

**ESTIMACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) A CAUSA DE
INCENDIOS FORESTALES CON TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA**

DIANA CAROLINA MUÑOZ MEJÍA



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
SEDE MELÉNDEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
SANTIAGO DE CALI
2021**

**ESTIMACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) A CAUSA DE
INCENDIOS FORESTALES CON TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA**

DIANA CAROLINA MUÑOZ MEJÍA

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Topográfica

Director

FRANCISCO LUIS HERNÁNDEZ TORRES, MSc.



UNIVERSIDAD DEL VALLE

SEDE MELÉNDEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

INGENIERÍA TOPOGRÁFICA

SANTIAGO DE CALI

2021

Nota de aceptación

Director de trabajo de grado

Jurado

Jurado

DEDICATORIA

A Dios, por forjar mi camino y guiarme por el sendero del bien

A mis padres y hermana, por la comprensión, amor y tolerancia en este proceso

*A mi abuela Carmen, por el apoyo incondicional durante tantos años.
Sé que desde el cielo estás muy orgullosa de haber culminado esta etapa de mi vida.*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Valle y a sus maestros, por acogerme y enseñarme a ver el mundo desde diferentes perspectivas. También, a mi director Francisco Luis Hernández Torres, por guiarme y compartir su tiempo y conocimiento en la realización de este trabajo de grado.

A mis amigos, por estar a mi lado apoyándome en las alegrías y tristezas. Finalmente, a todos mis compañeros por las experiencias y conocimientos compartidos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN.....	2
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 OBJETIVO GENERAL	4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3. JUSTIFICACIÓN.....	4
4. MARCO CONCEPTUAL.....	5
5. MARCO TEÓRICO.....	11
6. MARCO REFERENCIAL	22
7. METODOLOGÍA	27
7.1 Localización.....	27
7.2 Métodos	27
8. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	31
9. VALIDACIÓN.....	43
10. DISCUSIÓN.....	47
11. CONCLUSIONES.....	49
12. BIBLIOGRAFÍA.....	50

TABLA DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación Random Forest.....	15
Figura 2: Departamento de Cundinamarca.....	27
Figura 3: Diagrama metodológico.....	28
Figura 4: Distribución de frecuencia para el NDVI en las coberturas GLC 2000.....	32
Figura 5: Incendios forestales ocurridos entre 2008-2018	34
Figura 6: Precipitación media en Cundinamarca 2008-2018	35
Figura 7: Incendios forestales ocurridos en Cundinamarca según los usos de suelo 2008-2018	36
Figura 8: Incendios forestales ocurridos en Cundinamarca 2008	37
Figura 9: Incendios forestales ocurridos en Cundinamarca 2016	37
Figura 10: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2008-2018	38

Figura 11: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2011.....	39
Figura 12: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2012.....	39
Figura 13: Emisiones de CO ₂ por incendios forestales 2008-2018	41
Figura 14: Emisiones de CH ₄ y N ₂ O por incendios forestales 2008-2018.....	41
Figura 15: Emisiones de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O generadas por Incendios en Cundinamarca 2008	42
Figura 16: Emisiones de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O generadas por Incendios en Cundinamarca 2012	42
Figura 17: Validación de áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2008-2018.....	44
Figura 18: Diagrama de dispersión: Áreas calculadas por el IDEAM vs Áreas calculadas en esta investigación.....	46

TABLA DE TABLAS

Tabla 1: Matriz de confusión.....	18
Tabla 2: Extracción de valores NDVI	31
Tabla 3: Clasificación de coberturas GLC 2000 asociados a los rangos NDVI.....	32
Tabla 4: Constantes de densidad de biomasa y eficiencia de combustión para cada tipo de cobertura	33
Tabla 5: Constantes de factor de emisión para cada tipo de cobertura.....	34
Tabla 6: Validación del modelo de clasificación.....	43
Tabla 7: Validación de áreas quemadas	45
Tabla 8: Comparación de gases emitidos	46

RESUMEN

En los últimos años los incendios forestales han incrementado las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), causando grandes impactos en el medio ambiente. Por ello, se hace necesario estudiar el comportamiento de este fenómeno a través de metodologías que permitan obtener información de manera práctica, económica y eficiente.

En este trabajo de grado se utiliza el método propuesto por Seiler y Crutzen (1980), basado en el producto de las áreas quemadas, densidad de biomasa, eficiencia de combustión y factor de emisión a través de imágenes satelitales y técnicas de machine learning para estimar las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) generadas por los incendios forestales ocurridos en el departamento de Cundinamarca entre los años 2008-2018. Para el cálculo de las áreas quemadas se utilizó el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) y la clasificación de los usos del suelo se realizó por medio del algoritmo de clasificación de Random Forest (RF) con 2192 muestras con rangos espectrales de NDVI para cada tipo de cobertura.

En los resultados se evidenció que el promedio de las emisiones de GEI para los años a estudio fue de 200.888 (Tr) de CO_2 , 0.612368 (Tr) de CH_4 , 0.322687 (Tr) de N_2O , los cuales fueron validados con información del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y se identificó que entre las metodologías que utiliza el IDEAM y la planteada en esta investigación, existen grandes diferencias en cuanto a las emisiones de GEI. Sin embargo, en cuanto al método de clasificación de coberturas se obtuvo un índice kappa de 97% y una precisión de 99%.

Por otra parte, se concluye que se hace necesario implementar datos tomados en las zonas afectadas por el fuego para disminuir la incertidumbre de los resultados.

Palabras clave: Incendios forestales, Gases de Efecto Invernadero (GEI), imágenes satelitales, machine learning.

INTRODUCCIÓN

A partir del inicio de la revolución industrial y debido a las actividades humanas, se han intensificado las concentraciones de gases atmosféricos como el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), que son considerados como principales en el efecto invernadero (IPCC, 2013). Este último es un fenómeno natural que permite al planeta mantener las condiciones necesarias para conservar la vida (Repsa, 2019). Algunos de los rayos solares que llegan a la Tierra son capturados por la atmósfera y otra parte es devuelta al espacio en forma de calor o radiación infrarroja para mantener una temperatura media de 15°C . Los gases de efecto invernadero (GEI) presentes en la atmósfera tienen concentraciones pequeñas, que al ser alterados aumentan significativamente la temperatura terrestre (IDEAM, 2012).

Con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMUNCC), los países que hacen parte de esta organización están comprometidos a elaborar, actualizar y estabilizar los GEI que se presentan por diversas actividades, siguiendo las directrices del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) que se exponen por medio de Inventarios Nacionales de GEI (INGEI) (Tubiello, 2015).

Los incendios forestales (IF) son un fenómeno global que se ha convertido en un problema ambiental debido a que su presencia está relacionada con la pérdida de biodiversidad y cambios en el clima (Forestal, 2010). Su frecuencia incrementa el efecto invernadero ya que el producto de la combustión genera la liberación de elementos químicos como el dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos, material particulado (PM) y otras sustancias que a lo largo de los años produce efectos nocivos al medio ambiente (Johnson y Miyanishi, 2001). Por esta razón, el tema es de interés general y para ello se han implementado diferentes metodologías que tratan de modelar y estimar sus efectos. Una de las técnicas empleadas es la percepción remota que permite la captura de información de un fenómeno presente en la Tierra sin estar en contacto físico, todo esto gracias a la interacción electromagnética presente (Cenicaña, 2015).

En este trabajo de investigación, se utilizará la disciplina anteriormente mencionada como una herramienta para dar solución a la estimación de los gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , N_2O) causados por los incendios forestales, teniendo en cuenta que para ello se debe estudiar el comportamiento espectral de las coberturas en las que ocurrieron los incendios y además, evaluar el modelo que más se ajuste para su identificación.

Las primeras tres secciones del documento corresponden al planteamiento del problema, objetivos propuestos y a la justificación. Seguido se encuentran los marcos conceptual, teórico y referencial. En las últimas secciones está la metodología con la cual se desarrolló este trabajo de grado. También, se exponen los resultados y se hace un análisis de su comportamiento. Finalmente, se presenta la validación de los datos, discusión, conclusiones y bibliografía consultada.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los incendios forestales, según la Oficina de Asistencia para Desastres en América Latina y el Caribe (2001), son fuegos que avanzan sin ningún control causados por la naturaleza o producidos por la acción del ser humano ocasionando daños ecológicos, climáticos, económicos y sociales (Cuesta y Giraldo, 2013). Según Cerdá y Solera (2009), “son un factor natural de los ecosistemas terrestres”, por tanto su presencia en muchas partes del mundo responde a comportamientos climatológicos, condiciones en la vegetación y actividades humanas (Castillo, Pedernera y Peña, 2003). Este tipo de eventos se han convertido en contribuyentes al cambio climático, debido a que cuando se desarrollan, liberan gases de efecto invernadero (GEI) como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y otros componentes químicos, que causan cambios en la composición del aire (Langmann et al., 2009).

Los gases como el CO_2 , CH_4 y N_2O son componentes naturales de la atmósfera sin embargo, el delicado equilibrio de su composición gaseosa se puede desbalancear (IDEAM, 2016) debido a la actividad humana. Cuando hay alteraciones en los niveles normales de los gases atmosféricos, se genera un forzamiento radiativo que tiende a alterar la temperatura de la superficie terrestre (Ballesteros y Aristizabal, 2007) también, reduce la eficiencia en el proceso de radiación terrestre saliente, lo que ocasiona diversos cambios en el clima (Martínez y Osnaya 2004).

Otro de los impactos ocasionados por los incendios forestales es la pérdida de bosques, que a su vez se refleja en el cambio de las condiciones del clima de una región. Según un estudio realizado por la Universidad de Maryland (2016), la pérdida global de la cobertura forestal aumentó en un 51% con respecto al año anterior, debido a los incendios forestales ocurridos en la temporada del fenómeno del niño y que se reflejó a través de varios impactos como la sequía en los trópicos en una extensión de 168,754 km^2 (Weisse y Goldman, 2017). Asimismo, se evidencian diversos efectos socioeconómicos por este tipo de eventos que generan grandes pérdidas en ecosistemas, propiedades públicas/privadas y procesos productivos de empresas (Handmer y Proudley, 2008).

En los informes sobre perturbaciones a causa de incendios presentados por la evaluación de recursos forestales mundiales (FRA por sus siglas en inglés) en el año 2015, América del Sur presentó el promedio más alto (35 millones de hectáreas por año) de superficies quemadas en el periodo del 2003 al 2012 (FAO, 2018). En Colombia, en épocas del fenómeno del Niño, generalmente entre enero-marzo y julio- septiembre, los incendios forestales se intensifican de tal manera que contribuyen al deterioro de los bosques del país afectando en promedio 42.000 hectáreas por año (MAVDT, 2010). Según estadísticas sobre incendios publicadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Cundinamarca ha sido uno de los departamentos con más conflagraciones forestales de la última década que por lo general han ocurrido en épocas del fenómeno del niño (≈ 261 incendios entre 2008-2010). Aunque la causa principal del origen de incendios forestales no es la temperatura, la precipitación en cambio sí es importante en la dinámica de estos, debido a que la ausencia de lluvia produce condiciones favorables de combustión (Villabona y Armenteras, 2012).

Por otra parte, el IDEAM como entidad encargada de la elaboración de inventarios nacionales y departamentales sobre GEI, en sus informes anuales da a conocer la cantidad de emisiones generadas por estos gases (IDEAM, 2016); para realizar su cuantificación, el IPCC ha desarrollado directrices que permite generar los cálculos del inventario con base en los factores de emisión y datos de diversas actividades con las que se pueden construir las estadísticas nacionales y departamentales de la producción de GEI y su concentración (IDEAM, 2016). Sin embargo, las cifras se presentan en forma global y no se destaca que la diferencia en las emisiones de los GEI depende del tipo de cobertura del suelo afectado por el fuego.

Teniendo en cuenta que el último informe presentado en el año 2016 hace referencia al inventario hecho en el 2012, es decir, que sus datos están desactualizados y además gran parte de la información no es espacial, surgen las siguientes preguntas: ¿Cómo estimar las cantidades de CO₂, CH₄ y N₂O causados por incendios forestales?, ¿Qué metodologías emplear para obtener información espacializada de CO₂, CH₄ y N₂O?

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Estimar la emisión de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O) a causa de los incendios forestales ocurridos en el departamento de Cundinamarca entre los años 2008-2018 con técnicas de percepción remota.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar el modelo matemático que permita estimar la emisión de un compuesto ocasionado por un incendio ubicado geográficamente.
- Reconocer el comportamiento de las emisiones de los gases (CO₂, CH₄ y N₂O) en las coberturas de suelo afectadas por los incendios forestales.
- Comprobar los resultados obtenidos de las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O) en las coberturas afectadas por el fuego.

3. JUSTIFICACIÓN

Debido a la problemática que se presenta a nivel mundial con respecto a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), a lo largo de los años se han venido desarrollado diferentes mecanismos para el control y mitigación de estos. Aunque la mayor causa del aumento de las emisiones a la atmósfera es la quema de combustibles fósiles, los incendios forestales cada vez más se han relacionado con el efecto invernadero y el calentamiento global (Yamallel et al., 2013). Es importante considerar el estudio de los incendios forestales por medio de la cuantificación de los gases, debido a que tales conflagraciones son un fenómeno esencial en la dinámica de los ecosistemas (Parra y Bernal, 2010).

Otro de los efectos de las emisiones de GEI se refleja en el aumento de la temperatura media de los océanos y la superficie terrestre, como consecuencia del cambio climático (Conciencia Eco, 2010), por lo tanto cada vez más se realizan investigaciones científicas sobre estos efectos, ya que el incremento de la temperatura de la Tierra ha generado grandes alteraciones en los ecosistemas afectando todas sus formas de vida (Cambio climático global, 2013). En temporadas de oleaje de calor, suelen ocurrir varios incendios por la sequedad del ambiente o también por actividades humanas (Tortosa, 2013); la gran tasa de gases que estos generan a la atmósfera contribuye al cambio climático en el planeta y por esta razón es fundamental desarrollar metodologías para representar de forma espacial y temporal la liberación de los gases atmosféricos por producto de incendios forestales (Castillo, Pedernera y Peña 2003).

La composición del aire está directamente relacionada con las condiciones ambientales de una región (Korc, 2011), en consecuencia es importante reconocer las emisiones de GEI para evaluar sus efectos sobre el medio ambiente. De acuerdo con el IDEAM (2016), con el cálculo de las emisiones de GEI, se puede conocer el estado de calidad del aire y diagnosticar los efectos ambientales y sociales generados al ambiente y a la salud humana. En concordancia con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), las entidades encargadas de la cuantificación de GEI en Colombia brindan la información a las entidades territoriales con el propósito de implementar acciones estratégicas para la reducción de las emisiones que contribuyan a la mitigación de los GEI (IDEAM, 2012).

La cuantificación de los GEI tradicionalmente se realiza con equipos georreferenciados que presentan limitaciones en la determinación de la concentración espacial de los GEI. En la actualidad, nuevos métodos contribuyen en la solución de estas limitaciones por los que se les considera complementarios con los métodos convencionales, entre los que se destaca el uso de sensores remotos. Las imágenes de satélite obtenidas con técnicas de percepción remota son de fácil adquisición y bajo costo; también, facilitan el proceso de detección y monitoreo de los cambios en el suelo y la atmósfera a través del tiempo. En esta investigación se ha elegido esta disciplina como herramienta de captura de información para cuantificar las emisiones de GEI generadas por las coberturas de suelo afectadas por los incendios forestales.

4. MARCO CONCEPTUAL

Debido a la diferente composición de gases presentes en la atmósfera terrestre como el vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), ozono (O_3), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) (Ballesteros y Aristizabal, 2007), entre otros gases; se produce el efecto invernadero, su funcionamiento consiste en que los gases que lo componen capturan algunos de los rayos que son emitidos por el sol y otra parte son reflejados al espacio, por esto la Tierra se calienta de tal forma que permite mantener la vida en el planeta con una temperatura media de $15^{\circ}C$. Aunque los gases de efecto invernadero (GEI) representan un porcentaje mínimo respecto a los demás gases presentes en la atmósfera, existen algunos que tiene una larga duración en el

espacio, estos son el Dióxido de Carbono (CO_2) que no tiene un tiempo de vida determinado porque se mantiene en el ciclo del carbono, Metano (CH_4) con 12 años, Óxido nitroso (N_2O) ≈ 121 años y los clorofluorocarbonos (CFCs) entre 45 y 1020 años, razón por la que son llamados GEI directos ya que contribuyen en gran manera al efecto invernadero (IDEAM, 2012).

Cuando las concentraciones de gases atmosféricos superan los niveles considerados como normales, se dice que una sustancia es contaminante y por ello los efectos de las alteraciones se reflejan en el clima, que a través del tiempo y debido a diversas actividades humanas contribuyen al cambio climático. Pese a que este ocurre de forma natural, hay evidencias de que en las últimas cinco décadas el aumento de GEI ha acelerado este proceso (OMM, 2017).

Algunas de las actividades que acrecientan la emisión de GEI son los incendios forestales, pero para abordar este tema es necesario conocer algunos conceptos previos que ayudan a entender su funcionamiento como lo son la combustión y los tipos en cómo se presentan.

La combustión hace referencia a un proceso termoquímico, es decir, reacción entre calor y química entre un tipo de combustible y algún agente oxidante como el aire o el agua, que generan una reacción de liberación de energía en forma de calor o luz (Bioenergy, 2014). De acuerdo con el estado del fuego, se puede determinar la fase y el tipo de combustión que se esté generando. Las características del combustible, distribución, tamaño, humedad y química son las que dominan la duración de cada fase de combustión.

La primera fase es la de precalentamiento, en ella se hace el primer acercamiento entre los diferentes combustibles presentes que generan la combustión. Por el fuego existente en el medio, el oxígeno del espacio ha sido reducido y se empieza a generar una combustión incompleta que ocasiona la emisión de gases como el vapor de agua, bióxido de carbono, monóxido de carbono, entre otros (Alboronzo, Chereau y Araya, 2016).

Cuando el calor del medio, la difusión y la mezcla entre el oxígeno y el combustible se da, mantienen la temperatura necesaria para sostener el proceso de descomposición química del combustible por medio del calor (pirolisis). A esto se le conoce como fase de llamas (Johnson y Miyanishi, 2001).

A medida que el fuego va avanzando, se sigue consumiendo el oxígeno hasta el punto en el que ya no es suficiente para reaccionar con el combustible y por consiguiente se pasa a la fase de combustión lenta. En esta fase, la energía disipada es mayor que la generada, por lo tanto, las reacciones de descomposición química ya no son capaces de generar suficientes gases como para mantener la llama. Sin embargo, se sigue emitiendo gases como el monóxido de carbono (Alboronzo, Chereau y Araya, 2016). La acumulación de cenizas y el carbono se dan en la última fase, llamada combustión brillante. Fase en la que se produce el carbono puesto que no hay presencia de gases que permitan seguir con el fuego (Johnson y Miyanishi, 2001).

La combustión completa y la incompleta hacen referencia a los tipos de combustiones existentes. La primera es la ideal, donde los oxidantes y los combustibles se mezclan de tal manera que se completa el proceso de oxidación y su principal producto es el dióxido de carbono (CO_2). Pero este proceso se da pocas veces en ambientes naturales debido a que en

las combustiones reales existen reacciones químicas que tienen una velocidad finita en la que se presenta pérdida de calor en todas sus formas. La segunda forma también llamada combustión parcial, es la más común y la que contamina más el medio ambiente. Su principal producto es el monóxido de carbono (CO) (Stauffer, Dolan y Newman, 2007).

Los incendios forestales se definen como fuegos que avanzan sin ningún tipo de control y aunque son un fenómeno natural en la dinámica terrestre generados por descargas eléctricas o erupciones volcánicas, en algunas ocasiones son causados por diferentes actividades antropogénicas que van desde hechos accidentales, hasta procesos de ampliación de zonas para cultivar, criar ganado o desarrollo urbano Hernández, (2019). A diferencia de otro tipo de incendios, estos se propagan en grandes áreas y a altas velocidades que provocan cambios de dirección de forma inesperada, capaces de cruzar ríos y carreteras.

Los factores meteorológicos, topográficos y de combustible son componentes que influyen en el comportamiento del fuego. El primer componente es el más variable debido a que influye la temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, estabilidad atmosférica y precipitación del medio en el que se presente el fuego (Hernández, 2019). El segundo es uno de los más estables y gracias a la transferencia de calor por radiación y convección, el fuego asciende de acuerdo con la pendiente de la superficie; los principales actores son las características del terreno, exposición, altitud y pendiente. El tercer y último componente se refiere al tipo de material presente, el comportamiento es variable ya que depende de sus características (Julio y Giroz, 1975).

Existen tres fases de un incendio forestal, iniciación, propagación y extinción. La primera hace referencia al comienzo de la actividad, la segunda a la difusión por medio de los elementos que se encuentran a su alrededor y la tercera es la finalización del fuego ya sea por causas naturales como lluvia, ausencia de vegetación o por la intervención del hombre con labores de extinción (Stauffer, Dolan y Newman, 2007).

Los incendios pueden ser catalogados según su tamaño y forma de propagación. En la primera clasificación se encuentran los grandes incendios forestales que superan las 500 hectáreas (ha), generalmente por su comportamiento es difícil extinguirlos ya que presentan elevadas longitudes de llamas y altas velocidades de propagación (Álvarez, 2011). Luego están aquellos que tienen una extensión entre 1 a 500 ha que son considerados como incendios normales y por último están los conatos que no superan 1 ha de superficie quemada (Álvarez, 2011).

En la otra forma de clasificación están los incendios de tipo superficial donde el fuego se extiende horizontalmente sobre la superficie del terreno. También, están los que se producen de forma subterránea; generalmente no producen llamas y emiten poco humo. Finalmente, se encuentran los incendios de tipo copa o aéreos que inician de forma superficial pero luego avanzan verticalmente hasta llegar a las copas de los árboles; son considerados como unos de los más destructivos y difíciles de controlar, ya que destruyen toda la vegetación por la forma en la que se difunden (Forestal, 2010).

Dependiendo de la fase en la que se encuentre un incendio forestal, se emiten diferentes compuestos químicos a la atmósfera. En la etapa en la que se presenta la mayor combustión

se libera el dióxido de carbono (CO_2), puesto que interactúa con el oxígeno del aire. En la fase final cuando la combustión es lenta y se aproxima a la extinción, se emiten el metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), entre otros gases.

En la actualidad existen dos modelos que explican la interacción entre los factores que producen los incendios. El primer modelo es el del triángulo del fuego que describe los elementos necesarios para la formación de un incendio. Los componentes son el combustible, comburente y energía de activación; el primero hace referencia a diferentes tipos de sustancias que sean capaz de arder, teniendo en cuenta ciertas condiciones. El segundo se refiere a una sustancia que ocasiona el desarrollo de la combustión, generalmente es el oxígeno y el tercero corresponde a la energía (calor) mínima que se necesita para que los dos factores anteriores reaccionen (Forestal, 2010).

El otro modelo llamado tetraedro del fuego, explica cómo se propaga y se mantiene la continuidad de la combustión. La reacción en cadena es el factor que se añade al triángulo del fuego y se da cuando el fuego desprende el calor que es transmitido al combustible hasta vaporizarlo e inflamar el vapor con el oxígeno aun existente. De esta manera, para que la combustión se pueda conservar, el propio fuego debe mantener una generación de calor suficiente para que el proceso se repita y forme así una retroalimentación entre todos los factores (Boulandier et al., 2001).

Una vez que se da la interacción y reacción de los elementos generadores del fuego, se produce humo, llamas, calor y gases (Johnson y Miyanishi, 2001); cada uno incide de forma diferente en la evolución del fuego y por ende sus efectos también son distintos.

El humo es el primer factor presente en un incendio antes de que se presente el aumento de la temperatura. Se compone de partículas muy pequeñas que pueden ser solidas o liquidas y se encuentran en estado de suspensión en el aire (Johnson y Miyanishi, 2001).

La llama es el producto que se genera en estado gaseoso por la interacción entre el combustible y la concentración del comburente (Johnson y Miyanishi, 2001). Generalmente es un gas incandescente y su temperatura varía de acuerdo los factores antes mencionados.

El calor es el tipo de energía que se puede generar al aumentar la temperatura y es transmitida por conducción, convección y radiación.

La cantidad de gases que se pueden emitir en un incendio también dependen de los materiales que estén presentes en ese momento y de la cantidad de oxígeno disponible en el medio. Es el producto más peligroso ya que las emisiones pueden causar daños perjudiciales en la salud humana (Boulandier et al., 2001). Gases como el Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido Nitroso (N_2O), Hidrocarburos (HC), Dióxido de azufre (SO_2), Material Particulado (PM), entre otros componentes químicos pueden ser emitidos por los incendios (Langmann et al., 2009).

El dióxido de carbono (CO_2) es uno de los gases traza más importantes asociados a las actividades antropogénicas. La emisión de este gas por incendios se debe principalmente al consumo de combustibles fósiles para la generación de energía por medio de la tala y quema

de bosques (Ballesteros y Aristizabal, 2007) y también como resultado de algunas reacciones químicas asociados a procesos industriales. No tiene un periodo de vida determinado debido a que se mantiene en un ciclo continuo entre la atmósfera, océanos, tierra, plantas y animales. Sin embargo, es retenido cuando las plantas lo absorben en el proceso biológico del carbono (EPA, 2019).

El metano (CH_4) hace parte de los principales gases de efecto invernadero (GEI), su emisión a la atmósfera dura aproximadamente entre 9 y 15 años (Steinfeld et al., 2009) y también se asocia generalmente a actividades antropogénicas como la producción de transporte de carbón, gas natural y petróleo, rellenos sanitarios, actividades agrícolas, tratamiento de aguas residuales y otras fuentes como las termitas, sedimentos, volcanes e incendios forestales, que aunque no generan en mayor cantidad, es necesario considerarlas ya que a largo plazo causan grandes emisiones. Pese a que la duración del CH_4 en la atmósfera es menor que la del CO_2 , el CH_4 es más eficiente en la captura de la radiación, es decir, retiene la pérdida de radiación infrarroja (calor) desde la atmósfera al espacio (EPA, 2019).

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son un grupo de compuestos químicos formados por nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2). Uno de los gases que hace parte del conjunto es el óxido nitroso (N_2O) el cual tiene diversas fuentes naturales producto del ciclo del nitrógeno, su emisión también se asocia a actividades antropogénicas como la agricultura, industria, combustión y aguas residuales, también a actividades humanas como la quema de biomasa, combustibles fósiles y producción de nylon. Tiene una vida media de ≈ 131 años y puede ser eliminado de la atmósfera por reacciones químicas, absorción de bacterias y radiación ultravioleta (Gómez, 2019).

El comportamiento de la atmósfera es como la de un filtro selectivo que dependiendo de las longitudes de onda se puede eliminar casi que por completo la observación remota hacia la superficie terrestre, debido a la absorción del Ozono (O_3) y otros gases (Sánchez, 2020). Sin embargo, existen unas franjas de longitudes de onda que permiten que la radiación terrestre salga de la atmósfera sin ser absorbida. Estas franjas son llamadas también como ventanas atmosféricas, las cuales sirven para desarrollar investigaciones de teledetección con sensores espaciales que tengan ajustadas sus bandas a estas regiones del espectro para hacer la correcta captura de información (Sánchez, 2020).

La Tierra es un emisor en el infrarrojo, es decir, que cuando recibe luz del sol absorbe la luz ultravioleta (UV), visible e infrarrojo cercano y reemite la mayor parte de la energía hacia la atmósfera en las regiones del infrarrojo medio y lejano (Marini, Blesio y Godino, 2019). En el caso de los gases atmosféricos, la mayoría de ellos absorben en la región infrarroja (Pacheco, 2001). Es por esto que cuando se quiere observar la atmósfera en lugar de la superficie terrestre, las regiones más idóneas son aquellas en donde la absorción es baja como en las ventanas atmosféricas que se encuentran en el infrarrojo medio y lejano (López, 2017), ya que en estas se puede estimar la concentración de diferentes gases como los de efecto invernadero (GEI).

Con técnicas de sensoramiento remoto se puede hacer el análisis de los diferentes procesos que ocurren en la tierra por medio de la energía que emiten los cuerpos; por esta razón el

estudio de los incendios forestales se puede realizar con esta metodología. Ya que debido a los cambios que se generan cuando ocurren eventos como alteraciones en la cubierta vegetal, cantidad de clorofila, humedad, color, entre otros, se pueden estudiar por medio de su comportamiento espectral en imágenes satelitales de diferentes plataformas y sensores que proporcionan diversas resoluciones espaciales, temporales y espectrales (Mas, 2017). La primera hace referencia al nivel de detalle que puede tener una imagen, es decir, el tamaño del pixel; la segunda es el tiempo en que tarda el satélite en obtener imágenes de una zona en específico. Finalmente, la tercera se refiere al número de regiones espectrales con las que un sensor puede capturar información (Mas, 2017).

Es por lo que a la hora de realizar este tipo de investigaciones, se tiene que considerar aspectos como el tipo de satélite a usar, ya que se puede obtener resoluciones temporales medias o bajas, que dificultan la discriminación espectral de áreas quemadas por los procesos que ocurren después de un incendio (Cure, 2015). Caso contrario ocurre cuando se cuenta con una resolución espacial media-alta, donde se logra identificar incendios de menor extensión, pero por lo general presentan una baja temporalidad (Cure, 2015).

Existen diferentes metodologías con sensores remotos para identificar las áreas donde han ocurrido quemaduras forestales. Una de ellas es el análisis por medio de índices espectrales, basados en las señales emitidas por las áreas quemadas con respecto a otras cubiertas naturales o artificiales; la técnica combina información de varios rangos del espectro electromagnético como el rojo e infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR) (González, 2020).

Con algoritmos como el índice de diferencia normalizada (NDVI), índice de vegetación de onda corta (SWVI), índice de área quemada (BAI) y el índice de quema normalizado (NBR), se puede identificar los cambios espectrales que se producen cuando hay combustión (Michalijos y Uboldi, 2013). Cada uno se calcula por medio de la relación entre diferentes longitudes de onda. Productos del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) como MOD09A1, MCD43A4 y MCD45A1 también sirven para detectar áreas quemadas (Pavón, 2010); algunos de estos ya vienen con correcciones como la de condición de iluminación y observación (BRDF).

Para estimar la cantidad de gases que pueden producir los incendios forestales, existen métodos directos e indirectos (Salcedo y Escobar, 2012). El primero hace referencia a mediciones hechas en campo a incendios activos con técnicas de muestreo aéreo y en superficie (Carreño y Rodríguez, 2018). Otra forma es a través de cálculos en condiciones de laboratorio con quemaduras controladas donde el nivel de detalle y precisión es más alto, puesto que las concentraciones de humo son mayores, por ende, se hace más fácil la captura de información por medio de instrumentos (Salcedo y Escobar, 2012).

Los métodos indirectos están basados en deforestación-degradación y en áreas quemadas. El primero calcula las emisiones de acuerdo con el aumento o disminución de bosques y el segundo a la extensión de las zonas afectadas por el fuego (Yepes et al., 2011). En este último también intervienen variables como la densidad de biomasa, factor de emisión y carga de combustible (IDEAM, 2016); la mayoría de estas exceptuando las áreas quemadas, se basan

en constantes tomadas in situ que dependen del tipo de cobertura donde ocurrieron los incendios, según la clasificación Global Land Cover 2000 (GLC 2000), las cuales ya se han calculados por diferentes autores.

Otro método indirecto está basado en la Potencia Radiativa de Fuego (FRP), que mide la cantidad de energía liberada en el proceso de combustión, por unidad de tiempo medida en mega watts; cuando se integra temporalmente, proporciona la medición radiativa del fuego (FRE) medida en mega julios (Taborda, 2019). El cálculo de esta variable se puede hacer por el algoritmo desarrollado por Kaufman et al (1996), que caracteriza la relación existente entre la temperatura de brillo del fuego y los píxeles de fondo en el infrarrojo medio o también se puede realizar con la fórmula propuesta por Wooster et al., (2003), que utiliza el método de radiancia de infrarrojo medio (MIR) para la estimación del FRP.

Los coeficientes de emisión de humo son una variable que también interviene en la estimación de gases, su cálculo se basa en la energía radiativa del fuego (FRE) a través de la eficiencia de absorción y dispersión de masas, profundidad óptica de aerosol y componentes zonales y meridionales del viento (Taborda, 2019). Finalmente, el cálculo de la estimación de emisiones se realiza a través del producto entre la FRP y los coeficientes de emisión de humo, dando como resultado el flujo de masa de humo en kg s^{-1} (Taborda, 2019).

En algunos estudios las metodologías convencionalmente empleadas solo con softwares GIS suelen demandar una gran cantidad de tiempo, pero gracias a los avances tecnológicos existe una manera de automatizar procesos por medio de diversos lenguajes de programación como Python y Java (Córdova, 2018), los cuales permiten ejecutar la mayoría de procesos que se realizan convencionalmente y obtener muy buenos resultados como en la descarga de imágenes, extracción de valores rasters, clasificación de coberturas entre otros, que se pueden ejecutar por medio del diseño de códigos en cualquier lenguaje de programación.

Técnicas como Random Forest (RF) son comúnmente empleadas para resolver problemas a través de regresión y clasificación (Amat, 2017). Esta metodología de machine learning desarrollada con programación, se basa en la elaboración de varios árboles decisión para catalogar un objeto de acuerdo con las características asignadas para predecir la variable de respuesta; cada árbol de decisión arroja una clasificación y finalmente se escoge la que obtuvo más número de ocurrencias (Breiman, 2001).

5. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se exponen los conceptos teóricos que se emplearon para el desarrollo de esta investigación. Se describe el pre procesamiento de imágenes, índices de vegetación utilizados, modelo de clasificación, cálculo de emisiones y métodos estadísticos aplicados para analizar el comportamiento de los resultados.

5.1 Pre procesamiento de imágenes satelitales

5.1.1. Corrección radiométrica

Este proceso se realiza con el propósito de convertir los niveles digitales (ND) a reflectancia, entendida como la relación entre la energía reflejada y la incidente. Inicialmente se convierten los ND a valores de radiancia (L) por medio de la ecuación (1) planteada por Rejas-Ayuga, (2008).

$$L_{k_{i,j}} = a_k ND_{i,j} + b_k \quad (1)$$

Donde, L corresponde a la radiancia espectral recibida por el sensor en cada banda registrada ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{um}^{-1}$); a y b son los coeficientes de calibración para cada banda de acuerdo al sensor; ND, son los valores digitales para cada banda.

5.1.2. Corrección de efectos atmosféricos

El segundo proceso de la corrección radiométrica es la corrección de los efectos atmosféricos en los valores de radiancia calculados. Mediante el proceso de absorción y dispersión se modifica la radiación de energía electromagnética en la atmósfera, por ello es necesario hacer una corrección para disminuir el efecto que causa en la calidad de una imagen satelital. La ecuación (2) planteada por Vermote et al (1997), muestra cómo se hace esta corrección.

$$p = \frac{\pi * L_{sat} * d^2}{E_0 * \cos SZ} \quad (2)$$

Donde,

L_{sat} = Radiancia espectral

d =Distancia tierra-sol en unidades astronómicas

E_0 = Irradiancia solar media exoatmosférica

SZ = Ángulo cenital solar

5.1.3. Función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF)

Es una función que describe la ley de distribución de la intensidad de la radiación de la luz a partir de cuatro ángulos sólidos, dos relacionados con la incidencia de luz sobre la superficie

y otros dos con la reflexión de la luz desde la superficie. El cálculo de BRDF está representado por la ecuación (3) (Chen et al., 2017).

$$BRDF(\theta_l, \varphi_l, \theta_v, \varphi_v, \lambda) = \frac{dL_v(\theta_v, \varphi_v, \lambda)}{dE_l(\theta_l, \varphi_l, \lambda)} \quad (3)$$

$$= \frac{dL_v(\theta_v, \varphi_v, \lambda)}{L_l(\theta_l, \varphi_l, \lambda) \sin \theta_l \cos \theta_l d\theta_l d\varphi_l d\lambda}$$

Donde,

θ_v = Ángulo cenital del flujo incidente sobre la superficie

θ_l = Ángulo cenital del flujo que emerge de la superficie

φ_v = Azimuth de la proyección del flujo incidente sobre la superficie.

φ_l = Azimuth de la proyección del flujo reflejado sobre la superficie

λ = Longitud de onda

L_v = Radiancia de la dirección de la luz que se refleja de la superficie de estudio

E_l = Irradiancia de la dirección de la luz que incide sobre la superficie:

$$E_l = \frac{P}{A}$$

Donde,

P = Potencia incidente medida en watts (W)

A = Área de la superficie en que incide en metros cuadrados (m²)

5.2 Índices de vegetación (IV)

5.2.1. Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI)

Estima la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación presente en un área determinada por medio del cálculo de la intensidad de la radiación en las bandas del rojo e infrarrojo del espectro electromagnético. En la ecuación (4) se presenta este índice (Salcedo y Escobar 2012).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (4)$$

Donde,

NIR = Banda del infrarrojo cercano

RED = Banda roja del visible

5.2.1.1. Producto MOD13Q1 V006

Es un producto que genera un valor de índice de vegetación por pixel para el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) y el Índice de Vegetación Mejorada (EVI), calculados a partir de reflectancias de superficie bidireccionales corregidas atmosféricamente y se genera cada 16 días con una resolución espacial de 250 metros (Didan et al., 2015).

5.3 Modelo de clasificación

Clasificación GLC 2000

Es una clasificación de 22 tipos de coberturas de suelo a nivel mundial, elaboradas por asociaciones internacionales coordinados por el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (2000). La clasificación contiene cobertura terrestre detallada a nivel continental e información con menos detalle a nivel global. Los datos con los que se elaboró la distribución de suelo fueron adquiridos a través del sensor Vegetation a bordo de Spot 4. Sin embargo, fue necesario implementar el uso de otros instrumentos como ATSR-2 y JERS-1 para obtener información más específica en algunas zonas como en sur américa que se obtuvo un mapa de coberturas de suelo con una escala aproximada de 1:7.000.000 (Bartholome y Belward, 2005).

5.4 Aprendizaje automático

El aprendizaje automático se basa en métodos estadísticos que se entrenan para que puedan aprender automáticamente de los datos. Esta metodología implica suministrar información con ciertas características que se pueden entrenar para detectar y clasificar patrones de forma automática (Sagan et al., 2020).

En teledetección se han evidenciado grandes ventajas del aprendizaje automático en cuanto a algoritmos de clasificación, empleando técnicas como la de Random Forest. Su estructura basada en conjuntos de árboles de decisión donde los valores del vector se asignan de forma aleatoria e independiente y con igual distribución para cada árbol, reducen la correlación y la varianza entre ellos permitiendo obtener buenos resultados tanto en problemas de regresión como en clasificación (Carranza et al., 2018). El cálculo de Random Forest se presenta en la ecuación (5) (Breiman, 2001) y en la figura 1 se hace la representación.

$$h(x, \theta_k), k = 1, \dots \quad (5)$$

$X =$ Patrón de entrada

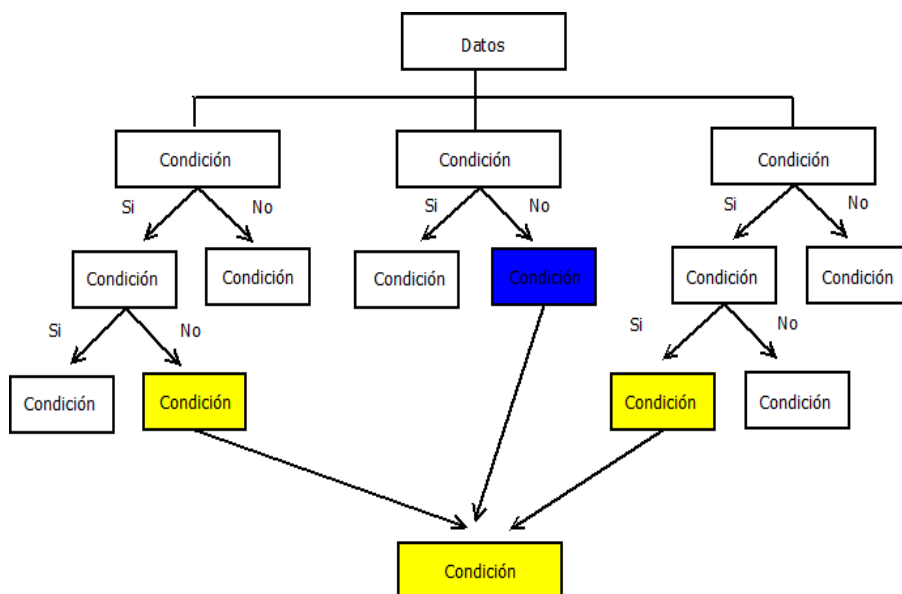


Figura 1: Clasificación Random Forest

5.5 Cálculo de emisiones

Las emisiones son calculadas a partir de la ecuación (6) planteada por Seiler y Crutzen, (1980). A continuación, se describen las variables empleadas para estimar la emisión de un compuesto *i* en un incendio identificado geográficamente.

$$E(X) = \sum_{i=1}^N BA_i * BD_i * BE_i * EF_i(X) \quad (6)$$

 BE_i = Eficiencia de combustión del combustible i

$EF_i(X)$ = Factor de emisión del contaminante (X) para el incendio i

5.5.1. Áreas quemadas (BA)

Para la identificación de áreas quemadas con sensores remotos, existe gran variedad de metodologías basadas en análisis visual para la delimitación de las zonas afectadas e índices espectrales, como el índice de diferencia normalizada (NDVI), índice de área quemada (IAQ), índice normalizado de área quemada (NBR) que estudian regiones del rojo e infrarrojo del espectro electromagnético (Rodríguez y Ríos, 2017).

Otra forma de calcular las áreas quemadas en teledetección es a través del producto de la cantidad de píxeles afectados y la dimensión de la resolución espacial del ráster utilizado (Gis & Beers, 2019). Este método es adecuado para investigaciones en las que el cálculo se realiza en varias zonas de afectación y no sólo en una en específico.

5.5.2. Densidad de Biomasa (BD)

La densidad de biomasa o también llamada carga de combustible es una variable que genera la biomasa que se encuentra disponible por unidad de superficie basados en la clasificación de coberturas terrestres (Salcedo y Escobar 2012). En la ecuación (7) se presenta la fórmula del cálculo de esta variable (Brow, 1997).

$$Biomasa\ total\ (t/ha) = VCC * DM * FEB \quad (7)$$

Donde,

VCC = Volumen con corteza (m^3/ha)

DM = Densidad media de madera ponderada por el volumen

FEB = Factor de expansión de la biomasa

5.5.3. Eficiencia de combustión (BE)

La eficiencia de combustión es la relación entre la tasa del calor químico liberado y el total del combustible de biomasa quemado. Sirve para analizar el comportamiento de incendios a través del porcentaje de biomasa que se quema efectivamente. El cálculo de este parámetro está representado en la ecuación (8) (Ishikawa et al., 2020).

$$x = \frac{Q_{ch}}{Q_T} \quad (8)$$

Donde,

x = Eficiencia de combustión

Q_{ch} = Tasa de liberación de calor químico

Q_T = Combustión neta completa

5.5.4. Factor de emisión (EF)

Es un parámetro empleado para estimar e inventariar las emisiones de diferentes gases causados por incendios. Se calcula midiendo la concentración de los contaminantes generados en el humo y en el aire fuera de la columna de humo como se muestra en las ecuaciones (9) y (10) (Yokelson et al., 1999).

$$EF_i(g/kg) = F_C * 1000 (g\ kg^{-1}) * \frac{MM_i(g)}{12(g)} * \frac{C_i}{C_T} \quad (9)$$

Donde,

EF_i = Es la masa en (g) de un compuesto i emitida por kg de combustible quemado

F_C = Fracción de masa de carbono en la biomasa seca

MM_i = Masa molar de i ($g\ mol^{-1}$)

12 = Masa molar de carbono ($g\ mol^{-1}$)

$\frac{C_i}{C_T}$ = Relación entre el número de moles emitidos de la especie i y el total de moles de carbono emitido:

$$\frac{C_i}{C_T} = \frac{\frac{\Delta C_i}{\Delta CO_2}}{\sum_{j=1}^n NC_j * \frac{\Delta C_i}{\Delta CO_2}} \quad (10)$$

Donde,

$\frac{\Delta C_i}{\Delta CO_2}$ = Promedio de la relación de emisión de fuego del compuesto i al CO_2

NC_j = Número de átomos de carbono en el compuesto i y la suma para los demás gases, incluyendo al CO_2 .

5.6 Indicadores estadísticos

5.6.1. Métricas de evaluación a modelos de clasificación

Son métricas de rendimiento que se utilizan para evaluar la efectividad de algoritmos de clasificación basados en machine learning.

- **Matriz de confusión:** Es una herramienta que describe el desempeño de modelos de clasificación a través de un arreglo. Cada columna representa el número de predicciones de cada clase y las filas los valores reales, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1: Matriz de confusión

		Predicción	
		Positivos	Negativos
Valor real	Positivos	Verdadero positivos (VP)	Verdaderos negativos (VN)
	Negativos	Falsos positivos (FP)	Falsos negativos (FN)

Donde,

VP = Cantidad de positivos que fueron clasificados correctamente como positivos

VN= Cantidad de negativos que fueron clasificados correctamente como negativos

FN= Cantidad de positivos que fueron clasificados incorrectamente como negativos

FP= Cantidad de negativos que fueron clasificados incorrectamente como positivos

- **Índice Kappa:** Mide la concordancia entre dos o más observadores en la medición a través de la relación entre los acuerdos observados y esperados por azar. El rango de valores oscila entre 0 y 1; cuando el valor es cercano a 1 la concordancia es muy buena y si es cercano a cero, pobre. En la ecuación (11) se muestra el cálculo de este índice (Abraira, 2001).

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (11)$$

Donde,

K = Índice Kappa

P_o = Concordancia o acuerdo acertado

P_e = Concordancia esperada debido al azar

- **Exactitud:** Es la relación entre las predicciones que fueron clasificadas correctamente y el total de registros basados en los datos generados en la matriz de confusión como se muestra en la ecuación (12) (Brownlee, 2016).

$$E = \frac{VP + VN}{VP + FP + FN + VN} \quad (12)$$

Donde,

E = Exactitud

VP = Verdadero positivo

VN = Verdadero negativo

FP = Falso positivo

FN = Falso negativo

- **Precisión:** Evalúa los datos de acuerdo con el desempeño de las predicciones en casos positivos, se basa en los registros de la matriz de confusión como se muestra en la ecuación (13) (Brownlee, 2016).

$$P = \frac{VP}{VP + FP} \quad (13)$$

Donde,

P = Precisión

VP = Verdadero positivo

FP = Falso positivo

- **Sensibilidad:** También llamada “recall”, identifica la cantidad de datos que el algoritmo es capaz de reconocer correctamente, relacionando las predicciones positivas correctas y el número total de predicciones positivas como se muestra en la ecuación (14) (Brownlee, 2016).

$$Recall = \frac{VP}{VP + FN} \quad (14)$$

Donde,

Recall = Sensibilidad

VP = Verdadero positivo

FN = Falso negativo

- **Puntaje de F1:** Es el promedio ponderado de precisión y recall. El puntaje representa ambas variables que contienen falsos positivos y falsos negativos. En la ecuación (15) se muestra el cálculo de este parámetro (Brownlee, 2016).

$$F1 = 2 * \frac{P * Recall}{P + Recall} \quad (15)$$

Donde,

F1 = Puntaje de F1

P = Precisión

Recall = Sensibilidad

- **Macro promedio:** Es el promedio de la métrica de evaluación que se quiere calcular en las diferentes clases. Si se tiene una matriz de confusión de 3x3, el macro promedio sería como se muestra en la ecuación (16) utilizando la métrica de precisión (Brownlee, 2016).

$$Macroavg = \frac{PC1 + PC2 + PC3}{3} \quad (16)$$

Donde,

Macroavg = Macro promedio

PC1 = Precisión de la clase 1

PC2 = Precisión de la clase 2

PC3 = Precisión de la clase 3

- **Promedio ponderado:** Es la relación entre cada clase por la métrica de evaluación que se quiere calcular. Continuando con la misma matriz 3x3 y con la métrica de precisión, el promedio ponderado se calcula como se muestra en la ecuación (17) (Brownlee, 2016).

$$PP = \frac{TVPC1 * PC1 + TVPC2 * PC2 + TVPC3 * PC3}{TD} \quad (17)$$

Donde,

PP = Promedio ponderado

$TVPC1$ = Total de valores positivos de la clase 1

$TVPC2$ = Total de valores positivos de la clase 2

$TVPC3$ = Total de valores positivos de la clase 3

$PC1$ = Precisión de la clase 1

$PC2$ = Precisión de la clase 2

$PC3$ = Precisión de la clase 3

TD = Total de datos

5.6.2. Coeficiente de determinación R^2

Indica el porcentaje de variación de la variable dependiente explicada por la variable independiente. Su rango de valores oscila entre 0 y 1, cuando el valor es cercano a 1 mayor es la asociación entre ambas variables. Caso contrario ocurre cuando el valor es cercano a cero, ya que esto representa que la relación entre estas es poca o nula. En la ecuación (18) se muestra el cálculo del coeficiente (Laguna, 2014).

$$R^2 = \frac{\sigma^2_{XY}}{\sigma^2_X \sigma^2_Y} \quad (18)$$

Donde,

R^2 = Coeficiente de determinación

σ^2_{XY} = Covarianza de X, Y

σ^2_X = Varianza de la variable X

σ^2_Y = Varianza de la variable Y

5.6.3. Medidas de dispersión

- **Error absoluto:** Es la diferencia entre el valor real y el medido, puede tomar valores positivos o negativos y tiene las mismas unidades que las de la medida. En la ecuación (19) se muestra el cálculo (Gil, 2013).

$$\varepsilon(x) = V_r - V_m \quad (19)$$

Donde,

$\varepsilon(x)$ = Error absoluto

V_r = Valor real

V_m = Valor medido

- **Desviación estándar:** Indica que tan dispersos se encuentran los datos con respecto al promedio. Lo cual indica que, si el valor es bajo, los datos están cerca de la media. En la siguiente ecuación (20) se muestra el cálculo (Abraira, 2002).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \mu)^2}{n}} \quad (20)$$

Donde,

σ = Desviación estándar

x = Variable

μ = Media de la variable x

n = Número de observaciones

6. MARCO REFERENCIAL

Existe una relación directamente proporcional entre el cambio climático y la incidencia de los incendios forestales, por ello es importante tener información precisa, continua y constante sobre este último acontecimiento. Para estudiar estos eventos se han utilizados diferentes imágenes de diversas plataformas (Cure, 2015) que permiten identificar características como las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por este fenómeno. Por ejemplo (Salcedo y Escobar, 2012), emplearon una metodología para determinar las áreas quemadas por medio de algoritmos que detectan cambios en la vegetación como el índice de vegetación NDVI y el índice de vegetación infrarrojo de onda corta SWVI (SAVI) del producto MOD13Q1 del sensor MODIS. Para calcular la emisión de

cada uno de los gases se empleó la ecuación propuesta por Seiler y Crutzen (1980), que calcula el resultado para cada clase de vegetación donde ocurrieron los incendios por medio del producto del área quemada (BA), densidad de la biomasa (BD), eficiencia de combustible (BE) y el factor de emisión de cada gas (EF(X)).

Wiedinmyer et al., (2006), emplearon la misma metodología descrita anteriormente para estimar la emisión de gases de incendios ocurridos entre 2002-2004 en América del Norte, para ello combinaron información satelital y datos in situ. La identificación de fuego se realizó por medio del producto MOD14 (MODIS fire and thermal anomalies product versión 4) del sensor MODIS. Por medio del DATASET FOR 2000 (GLC 2000) se obtuvo el tipo de cobertura del suelo de la zona a estudio; una vez identificadas las clases se les asignó respectivamente las cargas de combustible también publicadas por GLC 2000. Con el software de sistema de clasificación de características (FCCS) se asignó una fracción de combustible herbáceo y leñoso. Como método de comprobación para la carga de combustible identificadas con GLC, se utilizó el producto MODIS Vegetation Continuous Fields (VCF) que contiene información sobre la distribución de la superficie vegetal. Debido a que las bandas térmicas del sensor MODIS tienen una resolución espacial de 1 km, no se pudo identificar con exactitud la ubicación o grado de actividad del fuego. Por esta razón las áreas quemadas se escalaron de acuerdo con el tipo de vegetación del sitio del incendio. Se aplicó la ecuación para determinar la eficiencia de combustión y finalmente los factores de emisión se asignaron de acuerdo con la literatura encontrada. Una vez que se obtuvo los datos de todos los incendios ocurridos y el tipo de combustibles, se fusionaron espacialmente y se aplicó el modelo del cálculo de emisiones de gases. Producto de esto, se obtuvo las emisiones diarias con sus respectivas ubicaciones, datos que fueron exportados a un modelo de calidad de aire.

También, Mieville, et al., (2010) realizaron inventarios de emisiones históricas y recientes por quema de biomasa para los años 1900-2000 (periodo histórico) sobre una base decenal y 1997-2005 (periodo reciente) sobre una base anual a nivel mundial basándose en el modelo de Seiler y Crutzen (1980). Los inventarios se construyeron de acuerdo con dos metodologías. Para el periodo histórico se utilizaron datos de áreas quemadas recopiladas por Mouillot y Field (2005) y para los años recientes, el producto GBA2000 junto con datos de radiómetro ATSR con información de puntos de fuego. Los resultados proporcionaron datos de emisiones históricas en una cuadrícula con $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ de resolución y para las recientes $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. También, se identificó en el inventario histórico que hubo una disminución de superficies quemadas en zonas del norte, mientras que en las regiones tropicales como América del sur e Indonesia aumentaron debido a prácticas de deforestación como mecanismo para expansión agrícola.

Asimismo, Anaya (2009), estima las emisiones por biomasa quemada en Colombia entre 2001- 2006 empleando el modelo de Seiler y Crutzen (1980). También calculó las variables de área quemada, biomasa y eficiencia de combustión con productos de índices de vegetación. Utilizó datos L3JRC para calcular las áreas quemadas, MOD13A1 para la eficiencia de quemado a través de la diferencia de los valores del índice EVI antes y después de la ocurrencia del fuego y para estimar la biomasa empleó el índice MOD17A2. Analizó la

productividad y el tipo de cobertura con el producto MOD12Q1 que combinó con datos tomados en campo junto con imágenes satelitales con índices EVI, NDVI y MOD44B para identificar el porcentaje de vegetación por pixel. Finalmente, los resultados arrojaron que la región de Orinoquía presentó el 90% de emisiones de CO₂. Además, en los años 2004 y 2005 se evidenciaron los picos más representativos ya que en estas épocas ocurrieron la mayor y menor cantidad de incendios respectivamente.

Para determinar la ocurrencia y determinación de incendios Cure (2015), utilizó imágenes del sensor MODIS TERRA y AQUA con el fin de identificar las áreas quemadas (post-incendio). Para ello utilizó dos productos MODIS (MOD09A1 y MCD43A4) con y sin corrección de las condiciones de iluminación y observación (BRDF) para determinar el comportamiento espectral de las áreas afectadas por los incendios ocurridos. A partir de los productos anteriormente mencionados, también se calcularon seis índices espectrales (NDVI, IAQ, BAIM1, BAIM2 GEMI, NBR) para comprobar cuál de ellos permitía discriminar de mejor forma las superficies quemadas.

Hawbaker et al., (2017), utilizaron un algoritmo para identificar áreas quemadas en series de tiempo con imágenes Landsat denominado Landsat Burned Area Essential Climate Variable (BAECV), que utiliza modelos de regresión para generar superficies de probabilidad de quemado utilizando índices espectrales y bandas individuales de Landsat. Por otra parte, existen productos con algoritmos automatizados y semiautomatizados para detectar áreas de incendios a través de series de tiempo, entre ellos, SPOT VEGETATION, GBA GLOBSCAR, L3JRC y el producto MCD45A1 del sensor MODIS. Aunque estos productos se adecuan bien en una escala global, en la escala regional no es así debido a los cambios en la respuesta espectral de las áreas quemadas en el espacio y tiempo. Por esto Hardtke et al., (2015) desarrollaron un algoritmo para delimitar automáticamente dónde ocurrió un incendio a nivel regional o local con datos MODIS y SPOT VEGETACION. Los índices utilizados fueron el NBR y el dNBR para detectar las áreas quemadas y la severidad de la quemadura.

Ya que por medio de las metodologías tradicionales donde intervienen los factores de emisión asociados con combustibles y otros parámetros que son complejos de calcular y que presentan una alta incertidumbre. Pereira et al., (2009) investigaron sobre la relación entre las observaciones de profundidad óptica de aerosoles (AOD) y la energía radiativa liberada del fuego (FRE) para estimar los aerosoles y gases traza que se liberan a la atmósfera. Con el fin de desarrollar nuevos coeficientes de emisión de aerosol basados en FRE utilizando el producto de anomalías térmicas WFABBA del satélite GOES. Luego los resultados fueron comparados con la potencia radiativa del fuego (FRP) que proporciona el sensor MODIS. Finalmente, estos fueron incluidos a los Modelos de Transporte de Traza de Aerosol en el sistema de Modelamiento Atmosférico Regional (CATT-BRAMS).

Vadrevu et al., (2012), cuantificaron las emisiones de carbono negro derivados de la quema de biomasa en una región del Himalaya por medio de varios productos satelitales que determinan incendios activos, intensidad, áreas quemadas, variaciones de profundidad óptica de aerosol y altura de la columna de humo. La identificación de los incendios activos se hizo con los productos de potencia radiativa del fuego (FRP) y la energía radiativa del fuego (FRE)

del sensor MODIS. La FRE está integrada en la FRP, que es la tasa de energía liberada por unidad de tiempo. En la detección de áreas quemadas se utilizó el producto MODIS MCD45A1, que detecta los cambios en las coberturas basados en una función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF). Para el cálculo de emisiones, siguieron la metodología en la que intervienen las áreas quemadas, la carga promedio de biomasa, eficiencia de combustión y factores de emisión. La eficiencia de combustión y los factores de emisión que se utilizaron fueron extraídos de otros estudios. Finalmente, la variación de aerosol se hizo por medio del producto MODIS MYD08_M3.051 que evalúa los cambios por medio de la FRP. La cuantificación de las alturas de la columna de humo se hizo por medio del producto (CALIPSO) nivel 2.5 km de observaciones satelitales LIDAR que se evaluaron con datos MERRA del producto de reanálisis del sistema de observación de la Tierra Goddard (GEOS-5).

De igual modo, Liu et al., (2015), estimaron la emisión de los incendios agrícolas de la llanura del norte de china con el modelo de potencia radiativa del fuego (FRP) del sensor MODIS.

Emplearon esta metodología debido a que con los modelos en los que se involucra las áreas quemadas y factores de emisión suele haber mayor incertidumbre. Primero se integró el FRP en el tiempo para así obtener la energía radiativa del fuego (FRE), de esta ecuación se obtuvieron tres parámetros (b, h, o) que están asociados a la relación entre la FRP de Terra y Aqua; para hallar el valor de los parámetros, se implementaron ecuaciones que contenían como factor multiplicativo el promedio de la FRP entre Terra y Aqua. Adicional a esto, los autores agregaron un parámetro (e) en el factor de la hora pico (h) para reflejar la variabilidad temporal de la FRP en la zona de estudio. Finalmente, los resultados fueron comparados con el producto mensual de áreas quemadas MCD45A1 y la base de datos de emisión de incendios mundial GFEDV3.1. En cuanto a la primera comparación, se pudo observar que hubo una sobreestimación en algunos años respecto a los datos de MCD45A1, esto pudo haber sido porque la quema de residuos de cultivos es muy pequeña para ser detectada por sensores satelitales. Caso contrario ocurrió en la comparación con los datos GFEDV3.1 ya que las emisiones fueron menores.

Asimismo, Jordan et al., (2008), estimaron las emisiones de humo por medio de técnicas satelitales que miden la energía que se emite por los incendios o también llamado, método directo de estimación. El objetivo del estudio fue calcular el flujo de masa de humo utilizando las tasas de liberación de energía radiativa del fuego (FRE –RFRE) y la profundidad óptica de aerosol adquiridos por el sensor MODIS. Con los productos de incendios de este sensor, se identificó la ocurrencia y ubicación de los mismos y con los productos atmosféricos se determinó el AOD. Posterior a esto, se calculó la emisión de humo de los pixeles donde se ubicaron los incendios con un algoritmo en el que el valor mínimo se tomó como el fondo relativo y el de mayor valor se consideró como el humo total, entonces la estimación de humo se dio por medio de la resta entre el humo total y el fondo relativo. Finalmente, se estimó la densidad de masa de humo emitida (SMD) dividiendo la estimación de humo calculada antes con la eficiencia de extinción de masa de humo tomada de otra investigación.

Igualmente, Della Ceca et al., (2016), monitorearon la calidad del aire con varios sensores y satélites como MODIS/Aqua, SeaWIFS/SeaStar y OMI/Aura, para realizar una comparación de los datos resultantes con la red global de medición de aerosoles (AERONET) que contiene una base de datos de propiedades ópticas, microfísicas y radiativa de aerosoles. También, para segregar los tipos de aerosoles y materiales particulados que se presentan durante los incendios. La metodología consistió en utilizar los productos MYDO4, SWDB y OMAERO para calcular el AOD, es decir, la carga total de aerosoles en la ventana atmosférica. Todo esto con el fin de hacer una comparación de resultados para utilizarlos como herramienta predictiva en la toma de decisiones durante las temporadas que se presentan los incendios forestales.

Guo et al., (2019), propusieron una nueva metodología para estimar las emisiones de CO₂ de un incendio activo en Siberia el 20 de abril del 2015. Emplearon datos del satélite Observatorio de Carbono en Órbita-2 (OCO-2), del sensor MODIS y del espectroradiómetro de imágenes de múltiples ángulos (MISR). Para detectar las áreas quemadas y los incendios activos, utilizaron las imágenes MODIS. Por medio del software MIRS Interactive Explorer (MINX) se identificaron las columnas de humo y su altura. Luego descargaron los puntos OCO-2 que coincidieran con las columnas de humo ya identificadas y seguido a esto se aplicó el modelo de transición de cálculo de masa, que se basa en la relación entre densidad del CO₂, y el volumen de las columnas de humo. Los resultados que se obtuvieron con este método se compararon con los productos de Biomass Burning Model (BBM) para esa misma zona y se determinó que la metodología con BBM obtuvo mejores resultados. Sin embargo, estos permanecieron dentro del rango esperado.

Lozada, Choco y Torres (2020), aplicaron la metodología del modelo empírico de estimación de metano (CH₄) para cuantificar sus emisiones en el relleno sanitario presidente para los años 2014 y 2015 empleando imágenes satelitales ETM+ y OLI del satélite Landsat 7 y 8. El modelo que aplicaron relaciona el factor temperatura por medio de la temperatura superficial terrestre (TLS), datos tomados in situ y el área de la zona de estudio. Hicieron el preprocesamiento de las imágenes, haciendo la corrección atmosférica, conversión de valores de radiancia a reflectancia. También, calcularon la emisividad y un índice de escalonamiento que proviene de la aplicación del índice de diferencia normalizada (NDVI); con estos datos se calculó la temperatura superficial terrestre y el factor de temperatura para así finalmente aplicar el modelo para la estimación de metano. Aunque los resultados obtenidos sobreestimaron los valores tomados en campo, se comprobó que el uso de la percepción remota es un gran contribuyente para el monitoreo de las emisiones atmosféricas.

7. METODOLOGÍA

7.1 Localización

El Departamento de Cundinamarca con coordenadas 4°37' 00" Norte y 74°06' 00" Este, se encuentra ubicado en la parte central de Colombia en la región andina. Forma parte de la cordillera oriental y ocupa una superficie de 24.210 km². De acuerdo con su ubicación, posee diversidad de pisos térmicos que permiten contar con variedad en los ecosistemas. A continuación, en la figura 2 se muestra la ubicación del departamento en Colombia.

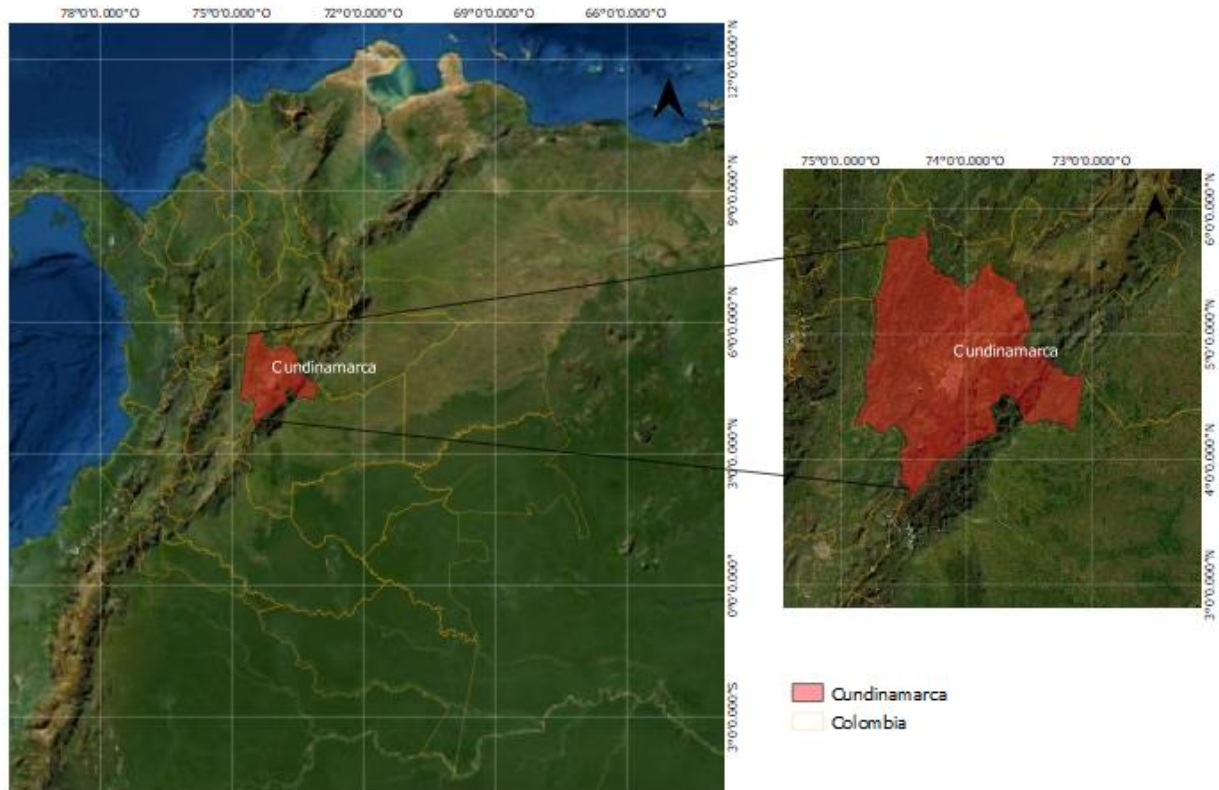


Figura 2: Departamento de Cundinamarca

7.2 Métodos

La metodología se basó en el modelo de biomasa quemada propuesto por Seiler y Crutzen, (1980). En la figura 3 se presenta el diagrama metodológico con las cinco fases establecidas para el desarrollo de esta investigación, seguido a este se da una breve descripción.

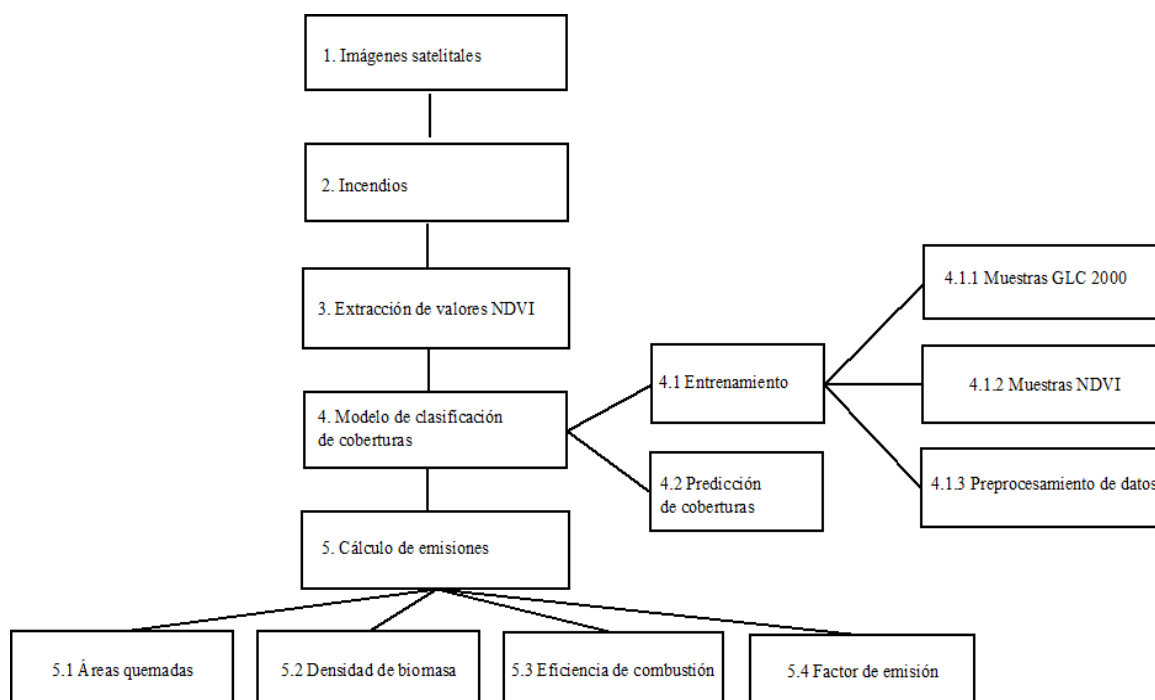


Figura 3: Diagrama metodológico

Fuente: Elaboración propia

1. IMÁGENES SATELITALES

A través de Google Earth Engine se elaboró un script en lenguaje de programación Java para realizar la descarga de las imágenes satelitales. El producto descargado para los años de estudio (2008-2018) fue MOD13Q1 V6 de 16 días del sensor MODIS a bordo del satélite Terra con una resolución espacial de 250 metros.

2. INCENDIOS

Descarga: La descarga de la información sobre los incendios se hizo a través de la página de sistema de gestión de recursos (FIRMS) de la NASA, que contiene una base de datos de fuegos activos casi en tiempo real monitoreados por el sensor MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua y por el conjunto de radiómetros de imágenes infrarrojas visibles (VIIRS) a bordo de S-NPP y NOAA 20; cada ubicación de un punto de fuego representa el centro de un pixel de 1 km para MODIS y 375 m para VIIRS.

También, cuenta con información de incendios ocurridos desde el 11 de noviembre del 2000 para MODIS, desde el 20 de Enero del 2012 para VIIRS S-NPP y desde el 1 enero del 2020 para VIIRS NOAA-20 hasta el año presente para todos los sensores. De esta colección histórica se descargaron los incendios en formato shape (shp) para cada trimestre de los años a estudio para el departamento de Cundinamarca.

Corte: Una vez que se tuvo la ubicación de los incendios en formato shp, con el software ArcGis y con un archivo en formato .shp del departamento de Cundinamarca se hizo el corte de las imágenes del producto MOD13Q1 para identificar los incendios ocurridos en la zona de estudio.

3. EXTRACCIÓN DE VALORES NDVI

Se realizó un código de Python en Google Colaboratory (Colab) para extraer los valores NDVI de los puntos donde ocurrieron los incendios entre los años 2008-2018.

Una vez realizado el corte de la zona de estudio con los puntos de fuego, se ingresaron al algoritmo de extracción de valores NDVI para ser relacionados con la ubicación geográfica de cada punto de fuego.

4. MODELO DE CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS

También, se diseñó un código en Colab para clasificar las coberturas de acuerdo a las muestras de valores NDVI a través del método de clasificación Random Forest. A continuación, se detalla cada uno de los pasos:

4.1 Entrenamiento

4.1.1. Muestras Global Land Cover 2000 (GLC 2000): Debido a que las constantes para cada tipo de cobertura y gas están definidos de acuerdo con la clasificación GLC 2000, fue necesario extraer muestras de esta clasificación en la zona de estudio a interés de este proyecto. Para ello, por medio del software Quantum Gis (QGIS) se distribuyeron puntos de forma aleatoria en la zona del departamento de Cundinamarca del mapa de cobertura GLC 2000 región sur américa, y se almacenaron esos valores.

4.1.2. Muestras NDVI: A través de Google Earth Engine (GEE) se filtró y descargó el ráster del producto MOD13Q1 que contenía los valores de NDVI del mismo periodo de tiempo del mapa de coberturas GLC 2000. Posteriormente, con los mismos puntos de las muestras GLC 2000 se extrajeron los valores de NDVI de la zona de estudio mediante el software Arcgis.

4.1.3. Preprocesamiento de datos: De acuerdo con la clasificación GLC 2000, en catorce clases se puede producir fuego; pero en este proyecto se emplearon ocho de ellas, que fueron las clases resultantes de la extracción de muestras GLC 2000. Asimismo, se estableció un rango de valores NDVI para cada una de las ocho clases. Este último paso fue necesario hacerlo debido a que cuando se hizo la revisión de los datos, se encontró que había valores de NDVI que pertenecían a más de una clase.

Una vez se obtuvo toda la información, se entrenó el algoritmo RandomForest (RF) con aproximadamente 2000 muestras con valores de NDVI para ocho tipos de cobertura de suelo según la clasificación GLC 2000.

4.2. Predicción de coberturas

Cuando el algoritmo de clasificación estuvo entrenado correctamente con los valores de NDVI para cada tipo de cobertura, el paso siguiente fue ingresar los archivos de extracción de valores NDVI para realizar las respectivas predicciones de las coberturas donde ocurrieron cada uno de los incendios.

5. CÁLCULO DE EMISIONES

Con los resultados de las coberturas de suelo se pudo realizar el cálculo de las emisiones a través de la ecuación (6) con las áreas quemadas, densidad de biomasa, eficiencia de combustión y factores de emisión.

5.1. Áreas quemadas (BA)

Las áreas quemadas se calcularon de acuerdo con el tamaño del pixel de las imágenes utilizadas y a la cantidad de pixeles identificados como puntos de fuego que pertenecían a cada tipo de cobertura.

5.2. Densidad de Biomasa (BD)

Las constantes de la densidad de biomasa se determinaron de acuerdo con el tipo de cobertura en la que ocurrieron los incendios según los resultados arrojados por el algoritmo de clasificación. Estas constantes se derivaron de Michel et al., (2005), de acuerdo con la clasificación GLC 2000.

5.3. Eficiencia de combustión (BE)

De igual manera que con la densidad de biomasa, las constantes de eficiencia de combustión para cada uso de suelo se adoptaron de los valores publicados por Michel et al., (2005).

5.4. Factor de emisión (EF)

Las constantes de los factores de emisión se obtuvieron de los valores publicados por EPA AP-42 document, 1995; Guild, et al., 2004; Reddy y Venkataraman, 2002; Battye y Battye, 2002; Andreae y Merlet, 2001; Hoelzemann et al., 2004; Liu, 2004. Wiedinmyer et al., (2006), realizaron una recopilación los valores que vienen dados según el tipo de cobertura de ocurrencia de incendios según la clasificación GLC y también de acuerdo con el tipo de gas al cual se le quiere calcular la emisión.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Imágenes satelitales

A través de un script diseñado en Google Earth Engine se descargaron un total de 44 imágenes del producto MOD13Q1 V6 de 16 días con resolución espacial de 250 metros; cuatro por cada año de estudio debido a que se tuvo en consideración que los periodos climáticos del país varían aproximadamente cada tres meses y que estos cambios influyen en la dinámica de los usos de suelo y del desarrollo de incendios. Por esta razón, se decidió evaluar todos los años de acuerdo con los cuatro trimestres que presenta un año (enero-marzo, abril-junio, julio-septiembre, octubre-diciembre). Las imágenes descargadas contenían valores de NDVI calculados a partir de reflectancias de superficie bidireccionales corregidas atmosféricamente.

Extracción de valores NDVI

Los puntos de fuego y las imágenes del producto MOD13Q1 descargados para cada trimestre, fueron las variables de entrada al código de programación diseñado para extraer el valor de NDVI de cada ubicación de incendio; basándose en la relación de la extracción de las coordenadas geográficas y valores del índice de vegetación en cada posición del fenómeno como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Extracción de valores NDVI

NDVI	Longitud	Latitud
0.4554	-73.9023	4.3587
0.3819	-73.1599	4.4725
0.2049	-74.2307	4.7156
0.60820	-73.9195	4.4026
0.69845	-74.7447	4.3842
0.47375	-74.8012	4.2951
0.56475	-74.7973	4.7291

Clasificación GLC y valores NDVI

Entrenamiento

Cobertura del suelo

El algoritmo de cobertura de suelo se entrenó de acuerdo con la clasificación GLC 2000 con aproximadamente 2000 puntos que se distribuyeron aleatoriamente sobre la zona de estudio con los ocho tipos de coberturas que se muestran en la tabla 3, debido a que estas representaron el comportamiento de la cobertura del suelo en el

departamento de Cundinamarca y además presentan características óptimas para el desarrollo de incendios.

Tabla 3: Clasificación de coberturas GLC 2000 asociados a los rangos NDVI

CLASIFICACIÓN GLOBAL LAND COVER 2000 (GLC 2000)		RANGO NDVI
2	Cubierta arbórea, latifoliado, caducifolio, cerrado	0.60 – 0.783
4	Cubierta de árbol, hojas de aguja, perenne	0.40 – 0.60
6	Cubierta arbórea, tipo de hoja mixta	0.30 – 0.40
11	Cubierta de arbusto, cerrado-abierto, siempre verde	0.23 – 0.25
13	Cubierta herbácea, cerrada-abierta	0.20 – 0.23
14	Cubierta de arbusto escasa o herbácea escasa	0.17 – 0.20
16	Zonas cultivadas y gestionadas	0.15 – 0.17
17	Mosaico:	0.25 – 0.30
	Tierras de cultivo / Cubierta arbórea / Otra vegetación natural	

Fuente: Modificado de Comisión Europea, (2020)

Rangos NDVI para clasificación de usos del suelo

Como característica del algoritmo para la clasificación de coberturas, se utilizó el producto Modis MOD13Q1 de 16 días con una resolución de 250 m. Se escogió este índice ya que permite identificar el desarrollo de la vegetación basándose en la intensidad de la radiación reflejada de las bandas del rojo e infrarrojo las cuales son ideales para estudiar la vegetación.

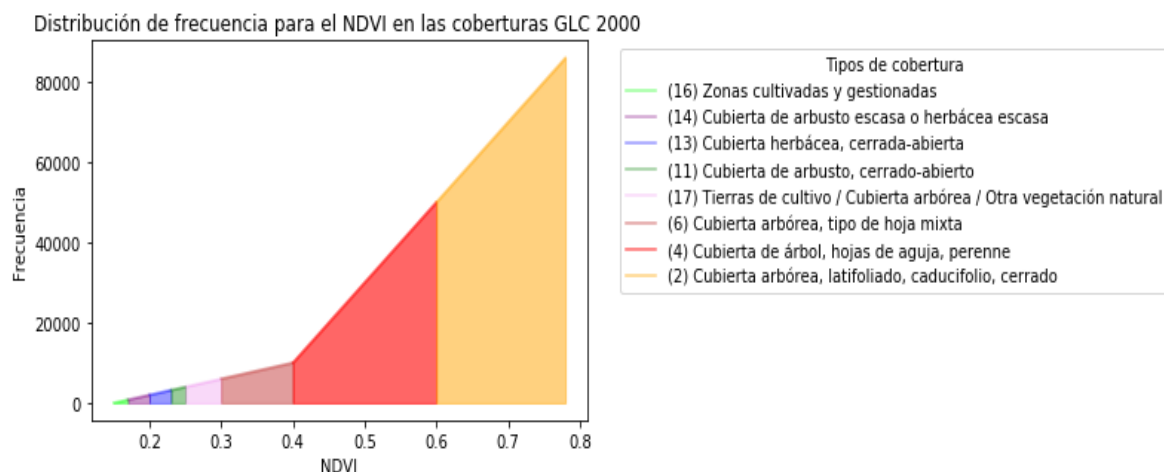


Figura 4: Distribución de frecuencia para el NDVI en las coberturas GLC 2000

Los mismos puntos empleados para la clasificación GLC 2000 fueron utilizados para extraer los valores de las diferentes imágenes ráster con valores de NDVI; de acuerdo con los resultados se hizo un reajuste de valores para cada tipo de cobertura a predecir como se muestra en la figura 4, debido a que con los rangos originales que tiene el índice, se identificó que algunos valores pertenecían a más de un tipo de cobertura GLC 2000 lo cual generaba errores.

Constantes para cálculo de emisiones

Densidad de biomasa (BD) y eficiencia de combustión (BE)

Para realizar el cálculo de las emisiones de los gases fue necesario identificar las coberturas de suelo donde ocurrieron los incendios para así obtener los valores de las constantes de densidad de biomasa y eficiencia de combustión. Las constantes fueron calculadas por Michel et al., (2005) para cada tipo de cobertura según la clasificación UMD Land Cover que fueron relacionadas con la clasificación GLC 2000 como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4: Constantes de densidad de biomasa y eficiencia de combustión para cada tipo de cobertura

	CLASES GLC	BD (kg/m ²)	BE
1	Cubierta arbórea, latifoliado, perenne	23,35	0,25
2	Cubierta arbórea, latifoliado, caducifolio, cerrado	20	0,25
3	Cubierta arbórea, latifoliado, caducifolio, abierto	3,3	0,4
4	Cubierta de árbol, hojas de aguja, perenne	36,7	0,25
5	Cobertura arbórea, con hojas aciculadas, caducifolio	18,9	0,25
6	Cubierta arbórea, tipo de hoja mixta	14	0,25
9	Mosaico: Cubierta arbórea / Otra vegetación natural	10	0,35
11	Cubierta de arbusto, cerrado-abierto, siempre verde	1,25	0,9
12	Cubierta de arbusto, abierto cerrado, caducifolio	3,3	0,4
13	Cubierta herbácea, cerrada-abierta	1,425	0,9
14	Cubierta de arbusto escasa o herbácea escasa	0,9	0,6
16	Zonas cultivadas y gestionadas	0,44	0,6
17	Mosaico: Tierras de cultivo / Cubierta arbórea / Otra vegetación natural	1,1	0,8
18	Mosaico: Tierras de cultivo / arbustos o césped	1	0,75

Fuente: Michel et al., 2005

Factor de emisión (FE)

El factor de emisión es otra constante importante para estimar la emisión de gases por incendios forestales. Está dado de acuerdo con el tipo de cobertura según la clasificación GLC 2000 y al tipo de gas al cual se le quiere calcular la emisión. En la

tabla 5 se muestran los valores de la constante publicado por Wiedinmyer et al., (2006), para los usos de suelo identificados en esta investigación.

Tabla 5: Constantes de factor de emisión para cada tipo de cobertura

Código GLC	C02 (kg/Mg ⁻¹)	NOX (kg/Mg ⁻¹)	CH4 (kg/Mg ⁻¹)
2	1588	1,3	6,6
4	1569	2,5	4,8
6	1569	2,7	4,5
11	1630	3,2	3,1
13	1630	6,5	3,1
14	1630	6,5	3,1
16	1630	6,5	3,1
17	1630	6,5	3,1

Fuente: Wiedinmyer et al., (2006)

Influencia de los periodos climáticos en la presencia de incendios

Debido a la ubicación geográfica y a las características fisiográficas que presenta el país, el clima es muy variado en cuanto a sus regiones. En el caso de la región andina donde se encuentra la zona de estudio de esta investigación, la zona de convergencia intertropical (ZCIT) es un factor que influye en la variación climática de la región ya que es un componente donde coinciden los vientos del hemisferio norte con los del sur. Motivo por el cual se ejerce una gran influencia de la distribución anual de lluvias que se presentan. Por lo anterior, se logra discriminar dos periodos de lluvias durante abril-mayo y octubre-noviembre y dos periodos de menor precipitación en diciembre-marzo y junio-agosto.

Considerando que el departamento de Cundinamarca cuenta con pisos térmicos cálido, templado y frío; en esta investigación se estudiaron y distribuyeron los periodos climáticos de acuerdo con los cuatro trimestres que presenta cada año como se muestra en la figura 5.

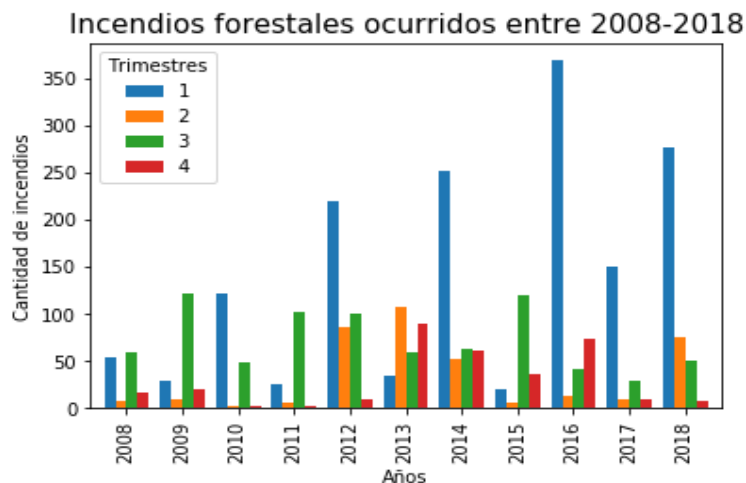


Figura 5: Incendios forestales ocurridos entre 2008-2018

Se puede observar que existe una relación directamente proporcional entre los periodos climáticos y la presencia de incendios, puesto que generalmente en los trimestres dos y cuatro de cada año se presenta una disminución en la cantidad de incendios, debido a que en esas épocas del año normalmente son en las que hay aumento de precipitaciones como se muestra en la figura 6.

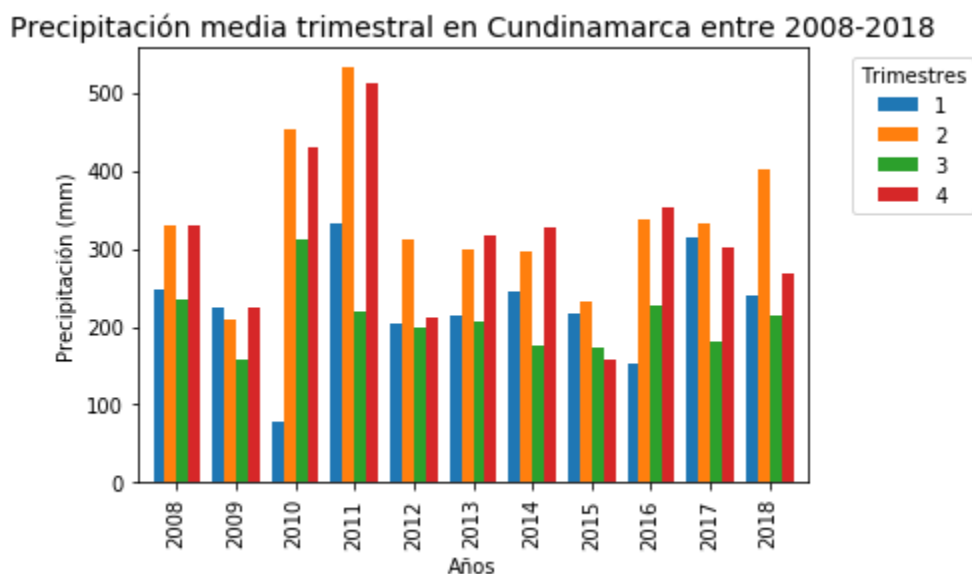


Figura 6: Precipitación media en Cundinamarca 2008-2018

Caso contrario ocurre en los trimestres uno y tres que como se muestra en la figura 5, fueron los periodos en los que más incendios se presentaron, dado que son temporadas en las que hay una reducción en las precipitaciones y aumento de evaporación y evapotranspiración, condiciones que favorecen a la presencia del fenómeno de ENOS (El Niño- Oscilación del Sur).

La figura 5 también muestra un aumento significativo en la cantidad de incendios ocurridos en el primer trimestre de los años 2012, 2014 y 2016; temporadas en las que el fenómeno del Niño hizo presencia causando uno de los mayores déficits de lluvias registrados en el país. Lo anterior demuestra que los incendios también son influenciados por fenómenos naturales en los que varían patrones de lluvias, temperatura y vientos como los son el Niño y la Niña.

Influencia de las coberturas de suelo en la ocurrencia de incendios

Se realizó la clasificación de las coberturas de suelo para los ocho tipos de coberturas que presentaban condiciones favorables para la presencia de incendios según la clasificación GLC 2000 región sur américa como se muestra en la figura 7.

Incendios forestales ocurridos de acuerdo a las coberturas de suelo entre 2008-2018

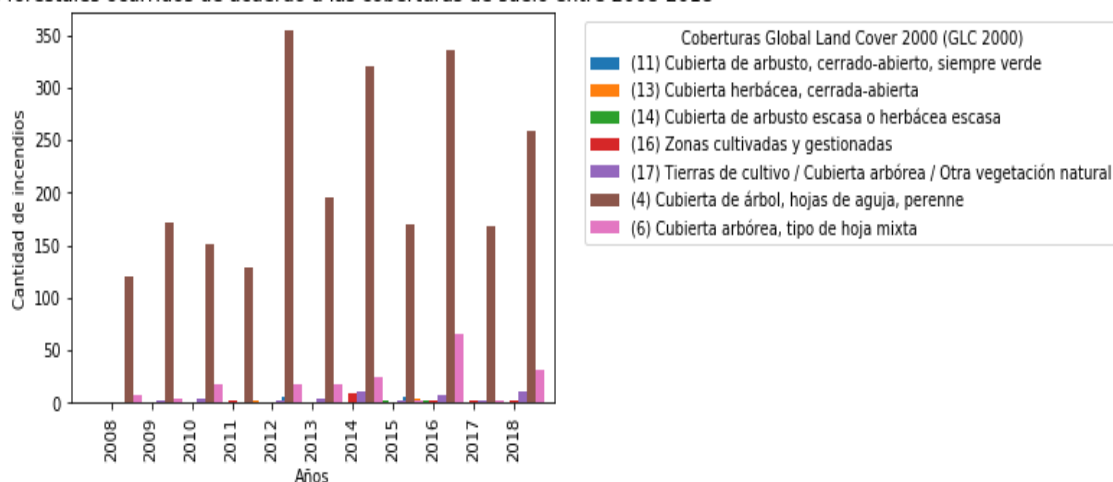


Figura 7: Incendios forestales ocurridos en Cundinamarca según los usos de suelo 2008-2018

En la figura 7, se evidencia que en todos los años de estudio en la cobertura 4 que corresponde a “cubierto de árbol, hojas de aguja, perenne”, se presentaron entre el 90% y 95% de los incendios con respecto a los demás usos de suelo. En este tipo de clasificación se encuentran plantaciones forestales de bosques que generalmente pertenecen a una misma especie y tienen un tiempo de vida de más de un año; características que junto con las condiciones climáticas hacen que sea un territorio óptimo para que se desarrollen incendios.

También, se observa que en la cobertura de “Bosques mixtos” representada con el número 6, ocurrieron entre 3% - 5% de los incendios restantes. Ya que este tipo de cobertura de suelo como su nombre lo indica, presenta bosques con diferentes características que son objeto de explotación forestal (IDEAM, 2008) que hacen favorable la presencia del fuego. Caso contrario ocurrió con los demás tipos de cobertura que representaron aproximadamente entre 0.5% y 1.5% de todos los incendios ocurridos para cada año; debido a que estos territorios corresponden a pequeños arbustos, zonas de cultivo y otro tipo de vegetaciones naturales pequeñas; condiciones que no son tan representativas en la dinámica del fuego. En las figuras 8 y 9 se muestra la distribución espacial de los incendios ocurridos en 2008 y 2016, años en los que hubo menor y mayor cantidad de incendios respectivamente, también se evidencia la cobertura de suelo afectado. Se observa que la distribución de los incendios no sigue un patrón establecido, pero en algunas temporadas generalmente convergen en el este y el oeste del departamento.

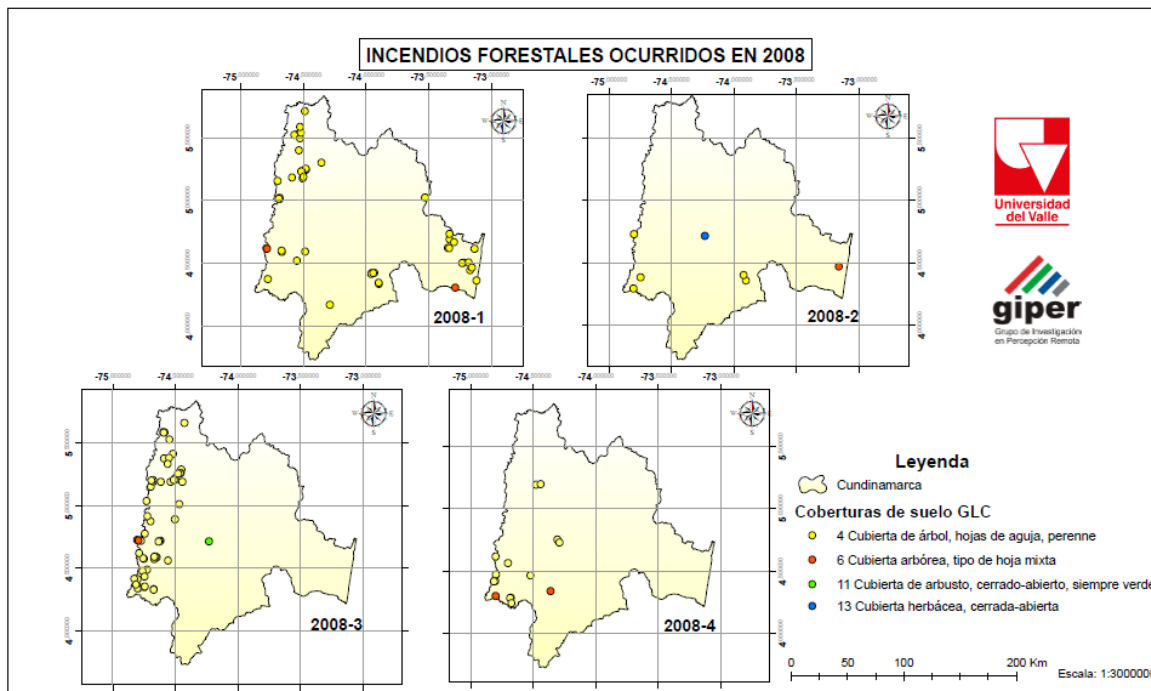


Figura 8: Incendios forestales ocurridos en Cundinamarca 2008

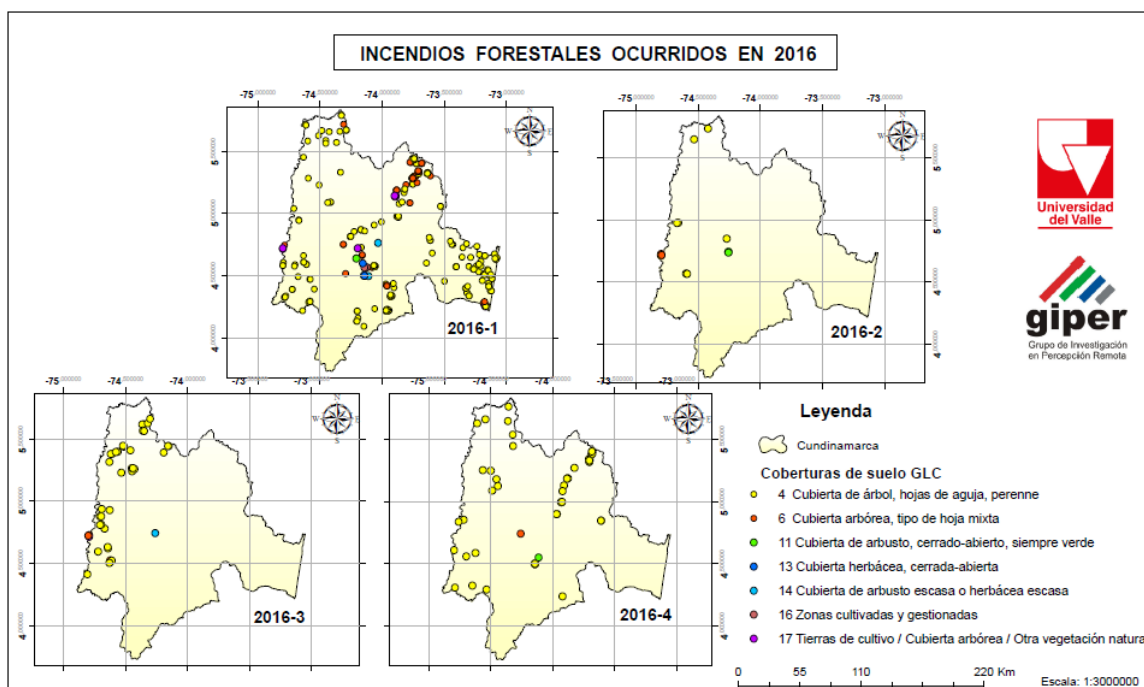


Figura 9: Incendios forestales ocurridos en Cundinamarca 2016

Áreas quemadas

Las áreas quemadas son una de las consecuencias de los incendios forestales en las que se presenta pérdidas de biodiversidad. La regeneración del suelo es lenta debido a que se aceleran los procesos erosivos que afectan las funciones ecológicas que tienen los bosques (González, 2009). En la figura 10 se expone el total de las áreas quemadas que se calcularon cada año para el departamento de Cundinamarca. Se observa que, en los años 2012, 2014 y 2016 se presentaron la mayor cantidad de áreas quemadas como consecuencia del fenómeno del Niño que para esos años causó grandes sequías en el país.

Por el contrario, en los años 2008 y 2011 se evidenció una menor cantidad de áreas quemadas ya que en esos años hubo una reducción en cuanto al número de incendios ocurridos, lo cual se vio reflejado la disminución de las zonas afectadas. Finalmente, se tiene que el total de áreas quemadas entre los años 2008-2018 para el departamento de Cundinamarca corresponde a 16.756,25 ha de territorio afectado por el fuego, causando impactos económicos, ecológicos y sociales como pérdida de vidas humanas, daños en propiedad pública y privada, pérdida de cultivos, entre otros (Ferreiro, 2016). En las figuras 11 y 12 se muestran las áreas quemadas de los años 2011 y 2012 unos de los años en los que se presentaron la menor y mayor cantidad de zonas afectadas por el fuego.

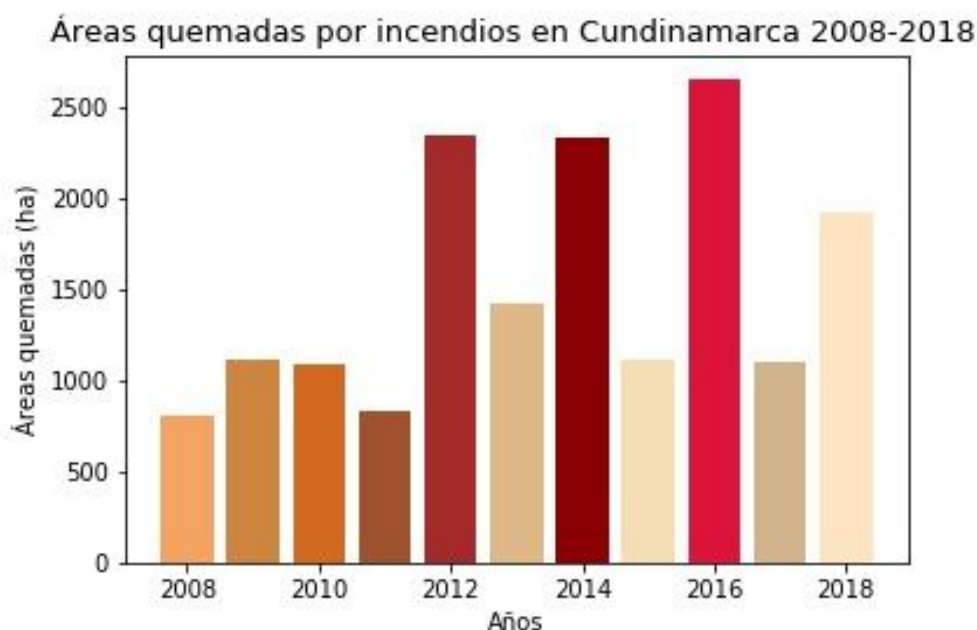


Figura 10: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2008-2018

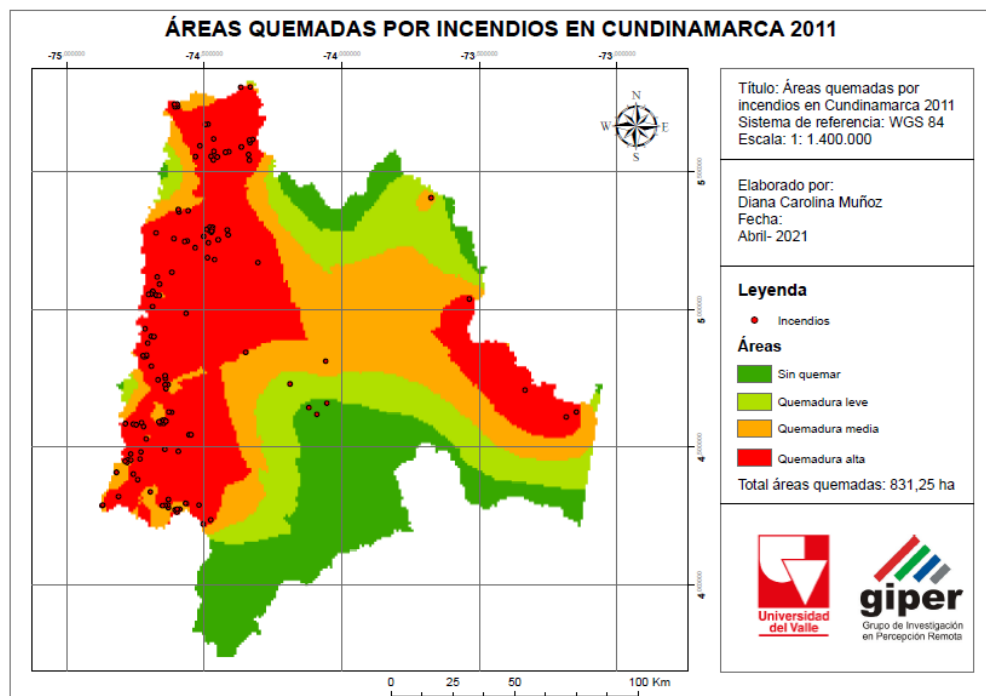


Figura 11: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2011

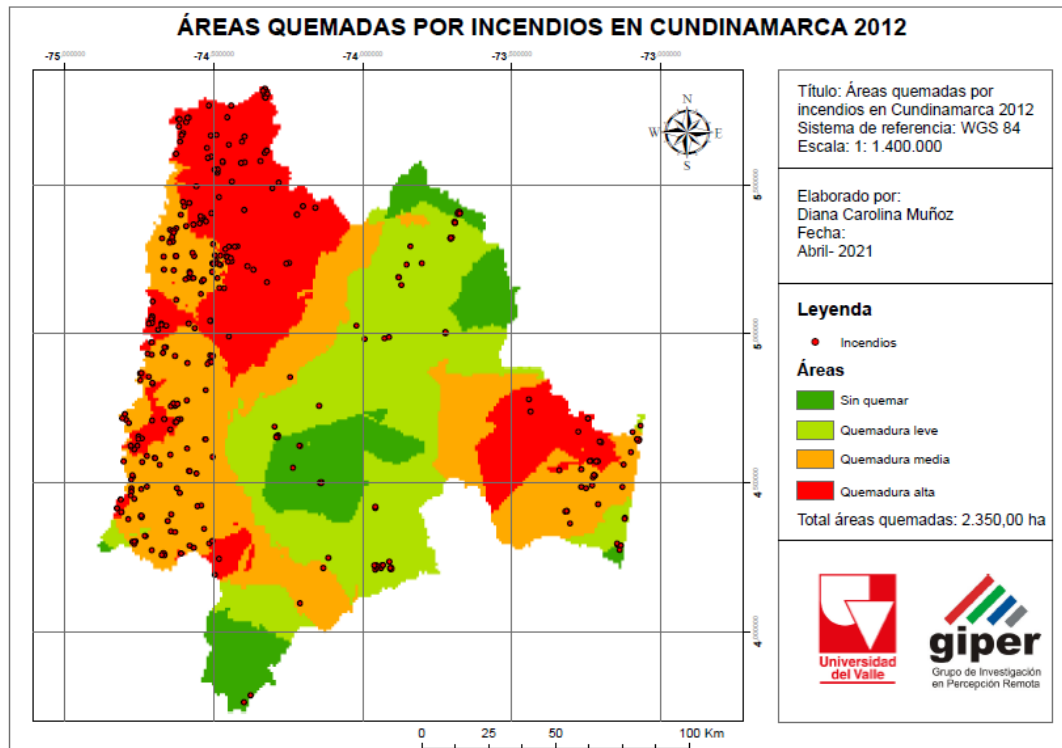


Figura 12: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2012

Los mapas de áreas quemadas fueron elaborados a través de la herramienta interpolación kriging del software Arcgis. Se ingresaron los puntos de fuego y de acuerdo a la agrupación de los puntos y a los valores de NDVI se identificaron zonas de quemadura alta, media, leve y zonas sin quemar. Hubo puntos de fuego que se ubicaron en las “zonas sin quemar”, lo cual pudo haber ocurrido debido a que el software realizó la distribución de acuerdo al rango de los valores de NDVI, es decir que los puntos de fuego agrupados con valores más altos de NDVI, se clasificaron en las zonas de “quemadura alta”, mientras que los puntos dispersos y con valores de NDVI bajos, se ubicaron en las zonas de “quemadura media” o en las zonas “sin quemar”. Por la anterior razón, los mapas realizados son una aproximación visual de las zonas que pudieron haber sido afectadas por el fuego, ya que se desconoce la extensión de las áreas quemadas de cada punto de fuego.

Emisiones de gases por incendios forestales

Las emisiones de gases de efecto invernadero causados por incendios forestales se han relacionado con el cambio en el comportamiento climático tanto a nivel regional como global, ya que se ha demostrado que son un elemento que condiciona la evolución de la contaminación ambiental, causando impactos en la salud (Ballester, 2005). A continuación, en las figuras 13 y 14 se observan las emisiones calculadas de CO₂, CH₄ y N₂O causadas por los incendios ocurridos entre los años 2008-2018 en Cundinamarca.

También, se evidencia que el comportamiento de los gases es muy variado, puesto que a lo largo de los años hay aumento y disminución en las cantidades emitidas. El primer año de estudio refleja el menor número de emisiones de los tres gases y en los siguientes años se presentan crecimientos como en los de 2012, 2014 y 2016 que tienen los picos más altos de emisiones debido a que como se ha mencionado anteriormente, en estos años se presentaron la mayor cantidad de incendios como consecuencia de la disminución de precipitaciones por la presencia del fenómeno del Niño.

Se identifica una gran diferencia entre las cantidades de GEI, puesto que el CO₂ representa el mayor número de emisiones a causa de los incendios forestales respecto a los demás gases; reafirmando que este es uno de los gases traza que más aporta en actividades que involucran al fuego. En las figuras 15 y 16 se muestran las emisiones de los GEI generadas por los incendios forestales ocurridos en 2008 y 2012.

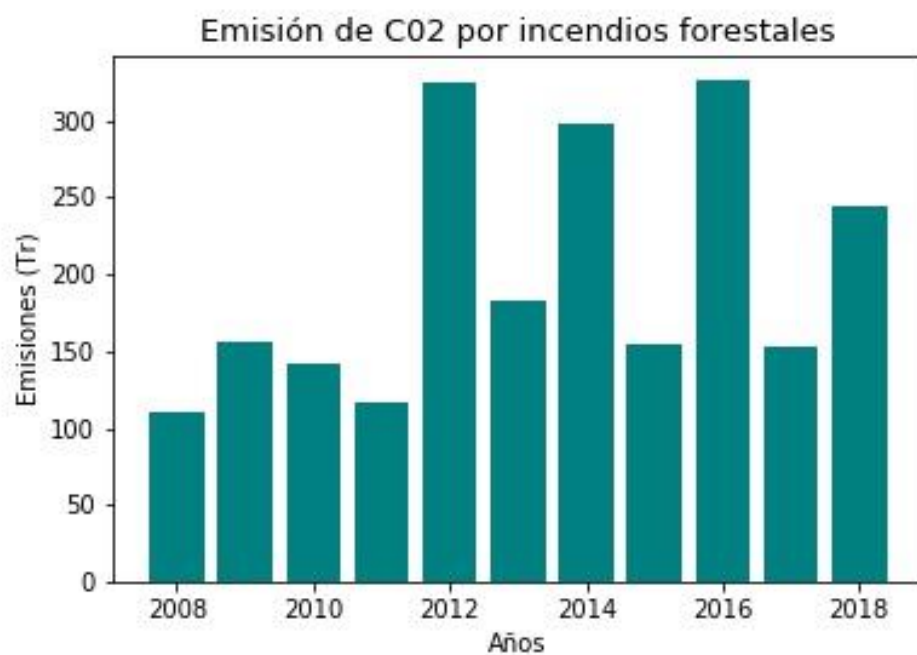


Figura 13: Emisiones de CO₂ por incendios forestales 2008-2018

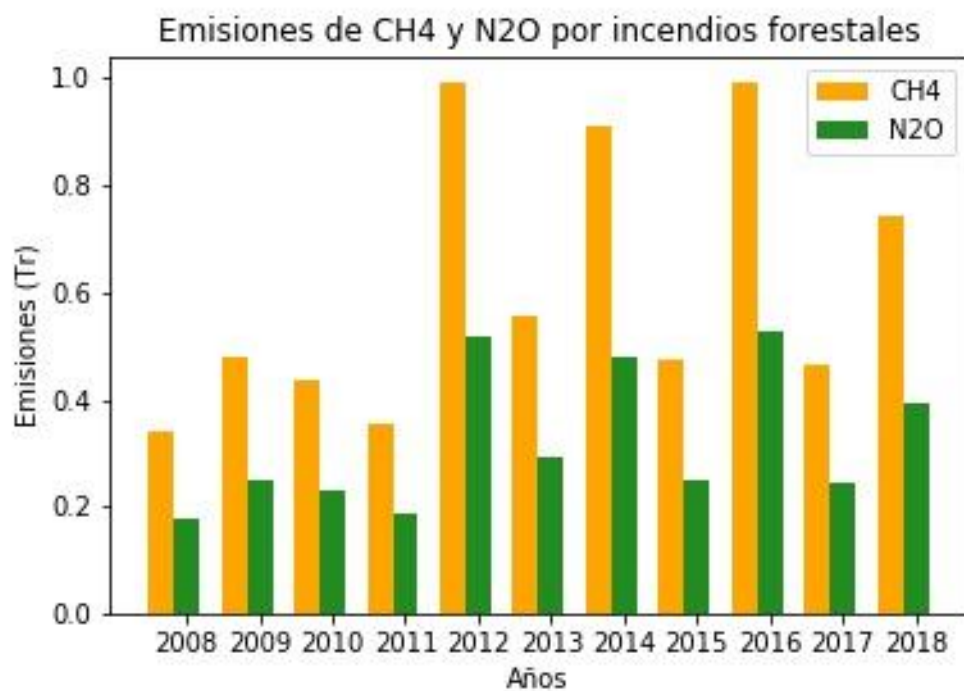


Figura 14: Emisiones de CH₄ y N₂O por incendios forestales 2008-2018

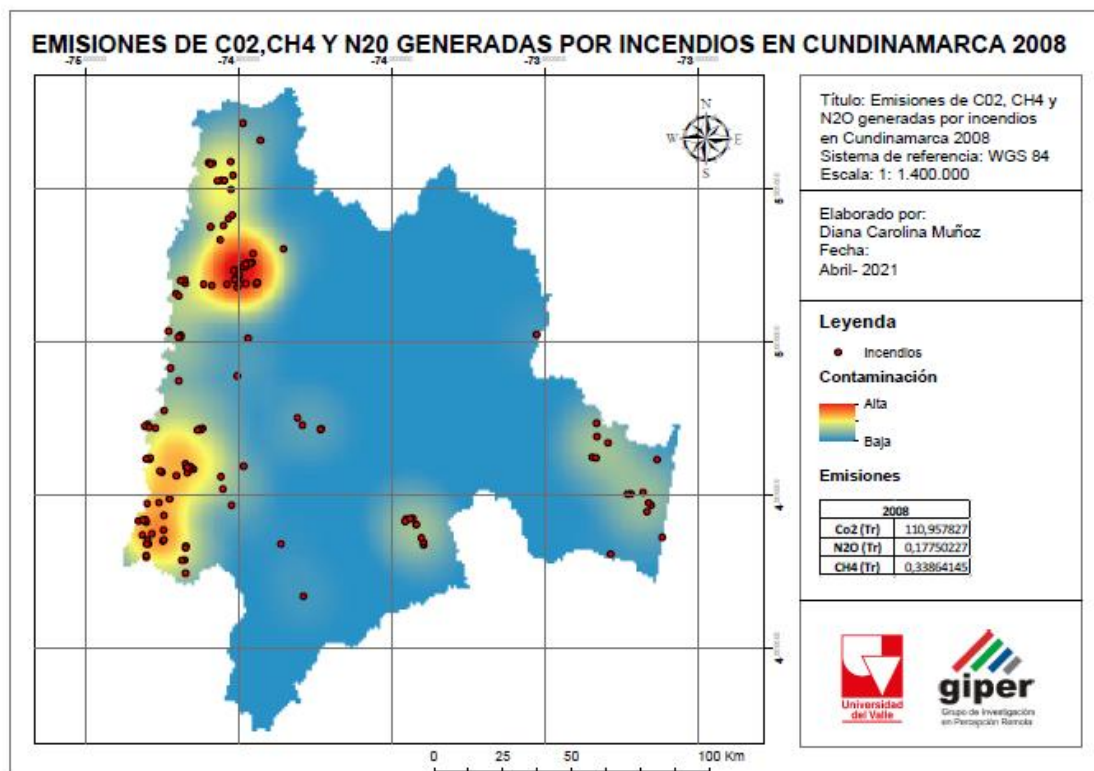


Figura 15: Emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O generadas por Incendios en Cundinamarca 2008

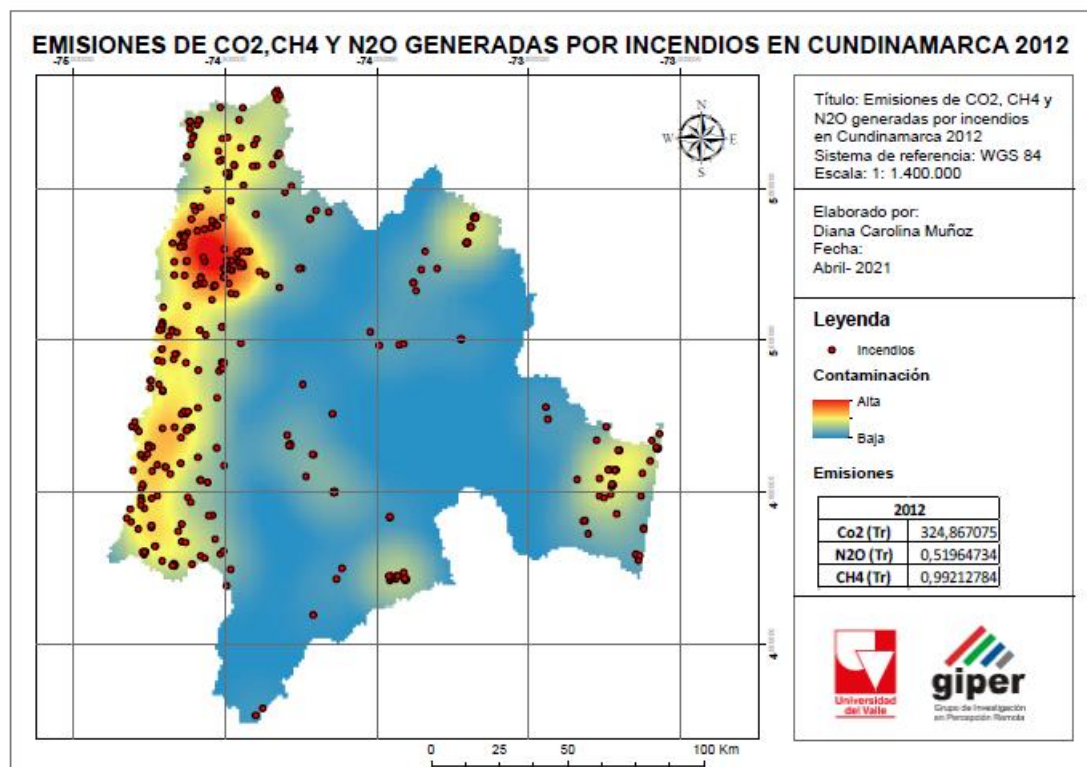


Figura 16: Emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O generadas por Incendios en Cundinamarca 2012

Los mapas de emisiones de CO₂, CH₄ Y N₂O se elaboraron con las herramienta “point density” del software Arcgis a través de los valores de NDVI de cada punto de fuego que de acuerdo a su agrupación y valor de NDVI, se ubicaron en zonas de “Alta” y “Baja” contaminación. Por lo anterior, los mapas son una representación visual aproximada de las emisiones de CO₂, CH₄ Y N₂O debido a que en esta investigación no se calcularon las emisiones de forma particular.

9. VALIDACIÓN

Modelo de clasificación

El algoritmo de clasificación de coberturas realizado con la técnica de machine learning Random Forest, fue validada con una matriz de confusión que evaluó el desempeño de la clasificación supervisada para los 439 datos de validación. A continuación, en la tabla 6 se observa que en las clases 4, 6, 11, 14 y 16 se obtuvo una precisión del 100% mientras que para las clases 13 y 17 alcanzaron una precisión de 85% y 98% respectivamente. También, se evidencia que la exactitud de la clase 2 fue de 0 ya que el algoritmo fue entrenado con un solo valor para este tipo de cobertura.

En cuanto a la sensibilidad se observa que, a nivel general, el algoritmo presenta un alto porcentaje para discriminar las clases a excepción de las coberturas 5 y 2 que obtuvieron un porcentaje de 50% y 0%. De igual forma ocurrió con el puntaje f1 ya que 7 de las 8 clases presentaron un rendimiento mayor al 60%.

También, se observa que la exactitud, el macro promedio y el promedio ponderado corresponden a 99%, 85% y 99% respectivamente; estos porcentajes reflejan que a pesar de que los datos no se encontraron balanceados, el diseño y la implementación del algoritmo fueron acertados para hacer una correcta clasificación de coberturas a través de los valores NDVI asignados para cada una de las clases, lo cual se evidencia en el resultado de concordancia de 97% que presentó el índice kappa.

Tabla 6: Validación del modelo de clasificación

	Precisión	Recall	Puntaje F1	Support
2	0	0	0	1
4	1	1	1	340
6	1	1	1	30
11	1	0,5	0,67	4
13	0,85	1	0,92	11
14	1	0,67	0,8	3
16	1	1	1	8
17	0,98	1	0,99	42
Exactitud			0,99	439
Macro promedio	0,85	0,77	0,8	439

Promedio ponderado	0,99	0,99	0,99	439
Índice kappa	97%			

Áreas quemadas

La comparación de las áreas quemadas se hizo con información suministrada por el IDEAM que fue recolectada por las Autoridades Ambientales y de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres – UNGRD.

En la figura 17, se observa que la mayoría de las áreas quemadas calculadas con métodos empleados por la UNGRD son mayores a las que se obtuvo utilizando técnicas de percepción remota como las aplicadas en esta investigación. La diferencia radica en que la mayoría de las áreas quemadas son calculadas directamente donde ocurrió el suceso por personal capacitado como el cuerpo de bomberos que luego envían el reporte a la UNGRD. En el caso del cálculo con percepción remota, se encuentra una gran diferencia ya que es un método indirecto basado en el tamaño del pixel de las imágenes (250m x 250m) empleadas, cantidad de pixeles pertenecientes a cada tipo de cobertura afectada por el fuego y a la ubicación de los incendios captados por sensores Modis y VIIRS con resoluciones de 1 km y 375 m respectivamente; es por esto que al no calcular las áreas quemadas de forma directa (in situ), existe disminución de las áreas calculadas puesto que con las resoluciones espaciales de los sensores, no se alcanzan a identificar todos los puntos de fuego.

Validación de áreas quemadas por incendios forestales en Cundinamarca entre 2008-2018

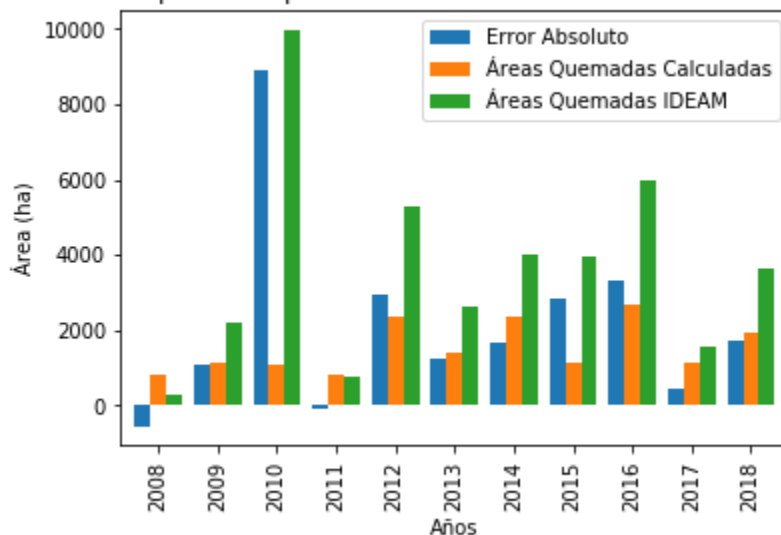


Figura 17: Validación de áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2008-2018

La diferencia de las áreas quemadas calculadas con ambas metodologías se evidencia en la columna “Error absoluto” de la tabla 7. Se observa que en los años 2008 y 2011 el valor tiene un signo negativo debido a que el área estimada en esta investigación fue mayor a la

registrada por la UNGRD; lo cual pudo haber ocurrido por errores aleatorios o porque en algunas ocasiones el tamaño del pixel representó más área de la que realmente fue.

Se observa que el promedio y la desviación estándar también son mayores en las áreas quemadas de la UNGRD, lo cual indica que los datos están más dispersos; característica representativa de este tipo de variables debido a que los incendios en la mayoría de los casos no se pueden predecir ni controlar, por ende, no existe un patrón establecido.

Tabla 7: Validación de áreas quemadas

Años	Áreas Quemadas IDEAM (ha)	Áreas Quemadas calculadas(ha)	Error absoluto (ha)
2008	267,25	812,50	-545,25
2009	2.195,13	1.118,75	1.076,38
2010	9.970,35	1.093,75	8.876,60
2011	746,55	831,25	-84,70
2012	5.267,56	2.350,00	2.917,56
2013	2.645,95	1.418,75	1.227,20
2014	4.002,00	2.337,50	1.664,50
2015	3.958,52	1.112,50	2.846,02
2016	5.954,70	2.656,25	3.298,45
2017	1.570,86	1.106,25	464,61
2018	3.650,25	1.918,75	1.731,50
Total	40.229,12	16.756,25	23.472,87
Promedio	3.657,19	1.523,30	
Desviación E	2.618,36	637,63	

En el diagrama de dispersión de la figura 18 se evidencia que las áreas quemadas calculadas por el IDEAM y las áreas quemadas calculadas en esta investigación, tienen una baja correlación positiva (0,16), esto indica que como se ha mencionado anteriormente, los métodos empleados presentan diferencias a la hora de obtener la información, los cuales se ven reflejados en los resultados.

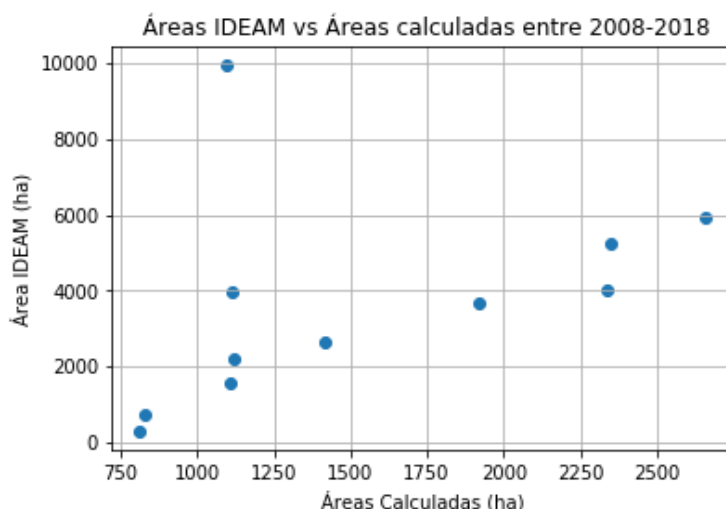


Figura 18: Diagrama de dispersión: Áreas calculadas por el IDEAM vs Áreas calculadas en esta investigación

Emisiones

La comprobación de las emisiones se hizo con los datos publicados en el inventario nacional y departamental de gases de efecto invernadero- Colombia, elaborado por el IDEAM para el año 2012. Las emisiones de cada gas están dadas en CO₂ equivalente, la cual es una medida en toneladas de la huella de carbono. Para realizar la conversión se utilizó el valor del Potencial de Calentamiento Global (PCG) que representa a través de un número la cantidad de calor atrapado en la atmósfera por determinado GEI, en relación con la cantidad de calor atrapado por el CO₂ en periodos de tiempo de 20, 50 y 100 años (IDEAM, 2012).

En la tabla 8 se muestran las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O estimadas por el IDEAM y por este proyecto para el departamento de Cundinamarca en el año 2012, basándose en el modelo propuesto por Seiler y Crutzen (1980). Se observa gran diferencia de los resultados entre ambas metodologías, lo cual pudo haber ocurrido debido a que la metodología que utiliza el IDEAM se basa en directrices del IPCC que emplean datos de actividad que provienen de estadísticas nacionales y departamentales de cada sector económico y factores de emisión dados por el IPCC en investigaciones internacionales. Otro factor que pudo haber influido en los resultados, es el valor empleado en la transformación de emisiones de CH₄ y N₂O a CO₂ equivalente, ya que en el inventario del IDEAM se usan las constantes para un periodo de tiempo de 100 años.

Tabla 8: Comparación de gases emitidos

GEI	Emisiones (kton C02 eq)	
	IDEAM	Calculadas
CO ₂	50,52948292	324867,075
CH ₄	14,92833384	20834,68472
N ₂ O	7,142183248	161090,6766

10. DISCUSIÓN

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se evidencia que los incendios forestales son una fuente de emisiones de gases de efecto invernadero que pueden provocar grandes alteraciones en la composición del aire tanto a escala regional como global. También, se identificó que una de las causas de dichos incendios se encuentra relacionada con las temporadas climáticas de sequía que presenta el país, debido a que la ausencia de precipitaciones genera condiciones óptimas en los suelos que junto con agentes externos como la actividad humana, hacen que se genere el fuego. Así como Mieville et al., (2010) concluyen que en las zonas tropicales el aumento de incendios está ligado en gran parte al fenómeno de El Niño- Oscilación del Sur (ENOS); caso contrario, sucede en temporadas de lluvia debido a que la precipitación no permite que los incendios se desarrollen tan fácilmente.

El uso del índice de vegetación NDVI junto con la clasificación supervisada Random forest, permitió identificar las coberturas en las que ocurrieron los incendios. Aunque los datos no fueron balanceados, se tuvo una exactitud de 99% y un índice kappa de 97%. En el estudio realizado por Platero (2020) se utilizó la misma técnica de clasificación para identificar siete tipos de coberturas en la provincia de Toledo (España) con tres índices espectrales (NDVI, NDWI y NDBI). En dicho estudio se obtuvo una exactitud de 91% y un índice kappa de 89%, esto indica que, aunque no estén balanceadas las muestras, el algoritmo es tan robusto que permite aprender con los datos entregados para clasificar correctamente, siempre y cuando cada clase tenga especificado el rango espectral de las características.

La cobertura en la que más se presentaron incendios forestales en todos los años de estudio, fue la clasificada como “cubierta de árbol, hojas de aguja, perenne” en escala global, que corresponde a “plantaciones forestales” en escala regional en la clasificación GLC 2000. Las plantaciones forestales se caracterizan por tener una vegetación arbórea en las que interviene el hombre para la producción de madera o como mecanismo de protección al medio ambiente a través de la reforestación. Las coberturas en mención son unas de las más afectadas por los incendios, dado que las actividades que en estas se realizan, hacen propicio este tipo de fenómenos que comúnmente son iniciados por el hombre. En el estudio realizado por Salcedo y Escobar (2012), se encontró que la cobertura con más áreas quemadas por la presencia de incendios fue la de “bosques naturales” según la clasificación Corine Land Cover (CLC) que también corresponde a “plantaciones forestales” según la clasificación GLC 2000; causando así mayor cantidad de emisiones debido a que la constante de densidad de biomasa para esa cobertura es mayor que para las demás. Por el contrario, en la investigación realizada por Anaya (2009), se identificó que las sabanas y los pastizales fueron las coberturas que más áreas quemadas presentaron.

La diferencia entre las emisiones calculadas por el IDEAM y las de este trabajo de grado, radica en que las estimaciones se hacen con técnicas distintas, puesto que como se ha mencionado anteriormente, el IDEAM realiza los cálculos de acuerdo con metodologías de nivel 1 y 2 con estadísticas de datos de actividad y factores de emisión que generalmente

proviene de estudios hechos en otros países como lo mencionan en IDEAM, (2016). Por consiguiente, la incertidumbre de las estimaciones es alta, pues al no realizar los cálculos en las zonas directamente afectadas, no se logra identificar con certeza los cambios del territorio cuando ocurren fenómenos tan efímeros como lo son los incendios. Por este motivo, el uso de este tipo de metodología puede presentar errores de omisión.

Por otra parte, en la presente investigación se emplearon técnicas de sensoramiento remoto con productos satelitales que de acuerdo con las necesidades y disponibilidad iban variando sus resoluciones espaciales. Para el cálculo de las áreas quemadas se utilizaron imágenes compuestas de 16 días con una resolución espacial de 250 m y para la identificación de los incendios, imágenes de 375 m y 1 km. Esto permitió que la diferencia de emisiones fuese grande por dos razones, en primer lugar, debido a que la resolución espacial fue alta, no se lograron identificar incendios de menor magnitud y, en segundo lugar, que el cálculo de las áreas quemadas no fuese estimado de la mejor manera, puesto que se estimaron de acuerdo al tamaño del pixel que fue 250 m y a la cantidad de incendios que pertenecían a cada tipo de cobertura, asumiendo que todos los incendios tuvieron la misma extensión.

Por las razones anteriormente mencionadas, se pudo haber presentado las diferencias de las áreas quemadas y emisiones. En la investigación realizada por Anaya (2009), sus estimaciones también fueron superiores a las calculadas por las entidades gubernamentales. Aunque el autor también utilizó la metodología de Seiler y Crutzen (1980), calculó las variables de biomasa y eficiencia de quemado con imágenes satelitales de la zona de estudio combinándolas con datos tomados en campo; se evidenciaron grandes diferencias entre sus resultados y los de las entidades locales, concluyendo que una correcta identificación de las zonas afectadas por el fuego son el punto de partida para estimar las emisiones generadas por los incendios forestales.

En síntesis, se considera que los incendios identificados con FIRMS contienen incertidumbres ya que el satélite MODIS no detecta incendios que estén ocultos por nubes. También existe la posibilidad de que un incendio se haya contado más de una vez, debido a que los barridos que hacen los satélites Aqua y Terra (Ascendente/ descendente) permiten que la observación de un punto sea realizada más de una vez en un mismo día. Además, el algoritmo fue diseñado para detectar incendios a escala global, por lo tanto, para la identificación de focos de fuego en zonas específicas puede generar errores.

Aunque existen diferentes instrumentos para medir las concentraciones de gases a nivel mundial como el de Medición de la contaminación en la troposfera (MOPITT por sus siglas en inglés), en este estudio no se pudo comparar los resultados obtenidos con estas mediciones, porque en algunos casos, el tiempo de lanzamiento del sensor difería con la temporada de esta investigación y además las emisiones que estos calculan son generales, es decir que no se encuentran agrupadas por actividad. En consecuencia, se optó por realizar las comparaciones con estudios hechos por entidades gubernamentales, pero debido a la poca investigación que hay sobre este tema, sólo se logró comparar las emisiones para el año 2012 con la información publicada en el inventario nacional y departamental de gases de efecto invernadero para el año en mención.

11. CONCLUSIONES

El promedio de las emisiones de GEI estimadas para los incendios forestales ocurridos en el Departamento de Cundinamarca entre los años 2008-2018 fue de 200,888 (Tr) de CO₂, 0,612368 (Tr) de CH₄, 0,322687 (Tr) de N₂O. Debido a la intensidad de la presencia del fenómeno del Niño, se presentaron los picos más altos de emisión en los años 2012, 2014 y 2016. Caso contrario ocurrió en 2008 y 2011 ya que en estos se encuentran los picos más bajos a causa del fenómeno de la Niña.

Las estimaciones de los gases generados por incendios forestales son esenciales para elaboración de inventarios nacionales, debido a que permiten estudiar el comportamiento de las emisiones de los gases a través de los años y de acuerdo a los resultados, se plantean mecanismos de control y mitigación para así cumplir con lo pactado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMUNCC) y desacelerar el calentamiento global.

En este trabajo de investigación se utilizó la metodología planteada por Seiler y Crutzen, (1980), para estimar las emisiones de (GEI) generadas por incendios forestales ocurridos en el departamento de Cundinamarca-Colombia, entre los años 2008 y 2018, empleando imágenes satelitales y técnicas de machine learning para obtener las variables requeridas por el modelo. Los resultados demuestran que las emisiones varían significativamente de un año a otro de acuerdo con las temporadas climáticas y a los tipos de cobertura en las que se presentan los incendios.

Aunque las variables extraídas fueron de investigaciones realizadas en Asia y Norte América, se logró realizar el cálculo de las emisiones generadas por el fuego debido a la relación de la clasificación entre las coberturas de suelo. Sin embargo, se recomienda el uso de métodos en los que se complementa con información tomada en campo por vehículos aéreos no tripulados (UAV) para identificar las zonas afectadas por el fuego, ya que la biodiversidad y el clima juegan un papel importante en las coberturas de suelo; factores que influyen en la presencia del fuego. Además, con el uso de información tomada en campo se puede aumentar la precisión y disminuir la incertidumbre ya que las áreas quemadas son el punto de partida para realizar las estimaciones de (GEI).

El uso del índice de vegetación NDVI y la técnica de clasificación Random Forest, demostraron ser herramientas eficaces para identificar las coberturas en las que ocurrieron los incendios. Los rangos espectrales del índice con los que se alimentó al algoritmo no contaban con información de cuerpos de agua, nieve y zonas desnudas, ya que no eran necesarios para esta investigación. Razón por la que la clasificación se centró sólo en las coberturas óptimas para la presencia del fuego. Además, la forma en la que está diseñado el algoritmo de clasificación permitió que aprendiera el rango espectral de cada clase, dando como resultado una exactitud de 99%.

Se identificó que, en todos los años de estudio, el tipo de cobertura más afectado por el fuego fue el de “plantaciones forestales”, puesto que es el que más se presenta en la zona debido a

la intervención del hombre en la siembra de especies arbóreas para la obtención y comercialización de madera.

Con la implementación de metodologías indirectas como las usadas en esta investigación, se pueden calcular las emisiones generadas por incendios, reduciendo costos y tiempo en la estimación de variables como las áreas quemadas, factores de emisión y densidad de biomasa las cuales suelen ser calculadas en campo o en condiciones de laboratorio.

12. BIBLIOGRAFÍA

Abraira, V. (2001). El índice kappa. *Semergen-Medicina de Familia*, 27(5), 247-249.

Abraira, V. (2002). Desviación estándar y error estándar. *SEMERGEN-Medicina de Familia*, 28(11), 621-623.

Alboronzo, Chereau & Araya, 2016). http://www.anb.cl/documentos_sitio/81229_4_Guia_Fuego.pdf

Álvarez Rogel, Y. (2011). Aplicación de tecnología SIG al estudio del riesgo y prevención de incendios forestales en el área de Sierra Espuña-Gebas (Región de Murcia).

Amat, J. (2017). Árboles de decisión, random forest, gradient boosting y C5.0. Obtenido de: https://www.cienciadedatos.net/documentos/33_arboles_de_prediccion_bagging_random_forest_boosting

Anaya Acevedo, J. A. (2009). Estimación mensual de emisiones por biomasa quemada para Colombia basado en imágenes de satélite.

Andreae, M. O., & Merlet, P. (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global biogeochemical cycles*, 15(4), 955-966.

Ballesteros, H. B., & Aristizabal, G. L. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. *Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. Subdirección de Meteorología.*

Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Española de Salud Pública*, 79, 159-175.

Bartholome, E., & Belward, A. S. (2005). GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(9), 1959-1977.

Battye, W., & Battye, R. (2002). Development of Emissions Inventory Methods for Wildland Fire.

Bioenergy, F. A. O. (2014). Food Security Rapid Appraisal (BEFS RA). United Nations Food and Agriculture Organization: Rome, Italy, 50.

Boulandier, J. J., Esparza, F., Garayoa, J., & Orta, C. (2001). Manual de extinción de incendios. Bomberos de Navarra. Pamplona, España.

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5-32.

Brow, S. (1997). Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests. FAO Forestry paper, 134.

Brownlee, J. (2016). Metrics to evaluate machine learning Algorithms in python. Python machine learning.

Carranza, J. P., Salomon, M., Piumetto, M., Monzani, F., & Calvimonte, M. G. M. (2018, September). Random Forest como técnica de valuación masiva del Valor del Suelo Urbano: una aplicación para la ciudad de Río Cuarto, Córdoba, Argentina. In Congreso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário-COBRA.

Carreño Cucaita, A. C., & Rodriguez Bayona, J. A. (2018). Sistema para el Monitoreo y Detección de Incendios Forestales en los Cerros Orientales de Bogotá.

Castillo, M., Pedernera, P., & Pena, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 19(3), 44-53.

Cenicana, 2015 Obtenido de: [https://www.cenicana.org/percepcion-remota/#:~:text=La%20percepci%C3%B3n%20remota%20tambi%C3%A9n%20conocida,la%20radiaci%C3%B3n%20electromagn%C3%A9tica%20\(REM\).](https://www.cenicana.org/percepcion-remota/#:~:text=La%20percepci%C3%B3n%20remota%20tambi%C3%A9n%20conocida,la%20radiaci%C3%B3n%20electromagn%C3%A9tica%20(REM).)

Cerdá, A., & Mataix-Solera, J. (2009). Incendios forestales en España. Ecosistemas terrestres y suelos. A: CERDà, A, 27-53.

Conciencia Eco. (2010). Conciencia Eco. Obtenido de: <https://www.concienciaeco.com/2010/08/21/que-es-el-calentamiento-global/>

Comisión Europea, (2020). Global Land Cover 2000 – Legend. Obtenido de: <https://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/legend.php>

Córdova, P.R. (2018). Evaluación del rendimiento de la transferencia de imágenes entre los lenguajes de programación Java y Python (Master's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).

Cuesta, J. R., & Giraldo, I. O. (2013). Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. Estado del arte. CUADERNO ACTIVA, (5), 59-67.

Cure López, L. M. (2015). Análisis de métodos para la cartografía de incendios forestales en el cantón de cuenca a partir de imágenes TERRA/AQUA MODIS (Master's thesis, Universidad del Azuay).

Chen, L., Ren, Z., Ma, C., & Chen, G. (2017). Modeling and simulating the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of seawater polluted by oil emulsion. *Optik*, 140, 878-886.

- Didan, K., Munoz, A. B., Solano, R., & Huete, A. (2015). MODIS vegetation index user's guide (MOD13 series). University of Arizona: Vegetation Index and Phenology Lab.
- Della Ceca, L., Ferreyra, M. F. G., Diez, S., & Scavuzzo, C. M. (2016, June). Integración de datos espaciales para el monitoreo de contaminantes atmosféricos durante incendios. In 2016 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON) (pp. 1-6). IEEE.
- FAO. (2018). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Obtenido de: <http://www.fao.org/publications/card/es/c/I9535ES/>
- Ferreiro Gómez, A. (2016). Análisis socioeconómico de los incendios forestales españoles y propuesta de rediseño de la estrategia de prevención-concienciación.
- Forestal, C. N. (2010). Incendios forestales, Guía práctica para comunicadores. *CN FORESTAL, Incendios forestales, Guía práctica para comunicadores*.
- Gil, P. S. (2013). Población de estudio y muestra. Asturias, España.
- Gis & Beers. (2019). Obtenido de: <http://www.gisandbeers.com/como-calcular-el-area-de-un-raster-pixel/>
- Gómez Peláez, Á. J. (2019). Bases físicas del cambio climático.
- González, P. (2009). Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna. Universidad Católica de Valparaíso. Valparaíso (Chile).
- González, A. J. (2020) Identificación de áreas quemadas por medio de índices espectrales utilizando imágenes sentinel 2 en el municipio de Orocué, Casanare.
- Global, C. C. (2013). Cambio Climático Global. Obtenido de <https://cambioclimaticoglobal.com/estudios-y-evidencias-del-calentamiento-global>
- Guild, L. S., Kauffman, J. B., Cohen, W. B., Hlavka, C. A., & Ward, D. E. (2004). Modeling biomass burning emissions for Amazon forest and pastures in Rondônia, Brazil. *Ecological Applications*, 14(sp4), 232-246.
- Guo, M., Li, J., Wen, L., & Huang, S. (2019). Estimation of CO2 Emissions from Wildfires Using OCO-2 Data. *Atmosphere*, 10(10), 581
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2013). Cambio Climático 2013–Bases Físicas del GTI (grupo de trabajo I). Resumen para responsables de políticas.
- Handmer, J., & Proudley, B. (2008). La Economía de los Incendios Forestales de Colindancia1.
- Hardtke, L. A., Blanco, P. D., del Valle, H. F., Metternicht, G. I., & Sione, W. F. (2015). Semi-automated mapping of burned areas in semi-arid ecosystems using MODIS time-series imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38, 25-35.

Hawbaker, T. J., Vanderhoof, M. K., Beal, Y. J., Takacs, J. D., Schmidt, G. L., Falgout, J. T., ... & Howard, S. M. (2017). Mapping burned areas using dense time-series of Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 198, 504-522.

Hernández, B. H. (2019). Lo que usted debe saber sobre incendios de cobertura vegetal. Recuperado de Gestion_de_Riesgo. go: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500,11762,28309>.

Hoelzemann, J. J., Schultz, M. G., Brasseur, G. P., Granier, C., & Simon, M. (2004). Global Wildland Fire Emission Model (GWEM): Evaluating the use of global area burnt satellite data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D14).

IDEAM, I. (2008). CORMAGDALENA, Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1: 100.000

IDEAM. (2012). Obtenido de: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023421/cartilla_INGEI.pdf

IDEAM, P. N. U. D., MADS, C., & DNP, F. (2016). Inventario nacional y departamental de Gases Efecto Invernadero-Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Bogotá DC.

Ishikawa, T., Kasumi, K., Tanaka, F., & Moinuddin, K. A. (2020). Combustion efficiency during fires in tunnels with natural ventilation by vitiated air including descending smoke. *Fire Safety Journal*, 103093.

Johnson, E. A., & Miyanishi, K. (2001). Forest fires. Behaviour and ecological effects. Elsevier, 570.

Jordan, N. S., Ichoku, C., & Hoff, R. M. (2008). Estimating smoke emissions over the US Southern Great Plains using MODIS fire radiative power and aerosol observations. *Atmospheric Environment*, 42(9), 2007-2022.

Julio, G., & Giroz, G. (1975). Notas sobre el comportamiento del fuego y su aplicación en el control de incendios forestales. *Bosque*, 1(1), 18-27.

Kaufman, Y. J., Remer, L., Ottmar, R., Ward, D., Li, R. R., Kleidman, R., ... & Shelton, G. (1996). Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment. *Global biomass burning*, 685-696.

Korc, M. E. (2001). Calidad del aire y su impacto en la salud en América Latina y el Caribe. En: Desafíos e innovaciones en la gestión ambiental: actas del Seminario Internacional" Experiencia Latinoamericana en Manejo Ambiental"-LC/L. 1548-P-2001-p. 15-22.

Laguna, C. (2014). Correlación y regresión lineal. Instituto Aragonés de Ciencias de la Salud, 4, 1-18.

- Langmann, B., Duncan, B., Textor, C., Trentmann, J., & van der Werf, G. R. (2009). Vegetation fire emissions and their impact on air pollution and climate. *Atmospheric environment*, 43(1), 107-116.
- Liu, M., Song, Y., Yao, H., Kang, Y., Li, M., Huang, X., & Hu, M. (2015). Estimating emissions from agricultural fires in the North China Plain based on MODIS fire radiative power. *Atmospheric environment*, 112, 326-334.
- Liu, Y. (2004). Variability of wildland fire emissions across the contiguous United States. *Atmospheric Environment*, 38(21), 3489-3499.
- López, D. M. L. (2017). Introducción a los datos tipo raster.
- Lozada, D. T., Choco, K. T. P., & Torres, F. L. H. (2020). Estimación de emisión de metano (CH₄) en el relleno sanitario Presidente por medio de imágenes satelitales. *Revista de Topografía AZIMUT*, 11(1).
- Martínez, M. F., & Osnaya, P. (2004). Cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología.
- Marini, S., Blesio, G., & Godino, M. E. (2019). 7102-19 FÍSICA Modelo atómico de absorción y emisión de fotones.
- Mas Monsonis, M. (2017). Uso de la teledetección y los SIG en la vigilancia de la calidad del agua: aplicación al Mar Menor.
- Michalijos, M. P., & Uboldi, J. (2013). Propuesta metodológica para la evaluación de áreas afectadas por incendios mediante el uso de imágenes satelitales (Sierra de la Ventana, Argentina). *Revista de geografía Norte Grande*, (56), 223-234.
- Michel, C., Liousse, C., Grégoire, J. M., Tansey, K., Carmichael, G. R., & Woo, J. H. (2005). Biomass burning emission inventory from burnt area data given by the SPOT-VEGETATION system in the frame of TRACE-P and ACE-Asia campaigns. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D9).
- Ministerio de Ambiente, V. y. (2010). MAVDT. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=428:plantilla-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos-23>.
- Mieville, A., Granier, C., Liousse, C., Guillaume, B., Mouillot, F., Lamarque, J. F., ... & Pétron, G. (2010). Emissions of gases and particles from biomass burning during the 20th century using satellite data and an historical reconstruction. *Atmospheric Environment*, 44(11), 1469-1477.
- Mouillot, F., & Field, C. B. (2005). Fire history and the global carbon budget: a 1× 1 fire history reconstruction for the 20th century. *Global Change Biology*, 11(3), 398-420.
- Oficina de Asistencia para Desastres en América Latina y el Caribe (OFDA). (2001). Obtenido de: http://www.elviejo.cr/Doc/Manual_del_Participante.pdf

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2017). Obtenido de: <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-aumento-de-la-concentraci%C3%B3n-de-gases-de-efecto-invernadero-alcanza-un>

Pacheco, S. B. (2001). Teledetección infrarroja de gases atmosféricos mediante espectrorradiometría FTIR. Universidad Complutense de Madrid.

Parra Lara, Á. D. C., & Bernal Toro, F. H. (2010). Incendios de cobertura vegetal y biodiversidad: una mirada a los impactos y efectos ecológicos potenciales sobre la diversidad vegetal.

Pavón, P. O. (2010). Métodos para la cartografía de área quemada con imágenes del sensor ENVISAT-MERIS en la cuenca mediterránea (Doctoral dissertation, Universidad de Alcalá).

Pereira, G., Freitas, S. R., Moraes, E. C., Ferreira, N. J., Shimabukuro, Y. E., Rao, V. B., & Longo, K. M. (2009). Estimating trace gas and aerosol emissions over South America: Relationship between fire radiative energy released and aerosol optical depth observations. *Atmospheric Environment*, 43(40), 6388-6397.

Platero. (2020). Clasificación supervisada de la cobertura de suelo mediante el algoritmo Random Forest en un área de la provincia de Toledo obtenido de: <https://rpubs.com/pplatero/602096>

Reddy, M. S., & Venkataraman, C. (2002). Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India. Part II—biomass combustion. *Atmospheric Environment*, 36(4), 699-712.

Rejas-Ayuga, J. (2008). Módulo VII: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Master en Ingeniería Medioambiental y gestión del agua. EOI Escuela de Negocios, 1-34.

REPSA, S. (2019). Plan de mitigación y reducción de las emisiones de gases efecto invernadero. Portal, 7, 08.

Rodríguez Beltrán, L. R., & Ríos Miranda, J. E. (2017). Identificación de áreas quemadas por incendios forestales en el departamento del Meta y determinación de medidas de intervención para su reducción.

Sagan, V., Peterson, K. T., Maimaitijiang, M., Sidike, P., Sloan, J., Greeling, B. A., ... & Adams, C. (2020). Monitoring inland water quality using remote sensing: potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Science Reviews*, 103187.

Salcedo, K. F. & Escobar S. D. (2012). [bibliotecadigital.usbcali](https://bibliotecadigital.usb.edu.co/handle/10819/2836). Obtenido de <https://bibliotecadigital.usb.edu.co/handle/10819/2836>.

Sánchez E. (2020). Sistemas de información geográfica: Datos raster. Obtenido de: https://titulaciongeografia-sevilla.es/contenidos/profesores/materiales/archivos/2020-02-16Clase3_texto.pdf.

- Seiler, W., & Crutzen, P. J. (1980). Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Climatic change*, 2(3), 207-247.
- Suárez Ibujés, M. O. (2011). Coeficiente de correlación de Karl Pearson.
- Stauffer, E., Dolan, J. A., & Newman, R. (2007). *Fire debris analysis*. Academic Press.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & Haan, C. D. (2009). *La larga sombra del ganado. Problemas ambientales y opciones* (No. FAO-MED 15). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Taborda Ramírez, L. E. (2019). Detección de emisiones generadas por incendios forestales y quema de residuos agrícolas a partir de la energía y la potencia radiactiva del fuego.
- Tortosa, G. (17 de Octubre de 2013). Red Remedia. Obtenido de: <https://redremedia.wordpress.com/2013/10/17/los-incendios-favorecen-la-emision-de-gases-de-efecto-invernadero/>
- Tubiello, F. N. (2015). Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura [recurso electrónico]: un manual para abordar los requisitos de los datos para los países en desarrollo.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2019). Overview of Greenhouse Gases. Obtenido de: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- US Environmental Protection Agency (US EPA). (1995). *Compilation of air pollutant emission factors*, AP-42.
- Vadrevu, K. P., Ellicott, E., Giglio, L., Badarinath, K. V. S., Vermote, E., Justice, C., & Lau, W. K. (2012). Vegetation fires in the himalayan region—Aerosol load, black carbon emissions and smoke plume heights. *Atmospheric Environment*, 47, 241-251.
- Vermote, E. F., Tanré, D., Deuze, J. L., Herman, M., & Morcette, J. J. (1997). Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 35(3), 675-686.
- Villabona, D. A., & Armenteras, D. (2012). Incidencia de incendios sobre la vegetación de Cundinamarca y Bogotá DC, entre 2001 y 2010. *Acta Biológica Colombiana*, 17(1), 143-158.
- Weisse, M., & Goldman, E. D. (2017). Was the Second-Worst Year on Record for Tropical Tree Cover Loss. Retrieved January, 12, 2019.
- Wiedinmyer, C., Quayle, B., Geron, C., Belote, A., McKenzie, D., Zhang, X., ... & Wynne, K. K. (2006). Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling. *Atmospheric Environment*, 40(19), 3419-3432.

Wooster, M. J., Zhukov, B., & Oertel, D. (2003). Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, 86(1), 83-107.

Yamallel, Y., Israel, J., Jiménez Pérez, J., Alanís Rodríguez, E., Aguirre Calderón, Ó. A., González Tagle, M. A., & Treviño Garza, E. J. (2013). Emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de incendios forestales de 2000-2011 en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. *Ciencia UANL*, 16(62), 68-75.

Yepes, A., Navarrete, D. A., Phillips, J. F., Duque, A. J., Cabrera, E., Galindo, G., ... & Ordoñez, M. F. (2011). Estimación de las emisiones de dióxido de carbono generadas por deforestación durante el periodo 2005-2010. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM-. Bogotá DC, Colombia, 3.

Yokelson, R. J., Goode, J. G., Ward, D. E., Susott, R. A., Babbitt, R. E., Wade, D. D., ... & Hao, W. M. (1999). Emissions of formaldehyde, acetic acid, methanol, and other trace gases from biomass fires in North Carolina measured by airborne Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D23), 30109-30125.

**ESTIMACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) A CAUSA DE
INCENDIOS FORESTALES CON TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA
(ANEXOS)**

DIANA CAROLINA MUÑOZ MEJÍA



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
SEDE MELÉNDEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
SANTIAGO DE CALI
2021**

TABLA DE CONTENIDO

1. Imágenes satelitales.....	1
2. Incendios	2
3. Extracción de valores NDVI	3
4. Clasificación GLC.....	8
1. Rangos NDVI.....	12
2. Clasificación de coberturas con Random Forest	12
3. Cálculo de emisiones.....	15
5. Mapas	18
6. Bibliografía.....	34

TABLA DE FIGURAS

Figura 1: Script de descarga de imágenes satelitales en Google Earth Engine	1
Figura 2: Visualización del NDVI del departamento de Cundinamarca en Google Earth Engine.....	2
Figura 3: Interfaz de Nasa firms.....	3
Figura 4: Instalación de librerías y conexión con el drive	4
Figura 5: Asignación de variable de incendios	4
Figura 6: Asignación de variable NDVI.....	5
Figura 7: Visualización de incendios sobre el producto NDVI.....	5
Figura 8: Extracción de coordenadas de incendios	5
Figura 9: Extracción de puntos raster.....	6
Figura 10: Diccionario de coordenadas de incendios y valores de NDVI	6
Figura 11: Dataframe	7
Figura 12: Eliminación de valores NAN.....	7
Figura 13: Almacenamiento de datos.....	7
Figura 14: Distribución de puntos aleatorios	8
Figura 15: Extracción de valores ráster.....	9
Figura 16: Asignación de variables	13
Figura 17: Eliminación de etiquetas.....	13
Figura 18: Datos de entrenamiento y prueba.....	14
Figura 19: Clasificación Random Forest.....	14
Figura 20: Predicciones.....	15
Figura 21: Cálculo de emisiones	17
Figura 22: Cálculo de emisiones	17
Figura 23: Incendios forestales ocurridos en 2008.....	18
Figura 24: Incendios forestales ocurridos en 2009.....	18
Figura 25: Incendios forestales ocurridos en 2010.....	19
Figura 26: Incendios forestales ocurridos en 2011.....	19
Figura 27: Incendios forestales ocurridos en 2012.....	20

Figura 28: Incendios forestales ocurridos en 2013.....	20
Figura 29: Incendios forestales ocurridos en 2014.....	21
Figura 30: Incendios forestales ocurridos en 2015.....	21
Figura 31: Incendios forestales ocurridos en 2016.....	22
Figura 32: Incendios forestales ocurridos en 2017.....	22
Figura 33: Incendios forestales ocurridos en 2018.....	23
Figura 34: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2008	23
Figura 35 : Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2009	24
Figura 36: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2010	24
Figura 37: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2011	25
Figura 38: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2012	25
Figura 39: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2013	26
Figura 40: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2014	26
Figura 41 : Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2015	27
Figura 42 : Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2016	27
Figura 43 : Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2017	28
Figura 44 : Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2018	28
Figura 45: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2008.....	29
Figura 46: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2009.....	29
Figura 47: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2010.....	30
Figura 48: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2011.....	30
Figura 49: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2012.....	31
Figura 50: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2013.....	31
Figura 51: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2014.....	32
Figura 52: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2015.....	32
Figura 53: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2016.....	33
Figura 54: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2017.....	33
Figura 55: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2018.....	34

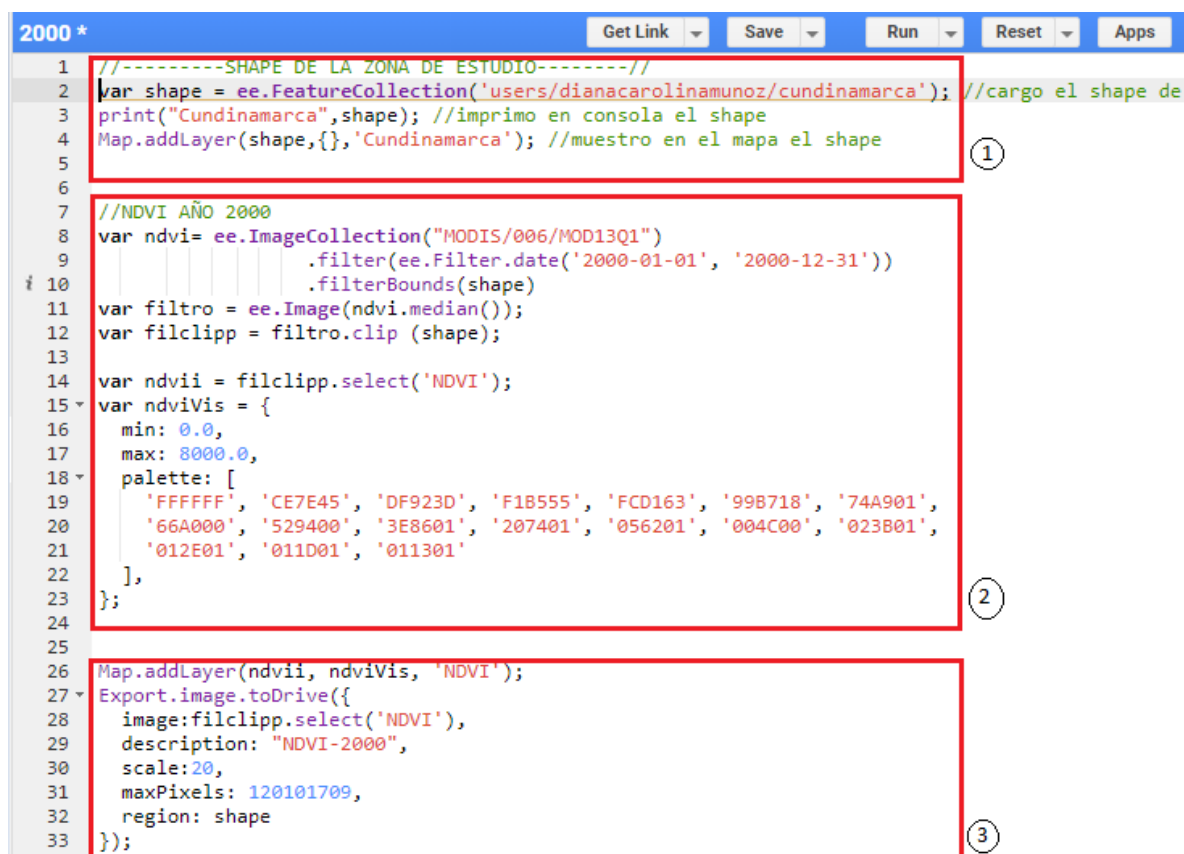
TABLA DE TABLAS

Tabla 1: Agrupaciones de clases en los datos digitales.....	9
Tabla 2: Relación entre leyenda regional y global	10
Tabla 3: Clasificación de coberturas GLC 2000	11
Tabla 4: Rangos NDVI.....	12
Tabla 5: Constantes de densidad de biomasa y eficiencia de combustión para cada tipo de cobertura GLC.....	15
Tabla 6: Constantes de factor de emisión para cada tipo de cobertura GLC	16

A continuación, en este documento se presentan los anexos de datos y procedimientos que se emplearon para el desarrollo del trabajo de grado.

1. Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales empleadas fueron descargadas a través de un script elaborado en Google Earth Engine. A continuación en la figura 1 se muestra el ejemplo de como se hizo la descarga de la imagen de NDVI del producto MOD13Q1 para el año 2000.



```
2000 *
1 //-----SHAPE DE LA ZONA DE ESTUDIO-----//
2 var shape = ee.FeatureCollection('users/dianacarolinamunoz/cundinamarca'); //carga el shape de
3 print("Cundinamarca",shape); //imprimo en consola el shape
4 Map.addLayer(shape,{},'Cundinamarca'); //muestro en el mapa el shape
5
6
7 //NDVI AÑO 2000
8 var ndvi= ee.ImageCollection("MODIS/006/MOD13Q1")
9   .filter(ee.Filter.date('2000-01-01', '2000-12-31'))
10  .filterBounds(shape)
11  var filtro = ee.Image(ndvi.median());
12  var filclipp = filtro.clip (shape);
13
14  var ndvii = filclipp.select('NDVI');
15  var ndviVis = {
16    min: 0.0,
17    max: 8000.0,
18    palette: [
19      'FFFFFF', 'CE7E45', 'DF923D', 'F1B555', 'FCD163', '99B718', '74A901',
20      '66A000', '529400', '3E8601', '207401', '056201', '004C00', '023B01',
21      '012E01', '011D01', '011301'
22    ],
23  };
24
25
26  Map.addLayer(ndvii, ndviVis, 'NDVI');
27  Export.image.toDrive({
28    image: filclipp.select('NDVI'),
29    description: "NDVI-2000",
30    scale: 20,
31    maxPixels: 120101709,
32    region: shape
33  });
```

Figura 1: Script de descarga de imágenes satelitales en Google Earth Engine

En el recuadro 1 se carga el shape de la zona de estudio que para este caso fue Cundinamarca, también se imprime en consola y finalmente se muestra en el mapa.

En el recuadro 2 se accede a la colección de imágenes satelitales del producto MOD13Q1 filtrado por fecha y zona de estudio. En este caso la fecha asignada fue todo el año 2000 ya que con esos datos se entrenó el algoritmo de clasificación. También, se filtran las imágenes obtenidas a través de la mediana, es decir que la imagen resultante es la mediana de todos los datos que se encontraron en el rango de fechas establecidas. Finalmente, se hace el corte de la imagen con el shape de la zona de estudio y luego se selecciona la banda que se quiere mostrar (NDVI) y se le asigna una paleta de colores para que la imagen sea así representada en el mapa.

En el recuadro 3 se seleccionan las variables que se van a mostrar, se le asigna un nombre y se exporta como se muestra en la figura 2.

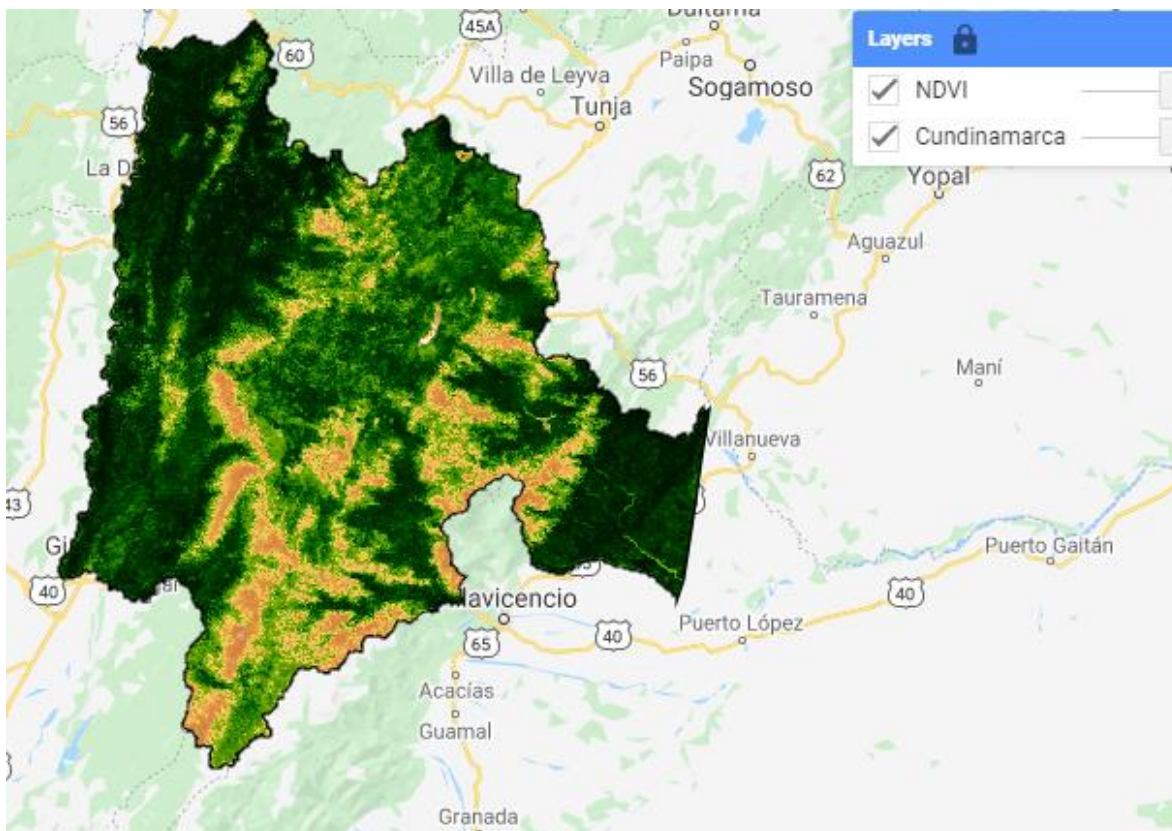


Figura 2: Visualización del NDVI del departamento de Cundinamarca en Google Earth Engine

Se realizó el mismo procedimiento para el resto de las imágenes entre los años 2008-2018, pero variando las fechas para cada trimestre.

2. Incendios

La descarga de los incendios se hizo por medio de la siguiente página web (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#d:2021-02-12..2021-02-13;@0.0,0.0,3z>) que contiene una base de datos de incendios ocurridos y activos a nivel mundial captados por el sensor MODIS y VIIRS.

En la figura 3 se presenta un ejemplo de cómo se realizó este proceso. En el primer recuadro se dibuja el polígono del área de interés y se guardan los cambios. En el siguiente recuadro se selecciona los sensores a consultar y luego se establecen las fechas que en el ejemplo corresponden al primer trimestre del 2008 y finalmente se asigna el correo al cual va a ser enviada la información.

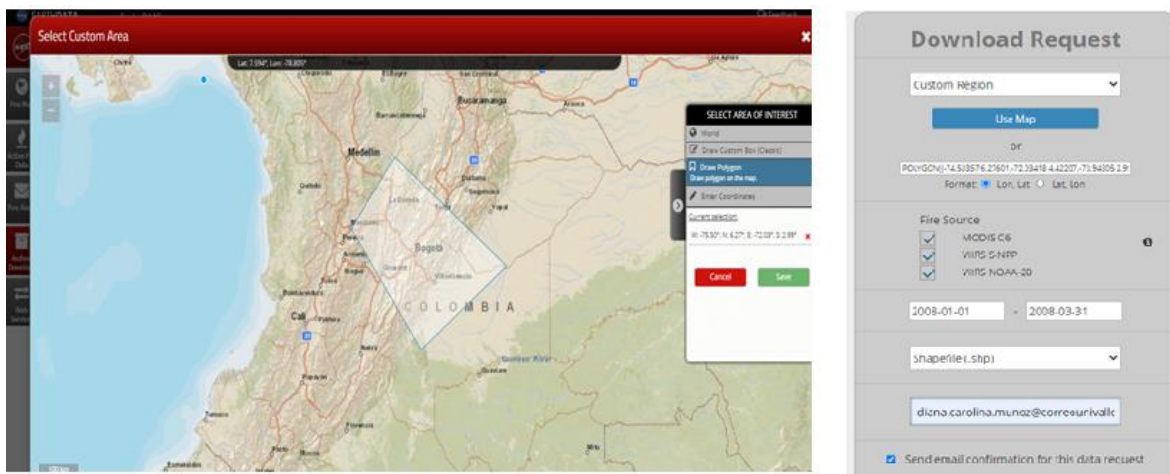


Figura 3: Interfaz de Nasa firms

Una vez se obtuvo el polígono en formato shp de incendios, por medio del software Arcgis con un archivo en formato shp de Cundinamarca se realizó el corte de tal forma que sólo quedarán los incendios que ocurrieron dentro de la zona de estudio.

3. Extracción de valores NDVI

Para extraer los valores NDVI de las imágenes descargadas se diseñó un algoritmo en google Colab como se muestra a continuación. (las imágenes corresponden al primer año).

En la figura 4 se muestran las librerías instaladas y la conexión con el drive. El anterior procedimiento se hace debido a que todos los datos fueron cargados en esta plataforma para poder trabajar en Colab.

```
#Instalación de librerías
#Geopandas
!apt install python3-rtree
!pip install git+git://github.com/geopandas/geopandas.git
!pip install descartes
#Rasterio
!pip install rasterio

[ ] #Librerías
import matplotlib.pyplot as plt
import geopandas as gpd
import rasterio
from rasterio.plot import show
import numpy as np
import pandas as pd

[ ] #conexion con el drive
from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')
```

Figura 4: Instalación de librerías y conexión con el drive

En la figura 5 se le asigna a una variable los datos en formato shp de los incendios ocurridos que para este caso corresponden al primer trimestre del 2008, también se muestra el sistema de referencia y finalmente se hace una gráfica de la ubicación de los puntos de fuego.

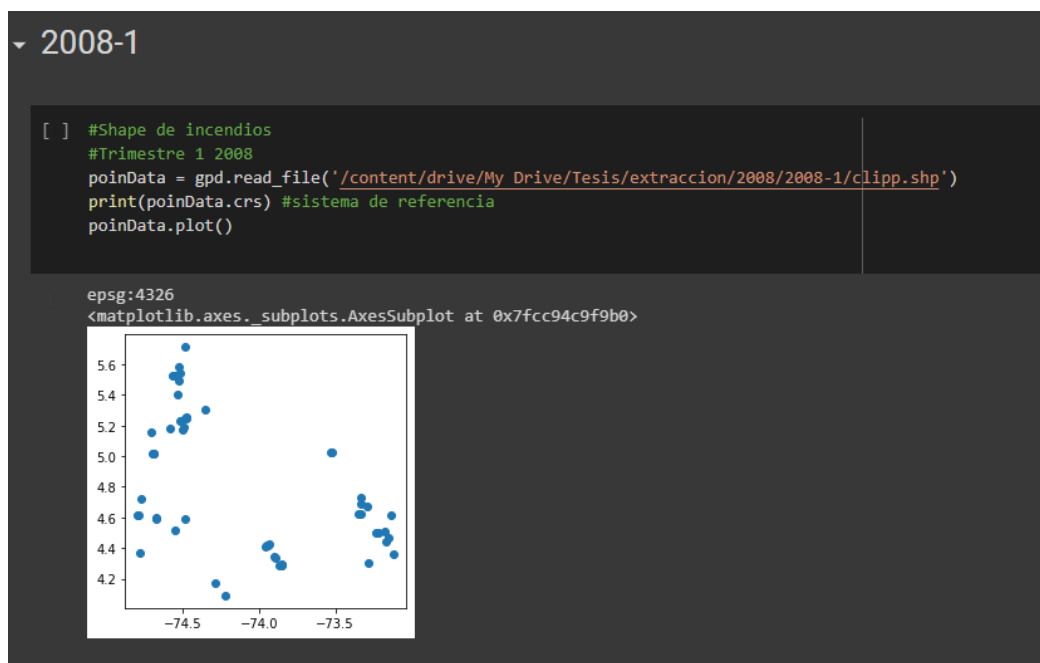


Figura 5: Asignación de variable de incendios

En la figura 6 se le asigna a una variable la imagen de NDVI descargada para el mismo periodo de tiempo de los incendios. Se muestra el sistema de referencia, se hace un conteo de las bandas de la imagen y finalmente se sobreponen los incendios ocurridos en el raster de NDVI como se muestra en la figura 7.

```
#Raster de NDVI
ndvi= rasterio.open('/content/drive/My Drive/Tesis/extraccion/2008/2008-1/NDVI-2008-1.tif')
print(ndvi.crs) #Sistema de referencia
print(ndvi.count) #Bandas
#Muestra de puntos y raster
fig, ax= plt.subplots(figsize=(15,15))
pointData.plot(ax=ax, color='orangered')
show(ndvi, ax=ax)
```

Figura 6: Asignación de variable NDVI

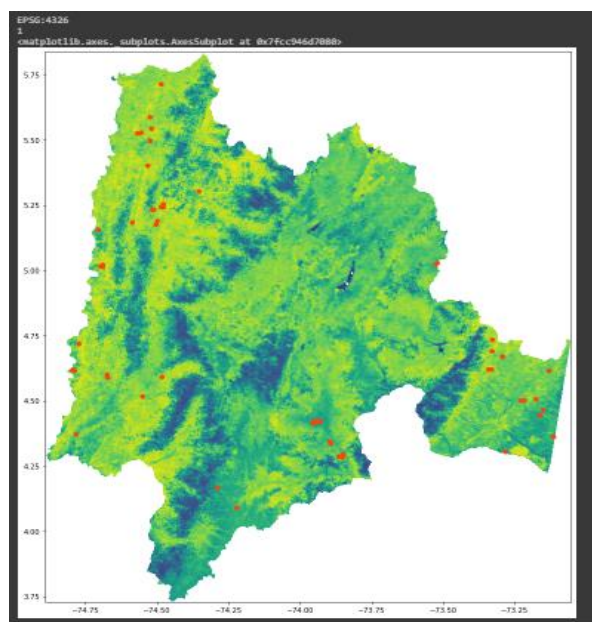


Figura 7: Visualización de incendios sobre el producto NDVI

En la figura 8 se muestra la extracción de las coordenadas para cada punto de fuego ocurrido en esa época.

```
[ ] #Extracción de coordenadas de los puntos
for point in pointData['geometry']:
    print(point.xy[0][0], point.xy[1][0])
```

Figura 8: Extracción de coordenadas de incendios

En la figura 9 se hace un ciclo for que recorre las coordenadas de los incendios y los guarda en una lista vacía. De igual forma, se recorre el ráster NDVI y se guardan los valores para cada punto de fuego coordinado en otra lista vacía.

```
[ ] #Extracción de puntos raster
pts= [] #lista de puntos (fuego)
ndv= [] #lista de valores de NDVI de los puntos de fuego
for point in poinData['geometry']:
    x= point.xy[0][0]
    y= point.xy[1][0]
    row, col = ndvi.index(x,y)
    pts.append((x, y))
    ndv.append(ndvi.read(1)[row, col])
    print('El punto corresponde a la longitud, latitud: %d, %d'%(x,y))
    print('El valor del raster en el punto %.2f \n'%ndvi.read(1)[row, col])
```

Figura 9: Extracción de puntos raster

En la figura 10 se hace un diccionario que relaciona las listas que contienen información sobre las coordenadas de los incendios y los valores de NDVI para cada punto.

```
#Diccionario para asignar los valores de NDVI a cada punto coordenado
diccionario={}
for i in range (len(ndv)):
    diccionario[ndv[i]]= pts[i]
```

diccionario

```
{3609.0: (-73.284, 4.3053),
 3834.5: (-73.9525, 4.4207),
 3858.5: (-74.7896, 4.6156),
 4045.5: (-73.94, 4.4211),
 4103.0: (-73.9311, 4.4224),
 4197.0: (-74.7956, 4.619),
 4204.5: (-74.6892, 5.0214),
 4358.0: (-73.1516, 4.4651),
 4584.5: (-73.1648, 4.4436),
 4724.5: (-73.9561, 4.4132),
 4754.0: (-73.8961, 4.3443),
 5011.5: (-73.1153, 4.3609),
 5386.5: (-74.7049, 5.1568),
 5638.0: (-73.5267, 5.0231),
 5680.5: (-74.7839, 4.372),
 5850.5: (-74.6735, 4.456)}
```

Figura 10: Diccionario de coordenadas de incendios y valores de NDVI

En la figura 11 se convierte el diccionario en un dataframe que contiene en una columna los valores de NDVI y en la otra las coordenadas de los incendios ocurridos.

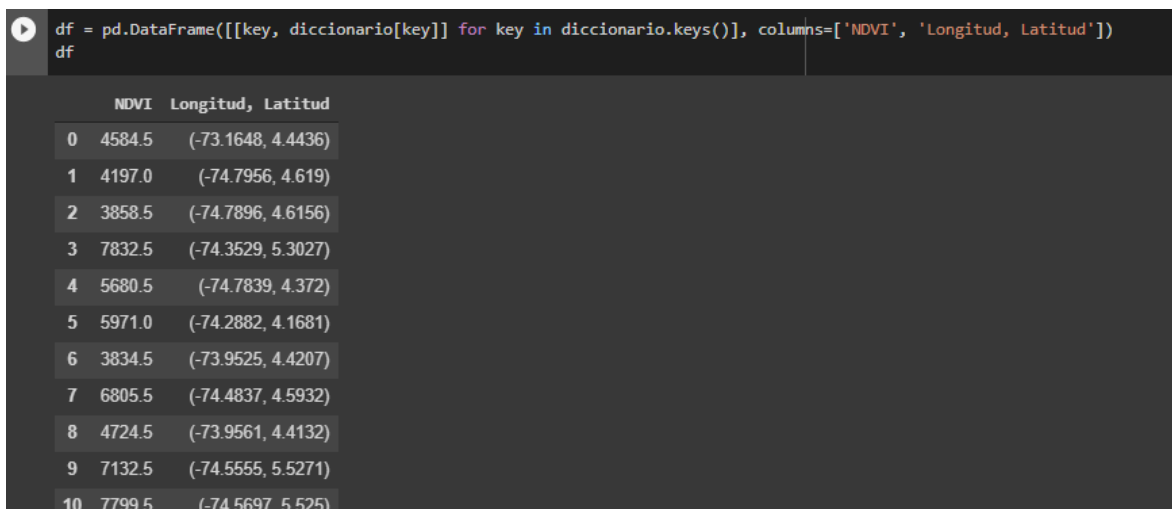


Figura 11: Dataframe

En la figura 12 se eliminan las filas que no contienen datos y se multiplica la columna de los valores NDVI por 0.0001 ya que el producto MOD13Q1 viene con los valores escalados.

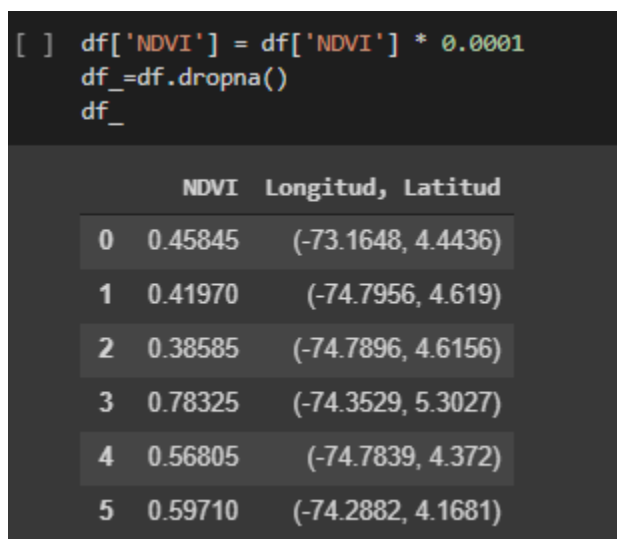


Figura 12: Eliminación de valores NAN

Finalmente, en la figura 13 se guardan los datos en un archivo .csv y se exportan al drive

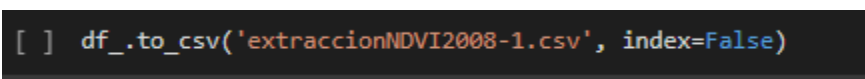


Figura 13: Almacenamiento de datos

4. Clasificación GLC

Debido a que las constantes para calcular las emisiones de los gases estaban dadas de acuerdo a la clasificación GLC, fue necesario consultar el mapa de la clasificación para la zona de estudio.

En el link (<https://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/products.php>) se descargó el ráster de coberturas para Sur América. Luego, en ArcGis se hizo el corte con un archivo en formato shp de Cundinamarca.

Una vez se obtuvo el ráster de la clasificación para la zona de estudio, a través del software QuantumGis (QGIS) se distribuyeron 31725 puntos aleatorios dentro de este como se muestra en la figura 14.

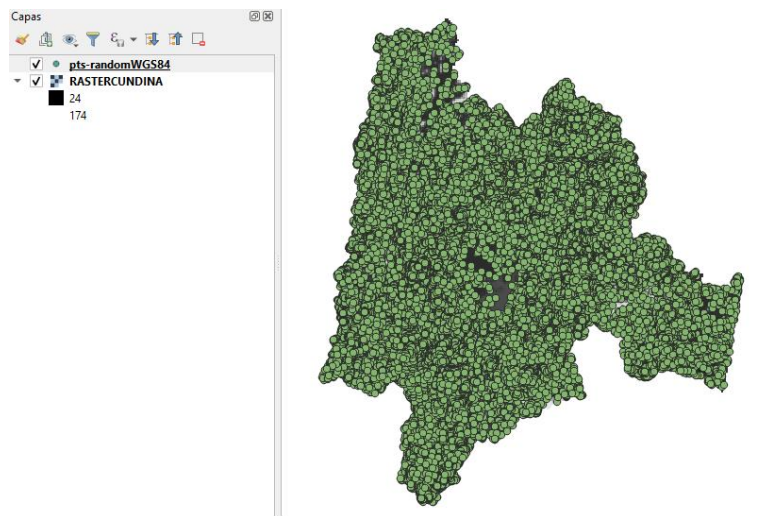


Figura 14: Distribución de puntos aleatorios

Luego, a cada punto se le calcularon las coordenadas y se extrajeron los valores del ráster para cada uno de ellos como se muestra en la figura 15.

ext-pts-wgs84 :: Objetos totales: 31725, Filtrados: 31725, Seleccionad...

	RASTERCUND	x	y
1	55,00000	-74,643	5,711
2	61,00000	-74,645	5,707
3	52,00000	-74,632	5,704
4		-74,635	5,753
5	52,00000	-74,634	5,709
6	54,00000	-74,637	5,729
7	55,00000	-74,641	5,709
8	53,00000	-74,633	5,734
9	54,00000	-74,636	5,718
10	54,00000	-74,642	5,712
11	52,00000	-74,631	5,720
12	54,00000	-74,642	5,721
13		-74,636	5,741
14	61,00000	-74,644	5,718
15		-74,637	5,746

Figura 15: Extracción de valores ráster

Cabe aclarar que los valores del ráster corresponden a los niveles digitales, no al valor de cada cobertura; por lo anterior fue necesario asociar los valores como se describe más adelante.

También, se encontró que algunos puntos no tenían ningún valor en el ráster debido a que se estaban fuera de la cobertura de la imagen; por esta razón fueron eliminados. Luego, los puntos resultantes se almacenaron con información de las coordenadas y los valores para el ráster de valores NDVI del año 2000. Se escogió este año porque el mapa de coberturas GLC fue hecho con datos de esa época, por ende era necesario que ambos ráster correspondieran al mismo periodo de tiempo para así poder relacionar las variables.

Una vez que se obtuvo la relación de los puntos coordenados con los valores de NDVI y los niveles digitales de la clasificación GLC, se procedió a asociarlos con las clases de cobertura terrestre que se presentan en las tablas 1 y 2.

Tabla 1: Agrupaciones de clases en los datos digitales

Classes	Land cover types
10-14	Lowland (<500m) evergreen tropical forestal
20-24	Lowland (<500m) deciduous tropical forest
30-33	Lowland (<500m) forest under flooding regime
40-44	Lowland (<500m) temperate forests
50-53	Agricultural clases
60-75	Grass and shrublands
80-84	Unvegetated

90	Urban
110-114	Montane forest 500- 1000m- evergreen
120-124	Montane forest 500- 1000m – deciduous
130-133	Montane forest 500- 1000m – flooded
140-144	Montane forest 500- 1000m – temperate
160-164	Montane forest 500- 1000m – evergreen
170-174	Montane forest > 1000m – deciduous
180-183	Montane forest > 1000m – flooded
190-194	Montane forest > 1000m - temperate

Fuente: Eva et al., (2002)

Tabla 2: Relación entre leyenda regional y global

GLOBAL LEGEND	REGIONAL LEGEND
Tree cover, broadleaf evergreen	Closed evergreen tropical forest
	Open evergreen tropical forest
	Bamboo dominated forest
	Closed semi-humid forest
	Open semi-humid forest
	Temperate closed evergreen broadleaf
	Montane evergreen forest
Tree cover, broadleaf, deciduous	Closed deciduous forest
	Open deciduous forest
	Closed semi deciduous forest
	Open semi deciduous forest
	Semi deciduous transition forest
	Temperate closed deciduous broadleaf
	Temperate open deciduous broadleaf
	Montane deciduous broadleaf
Tree cover regularly flooded: Mangrove	Mangroves
	Fresh water flooded forest
	Permanent swamp forest
Tree cover, needleleaf, evergreen	Forest plantation
Tree cover, mixed phenology or leaf type	Temperate mixed evergreen broadleaf
	Montane mixed forest
Cultivated and managed areas	Agriculture - intensive
Cropland/ other natural vegetation (non-trees)	Mosaic agriculture / degraded vegetation
Cropland/ tree cover	Mosaic agriculture / degraded forest
Herbaceous cover, closed - open	Grass savannah
	Shrub savannah
	Moorlands / heathlands
	Closed montane grasslands
	Closed steppe
Sparse Herbaceous or sparse shrub cover	Open shrublands

	Open steppe grasslands
	Sparse desert steppe shrub / grassland
Shrub cover, closed – open, evergreen	Closed shrublands
Regularly flooded shrub and / or herbaceous cover	Periodically flooded shrublands
	Periodically flooded grasslands
Bare areas	Barren / bare soil
	Desert
	Salt pan
Water bodies (natural & artificial)	Permanent snow / ice
Artificial surface and associated areas	Urban

Fuente: Eva et al., 2002

Cuando se obtuvieron los datos de la relación entre las coberturas GLC y los valores de NDVI, se procedió a eliminar las clases en las que no se puede producir fuego para así dejar sólo 8 de las 14 coberturas que si presentan condiciones óptimas para que el fenómeno ocurra. Las 8 coberturas que se presentaron en la extracción de muestras en la zona de estudio se evidencian en la tabla 3.

Tabla 3: Clasificación de coberturas GLC 2000

CLASIFICACIÓN GLC	
2	Cubierta arbórea, latifoliado, caducifolio, cerrado
4	Cubierta de árbol, hojas de aguja, perenne
6	Cubierta arbórea, tipo de hoja mixta
11	Cubierta de arbusto, cerrado-abierto, siempre verde
13	Cubierta herbácea, cerrada-abierta
14	Cubierta de arbusto escasa o herbácea escasa
16	Zonas cultivadas y gestionadas
17	Mosaico:
	Tierras de cultivo / Cubierta arbórea / Otra vegetación natural

Fuente: Comisión Europea, 2020

1. Rangos NDVI

Fue necesario establecer rangos de valores NDVI para cada una de las 8 coberturas como se muestra en la tabla 4 ya que se encontró que algunos de los valores pertenecían a más de una clase.

Tabla 4: Rangos NDVI

Clasificación GLC	Valor NDVI
(16) Zonas cultivadas y gestionadas	0,15 - 0,17
(14) Cubierta de arbusto escasa o herbácea escasa	0,17 - 0,20
(13) Cubierta herbácea, cerrada-abierta	0,20 - 0,23
(11) Cubierta de arbusto, cerrado-abierto, siempre verde	0,23 - 0,25
(17) Tierras de cultivo / Cubierta arbórea / Otra vegetación natural	0,25 - 0,30
(6) Cubierta arbórea, tipo de hoja mixta	0,30 - 0,40
(4) Cubierta de árbol, hojas de aguja, perenne	0,40 - 0,60
(2) Cubierta arbórea, latifoliado, caducifolio, cerrado	0,60- 0,783

Fuente: Modificado de Comisión Europea, 2020

2. Clasificación de coberturas con Random Forest

Para la clasificación de coberturas se diseñó un algoritmo en Colab basado en técnicas de machine learning. En las siguientes figuras se describe cada uno de los pasos.

En la figura 16 se hace la conexión con el drive, se importan las librerías utilizadas y se le asigna a una variable los datos de los valores de NDVI y clases GLC que se obtuvo de los anteriores pasos, se leen los archivos, se convierten en un dataframe y se muestran los primeros valores.

```
#conexion con el drive
from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

Mounted at /content/drive

#Librerías a utilizar
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

archivo = '/content/drive/My Drive/Tesis/end.txt'
df= pd.read_csv(archivo) #lee los archivos y los convierte en dataframe
print (df.head())
```

	ndvi	RASTERCUND
0	0.40015	4
1	0.40040	4
2	0.40115	4
3	0.40320	4
4	0.40355	4

Figura 16: Asignación de variables

En la figura 17 se eliminan las etiquetas de los ejes del dataframe con “values”, se imprime la cantidad de datos y características que para este caso son 2192 datos de NDVI y clases GLC. Luego se hace la extracción de características y a la variable “X” se le asignan los valores de NDVI y a “Y” los de GLC.

```
dataset = df.values #devuelve los valores del dataframe
print (dataset.shape)

(2192, 2)

#EXTRACCION DE CARACTERISTICAS#
X = dataset[:,0:1] #valores de ndvi
y = dataset[:,1] #valores GLC
```

Figura 17: Eliminación de etiquetas

En la figura 18 se hace la separación de los datos de entrenamiento y prueba en 80% y 20% respectivamente y se imprimen las variables para identificar como quedó la partición.

```
[ ] from sklearn.model_selection import train_test_split #Librería de separación de datos

[ ] X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size= 0.2, random_state=0) #Separación de datos de entrenamiento y prueba

[ ] print('son {} datos para entrenamiento'.format(X_train.shape[0] ))
    print('son {} datos para validar'.format(X_test.shape[0] ))

son 1753 datos para entrenamiento
son 439 datos para validar
```

Figura 18: Datos de entrenamiento y prueba

En la figura 19 se importa el algoritmo de clasificación Random Forest y se entrena el modelo con la partición de las muestras. Seguido a esto se imprime la precisión de los datos de entrenamiento y prueba que corresponden a 99% en ambos casos.

```
Random Forest

[ ] #Importar librerías de RandomForest
    from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
    algoritmo= RandomForestClassifier()

    algoritmo.fit(X_train, y_train) #Entrenamiento del modelo

RandomForestClassifier(bootstrap=True, ccp_alpha=0.0, class_weight=None,
                        criterion='gini', max_depth=None, max_features='auto',
                        max_leaf_nodes=None, max_samples=None,
                        min_impurity_decrease=0.0, min_impurity_split=None,
                        min_samples_leaf=1, min_samples_split=2,
                        min_weight_fraction_leaf=0.0, n_estimators=100,
                        n_jobs=None, oob_score=False, random_state=None,
                        verbose=0, warm_start=False)

[ ] #Precisión de los datos
    from sklearn.metrics import accuracy_score
    y_predicted=algoritmo.predict(X_test)

[ ] print ('Precisión de datos de entrenamiento {}'.format(algoritmo.score(X_train, y_train)))
    print ('Precisión de datos de prueba {}'.format(algoritmo.score(X_test, y_test)))

Precisión de datos de entrenamiento 0.9988590986879635
Precisión de datos de prueba 0.9908883826879271
```

Figura 19: Clasificación Random Forest

En la figura 20 se muestra un ejemplo de la predicción de los datos del primer trimestre del 2008. Primero se asigna a una variable los archivos de los valores de NDVI de los incendios ocurridos en esa época, se convierten en dataframe, se imprimen y se elimina las etiquetas. Luego de esto se hace la predicción con el algoritmo ya entrenado y finalmente se hace el conteo de cada clase.

11	Cubierta de arbusto, cerrado-abierto, siempre verde	1,25	0,9
12	Cubierta de arbusto, abierto cerrado, caducifolio	3,3	0,4
13	Cubierta herbácea, cerrada-abierta	1,425	0,9
14	Cubierta de arbusto escasa o herbácea escasa	0,9	0,6
16	Zonas cultivadas y gestionadas	0,44	0,6
17	Mosaico: Tierras de cultivo / Cubierta arbórea / Otra vegetación natural	1,1	0,8
18	Mosaico: Tierras de cultivo / arbustos o césped	1	0,75

Fuente: Michel et al., 2005

Tabla 6: Constantes de factor de emisión para cada tipo de cobertura GLC

Código GLC	C02	NOX	CH4
2	1588	1,3	6,6
4	1569	2,5	4,8
6	1569	2,7	4,5
11	1630	3,2	3,1
13	1630	6,5	3,1
14	1630	6,5	3,1
16	1630	6,5	3,1
17	1630	6,5	3,1

Fuente: Wiedinmyer et al., 2006

Las áreas quemadas se calcularon de acuerdo al tamaño de pixel de las imágenes empleadas que en este caso correspondieron a 250m x 250m y a la cantidad de pixeles que pertenecían a un tipo de cobertura.

En las figuras 21 y 22 se muestra cómo se realizó el cálculo de las emisiones para los tres gases (CO₂, CH₄, N₂O) dadas en teragramos (Tg) para la clase 4 de la clasificación GLC.

CÁLCULO DE EMISIONES

ECUACIÓN DE EMISIONES

$$E(x) = BA * BD * BE * EF(x)$$

2008-1 CLASE 4

- Tamaño del pixel 250
- Area del pixel 62500 metros cuadrados
- Área quemada para la clase 4
- $62500 * 45 = 2812500 \text{ m}^2$

```
[ ] AQ200814= 2812500
    BD200814= 36.7
    BE200814= 0.25
    EFCC02200814=1569 #Constante para CO2
    EFN20200814= 2.5 #Constante para N2O
    EFCH4200814= 4.8 #Constante para CH4
```

Figura 21: Cálculo de emisiones

```
#Emision de CO2 2008-1 para la CLASE 4
emc02200814=AQ200814*BD200814*BE200814*EFCC02200814
emc02200814tr=emc02200814/1000000000
print('Las emisiones de CO2 para la clase 4 en 2008-1 fueron de', emc02200814tr, 'Teragramos')
#Emision de N2O 2008-1 para la CLASE 4
emn2o200814=AQ200814*BD200814*BE200814*EFN20200814
emn2o200814tr=emn2o200814/1000000000
print('Las emisiones de N2O para la clase 4 en 2008-1 fueron de', emn2o200814tr, 'Teragramos')
#Emision de CH4 2008-1 para la CLASE 4
emch4200814=AQ200814*BD200814*BE200814*EFCH4200814
emch4200814tr=emch4200814/1000000000
print('Las emisiones de CH4 para la clase 4 en 2008-1 fueron de', emch4200814tr, 'Teragramos')
```

```
Las emisiones de CO2 para la clase 4 en 2008-1 fueron de 40.48755468750001 Teragramos
Las emisiones de N2O para la clase 4 en 2008-1 fueron de 0.06451171875 Teragramos
Las emisiones de CH4 para la clase 4 en 2008-1 fueron de 0.12386250000000001 Teragramos
```

Figura 22: Cálculo de emisiones

De igual manera se calcularon las emisiones de los tres gases para los demás años de estudio en los ocho tipos de coberturas.

5. Mapas

A continuación, se muestran una serie de mapas en los que se visualizan la cantidad y ubicación de los incendios ocurridos en cada trimestre entre 2008-2018.

- 2008

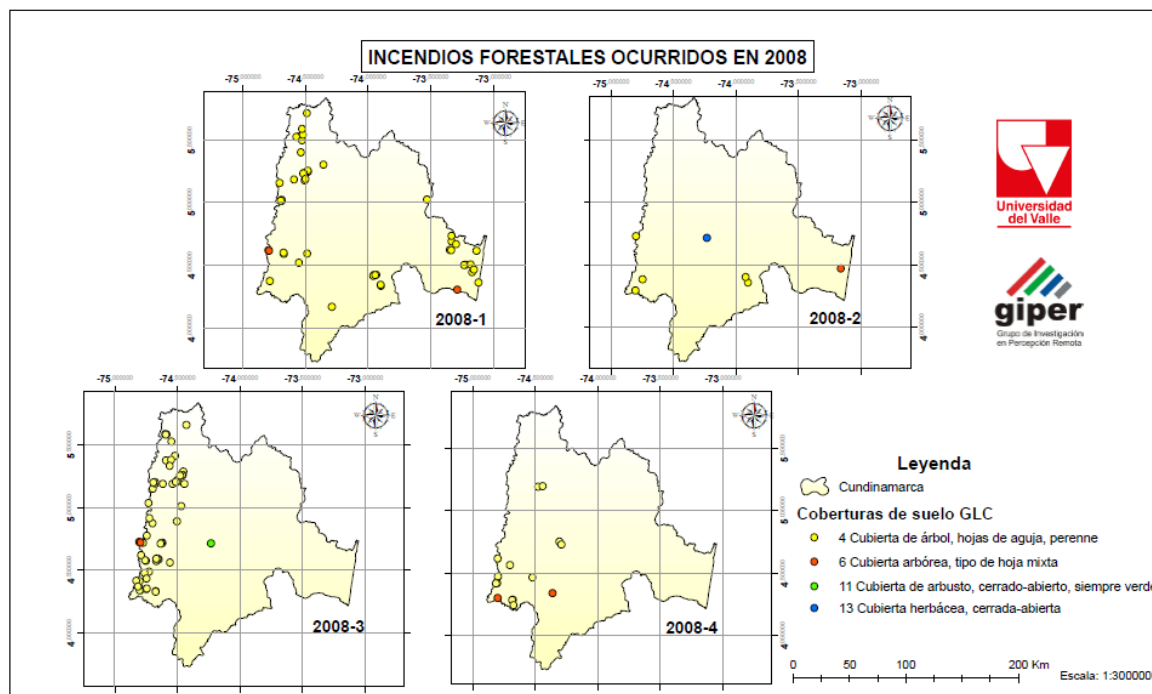


Figura 23: Incendios forestales ocurridos en 2008

- 2009

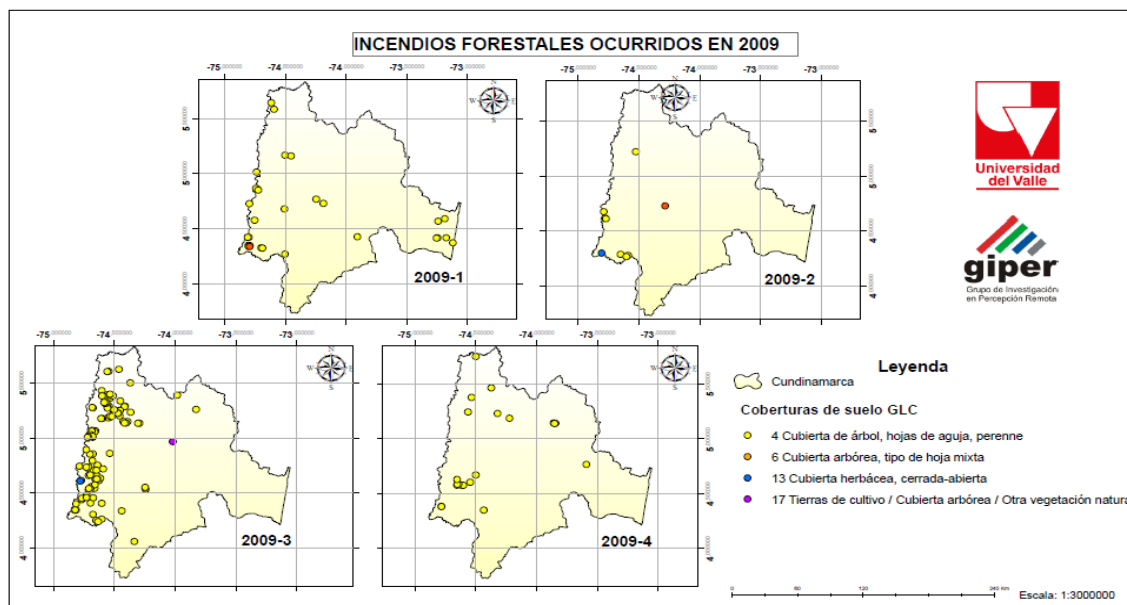


Figura 24: Incendios forestales ocurridos en 2009

- 2010

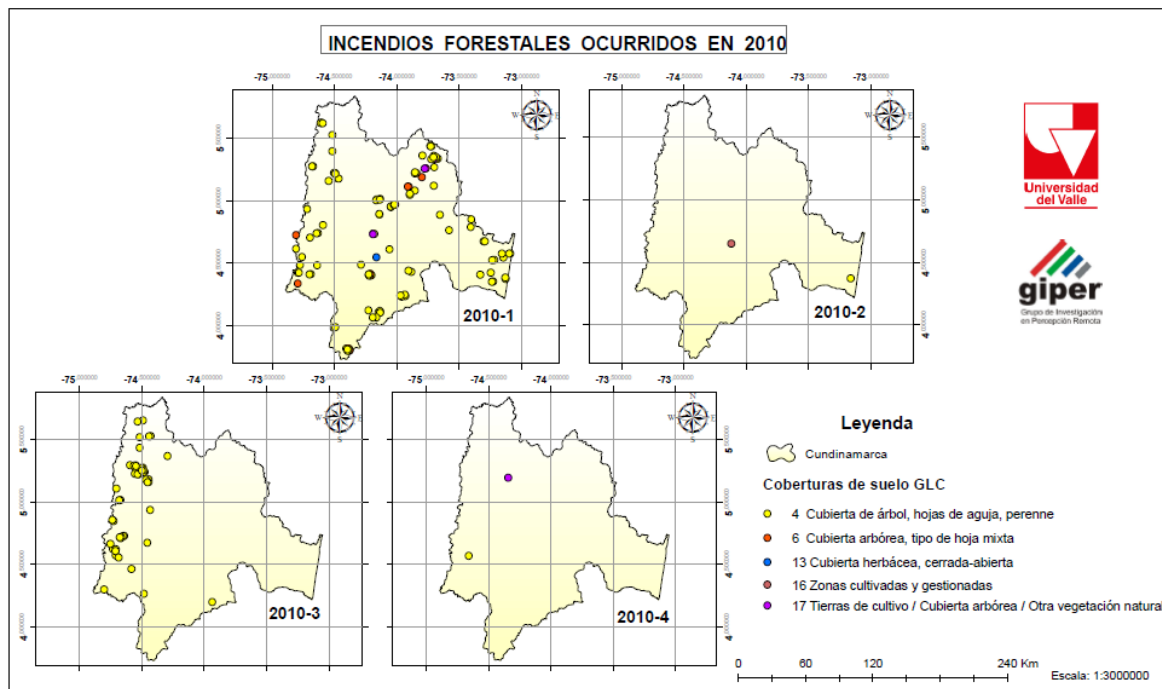


Figura 25: Incendios forestales ocurridos en 2010

- 2011

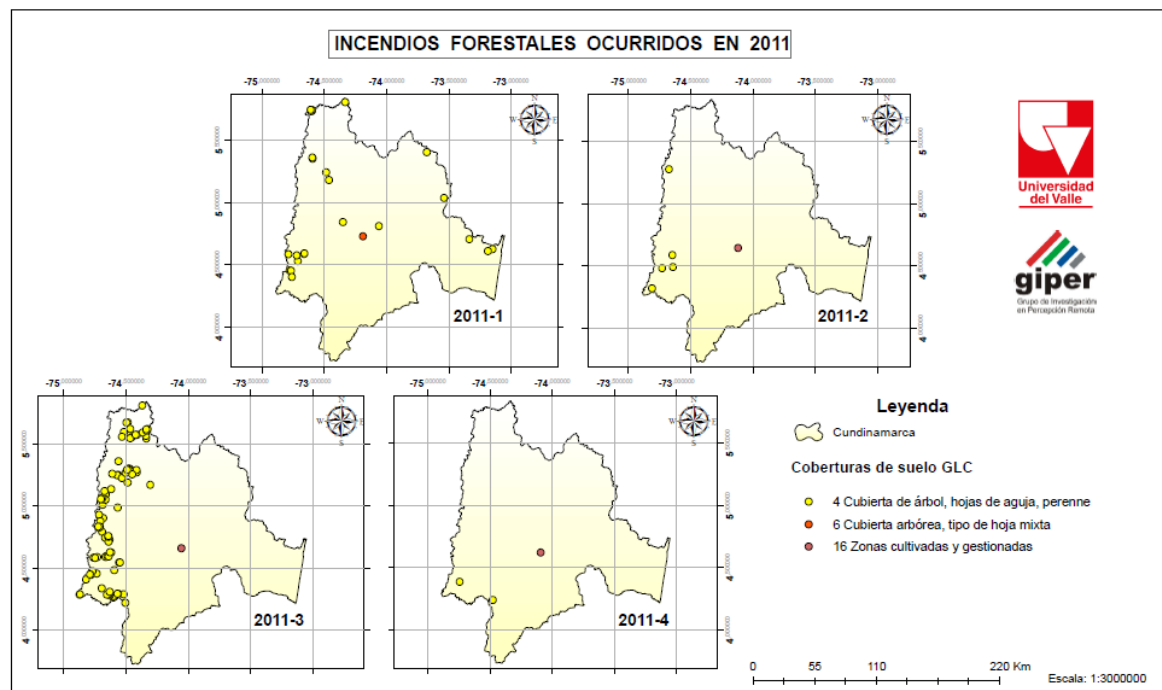


Figura 26: Incendios forestales ocurridos en 2011

- 2012

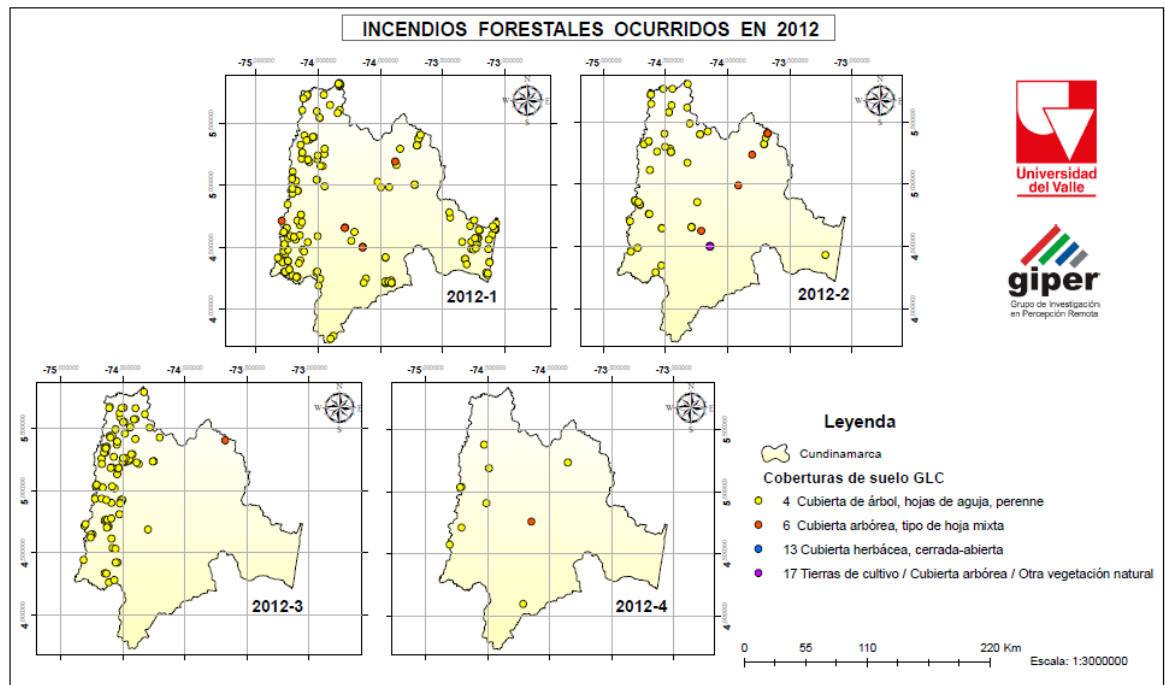


Figura 27: Incendios forestales ocurridos en 2012

- 2013

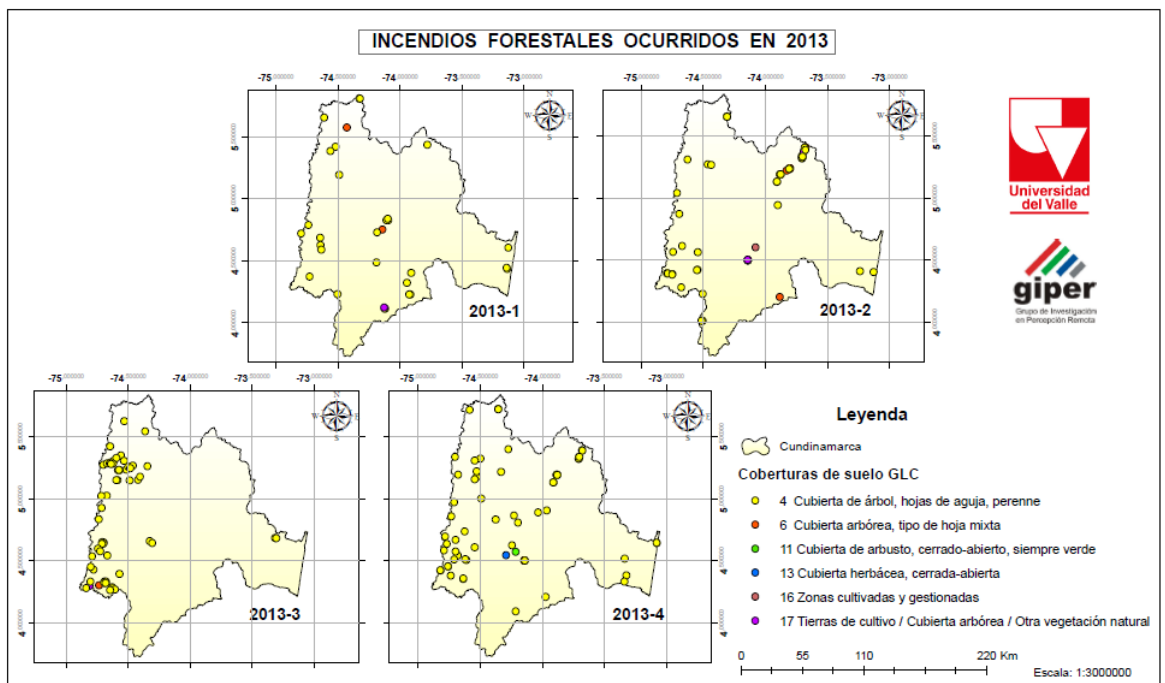


Figura 28: Incendios forestales ocurridos en 2013

- 2014

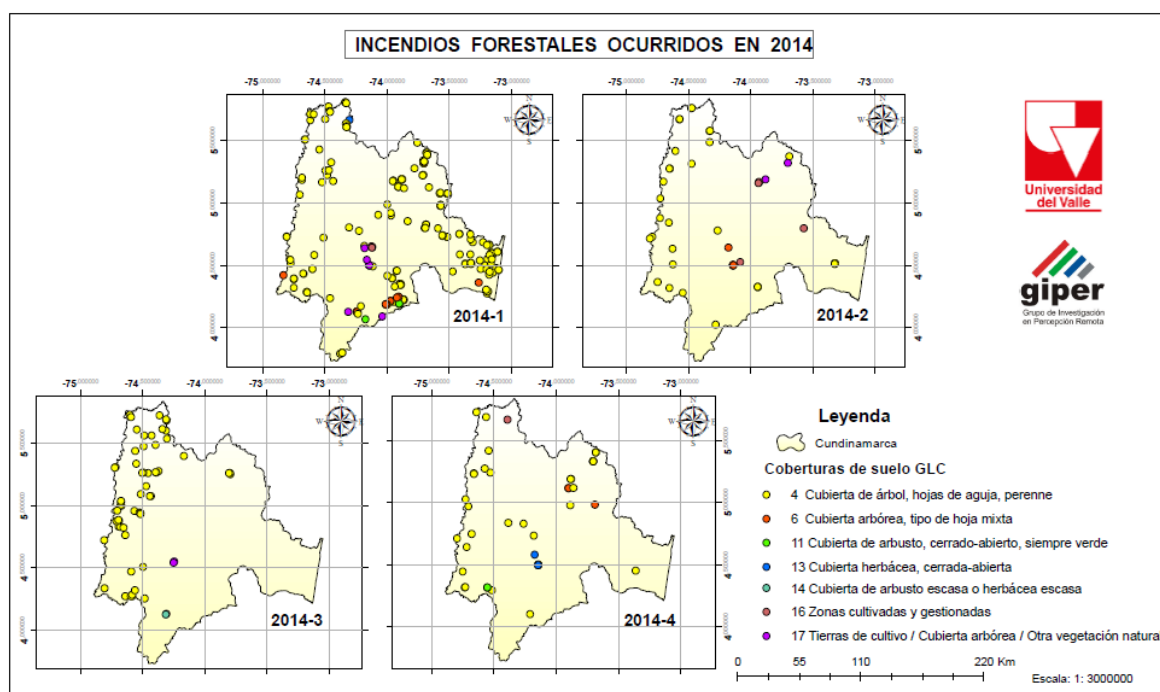


Figura 29: Incendios forestales ocurridos en 2014

- 2015

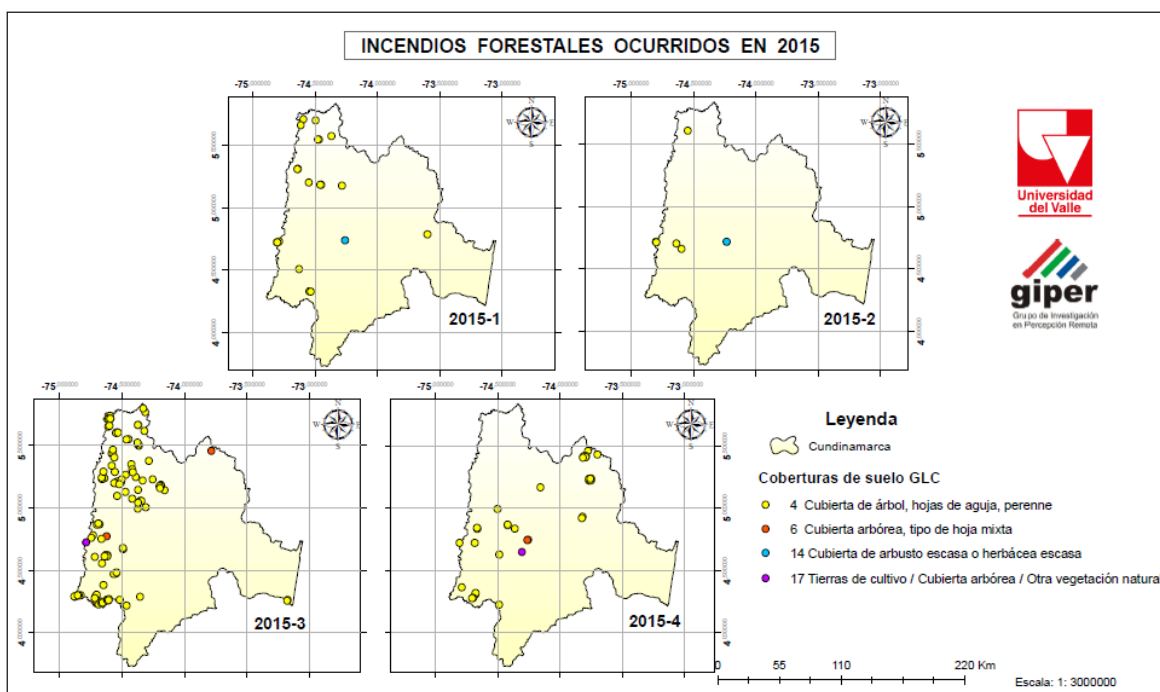


Figura 30: Incendios forestales ocurridos en 2015

- 2016

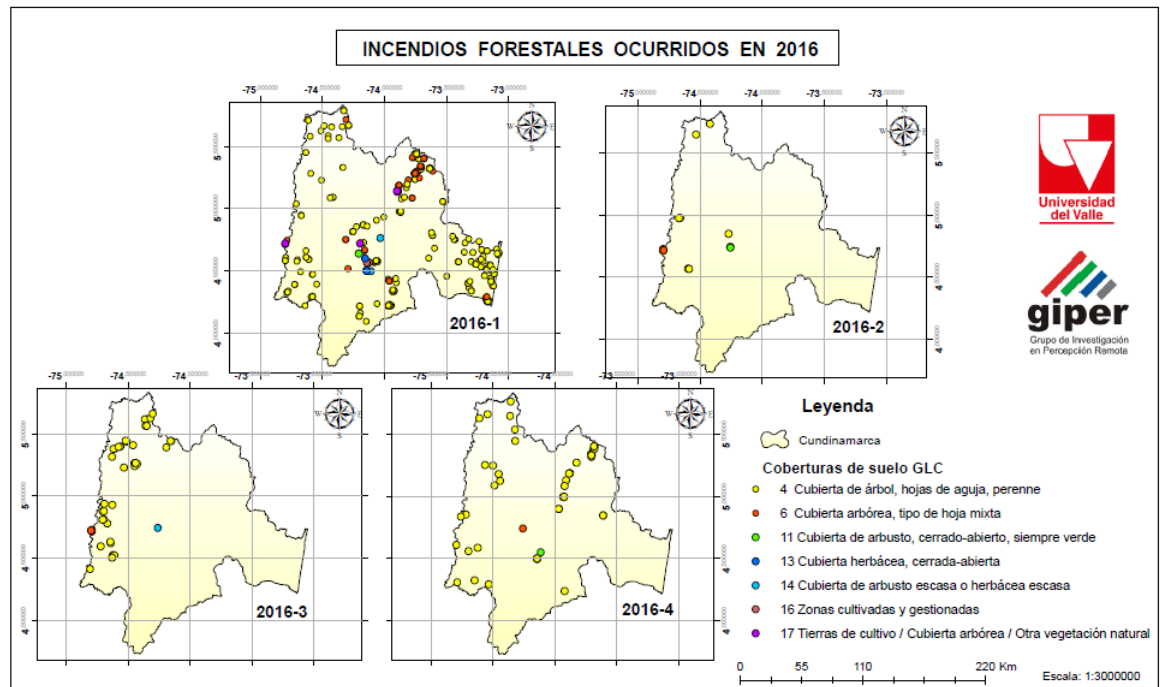


Figura 31: Incendios forestales ocurridos en 2016

- 2017

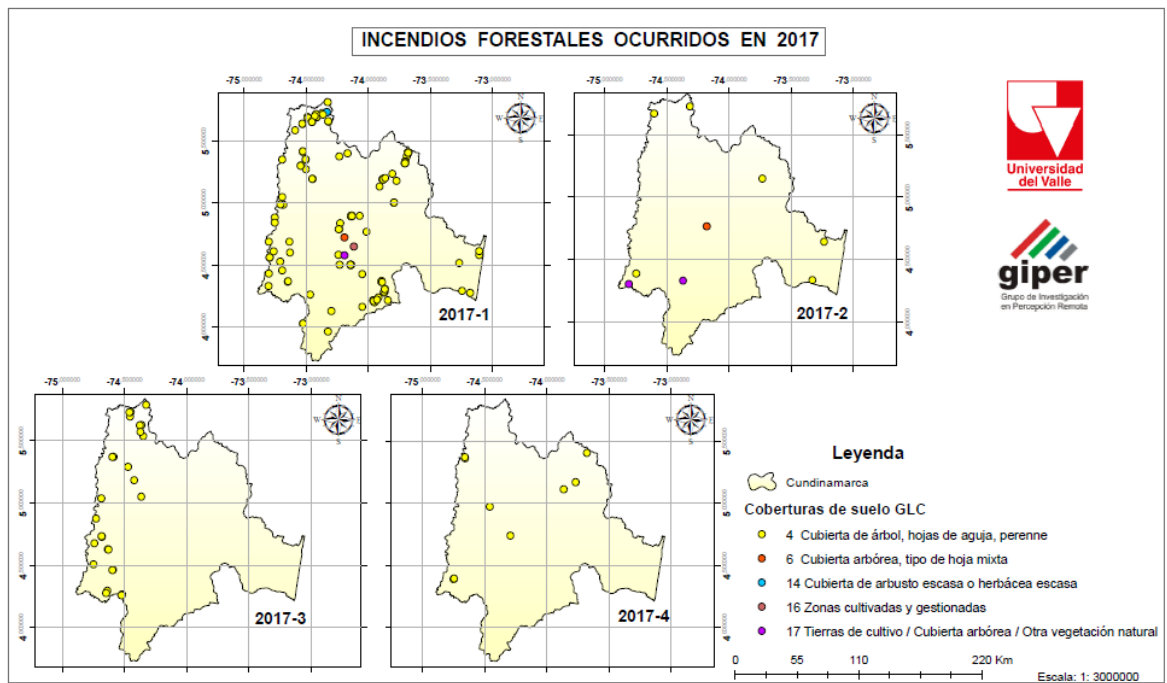


Figura 32: Incendios forestales ocurridos en 2017

- 2018

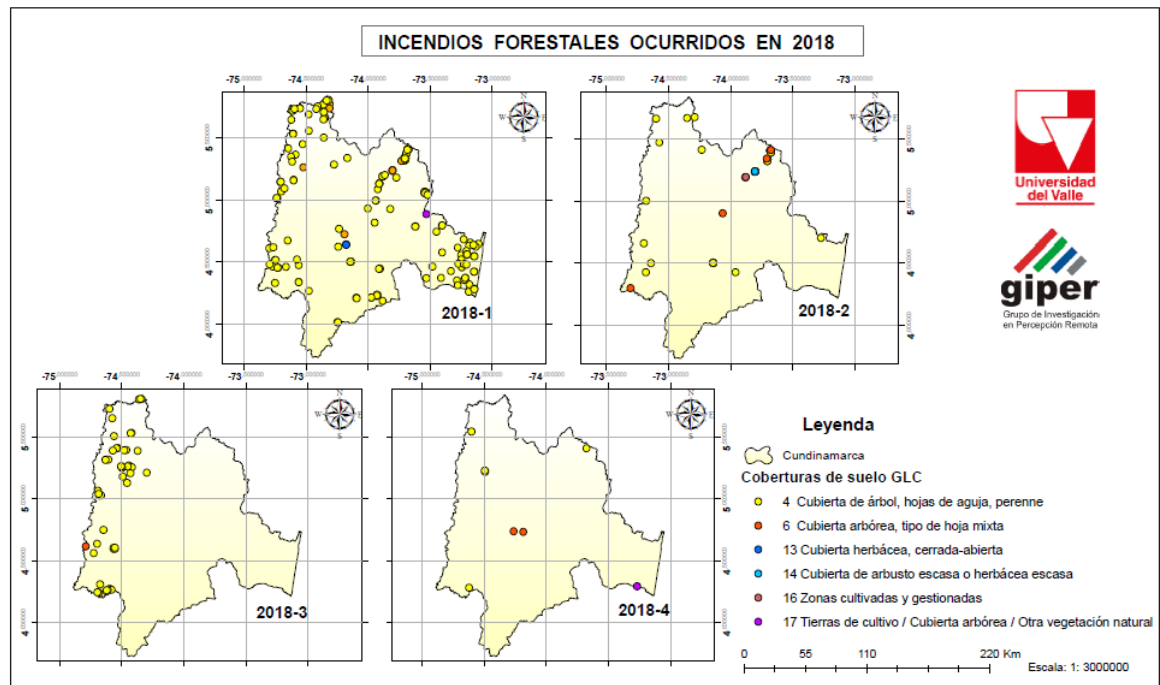


Figura 33: Incendios forestales ocurridos en 2018

A continuación, se muestran una serie de mapas en los que se visualizan las áreas quemadas y la ubicación de los incendios ocurridos entre 2008-2018 en Cundinamarca.

- 2008

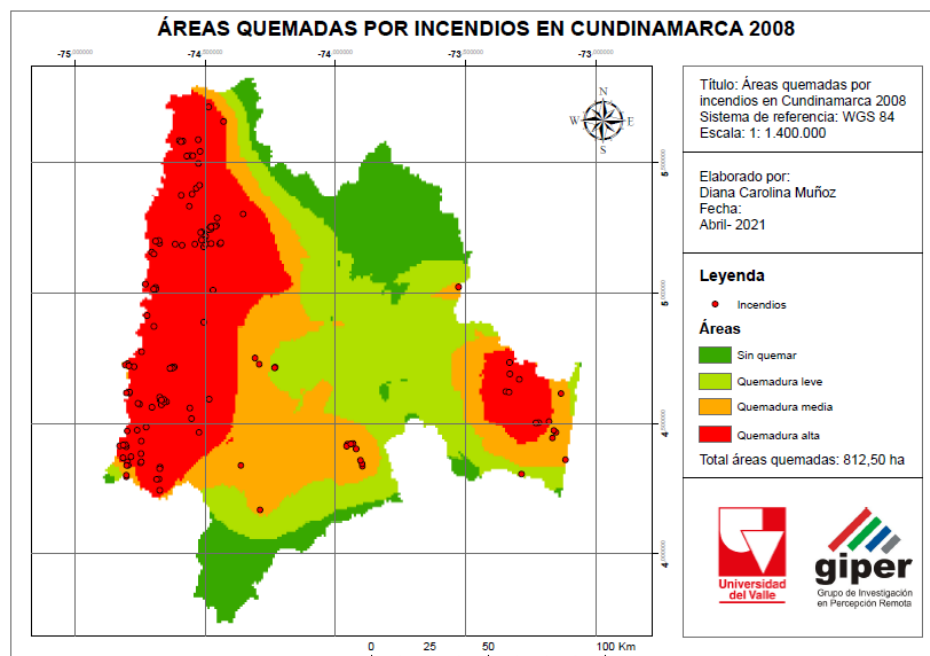


Figura 34: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2008

- 2009

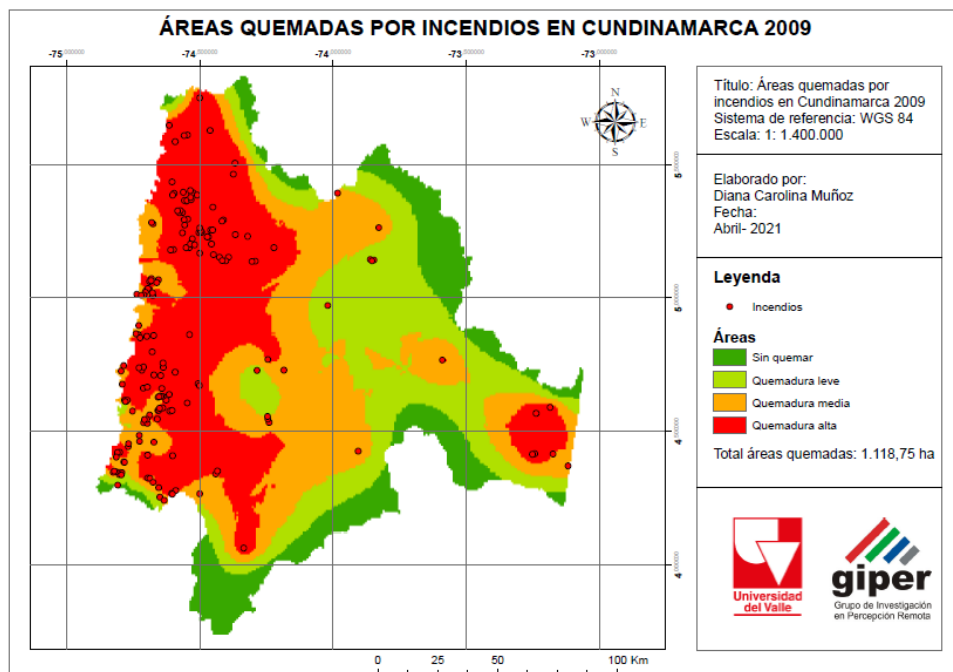


Figura 35 : Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2009

- 2010

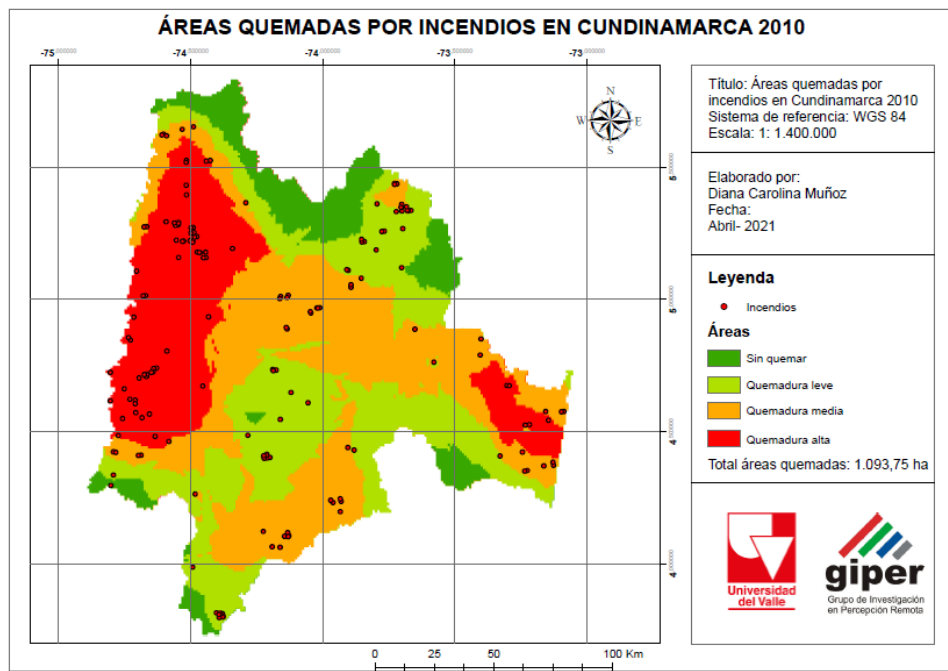


Figura 36: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2010

- 2011

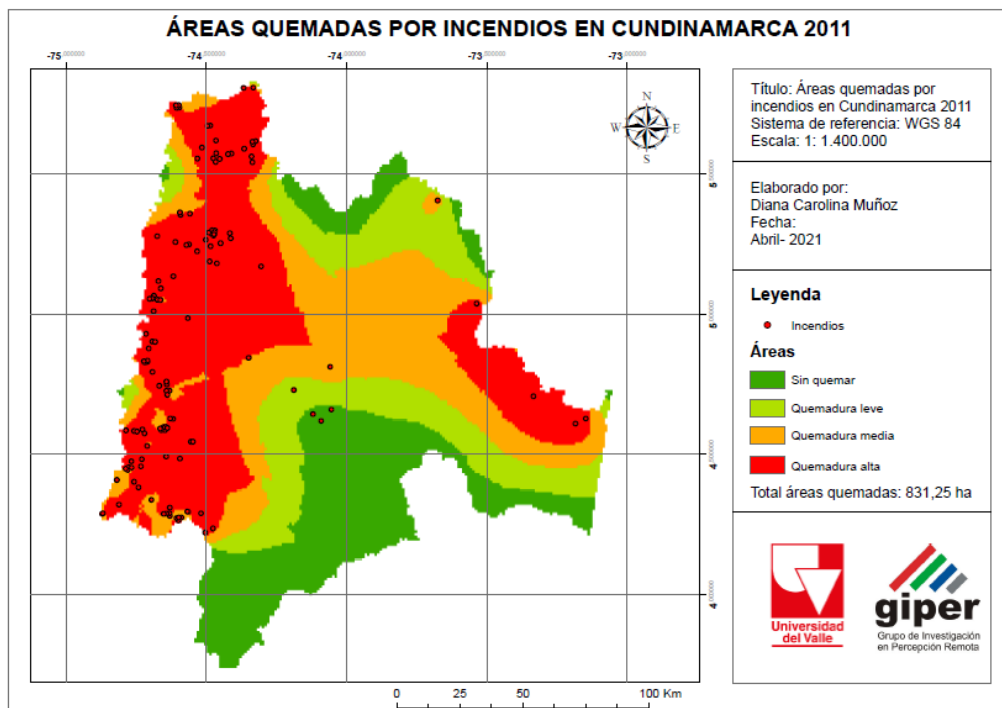


Figura 37: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2011

- 2012

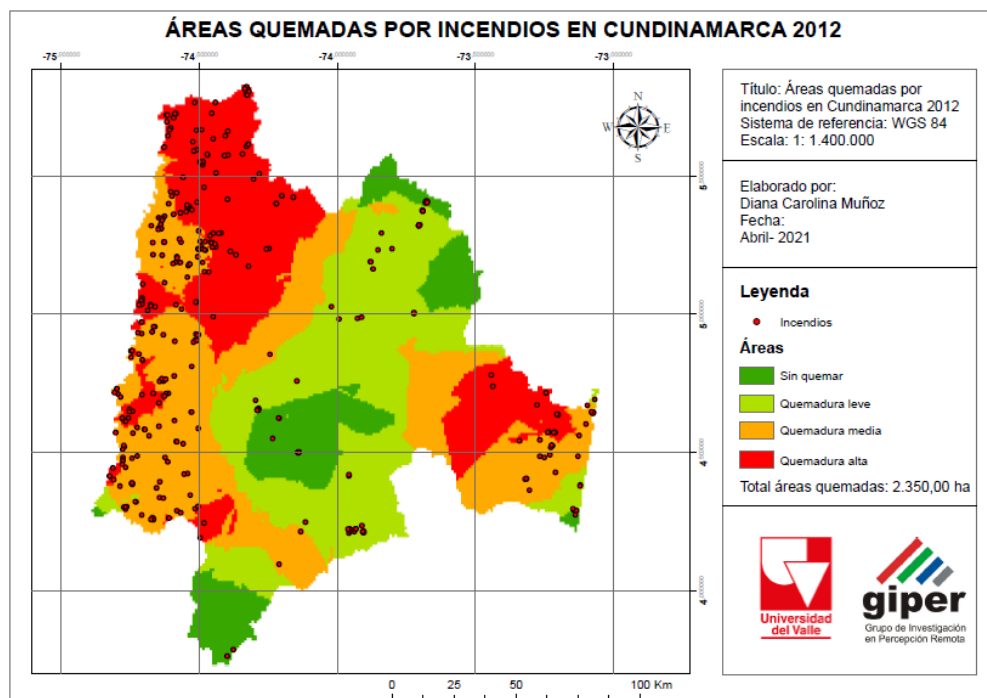


Figura 38: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2012

- 2013

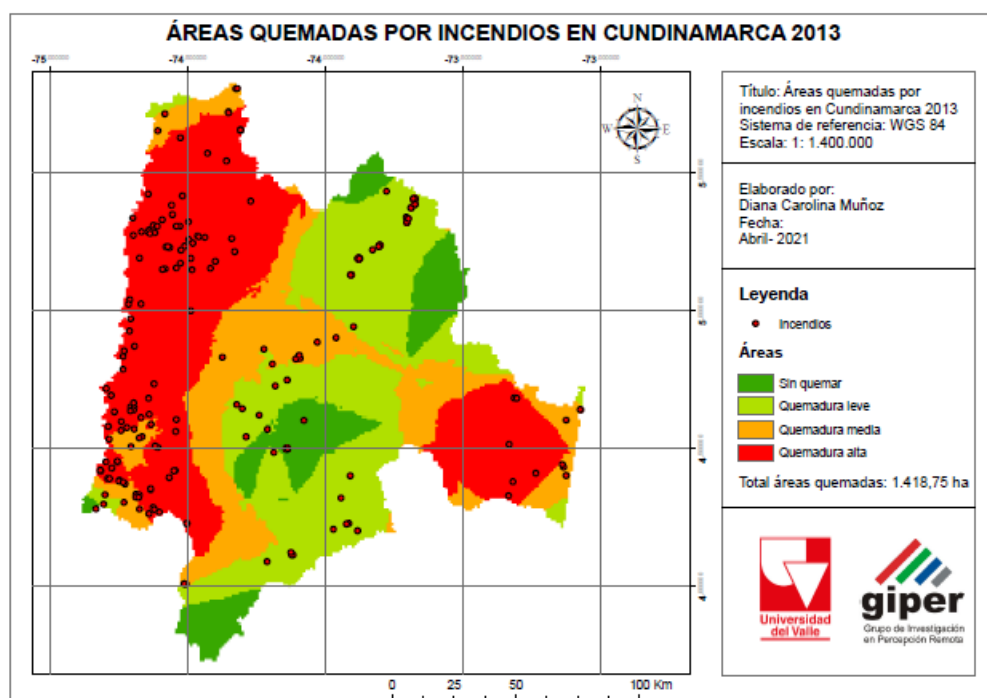


Figura 39: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2013

- 2014

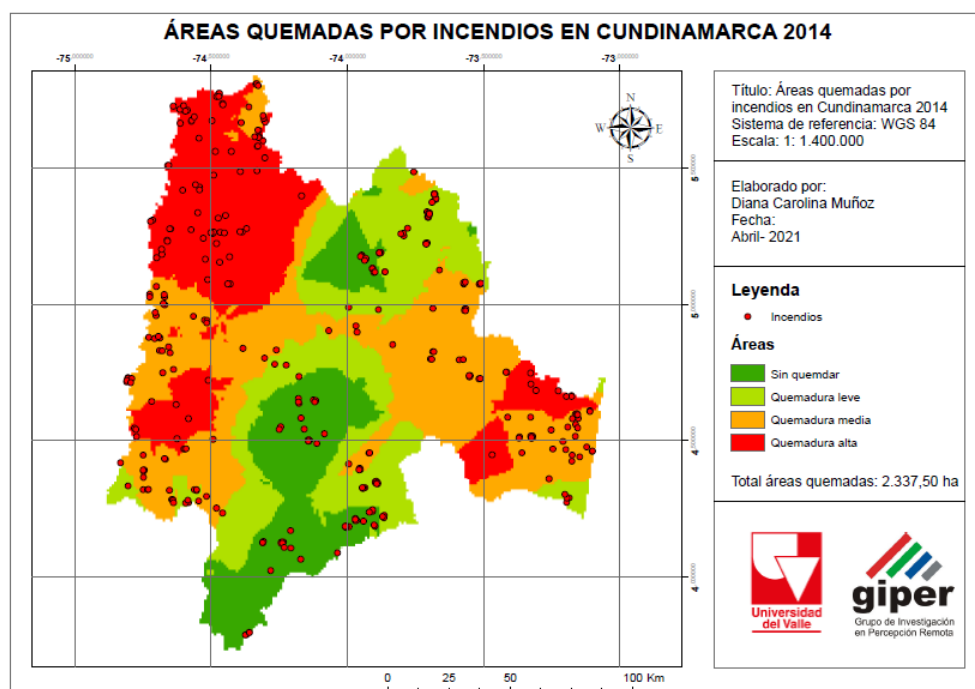


Figura 40: Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2014

- 2015

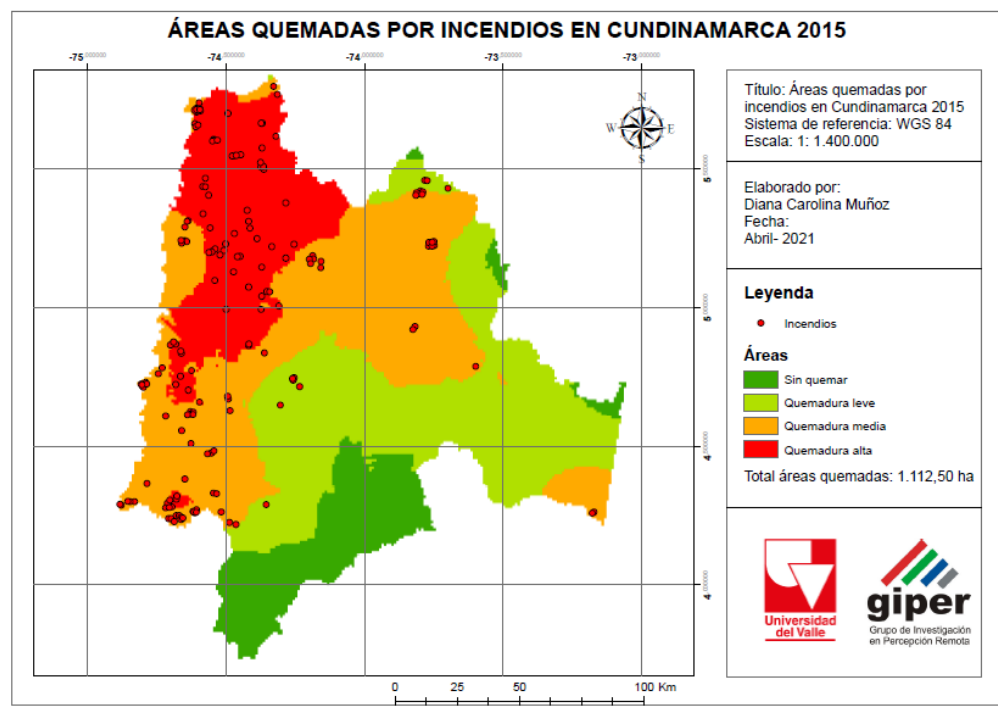


Figura 41 : Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2015

- 2016

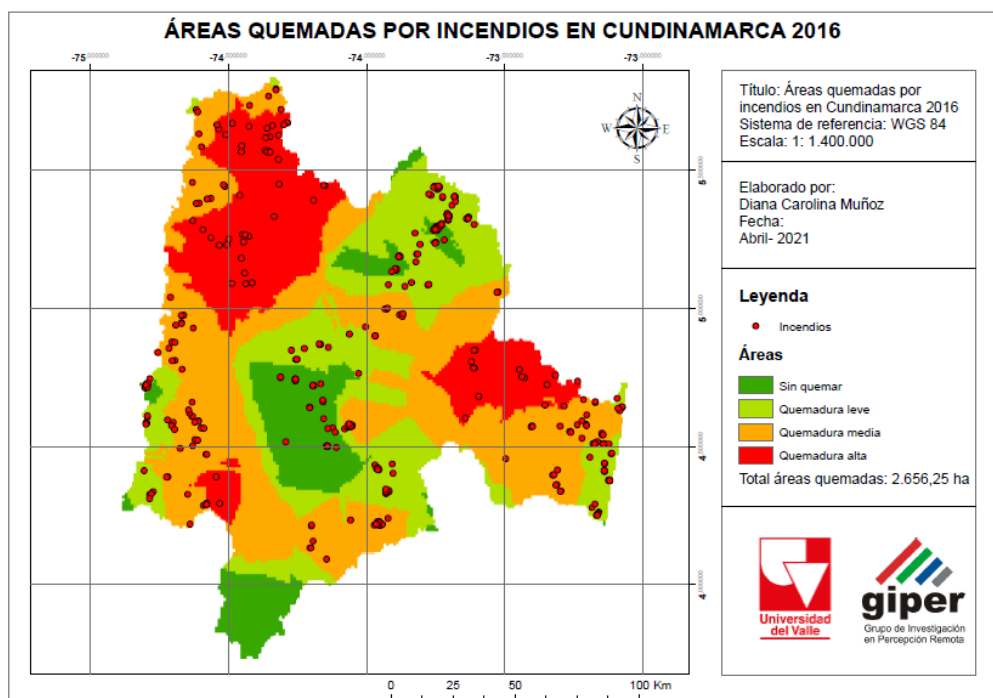


Figura 42 : Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2016

- 2017

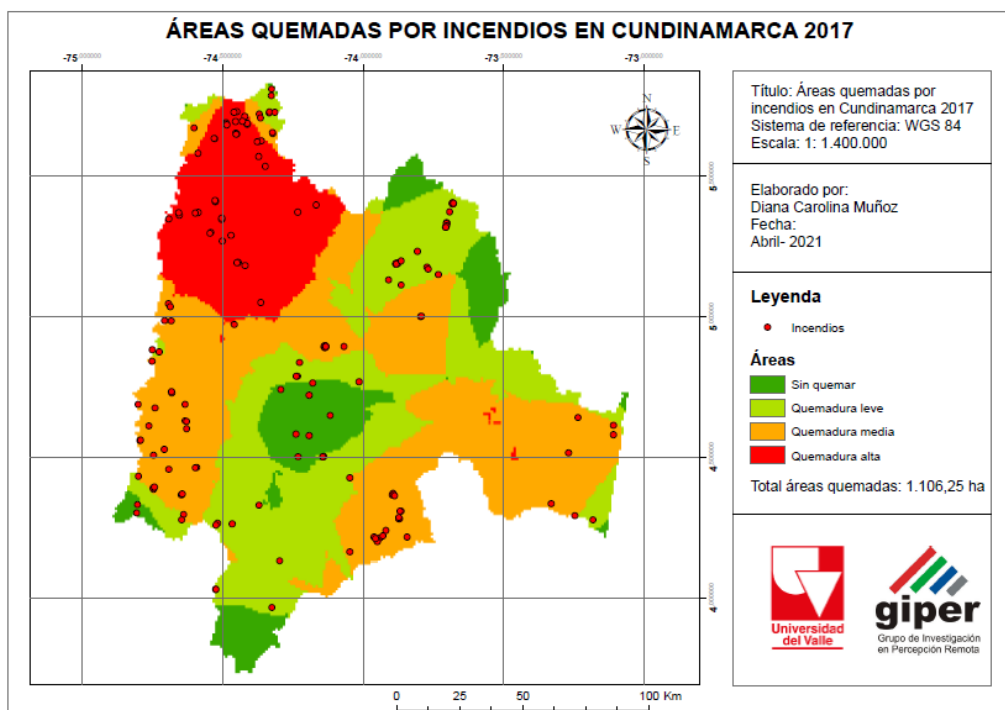


Figura 43 : Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2017

- 2018

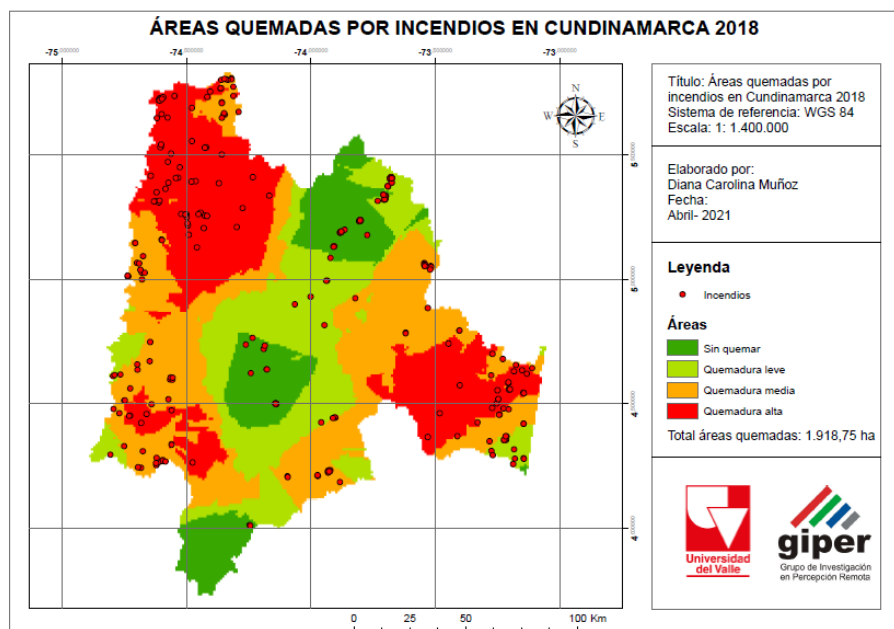


Figura 44 : Áreas quemadas por incendios en Cundinamarca 2018

A continuación, se muestran una serie de mapas en los que se visualizan las emisiones de los GEI generados por los incendios ocurridos entre 2008-2018 en Cundinamarca.

- 2008

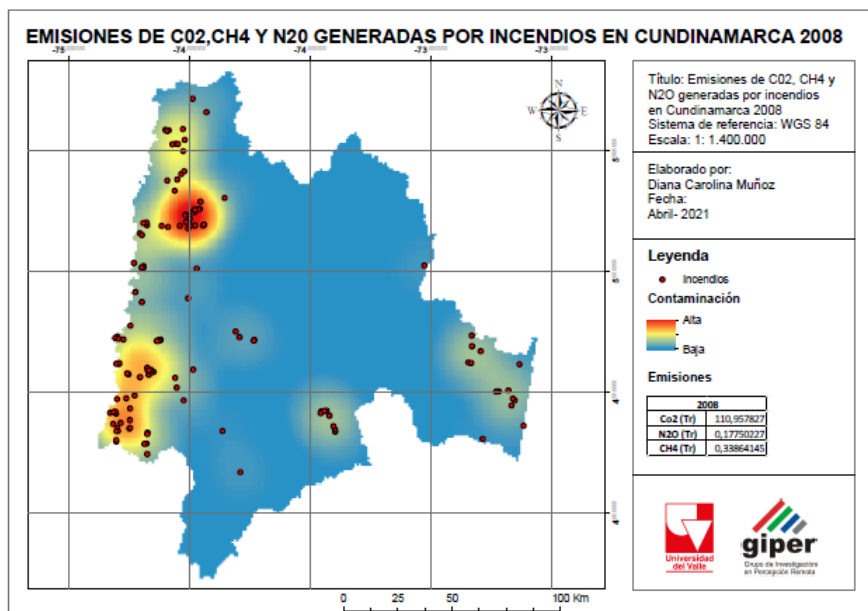


Figura 45: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2008

- 2009

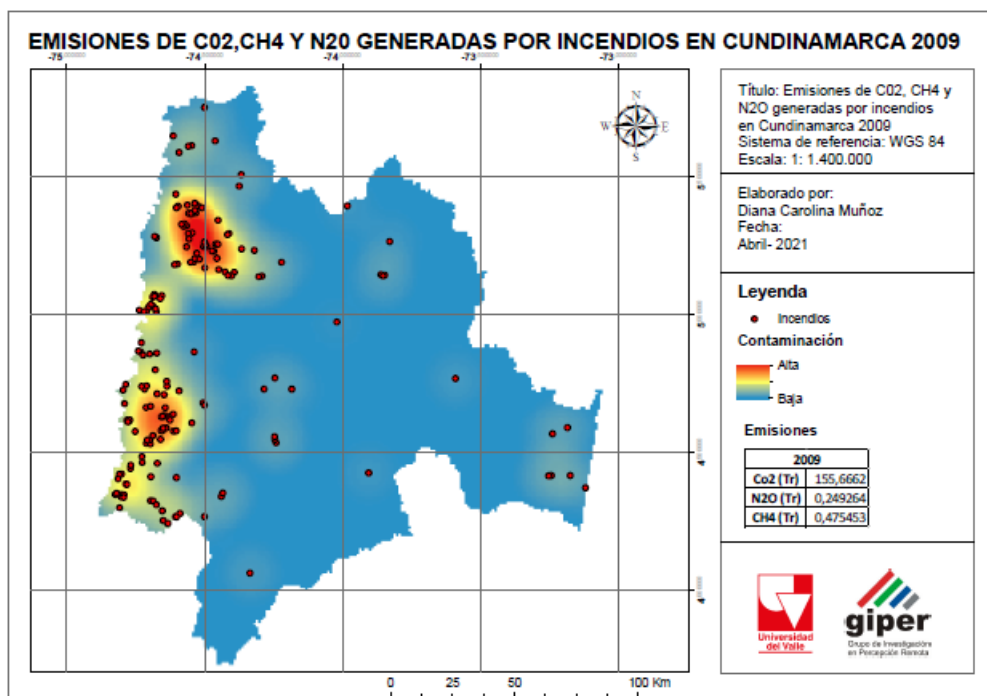


Figura 46: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2009

- 2010

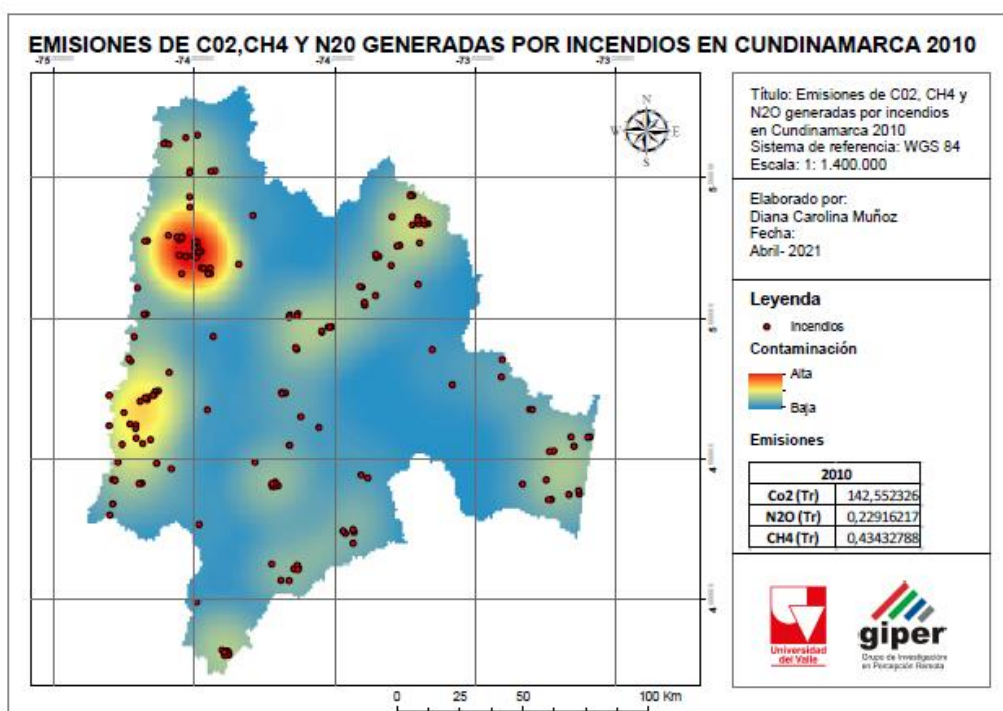


Figura 47: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2010

- 2011

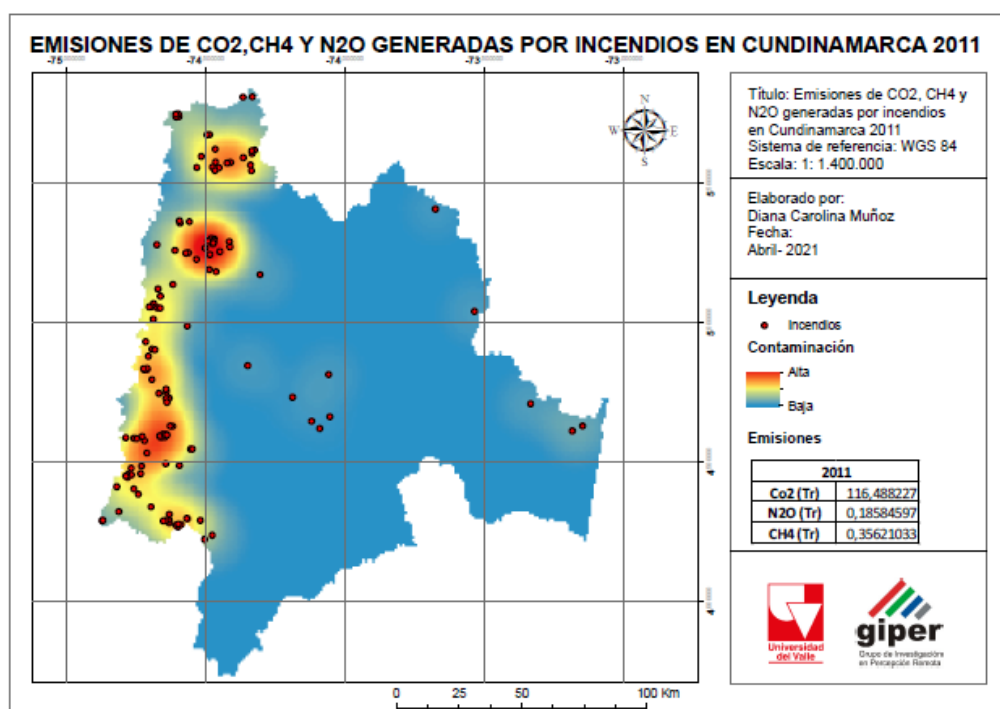


Figura 48: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2011

- 2012

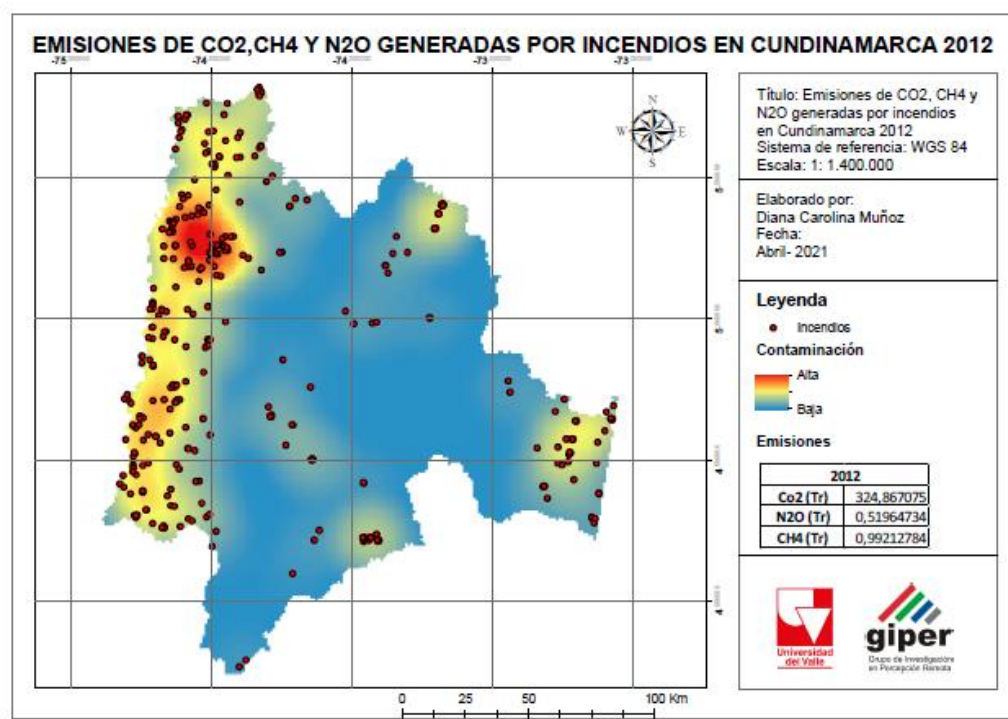


Figura 49: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2012

- 2013

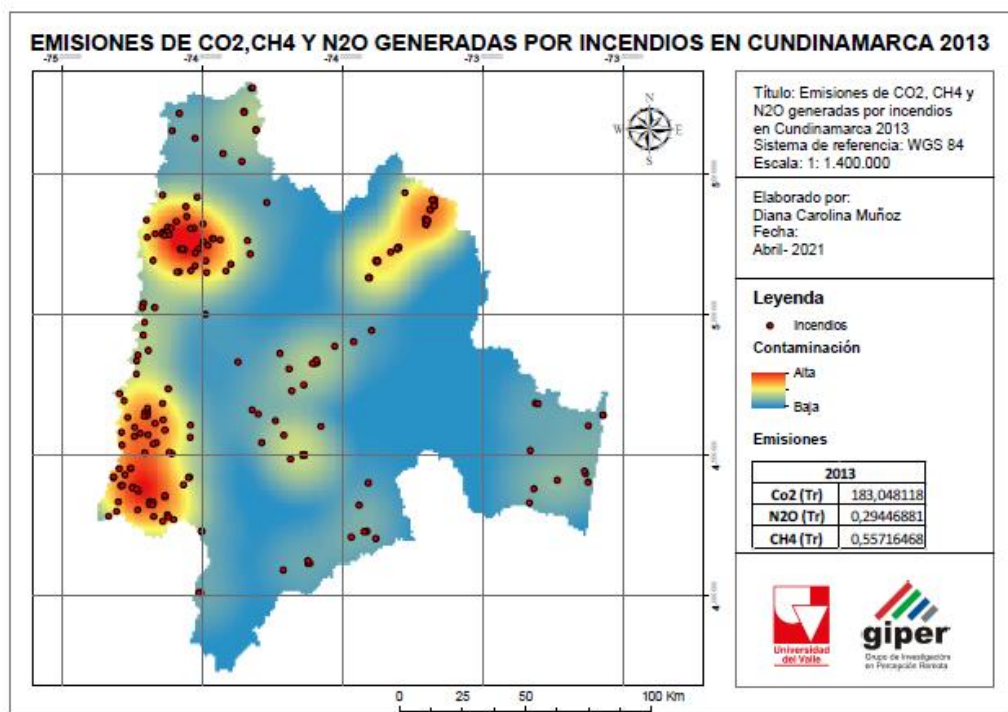


Figura 50: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2013

- 2014

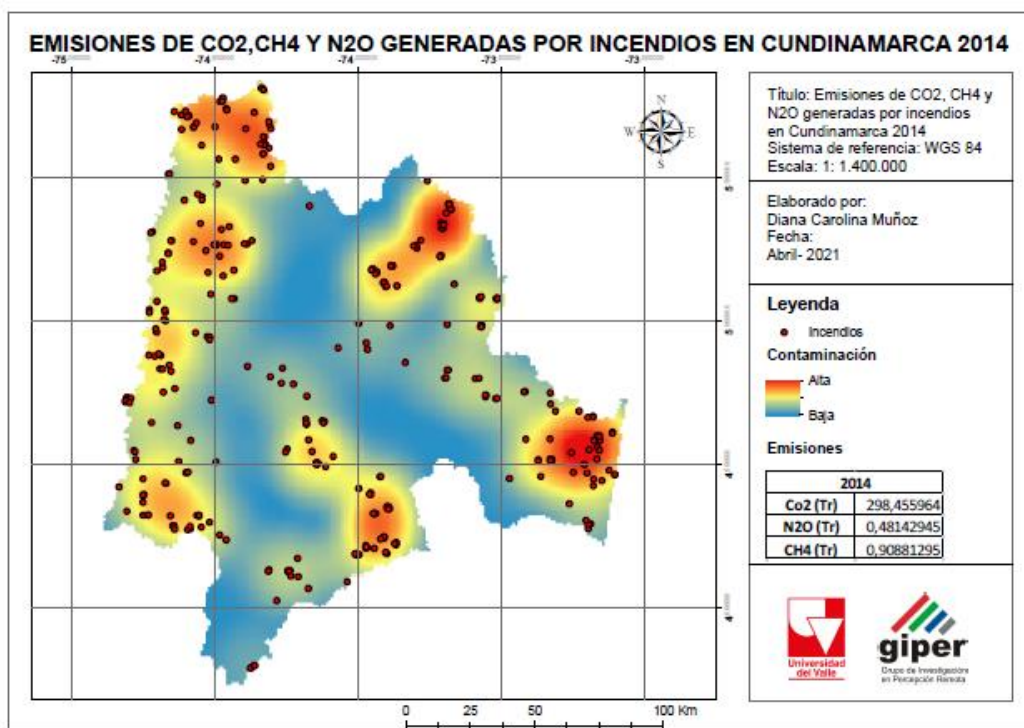


Figura 51: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2014

- 2015

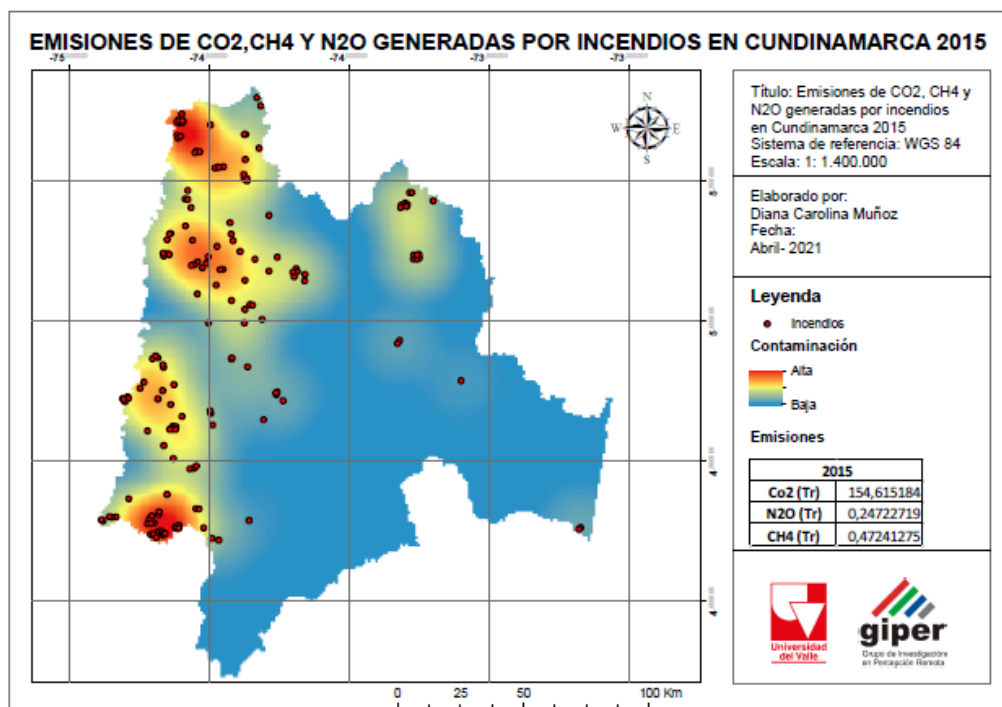


Figura 52: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2015

- 2016

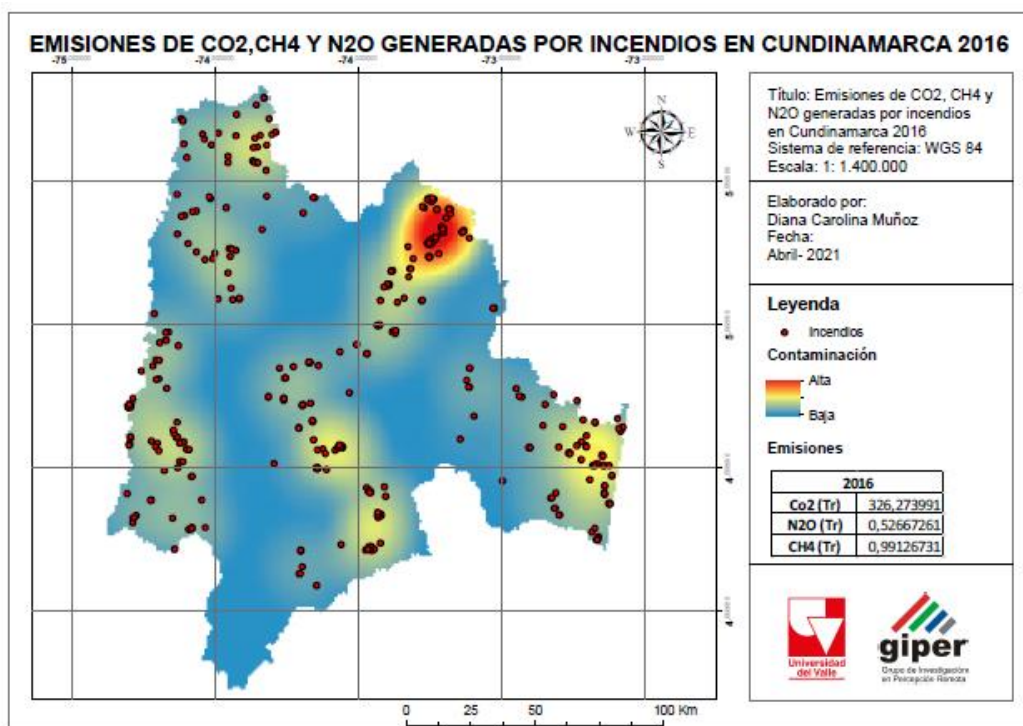


Figura 53: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2016

- 2017

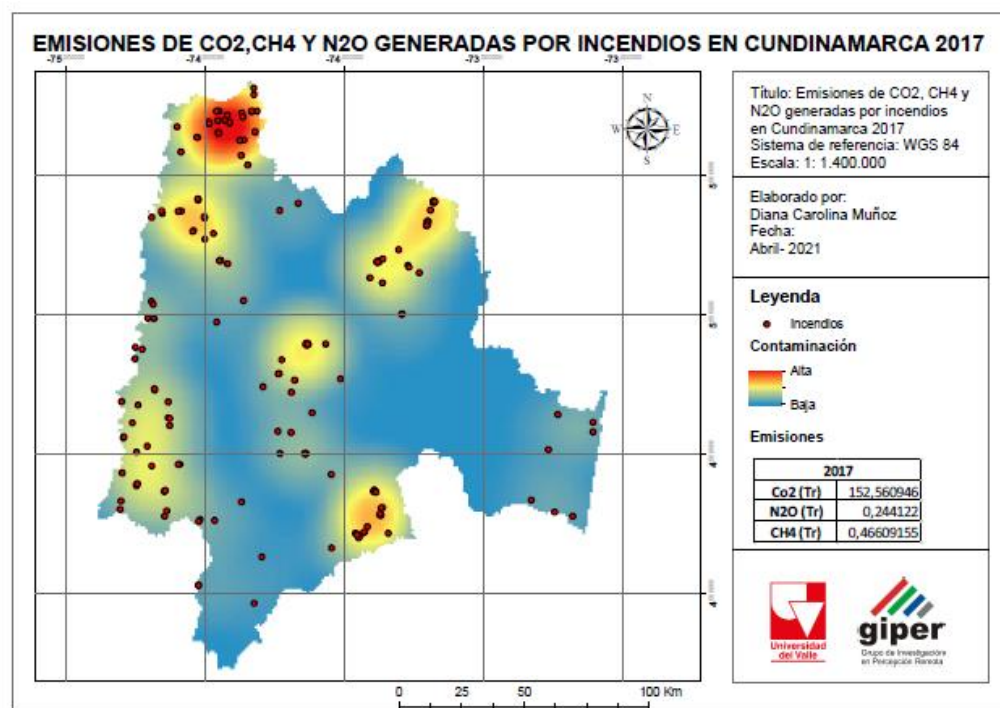


Figura 54: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2017

- 2018

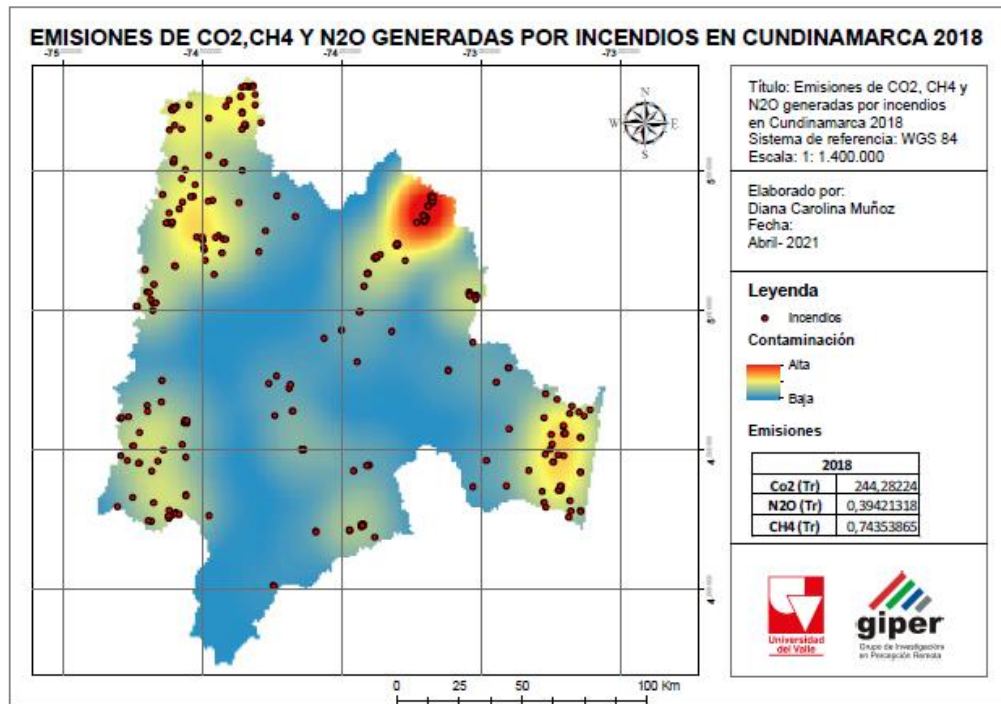


Figura 55: Emisiones de GEI por incendios en Cundinamarca 2018

6. Bibliografía

Comisión Europea, (2020). Global Land Cover 2000 – Legend. Obtenido de: <https://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/legend.php>

Eva, H. D., De Miranda, E. E., Di Bella, C. M., Gond, V., Huber, O., Sgrenzaroli, M., ... & Hartley, A. (2002). A vegetation map of South America. European Commission.

Michel, C., Liousse, C., Grégoire, J. M., Tansey, K., Carmichael, G. R., & Woo, J. H. (2005). Biomass burning emission inventory from burnt area data given by the SPOT-VEGETATION system in the frame of TRACE-P and ACE-Asia campaigns. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 110(D9).

Seiler, W., & Crutzen, P. J. (1980). Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. Climatic change, 2(3), 207-247.

Wiedinmyer, C., Quayle, B., Geron, C., Belote, A., McKenzie, D., Zhang, X., ... & Wynne, K. K. (2006). Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling. Atmospheric Environment, 40(19), 3419