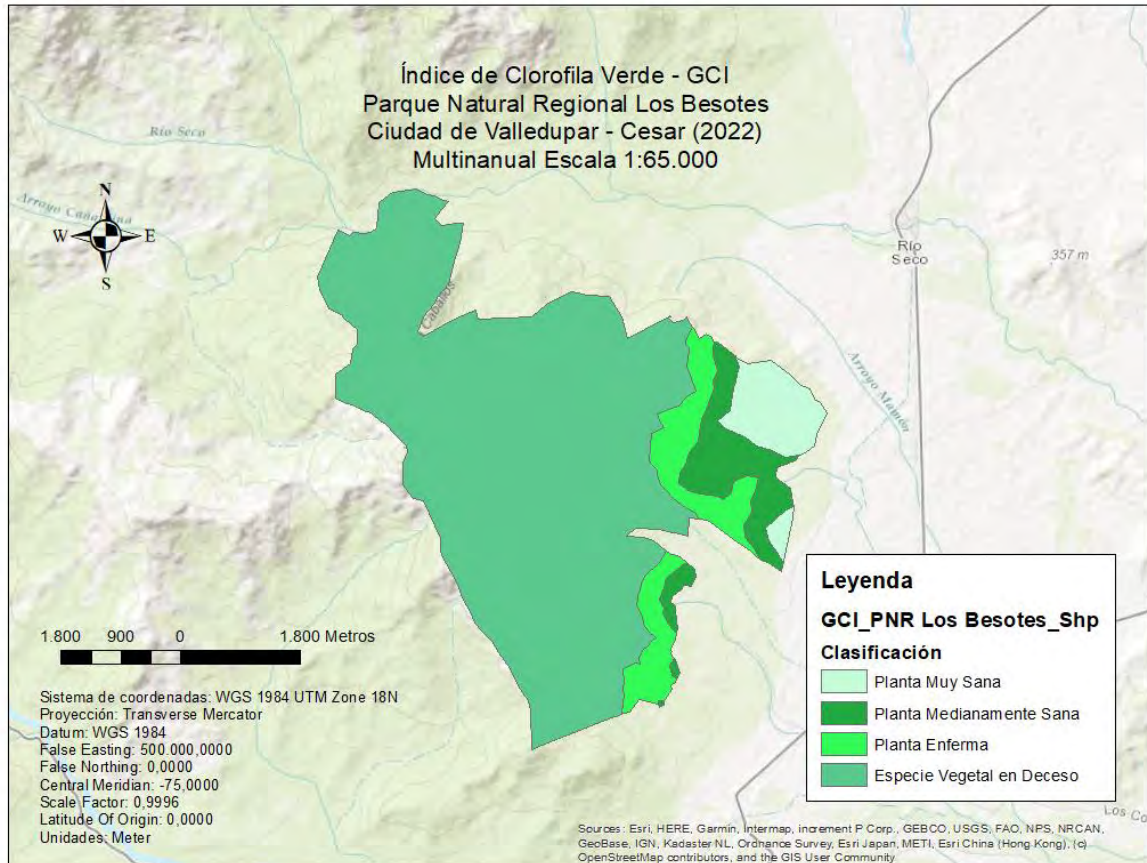


Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Si bien, al comparar con las figuras anteriores, el NDVI al igual que el GCI y el SIPI (como se apreciarán) difieren en las distribuciones de la zonificación de sus clases categóricas, concentrando una gran extensión de especie vegetal en deceso explicando mayoritariamente el área de estudio.

Además, la razón por la cual son congruentes es que estos indicadores no consideran variables físicas en sus fórmulas, sino que utilizan netamente las bandas del satélite para analizar la concentración de clorofila y carotenoides en la vegetación, explicando así desde otro punto de vista funcional mayores áreas de afectación ante posibles inminentes devastaciones por incendios.

Figura 81. Representación Geográfica del Índice de Clorofila Verde – GCI del Parque Natural Regional Los Besotes

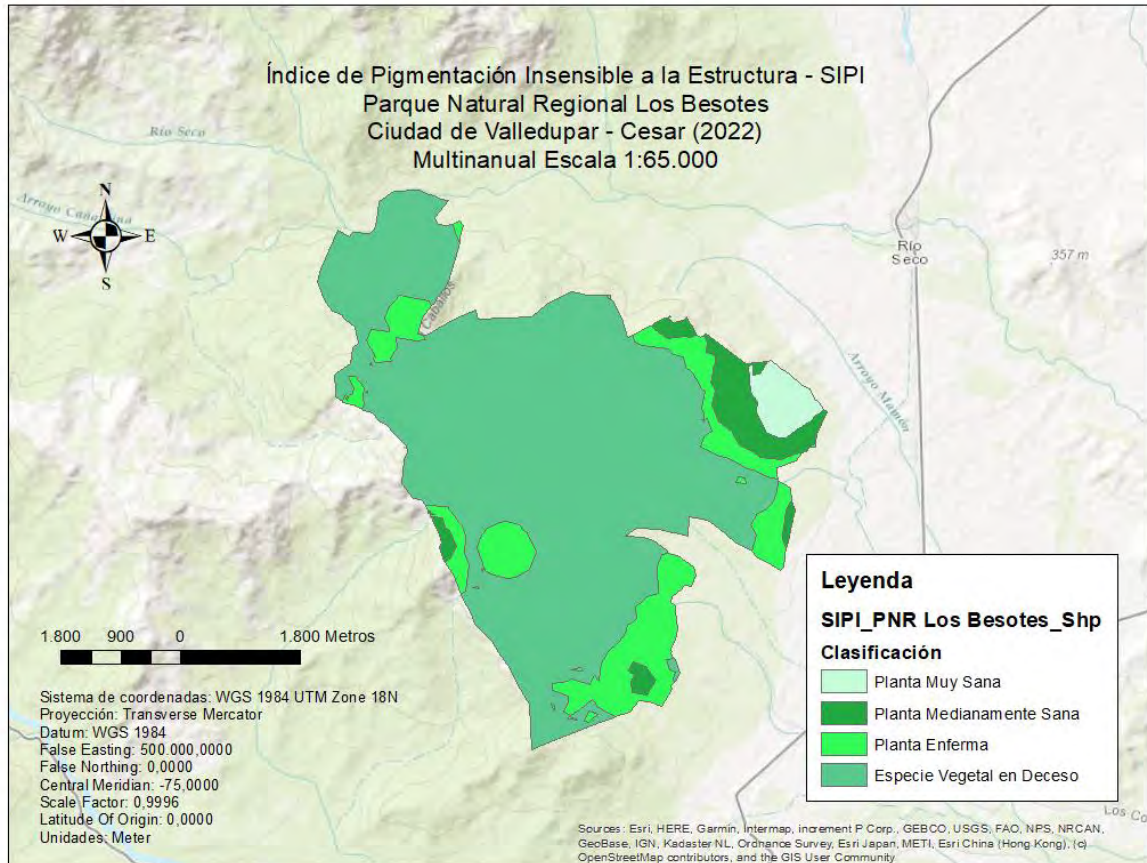


Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Así mismo, indicadores como el GCI parecen no explicar correctamente la situación de la vegetación del Parque Natural Regional Los Besotes, puesto que las extensiones representadas son poco variables y se concentran en curvas de nivel conforme a la tendencia de la pendiente de los cerros que se integran en esta área.

Esto en principio llevó a la investigación para tratar de comprender el porqué del resultado tan sugerente, pero no se encontró una explicación que pudiera justificar a los autores del porque adopta esta tendencia y forma, lo que en parte llevó a repensar si considerarlo o no, pero para solventar dudas en futuras investigaciones se presenta y se integra en el modelo.

Figura 82. Representación Geográfica del Índice de Pigmentación Insensible a la Estructura – SIPI del Parque Natural Regional Los Besotes



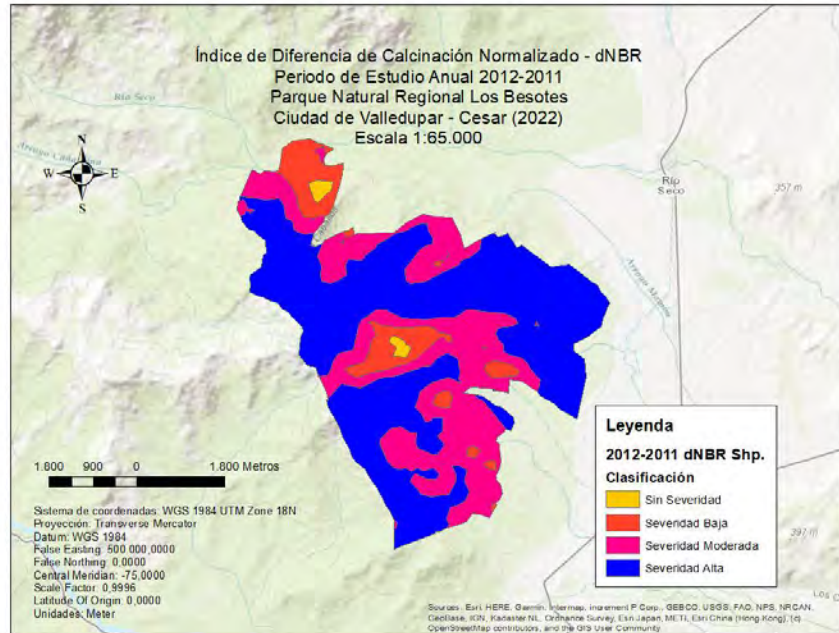
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Finalmente, se presenta el SIPI, el cual si tiene una particularidad más congruente con el NDVI que a diferencia del GCI coincide en características de distribución.

Posteriormente de elaborado estos indicadores se llevó a cabo la construcción individual y diferenciada del Índice de Calcinación Normalizado (dNBR) para el periodo de estudio 2011 a 2020.

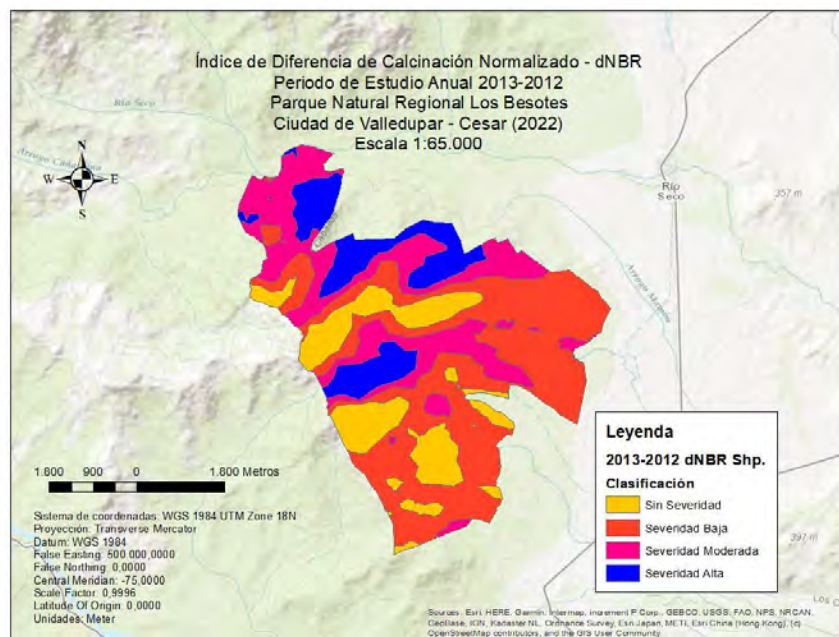
Estas figuras que está a punto de observar son la representación de como cambiaban los eventos de calcinación vegetal, la distribución atípica y sin tendencia fortifica los resultados ya que los incendios no tienen una distribución espacial longitudinal específica; que, por el contrario, son incididos por variables físicas y meteorológicas. Cada imagen será presentada sin un encabezado o pie de página ya que solo explica los eventos.

Figura 83. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2011-2012



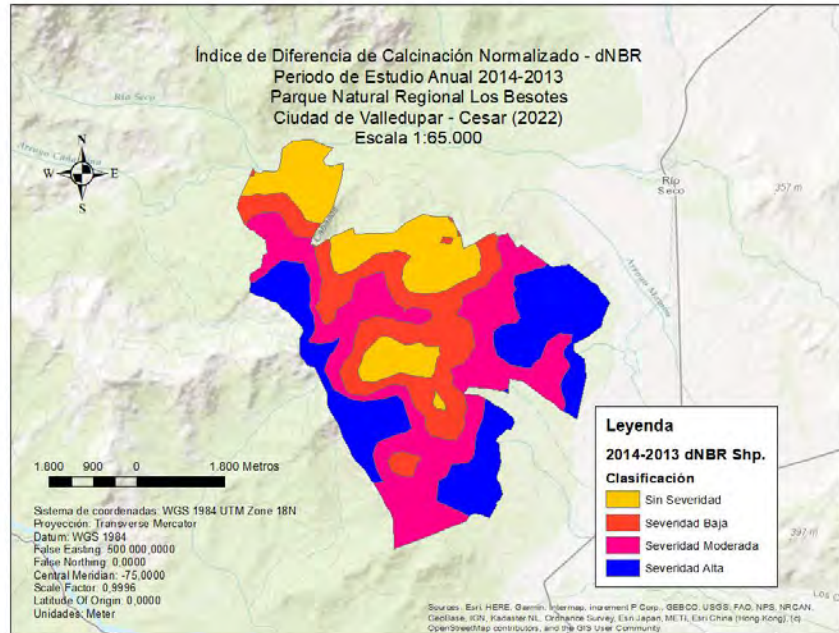
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Figura 84. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2012-2013



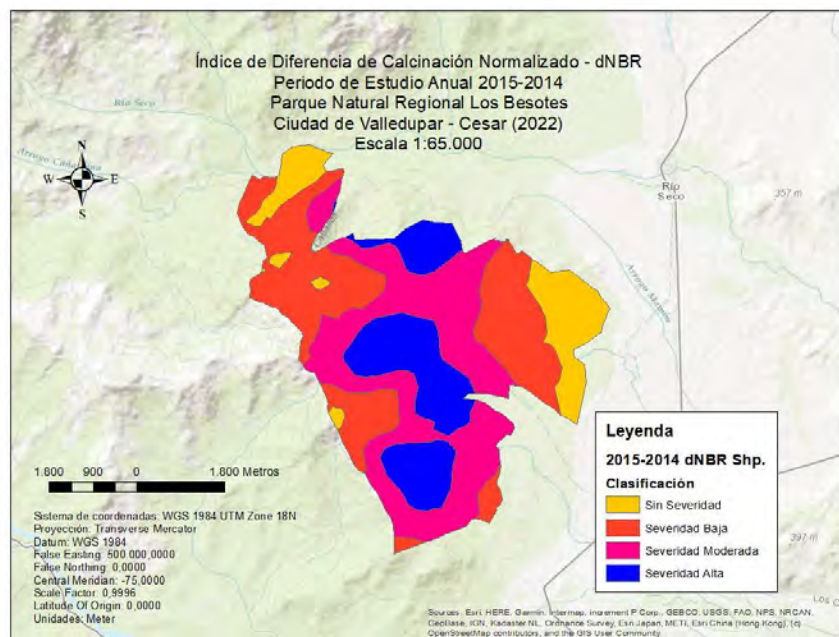
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Figura 85. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2013-2014



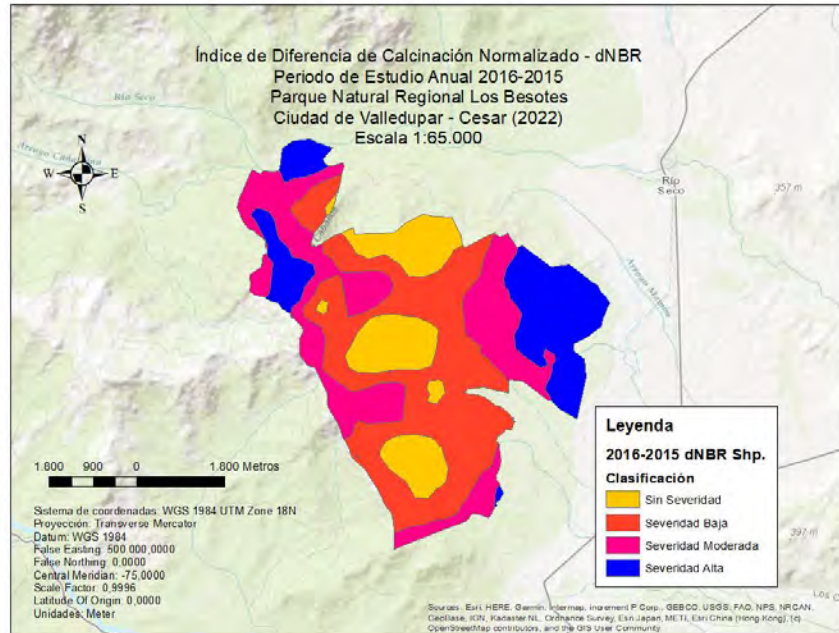
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Figura 86. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2014-2015



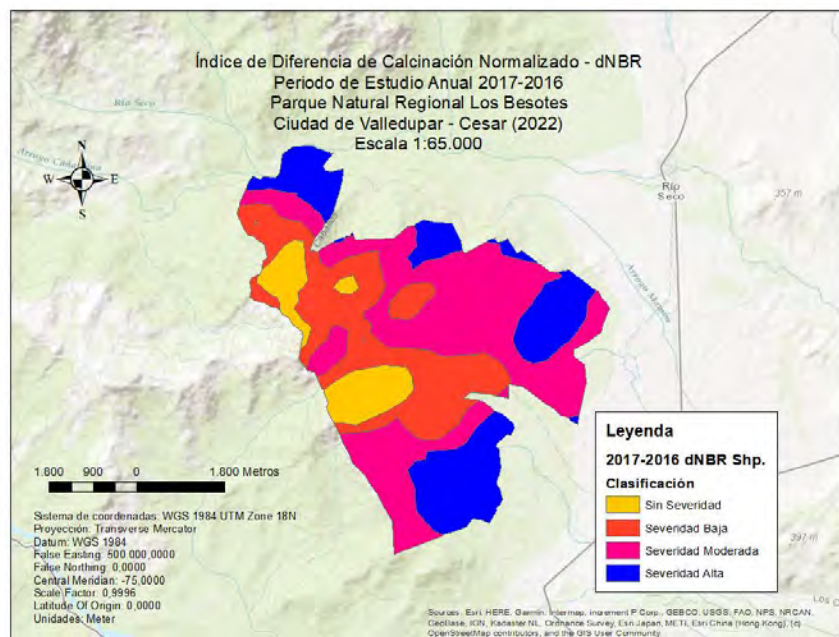
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Figura 87. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2015-2016



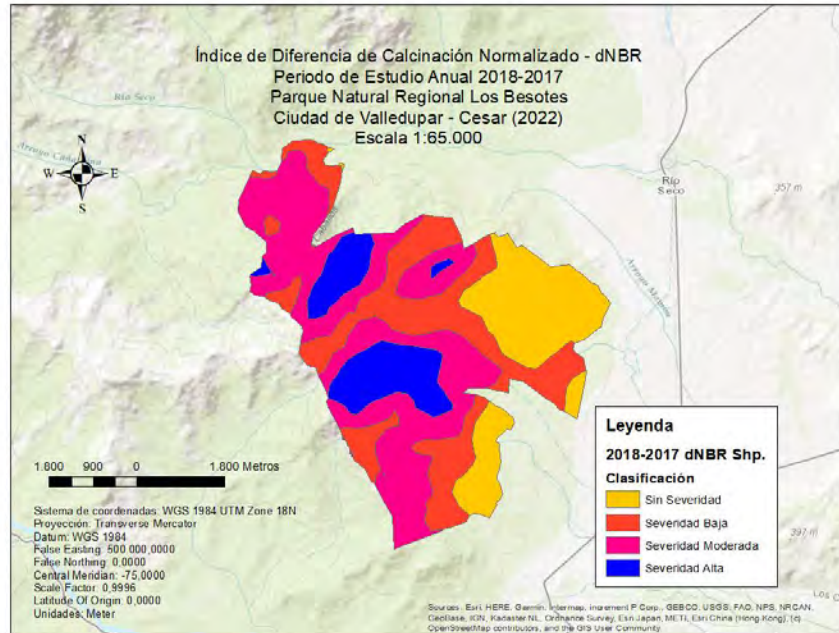
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Figura 88. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2016-2017



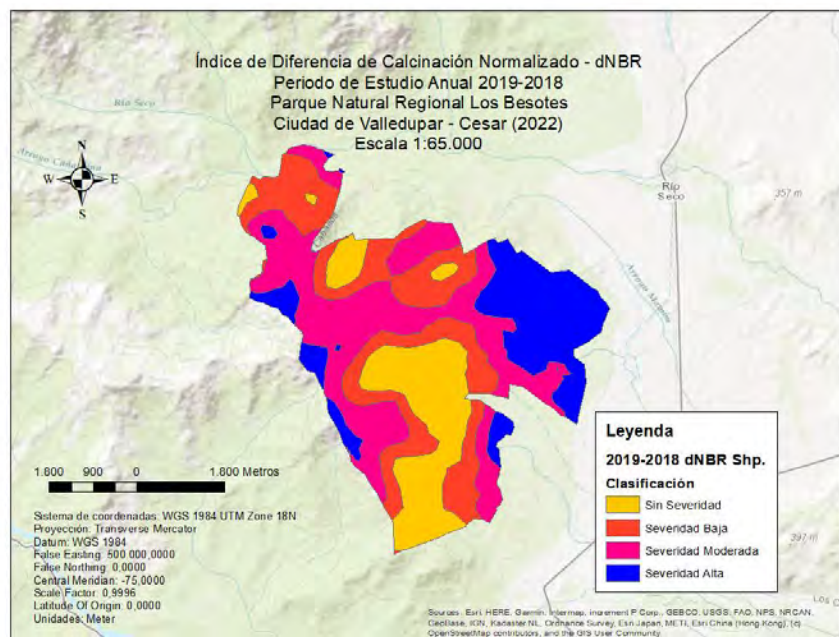
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Figura 89. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2017-2018



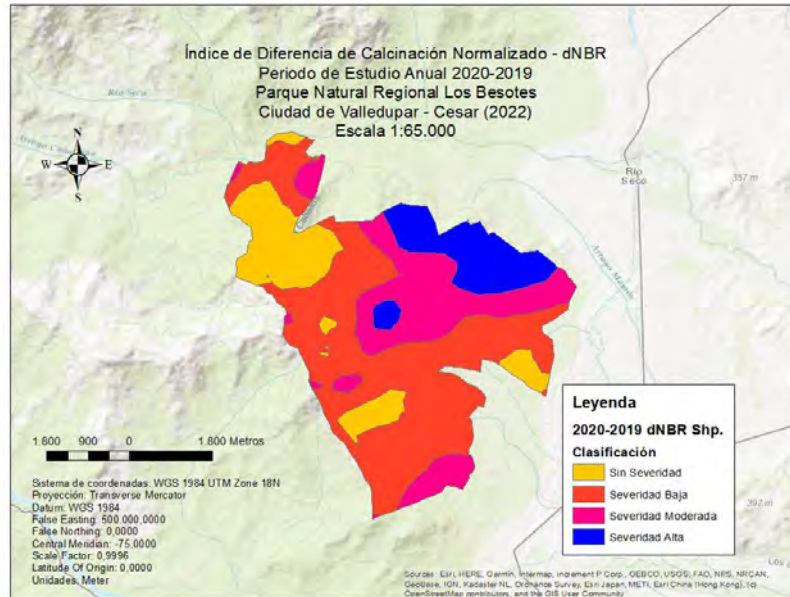
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Figura 90. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2018-2019



Nota: Elaborado por los Autores (2022)

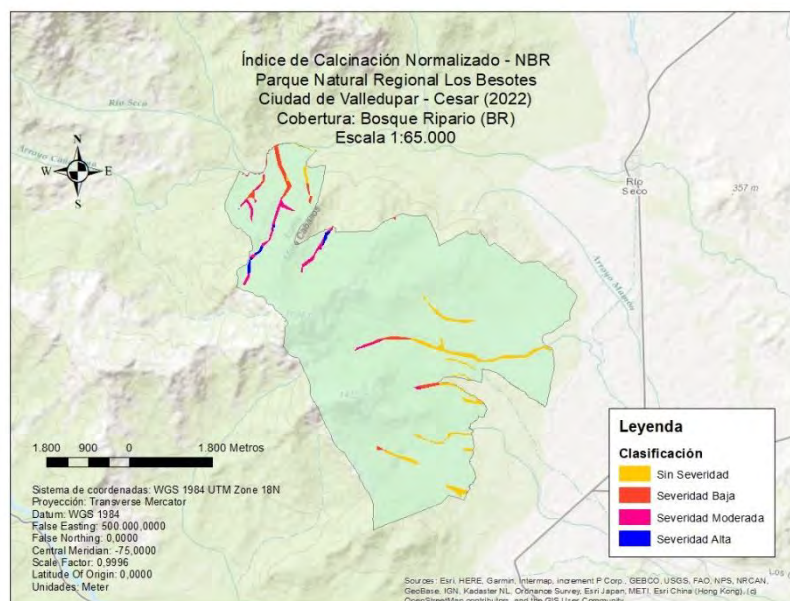
Figura 91. Representación Geográfica del Índice de Diferencia de Calcinación Normalizado – dNBR del Parque Natural Regional Los Besotes periodo 2019-2020



Nota: Elaborado por los Autores (2022)

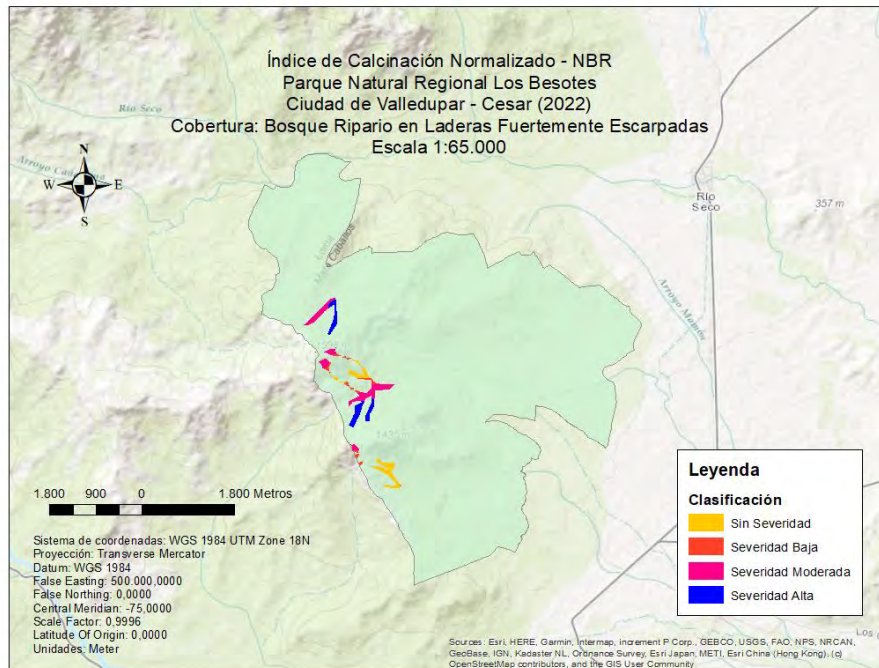
Seguido acto, se presenta el NBR para cada una de las clases vegetativas y su distribución para las categorías de Vegetación analizadas.

Figura 92. NBR para cobertura de Bosque Ripario



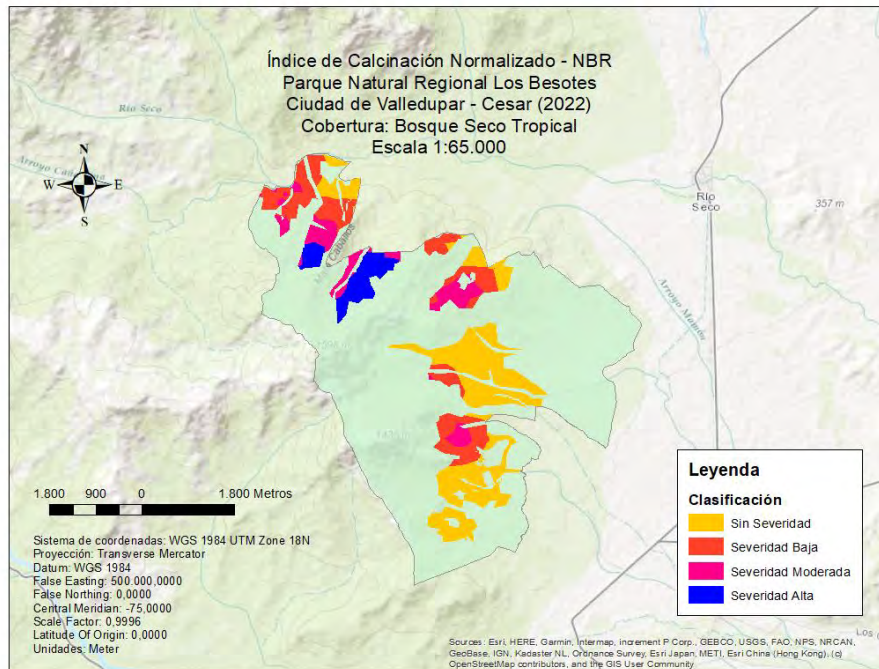
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Figura 93. NBR para cobertura de Bosque Ripario en Laderas Fuertemente Escarpadas



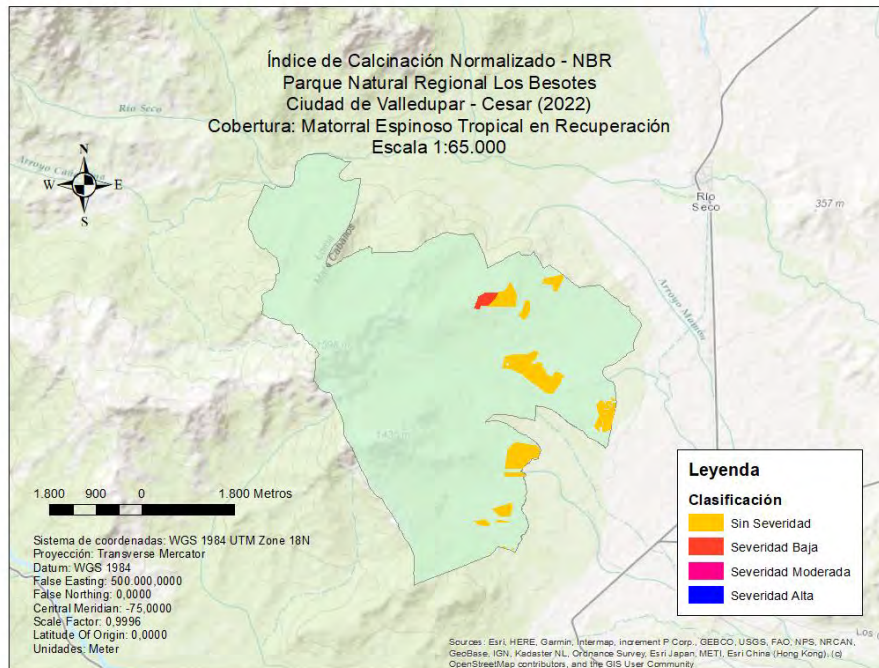
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Figura 94. NBR para cobertura de Bosque Seco Tropical



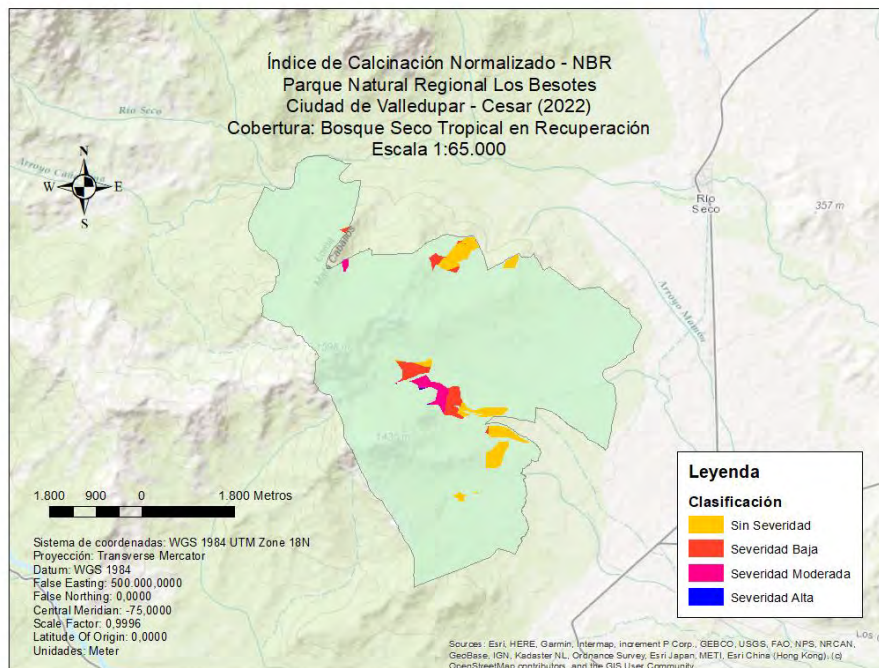
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Figura 95. NBR para cobertura de Matorral Espinoso Tropical en Recuperación



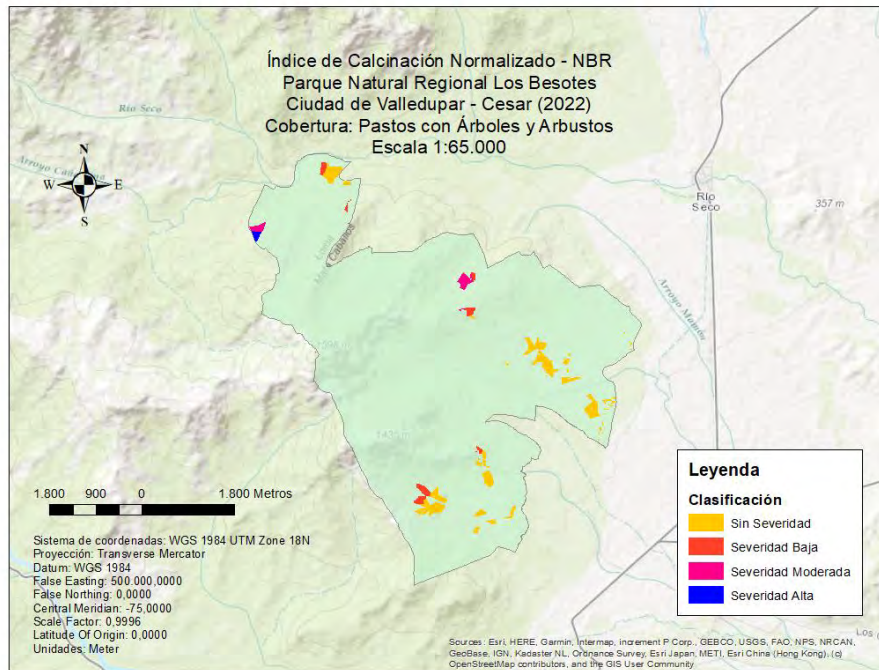
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Figura 96. NBR para cobertura de Bosque Seco Tropical en Recuperación



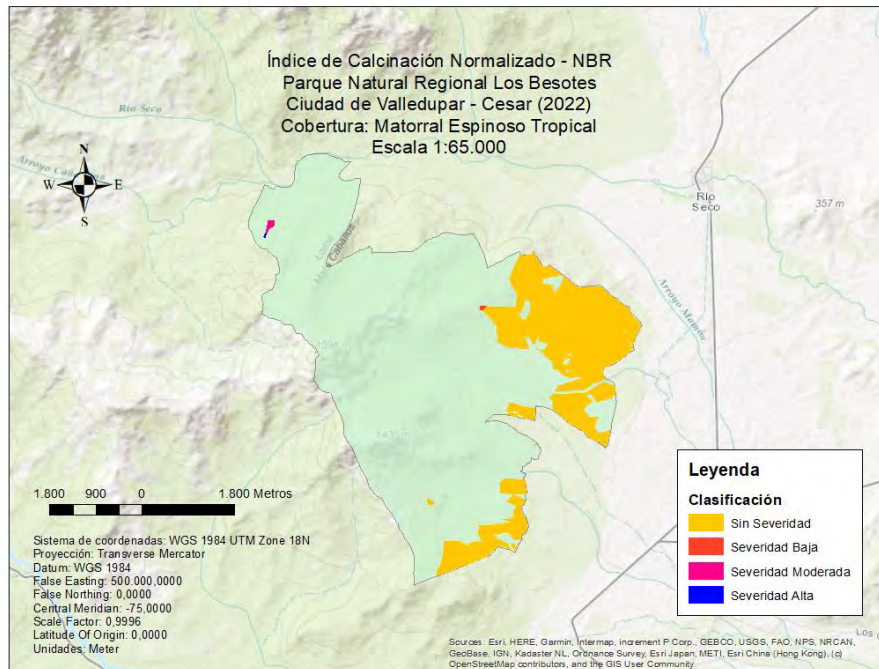
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Figura 97. NBR para cobertura de Pastos con Árboles y Arbustos



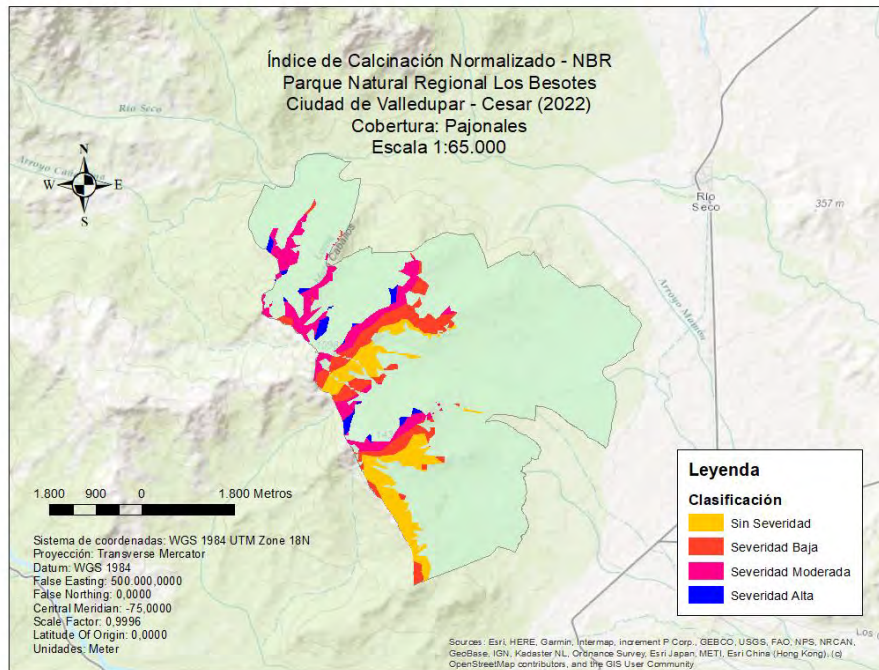
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Figura 98. NBR para cobertura de Matorral Espinoso Tropical



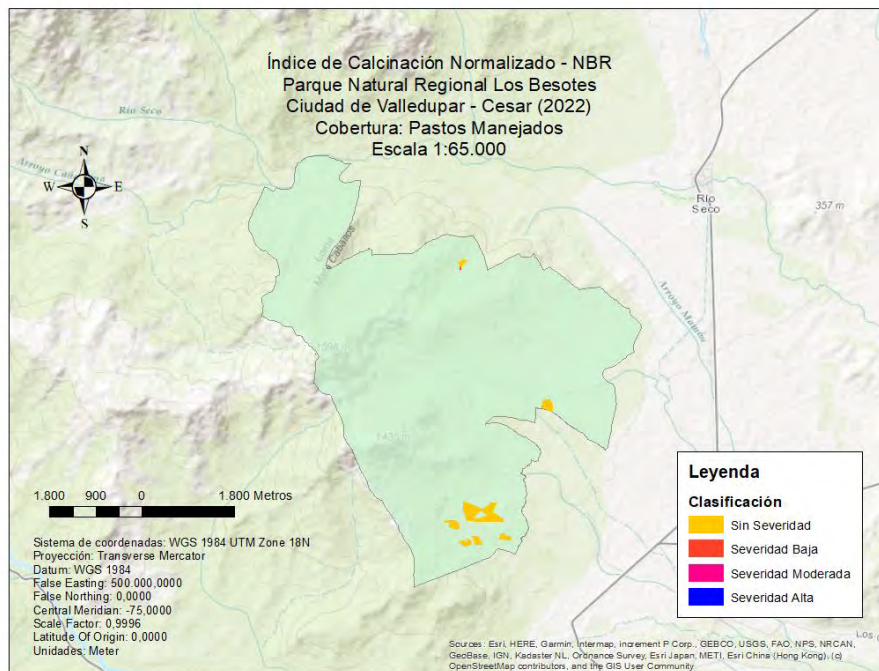
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Figura 99. NBR para cobertura de Pajonales



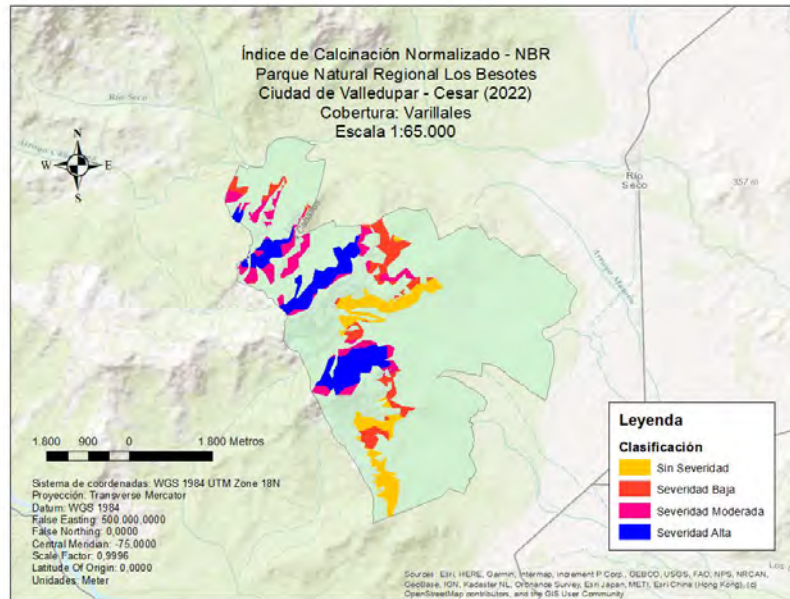
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Figura 100. NBR para cobertura de Pastos Manejados



Nota: Elaborado por los Autores (2022)

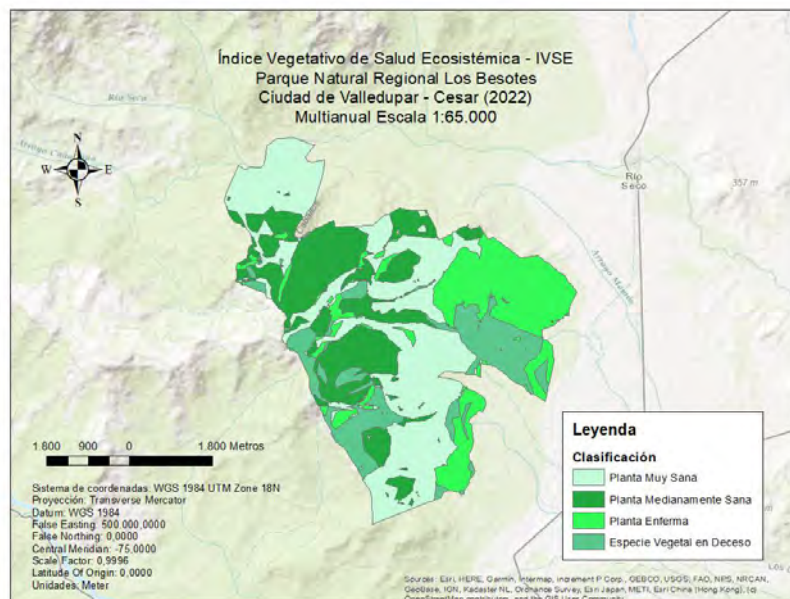
Figura 101. NBR para cobertura Varillales



Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Definido esto se obtuvo el índice de salud ecosistémico, considerando los índices vegetativos y los indicadores NBR para cada cobertura. El resultado fue el siguiente:

Figura 102. Representación Geográfica del Índice Vegetativo de Salud Ecosistémica – IVSE del Parque Natural Regional Los Besotes

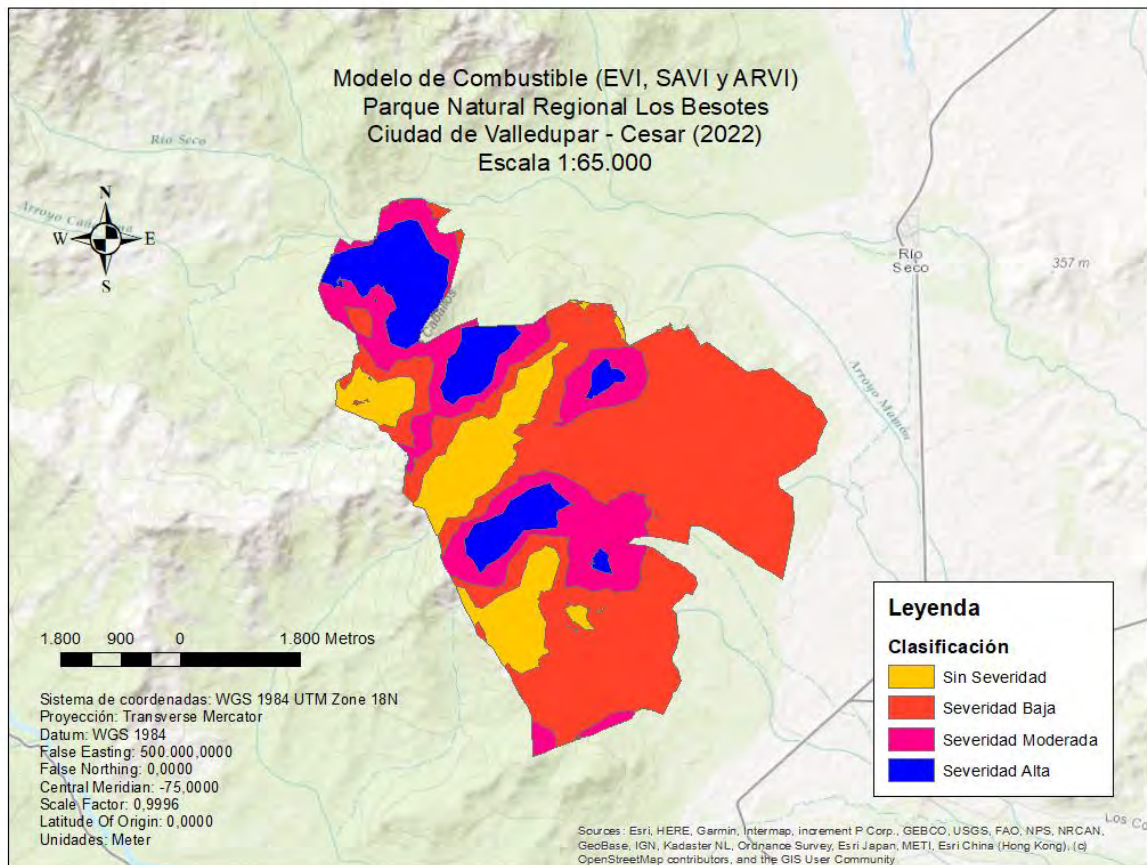


Nota: Elaborado por los Autores (2022)

6.3.2. Mapas Del Modelo De Combustible

Utilizando las fórmulas del Modelo Matemático de Combustible 1 (creado a partir del EVI_2, SAVI y ARVI) y fue formulado en el Sistema de Información Geográfico, el resultado fue el siguiente:

Figura 103. Modelo de Combustible (EVI, SAVI y ARVI)



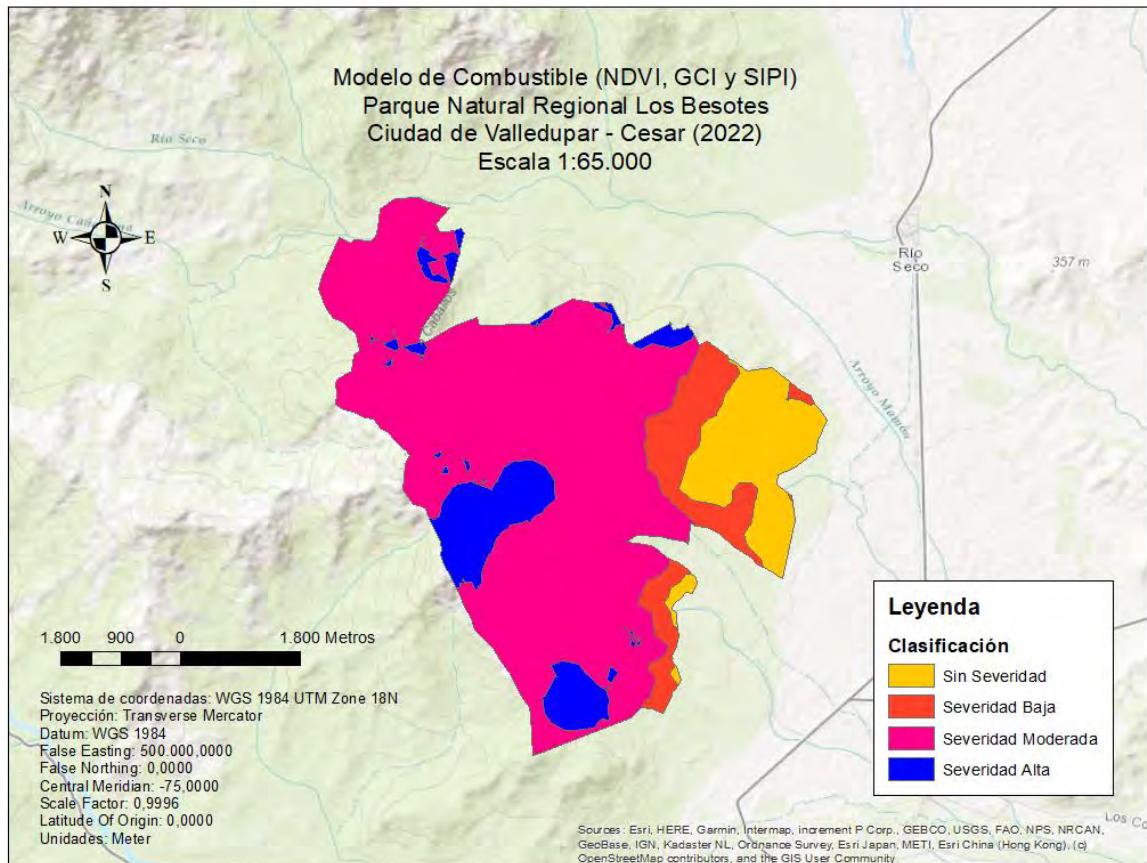
Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Como se aprecia en la figura anterior, la mayoría de la extensión del polígono se caracteriza porque puede ser clasificado como Severidad Baja y existen zonas que son congruentes con los escarpados lugares del piso altitudinal y térmico más elevado en el Parque Natural Regional Los Besotes.

Así mismo, las zonas de severidad alta se encuentran en sitios con referentes y antecedentes de eventos sucedidos, por lo cual, se puede decir que este modelo es más coherente con lo esperado.

Por otra parte, y utilizando las fórmulas del Modelo Matemático de Combustible 2 (creado a partir del NDVI, GCI y SIPI) y fue formulado en el Sistema de Información Geográfico, el resultado fue el siguiente:

Figura 104. Modelo de Combustible 2 (NDVI, GCI y SIPI)



Nota: Elaborado por los Autores (2022)

Por otra parte, el modelo de combustible 2 tiene una correspondencia con la tendencia de la pendiente y distribuye las zonas con ese enfoque, localizando las zonas sin severidad en las partes más bajas del parque y las zonas de mayor severidad en las partes más elevadas del parque y mayoritariamente predomina la severidad moderada, que no se distancia de la realidad observable por consecuencia de los eventos comburentes.

De esta manera se da por cumplido los objetivos de esta investigación y se procede a dar conclusiones y recomendaciones que ayuden a complementar y mejorar el resultado de este valioso e importante trabajo.

7. CONCLUSIONES

Para el desarrollo de esta investigación se cumplieron tres objetivos específicos llevados a cabo en fases metodológicas de trabajo, comenzando por determinar la salud ecosistémica del Parque Natural Regional Los Besotes. Los autores hicieron la recopilación y expresión de la información de insumo mediante la plataforma EarthExplorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos de América, coleccionando información de 10 años y principalmente de los meses febrero y marzo, los cuales son los que más eventos de combustión han registrado para esta zona. La plataforma escogida fue el satélite Landsat 7 ETM+ C2 L1.

En complemento a esto se procedió a realizar la aplicación de los índices NDVI, EVI, ARVI, SAVI, GCI, SIPI, NBR y dNBR conforme a las formulaciones y para la mayoría fue correcta su aplicación, sin embargo, para el EVI hubo inconsistencias con los datos y sobre todo por los problemas de bandeado que este satélite presentó, para lo cual fue empleado el EVI de Jung. Esto se completó de manera exitosa logrando setenta imágenes ya que se trabajó con el lapso 2011 y 2020.

Los resultados fueron estandarizados siguiendo la distribución del espectro electromagnético y categorizados en cuatro clases: Planta muy sana, Planta medianamente sana, Planta enferma y Especie vegetal en deceso, para posteriormente realizar la sumatoria ponderada de factores con la cual se obtuvo el indicador de salud ecosistémico, logrando encontrar la zonificación que explicaba que las plantas más enfermas y en deceso se localizan en zonas donde se han producido focos incendiarios. Se encontraron coincidencias de zonificación que fueron fundamentales para la creación del modelo de combustible. Con esto se dio cumplimiento al primer objetivo de la investigación.

En la segunda fase metodológica se evaluó que los resultados pudieran ser correlacionados entre sí y si era factible combinarlos por indicadores o por categorías, sin embargo, se identificaron que se conformaban dos grupos, uno para los indicadores NDVI, GCI y SIPI y otro para EVI_2, ASVI y SAVI siendo significativos al Análisis de Varianza (ANOVA), por lo cual se crearon dos modelos de combustible mediante Regresión Lineal Múltiple, obteniendo un resultado con $p\text{-value} < 0,05$ alpha y con coeficientes de correlación igual a la unidad, lo que permite explicar correctamente todos los datos como se esperaba.

También se obtuvo el NBR multianual, el cual fue establecido para las once coberturas vegetales identificadas, conociendo que los Varillales y los Bosques Secos y Riparios de alta montaña son los que tienen mayor combustión por consecuencia de conflagraciones. De esta manera se da por cumplido el segundo objetivo de la investigación.

Finalmente, se realizaron las zonificaciones de los indicadores vegetativos NDVI, EVI, ARPI, SAVI, GCI, SIPI y dNBR así como la del Indicador Vegetativo. De los primeros, los autores hacen comentarios y relaciones de las explicaciones naturales individuales de los indicadores vegetativos y como resulta más factible considerar el primer modelo de combustión como el idóneo, ya que contiene variables físicas externas que pueden incidir en la posible distribución de los penachos incendiarios sobre la cobertura. Se presentaron los dos modelos de combustión y se dieron explicaciones de las ventajas de uno sobre el otro y con esto se dio por finalizado la investigación, completando así el tercer y último objetivo de esta investigación.



8. RECOMENDACIONES

Es importante ir a campo y verificar los resultados comparándolo con los obtenidos en esta investigación, por lo cual, sería la principal recomendación a proponer, por encima de las otras posibles. Sin embargo, también es posible:

Contar con información digital mucho más preparada y diseñada para el propósito de este trabajo, bien sea, adquirir la información de plataformas digitales que hay hecho un tratamiento a las imágenes y además que tengan una resolución menor, que permita mejorar la precisión del trabajo, el sesgo investigativo y el error de la experimentación.

Por otra parte, los indicadores vegetativos son diversos y es recomendable que aquellos que consideren variables físicas sean tenidos en cuenta para perfeccionar el modelo de combustible, aunque en esta investigación se resalta que solo tres fueron eficaces también se menciona que hay otros más que pueden ponerse a prueba para la evaluación.

Es considerable que se proceda también a diseñar el proceso lógico que ayude a conocer a futuros investigadores como hacer esta construcción de Modelo de Combustible y extrapolarlo en otras áreas importantes, así mismo, considerando otros índices, pero también otros métodos de trabajo como pueden varias las sumatorias o multiplicaciones ponderadas y porcentuales que pudieren usarse.

Por otra parte, la Regresión Lineal Múltiple es una de las tantas maneras de construir una ecuación, se podría intentar crear un modelo logístico o probabilístico que ayuda eliminar los sesgos de la investigación cuantificable y reducir el error de forma notable, así mismo, pueden utilizarse método de comprobación mucho más precisos como los análisis de covarianza CANOVA entre otros diversos.

El resultado obtenido es netamente académico pero ayudaría a reforzar investigaciones aplicadas para resolver problemas en la gestión del riesgo del desastre por eventos de conflagración ya que con el uso de la tecnología y la ciencia se podría integrar un proceso sólido que ayude a la toma de decisiones y construcción de políticas relacionadas a este aspecto de interés.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHS. (1992). *Prevención de Riesgos en Combate de Incendios Forestales*. Chile:Achs.
- ARL SURA. (2017). *Glorasio SURA*. Servicio de Afiliación de Riesgos, Pensiones y Salud SURAMERICANA S.A.
- Congreso de Colombia. (2012). *Ley 1523 de 2021: Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones*. Bogotá D.C.: Congreso de la República.
- Congreso de la República. (1993). *Ley 99 de 1993: Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan .* Bogotá D.C.: Congreso de la República.
- Congreso de la República. (2000). *Ley 1333 de 2009: Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones*. Bogotá D.C.: Congreso de la República.
- Congreso de la República. (2000). *Ley 599 de 2000: por la cual se expide el Código Penal de Colombia*. Bogotá D.C.: Congreso de la República.
- CONPES. (2018). *CONPES 3947 de 2018: Estrategias de Actuación y Coordinación para reducir las afectaciones ante la eventual ocurrencia de un fenómeno de Variabilidad Climática: El niño 2018 - 2019*. Bogotá D.C.: Departamento Nacional de Planeación.
- CORPOCESAR. (2011). *Estudio Básico Para La Declaratoria De Un Área Natural Protegida En La Región De Los Besotes (Municipio De Valledupar) Y Formulación De Su Plan De Manejo*. Valledupar.
- CORPOCESAR. (2011). *Mapa de Riesgo por Incendios Forestales en el Departamento del Cesar*. Valledupar, Cesar: INGORMAP LTDA.

CORPOCESAR. (2016). *Más de \$348 Millones costó el control de incendio Forestal del Parque Natural regional los Besotes*. Valledupar: Corporación Autónoma Regional del Cesar.

Cuenca C., S. (2019). *Determinación Del Potencial Hídrico Foliar En Cultivos, Mediante La Aplicación De Técnicas De Teledetección Bajo Análisis De Índices De Vegetación, Proporcionados Por Un Sensor Multiespectral Ubicado En Un Drone*. Neiva, Huila: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Diario El Pilón. (06 de Diciembre de 2016). *El Parque Natural Regional (PNR) Los Besotes, ubicado al norte de Valledupar y localizado en las mencionadas regiones ha sufrido consecuencias devastadoras en su flora y fauna a consecuencia de incendios forestales cuyo origen se supone es producto de per*. Obtenido de Diario El Pilón: <https://elpilon.com.co/ecoparque-los-besotes-del-infierno-al-paraiso/>

Díaz G-C-, J. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid. Obtenido de https://eprints.ucm.es/id/eprint/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf

Díaz T., J. (s.f.). *Descripción del régimen de incendios del Bosque seco tropical de la cuenca alta del Río Magdalena y su relación con la variación climática*. Manizales, Caldas: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/23232/Descripcion%20regimen%20incendios%20bs-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

EMOL. (15 de Abril de 2014). *Infografía: conoce como se propagan y combaten los incendios forestales*. Obtenido de Empresa El Mercurio S.A.P.: <https://www.emol.com/noticias/nacional/2014/04/15/655486/infografia-conoce-como-se-propagany-combaten-los-incendios-forestales.html>

FAO. (2015). *"Términos y Definiciones". Programa de evaluación de los recursos forestales. En FAO, Términos y Definiciones"*. Programa de evaluación de los recursos forestales.

FEDEBIOCOMBUSTIBLES. (2007). *BIOCOMBUSTIBLES, 50 preguntas sobre este nuevo mercado*. Obtenido de Federeación Nacional de Biocombustibles de Colombia: <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-923.htm>

Fernández, Ó. (2016). *Estimación de modelos de combustible basada en datos de sensores remotos*. Oviedo (Asturias), España: Universidad de Oviedo.

Gitelson, A., Gritz, Y., & Merzlyak, M. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J. Plant Physiol*, 160, 271-282. doi:<https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>

H. Sampieri. (1994). *Metodología de la Investigación: DEFINICIÓN DEL TIPO DE INVESTIGACIÓN A REALIZAR: BÁSICAMENTE EXPLORATORIA, DESCRIPTIVA, CORRELACIONAL O EXPLICATIVA (Capítulo 4)*. Ciudad de México, México: McGraw Hill.

Holdridge, L. (1982). *Ecología Basas en Zonas de Vida*. San José de Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

Huete, A. (1998). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). Department of soil and water science. University of Arizona, Tucson, Arizona 85721. *Remote Sens. Environ*(25), 295-309. doi:9. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(96)00112-5)

Huete, A., Liu, H., Batchily, K., & Leeuwen, W. (1997). A Comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ*(59), 440-451. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5)

IDEAM. (2014). *Ecosistemas: Incendios de la Cobertura Vegetal*. Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/incendios-cobertura-vegetal>

IGAC. (2012). *Resolución 1415 de 2012: Por la cual se actualiza y modifica el modelo de almacenamiento geográfico (Geodatabase) contenido en la Metodología General para la presentación de Estudios Ambientales*. Bogotá D.C.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

- IGAC. (2020). *Resolución 471 de 2020: Por medio del cual se establecen las especificaciones técnicas mínimas que deben tener los productos de la cartografía básica oficial de Colombia*. Bogotá D.C.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Jimenez, A., Urrego, L., & Toro, L. (2016). Evaluación Del Comportamiento De Incendios De La Vegetación En El Norte De Antioquia (Colombia): Análisis Del Paisaje. *Colombia Forestal*, 161-180.
- Kaufman, Y., & Tanré, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 97-131.
- Key, C., & Benson, N. (2006). *Landscape assessment: Sampling and analysis methods. FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. Odgen, UT, EEUU: USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD.
- Lavell, A. (2007). *Apuntes para una reflexión institucional en países de la Subregión Andina sobre el enfoque de la Gestión del Riesgo*. Comisión Europea; Comunidad Andina. Comunidad Andina. Consultora Nacional Spazio. Lima, Perú.
- Márquez, G. (2003). ECOSISTEMAS ESTRATÉGICOS, BIENESTAR Y DESARROLLO. En G. Márquez. Universidad Nacional de Colombia.
- MINAMBIENTE. (1995). *Decreto 948 de 1995: Se reglamentan, parcialmente la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9ª de 1979; y la Ley 99 de 1993*. Bogotá D.C.: Ministerio del Medio Ambiente.
- MINAMBIENTE. (1997). *Decreto 2340 de 1997: Por el cual se dictan unas medidas para la organización en materia de prevención y mitigación de incendios forestales y se dictan otras disposiciones*. Bogotá D.C.: Ministerio del Medio Ambiente.
- Muñoz A., P. (2013). *Apuntes de Teledetección: Índices de Vegetación*. Centro de Información de Recursos Naturales. Obtenido de <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indices%20de%20vegetaci%C3%B3n%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Nasi, R., Dennis, R., Meijaard, E., & Moore, P. (2001). Los incendios forestales y la diversidad biológica. *FAO Artículos*. Obtenido de <https://www.fao.org/3/y3582s/y3582s08.htm>
- Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., & Savé, R. (1993). The reflectance at the 950–970 region as an indicator of plant water status. *Int. J. Remote Sens.*, 14(10), 1887-1905.
- Perfetti, J., Balcázar, Á., Hernández, A., & Leibovich, J. (2013). *Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia*. Bogotá D.C.: FEDESARROLLO.
- Presidencia de Colombia. (1991). *Constitución Política de Colombia*. Bogotá D.C.: Presidencia de Colombia.
- Presidencia de la República. (1975). *Decreto 2811 de 1974: Código de los Recursos Naturales*. Bogotá D.C.: Presidencia de la República.
- Presidente de la República de Colombia. (2015). *Decreto 1076 de 2015: Decreto único reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Bogotá D.C.: Presidencia de la República de Colombia.
- Rico, G. (31 de Julio de 2017). *Solo queda el 8%: ¿Cuál es el futuro del bosque seco tropical en Colombia?* Obtenido de MONGABAY: <https://es.mongabay.com/2017/07/solo-queda-8-futuro-del-bosque-seco-tropical-colombia/>
- Rojas H., T. (02 de Abril de 2020). *¿por qué cada año se registran en promedio más de 1.000 incendios?* Obtenido de El Tiempo: <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/por-que-cada-ano-se-registran-en-promedio-mas-de-1-000-incendios-479344>
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains. *Third ERTS Symposium (Washington, DC: NASE)*, 309-317.
- Sánchez R., E., Torres, M., Palacios C., A., Aguilar A., M., Pino S., I., & Granado R., L. (2000). Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como Indicadores para la Asignación de Modelos de Combustible para la Estimación del Riesgo de Incendios en Andalucía. *Tecnologías Geográficas para el Desarrollo*, 164-174.

SIPECIF. (2007). *Problemática de los Incendios Forestales*. Obtenido de Sistema Nacional de Prevención y Control de Incendios Forestales: <http://www.scep.gob.gt/>

Toribio, G. (25 de Octubre de 2019). *Teledetección Aplicada a la Agricultura de Precisión*. Obtenido de Cursos de Teledetección: <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-ques-y-para-que-sirve/>

UNGRD. (2017). *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes*. Bogotá D.C., Colombia: DNGRD.

UNGRD. (2018). *Lo que usted debe saber sobre riesgo Tecnológico*. Bogotá D.C.: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.

UNGRD. (2019). *Cartilla “Lo que usted debe saber sobre incendios de Cobertura Vegetal”*. Bogotá D.C., Colombia: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.

UNICESAR. (2021). *Lineamientos y Guía Orientadora para la Estructuración y Formulación del Anteproyecto y Proyecto de Grado en el programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria*. Valledupar, Cesar: Universidad Popular del Cesar.

Vargas, D., & Campos, C. (2018). Modelo de vulnerabilidad ante incendios forestales para el Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica. *UNED*, 435-446.

Vivancos, J., Llastarri, A., Grau, M., & Vivancos, D. (s.f.). *Teledetección y estudio de la vegetación*. Obtenido de La Tierra vista de Satélite. Introducción a la Teledetección: http://200.116.181.65/principal/tierra/unidad2/td_ndvi.htm

