

# Estimación de emisiones atmosféricas de CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub> y *Black Carbon* vía *bottom up*, generados por quema de biomasa en el norte de América del Sur

Germán M. Valencia <sup>\*1,2</sup>, Jesús A. Anaya <sup>2</sup>, Francisco J. Caro-Lopera <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingenierías. Universidad de San Buenaventura, Carrera 56C Nro. 51-90, Medellín, Colombia.

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías. Universidad de Medellín, Carrera 87 Nro. 30-65, Medellín, Colombia.

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Básicas. Universidad de Medellín, Carrera 87 Nro. 30-65, Medellín, Colombia.

**Resumen:** La quema de biomasa es una fuente importante de gases efecto invernadero (GEI) y contaminantes atmosféricos (CA) en la región norte de América del Sur (NHSA). En esta investigación se implementó un método *bottom-up* para la estimación de emisiones, haciendo énfasis en el proceso de validación de los productos de biomasa aérea (AGB), lo que hasta ahora ha sido poco abordado desde el punto de vista de la cuantificación de las emisiones. También se incorporaron los resultados más recientes sobre la validación de productos de área quemada (AQ) y el análisis de la incertidumbre, dentro del proceso de estimación de las emisiones de gases, que de forma directa o indirecta, promueven el efecto invernadero, como lo son el CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub> y *Black Carbon* (BC). En total se quemaron en la región 87,60 Mha entre 2001 y 2016, representadas en un 57% por pastos; 23%, sabanas; 8%, sabanas arboladas; 8%, suelos mixtos con cultivos y vegetación natural; 3%, bosques perennes de latifoliadas; 1%, en el resto de coberturas. Con 35.480 polígonos de referencia se generó un modelo basado en la incertidumbre de AQ, el cual sirvió para encontrar el factor de calibración del FireCCI5.0 en todas las especies estudiadas. Así se obtuvo como resultado que las emisiones totales (mínimas y máximas) y el promedio de las mismas en el periodo de estudio fueron en su orden 1760 Tg CO<sub>2</sub> (765,07-2552,88; promedio 110 Tg), 68,12 Tg de CO (27,11-98,87; promedio 4,26 Tg), 3,05 Tg de NO<sub>2</sub> (1,27-4,40; promedio 0,19 Tg), 0,76 Tg de NH<sub>3</sub> (0,33-1,12; promedio 0,05 Tg), 0,44 Tg de *Black Carbon* (0,015-0,64; promedio de 0,03 Tg).

**Palabras clave:** *Bottom-up*, área quemada, emisiones atmosféricas, validación de biomasa vegetal aérea, gases efecto invernadero, contaminantes atmosféricos, incertidumbre.

## Bottom-up estimates of atmospheric emissions of CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, and Black Carbon, generated by biomass burning in the north of South America

**Abstract:** Biomass burning is an important source of greenhouse gases (GHG) and air pollutants (AP) in developing countries. In this research, a bottom-up method was implemented for the estimation of emissions, emphasizing the validation process of aerial biomass products (AGB), which it has not been sufficiently approached from the point of view of the quantification of emissions. The most recent results on the validation of burned area (AQ) products and the analysis of uncertainty were also incorporated into the process of estimating the emissions of gases that directly or indirectly promote the greenhouse effect, such as CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, and Black Carbon

**To cite this article:** Valencia, G.M., Anaya, J.A., Caro-Lopera, F.J. 2022. Bottom-up estimates of atmospheric emissions of CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, and Black Carbon, generated by biomass burning in the north of South America. *Revista de Teledetección*, 59, 23-47. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.15594>

\* Corresponding author: [german.valencia@usbmed.edu.co](mailto:german.valencia@usbmed.edu.co)

(BC). In total, 87.60 Mha were burned in the region between 2001 and 2016, represented in a 57% by pasture lands a 23% by savannas, an 8% by savanna woodlands, an 8% by mixed soils with crops and natural vegetation, a 3% by evergreen broadleaf forests, and a 1% in the region's remaining types of land cover. With 35480 reference polygons, a model based on the uncertainty of AQ was generated, which served to find the calibration factor of the FireCCI5.0 in all the studied species. The total emissions (minimum and maximum) and the average of the same in the study period were the following: 1760 Tg CO<sub>2</sub> (765.07-2552.88; average 110 Tg), 68.12 Tg of CO (27.11-98.87; average 4.26 Tg), 3.05 Tg of NO<sub>2</sub> (1.27-4.40; average 0.19 Tg), 0.76 Tg of NH<sub>3</sub> (0.33-1.12; average 0.05 Tg), and 0.44 Tg of Black Carbon (0.015-0.64; average 0.03 Tg).

**Key words:** Bottom-up, burned area, atmospheric emissions, Aboveground biomass validation, greenhouse gases, atmospheric pollutants, uncertainty.

---

## 1. Introducción

### 1.1. Importancia

Cuando un fuego se enciende la humedad es expulsada, y luego a medida que aumenta la temperatura se producen reacciones químicas que generan emisiones de gases y aerosoles. Estas emisiones influyen en el cambio climático del planeta (Lees et al., 2018; Yang et al., 2013), por ello, el IPCC relaciona la quema de biomasa con la producción de GEI (responsables del cambio climático) y estos a su vez con el aumento de las temperaturas de la Tierra (IPCC, 2018; Jones et al., 2020; Prosperi et al., 2020). Según Andreae (1991) estas quemaduras se producen principalmente en las zonas tropicales del planeta, donde el fuego en ocasiones es utilizado como una forma de manejo forestal para desmonte dentro de la mejora del pastoreo (Vasconcelos et al., 2013). Adicionalmente, se ha encontrado que la cantidad de incendios forestales ha crecido en los últimos años, debido a las épocas secas que favorecen condiciones climáticas, como es el caso de ENSO en fase fuerte de los años 2010 y 2016, en fase moderada del año 2003, y en fase débil en los años 2005, 2007 y 2015 (Abril-Salcedo et al., 2020), sumado a la baja humedad que puede provocar que los incendios se presenten y se desarrollen (Langmann et al., 2009). Por ejemplo en el año 2019 las quemaduras en la Amazonia tuvieron un incremento cercano al 84% (BBC, 2019), y con una tendencia similar se presentaron en Indonesia, Australia, Siberia (Pierre-Louis, 2019; Williams et al., 2019).

Los impactos generados por estas emisiones se dan a nivel local en las zonas donde ocurren los incendios, pero también debido al transporte

atmosférico, se ven afectaciones a nivel regional y global (Edwards et al., 2004). Estas emisiones contienen tanto GEI como CA. Los primeros, interactúan con la radiación dentro del rango infrarrojo. Lo cual es fundamental dado que es causal del efecto invernadero (Baede et al., 2007). Dentro de estos, los principales gases que surgen naturalmente son: vapor de agua (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Los CA, por su parte, son sustancias químicas o formas de energía que implican riesgo, daño o molestia grave para las personas, o elementos del entorno. Los más destacados de este ramo son: CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, COV, NH<sub>3</sub> y material particulado de diferentes tamaños (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, *Black Carbon*) (Andreae y Merlet, 2001; Schulze, 1989).

Es necesario un monitoreo de estas emisiones de forma constante y con diferentes niveles de detalle. El desarrollo de los sensores remotos puede servir para esta tarea, ya que presentan varias ventajas sobre mediciones *in-situ* a) al abarcar grandes extensiones de territorio, b) tener una alta periodicidad para el monitoreo y c) contar con mejores sensores que permiten caracterizar más variables biofísicas. Por ello, el uso de datos satelitales para la cuantificación de las emisiones por la quema de material vegetal se viene desarrollando a partir de la estimación de las emisiones utilizando variables como focos de calor (*hotspots*), área quemada, biomasa, factores de emisión, eficiencia de quemado, cobertura del suelo, los cuales son utilizados dentro de los métodos conocidos como *Bottom-up* (Seiler y Crutzen, 1980).

## 1.2. Bottom-up

Existen programas para la estimación de las emisiones a nivel global de forma operativa, entre ellos se destacan el *Emission Database for Global Atmospheric Research* EDGAR v4.2 (Janssens-Maenhout et al., 2012, 2011), inventarios detallados de quemados de biomasa como *Global Fire Emission Database* (GFED4) (Van der Werf et al., 2013), el *Global Fire Assimilation System* (GFASv1) (Kaiser et al., 2012), y a nivel regional se destaca el *Wildland Fire Emission Inventory* para el caso de EEUU (Urbanski et al., 2011).

En la Tabla 1 se pueden apreciar algunos de los inventarios de emisiones de carbono más relevantes en la región de América del Sur. En la columna “Estimación de emisiones por quema de biomasa” de la Tabla 1, se pueden observar las diferencias en los valores de los modelos. Según Melton et al. (2012), las tendencias de emisiones en la zona tropical de América del Sur están en aumento. Los inventarios de emisiones GFEDv3.1 y el GFASv1.0 (Christen, 2014; Hooghiemstra et al., 2012; Kaiser et al., 2012; Pechony et al., 2013; Whitburn et al., 2014), son los más mencionados en la literatura; donde se evidencian variaciones en los valores de las emisiones. Las diferencias entre los modelos están asociadas a la incertidumbre en las variables que incluyen área quemada (AQ), biomasa (B), factores de emisión (Ek) y eficiencia

del quemado EQ. Por ello, en el presente trabajo además de cuantificar las emisiones de algunas sustancias químicas emitidas a la atmósfera, se analiza la incertidumbre asociada a la variable área quemada, la cual es estimada utilizando datos obtenidos por teledetección.

### 1.2.1. Área Quemada (AQ) e incertidumbre

En la década de los 80 se definió que la quema de biomasa es una variable esencial de cambio climático (Mouillot et al., 2014). Por ello desde esa misma época se desarrollaron los primeros estudios para conocer la cantidad de área quemada en el mundo, lo mismo que la cantidad de incendios de biomasa (Crutzen y Andreae, 1990). Gracias al avance logrado en los sensores remotos en términos del mejoramiento en la resolución espacial, espectral, temporal y radiométrica, se han logrado desarrollar estudios y modelos muy precisos con el seguimiento de las quemadas en los últimos 20 años, con información detallada sobre la calidad de los productos cartográficos y la representación de los incendios.

Los productos de AQ pueden detectar las cicatrices del fuego que quedan incluso por incendios de corta duración, que se hayan producido entre las observaciones térmicas utilizadas para detectar los fuegos activos, o por los incendios que fueron cubiertos por nubes en el momento de las

**Tabla 1.** Principales inventarios *Bottom-up* de emisiones. Tabla adaptada del trabajo de Shi et al. (2015).

Inventario/ Modelo	Referencia	Tipo emisión	Resolución temporal	Resolución especial/Cobertura	Método ( <i>Bottom-up</i> o <i>Top-down</i> )	Estimación de emisiones por quema de biomasa
ACCMIP	(Lamarque et al., 2010)	Antropogénica Quema de biomasa	Diario 1850-2000	0,5°×0,5° Global	<i>Bottom-up</i>	Promedio en Latinoamérica 75,3 Tg C
EDGAR4.2	(Janssens- Maenhout et al., 2011)	Antropogénica Quema de biomasa	Anual 1970-2012	0,1°×0,1° Global	<i>Bottom-up</i>	América del Sur 470 Tg C
EDGAR- HTAPV1	(Janssens- Maenhout et al., 2012)	Antropogénica Quema de biomasa	Anual 2000-2005	0,1°×0,1° Global	<i>Bottom-up</i>	América del Sur 470 Tg C
GFED 4s	(van der Werf et al., 2017)	Quema de biomasa	Anual Mensual Diario para quemados de más de 3 horas 1997-2016	0,25°×0,25° Global	<i>Bottom-up</i>	NHSA 32 Tg C
3BEM	(Longo et al., 2010)	Quema de biomasa	Diario	35 km horizontal América del Sur	<i>Bottom-up</i>	América del Sur 712 Tg CO <sub>2</sub>
G-G	(Mieville et al., 2010)	Quema de biomasa	Mensual 1997-2005	1°×1° Global	<i>Bottom-up</i>	NHSA 6,6 Tg CO <sub>2</sub>

observaciones térmicas, o por las cicatrices de fuego que se dejan en el paisaje por los incendios que son demasiado pequeños o demasiado débiles en radiación para activar el algoritmo de detección de *hotspots* (Chuvieco et al., 2019).

Algunos trabajos destacados sobre productos de área quemada con incidencia en la región NHSA, o sobre su validación, son el de Chuvieco et al. (2008) presentando los resultados del proyecto AQL (Área Quemada en Latinoamérica). Anaya y Chuvieco, (2010) validaron los productos MCD45, Globcarbon, L3JRC. Palomino y Anaya, (2012) evaluaron la calidad del producto MCD45A1 en la región de la Orinoquia. Opazo y Chuvieco (2013), presentaron un análisis geográfico de la distribución espaciotemporal de la ocurrencia de incendios en el continente durante el periodo 2004 a 2006 a partir del producto de área quemada AQS. Rodríguez-Montellano et al. (2015), presentaron los resultados de la validación de los productos MCD45A1, MCD64A1 colección 5 y AQM en Bolivia. Libonati et al. (2015) evaluaron los productos MCD45A1, MCD64A1 colección 5 y AQM en una zona de Brasil. Padilla et al. (2014) hicieron el ejercicio de validación de los productos MCD64C5, MCD45C5.1, GeoLand, MERGED\_cci, Meris\_cci, y VGT\_cci, en 103 sitios en todo el mundo, de los cuales 13 quedaban en América del Sur.

En uno de los ejercicios de validación estadística más recientes en la región NHSA (NHSA) y norte de África (NHAF), Valencia, et al. (2020a) presentaron la validación de los productos MCD45 C5.1, MCD64 C5, MCD64 C6, FireCCI 4.2 (MERIS) y FireCCI 5.0 (MODIS) en 44 zonas (WRS2) entre ambos continentes (17 América y 27 África). De allí se identificó que el mejor producto de área quemada en ambos continentes es el FireCCI5.0. Estos resultados, en especial los del continente americano fueron incluidos en la presente investigación.

### 1.2.2. Biomasa (B)

Según Saatchi et al. (2011), Baccini et al. (2012), y Rodríguez-Veiga et al. (2017), en las zonas tropicales se almacena gran parte de la biomasa aérea del planeta. Pero además, allí se presentan las principales dificultades para el monitoreo de la biomasa aérea, por la baja densidad de mediciones de campo y debido a los conflictos armados en

algunas de estas zonas (Rodríguez-Veiga et al., 2017).

Aunque existen varios trabajos para modelar la producción de biomasa aérea son pocos los estudios enfocados en la evaluación de la exactitud con la que los mapas de biomasa están representando la cantidad de carbono. La importancia en la validación ya ha sido resaltada en estudios que comparan los pocos productos de biomasa existentes a escala continental o global (Avitabile et al., 2016; Avitabile y Camia, 2018; Chave et al., 2019; Santoro et al., 2015), y sus implicaciones en la gestión ambiental y aplicaciones científicas. En la sección 1 y 2 del material suplementario (SM) del presente trabajo, se podrá encontrar un ejercicio con pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas, para validar los productos de biomasa aérea (AGB) con mayor relevancia según la cantidad de citas, en la región NHSA, presentando las condiciones de calidad, para ser incluido en el modelo de estimación de emisiones.

### 1.2.3. Coberturas del suelo, eficiencia de quemado (EQ), factor de emisión (Ek)

La información del tipo de cubierta es utilizada para establecer la eficiencia de quemado y los factores de emisión. La eficiencia de quemado habla del porcentaje de la vegetación que es quemado en la ocurrencia de un incendio, normalmente su valor va entre 0 y 1, dependiendo del tipo de cubierta. Por su parte, los factores de emisión se definen como un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de un gas emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la emisión. Estos factores son usualmente expresados como la masa del gas dividido por una unidad de peso, volumen, distancia o duración (EPA, 2019a, 2019b). Esta es una variable importante dentro del proceso de estimación *bottom-up*, ya que dan cuenta de la cantidad de un gas emitido a la atmósfera por unidad de material quemado. Estos dos factores (eficiencia de quemado y el factor de emisión) son obtenidos por medio de pruebas de laboratorio.

### 1.2.4. Focos de calor (hotspots)

Además del área quemada, las anomalías térmicas también pueden ser utilizadas para cuantificar emisiones. Existen dos regiones del espectro electromagnético especialmente útiles para caracterizar elementos que tienen alta emisividad.

Estas son el infrarrojo medio (MIR: 2.5–8 μm) y el infrarrojo térmico (TIR: 8–14 μm). En el TIR la señal detectada por el sensor está relacionada por la temperatura de fenómenos superficiales y su emisividad (Kumar et al., 2020). Un foco de calor (*hotspot*), anomalía térmica o foco activo, es un indicador de la presencia de un incendio, y para su detección se desarrollan algoritmos que comparan la temperatura de brillo de un píxel y sus vecinos, con valores umbrales típicos de incendios en las bandas de 4 μm y 11 μm (Giglio et al., 2013).

La detección de focos de calor se da cuando el sensor satelital tiene la capacidad de observar directamente la radiación térmica emitida por un incendio, mientras se está quemando. Por el contrario, las AQ pueden mapearse por detección remota muchos días después del evento de fuego, suponiendo que la ceniza residual no se ha eliminado y/o que el rebrote de vegetación después del incendio no ha ocurrido (Chuvieco et al., 2019).

### 1.3. Gas efecto invernadero

El CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, *Black Carbon* y el NH<sub>3</sub> fueron escogidos en la investigación debido a sus efectos directos o indirectos en la generación de GEI. El dióxido de carbono CO<sub>2</sub> es importante a nivel global ya que es un GEI, su concentración en la atmósfera de la Tierra es actualmente de casi 412 partes por millón (ppm) y está aumentando. Lo que representa un aumento del 47% desde el comienzo de la era industrial, cuando la concentración estaba cerca de 280 ppm, y un aumento del 11% desde 2000, cuando estaba cerca de 370 ppm (Buis, 2019). Mediciones con OCO-2 han revelado que en los últimos 5 años ha aumentado la influencia de las emisiones atmosféricas de CO<sub>2</sub> en la región tropical del planeta, en especial asociadas a ENSO (El Niño) de 2015-2016. En el caso de Indonesia se encontró una alta relación del aumento de la temperatura, con un aumento en las concentraciones de CO<sub>2</sub> generados por la quema de biomasa (Malhi et al., 2018; Palmer et al., 2019). El CO<sub>2</sub> es el segundo GEI más importante arrojado a la atmósfera (el primero es el vapor de agua), generado como resultado de la combustión de la biomasa vegetal a causa del fuego, o por emisiones de quemaduras de combustibles fósiles. Debido a las quemaduras de biomasa, en la fase llama del fuego, se emite cerca de un 63% de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y en la fase brasa el restante 37% (Levine

et al., 2001). Su permanencia en la atmósfera del planeta varía entre 300 y 1000 años, de ahí su acumulación constante en la atmósfera (Brown, 2017; Gray, 2019), y su riesgo para generaciones futuras.

El monóxido de carbono (CO) reacciona con los GEI, aumentando la concentración de estos. Este es considerado dentro de la gama de emisiones perjudiciales para la salud humana y el bienestar de los seres vivos, identificados como contaminantes criterio. Una de las reacciones químicas que aumentan su presencia en la atmósfera es la oxidación del metano (Bauduin et al., 2017). Su disolución o desaparición es dominada por la presencia en el aire de radicales hidroxyl (OH), también es considerado el mayor precursor de O<sub>3</sub> troposférico a una escala global (Bauduin et al., 2017; Fry et al., 2012). Su tiempo de vida en la atmósfera no se conoce con exactitud, pero oscila entre 0,3 y 5 años (Jaffe, 1968; Voiland, 2015). Este gas se emite en la quema de biomasa en la proporción de 16% en la fase llama, y el restante 84% es emitido en la fase brasa (Levine et al., 2001), lo que representa cerca del 50% de todo el CO arrojado a la atmósfera del planeta (S. Whitburn et al., 2014).

Las emisiones de amoníaco (NH<sub>3</sub>) han aumentado casi 4 veces en los últimos 20 años. Estas se dan principalmente como consecuencia de procesos humanos, entre los que destaca la agricultura, las erupciones volcánicas, las quemaduras de carbón en los hogares para cocinar, tráfico vehicular (Whitburn et al., 2017). En el caso de América del Sur y parte de África, estas se dan principalmente por la quema de biomasa, y se dan de manera estacional (Evangelidou et al., 2021). A nivel mundial se emiten en promedio 3.26 Tg al año (Whitburn et al., 2014). Debido a su rápida reacción puede ser considerado un trazador de fuentes de emisiones de quema de biomasa, ya que su detección en el ambiente se da por una emisión cercana en el tiempo y en el espacio, al ser un gas de muy corta duración (Dammers et al., 2016). Esta especie química juega un papel importante en la química atmosférica y en los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno reactivo (Galloway et al., 2003), representando un peligro para los ecosistemas sensibles al participar en la transformación del sulfato de amonio y nitrato de amonio en aerosoles, que impactan la salud humana, la visibilidad y el clima (von Bobrutski et al., 2010). Se ha demostrado

que el  $\text{NH}_3$  juega un papel protagónico en la formación de partículas secundarias al reaccionar con las especies  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , para formar aerosoles que contienen sales de amoníaco, el cual constituye la fracción principal de aerosoles  $\text{PM}_{2.5}$  que se han encontrado en algunas ciudades (Doria-Argumedo y Fagundo-Castillo, 2017; Wang y Christopher, 2003; Wu et al., 2016).

El dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) es una especie importante presente en la atmósfera y está asociada a una serie de problemas ambientales, incluyendo la formación de  $\text{O}_3$  troposférico, aerosoles, acidificación, eutrofización, y efectos adversos en la salud humana (Clerbaux et al., 2015; Mavroidis y Chaloulakou, 2011; Monks et al., 2009; Tie et al., 2007). Este gas también podría ser utilizado como trazador de las fuentes de emisión, pero su presencia en la atmósfera es tres veces mayor que la del  $\text{NH}_3$ .

El *Black carbon* (BC), es uno de los componentes del material particulado fino emitido durante la quema de biomasa, emitido principalmente en la fase de brasas. Considerado un contaminante atmosférico peligroso para la salud humana, para la habitabilidad del planeta, generando efectos en el clima y el ambiente (Simões Amaral et al., 2016). Además de su implicación en la salud, este material también tiene un efecto en la atmósfera, ya que al absorber la radiación solar y reemitirla nuevamente en forma de calor participa en el forzamiento de la atmósfera y en el cambio climático (Löndahl et al., 2010; Shi et al., 2015; YuSheng et al., 2015). En la actualidad los países en vía de desarrollo especialmente de América, África y Asia, son los que emiten la mayor cantidad de esas partículas, asociadas a la quema de biomasa y de combustibles para diferentes actividades económicas (Solaun et al., 2014).

## 1.4. Propósito

En este artículo, se presenta un análisis del impacto de los errores de los productos de área quemada en la estimación de las emisiones atmosféricas, de igual forma, se presenta una validación de los principales productos de biomasa área. Conocidos estos dos factores, se implementó el método *bottom-up* para la estimación de las emisiones de las especies químicas  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$  y *Black*

*Carbon*, estudiados de manera diaria entre el 1 de enero de 2001 y el 31 de diciembre de 2016.

## 2. Metodología

### 2.1. Área de estudio

La región NHTA es una zona geográfica que desde el punto de vista de emisiones por quema de biomasa, debe ser estudiada de forma conjunta, dado que comparten cuencas hidrográficas y flujos de energía presentes en la precipitación, y el viento. En la Figura 1 se puede observar la delimitación de la zona de estudio, representada por el polígono enmarcado por la línea de color rojo.

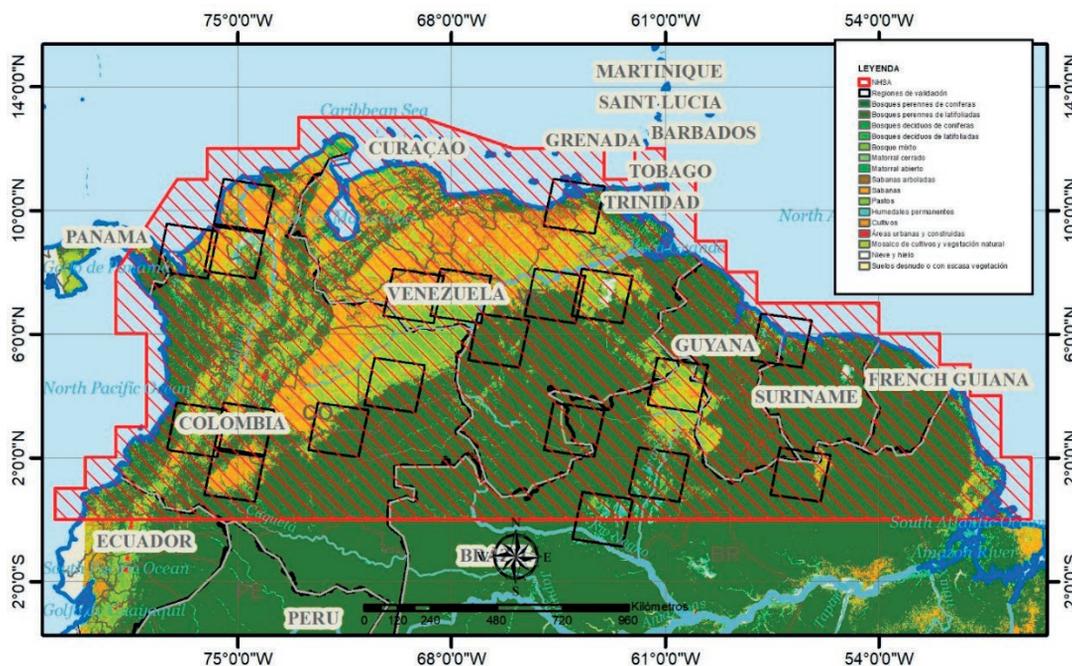
Los inventarios de emisiones globales GFAS, GFED, FINN, utilizan la zonificación propuesta por Giglio et al. (2006), donde aparece la zona NHTA con características en sus incendios y vegetación diferentes a otras regiones del planeta. Esta región está dominada por pastizales de sabana en la cuenca del río Orinoco, bosques naturales en la zona del Amazonas, mosaicos, pastos y humedales en la región Atlántica y bosques en el Pacífico (ver Figura 1).

### 2.2. Modelo conceptual

Uno de los modelos más utilizados para cuantificar las emisiones por la quema de biomasa es el de Seiler y Crutzen (1980). Este modelo es considerado indirecto, ya que las emisiones son determinadas a partir de la estimación de las variables que participan en la generación de las mismas (Ecuación 1).

$$M_{i,j,k} = AQ_{i,j} \times B_{i,j,m} \times EQ_{i,j,m} \times E_k \quad (1)$$

Donde,  $M_{i,j,k}$  es la cantidad emitida de un gas con coordenadas  $i, j$  en Mg.  $AQ$  es el área quemada en  $\text{km}^2$  ( $i, j$ ).  $B$  corresponde a la biomasa aérea en  $\text{Mg}/\text{km}^2$ ;  $EQ$  es la eficiencia de quemado o de combustión del tipo de vegetación  $m$  (a-dimensional);  $E_k$  es el factor de emisión, es decir, la cantidad del gas  $k$  emitido por unidad de material vegetal ( $\text{g kg}^{-1}$  de biomasa quemada). El éxito de este modelo se centra en determinar la exactitud y la incertidumbre de cada una de las variables.



**Figura 1.** Figura con la delimitación por la línea de color rojo del NHTSA, sobre Mapa de coberturas del suelo, información procesada del modelo MCD12Q1 (acceso <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/>), la cartografía base fue construida a partir de información del programa *Natural Earth*, acceso <https://www.naturalearthdata.com/>. Conformada por Colombia, Venezuela, norte de Brasil, Surinam, Guayana y Guayana.

### 2.3. Validación estadística

La mayoría de los estudios de validación y/o calibración estadística publicados se basan en medidas globales de concordancias, utilizando pruebas estadísticas como la matriz de confusión (o matriz de error), el R<sup>2</sup> y métodos de mínimos cuadrados. Los modelos lineales de mínimos cuadrados subyacentes en dichos procesos de validación sólo son válidos si se cumplen las condiciones del teorema de Gauss-Markov (Ghasemi y Zahediasl, 2012; Limpert y Stahel, 2011; Stahl, 2014; Zuluaga et al., 2021). Las verificaciones rigurosas, usualmente elusivas en los estudios aplicados en teledetección, incluyen la varianza constante, normalidad y no correlación de los errores, así como la verificación de la linealidad y el análisis de los datos extremos, mal llamados *outliers* y que realmente deben estudiarse en un marco estadístico mayor que les clasifica como puntos influyentes y palanca (Valencia et al., 2016, 2020a).

Adicionalmente, otro aspecto crucial para la calibración y validación, así como la incertidumbre asociada, viene del diseño muestral. Un modelo de tamaño muestral óptimo incorporando la prevalencia a la omisión de los productos área quemada, ratificada en los estudios de Boschetti et al. (2019), Padilla et al. (2015, 2017), fue derivado e implementado en Valencia, et al. (2020b). Allí los autores encontraron la medida óptima de las zonas de validación requeridas en la región NHTSA, para que los resultados de la calidad de los productos de AQ fueran estadísticamente significativos.

#### 2.3.1. Validación de Área Quemada (AQ)

Según Valencia et al. (2020a) el producto de área quemada con mayor exactitud en la región NHTSA es el FireCCI5.0, para lo cual los autores utilizaron 35.480 áreas quemadas de referencia, obtenidas a partir del procesamiento de datos LANDSAT en 20 zonas WRS2. Allí, la verdad de campo (áreas quemadas de referencia) fueron construidas implementando un modelo híbrido que parte de

la generación de semillas utilizando del modelo BAMS en imágenes Landsat 5 y 7 (Bastarrica et al., 2014), e incluyendo el mascarado por nubes, sombras de nubes y agua obtenidas del modelo LEDAPS (Masek et al., 2006, 2013). En la Figura 1 se puede observar la distribución espacial de las 20 zonas de validación, utilizadas para validar las AQ, y también con dicha información de referencia fue construido el modelo de calibración de las emisiones como se verá en el apartado 2.5 de este artículo. Las regiones de validación corresponden a los polígonos enmarcados en la Figura 1 con una línea de color negro.

### 2.3.2. Validación de la Biomasa (B)

Con el número de estudios de biomasa en la zona de estudio recogidos en la Tabla 2, es importante establecer cuál de ellos tienen los valores de biomasa más parecidos con la realidad. Para esto, en la sección 1 y 2 del –Material suplementario– se presentan el proceso metodológico y los resultados de la validación de los mapas de biomasa de Saatchi, Baccini, Avitabile.

Allí se plantea el uso de una alternativa para hacer frente a la validación de datos no paramétricos, aplicando métodos de modelación robusta, resistentes a problemas de diagnóstico, como son: la técnica de Huber (donde el ajuste se realiza mediante un proceso iterativo de mínimos cuadrados con pesos) (Hampel et al., 1986, Huber y Ronchetti, 2009), o la implementación de la estimación  $M$  (puede ser considerada como una generalización de los de Máxima Verosimilitud), la cual corresponde al método de mínimas desviaciones absolutas, que tiene por objeto minimizar una suma con pesos de residuos absolutos (Koenker, 1994, 2005; Portnoy y Koenker, 1997). Igualmente, se implementó el modelo de mínimos cuadrados recortados, donde la regresión se realiza utilizando los valores no extremos del conjunto de datos, y considerando un

estimador de regresión con un punto de tolerancia alta para considerar el mayor número de datos extremos (Rousseeuw y Huber, 1997; Rousseeuw y Leroy, 2005), conjugando dicha técnica con la simulación *bootstrap* para obtener un método robusto que soporta conclusiones estadísticas con gran solidez.

## 2.4. Factores de emisión y eficiencia de quemado

Los factores de emisión y la eficiencia de quemado son obtenidas de ensayos de laboratorio o con mediciones en quemas controladas en campo, reportadas de otros estudios. En cualquier caso, estas dos variables son asociadas a la cobertura del suelo. En la Tabla 3 se presentan de forma resumida las características de información de coberturas del suelo, EQ, Ek, donde se seleccionó la leyenda del IGBP para asociar factores de emisión y eficiencia de quemado. Para ello fue necesario determinar las equivalencias entre leyendas de cada base de datos (Figura 2).

La información bibliográfica con estudios sobre los factores de emisión y de combustión (o también llamado eficiencia de quemado) en la región son precarios. Incluso la mayoría de los datos referenciados sobre estos dos elementos, corresponden a estudios realizados con vegetación de otras partes del mundo, las más cercanas corresponden a México y Brasil.

## 2.5. Emisiones e incertidumbre

Con el método de Seiler y Crutzen expuesto en las secciones 1.2, 2.2, y utilizando los resultados obtenidos en la validación expresada en MS-2, más los datos analíticos de la tabla anterior, se procedió con el cálculo de las emisiones de los gases CO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, y *Black Carbon*. Las 20 regiones

**Tabla 2.** Mapas de biomasa aérea (AGB) disponibles y con cobertura en la región tropical de América del Sur. Adaptado de Rodríguez-Veiga et al. (2017c).

Autor	Parámetro estudiado	Tamaño píxel	Cobertura temporal	Cobertura espacial	Sensores y modelo
(Anaya et al., 2009)	AGB	500 m	2001-2006	Colombia	MODIS/ Regresión
(Saatchi et al., 2011)	AGB	1 km	2011	Trópico	MODIS, SRTM/Max Ent
(Baccini et al., 2012)	AGB	463 m	2007-2008	Trópico	Modis, SRTM/ Random Forest
(Avitabile et al., 2015)	AGB	1 km	2000-2008	Trópico	Modis, SRTM/Fusión de datos

**Tabla 3.** Asignación de eficiencia de quemado y factores de emisión según el tipo de cobertura.

Variable	Nombre del dato	Periodo	Observación
Coberturas del suelo	Fueron analizados los productos globales GLOB Cover Land Cover Map, MODIS Land Cover L3 Global (MOD12), y GLC30	2000-2016	Para definir el mejor producto se hizo una revisión de la nomenclatura de las cubiertas del suelo, la cual debe coincidir con la información de factores de emisión y la eficiencia de quemado, a través de literatura en el tema de emisiones por biomasa. Igualmente se revisó la resolución espacial y temporal de los productos. Como resultado de este proceso se identificó que el producto más adecuado de momento en la región es el MODIS Land Cover L3 Global (MOD12) (Figura 1 sección B). El cual destaca por una leyenda unificada según el modelo IGBP. Adicionalmente su leyenda coincide con la información de los factores de emisión y de combustión, encontradas en la literatura. El producto GLOB Cover Land Cover Map, tiene una muy buena resolución espacial y temporal, además de un sistema de leyendas con 37 clases de coberturas. Pero estas últimas no coinciden en su totalidad con la información de estudios sobre EQ y Ek.
Factor de emisión (Ek)	Según clases encontradas en búsqueda bibliográfica. Se tuvieron en cuenta los informes del IGBP siguiendo el trabajo de (Akagi et al., 2011; Wiedinmyer et al., 2011)		Se refieren a la cantidad de gramos emitidos por kilogramo de materia seca consumida. Se consolidó a través de una revisión bibliográfica.
Eficiencia de quemado (EQ)	Según clases encontradas en búsqueda bibliográfica. Se tuvieron en cuenta los informes del IGBP siguiendo el trabajo de (Wiedinmyer et al., 2011)		Proporción de biomasa quemada en función del tipo de cobertura del suelo. Se consolidó a través de una revisión bibliográfica.

de validación expuestas en Valencia et al. (2020a, 2020b) con 35.480 cicatrices de incendios sirvieron para modelar e incorporar la incertidumbre del AQ según el tipo de cobertura y también aplicado sobre el cálculo de la emisión para cada una de las especies escogidas en el estudio. En la Figura 2 se puede observar el flujo de procesamiento aplicado sobre los datos, para obtener el inventario de emisiones de las especies mencionadas. Este flujo de procesamiento se utilizó tanto para estimar las emisiones con base en Fire CCI como para estimar las emisiones asociadas a sus errores de omisión y comisión.

La información de referencia con las 35.480 cicatrices de incendios, junto con la información de la omisión (Oe) y la comisión (Ce) del producto FireCCI5.0 fueron utilizadas para calibrar las medidas de las emisiones obtenidas del FireCCI5.0, mostrando la incertidumbre del proceso, tanto para el ajuste de los modelos como para su poder predictivo. Para ello se emplearon la mitad de las

áreas quemadas de referencia en la construcción de los modelos (muestra de entrenamiento), mientras que la otra mitad fue utilizada para evaluar el poder predictivo de los modelos (muestra de prueba).

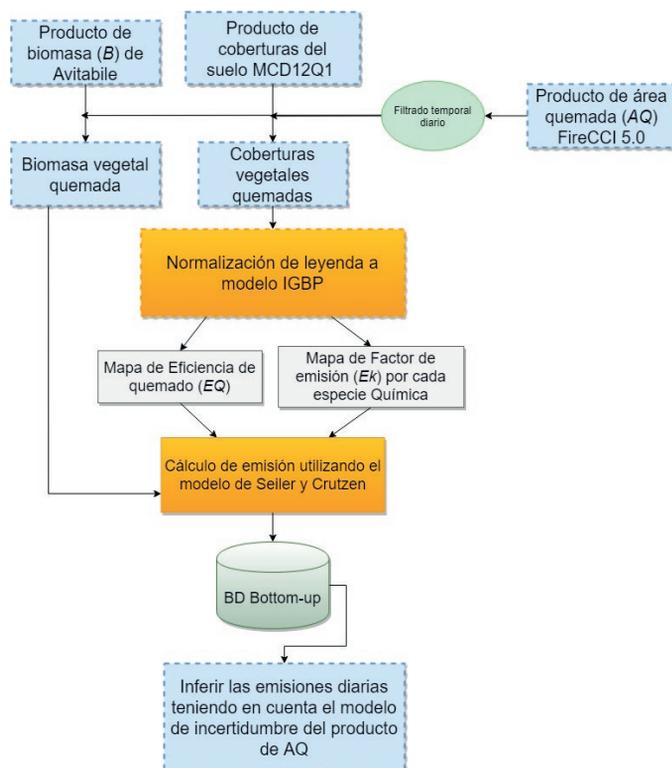
De la definición de los errores de Oe y Ce se tiene el modelo lineal (Ecuación 2) sin intercepto con parámetros Oe y Ce (medidos de 0 a 100):

Ecuación de calibración del Fire CCI5.0:

$$\text{Emisiones AQ FireCCI5.0} = \frac{(100 - Oe)}{(100 - Ce)} \times \text{Emisiones AQ LANDSAT} \quad (2)$$

Los casos extremos no triviales de este modelo son: en general, cuando Oe=Ce, las dos emisiones coinciden como debe ser. Si Oe es diferente de 0 y Ce=100 hay una indeterminación, que corresponde a una emisión 0 del FireCCI5.0.

Posteriormente se calculó el error relativo de la medida del FireCCI5.0 calibrado



**Figura 2.** Modelo conceptual para la estimación de emisiones *Bottom-up* y su incertidumbre.

respecto a la referencia obtenida por LANDSAT, en cada uno de los incendios inconexos. Con las  $35.480/2=17.740$  muestras de entrenamiento de LANDSAT y FireCCI5.0, se obtuvo un modelo lineal sin intercepto para cada una de las especies.

Las estimaciones de las pendientes de los modelos representan los factores requeridos de calibración del FireCCI5.0 a partir del LANDSAT. Con ello, cada estimación está acompañada de la calidad del ajuste y el poder predictivo de las muestras, así como los límites inferior y superior de los factores de calibración.

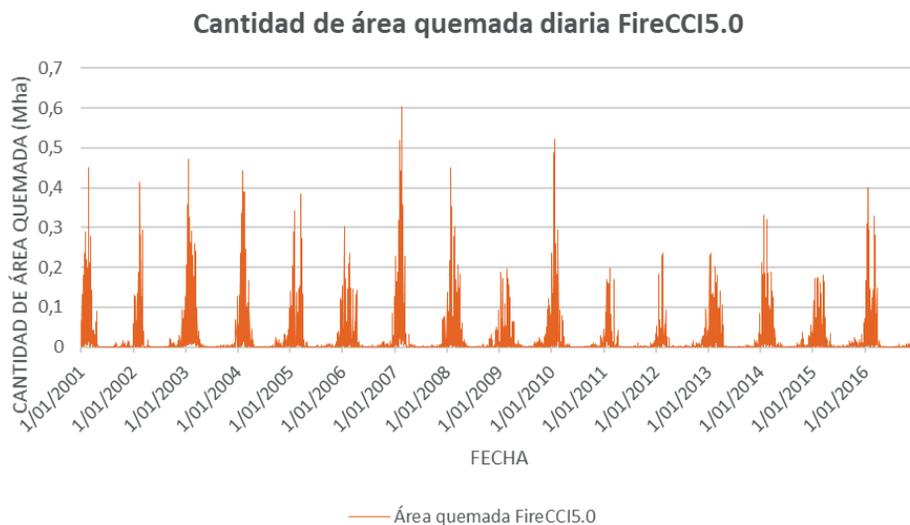
Los resultados de la cuantificación de las emisiones según el modelo de la Figura 2 fueron comparados con la información del producto GFED4s en el periodo comprendido entre los años 2001 y 2016. Para ello se presentan de manera gráfica dichos resultados y comparaciones, mediante series de tiempo de AQ, y las emisiones de cada una de las especies químicas incluidas en el estudio.

### 3. Resultados

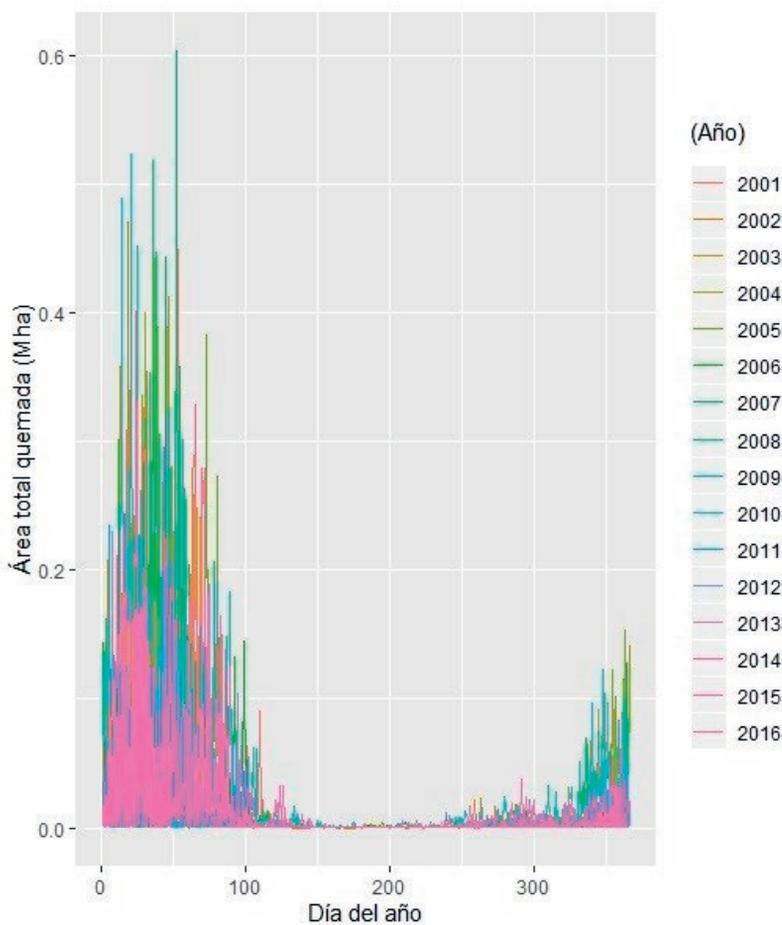
#### 3.1. Área total quemada (AQ)

Con el fin de observar las variaciones diarias de las quemadas, se generó una serie de tiempo con el comportamiento diario entre 2001 y 2016. A partir de esta información, se puede observar que el año 2007 presentó el día con la mayor cantidad de área quemada en la temporalidad del estudio. En la Figura 3 se aprecia un comportamiento unimodal en la serie de tiempo en los primeros días de cada año. El eje  $x$  representa los días de la serie de tiempo y el eje  $y$  representa la cantidad de AQ. Un análisis más detallado de este fenómeno se puede observar en la Figura 4, donde se observa la distribución multianual del valor del área quemada en el NHSA.

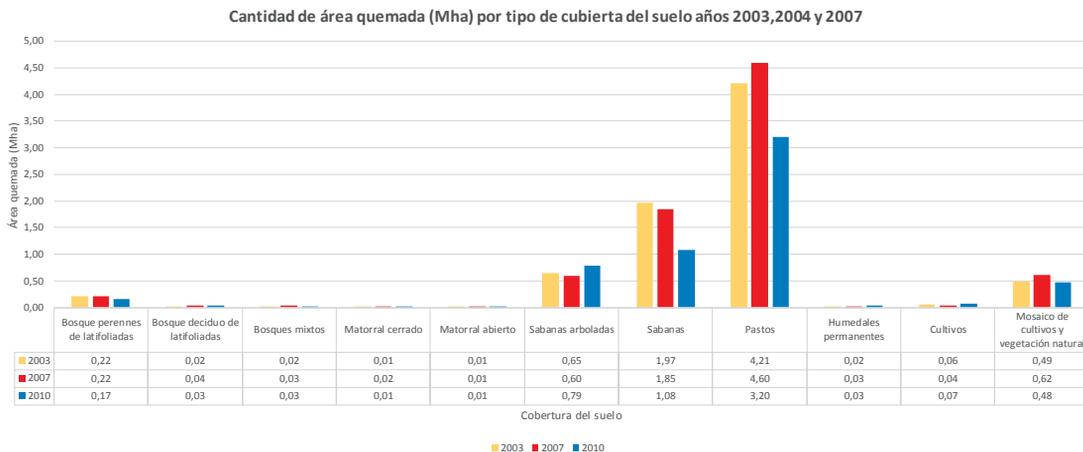
En la Figura 4, cada color está representado un año, el eje  $x$  representa los 365 días del año, y en el eje  $y$  se observa la cantidad de área quemada por día en Mha. En un análisis de su acumulado anual se aprecia que el año con la mayor cantidad de área quemada es el 2007 con 8,27 Mha, seguido



**Figura 3.** Cantidad de área quemada diaria en la región NHSA entre el 1 de enero de 2001 y el 31 de diciembre de 2016.



**Figura 4.** Comportamiento del área quemada diaria multianual en la región NHSA desde 2001 hasta 2016.



**Figura 5.** Coberturas del suelo con mayor incidencia de quemas en años 2003, 2007 y 2010.

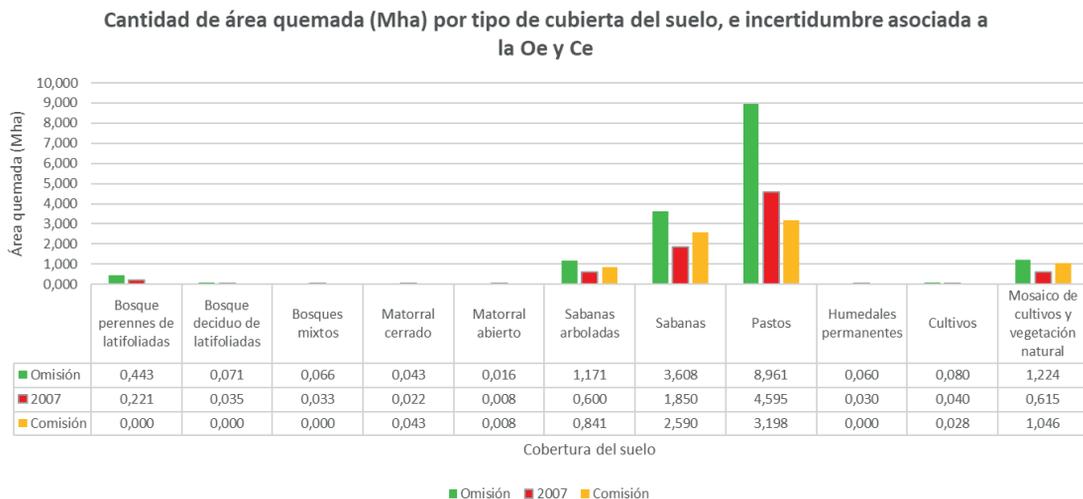
por 2003 con 7,83 Mha y 2004 con 7,71 Mha, el año con la menor cantidad de quema fue 2011 con 2,87 Mha.

En la Figura 5 se observa el comportamiento de las quemas de acuerdo con el tipo de cobertura afectada, tomando como referencia los 3 años con los mayores valores de AQ, según se observa en la Figura 7 a) y en la Tabla MS4 (años 2003, 2007 y 2010). En esta figura el eje x representa el tipo de cobertura del suelo tomando como base la leyenda IGBP, y el eje y representa la cantidad de AQ según los resultados del modelo FireCCI5.0. En la figura se observa el dominio de las quemas en coberturas pastos, sabanas y sabanas arboladas.

Sin embargo, en las coberturas bosques perennes de latifoliadas, mosaicos de cultivos de vegetación natural, bosques mixtos, bosques deciduos de latifoliadas, cultivos, humedales permanentes, matorrales cerrados y abiertos, en su orden, presentan también importantes aportes.

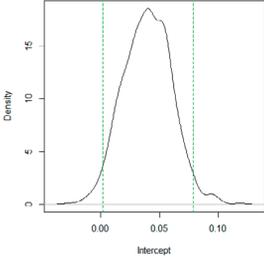
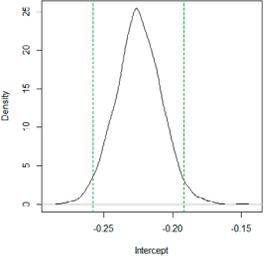
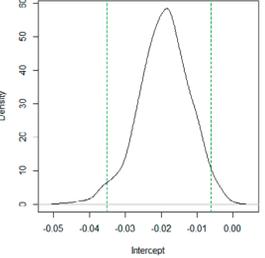
**3.1.1. Error en la estimación de área quemada en términos de cubierta del suelo**

Con la información de la incertidumbre de las 35.480 áreas quemadas de referencia, se generó un modelo que permite escalar el efecto del error del área quemada asociada al tipo de cobertura del suelo. Este modelo fue fundado en



**Figura 6.** Cantidad de área quemada, efecto de la omisión y la comisión de AQ, según tipo de cobertura del suelo.

**Tabla 4.** Validación de productos de biomasa utilizando pruebas con estadística robusta.

	Baccini	Saatchi	Avitabile
Hubber	-0.01205521 (intercepto) 0.84722852 (pendiente)	-0.0103080 (intercepto) 0.6856086 (pendiente)	-0.04724404 (intercepto) 0.89357874 (pendiente)
Regresión robusta LAD	-0.03452277 (intercepto) 0.93096521 (pendiente)	-0.06708527 (intercepto) 0.81619799 (pendiente)	-0.05171944 (intercepto) 0.90964825 (pendiente)
LTS	0.04182 (intercepto) 1.17565 (pendiente)	-0.2219 (intercepto) 1.0545 (pendiente)	-0.01792 (intercepto) 0.95490 (pendiente)
Densidades bootstrap con 100000 corridas para LTS			

el comportamiento aleatorio y no lineal de los productos cartográficos de AQ en la región de estudio, tal y como fue probado por Valencia et al (2020). Según los resultados del FireCCI5.0 el año 2007 presentó la mayor cantidad de quemas en la serie de tiempo multianual estudiada. En ese año se quemaron 8,27 Mha (Ver Figura 7a y Tabla MS4). En la Figura 6 se pueden apreciar las diferentes estimaciones de AQ, según el tipo de cobertura del suelo, incluyendo los valores de acuerdo, omisión (Oe) y comisión (Ce) obtenidas de la validación del producto FireCCI5.0.

En la Figura 6 se presenta la cantidad de AQ del año 2007, para cada una de las coberturas afectadas por los incendios, los acuerdos entre la información de referencia y Fire CCI 5.0 (barra roja), igualmente, se presentan las estimaciones de AQ teniendo en cuenta la Oe (barra verde) y la Ce (barra amarilla).

### 3.2. Validación biomasa

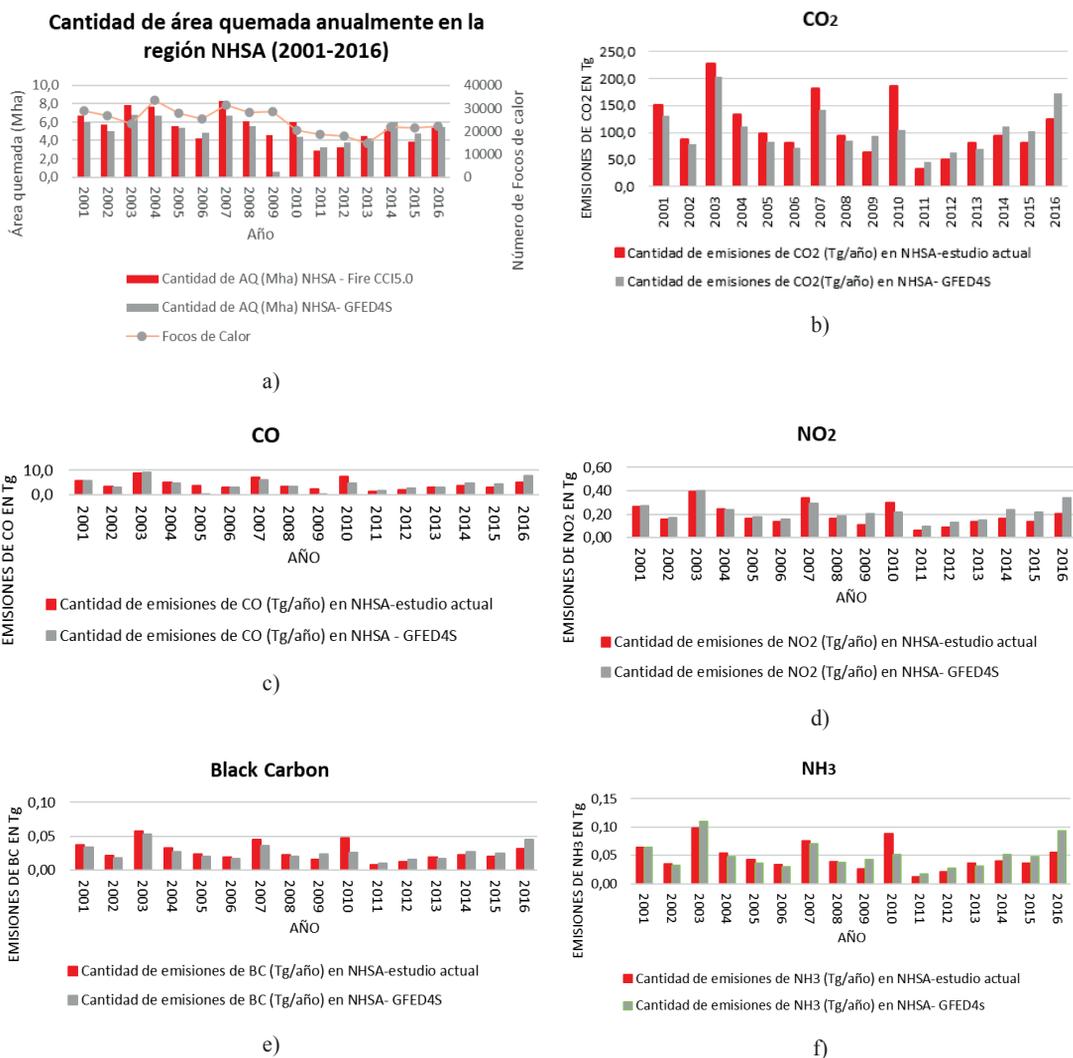
Dado que el comportamiento de los datos es no normal (ver procedimiento en apartado MS2-material suplementario), se procedió a validar utilizando otras pruebas como modelación robusta y mínimos cuadrados recortados sobre simulación *bootstrap*. La validación de dichas técnicas de teledetección ha sido ratificada en recientes trabajos de los autores Valencia et al. (2020a). En la Tabla 4 se presentan los resultados de las comparaciones no paramétricas realizadas.

Una verificación de estos modelos permitió identificar que el modelo más estable a lo largo del análisis es el modelo de Avitabile, mientras que los otros tuvieron una alta variación. Según el resultado de los mínimos cuadrados recortados sobre 1.000.000 simulaciones *Bootstrap*, el modelo de Avitabile explica con 95% de fiabilidad la información de referencia.

### 3.3. Estimación de la emisión de GEI Bottom-up

Con las variables explicativas ya definidas mediante el proceso de construcción y validación, se procedió a aplicar el modelo de Seiler y Crutzen para estimar las emisiones. Las variables que se escogieron para los cálculos según referencias bibliográficas recopiladas para esta investigación fueron: producto de AQ FireCCI5.0, producto de biomasa mapa de Avitabile, producto de coberturas del suelo MCD12Q1, factores de emisión y de combustión por cubierta.

En la Figura 7a se puede observar el comportamiento de las quemas de forma anual, durante toda la serie de tiempo, e incluyendo los resultados del GFED4s (van der Werf et al., 2017) para AQ, e incluyendo los focos de calor reportados en ese mismo estudio. En la Figura 7a se aprecia que en el periodo del estudio GFED 4s reportó 79,37 Mha, y el FireCCI 5.0 87,60 Mha, lo cual representa una diferencia de 8,23 Mha. De la Figura 7b a 7f se



**Figura 7.** Cantidad de área quemada, focos de calor y de emisiones anuales entre 2001 a 2016 en la región NHTA, a) cantidad de área b) emisiones de CO<sub>2</sub>, c) emisiones de CO, d) emisiones de NO<sub>2</sub>, e) emisiones de *Black Carbon* (BC) y f) emisiones de NH<sub>3</sub>.

puede apreciar el comportamiento de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, *Black Carbon* y NH<sub>3</sub>, con acumulación anual, entre los años 2001 a 2016. La barra de color roja representa la variación año a año de las emisiones calculadas por el método *bottom-up* propuesto en este trabajo. La barra gris representa el resultado de la emisión de la especie química según el modelo GFED4s.

En la Tabla MS4 del material suplementario se puede observar de forma resumida los resultados de las estimaciones año a año, obtenidas en el inventario construido en el presente estudio, y también según los resultados de GFED4s.

Para establecer la contribución del tipo de cubierta del suelo quemada en cada uno de los años con la emisión, se calculó el porcentaje de CO<sub>2</sub> generado por las quemadas, con periodicidad anual y basados en el producto MCD12Q1. En la Tabla 5 se puede observar el porcentaje de contribución de las coberturas más afectadas por las quemadas.

### 3.3.1. Incertidumbre

Al modelar la incertidumbre, según el procedimiento descrito en la sección 2.5, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 6.

**Tabla 5.** Contribución (en%) de cada tipo de cubierta del suelo en la cantidad total de CO<sub>2</sub> emitido, con periodicidad anual entre 2001 y 2016.

Año/ Cobertura	Bosque perennes de latifoliadas	Bosque deciduo de latifoliadas	Bosques mixtos	Sabanas arboladas	Sabanas	Pastos	Cultivos	Mosaico de vegetación natural	Otro
2001	6,51	2,08	3,06	31,21	31,79	9,23	3,36	11,44	1,31
2002	7,85	1,90	2,62	24,03	33,35	16,49	2,93	9,65	1,16
2003	12,88	2,38	2,05	33,34	27,89	6,86	2,26	11,78	0,55
2004	6,79	2,59	1,33	29,47	33,62	13,60	2,41	9,49	0,71
2005	3,11	2,84	1,51	36,25	29,27	12,46	4,10	9,74	0,72
2006	6,57	3,10	1,85	30,86	30,52	12,39	3,86	9,93	0,91
2007	16,57	2,00	3,00	25,94	28,90	10,37	2,35	9,99	0,86
2008	5,17	1,82	1,81	29,69	31,46	15,62	3,70	10,00	0,73
2009	3,64	2,30	2,18	29,54	28,73	17,46	4,45	10,58	1,12
2010	9,77	2,84	2,87	41,91	21,33	6,03	2,99	11,50	0,75
2011	6,22	1,48	1,79	22,96	27,14	28,04	3,50	7,74	1,13
2012	7,47	2,46	2,89	29,83	26,62	15,82	3,75	10,05	1,11
2013	4,30	3,40	1,57	36,57	28,25	12,29	4,23	8,56	0,82
2014	6,38	3,44	2,15	32,62	28,42	12,38	4,28	9,68	0,65
2015	9,06	3,57	2,48	34,42	23,09	12,67	3,75	9,94	1,03
2016	12,25	2,70	2,07	35,33	22,67	10,11	3,24	10,66	0,97

A manera de ilustración, en el caso del CO<sub>2</sub>, donde el resultado de las estimaciones en el año 2003 fue de 227,65 Tg, la calibración del FireCCI oscila entre un factor de 0,4347 y 1,4505 respecto a la referencia; es decir, la incertidumbre asociada

está entre un valor mínimo de 98,96 Tg CO<sub>2</sub> y 330,21 Tg CO<sub>2</sub>. La calidad del modelo ajustado y su poder predictivo se resume en un error relativo del 9,56% para la estimación superior y un 49,69% para la estimación inferior. Como los

**Tabla 6.** Estimación de los factores de calibración del FireCCI5.0 y análisis de la calidad del ajuste y poder predictivo de los modelos para las muestras de prueba y de entrenamiento del modelo.

Especie/RMSE	Estimación inferior	Referencia	Estimación superior
NH <sub>3</sub>	Estimación NH <sub>3</sub>	1	1,476
	RMSE Muestra entrenamiento		0,4999
	RMSE Muestra de prueba		0,4646
	Error relativo del RMSE de prueba y entrenamiento		0,07049
NO <sub>2</sub>	Estimación NO <sub>2</sub>	1	1,443
	RMSE Muestra entrenamiento		2,4394
	RMSE Muestra de prueba		2,1833
	Error relativo del RMSE de prueba y entrenamiento		0,105
CO	Estimación CO	1	1,4515
	RMSE Muestra entrenamiento		48,52
	RMSE Muestra de prueba		44,0708
	Error relativo del RMSE de prueba y entrenamiento		0,09166
<i>Black Carbon</i>	Estimación <i>Black Carbon</i>	1	1,4553
	RMSE Muestra entrenamiento		0,311
	RMSE Muestra de prueba		0,2837
	Error relativo del RMSE de prueba y entrenamiento		0,0876
CO <sub>2</sub>	Estimación CO <sub>2</sub>	1	1,4505
	RMSE Muestra entrenamiento		1348,645
	RMSE Muestra de prueba		1219,724
	Error relativo del RMSE de prueba y entrenamiento		0,0956

productos tienden a la omisión se observa una mayor significancia estadística justamente en la estimación superior, como es de esperarse. Los valores del RMSE de la muestra de prueba y de entrenamiento, sirven para observar la calidad del modelo tanto en el ajuste como en la predicción.

## 4. Discusión

### 4.1. Área quemada

Las quemas en la región de estudio presentan un comportamiento periódico. En la Figura 4 se aprecia que estas se originan principalmente a mediados de los meses de noviembre o diciembre, y se prolongan hasta mediados del mes de marzo o del mes de abril del siguiente año. Estas quemas representan más del 80% de las emisiones por incendios de biomasa en la región. De forma similar, evaluando el comportamiento multianual, se logró apreciar que el año 2009 presentó la mayor cantidad de días con registros de quemas, con 340 días con quemas, seguido de los años 2014, 2015, 2012, 2006, 2005 y 2010 con 325, 324, 312, 310, 308 y 258 días con quemas, respectivamente. En 2007 se dieron 298 días con quemas, en 2003 se dieron 287 días y en 2004 fueron 300. Ello demuestra que el número de días con quemas no refleja directamente la cantidad de área quemada en la región, ya que los años con mayor cantidad de área quemada en su orden fueron 2007, 2003 y 2004. Lo cual, por otro lado, presenta una mayor relación con el fenómeno de ENSO, ya que la presencia de este sí tuvo una alta relación con los años con mayor cantidad de área quemada dentro de la temporalidad del presente estudio.

En un comparativo con las cifras de AQ de la base de datos del proyecto GFED 4s, frente a la serie de tiempo de la actual investigación, se observan importantes variaciones. En la Figura 7a se aprecia que en el caso del modelo GFED4s, la mayor cantidad de AQ se dio en los años 2003 con 6,75 Mha, 2007 con 6,70 Mha y luego está el 2004 con 6,70 Mha. Por su parte el inventario obtenido del FireCCI5.0 y presentado en este estudio, presenta que los años con las mayores quemas son en su orden 2007 con 8,27 Mha de AQ, 2003 con 7,83 Mha y 2004 con 7,71 Mha. Si bien las tendencias mostradas en la Figura 7a son similares, hay una diferencia de 8,23 Mha quemadas, en toda la serie de tiempo.

Información más detallada puede ser visualizada en la Tabla MS4 (Material suplementario).

Las 87,60 Mha quemadas durante el periodo del estudio, estuvieron representadas en un 57% por pastos, 23% sabanas, 8% sabanas arboladas, 8% por suelos mixtos con cultivos y vegetación natural, 3% bosques perennes de latifoliadas, 0,5% cultivos, el restante 0,5% en el resto de los tipos de coberturas del suelo. Al incorporar la incertidumbre asociada al comportamiento de la validación de AQ, según el tipo de cobertura del suelo, se aprecia una alta omisión en todas las coberturas incluidas en el estudio, siendo mayor en las clases de bosque, en humedales permanentes. En las otras clases también predomina la omisión, pero tiene una compensación mayor respecto a la omisión. Esto, sumado al efecto de la deforestación en la región de estudio, no detectada por los sensores con los cuales se realizan los estudios de AQ, representa una subestimación de cada uno de los gases emitidos a la atmósfera, ya que precisamente las coberturas con los mayores índices de omisión son también importantes bancos de biomasa.

### 4.2. Validación de biomasa

La mayoría de los estudios sobre validación de los constituyentes de la ecuación de Seiler y Crutzen centran su atención en la variable de AQ o en cobertura del suelo (la cual es utilizada para relacionar las variables Ek y EQ), y poco centran su atención sobre la validación de la variable B.

En las publicaciones de Valencia et al. (2016), Valencia, et al. (2020a, 2020b), se describieron procedimientos de validación y calibración estocástica, haciendo referencia de la importancia de incluir en las investigaciones las pruebas de normalidad, para definir el comportamiento de los datos. Estos elementos fueron retomados en esta investigación, donde al aplicar un modelo de mínimos cuadrados, el mejor modelo de biomasa parecía ser el de Baccini, pero las pruebas de diagnóstico de la normalidad permitieron establecer que el comportamiento del fenómeno, según los datos de referencia, es no normal. Con lo cual, al aplicar de nuevo estadística robusta (sensibles a puntos extremos), el mejor producto de biomasa vegetal aérea pasó a ser el modelo de Avitabile. La inclusión de un producto con condiciones de calidad menores, al aplicar una validación

inadecuada, pueden llevar a la presentación de resultados estadísticamente no significativos.

En el estudio se encontraron abundantes datos de referencia en ecosistemas de bosque. En contraste, aquellos con las mayores transformaciones y con mayor incidencia de quemadas, como son los pastos y las sabanas de la región de la Orinoquía, los pastos de la región Caribe, y bosques en el Choco o la Amazonía de las Guyanas, tienen muy pocos estudios que pudieran servir para conocer la cantidad de biomasa y ser incluidos en una validación más robusta.

### 4.3. Emisiones

Los mayores valores diarios de CO<sub>2</sub> se dan en los años 2010, 2003, 2007, 2005 y 2016. Lo cual concuerda en su mayoría con la presencia del fenómeno climático ENSO. Según la cantidad de quemadas registradas el día con la mayor cantidad de área quemada fue reportada el 21 de febrero de 2007 con 0,6 Mha, lo que representó una emisión estimada de 16,7 millones de ton CO<sub>2</sub>/día. En cambio la fecha con la mayor cantidad de emisiones reportadas de CO<sub>2</sub>, fue el día 13 de febrero de 2010 donde se quemaron 0,3 Mha de vegetación, lo que representó una emisión estimada de 17,9 Millones de ton CO<sub>2</sub>/día. En ambas fechas, y a lo largo de la serie de tiempo, se encontró que los ecosistemas con más incendios son los pastos y las sabanas de la región de la Orinoquía, seguido por los pastos de la región Caribe de Colombia, y por último los bosques Amazónicos de Colombia y de las Guyanas.

De la Figura 7b a 7f se observa el comportamiento de las emisiones estimadas y también las reportadas por el modelo GFED4s, donde se observa un cambio en el orden debido a la cantidad de emisiones. Los años con mayor cantidad de emisiones, son en su orden 2003 con 227,65 Tg CO<sub>2</sub>, 8,94 Tg CO, 0,39 Tg NO<sub>2</sub>, 0,06 Tg BC, y 0,1 Tg de NH<sub>3</sub>; 2010 con 186,21 Tg CO<sub>2</sub>, 7,38 Tg CO, 0,30 Tg NO<sub>2</sub>, 0,05 Tg BC, y 0,09 Tg de NH<sub>3</sub>; 2007 con 181,43 Tg CO<sub>2</sub>, 6,18 Tg CO, 0,34 Tg NO<sub>2</sub>, 0,05 Tg BC, y 0,08 Tg de NH<sub>3</sub>. Luego está el año 2001 con 150,68 Tg CO<sub>2</sub>, 5,76 Tg CO, 0,26 Tg NO<sub>2</sub>, 0,03 Tg BC, y 0,06 Tg de NH<sub>3</sub>. Los años con los mayores valores de emisión están apalancados por la influencia de las quemadas en los ecosistemas en bosque. Por ello como se observa en la Figura 6, los

años 2003, 2010 y 2007 presentan las emisiones más altas del periodo del estudio. Si bien las tendencias en los valores de esta investigación son similares a las del GFED4s, se observa un cambio en la tendencia de los valores de emisiones del GFED desde el año 2011, año en el que de forma paralela se inicia el funcionamiento de VIIRS, con lo cual, la incorporación de los focos de calor genera un efecto en la estimación de las emisiones, en dicho modelo.

Los resultados presentados en la Tabla 6 muestran que los años con mayor cantidad de emisiones, se ven altamente influenciados por una mayor alteración con las quemadas en la cobertura bosques perennes de latifoliadas, ya que este tipo de cobertura puede albergar en la región según la información de biomasa, valores de hasta 490 Mg C/ha. Adicionalmente, se observa en la misma tabla de resultados, que los ecosistemas de sabanas, sabanas arboladas, y pastos, son responsables en promedio de cerca del 70% de las emisiones de CO<sub>2</sub> en periodo de estudio. Luego encontramos los mosaicos de cultivos y vegetación natural con cerca del 10% de las emisiones.

Tomando como referencia de análisis el año 2007, se puede establecer que se generaron 181,43 Tg de emisiones de CO<sub>2</sub> por las quemadas de biomasa durante dicho año. Al relacionar la contribución de las emisiones generadas, se encontró que la cobertura de sabana fue responsable del 29% de las emisiones de dicho GEI. A continuación encontramos que las quemadas en cobertura del suelo de sabana arbolada es responsable del 26% de las emisiones, seguido de los bosques perennes de latifoliadas con 16,6%, los pastos con 10,3%, el mosaico de cultivos y vegetación natural con 10%, bosques mixtos 3%, y por último los otros tipos de cobertura distribuyéndose el restante 5,1% de las emisiones. Al relacionar estos resultados con la información del área quemada, se encuentra una inconsistencia en estos resultados, dado que los pastos representan el 57% de las quemadas en la región, pero el resultado de la emisión no es equivalente, ya que existen superficies en pastos, que fueron quemadas, pero en la cuantificación de las emisiones tienen valores de 0, ya que el producto de biomasa tiene valores de 0.

#### 4.3.1. Incertidumbre

En todas las especies se observa que el límite superior del factor de calibración del FireCCI5.0

duplica la información de la referencia (LANDSAT) (ver Tabla 6). Pero el valor estimado que se utilizó para la calibración oscila entre el 42 y 48% para todas las especies. La incertidumbre asociada a dicha estimación la describe la calidad del ajuste y el poder predictivo de los modelos (Error relativo del RMSE); es decir en todas las especies la incertidumbre asociada está entre el 7 y el 11%, valor de importante significancia estadística.

Los resultados para la calibración inferior del FireCCI5.0 muestran un límite mínimo de muy baja calidad (3%). La estimación que se emplea para la calibración inferior depende de cada especie, pero se encuentra entre 40 y 44%. No obstante, las incertidumbres medidas de la calidad del ajuste y la predicción, de esas estimaciones fluctúan notablemente en las especies desde el 4% en el  $\text{NH}_3$  hasta un 69% en el  $\text{NO}_2$ .

Reuniendo los dos análisis anteriores se observa que la menor incertidumbre se da en la estimación del factor de calibración superior del FireCCI5.0, aspecto que justamente es requerido para completar adecuadamente la omisión usual de los productos de AQ. En otras palabras, la calibración que más significancia estadística tiene en este trabajo es justamente la que menor incertidumbre tiene.

## 5. Conclusiones

En la investigación se mostró la alta relación del aumento en las emisiones con la incidencia de ENSO. En total se quemaron en la región 87,60 Mha, representadas en un 57% por pastos, 23% sabanas, 8% sabanas arboladas, 8% por suelos mixtos con cultivos y vegetación natural, 3% bosques perennes de latifoliadas, 0,5% cultivos, el restante 0,5% en el resto de los tipos de coberturas del suelo. Los años con mayor cantidad de emisiones son en su orden 2003 con 227,65 Tg  $\text{CO}_2$ , 8,94 Tg CO, 0,39 Tg  $\text{NO}_2$ , 0,06 Tg BC, y 0,1 Tg de  $\text{NH}_3$ ; 2010 con 186,21 Tg  $\text{CO}_2$ , 7,38 Tg CO, 0,30 Tg  $\text{NO}_2$ , 0,05 Tg BC, y 0,09 Tg de  $\text{NH}_3$ ; 2007 con 181,43 Tg  $\text{CO}_2$ , 6,18 Tg CO, 0,34 Tg  $\text{NO}_2$ , 0,05 Tg BC, y 0,08 Tg de  $\text{NH}_3$ , luego está el año 2001 con 150,68 Tg  $\text{CO}_2$ , 5,76 Tg CO, 0,26 Tg  $\text{NO}_2$ , 0,03 Tg BC, y 0,06 Tg de  $\text{NH}_3$ . Las emisiones totales y promedio en el periodo de estudio fueron en su orden 1760 Tg  $\text{CO}_2$  (promedio 110 Tg), 68,12 Tg de CO (promedio 4,26 Tg),

3,05 Tg de  $\text{NO}_2$  (promedio 0,19 Tg), 0,76 Tg de  $\text{NH}_3$  (promedio 0,05 Tg), 0,44 Tg de *Black Carbon* (promedio de 0,03 Tg).

En este estudio se presenta una serie de etapas para incorporar la validación en los ejercicios de estimación de las emisiones. Por ello, a continuación, se presenta un protocolo para la calibración del FireCCI5.0 respecto a la referencia, y la posterior estimación de la correspondiente incertidumbre en la estimación de la emisión:

1. Diseño muestral óptimo derivado los estudios de omisión en el área de interés (ver Valencia, et al., 2020a, 2020b).
2. Incluir la topología y la dinámica representada en los incendios inconexos, como alternativa a las dificultades que presentan los elementos de la matriz de error globales.
3. Construcción del modelo de calibración desde una muestra de entrenamiento con la mitad de los incendios inconexos.
4. Verificación del poder predictivo de los modelos usando la otra mitad de incendios inconexos como muestra de prueba.
5. Determinación de la calidad del ajuste y del poder predictivo para definir la incertidumbre de la calibración del FireCCI5.0.

Es necesaria la incorporación de diagnósticos que permitan establecer el comportamiento de los datos, dentro del proceso de validación. Esto se justifica teniendo en cuenta que aplicar regresión lineal o mínimos cuadrados sin las pruebas de diagnóstico, puede llevar a presentar conclusiones erróneas. En la presente investigación se hace referencia a esto, y se presentan pruebas rigurosas para datos no paramétricos, como los que se presentan en muchos fenómenos naturales.

Es necesario profundizar los estudios sobre biomasa vegetal aérea en aquellos ecosistemas con mayor incidencia de quemaduras en la región NHSA, ya que durante esta investigación se encontraron errores en datos de referencia para validar sobre pastos y sabanas de la Orinoquía, pastos en la región Caribe, y bosques en el Choco geográfico, los mismos que en bosques de las Guayanas.

De igual forma, es necesario ampliar los estudios sobre factores de emisión y de eficiencia de quemado de vegetación en la región. Incluso sería ideal hacer los estudios de la vegetación presente en la región con tecnología que permita construir

los factores antes mencionados, pero sin alterar las condiciones ambientales del sitio de presencia de la vegetación, ya que con variaciones en la humedad también se generan cambios en las condiciones de los elementos arrojados a la atmósfera. No es lo mismo las condiciones en laboratorio que en el ambiente.

El cambio de paradigma sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> en las regiones tropicales del planeta, donde son presentadas como grandes generadores de cambio climático, debido al aumento en las concentraciones de CO<sub>2</sub> según estudio referenciado por Buis (2019), puede deberse al efecto de la omisión en la detección de los productos de AQ en coberturas en bosques, humedales, pastos y suelos mixtos con grandes transformaciones desde el año 2014. También confluye un aumento en la tasa de deforestación en zonas con dificultades tecnológicas para la detección del cambio en la cubierta del suelo, debido a la alta nubosidad la mayor parte del año, como la que se da en la región de la Amazonía, la cordillera de los Andes y el Pacífico colombiano, tal y como fue reportado por Anaya et al. (2015).

En el estudio se pudo comprobar la relación existente entre las emisiones y el fenómeno de ENSO. Igualmente, se pudo evidenciar la existencia de una mayor afectación a la atmósfera por las emisiones arrojadas por las quemaduras de biomasa en dicho periodo. Este aspecto se pudo constatar en los años con prevalencia del fenómeno ENSO observando más afectación de los bosques perennes de latifoliados y un considerable aumento en emisiones en la región. Estos resultados merecen ser estudiados con mayor detalle al estar relacionado con el ciclo de carbono, y evaluar el equilibrio del mismo, relacionando los sumideros de carbono representados en cada cobertura del suelo y los cálculos de emisiones de carbono, obtenidos en la presente investigación.

Este estudio debe servir más adelante para establecer el efecto de las emisiones sobre el cambio climático y la calidad del aire en otros lugares. Ya que la emisión generada no se queda confinada en el lugar de la quema, sino que a través del aire los elementos emitidos a la atmósfera se desplazan por el planeta, llegando a centros poblados, y generando también un importante efecto sobre la variabilidad del clima regional y global. En el caso de las emisiones de material particulado fino

por ejemplo, podrían ser estudiadas a través de un modelo de transporte, acompañado de una caracterización del material particulado en la época de las quemaduras en la región, utilizando las transformaciones químicas del NH<sub>3</sub>, sirviendo como trazador.

## Material suplementario

El material suplementario se encuentra disponible en: [https://polipapers.upv.es/public/journals/27/15594\\_supp\\_file.pdf](https://polipapers.upv.es/public/journals/27/15594_supp_file.pdf)

## Agradecimientos

Queremos agradecer a la Universidades de San Buenaventura a través de sus programas de Especialización en Sistemas de Información Geográfica y Maestría en Geoinformática, a la Universidad de Medellín a través de su Doctorado en Ingenierías y el Doctorado en Modelamiento y Ciencia Computacional. Igualmente damos gracias a Colciencias por su importante aporte para apoyar la formación de investigadores a un alto nivel, con su programa de Becas Colciencias-Programa Doctoral convocatoria 567, código PDBCNAL71331711. Finalmente, al Doctor Emilio Chuvieco de la Universidad de Alcalá de Henares, y a todo su equipo de investigadores, por el desarrollo del modelo FireCCI, al igual que al programa COPERNICUS por su aporte a la humanidad con el estudio de las variables esenciales de cambio climático.

## Referencias

- Abril-Salcedo, D. S., Melo-Velandia, L. F., Parra-Amado, D. 2020. Nonlinear relationship between the weather phenomenon El Niño and Colombian food prices. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 64(4), 1059–1086. <https://doi.org/10.1111/1467-8489.12394>
- Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Wiedinmyer, C., Alvarado, M. J., Reid, J. S., Karl, T., ... Wennberg, P. O. 2011. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(9), 4039–4072. <https://doi.org/10.5194/acp-11-4039-2011>

- Anaya, J. A., Chuvieco, E. 2010. Accuracy assessment of burned area products in the Orinoco basin. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference 2010: Opportunities for Emerging Geospatial Technologies*, 1(1), 8–17.
- Anaya, J. A., Chuvieco, E., Palacios-Orueta, A. 2009. Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. *Forest Ecology and Management*, 257(4), 1237–1246. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.11.016>
- Anaya, J. A., Colditz, R. R., Valencia, G. 2015. Land Cover Mapping of a Tropical Region by Integrating Multi-Year Data into an Annual Time Series. *Remote Sensing*, 7(12), 16274–16292. <https://doi.org/10.3390/rs71215833>
- Anderson, B. E., Grant, W. B., Gregory, G. L., Browell, E. V., Collins, J. E., Sachse, G. W., ... Blake, N. J. 1996. Aerosols from biomass burning over the tropical South Atlantic region: Distributions and impacts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D19), 24117–24137. <https://doi.org/10.1029/96JD00717>
- Andreae, M. 1991. Biomass burning: its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In J. Levine (Ed.), *MIT Press* (pp. 3–21). Cambridge.
- Andreae, M. O., Merlet, P. 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(4), 955–966. <https://doi.org/10.1029/2000GB001382>
- Avitabile, V., Herold, M., Heuvelink, G. B. M., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Asner, G. P., ... Willcock, S. 2016. An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. *Global Change Biology*, 22(4), 1406–1420. <https://doi.org/10.1111/gcb.13139>
- Avitabile, V., Camia, A. 2018. An assessment of forest biomass maps in Europe using harmonized national statistics and inventory plots. *Forest Ecology and Management*, 409(November 2017), 489–498. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.047>
- Baccini, a., Goetz, S. J., Walker, W. S., Laporte, N. T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., ... Houghton, R. a. 2012. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Clim. Change*, 2(3), 182–185. <https://doi.org/10.1038/nclimate1354>
- Baede, A., van der Linden, P., Verbruggen, A. 2007. Annex to IPCC Fourth Assessment Report. *IPCC Fourth Assessment Report*, 75–104. Retrieved from [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_appendix.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_appendix.pdf)
- Bastarrrika, A., Alvarado, M., Artano, K., Martinez, M. P., Mesanza, A., Torre, L., ... Chuvieco, E. 2014. BAMS: A Tool for Supervised Burned Area Mapping Using Landsat Data. *Remote Sensing*, 6, 12360–12380. <https://doi.org/10.3390/rs61212360>
- Bauduin, S., Clarisse, L., Theunissen, M., George, M., Hurtmans, D., Clerbaux, C., Coheur, P. F. 2017. IASI's sensitivity to near-surface carbon monoxide (CO): Theoretical analyses and retrievals on test cases. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 189, 428–440. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.12.022>
- BBC. 2019. Amazon fires increase by 84% in one year - space agency - BBC News. *BBC*. Retrieved from <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-49415973>
- Boschetti, L., Roy, D. P., Giglio, L., Huang, H., Zubkova, M., Humber, M. L. 2019. Global validation of the collection 6 MODIS burned area product. *Remote Sensing of Environment*, 235(October), 111490. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111490>
- Brown, K. 2017. NASA Pinpoints Cause of Earth's Recent Record Carbon Dioxide Spike. *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*. Retrieved from <http://www.nasa.gov/press-release/nasa-pinpoints-cause-of-earth-s-recent-record-carbon-dioxide-spike>
- Buis, A. 2019. The Atmosphere: Getting a Handle on Carbon Dioxide – Climate Change: Vital Signs of the Planet. Retrieved December 6, 2020, from <https://climate.nasa.gov/news/2915/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/>
- Chave, J., Davies, S. J., Phillips, O. L., Lewis, S. L., Sist, P., Schepaschenko, D., ... Saatchi, S. 2019. Ground Data are Essential for Biomass Remote Sensing Missions. *Surveys in Geophysics*, 40(4), 863–880. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09528-w>
- Christen, A. 2014. Atmospheric measurement techniques to quantify greenhouse gas emissions from cities. *Urban Climate*, 10, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.04.006>
- Chuvieco, E., Mouillot, F., van der Werf, G. R., San Miguel, J., Tanasse, M., Koutsias, N., ... Giglio, L. 2019. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sensing of Environment*, 225(November 2018), 45–64. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.013>
- Chuvieco, E., Opazo, S., Sione, W., Del Valle, H., Anaya, J., Di Bella, C., ... Libonati, R. 2008. Global burned-land estimation in Latin America using MODIS composite data. *Ecological Applications*, 18(1), 64–79. <https://doi.org/10.1890/06-2148.1>

- Clerbaux, C., Hadji-Lazaro, J., Turquety, S., George, M., Boynard, A., Pommier, M., ... Van Damme, M. 2015. Tracking pollutants from space: Eight years of IASI satellite observation. *Comptes Rendus - Geoscience*, 347(3), 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2015.06.001>
- Crutzen, P. J., Andreae, M. O. 1990. Biomass Burning in the Tropics: Impact on Atmospheric Chemistry and Biogeochemical Cycles. *Science*, 250(4988), 1669–1678. <https://doi.org/10.1126/science.250.4988.1669>
- Dammers, E., Palm, M., Van Damme, M., Vigouroux, C., Smale, D., Conway, S., ... Erisman, J. W. 2016. An evaluation of IASI-NH<sub>3</sub> with ground-based Fourier transform infrared spectroscopy measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(16), 10351–10368. <https://doi.org/10.5194/acp-16-10351-2016>
- Doria-Argumedo, C., Fagundo-Castillo, J. R. 2017. Caracterización química de material particulado fracción respirable Pm10 en la atmósfera de Riohacha - La Guajira Colombia. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 17(1), 5–16. <https://doi.org/10.19053/1900771x.v17.n1.2017.4645>
- Edwards, D. P., Emmons, L. K., Hauglustaine, D. a., Chu, D. a., Gille, J. C., Kaufman, Y. J., ... Drummond, J. R. 2004. Observations of carbon monoxide and aerosols from the Terra satellite: Northern Hemisphere variability. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 109(24), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2004JD004727>
- EPA. 2019a. Basic Information of Air Emissions Factors and Quantification.
- EPA. 2019b. Basic Information of Air Emissions Factors and Quantification, 2017–2019. Retrieved from <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/basic-information-air-emissions-factors-and-quantification>
- Evangelidou, N., Balkanski, Y., Eckhardt, S., Cozic, A., Van Damme, M., Coheur, P. F., ... Hauglustaine, D. 2021. 10-Year Satellite-Constrained Fluxes of Ammonia Improve Performance of Chemistry Transport Models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(6), 4431–4451. <https://doi.org/10.5194/acp-21-4431-2021>
- Freitas, S. R., Longo, K. M., Alonso, M. F., Pirre, M., Marecal, V., Grell, G., ... Sánchez-Gácita, M. 2011. PREP-CHEM-SRC – 1.0: a preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models. *Geoscientific Model Development*, 4(2), 419–433. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-419-2011>
- Fry, M. M., Naik, V., West, J. J., Schwarzkopf, M. D., Fiore, A. M., Collins, W. J., ... Zeng, G. 2012. The influence of ozone precursor emissions from four world regions on tropospheric composition and radiative climate forcing. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117(7), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2011JD017134>
- Galloway, J. N., Aber, J. D., Erisman, J. W., Seitzinger, S. P., Howarth, R. W., Cowling, E. B., Cosby, B. J. 2003. The Nitrogen Cascade. *BioScience*, 53(4), 341. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0341:TNC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2)
- Ghasemi, A., Zahediasl, S. 2012. Normality tests for statistical analysis: A guide for non-statisticians. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 10(2), 486–489. <https://doi.org/10.5812/ijem.3505>
- Giglio, L., Csizar, I., Justice, C. O. 2006. Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors. *Journal of Geophysical Research*, 111(July 1996), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2005JG000142>
- Giglio, L., Randerson, J. T., Van Der Werf, G. R. 2013. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(1), 317–328. <https://doi.org/10.1002/jgrg.20042>
- Gray, E. 2019. Satellite Data Record Shows Climate Change's Impact on Fires. Retrieved December 6, 2020, from <https://climate.nasa.gov/news/2912/satellite-data-record-shows-climate-changes-impact-on-fires/>
- Hampel, F. R., Ronchetti, E. M., Rousseeuw, P. J., Stahel, W. A. 1986. *Robust Statistics: The Approach Based on Influence Functions*. (J. W. & Sons, Ed.). New York.
- Hooghiemstra, P. B., Krol, M. C., Van Leeuwen, T. T., Van Der Werf, G. R., Novelli, P. C., Deeter, M. N., ... & Röckmann, T. 2012. Interannual variability of carbon monoxide emission estimates over South America from 2006 to 2010. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D15), 1–25. <https://doi.org/10.1029/2012JD017758>
- Huber, P. J., Ronchetti, E. M. 2009. *Robust Statistics*. (Wiley, Ed.) (2nd ed.). <https://doi.org/10.1002/9780470434697>
- IPCC. 2018. *IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C*. *Ipcc - Sr15*. Retrieved from <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>

- Jaffe, L. S. 1968. Ambient carbon monoxide and its fate in the atmosphere. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 18(8), 534–540. <https://doi.org/10.1080/00022470.1968.10469168>
- Janssens-Maenhout, G., Dentener, F., Aardenne, J. Van, Monni, S., Pagliari, V., Orlandini, L., ... Keating, T. 2012. *EDGAR-HTAP: a harmonized gridded air pollution emission dataset based on national inventories*. ... Office, Ispra (Italy). <https://doi.org/10.2788/14102>
- Janssens-Maenhout, G., Petrescu, A. M. R., Muntean, M., Blujdea, V. 2011. Verifying Greenhouse Gas Emissions: Methods to Support International Climate Agreements. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, 1(2), 132–133. <https://doi.org/10.1080/20430779.2011.579358>
- Jones, M. W., Smith, A., Betts, R., Canadell, J. G., Prentice, I. C., Le Quéré, C. 2020. Climate change increases the risk of wildfires. *Rapid Response Review*, (March 2013), 2013–2015. Retrieved from <https://sciencebrief.org/briefs/wildfires>
- Kaiser, J. W., Heil, a., Andreae, M. O., Benedetti, a., Chubarova, N., Jones, L., ... Van Der Werf, G. R. 2012. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. *Biogeosciences*, 9(1), 527–554. <https://doi.org/10.5194/bg-9-527-2012>
- Koenker, R. 1994. Confidence Intervals for Regression Quantiles. In P. Mandl & M. Hušková (Eds.), *Asymptotic Statistics* (pp. 349–359). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-57984-4\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-642-57984-4_29)
- Koenker, R. W. 2005. *Quantile Regression*. (Cambridge University Press, Ed.). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754098>
- Kumar, S. S., Hult, J., Picotte, J., Peterson, B. 2020. Potential underestimation of satellite fire radiative power retrievals over gas flares and wildland fires. *Remote Sensing*, 12(2), 10–14. <https://doi.org/10.3390/rs12020238>
- Lamarque, J. F., Bond, T. C., Eyring, V., Granier, C., Heil, a., Klimont, Z., ... Van Vuuren, D. P. 2010. Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: Methodology and application. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(15), 7017–7039. <https://doi.org/10.5194/acp-10-7017-2010>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.047>
- Lees, K. J., Quaife, T., Artz, R. R. E., Khomik, M., Clark, J. M. 2018. Potential for using remote sensing to estimate carbon fluxes across northern peatlands – A review. *Science of the Total Environment*, 615, 857–874. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.103>
- Levine, J. S., Cofer III, W. R., Pinto, J. P. 2001. Chapter 14. Biomass Burning. In *Atmospheric methane: source, sinks, and role in Global Change* (Vol. 113, pp. 299–313). NATO ASI series. Retrieved from <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/BiomassBurning/>
- Libonati, R., DaCamara, C., Setzer, A. W., Morelli, F., Melchiori, A. E., Cândido, P. de A., Jesús, S. C. de. 2015. Validating MODIS burned area products over Cerrado region. In *XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR* (pp. 6381–6388).
- Limpert, E., Stahel, W. A. 2011. Problems with using the normal distribution - and ways to improve quality and efficiency of data analysis. *PLoS ONE*, 6(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021403>
- Liu, Y. Y., van Dijk, A. I. J. M., de Jeu, R. a M., Canadell, J. G., McCabe, M. F., Evans, J. P., Wang, G. 2015. Recent reversal in loss of global terrestrial biomass. *Nature Climate Change*, 5(May), 1–5. <https://doi.org/10.1038/nclimate2581>
- Löndahl, J., Swietlicki, E., Lindgren, E., Loft, S. 2010. Aerosol exposure versus aerosol cooling of climate: What is the optimal emission reduction strategy for human health? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(19), 9441–9449. <https://doi.org/10.5194/acp-10-9441-2010>
- Longo, K. M., Freitas, S. R., Andreae, M. O., Setzer, a., Prins, E., Artaxo, P. 2010. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 2: Model sensitivity to the biomass burning inventories. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(13), 5785–5795. <https://doi.org/10.5194/acp-10-5785-2010>
- Malhi, Y., Rowland, L., Aragão, L. E. O. C., Fisher, R. A. 2018. New insights into the variability of the tropical land carbon cycle from the El Niño of 2015/2016. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1760). <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0298>
- Masek, J., Vermote, E. F., Saleous, N. E., Wolfe, R., Hall, F. G., Huemmrich, K. F., ... Lim, T. 2006. A Landsat Surface Reflectance Dataset for North America, 1990–2000. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1), 68–72. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.857030>

- Masek, J., Vermote, E. F., Saleous, N., Wolfe, R., Hall, F. G., Huemmrich, F., ... Lim, T. K. 2013. LEDAPS Calibration, Reflectance, Atmospheric Correction Preprocessing Code. *Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center*. Tennessee, U.S.A. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1146>
- Mavroidis, I., Chaloulakou, a. 2011. Long-term trends of primary and secondary NO<sub>2</sub> production in the Athens area. Variation of the NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio. *Atmospheric Environment*, 45(38), 6872–6879. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.006>
- Melton, J. R., Wania, R., Hodson, E. L., Poulter, B., Ringeval, B., Spahni, R., ... Kaplan, J. O. 2012. Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: conclusions from a model intercomparison project (WETCHIMP). *Biogeosciences Discussions*, 9(8), 11577–11654. <https://doi.org/10.5194/bgd-9-11577-2012>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.01.011>
- Monks, P. S., Granier, C., Fuzzi, S., Stohl, A., Williams, M. L., Akimoto, H., ... von Glasow, R. 2009. Atmospheric composition change - global and regional air quality. *Atmospheric Environment*, 43(33), 5268–5350. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.021>
- Moreira, D. S., Freitas, S. R., Bonatti, J. P., Mercado, L. M., Rosário, N. M. É., Longo, K. M., ... Gatti, L. V. 2013. Coupling between the JULES land-surface scheme and the CCATT-BRAMS atmospheric chemistry model (JULES-CCATT-BRAMS1.0): applications to numerical weather forecasting and the CO<sub>2</sub> budget in South America. *Geoscientific Model Development*, 6(4), 1243–1259. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1243-2013>
- Mouillot, F., Schultz, M. G., Yue, C., Cadule, P., Tansey, K., Ciais, P., Chuvieco, E. 2014. Ten years of global burned area products from spaceborne remote sensing-A review: Analysis of user needs and recommendations for future developments. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26(1), 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.014>
- Opazo, S., Chuvieco, E. 2013. Análisis geográfico de áreas quemadas en Sudamérica. *Geofocus*, 13(2), 1–24. <https://doi.org/10.1104/pp.104.051110.3582>
- Padilla, M., Olofsson, P., Stehman, S. V., Tansey, K., Chuvieco, E. 2017. Stratification and sample allocation for reference burned area data. *Remote Sensing of Environment*, 203, 240–255. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.041>
- Padilla, M., Stehman, S. V., Chuvieco, E. 2014. Validation of the 2008 MODIS-MCD45 global burned area product using stratified random sampling. *Remote Sensing of Environment*, 144, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.008>
- Padilla, M., Stehman, S. V., Ramo, R., Corti, D., Hantson, S., Oliva, P., ... Chuvieco, E. 2015. Comparing the accuracies of remote sensing global burned area products using stratified random sampling and estimation. *Remote Sensing of Environment*, 160(April), 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.005>
- Palmer, P. I., Feng, L., Baker, D., Chevallier, F., Bösch, H., Somkuti, P. 2019. Net carbon emissions from African biosphere dominate pan-tropical atmospheric CO<sub>2</sub> signal. *Nature Communications*, 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11097-w>
- Palomino, S., Anaya, J. A. 2012. Evaluation of the Causes of Error in the Mcd45 Burned-Area Product for the Savannas of Northern South America. *Dyna-Colombia*, 79(176), 35–44.
- Pechony, O., Shindell, D. T., Faluvegi, G. 2013. Direct top-down estimates of biomass burning CO emissions using TES and MOPITT versus bottom-up GFED inventory. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(14), 8054–8066. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50624>
- Pierre-Louis, K. 2019. The Amazon, Siberia, Indonesia: A World of Fire. *The New York Times*. Retrieved from <https://www.nytimes.com/2019/08/28/climate/fire-amazon-africa-siberia-worldwide.html>
- Portnoy, S., Koenker, R. 1997. The Gaussian hare and the Laplacian tortoise: computability of squared-error versus absolute-error estimators, 279–300. <https://doi.org/10.1214/ss/1030037960>
- Prosperi, P., Bloise, M., Tubiello, F. N., Conchedda, G., Rossi, S., Boschetti, L., ... Bernoux, M. 2020. New estimates of greenhouse gas emissions from biomass burning and peat fires using MODIS Collection 6 burned areas. *Climatic Change*, 161(3), 415–432. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02654-0>
- Rodriguez-Montellano, A., Libonati, R., Melchiori, E. 2015. Sensibilidad en la detección de áreas quemadas en tres ecosistemas vegetales de Bolivia, utilizando tres productos regionales. In *XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR* (Vol. 1, pp. 1663–1670).

- Rodríguez-Veiga, P., Wheeler, J., Louis, V., Tansey, K., Balzter, H. 2017. Quantifying Forest Biomass Carbon Stocks From Space. *Current Forestry Reports*, 3, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0052-5>
- Rousseeuw, P. J., Huber, M. 1997. Recent developments in PROGRESS. In L1-Statistical Procedures and Related Topics. *Dodge, IMS Lecture Notes*, 31, 201–214.
- Rousseeuw, P. J., Leroy, A. M. 2005. *Robust Regression and Outlier Detection*. (John Wiley & Sons, Ed.). Wiley. Retrieved from [https://books.google.com/books?id=woaH\\_73s-MwC](https://books.google.com/books?id=woaH_73s-MwC)
- Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., ... Morel, A. 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(24), 9899–904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>
- Santoro, M., Beaudoin, A., Beer, C., Cartus, O., Fransson, J. E. S., Hall, R. J., ... Wegmüller, U. 2015. Forest growing stock volume of the northern hemisphere: Spatially explicit estimates for 2010 derived from Envisat ASAR. *Remote Sensing of Environment*, 168, 316–334. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.005>
- 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. <https://doi.org/10.1007/BF00137988>
- Shi, Y., Matsunaga, T., Saito, M., Yamaguchi, Y., Chen, X. 2015. Comparison of global inventories of CO<sub>2</sub> emissions from biomass burning during 2002–2011 derived from multiple satellite products. *Environmental Pollution*, 206, 479–487. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.08.009>
- Shi, Y., Matsunaga, T., Yamaguchi, Y. 2015. High-Resolution Mapping of Biomass Burning Emissions in Three Tropical Regions. *Environmental Science and Technology*, 49(18), 10806–10814. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01598>
- Simões Amaral, S., Andrade de Carvalho, J., Martins Costa, M., Pinheiro, C. 2016. Particulate Matter Emission Factors for Biomass Combustion. *Atmosphere*, 7(11), 141. <https://doi.org/10.3390/atmos7110141>
- Solaun, K., Sopolana, A., Arraibi, E., Pérez, M. 2014. Series CO<sub>2</sub>: Black Carbon y sus efectos en el clima. *Factor CO<sub>2</sub>*, 52. Retrieved from [https://www.factorco2.com/comun/docs/131-Series%20CO2\\_Black%20Carbon\\_Factor%20CO2\\_20140613.pdf](https://www.factorco2.com/comun/docs/131-Series%20CO2_Black%20Carbon_Factor%20CO2_20140613.pdf)
- Stahl, S. 2014. Evolution of the Normal Distribution. In *Mathematics magazine* (pp. 96–113). Retrieved from [https://www.maa.org/sites/default/files/pdf/upload\\_library/22/Allendoerfer/stahl96.pdf](https://www.maa.org/sites/default/files/pdf/upload_library/22/Allendoerfer/stahl96.pdf)
- Schulze, E.D. 1989. Air pollution and forest decline in a spruce (*Picea abies*) forest. *Science*, 244(7), 776. <https://doi.org/10.1126/science.244.4906.776>
- Tie, X., Chandra, S., Ziemke, J. R., Granier, C., Brasseur, G. P. 2007. Satellite measurements of tropospheric column O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> in eastern and southeastern asia: Comparison with a global model (MOZART-2). *Journal of Atmospheric Chemistry*, 56(2), 105–125. <https://doi.org/10.1007/s10874-006-9045-7>
- Urbanski, S. P., Hao, W. M., Nordgren, B. 2011. The wildland fire emission inventory: Western United States emission estimates and an evaluation of uncertainty. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(24), 12973–13000. <https://doi.org/10.5194/acp-11-12973-2011>
- Valencia, G. M., Anaya, J. A., Caro-Lopera, F. J. 2016. Implementación y evaluación del modelo Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS): estudio de caso en los Andes colombianos. *Revista de Teledetección*, 46(46), 83–101. <https://doi.org/10.4995/raet.2016.3582>
- Valencia, G. M., Anaya, J. A., Ramo, R., Velásquez, É. A., Francisco, J. 2020a. About Validation-Comparison of Burned Area Products. *Remote Sensing*, 12(2018), 1–39.
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Leeuwen, T. T. Van, Chen, Y., Collatz, G. J., ... Kasibhatla, P. S. 2017. Global fire emissions estimates during 1997 – 2016. *Earth System Science Data*, 9, 697–720. <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>
- Vasconcelos, S. S. De, Fearnside, P. M., Graça, P. M. L. D. A., Nogueira, E. M., Oliveira, L. C. De, Figueiredo, E. O. 2013. Forest fires in southwestern Brazilian Amazonia: Estimates of area and potential carbon emissions. *Forest Ecology and Management*, 291, 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.044>
- Voiland, A. 2015. Fourteen years of carbon monoxide from MOPITT – Climate Change: Vital Signs of the Planet. Retrieved December 6, 2020, from <https://climate.nasa.gov/news/2291/fourteen-years-of-carbon-monoxide-from-mopitt/>
- von Bobrutski, K., Braban, C., Famulari, D., Jones, S., Blackall, T., Smith, T. E. L., ... Nemitz, E. 2010. Field inter-comparison of eleven atmospheric ammonia measurement techniques, 91–112. <https://doi.org/10.5194/amtd-2-1783-2009>

- Wang, J., Christopher, S. A. 2003. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM 2.5 mass: Implications for air quality studies. *Geophysical Research Letters*, 30(21), 2095. <https://doi.org/10.1029/2003GL018174>
- Whitburn, S., Van Damme, M., Kaiser, J. W. W., Van Der Werf, G. R. R., Turquety, S., Hurtmans, D., ... Coheur, P.-F. F. 2014. Ammonia emissions in tropical biomass burning regions: Comparison between satellite-derived emissions and bottom-up fire inventories. *Atmospheric Environment*, 121, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.03.015>
- Whitburn, Simon, Van Damme, M., Clarisse, L., Hurtmans, D., Clerbaux, C., Coheur, P. F. 2017. IASI-derived NH<sub>3</sub> enhancement ratios relative to CO for the tropical biomass burning regions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(19), 12239–12252. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12239-2017>
- Wiedinmyer, C., Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Emmons, L. K., Al-Saadi, J. A., Orlando, J. J., Soja, A. J. 2011. The Fire INventory from NCAR (FINN) – a high resolution global model to estimate the emissions from open burning. *Geoscientific Model Development Discussions*, 3(4), 2439–2476. <https://doi.org/10.5194/gmdd-3-2439-2010>
- Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Gershunov, A., Guzman-Morales, J., Bishop, D. A., Balch, J. K., Lettenmaier, D. P. 2019. Observed Impacts of Anthropogenic Climate Change on Wildfire in California. *Earth's Future*, 7(8), 892–910. <https://doi.org/10.1029/2019ef001210>
- Wu, Y., Gu, B., Erisman, J. W., Reis, S., Fang, Y., Lu, X., Zhang, X. 2016. PM<sub>2.5</sub> pollution is substantially affected by ammonia emissions in China. *Environmental Pollution*, 218, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.027>
- Yang, J., Gong, P., Fu, R., Zhang, M., Chen, J., Liang, S., ... Dickinson, R. 2013. The role of satellite remote sensing in climate change studies. *Nature Climate Change*, 3(10), 875–883. <https://doi.org/10.1038/nclimate1908>
- YuSheng, S., Matsunaga, T., Yamaguchi, Y. 2015. High-resolution mapping of biomass burning emissions in three tropical regions. *Environmental Science & Technology*, 49(18), 10806–10814. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01598>
- Zuluaga, O., Patiño, J. E., Valencia, G. M. 2021. Modelos implementados en el análisis de series de tiempo de temperatura superficial e índices de vegetación: una propuesta taxonómica en el contexto de cambio climático global. *Revista de Geografía Norte Grande*, 78, 323–344. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022021000100323>