

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA, GEOGRAFÍA Y MEDIO AMBIENTE



INTER-COMPARACIÓN DE PRODUCTOS GLOBALES
DE ÁREA QUEMADA, GENERADOS POR
TELEDETECCIÓN

Tesis Doctoral presentada por:

DANTE CORTI GONZÁLEZ

Bajo la dirección del:

Dr. Emilio Chuvieco Salinero

Madrid

Febrero de 2014

TABLA CONTENIDOS

| | |
|--|-----------|
| Agradecimientos | 6 |
| Resumen | 7 |
| Abstract | 9 |
| Introducción..... | 11 |
| 1 Planteamiento del problema, hipótesis y objetivos. | 23 |
| 1.1 Quemas de biomasa y Cambio Climático | 23 |
| 1.2 Modelos globales de clima y vegetación..... | 24 |
| 1.3 Modelos climáticos globales (GCM) | 26 |
| 1.4 Modelos dinámicos de vegetación global (DGVM) | 32 |
| 1.5 Distribución global de área quemada | 36 |
| 1.6 Regímenes de incendios..... | 37 |
| 1.7 Fuego y Biomas..... | 38 |
| 1.8 Fuego y Factor Humano | 38 |
| 1.9 Área quemada y Cambio Climático | 39 |
| 1.10 Sensores Remotos y productos de área quemada..... | 41 |
| 1.10.1 Productos GBA2000 y GLOBSCAR | 44 |
| 1.10.2 Productos GLOBCARBON, L3JRC y GEOLAND2..... | 45 |
| 1.10.3 Productos MODIS MCD45A1 y MCD64A1 y GFED..... | 46 |
| 1.10.4 Producto Fire_CCI..... | 47 |
| 1.11 Intercomparación entre productos globales de área quemada | 49 |
| 1.12 Hipótesis y objetivos..... | 50 |
| 2 Análisis de distribución global del área quemada | 55 |
| 2.1 Introducción | 55 |
| 2.2 Metodología | 57 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 2.2.1 | Reclasificación de biomas terrestres..... | 57 |
| 2.2.2 | Selección de zonas de estudio de área quemada a nivel global. | 60 |
| 2.2.3 | Selección de imágenes Landsat TM/ETM+..... | 62 |
| 2.2.4 | Procesamiento multitemporal de imágenes Landsat TM/ETM+ con el programa ABAMS | 65 |
| 2.2.5 | Análisis global de regímenes de área quemada..... | 72 |
| 2.4 | Resultados y Discusión de Regímenes de incendios | 75 |
| 2.4.1 | Distribución de área quemada por zona de estudio | 75 |
| 2.4.2 | Distribución de Área Quemada por cercanía a zonas pobladas | 78 |
| 3 | Intercomparación por zonas de estudio de productos de área quemada | 85 |
| 3.1 | Introducción | 85 |
| 3.2 | Pre-proceso de los productos de área quemada | 88 |
| 3.3 | Proceso de intercomparación de productos de área quemada..... | 93 |
| 3.3.1 | Intercomparación Cualitativa | 94 |
| 3.3.2 | Intercomparación Cuantitativa | 98 |
| 3.4 | Resultados y Discusión de la intercomparación por zonas | 99 |
| 3.4.1 | Intercomparación Espacial | 99 |
| 3.4.2 | Intercomparación anual a través del Índice Kappa..... | 112 |
| 3.5 | Intercomparación global a través de Índice de relación de Sörensens-Dice.... | 116 |
| 3.5.1 | Intercomparación espacial a través de Índices de Concordancia Kappa y Sörensens-Dice..... | 119 |
| 3.5.2 | Evaluación de la sobre y sub-estimación y, concordancia global por zona de estudios | 126 |
| 3.5.3 | Evaluación del sesgo en el día de detección de área quemada..... | 132 |
| 3.5.4 | Evaluación en la estimación del área quemada | 134 |
| 4 | Intercomparación global de <i>productos de área quemada</i> | 147 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.1 | Introducción | 147 |
| 4.2 | Pre-proceso de los productos de área quemada | 148 |
| 4.3 | Métricas para la intercomparación global de <i>productos de área quemada</i> ... | 150 |
| 4.4 | Resultados y Discusión de intercomparación global..... | 151 |
| 4.4.1 | Cartografía de intercomparación de productos de área quemada | 153 |
| 5 | Conclusiones y Líneas futuras de investigación | 171 |
| 5.1 | Conclusiones..... | 171 |
| 5.2 | Líneas futuras de investigación | 176 |
| 6 | Referencias Bibliográficas | 179 |
| 7 | Índices de tablas | 198 |
| 8 | Índices de figuras | 200 |

“Todo parece imposible hasta que se hace”

Nelson Mandela, Madiba.

Agradecimientos

En primer lugar esta tesis doctoral está dedicada a las dos personas que más amo en la Tierra que son Isabel y Nicolas, *mi familia*, quienes me han dado todo para llegar donde estoy ahora, apoyándome en cada una de mis aventuras.

A mis padres que desde la distancia han apoyado cada una de las etapas de mi vida tanto personal como profesional.

A mi tutor y amigo Emilio Chuvieco, por haberme dado la oportunidad de trabajar, durante estos tres años, con él y el equipo de investigación que dirige.

A Hans Grosse, Director Ejecutivo del Instituto Forestal de Chile, quien en todo momento me apoyó para realizar esta nueva etapa profesional.

A mis compañeros que compartieron tanto mis penas como alegrías profesionales y personales durante este tiempo, como son; Vero, Stijn, John, Itziar y Mariano.

A José Sancho “Pepe”, por aportar su sabiduría en la última etapa de esta tesis y sus invitaciones a salidas de campo y exponer en sus clases de Ciencias Ambientales.

Tampoco me puedo olvidar del clan del sótano; Rubén, Dani, Fernando, Pablo, Lucre, Vanesa, Carol, Mario, Daniel, Marc, Malena, Jaime y José. Sin los cuales estos años se hubieran hecho monótonos. Y a los que fueron parte del clan y que luego siguieron nuevos rumbos como Juan Pablo, Mavi, Elena, Teresa, Patri y el Comandante Dr. Pacheco.

Al resto de los integrantes del Departamento de Geografía en la primera etapa de mis tesis y luego de Geología, Geografía y Medio Ambiente. A Javier, Inmaculada y en ellos agradezco a todos los demás.

A mis amigos del INFOR Roberto, Paola, Iván, Armando, Carlos, Jacob, Luis, Verónica, Juan José y Marjorie, que a la distancia me han apoyado y ayudado.

Resumen

El objetivo principal de esta tesis es intercomparar diferentes productos de área quemada. Se ha hecho en el marco del proyecto *Fire_CCI*, que financia la Agencia Europea del Espacio (ESA), dentro de su iniciativa de cambio climático (CCI). En la tesis se comparan los productos derivados de este proyecto (*Fusionado*, MERIS y VGT) con los actualmente existentes generados en proyectos previos de la NASA (MCD45A1, MCD64A1 y *GFEDv3.1*) o las instituciones europeas (GLOBCARBON, L3JRC y GEOLAND2). Esta comparación se realiza, tanto espacial como temporalmente entre los años 1999 y 2009.

Con este objetivo general, se definieron los siguientes objetivos específicos: estudiar la existencia de relación entre el tamaño del área quemada y su distribución latitudinal y cercanía a zonas urbanas, así como la relaciones entre su tamaño y bioma; determinar la interrelación entre productos de área quemada; evaluar la consistencia del producto *Fire_CCI* con respecto al resto de productos de área quemada.

Nuestros resultados indican que el producto MERIS, a nivel de píxel, presenta los mejores valores estadísticos con relación al producto MCD64A1 (considerado el de mayor fiabilidad), a nivel de las 10 zonas de estudio, con valores de Kappa y Sörensens-Dice de 32% y 38%, respectivamente.

Al realizar la intercomparación global de los productos de área quemada, empleando cuadrículas de 0,5° se obtuvieron similares resultados a los obtenidos para las zonas de estudio, observándose los mejores valores de correlación entre el producto *GFEDV3.1* (cuyo producto de referencia en área quemada es MCD64A1) y MERIS, con un valor de $r^2 = 0,45$, por encima de los valores obtenidos para los producto VGT y *Fusionado* (0,12 y 0,42 respectivamente), así como para el producto GEOLAND2 (y $r^2 = 0,33$).

Esta tesis doctoral nos han permitido realizar una primera reseña global de la distribución del área quemada por franja latitudinal, concluyendo que existe una relación significativa ($V = 0,44$) entre el tamaño de los incendios y la latitud en que ocurren siendo mayores en las franjas latitudinales superiores a los 40° de latitud Norte y disminuyendo hacia el ecuador, como también entre el total de área quemada y las franjas latitudinales en las que se distribuyen, siendo mayor en el Ecuador (24.378

km²) disminuyendo hacia los polos (550 km²). Además, se ha podido determinar que el bioma de sabana tropical que se localiza principalmente entre los 20° de latitud Norte y Sur, es el que se ve mayormente afectado por la ocurrencia de incendios, tanto en superficie (23.723 km²) como en número de estos (49.800).

Esta tesis doctoral ha generado la mayor base cartográfica realizada hasta ahora para la validación y calibración de productos de área quemada, con 129 pares de imágenes Landsat TM/ETM+ que han sido distribuidas de forma equitativa entre los 7 biomas reclasificados.

Los resultados obtenidos de este trabajo doctoral nos permiten señalar que el producto MERIS podría ayudar a ajustar las predicciones de área quemada en zonas donde los productos GFED, actualmente utilizados por los modeladores de clima y vegetación, subestiman esta información como es el caso de los biomas tropicales y boreales, disminuyendo las limitantes en el uso de estos productos.

Abstract

The aim of this Ph.D. is to compare several Burned Area (BA) products. This work has been developed in the framework of the *Fire_CCI* project, funded by the European Space Agency (ESA), within its Climate Change Initiative (CCI). The comparison is performed between products derived from this project (Merged Product, MERIS BA and VEGETATION BA) and existing ones from NASA (MCD45A1, MCD64A1 y GFEDv3.1) and other European Institutions (GLOBCARBON, L3JRC y GEOLAND2). This comparison has been performed both spatial and temporally for years 1999 to 2009.

More in detail, the objectives of the thesis are firstly, to study the relation between the burned area and its geographical distribution and closeness to urban areas, and the relations between size and biome. Secondly, to determine the relation between BA products, and finally, to evaluate the consistency of the *Fire_CCI* BA product with respect to the other existing BA products.

Our results indicate that the MERIS product, on a pixel level, presents the best statistical values in relation to the MCD64A1 product (considered the most reliable one) when taking into account the 10 study sites, with Kappa and Sørensen-Dice values of 32% and 38%, respectively.

When comparing the products on a 0.5 degree grid, the results are similar to the ones obtained for the study sites, observing better correlation values between the GFEDv3.1 (which reference comes from the MCD64A1) and MERIS with an $r^2 = 0,45$, a higher value than the one obtained for the VGT and Merged Product (0,12 y 0,42 respectively), and also for the GEOLAND2 ($r^2 = 0,33$).

This Ph.D. thesis has given us the opportunity to assess for the first time the latitudinal fire distribution on a global scale. The conclusion is that there is a significant relation ($V = 0,44$) between fire size and latitude, being bigger above 40° N and decreasing when approaching the Equator. There is also a relation between the total BA and the latitude, being bigger at the Equator (24.378 km^2) and decreasing when approaching the poles. In addition, it was determined that the tropical savanna biome, that is found mainly between the 20°N and 20°S , is the one that is most affected by fire occurrence, both in area (23.723 km^2) and number of fires (49.800).

This thesis has also generated the biggest database for BA products validation and calibration, with 129 pairs of Landsat TM/ETM+ that have been distributed equitably between the 7 reclassified biomes.

The results obtained in this Ph.D. thesis allow us to point out that the MERIS BA product could help adjusting the BA predictions in areas where the GFED product underestimates the BA (tropical and boreal biomes). This product is currently being used by the climate and vegetation modellers. The use of the MERIS BA product could help reducing the limitations of the existing BA products.

Introducción

Esta tesis doctoral, como cualquier trabajo científico, hace de puente entre lo hecho hasta ahora y lo mucho que queda por hacer; en este caso en la investigación sobre las ventajas e inconvenientes de los diferentes productos existentes de área quemada. Quiere ser un eslabón más de esa cadena infinita de estudios que tienen por misión aproximarse a la verdad. El mayor asombro que produce la contemplación del universo, sentenció Albert Einstein, es su comprensión; por eso, continuamos empeñándonos en desentrañar las claves de su funcionamiento, de desvelar sus secretos para acercarnos a su verdad y hacerla nuestra, aunque, bien sabemos, quizás nunca terminemos de hacerlo del todo.

Personalmente he tenido el privilegio de trabajar en el seno de un grupo de investigación de excepcional condición científica. Los desafíos que este grupo tiene planteados son de gran calado, cuenta con un patrimonio intelectual y científico de gran valor que busca a través de su esfuerzo progresar en el conocimiento de las claves ambientales de nuestro planeta, utilizando como referencia la herencia recibida de estudios anteriores. El aprovechamiento de la información territorial suministrada por los sensores a bordo de los satélites de observación de la tierra es la base sobre el que gira aquel esfuerzo. En concreto, el conocimiento de un fenómeno como los incendios de biomasa que afectan a extensas superficies de nuestro planeta se constituye como desafío científico; su impacto en los biomas, la repercusión que pueda tener en el comportamiento del clima y por ende en el cambio climático, la incidencia que directamente pueda producir en las propias comunidades humanas, los factores que inciden en su ocurrencia y severidad, entre otros, son temas de notable interés que han exigido, y exigen cada día, el esfuerzo de este grupo de investigadores entre los que he tenido la suerte de trabajar en los últimos tres años.

Mi trabajo doctoral trata, pues, de aportar luz en una faceta de gran importancia para el esclarecimiento de una preocupación; la evaluación veraz del área quemada en la superficie terrestre. Esto concita la atención de la comunidad científica, los responsables de la gestión territorial y los equipos técnicos que diseñan sensores y metodologías de análisis de información espacial como son los modeladores tanto del

clima como de la vegetación. Son diversos los productos existentes que buscan cumplir satisfactoriamente este desafío; es nuestro deseo efectuar un estudio comparativo entre ellos y mostrar sus ventajas, inconvenientes, bondades y debilidades. Otros seguirán con otros temas complementarios del paso dado en esta tesis doctoral, como la validación de estos mismos productos de área quemada y, sobre todo, la inserción de la información obtenida por ellos como variable básica en los modelos predictivos de clima y vegetación.

Los contenidos de esta tesis se organizan de acuerdo a la estructura que se define en los siguientes párrafos:

En el capítulo 1 se realiza una caracterización de la problemática, en nuestro caso estimar el área quemada a nivel global, a través de una revisión de diferentes estudios para conocer el estado actual de las investigaciones científicas relacionadas con los tres temas principales; estudios sobre regímenes de incendios globales y por cobertura de suelo, los diferentes productos de área quemada y la intercomparación entre ellos y modelos predictivos de clima y vegetación y sus requerimientos de información relacionada con incendios. Consecuentemente a lo planteado, se establecen los objetivos generales y específicos de esta tesis, lo que permite centrar el contenido central de este estudio.

En el capítulo 2 se describe la metodología, resultados y discusión de la distribución del área quemada a nivel global. Se dan a conocer los criterios utilizados para la selección de zonas globales de área quemada por bioma y la selección de algoritmos utilizados con el programa ABAMS para la generación de polígonos de área quemada. Las zonas de validación corresponden a una serie de pares de imágenes Landsat TM/ETM+ que se han distribuido por bioma terrestre de acuerdo a la representatividad del área quemada de cada uno de ellos en relación al total obtenido en el año 2008.

Esta información ha permitido realizar un análisis de los regímenes incendios de acuerdo a tres variables: tipo de bioma, proximidad a sectores poblados y distribución latitudinal. Se relacionan los resultados obtenidos con otros estudios

En el capítulo 3 se describe la metodología utilizada para la comparación en 10 zonas de estudio de los productos de área quemada. Además, se presentan los resultados obtenidos y la discusión de estos. Para realizar esta intercomparación se seleccionan 10 zonas de estudio globales presentándose las zonas seleccionadas. Se realiza una intercomparación de productos de área quemada tanto a nivel espacial como global, empleando un periodo temporal de 11 años (1999 – 2009).

En el capítulo 4 se describe la metodología utilizada para comparación global para el año 2008, de seis de los ocho productos estudiados, se presentan los resultados obtenidos y la discusión de estos. Se muestran los criterios estadísticos utilizados en la intercomparación y evalúan los resultados obtenidos. El esquema desarrollado para los capítulos 3 y 4 se presenta en la Figura Nº 1.

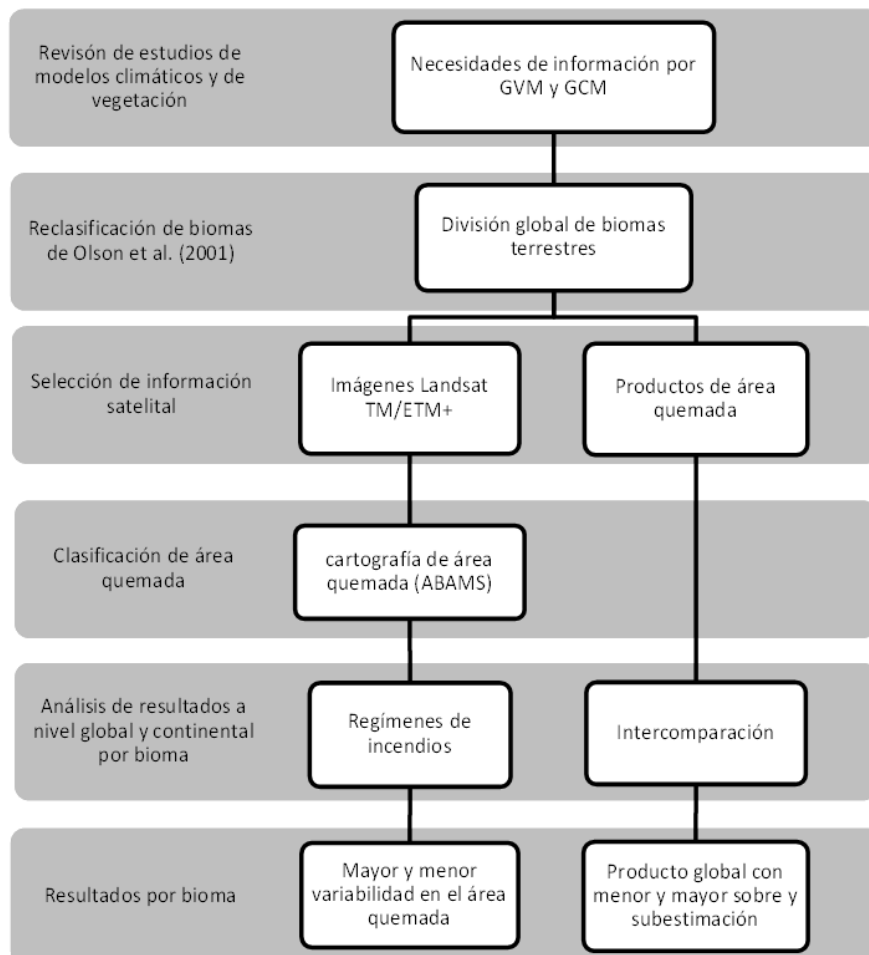


Figura Nº 1 Esquema general de la tesis doctoral

En el capítulo 5 se entregan las conclusiones finales de este trabajo que tienen relación con los regímenes de incendio y la intercomparación de productos área quemada, que podrían ser una fuente de información relevante tanto para los modelos globales de clima como de vegetación. Como colofón, se esbozan las futuras líneas de investigación que podrían surgir a partir de esta tesis doctoral.

Una serie de artículos y ponencias en congresos han derivado de esta tesis doctoral que se presentan en los siguientes párrafos. De ellos en tres el autor de este trabajo figura como primer autor, al llevar a cabo todas las fases de los estudios, en los restantes se ha colaborado con la generación y organización de datos, discusión y revisión de manuscrito:

1. **D. Corti** y E. Chuvieco. (2013). Uso de productos de área quemada en modelos climáticos y de vegetación. Revista Bosque. Valdivia, Chile (aceptado).

Resumen: Los incendios forestales tienen un notable impacto sobre el medio ambiente global, principalmente en el cambio climático, debido al efecto que tienen las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, durante la combustión de biomasa, y sobre los cambios de cobertura de uso de suelo que generalmente implican. Este artículo examina como los modelos de predicción global del clima y vegetación utilizan la información relacionada con el área quemada. Se obtienen como conclusiones, a partir de las referencias bibliográficas consultadas, que los *productos de área quemada* deberían considerar una mejora en su resolución espacial y temporal (abarcar el mayor periodo de tiempo posible). Además, deberían incluir algunas variables adicionales que permitan estimar las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por estos incendios.

2. E. Chuvieco, I. Alonso-Canas, **D. Corti**, M. Padilla, S. Hantson, M. García (2013). CARTOGRAFÍA GLOBAL DE ÁREAS QUEMADAS: PROYECTO ESA FIRE CCI. XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Madrid.

Resumen: En el XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección (AET) y el área temática de *ocupación y uso de suelo*, se presentaron los avances del proyecto *Fire_CCI* que forma parte de la iniciativa de cambio climático de la Agencia Europea del Espacio (ESA). Se mostraron las primeras versiones de cartografía de área quemada utilizando datos de los sensores (A)ATSR, VEGETATION y MERIS. Se mostraron los dos subproductos finales, en formato píxel y formato cuadrícula, con una malla de 0,5°x0,5°, de acuerdo a las necesidades de los modeladores de clima y vegetación. Se presentaron los primeros resultados de la validación sistemática de los resultados, a partir de perímetros de referencia generados con imágenes multi-temporales Landsat TM/ETM+, y los primeros resultados de comparación con los *productos de área quemada* existentes.

3. S. Hantson, M. Padilla, **D. Corti**, E. Chuvieco (2013). Strengths and weaknesses of MODIS hotspots to characterize global fire occurrence, Remote Sensing of Environment, Volume 131, Pages 152-159.

Resumen: Los Hotspots de MODIS (MOD14) han sido utilizados para estudiar la ocurrencia de incendios a nivel global, al proporcionar información relevante sobre estos como son su distribución espacial y temporal. Presentan también problemas en diferenciar incendios activos de área quemadas. En esta publicación se presenta la relación entre los Hotspots y área quemada extraída desde imágenes Landsat TM/ETM+, considerados como datos de referencia para la validación de productos globales de área quemada. Este estudio ha podido concluir que los Hotspots son más fiables en la detección de áreas quemadas con superficies mayores a 500 hectáreas (errores menores al 20%).

4. S. Hantson, M. Padilla, R. Cardoso, **D. Corti**, E. Chuvieco. (2012). A global comparison between MODIS hotspots and high resolution burned area data. EGU General Assembly Conference Abstracts 14, 12708.

Resumen: Los incendios forestales son un importante factor medioambiental a nivel global, influyendo en la vegetación, reservas de carbono, cambio en el uso del suelo y ser. Además, una importante fuente de gases de efecto invernadero. Sin embargo existe una incertidumbre en lo que tiene relación con su distribución, intensidad y ocurrencia. Al ser actualmente los productos satelitales la única fuente de información de sobre la ocurrencia de incendios a nivel global, además tienen una buena resolución espacial y temporal. Hay dos productos satelitales que han sido utilizados para estudiar la ocurrencia de incendios como son los Hotspots y el cartografía de área quemada. En este trabajo se estudió la relación entre los datos de área quemada generados a partir de imágenes multi-temporales de alta resolución espacial como son las imágenes Landsat TM/ETM+ y el producto MODIS MOD14, correspondientes a la base de datos global de Hotspots. Se presenta un análisis de regresión entre los Hotspots y, el área quemada y número de incendios.

5. E. Chuvieco; **D. Corti**; M. Padilla. (2012). Intercomparison of global burned area products. Fall Meeting, AGU, San Francisco, California, United States.

Resumen: El proyecto *Fire_CCI* que forma parte de la iniciativa para el cambio climático de la ESA, ha generado a partir de los sensores ATSR, VEGETATION y MERIS un nuevo producto de área quemada. En este trabajo este producto fue comparado con los productos GLOBCARBON, L3JRC y MCD45A1, durante el año 2005 en tres zonas de estudio localizadas en : Canadá, Portugal y Australia. Los resultados obtenidos de la primera versión de este nuevo producto no señalan que presenta resultados más cercanos al producto MODIS MCD45A1 que a los productos de la ESA como son GLOBCARBON y L3JRC.

6. **D. Corti**, R. Cardozo, M. Padilla, M. Martín, S. Hantson y E. Chuvieco. (2012). Selección de Zonas Globales de Validación para productos globales de Área Quemada. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Madrid, AGE-CSIC. Madrid.

Resumen: La quema de biomasa cada vez cobra mayor importancia en los modelos predictivos de cambio climático al ser una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles a la atmósfera, equivalentes al 20% de las emisiones anuales. Con la información obtenida por teledetección se han generado diversos *productos de área quemada* como son: L3JRC, GBA2000, GLOBSCAR, GLOBCARBON, MCD45A1 y MCD64A1, con diferencias en la detección y estimación del área quemada. El objetivo de esta investigación fue la generación de zonas globales de validación, que permitan la óptima comparación y validación espacial de los diferentes *productos de área quemada* a nivel de bioma. Con estas zonas se ha generado una base de información en sectores que actualmente contaban con escasa o nula información. La generación de estas 129 zonas de validación se realizó en siete grupos de biomas, en función del total de superficie quemada durante el año 2008. La cobertura vectorial del área quemada se realizó con el programa ABAMS a través del análisis multitemporal de imágenes Landsat TM/ETM+.

7. S. Hantson, M. Padilla, **D. Corti**, E. Chuvieco. (2012). Un análisis de los errores de comisión y omisión de los Hotspots de MODIS a partir de datos de área quemada de alta resolución a escala global. *Tecnologías de la información geográfica en el contexto del cambio global*, 74-81.

Resumen: La información de los Hotspots de MODIS se han utilizado ampliamente con fuente de datos para estudiar el área quemada a nivel global. Con el objetivo de mejorar la comprensión de estos datos y su caracterización se realizó una comparación de estos con datos obtenidos de imágenes Landsat TM/ETM+ en 9 zonas del planeta que representan diferentes ecosistemas. Los resultados obtenidos nos señalan que los Hotspots tienen bajos errores de comisión, menores al 4%. Por el contrario los errores de omisión son relativamente altos a nivel global y, menores en incendios de grandes dimensiones.

8. **D. Corti**, E. Chuvieco, P. Oliva, T. Calado, M. Padilla, R. Cardozo, S. Hantson. (2011). Intercomparación de productos globales de área quemada, generados por teledetección, con nuevo producto de la agencia espacial europea (ESA). Proyecto *FIRE_CCI*. Eco clima. Reunión: bosques, sociedad y cambio climático, Valdivia-Chile, 31 de Ago.-2 Sep. 2011. Libro de actas de eco Reuniones (Chubut Argentina). p. 69-74.

Resumen: Este estudio tuvo como principal objetivo presentar en América Latina los alcances y objetivos del proyecto *Fire_CCI*, principalmente la metodología que se utilizaría para la intercomparación global del *producto de área quemada Fire_CCI* con los productos L3JRC, GLOBCARBON, MCD45A1 y MCD64A1. Y los resultados esperados luego de esta intercomparación, como también la proposición de ajustes del nuevo algoritmo.

9. M. Padilla, S. Hantson, R. Cardozo, **D. Corti**, E. Chuvieco. (2011). An integrated index for the multitemporal validation of burned area products. Advances in Remote Sensing and GIS applications in Forest Fire Management. From local to global assessments. Proceedings of 8th International EARSeL FF-SIG Workshop Stresa (Italy), 20 – 21 october 2011.

Resumen: En la última década se ha buscado incorporar el área quemada como una de las variables de entrada para los modelos de cambio climático. Por lo que la validación de los *productos de área quemada* es fundamental para su ser considerados por los modeladores del clima. Este estudio presenta un índice que resume todos los componentes de error del área quemada, obtenidos de la validación con datos de referencia Landsat TM/ETM+. La metodología propuesta comprende: la detección de área quemada, la información de regresión lineal, la estabilidad temporal de los errores y la matriz de confusión de los errores. Se analizaron los productos de área quemada GLOBCARBON, MCD45A1 y L3JRC en tres zonas de estudio, en un periodo de tiempo entre el año 2000 y 2006. Se ha podido concluir que el producto MCD45A1 presenta una mejor precisión y exactitud que los productos L3JRC y GLOBACARBON.

CAPÍTULO 1:
PLANTEAMIENTO DEL TEMA,
HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

1 Planteamiento del problema, hipótesis y objetivos.

En este capítulo se presenta un revisión de diferentes estudios científicos que me han permitido observar las necesidades de información de área quemada a nivel global que requiere la comunidad científica, especialmente los modeladores de clima y vegetación, la cual debe ser lo más cercana a la realidad de campo. A partir de este análisis se plantea la hipótesis de esta tesis doctoral y los objetivos que me han permitido responder a ella.

1.1 Quemados de biomasa y Cambio Climático

Las quemados de biomasa producidas por incendios forestales y agrícolas son la segunda fuente de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, equivalentes -según las fuentes- a entre el 20% y 40% del total de emisiones anuales (Justino *et al.*, 2011; Stroppiana *et al.*, 2010; van der Werf *et al.*, 2010). Estas quemados alteran directamente las condiciones climáticas de las zonas afectadas, al modificar las temperaturas y transformar la cobertura del suelo (Glitzenstein *et al.*, 1995).

Los incendios afectan al clima principalmente de dos maneras; por un lado modifican el albedo terrestre y el balance de carbono, en el caso de la conversión de zonas forestales a agrícolas (las zonas forestales tienen mayor acumulación de carbono que las agrícolas y un albedo generalmente más bajo); por otro suponen en el momento de la quema la emisión de una sustancial cantidad de gases de efecto invernadero y aerosoles, que también modifican el balance de radiación terrestre y la concentración atmosférica de estos gases (Csiszar *et al.*, 2009).

La pérdida de biomasa altera el ciclo global del carbono al reducirse la superficie de bosques, principales sumideros terrestres de este gas (Arora y Boer, 2005; Conard y Solomon, 2009; Ellicott *et al.*, 2009). Durante la quema de vegetación son liberados a la atmósfera gases de efecto invernadero como el CO₂, o el metano, además de ozono troposférico, óxidos de nitrógeno y aerosoles (Houghton *et al.*, 1997), transformando el balance de radiación entre la tierra y la atmósfera (van der Werf *et al.*, 2003).

Además, hay que tener en cuenta los efectos de la deforestación y degradación de los bosques a nivel mundial relacionados con las quemadas de biomasa originadas por incendios forestales y aquellos provocados para conseguir nuevas tierras de cultivo o bien limpiar rastrojeras (Williams *et al.*, 2011).

Por estas razones, la estimación de la superficie quemada así como las condiciones de esa quema (energía liberada, biomasa consumida), incluyendo las quemadas agrícolas, se consideran como una variable esencial del clima (ECVs). De hecho forman parte de la lista de 49 ECV definidas por el programa GCOS (*Global Climate Observing System*). Estas variables incluyen una gran cantidad de parámetros tales como temperatura, precipitación, humedad relativa, hielo continental y marino, aerosoles, nubes, gases atmosféricos, etc. El GCOS es una organización que, como es sabido, aúna los esfuerzos de Naciones Unidas y la Unión Meteorológica Mundial para facilitar la observación del cambio climático (Karl *et al.*, 2010).

1.2 Modelos globales de clima y vegetación

Cada ecosistema tiene respuestas diferentes al efecto de los incendios tanto a nivel ecológico (seres vivos, animales y plantas) como también atmosféricos y climáticos, dependiendo de la extensión e intensidad del área quemada (Miller y Urban, 1999). Para poder medir y seguir el efecto de la quema de biomasa se hace necesario disponer de información detallada sobre la localización, extensión e intensidad de los incendios y de las emisiones generadas tanto a escala global como regional y poder estimar, así, sus efectos en el tiempo (Balshi *et al.*, 2009; Bastarrika, 2009). Razones por las cuales son de gran importancia los modelos de clima y vegetación que nos permiten entender estas variables y el papel que el fuego tiene en los mismos.

Para realizar el seguimiento y predicciones de los posibles cambios en el clima debidos a fenómenos naturales o antropogénicos, se han desarrollado los modelos climáticos globales (*Global Climate Models*, GCM). utilizados para predecir escenarios futuros de precipitaciones y temperaturas (aumentos o disminuciones anuales) (Pachauri *et al.*, 2007).

Para desarrollar estas predicciones se utiliza como información de referencia registros históricos de meteorología, de cambios en cubiertas vegetales, superficie quemada, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y quemas de combustibles fósiles (Bachelet *et al.*, 2008).

En el cuarto informe del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) se señalan los resultados de los 23 GCM más robustos desarrollados a nivel mundial; este informe se considera la principal fuente de información para investigaciones científicas y gubernamentales que tienen relación con las proyecciones climáticas (Pachauri *et al.*, 2007).

Una parte de los modelos globales se orientan a estimar la respuesta de la vegetación al sistema climático. Se denominan modelos globales de dinámica de la vegetación (DGVM) y se utilizan para predecir los posibles cambios y distribución de la vegetación debido a variaciones en las condiciones climáticas o por efecto de fenómenos naturales como pueden ser incendios, erupciones volcánicas, inundaciones o deslizamientos de tierras (Bachelet y Price, 2008).

Las principales variables empleadas para simular los cambios en la vegetación global o regional son la temperatura, precipitación, latitud, altitud, topografía, radiación y posición solar, emisiones de CO₂, tipos de suelo y de vegetación (Sato *et al.*, 2007). En algunas investigaciones se han asociado los GCM y los DGVM, aumentando la precisión de estos últimos y permitiendo la evaluación de los efectos interactivos entre los cambios de clima y vegetación (Bachelet y Price, 2008).

Para que los resultados de los algoritmos utilizados por los diferentes modelos sean más exactos se debe contar con una base de datos histórica de los diferentes procesos que afectan tanto al clima como a la vegetación. En este terreno la información obtenida por satélites de observación puede contribuir a mejorar la información de las variables analizadas en los diferentes tipos de modelos (Karl *et al.*, 2010; Seiz *et al.*, 2011).

Esta información es de especial relevancia para algunos procesos físicos que presentan variaciones diarias y estacionales, aportando información estadística que mejora la estimación y parametrización de los modelos globales de clima y vegetación (MOHC *et al.*, 2011). Por lo tanto, contar con información más precisa de área quemada (menores errores de omisión y comisión) servirá para mejorar tanto los modelos de clima y vegetación como también para estudios de efectos del cambio climático y de la actuación del hombre sobre los diferentes ecosistemas y gestionar futuros proyectos UN_REDD (*United Nations Collaborative Programme on Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries*) y otros que quieran desarrollar los países que se ven afectados por la actividad de cambio de uso de suelo, como para estudios de cambio climático (Archibald *et al.*, 2010; Boschetti *et al.*, 2010b; Johns *et al.*, 2008; Pachauri *et al.*, 2007).

Los modelos predictivos de clima y vegetación más avanzados tratan de representar todos los procesos físicos tanto de la atmósfera como de la superficie, lo que implica una gran complejidad al incluirse múltiples procesos físicos y biológicos, considerados en su variación tridimensional (x, y, altura atmosférica). Esto lleva consigo que sólo puedan resolverse utilizando redes de ordenadores de última generación, lo que conduce inevitablemente a confrontaciones entre la precisión y fiabilidad de los modelos y la velocidad de cálculo (Solomon *et al.*, 2007).

1.3 Modelos climáticos globales (GCM)

Los primeros modelos climáticos se desarrollaron en los años cincuenta y han sido utilizados por los meteorólogos para estudiar las variaciones de la temperatura y las precipitaciones a lo largo de un periodo de tiempo determinado y su predicción futura. Para estimar estos cambios empleaban información histórica de temperatura, presión atmosférica y precipitaciones, entregando como resultado las posibles condiciones climáticas, en tres escenarios futuros que dependen del nivel de impacto que pueden ocasionar los cambios del clima, pudiendo ser bajo, medio o extremo (Pachauri *et al.*, 2007). Una de las limitantes de los primeros modelos era que sólo podían predecir las condiciones del clima a corto plazo (Smagorinsky, 1963).

Con el avance de las investigaciones del cambio climático se ha podido determinar que la atmósfera, océanos, hielos y vegetación están interconectados, por lo que los primeros modelos han ido quedando obsoletos reemplazándose por los GCM que pueden procesar una gran cantidad de información y variables (Marlon *et al.*, 2008). Las predicciones generadas por estos modelos se comprueban con bases de datos históricas como las señaladas en los párrafos anteriores (Balshi *et al.*, 2009; Cox *et al.*, 2004).

Los GCM se desarrollan a partir de una serie de ecuaciones y algoritmos matemáticos que modelan el comportamiento de los diferentes factores que inciden en el clima, como son el intercambio gaseoso entre la superficie terrestre, océanos y la atmósfera, además de las variaciones de la energía solar en la atmósfera, variables que afectan las temperaturas, precipitaciones y contenidos de humedad (Solomon *et al.*, 2007). Estos modelos se diseñan a partir de una serie de escenarios de referencia que tienen en consideración una serie de supuestos: crecimiento demográfico, uso de energías fósiles y transformaciones tecnológicas entre otras (Pachauri *et al.*, 2007).

Debido a que los GCM consideran múltiples variables para su ejecución, resultan muy complejos de elaborar y ejecutar. El equilibrio entre complejidad, nivel de resolución y realismo de los modelos se va agrandando según la potencia de cálculo de los ordenadores reduciéndose así mismo la incertidumbre de las variables de entrada (Carvalho *et al.*, 2011; Gonzalez *et al.*, 2010; Salas-Méla *et al.*, 2005). Los modelos climáticos complejos consideran las interacciones que existen entre la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre y el hielo, simulando las condiciones futuras del clima a través de métodos cuantitativos, sus resultados se utilizan en estudios de la dinámica del sistema climático y proyecciones del clima futuro (Houghton *et al.*, 1997) (Tabla N°1).

Los GCM poseen una baja resolución espacial (0,25°, 0,5°, 1°, 3°). pero debido a la necesidad de contar con información climática de mayor resolución se han generado modelos de escala regional, derivados de los globales con resoluciones menores de 0,25° (Chen *et al.*, 2009) (Tabla N°1).

Es aquí donde la información obtenida por sensores de Observación de la Tierra resultarían clave para mejorar nuestro conocimiento del sistema climático, al proporcionar datos consistentes en el espacio y tiempo de algunas variables críticas, como es el caso de la temperatura del agua, la productividad vegetal, la concentración de gases de efecto invernadero, la cobertura del suelo, aerosoles y superficie quemada. El GCOS considera que debido a su precisión y frecuencia temporal los satélites son una herramienta fundamental para el seguimiento del cambio climático por el GCOS (Seiz *et al.*, 2011).

La aportación de los datos de área quemada a los GCM afecta, por un lado, a la química atmosférica (emisiones directas de aerosoles y GEI) y, por otro, al balance de carbono y de albedo terrestre (consecuencia del cambio de cobertura del suelo). En la Tabla N°1 se señalan los modelos globales que emplean información de área quemada señalándose la resolución espacial de la misma, el origen de la información sobre incendios que incorporan y las referencias bibliográficas más destacadas.

Tabla Nº 1. Información de área quemada en los GCM

| Nombre y descripción de GCM | País | Resolución, Espacial y Niveles | Fuente de variables de área quemada utilizadas | Fuente |
|--|-----------------|--------------------------------|---|--|
| ECHAM5/MPI_OM (Holocene experiment with coupled atmosphere –ocean-model) | Alemania | 1,9º x 1,9º; L31 | | (Jungclaus <i>et al.</i> , 2006; Raddatz <i>et al.</i> , 2007) |
| ECHO_G (ECHAM4 + HOPE_G) | Alemania, Corea | 3,9º x 3,9º; L19 | | (Legutke <i>et al.</i> , 1999; Zorita <i>et al.</i> , 2003) |
| CSIRO_MK3.x (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization climate model) | Australia | 1,9º x 1,9º; L18 | | (Collier <i>et al.</i> , 2011; Katzfey <i>et al.</i> , 2009) |
| CGCM 3.1(T47) (Canadian Global Coupled Climate Carbon Model) | Canadá | 2,8º x 2,8º; L31 | No utiliza información de incendios | (Yukimoto <i>et al.</i> , 2001) |
| CGCM 3.1(T63) (Canadian Global Coupled Climate Carbon Model) | Canadá | 1,9º x 1,9º; L31 | | |
| BCC_CM1 (Beijing Climate Center _climate model) | China | 1,9º x 1,9º; L16 | | (Ding <i>et al.</i> , 2004) |
| FGOALS_g 1.0 (Flexible Global Ocean Atmosphere _Land System) | China | 2,8º x 2,8º; L26 | | (Ma <i>et al.</i> , 2004) |
| CCSM3 (Community Climate System Model) | EE.UU. | 1,4º x 1,4º; L26 | Emissiones de aerosoles (van der Werf <i>et al.</i> , 2003) | (Collins <i>et al.</i> , 2006) |
| NOAA GFDL_CM 2.x (Gmeophysical Fluid dynamics Laboratory – couple model) | EE.UU. | 2,0º x 2,5º; L24 | Área quemada, emisiones de aerosoles ((van der Werf <i>et al.</i> , 2006) | (Knutson <i>et al.</i> , 2006) |

| Nombre y descripción de GCM | País | Resolución, Espacial y Niveles | Fuente de variables de área quemada utilizadas | Fuente |
|---|---------|--------------------------------|--|--|
| NASA GISS_AOM (Goddard Institute for Space Studies – Model A_O_M) | EE.UU. | 3º x 4º; L12 | | (Lucarini y Russell, 2002; Russell <i>et al.</i> , 1995) |
| NASA GISS_EH (Goddard Institute for Space Studies – ModelE_H) | EE.UU. | 4º x 5º; L20 | No utiliza información de incendios | (Mann y Schmidt, 2003) |
| NASA GISS_ER (Goddard Institute for Space Studies – ModelE_R) | EE.UU. | 4º x 5º; L20 | Emisiones CO ₂ y aerosoles (van der Werf <i>et al.</i> , 2003) | (Hansen <i>et al.</i> , 2007) |
| PCM (Parallel climate model) | EE.UU. | 2,8º x 2,8º; L26 | No utiliza información de incendios | (Washington <i>et al.</i> , 2000) |
| CNRM_CM3 (Centre national de recherches météorologiques – climate model) | Francia | 1,9º x 1,9º; L45 | Emisiones de GEI (van der Werf <i>et al.</i> , 2003) | (Salas-Méla <i>et al.</i> , 2005) |
| IPSL_CM4 (Institut Pierre Simon Laplace – Climate Model) | Francia | 2,5º x 3,75; L19º | Emisiones CO ₂ (Friedlingstein <i>et al.</i> , 2006; van der Werf <i>et al.</i> , 2004) | (Marti <i>et al.</i> , 2005) |
| MIROC 3.2 (hires) (model for interdisciplinary research on climate) | Japón | 1,1º x 1,1º; L56 | Variaciones de Tº (Hasson <i>et al.</i> , 2009) | (Watanabe <i>et al.</i> , 2011) |
| MIROC 3.2 (medres) (model for interdisciplinary research on climate) | Japón | 2,8º x 2,8º; L20 | | (Watanabe <i>et al.</i> , 2011) |
| MRI_CGCM 2.3.2 (Meteorological Research Institute – coupled atmosphere – ocean general circulation model) | Japón | 2,8º x 2,8º; L30 | No utiliza información de incendios | (Yukimoto <i>et al.</i> , 2001) |

| Nombre y descripción de GCM | País | Resolución, Espacial y Niveles | Fuente de variables de área quemada utilizadas | Fuente |
|---|-------------|--------------------------------|--|---|
| BCCR _BCM 2.0 (Bjerknes Centre for Climate Research – Bergen Climate Model) | Noruega | 1,9° x 1,9°; L31 | | (Medhaug y Furevik, 2011) |
| UKMO _HadCM3 (UK Met Office Hadley Centre Model) | Reino Unido | 2,5° x 3,75°; L19 | Emisiones de CO ₂ (van der Werf <i>et al.</i> , 2003) | (Johns <i>et al.</i> , 2003) |
| UKMO _HadGEM1 (UK Met Office Hadley Centre Global Environmental Model) | Reino Unido | 1,3° x 1,9°; L38 | | (Breugem <i>et al.</i> , 2006) |
| INM _CM 3.0 (Institute of Mathematics Numerical Climate Model) | Rusia | 4° x 5°; L21 | No utiliza información de incendios | (Volodin y Diansky, 2006; Volodin <i>et al.</i> , 2008) |

Los GCM generalmente simulan o estiman la probabilidad de ignición de la vegetación considerando su contenido de humedad, la cantidad de combustible vivo y muerto, además de las variaciones de las condiciones climáticas (temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa y vientos) (Seidl *et al.*, 2011).

La información que es utilizada para validar los algoritmos de área quemada de los modelos climáticos, se obtiene desde registros históricos y dendrocronológicos (Verseghy, 2000). Los resultados obtenidos y que tienen relación con incendios forestales y/o agrícolas se utilizan en estudios de cambios de uso de suelo, de emisiones de GEI y CO₂ en regiones que podrían ser afectadas en un futuro por este tipo de desastres por causas directas o indirectas del cambio climático (Bond *et al.*, 2003; Delire *et al.*, 2008; Hasson *et al.*, 2009).

Los modelos climáticos IPSL-C4, UKMO, CSIRO, NASA-GISS, NOAA-GFDL-CM, CNRM-C3 y MIROC utilizan la información de emisiones de CO₂ originadas por los incendios forestales que entrega el GFEDv3.1, para validar sus resultados generados en cada modelo climático (Tabla N°1).

1.4 Modelos dinámicos de vegetación global (DGVM)

Los modelos dinámicos de vegetación global simulan los cambios potenciales de la vegetación y sus efectos sobre los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos (ej. ciclo del carbono). debido al cambio climático (Seidl *et al.*, 2011). Estos modelos utilizan series temporales de información climática la cual varía según la latitud, topografía y cubierta vegetal y su análisis permite simular la dinámica anual, mensual o diaria de los diferentes procesos ecosistémicos (Bachelet *et al.*, 2008; Crevoisier *et al.*, 2007; Kucharik *et al.*, 2006; Sato *et al.*, 2007).

Los DGVM simulan los flujos de diversas variables como la energía, nutrientes, agua, respiración y balance de carbono entre tierra y atmósfera. Estos modelos consideran la competencia entre los diferentes tipos de plantas, así como la mortalidad natural y la ocasionada por perturbaciones (inundaciones, incendios, erupciones volcánicas, etc.).

Los modelos que utilizan información de incendios generada desde sensores remotos, emplean la información de área quemada y algunos modelos como JSBACH y NASA_CASA utilizan como información complementaria el número de incendios activos, intensidad del fuego y radiación emitida (Karl *et al.*, 2010; van Dijk *et al.*, 2011) (Tabla Nº 2).

Se ha realizado una lectura y análisis de los 17 DGVM más citados en las diferentes bases bibliográficas. De estos modelos el 76% utiliza entre sus principales variables los tipos de combustibles para generar sus resultados. Los modelos de vegetación que consideran el fuego dentro de sus variables han desarrollado submodelos para predecir su comportamiento del fuego y sus efectos en la vegetación, así como el efecto del comportamiento sobre la colonización posterior de nuevas especies (Seidl *et al.*, 2011).

Estos submodelos estiman la superficie quemada y severidad de los incendios en el ecosistema afectado en los que varían el contenido de humedad en la vegetación y el suelo, además de las precipitaciones y temperaturas atmosféricas (Bachelet *et al.*, 2008; Thonicke *et al.*, 2010). Sólo tres de los DGVM utilizan la información de los productos de área quemada para determinar las emisiones de GEI y superficie afectada por los incendios forestales, estos son JSBACH, LPJ_DGVM y NASA_CASA, que emplean información de los modelos GBA2000 y GFEDv3.1 (Tabla N°2).

El resto de modelos genera sus propios algoritmos para estimar el impacto de incendios de acuerdo a las estimaciones de contenidos de humedad de la vegetación y cantidad de combustible vivo y muerto para cada bioma. Esa información se estima a través de modelos globales de clima (temperaturas, humedad relativa, vientos, etc.).

Los diferentes modelos simulan el comportamiento de un evento de fuego en términos de tasa potencial de propagación, intensidad y superficie total afectada. En los submodelos utilizados en la mayoría de los modelos predictivos como SPITFIRE y MC-FIRE, los incendios ocurren cuando el contenido de humedad de los combustibles leñosos y finos alcanzan los umbrales establecidos para cada escenario futuro de clima (Bachelet *et al.*, 2008; Friedlingstein *et al.*, 2006; Thonicke *et al.*, 2010), asumiendo que las fuentes de ignición son fijas y que siempre están presentes pudiendo ser de origen natural (ej. rayos) o antropogénico (Bachelet *et al.*, 2008; Potter *et al.*, 2001).

El estudio de Seidl *et al.*, (2011) observó que los modelos dinámicos de vegetación de mayor complejidad clasifican la vegetación por clases de edad o a nivel de árbol individual, para generar modelos de combustible que permiten estimar la acumulación de combustibles en el tiempo y en forma vertical. Otros modelos tratan de simular incendios considerando las interacciones de la vegetación con el clima y los impactos antropogénicos. (White *et al.*, 2008).

En los modelos predictivos las variables de área quemada que se consideran son el rango de superficie afectada para estimar el consumo y emisión de carbono de la vegetación tanto viva como muerta, la carga de combustible disponible y condiciones medioambientales de combustión (Allen *et al.*, 2010; Bachelet *et al.*, 2008; Kittel *et al.*, 2004; Lenihan *et al.*, 2005; Rogers *et al.*, 2011).

Al analizar los requerimientos de información de los Modelos Globales de la Dinámica Vegetacional y de los modelos mixtos DGVM_MCG, esta debe ser representativa de la diversidad de todos los biomas para disminuir los niveles de incertidumbre de los diversos modelos en relación a esta variable (Tabla N°2).

Los modelos globales de clima y vegetación simulan la mayor parte de la información relacionada con la quema de biomasa como el área afectada, las emisiones de CO₂ y aerosoles. Información que también es generada por los productos de área quemada, obtenida del análisis de la realidad de campo y no a partir de estimaciones. Esta información al aproximarse más a la realidad y no generada a partir de simulaciones podría disminuir los valores de incertidumbres de ambos tipos de modelos predictivos.

Tabla Nº 2 Información de área quemada en los DGVM.

| Modelo | País | Fuente de variables de área quemada utilizadas | Fuente |
|--|------------------|--|---|
| VECODE (Vegetation Continuous Description Model) | Alemania | | (Brovkin <i>et al.</i> , 2002) |
| IBIS (Integrated Biosphere Simulator) | EE.UU. | | (Foley <i>et al.</i> , 1998; Levis <i>et al.</i> , 1999) |
| HYBRID | Reino Unido | No utiliza información de área quemada | (Friend <i>et al.</i> , 1997) |
| TRIFFID (Representation of Interactive Foliage and Flora Including Dynamics) | Reino Unido | | (Cox <i>et al.</i> , 2004) |
| CTEM (Canadian Terrestrial Ecosystem Model) | Canadá | Simulaciones de GEI (van der Werf <i>et al.</i> , 2003) | (Wang <i>et al.</i> , 2006) |
| VEMAP (Vegetation Ecosystem Modeling and Analysis Project) | EE.UU. | Simulaciones de área quemada (Thonicke <i>et al.</i> , 2001) | (Kittel <i>et al.</i> , 2004) |
| VINCERA (Vulnerability and Impacts of North American forests to Climate: Ecosystem Responses and Adaptation) | Canadá | Simulaciones de área quemada | (Bachelet <i>et al.</i> , 2008) |
| CCSM (Community Climate System Model) | EE.UU. | Simulaciones de área quemada (Gregoire <i>et al.</i> , 2003) | (Collins <i>et al.</i> , 2006) |
| SEIB_DGVM (spatially explicit individual _based Dynamic Global Vegetation Model) | Japón | SPITFIRE (Thonicke <i>et al.</i> , 2001) | (Sato, 2007) |
| MC1 (MAPSS _CENTURY) | EE.UU. | | (Bachelet <i>et al.</i> , 2008; Lenihan, 2006) |
| NASA – CASA (Carnegie Ames Stanford Approach) | EE.UU. | GFEDv3.1 (Giglio <i>et al.</i> , 2010) | (Potter <i>et al.</i> , 2012) |
| SDGVM (spatially based Dynamic Global Vegetation Model) | Reino Unido | Modelo Empírico de área quemada | (Woodward y Kelly, 2008) |
| JSBACH (Jena Scheme for Biosphere _Atmosphere Coupling in Hamburg) | Alemania | SPITFIRE (Thonicke <i>et al.</i> , 2001) | (Brovkin <i>et al.</i> , 2009; Raddatz <i>et al.</i> , 2007) |
| JULES | Reino Unido | | (Niles <i>et al.</i> , 2002) |
| LPJ_DGVM (The Lund – Potsdamn – Jena Model Dynamic Global Vegetation Model) | Alemania, Suecia | | (Sitch <i>et al.</i> , 2008) |
| CLM_DVGM (Climate Model _Dynamic Global Vegetation Model) | EE.UU. | MC_FIRE, SPITFIRE (Thonicke <i>et al.</i> , 2010) | (Bonan y Levis, 2006; Dai, 2006; Zhou <i>et al.</i> , 2007) |
| ORCHIDEE (Organising Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems) | Francia | | (Bellassen <i>et al.</i> , 2011; Karl <i>et al.</i> , 2010; Krinner <i>et al.</i> , 2005) |

Los modelos predictivos de clima poseen una baja resolución espacial y temporal, aun cuando se ha ido mejorando entre el primer informe del IPCC en 1990 (FAR) que llegaba a los 500 km y el cuarto en 2007 (4AR) donde los modelos han llegado a 1° de resolución (110 km aproximadamente) (Solomon *et al.*, 2007). La resolución espacial de todos los productos de área quemada es mayor a esa cifra siendo lo más habitual entre 500 y 1000 m.

1.5 Distribución global de área quemada

Giglio *et al.*, (2010), señalan que en el periodo comprendido entre los años 1998 y 2009 el área global quemada anualmente es de aproximadamente 330 millones de hectáreas. De éstas más del 70% se encuentra en el continente africano. Esta estimación es muy similar a lo señalado por Stroppiana *et al.*, (2010) y Archibald *et al.*, (2010) que indican que más del 72% de los incendios que se producen anualmente en todo el planeta ocurren en la sabana tropical de África. Para la FAO los incendios anuales de la cubierta vegetal afectan una superficie superior a los 350 millones de hectáreas y cerca de la mitad ocurrirían en África (<http://goo.gl/EyBn7d>).

El estudio de Giglio *et al.*, (2010), permite responder algunas de las variables planteadas por (Krawchuk *et al.*, 2009), en el cual describe el producto GFEDv3.1 generado a partir del producto de área quemada MCD64A1; señala que las zonas con mayor área quemada se relaciona con áreas de incendios de praderas y sabana tropical. En zonas tropicales los bajos valores de área quemada se relacionan con zonas boscosas, tendencia que se invierte en los bosques boreales.

Krawchuk *et al.*, (2009) señalan que el cambio climático alterará la distribución geográfica de los incendios forestales, efecto de la variación de una serie de gradientes espaciales y ambientales. Indica, además, que los incendios forestales siguen siendo un fenómeno desconocido en cuanto a su comportamiento con respecto a sus efectos sobre el cambio climático. Para solucionar este problema presenta un modelo multivariable que permite cuantificar el cambio potencial en los regímenes de incendio, a través de la asignación de pesos específicos a diferentes factores medioambientales a nivel regional, relacionados con la distribución histórica y actual de los incendios de vegetación. En contraste con su hipótesis inicial que señalaba que

el calentamiento global debería ocasionar un mayor número de incendios, este estudio pudo determinar, que los aumentos en algunas regiones son contrarrestados por la disminución en otras zonas, debido a la interacción de las variables de temperatura y precipitación. Por último, en este mismo trabajo se hace constar que los cambios en los regímenes de incendios podrían tener importantes efectos en los ecosistemas terrestres debido a que estas variaciones pueden ocurrir rápidamente, generando problemas ambientales complejos para las especies vegetales, las cuales no logran adaptarse a las nuevas condiciones climáticas. Señala la necesidad incluir explícitamente los incendios de biomasa en la investigación sobre dinámica de modelos globales de clima y vegetación.

1.6 Regímenes de incendios

Regímenes de incendio es el término dado a la tendencia general de incendios que se producen de forma natural en un ecosistema o bioma determinado durante un período prolongado de tiempo. Los científicos clasifican los regímenes de incendios utilizando una combinación de factores que incluyen frecuencia, intensidad, tamaño, patrón, estación y severidad. La clasificación de regímenes de incendio permite determinar qué tipo de régimen de fuego es común en un determinado ecosistema y poder comparar de esta manera los incendios actuales con datos históricos (<http://alturl.com/9umeg>).

A escala global, es de destacar que los meses con mayor número de incendios son julio, agosto, septiembre y diciembre, mientras que febrero es el mes con menos ocurrencia de incendios en ambos hemisferios. La duración anual a nivel global de las sesiones de incendios está entre 2 y 6 meses (Giglio *et al.*, 2009). A nivel de bioma se ha observado que en la sabana tropical los incendios ocurren durante todo el año, en tanto en zonas de bosques boreales el periodo de incendios es relativamente corto y acotado entre 1 y 3 meses.

1.7 Fuego y Biomas

El fuego es un fenómeno natural que ha tenido un rol importante en la formación de diferentes hábitats como también en el mantenimiento de la biodiversidad en todo el mundo. Los beneficios e impactos del fuego son amplios; la mayoría de los hábitats terrestres dependen del fuego para su sostenibilidad ecológica (Shlisky *et al.*, 2007) (Harrison *et al.*, 2010).

El fuego puede llegar a determinar la distribución de los hábitats, el flujo del carbono y los nutrientes y las propiedades de retención del agua de los suelos. En hábitats adaptados al fuego, la exclusión de éste influye en una reducción de la biodiversidad y un aumento en la densidad de la vegetación, incrementando el peligro de incendios. El fuego siempre ha sido una importante herramienta empleada para cambiar el paisaje y uso del suelo. Sin embargo, en hábitats no adaptados al fuego, como son los bosques ecuatoriales, la introducción de éste causa transformaciones que determinan pérdidas sociales, económicas, ambientales y de especies (Harrison *et al.*, 2010; Shlisky *et al.*, 2007). Estos mismos autores afirman que la expansión del fuego a biomas tropicales que generalmente no se encuentran adaptados al fuego, y que además abrigan gran parte de la biodiversidad y del carbono capturado del mundo, puede destruir hábitats únicos y perturbar los sistemas climáticos.

1.8 Fuego y Factor Humano

Generalmente los incendios en bosques tropicales son originados por el hombre ya sea intencional o accidentalmente; unas veces el motivo es el cambio de usos del suelo, otras veces las quemadas controladas se salen de control (Nepstad *et al.*, 1999). Los cambios de uso del suelo en zonas cubiertas por bosques tropicales tienden a crear condiciones más secas, que aumentan la predisposición de los bosques residuales a incendios de sotobosque y generalmente a una mayor frecuencia de incendios (Alencar *et al.*, 2004).

En las zonas tropicales de América del Sur los incendios de gran escala se relacionan con la colonización humana, que tiene como consecuencia la deforestación con fines agrícolas (Skole y Tucker, 1993:), construcción de caminos (Laurance *et al.*, 2002) y actividades madereras (Cochrane y Barber, 2009; Nepstad *et al.*, 1999).

El fuego es una perturbación común en diferentes ecosistemas como son los bosques boreales y mediterráneos, la sabana tropical y praderas. Este fenómeno, asociado a diferentes causas externas (cercanías a sectores poblados, cantidad de combustible y condiciones climáticas) ayuda a explicar en gran medida la existencia de una mayor o menor cantidad de área quemada (Lloret *et al.*, 2003).

1.9 Área quemada y Cambio Climático

Los expertos en manejo del fuego identifican al cambio climático como una de las causas potenciales de amenazas a la biodiversidad y también de las cubiertas vegetales, principales capturadoras terrestres de carbono. Generalmente en ecosistemas dependientes del fuego no debería haber una pérdida neta de carbono almacenado dado que la biomasa que se quema vuelve a crecer durante la duración del ciclo del fuego (Pachauri *et al.*, 2007). Sin embargo, el cambio climático está aumentando la frecuencia y el alcance de los incendios mediante la alteración de factores clave que controlan el fuego: temperatura, precipitación, humedad, viento, ignición, biomasa, materia orgánica muerta, composición de las especies y estructura de la vegetación y humedad del suelo aumentando en zonas en las cuales los incendios no eran una variable preponderante como son los bosques templados y boreales (Suppiah *et al.*, 2007).

En el caso de incendios mayores de 400 hectáreas en los bosques de coníferas de altitud media del oeste de Estados Unidos manejados a nivel federal, un aumento en las temperaturas de primavera y verano de 1°C desde 1970, junto con el deshielo que ocurre más temprano y veranos más largos han causado un aumento del 400% en la frecuencia de los incendios y del 650% en el área quemada en el período 1970-2003 (Westerling *et al.*, 2006). Sin embargo, el bajo nivel de la actividad humana o la exclusión del fuego en esos bosques indican que el cambio climático puede causar impactos diferentes según los niveles de intensidad de intervención humana.

Los análisis de las condiciones potenciales futuras proyectan que el cambio climático aumentará la frecuencia de los incendios en todos los biomas (Flannigan *et al.*, 2009; Williams, 2000). Si bien en algunos lugares la frecuencia del fuego puede disminuir el aumento del tamaño de estos, parece que se crea *de facto* una retroalimentación positiva para el calentamiento global emitiendo cantidades significativas de GEI (Kasischke *et al.*, 1995; Randerson *et al.*, 2005).

Los bosques desempeñan un papel vital en la regulación del clima local debido a su interacción con los ciclos del agua. Sin embargo, los bosques también tienen un efecto significativo en el clima global, ya que afectan al albedo de superficie (energía reflejada desde el suelo), ya que absorben más calor que el suelo desnudo. Myers *et al.*, (2000) explican que la pérdida de la cubierta vegetal del bosque significa una menor absorción de radiación solar incidente, que se traduce como una menor cantidad de agua absorbida, liberando una menor cantidad de agua a la atmósfera. La precipitación también se ve afectada cuando los incendios de bosques producen contaminación en el aire y liberan GEI y aerosoles a la atmósfera. Los aerosoles pueden calentar o enfriar el aire dependiendo de su tamaño, color y forma. Las elevadas concentraciones de aerosoles producidos por la combustión de biomasa tienen un impacto en el clima local ya que incrementan la formación de nubes pero disminuyen la precipitación (DeFries *et al.*, 2008; van der Werf *et al.*, 2008).

Debido a esto, los grandes incendios forestales influyen, a su vez, en la disminución de la precipitación, lo que hace a las áreas quemadas más vulnerables ante la sequía y los incendios futuros. A largo plazo estos cambios explican por qué las regiones deforestadas experimentan una disminución en la precipitación pluvial.

El estudio de Pausas y Ribeiro (2013) señala que el cambio climático afectará el número de incendios y área quemada al alterar los contenidos de biomasa. Así, en zonas tropicales con una mayor cantidad de incendios el aumento de las sequías tenderá a aumentar el número de estos, y en zonas con menor cantidad de incendios los cambios del clima aumentarían la cantidad de combustible disponible para aumentar el tamaño de los futuros posibles incendios (Pausas y Ribeiro, 2013).

1.10 Sensores Remotos y productos de área quemada

Para cubrir la falta de información referente a la superficie de biomasa que se pierde anualmente por incendios, se han desarrollado a partir de la información obtenida desde los sensores satelitales diferentes productos de área quemada que han tenido como objetivo generar productos cartográficos que representen la distribución espacial y temporal del área quemada global (Bastarrika, 2009; Gregoire *et al.*, 2003; Manton *et al.*, 2010; MOHC *et al.*, 2011).

Los productos de área quemada actualmente existentes incluyen cartografía sobre las áreas afectadas por el fuego, ya sean forestales o agrícolas. Facilitan también información de gran utilidad sobre el tamaño y distribución temporal de la ocurrencia del fuego.

En las últimas décadas, el seguimiento espacial y temporal de quemas de biomasa y de sus impactos se ha realizado a través de imágenes captadas por satélites de observación de la Tierra. Dentro de sus características más importantes estos equipos poseen mediana y baja resolución espacial (inferiores a 1.000 m x 1.000 m). con una alta resolución temporal (diaria) lo que proporciona una perspectiva global prácticamente en tiempo real de las condiciones de la vegetación (Justice y Korontzi, 2001).

Las imágenes obtenidas a través de estos sensores satelitales han demostrado ser una herramienta muy efectiva para el monitoreo de áreas quemadas sobre grandes extensiones, siendo un instrumento importante para determinar zonas afectadas y separarlas de las no quemadas; en los últimos años se han propuesto diferentes metodologías para cuantificar la superficie afectada en diferentes biomas (Boschetti *et al.*, 2004).

El uso de imágenes obtenidas desde satélites en la elaboración de cartografía de área quemada le otorgan un valor añadido con respecto a la toma de datos en campo o a través de fotografías aéreas, entre estas ventajas se pueden nombrar la variabilidad de la resolución espacial (entre 1 y 1.000 m) y temporal (diaria, quincenal y mensual) de los datos, lo que permite realizar estudios tanto a escala regional como global (Boschetti *et al.*, 2010a).

Los sensores utilizados en la generación de productos de área quemada poseen una alta resolución temporal que varía desde una hasta dos imágenes diarias en los sensores MODIS y AVHRR, permitiendo evaluar el comportamiento de los incendios y de la vegetación a lo largo del tiempo (Bastarrika, 2009). Otro aspecto a considerar, señalado por este autor, que se debe considerar cuando se utilizan imágenes satelitales para la generación de productos área quemada es la capacidad de los distintos sensores de capturar información en las regiones del espectro no visibles para el ojo humano, donde el área quemada resalta claramente, como es en el infrarrojo cercano y medio (NIR y SWIR respectivamente).

Desde la década de 1990 a partir de imágenes satelitales se han desarrollado diferentes programas que tratan de concretar de modo más preciso el día de inicio de un incendio y el área quemada afectada. Las dos grandes agencias espaciales, NASA y ESA, han trabajado en esta línea en los últimos años. Entre los productos europeos están el L3JRC, GBA2000 y GEOLAND2, generados a partir de datos SPOT-VEGETATION (VGT) (Tansey *et al.*, 2008), el GLOBCARBON, que combina los datos VGT con ATSR (Plummer *et al.*, 2007) y el GLOBSCAR, que integra datos ATSR2 (Simon *et al.*, 2004).

La NASA también ha generado productos de área quemada, el MCD45A1 y el MCD64A1, obtenidos ambos a partir de imágenes MODIS capturadas por los sensores Terra y Aqua (Giglio *et al.*, 2009; Roy *et al.*, 2005). Una combinación de este último producto con los Hotspots¹ de ATSR han permitido estimar el componente de área

¹ Hotspots o punto de calor representa el centro de un pixel de 1 kilómetro que arde activamente. Los Hotspots son detectados utilizando datos de los instrumentos MODIS y ATSR. Generalmente los Hotspots son incendios de vegetación, pudiendo ser algunas veces una erupción volcánica o una llamarada de un pozo de gas (<http://alturl.com/kx7hm>).

quemada de la base de datos emisiones GFED (Global Fire Emissions Database) v3, una de las más reconocidas actualmente en este ámbito y que cubre el mayor periodo temporal de información de área quemada entre los años 1995 y 2013 (Giglio *et al.*, 2010; van der Werf *et al.*, 2009).

La información obtenida por estos sensores resulta clave para mejorar nuestro conocimiento del sistema climático al proporcionar datos consistentes en el espacio y en el tiempo. Por ello, los satélites de observación de la Tierra se consideran una herramienta fundamental para el sistema de observación global del clima (GCOS) (Manton *et al.*, 2010; Seiz *et al.*, 2011). Debido a las interacciones con el clima los productos de área quemada constituyen una fuente de información fundamental para analizar las interacciones fuego – clima – vegetación (Plummer *et al.*, 2007).

En este contexto, la Agencia Espacial Europea (ESA) ha desarrollado la Iniciativa para el Cambio Climático (*Climate Change Initiative*, CCI). que pretende mejorar los productos europeos de teledetección adaptándolos a los requerimientos del Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y del GCOS. El programa ESA CCI incluye 13 variables referidas a la atmósfera (emisiones de gases de efecto invernadero ozono, nubes, aerosoles), océanos (temperatura, color y altura del agua, hielo marino), territorios emergidos (cobertura del suelo, humedad del suelo, hielo continental, glaciares). El área quemada se encuentra en éstas últimas (<http://www.esa-cci.org>) (Figura N°2).

El objetivo de este programa es generar a partir de la información obtenida por satelitales de observación de la Tierra, productos globales con alta estabilidad temporal y espacial, para que puedan ser utilizados por investigadores y modeladores de clima y vegetación.

Los fuegos son estudiados por el proyecto *Fire_CCI* una de las ECV identificadas en el programa. El objetivo de este proyecto es generar cartografía de área quemada a nivel mundial (AQ) a partir de los sensores de la ESA: ATSR, SPOT-VEGETATION y MERIS. Se pretende obtener información específica sobre área quemada por bioma y global como también sus errores e incertidumbres de los datos, calibración, validación y mantenimiento del algoritmo de largo plazo. Uno de sus objetivos principales es intercomparar los resultados obtenidos con otros conjuntos de datos existentes

(www.esa-fire-cci.org). En este marco se sitúa esta tesis doctoral, por lo que terminaremos esta sección comentando los productos de área quemada ya existentes, con los que se pretende comparar el que se genere en el marco del proyecto *Fire_CCI*.



Figura Nº 2 Proyectos y variables evaluadas por la Iniciativa para el Cambio Climático de la ESA

1.10.1 Productos GBA2000 y GLOBSCAR

Los primeros productos de área quemada de escala global fueron desarrollados por la Agencia Espacial Europea (ESA) y el Centro de Investigación Europeo de Ispra (*Joint Research Group, JRC*). Se denominaron GLOBSCAR y GBA2000, respectivamente. Ambos productos contaban con una resolución espacial de 1.000 m y temporal de 30 días, la información de referencia se obtenía desde los sensores ATSR2 y VEGETATION, respectivamente (Simon *et al.*, 2004; Tansey *et al.*, 2004)

El GBA2000 fue una iniciativa lanzada por el *Joint Research Center (JRC)* en asociación con instituciones de Rusia, Portugal, Canadá, Reino Unido e Italia. El objetivo del proyecto era producir un mapa de áreas quemadas global para el año 2000 y la obtención de estadísticas de superficies quemadas por país, mes y para cada tipo de ecosistema empleando imágenes VEGETATION (Gregoire *et al.*, 2003).

A diferencia del resto de los productos de área quemada que poseen un solo algoritmo global para el procesamiento de las imágenes, el producto GBA2000 desarrolló algoritmos específicos para cada ecosistema, con el fin de evitar problemas derivados de la diferente fenología y condiciones climáticas de cada ecosistema (Tansey *et al.*, 2004).

1.10.2 Productos GLOBCARBON, L3JRC y GEOLAND2

Se han generado versiones mejoradas de los productos GBA2000 y GLOBSCAR, como fueron GLOBCARBON desarrollado por la ESA, L3JRC desarrollado por el JRC y GEOLAND2 desarrollado por la Universidad de Leicester (Plummer *et al.*, 2007; Tansey *et al.*, 2008). Los tres productos utilizan información generada por el sensor SPOT_VEGETATION; adicionalmente GLOBCARBON emplea los datos de los sensores ATSR2 (a bordo del ERS2) y AATSR (a bordo del ENVISAT) (Tabla N°3).

La resolución espacial de ambos productos es 1.000 m y la temporal de 1 día para el L3JRC, GEOLAND2 y GLOBCARBON. Los productos L3JRC y Geoland2 analizan la ocurrencia de incendios y área quemada entre los años 2000–2007 y 2000-2010 respectivamente, detectando el área quemada a partir de la identificación de cambios de un índice temporal normalizado basado en la banda del infrarrojo cercano.

Por su parte, el producto GLOBCARBON realizó el mismo análisis entre los años 1998 y 2007, detectando la superficie quemada a partir de los mismos algoritmos de los productos GBA2000 y GLOBSCAR, con el objetivo de generar información consistente en el tiempo, que no era cubierta por sus predecesores.

El proyecto GLOBCARBON fue diseñado inicialmente para suministrar un producto de área quemada para ser utilizado por la comunidad científica que estudiaba el Ciclo Global del Carbono, siendo una fuente de información para DGVM y GCM, generando datos de lugar y fecha del incendio entre otros, fue un proyecto coordinado por la ESA (Plummer *et al.*, 2007)

Lo más significativo del objetivo del proyecto GLOBCARBON fue el planteamiento de la generación de la información lo más independiente posible del sensor utilizado, a fin de que el servicio tuviera continuidad temporal y los productos pudieran seguir generándose utilizando otras fuentes (Plummer *et al.*, 2007).

El producto L3JRC está disponible para siete años (2000-2007) y utiliza imágenes diarias SPOT-VEGETATION con resolución espacial de 1 km y fue desarrollado por un consorcio de instituciones académicas como son las Universidades de Leicester, Catolique de Louvain-la-Neuve (Bélgica). el Instituto de Investigación Tropical de Lisboa y *el Joint Research Centre* de la Comisión Europea (EU). El algoritmo detectaba las áreas quemadas a partir de la identificación del cambio de un índice temporal normalizado (basado en el NIR). Este producto asume que la temporada de incendios global comienza el 1 de abril y finaliza el 31 de marzo del año siguiente y que una misma superficie no puede quemarse más de una vez en la misma temporada (Tansey *et al.*, 2008) (Tabla N°3).

1.10.3 Productos MODIS MCD45A1 y MCD64A1 y GFED.

Desde el año 2000 a la fecha se han generado otros dos productos de área quemada a partir de la información obtenida por los sensores MODIS instalados sobre los satélites Terra y Aqua de la NASA. Los productos se denominan MCD45A1 (Roy *et al.*, 2008) y MCD64A1 (Csiszar *et al.*, 2009). La resolución temporal de los productos derivados de MODIS es diaria, y la espacial es de 500 m para los productos MCD, 0.5° para el GFEDv3.1 y 0,25° para el producto GFED4 (Tabla N°3).

Los productos MCD45A1 y MCD64A1 incluyen el día Juliano de la detección del área quemada (con un nivel de fiabilidad de 8 días). la detección del cambio o área quemada considera la reflectividad estimada para cada píxel a partir de algoritmos que emplean las regiones del NIR y SWIR (Giglio *et al.*, 2009; Roy *et al.*, 2006).

El producto MCD45A1 detecta los incendios a través de comparar la reflectividad observada con la que se modela empleando un modelo de reflectividad que tiene en cuenta el efecto de observación angular. El área quemada se detecta considerando los cambios en reflectividad a partir de imágenes diarias MODIS. El algoritmo detecta la fecha aproximada del incendio (con una fiabilidad de 8 días), localizando la ocurrencia de cambios rápidos en la reflectividad de superficie a lo largo de una serie temporal, de manera que solamente identifica las nuevas áreas quemadas, excluyendo aquellas que han ocurrido en temporadas anteriores (Roy *et al.*, 2005).

La limitación encontrada en este producto deriva de la necesidad de una serie temporal larga libre de nubes para poder aplicar el algoritmo (Roy *et al.*, 2008). El producto entrega para cada píxel de la imagen los datos de día del año aproximado en el que se detectó el incendio, así como información sobre la confianza de la estimación de quemado, el número de observaciones disponibles para la inversión, el número de observaciones utilizadas, la dirección en la que se realizó la inversión, el tipo de cubierta afectada y el número de días consecutivos que no han podido ser utilizados en el proceso. Además, se incluyen los metadatos donde se resumen los valores de los píxeles y se describen los atributos geográficos y temporales de la imagen.

El producto MCD64A1 se basa en cambios en reflectividad observada apoyándose en la localización de los puntos de calor (Hotspots) detectados en los canales térmicos. El algoritmo detecta la fecha aproximada del incendio (con una fiabilidad de 8 días), detectando área quemada y eliminando zonas con incendios anteriores que puedan observarse en la imagen (Giglio *et al.*, 2010).

Se han desarrollado también dos productos mensuales de área quemada llamados GFEDv3.1 y GFED4 que estiman mensualmente y durante un periodo que va desde 1996 a 2013 el área quemada y las emisiones de GEI asociadas a estas zonas, agregada en una malla global de 0,5° y 0,25° de resolución espacial, respectivamente. Este producto se generó a partir de la información obtenido de los sensores MODIS, ATSR y TRMM. El producto de ambas variables permite evaluar la relación que existe entre las emisiones de GEI y área quemada (Giglio *et al.*, 2010; van der Werf *et al.*, 2010) (Tabla N°3).

1.10.4 Producto Fire_CCI

El *Fire_CCI* desarrolló y validó los algoritmos utilizados para generar área quemada para cada uno de los sensores utilizados, se estimó el error de área quemada que ha permitido a nivel mundial evaluar la estabilidad temporal y consistencia espacial. También desarrolló un algoritmo para fusionar la información de área quemada de los diferentes sensores en un solo producto final, adaptado a las necesidades de los modeladores de clima y vegetación (http://www.esa_cci.org/).

El proyecto *Fire_CCI* ha generado cuatro productos de área quemada, desarrollados a partir de cada uno de los sensores utilizados *Along Track Scanning Radiometer* (ATSR), *VEGETATION* (VGT) y *Medium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS). Además, de la combinación de estos tres sensores se ha elaborado un producto *Fusionado* que considera como área quemada los píxeles que se han quemado en al menos dos de los tres sensores utilizados.

El proyecto *Fire_CCI* ha desarrollado datos de área quemada desde el año 1997 al 2009 para una serie de áreas de estudio, y tres años de coberturas globales (2006 a 2008). El producto *Fusionado* ofrece información sobre área quemada con una resolución espacial de 300 m en los años que existe MERIS y 1000 m para el resto. También ofrece un resumen de superficie quemada y coberturas del suelo afectadas a una resolución de 0,5° para periodos quincenales (Chuvieco *et al.*, 2012) (Tabla Nº3).

Tabla Nº 3. Productos globales de área quemada .

| Producto Global | Años | Sensor | Fuente |
|---------------------|-----------|--------------------------------------|--|
| GLOBSCAR GBA2000 | 2000 | ATSR2 | (Simon <i>et al.</i> , 2004) (Gregoire <i>et al.</i> , 2003) |
| L3JRC | 2001-2007 | VEGETATION | (Gregoire <i>et al.</i> , 2003; Tansey <i>et al.</i> , 2004) |
| GeoLand2 | 2001-2009 | | (Tansey <i>et al.</i> , 2008) (Tansey, in press) |
| GLOBCARBON | 1999-2007 | VEGETATION; ATSR2; AATSR | (Plummer <i>et al.</i> , 2007) |
| MCD45A1 MCD64A1 | 2000-2013 | Terra; Aqua | (Roy <i>et al.</i> , 2006) (Giglio <i>et al.</i> , 2009) |
| GFEDv3.1 GFEDv4 | 1998-2013 | Terra; Aqua; (A)ATSR, TRMM | (Giglio <i>et al.</i> , 2010; van der Werf <i>et al.</i> , 2010) |
| <i>Fire_CCI</i> | 1995-2009 | VEGETATION; ATSR2; (A)ATSR; MERIS | (Chuvieco <i>et al.</i> , 2012) |

1.11 Intercomparación entre productos globales de área quemada

En el estudio de Chang y Song (2009) se realizó la intercomparación global de los productos L3JRC y MCD45A1, entre los años 2000 y 2007; demostró que los periodos de incendios son más largos con L3JRC observándose área quemada durante la mayoría de los meses de abril a octubre, independiente de la estación en que se encuentre la zona en estudio. Por el contrario, el producto MCD45A1 mostraba una mayor concentración de incendios en los meses de agosto y diciembre.

De la intercomparación de ambos productos se concluye que el L3JRC presenta una importante sobreestimación del área quemada en la mayoría del planeta. Esto se debe que este producto detecta una excesiva cantidad de área quemada fuera de la temporada de incendio. A través del análisis de ambos productos globales, se puede observar que la concentración de área quemada, hasta un 73% se encuentra en África. Se observa en ambos productos globales que los continentes con mayor área quemada son África y Oceanía.

Boschetti *et al.*, (2004) realizaron una intercomparación entre los productos de área quemada que se desarrollaron para el año 2000, como son GBA2000 y GLOBSCAR y se utilizó como información de referencia el Atlas Global de Incendios, analizando los resultados de acuerdo a su distribución geográfica. El objetivo del estudio era determinar qué producto se podría utilizar para evaluar el efecto de la acción humana en las emisiones de gases de efecto invernadero.

A nivel de continente los mayores valores de omisión y comisión con respecto al Atlas Global de Incendios, se encontraron el GLOBSCAR. Es importante señalar que ambos productos detectaron área quemada en las zonas boreales de Asia, que no estaban indicadas en el Atlas Global. Además ambos productos detectan mejor el área quemada en las zonas de sabana tropical que en otros biomas. Se concluye que las diferencias de área quemada entre cada producto se deben a los diferentes algoritmos utilizados.

Giglio *et al.*, (2010) realizaron la intercomparación del producto *GFEDv3.1* con los productos de área quemada *GFED2*, *L3JRC*, *GLOBCARBON* y *MCD45A1*, encontrando diferencias significativas en diferentes regiones. Se utilizó como información de referencia el producto de incendios activos de MODIS (*MOD14CHM*) para el periodo de tiempo comprendido entre los años 2000 y 2009 y para el periodo de 1998 – 2008 la información del Atlas Global de Incendios. De este análisis se ha podido concluir que el producto *L3JRC* es el que ofrece una mayor cantidad de área quemada independiente de la región que se esté analizando; por el contrario, los productos *MCD45A1* y *GFEDv3.1* se consideran más aproximados o consistentes con la realidad con una sobre y subestimación muy bajas principalmente en el continente africano, para ambos hemisferios. El producto *GLOBCARBON* se asemeja más en sus resultados al producto *L3JRC*, tanto en su distribución espacial como temporal.

Para todos los productos las mayores diferencias se producen en el año 1998, cuando la intercomparación se realiza con el Atlas Global de Incendios obtenidos a partir del sensor ATSR. Por el contrario, las menores diferencias se observan para el año 2008.

1.12 Hipótesis y objetivos

Hasta hoy no se ha realizado una intercomparación de todos los productos de área quemada existentes. Tampoco se ha determinado qué producto cuenta con la información más adecuada para ser utilizado por los modeladores del clima y vegetación, con el fin de mejorar sus algoritmos a través de una mejor fuente de referencia para la validación de sus resultados.

Se plantea como hipótesis de trabajo que el análisis intercomparativo de productos de área quemada puede aportar información básica para optimizar tanto las simulaciones de escenarios globales de los impactos del cambio climático, como los modelos que evalúan y establecen las futuras metodologías de adaptación y mitigación. Esta hipótesis se sustenta en lo dicho al respecto por Karl *et al.*, (2010).

El objetivo principal de esta tesis doctoral, consecuentemente, es intercomparar los diferentes productos *Fire_CCI* de área quemada con los productos ya existentes: MCD45A1, MCD64A1, GLOBCARBON, L3JRC y GEOLAND2, tanto espacial como temporalmente entre los años 1999 y 2009.

Ello comporta definir propósitos y objetivos específicos como los siguientes:

- Se intentará estudiar la existencia de relación entre el tamaño del área quemada su distribución latitudinal y su cercanía a zonas urbanas, como también sus relaciones entre tamaño y bioma.
- Se intentará determinar interrelación entre productos de área quemada.
- Evaluar la consistencia del producto *Fire_CCI* con respecto al resto de área quemada y determinar si los resultados de cada producto estiman o sobrestiman la realidad de terreno.
- Se buscará determinar qué producto global de área quemada de *Fire_CCI* tiene mejor relación con los diferentes productos existentes para ser utilizado como complemento o individualmente por los modeladores del clima y vegetación, mejorando sus algoritmos a través de una mejor validación de sus resultados.

CAPÍTULO 2:
ANÁLISIS GLOBAL DE DISTRIBUCIÓN DE
ÁREA QUEMADA

2 Análisis de distribución global del área quemada

2.1 Introducción

En este capítulo se presenta la metodología, resultados obtenidos y discusión de los mismos sobre la selección de zonas de estudio que se realizó en el proyecto *Fire_CCI* como áreas de validación. Esta muestra nos permitirá hacer un análisis de los regímenes de incendios por bioma y proximidad a sectores poblados.

Para estimar el número de incendios y área quemada afectada según el tipo de bioma se requiere información de referencia generada a partir de imágenes satelitales de mayor resolución espacial que las utilizadas para generar los productos de área quemada , que permiten una óptima clasificación de las zonas que se desea evaluar (Boschetti *et al.*, 2010b; Tansey *et al.*, 2008).

Las imágenes comúnmente utilizadas son obtenidas por los sensores Landsat TM y ETM+. Si bien hasta hace algunos años era muy costoso poder contar con pares de imágenes de alta resolución espacial que permitieran cubrir el planeta en su totalidad, esto se solucionó al ser liberadas al público y la comunidad científica las imágenes Landsat tanto TM como ETM+ (Woodcock *et al.*, 2008).

Al momento de seleccionar las imágenes representativas de todos los biomas, se debe considerar la diversidad de estos en lo que respecta a las condiciones de las quemadas que se requiere validar, como son el tipo de vegetación y características climatológicas de la época del año en la que ocurren los incendios. La razón de ello estriba en que cada bioma y los ecosistemas que lo conforman reaccionan de forma diferente a los incendios observándose efectos muy variados (Chandler, 1983).

Dentro de estos patrones se encuentran las ecorregiones definidas por la World Wildlife Fund (WWF) como “una gran unidad de tierra o agua que está constituida tanto por grupos de especies, comunidades naturales y condiciones ambientales únicas en su distribución geográfica, como son por ejemplo la selva tropical, bosques templados, boreales y mediterráneos” (Olson *et al.*, 2001).

Esta clasificación es una de las más reconocidas dentro de la comunidad científica, donde destaca la división del planeta en 14 biomas terrestres en los que se agrupan 8 ecozonas y 867 ecorregiones cuya principal característica es el tener similares especies animales y vegetales, como también iguales condiciones climáticas y topográficas.

En cada bioma se deben tener en consideración las presiones antropogénicas y del cambio climático, con diferentes efectos dependiendo de la zona de planeta y cubierta vegetal en que ocurran, por lo que es necesario contar con una clasificación de ecosistemas terrestres precisa que permita analizar estos efectos (Olson *et al.*, 2001; Pachauri *et al.*, 2007).

Al correlacionar la ocurrencia de incendios con los biomas se ve que constituyen un fenómeno global que afecta a la mayoría de los biomas terrestres, principalmente la sabanas tropical y templada, y los bosques boreal, tropical, templado y mediterráneo (Justice *et al.*, 2003; Olson *et al.*, 2001). Los biomas que se localizan en el continente africano son los que anualmente se ven más afectados, representando cada año más del 70% del área que se quema en el mundo con lo que supone de emisiones de GEI y aerosoles artificiales a la atmosfera (Archibald *et al.*, 2010; Archibald *et al.*, 2012; Giglio *et al.*, 2006; van der Werf *et al.*, 2010).

Para realizar el estudio de los regímenes de incendios se subdividió la cobertura terrestre por tipo de vegetación y clima, dado que se pretendía determinar si estas variables influyen en los valores de área quemada. Para esto se utilizó como información de referencia la clasificación de biomas terrestres desarrollada por Olson *et al.*, (2001). Esta clasificación luego se reordenó de acuerdo a tres variables como son proximidad geográfica, características de clima y vegetación.

A partir de esta subdivisión se realizó una selección global de 129 zonas de estudio equivalentes en tamaño a una imagen Landsat TM/ETM+. Esta selección se utilizó en el análisis de los regímenes de incendios por bioma, distribución latitudinal y proximidad a sectores poblados tanto a escala regional como global. En cada zona se seleccionó un par de imágenes (pre y post incendio). Para la selección de zonas de estudio se ha considerado la distribución de área quemada durante el año 2008. Los biomas que representan mayor porcentaje de área quemada se les ha asignado un mayor número

de zonas de estudio que aquellos que representan un menor porcentaje de esta área dentro del año seleccionado.

Se ha extraído y zonificado en cada zona el área quemada por medio del programa ABAMS. Para mejorar la cartografía de área quemada generada, algunos de sus resultados fueron corregidos manualmente y validados por otro investigador, con esto se ha buscado ajustar lo máximo posible la información generada a la realidad de terreno.

Posteriormente se realizó un análisis de distribución de área quemada global y continental. Lo que permitió determinar cómo es el comportamiento del área quemada en cada una de estas zonas y se evaluó el peso de las variables bioma, distribución geográfica y proximidad a sectores poblados.

2.2 Metodología

2.2.1 Reclasificación de biomas terrestres

Se realizó una reclasificación de los 14 biomas de Olson *et al.*, (2001), que corresponden a un conjunto de ecosistemas de una determinada zona geográfica definidos a partir de las especies vegetales y animales predominantes (Tabla N°4).

Tabla N° 4 Clasificación de Biomas Terrestres*.

| Nº | Bioma | Clima | Nº de ecorregiones |
|----|---|---|--------------------|
| 1 | Bosque húmedo tropical y subtropical de frondosas | Tropical y subtropical, húmedo | 231 |
| 2 | Bosque seco tropical y subtropical de frondosas | Tropical y subtropical, semihúmedo | 59 |
| 3 | Bosque subtropical de coníferas | Tropical y subtropical, semihúmedo | 17 |
| 4 | Bosque templado de frondosas y mixto | Templado, húmedo | 84 |
| 5 | Bosque templado de coníferas | Templado frío, húmedo | 52 |
| 6 | Bosque boreal/Taiga | Subártico, húmedo | 28 |
| 7 | Praderas, sabanas y matorrales tropicales y subtropicales | Tropical y subtropical, semiárido | 26 |
| 8 | Praderas, sabanas y matorrales templados | Templado, semiáridas | 50 |
| 9 | Praderas y sabanas inundadas | Templado a tropical, agua dulce o salobre inundadas | 37 |
| 10 | Praderas y matorrales de montaña | Alpino o de montaña | 39 |
| 11 | Tundra | Ártico | 99 |
| 12 | Bosque y matorral mediterráneos | Templado cálido, semihúmedo a semiárido | 39 – 50 |
| 13 | Desierto y matorral xerófilo | Templado a tropical, árido | 4 |
| 14 | Manglar | Subtropical y tropical, inundados de agua salada | 6 |

* fuente: (Olson *et al.*, 2001)

A partir de esta reclasificación los biomas se reordenaron en 7 grupos según sus características climáticas, geográficas y vegetacionales. Los biomas poco representativos en materia de área quemada como son los desiertos, manglares, tundra y praderas de montaña se clasificaron en un solo grupo independiente de sus condiciones de clima, vegetación y localización geográfica a este grupo se le asignó el nombre de “otros biomas” (Tabla N°5).

Tabla N° 5 Reclasificación de Biomas de Olson *et al.*, (Olson *et al.*, 2001)

| Biomass <i>Fire_CCI</i> | Biomas |
|-------------------------|---|
| Otros biomas | Praderas y matorrales de montaña; Tundra; Desierto y matorral xerófilo; Manglar |
| Bosque Tropical | Bosque húmedo tropical y subtropical de frondosas; Bosque seco tropical y subtropical de frondosas; Bosque subtropical de coníferas |
| Bosque Templado | Bosque templado de frondosas y mixto; Bosque templado de coníferas |
| Bosque Boreal | Bosque boreal/Taiga |
| Sabana Tropical | Praderas, sabanas y matorrales tropicales y subtropicales; Praderas y sabanas inundadas |
| Pradera Templada | Praderas, sabanas y matorrales templados |
| Bosque Mediterráneo | Bosque y matorral mediterráneos |

La nueva cobertura se asoció con la de área quemada anual obtenida a partir del producto GFEDv3.1 (Giglio *et al.*, 2010). Para ello, la información de biomas se exportó a formato raster con una resolución espacial de 0.5° similar a la utilizada por el producto GFEDv3.1. Estas imágenes resultantes de bioma y área quemada con una banda binaria de quemado (1) y no quemada (0) y día del año en que se detectó el incendio se relacionaron con la de cobertura global de las imágenes Landsat TM/ETM+ (Figura N°3 y N°4).

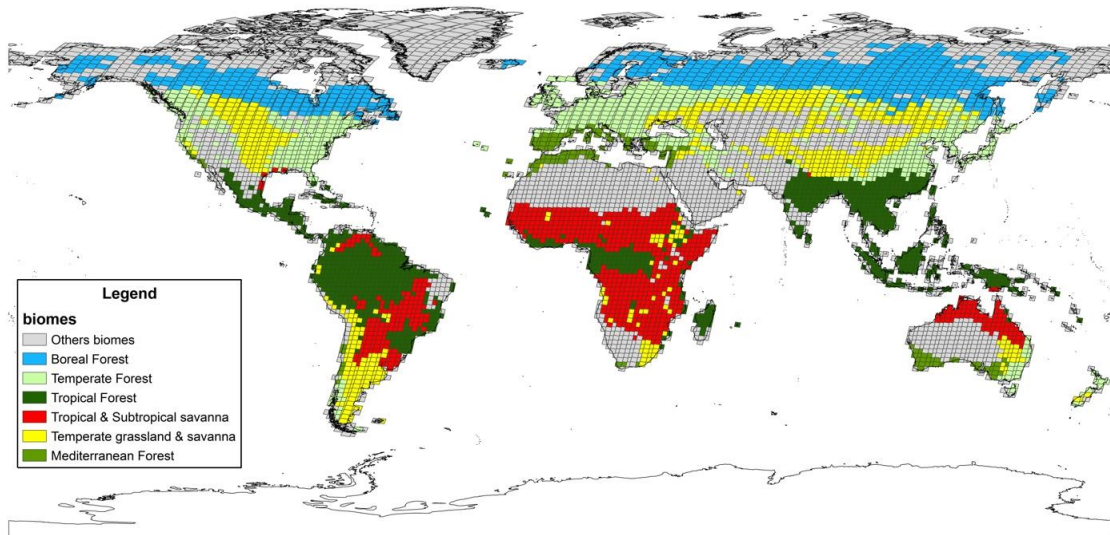


Figura Nº 3 Distribución global de biomas por imagen Landsat TM/ETM+ (Olson *et al.*, 2001).

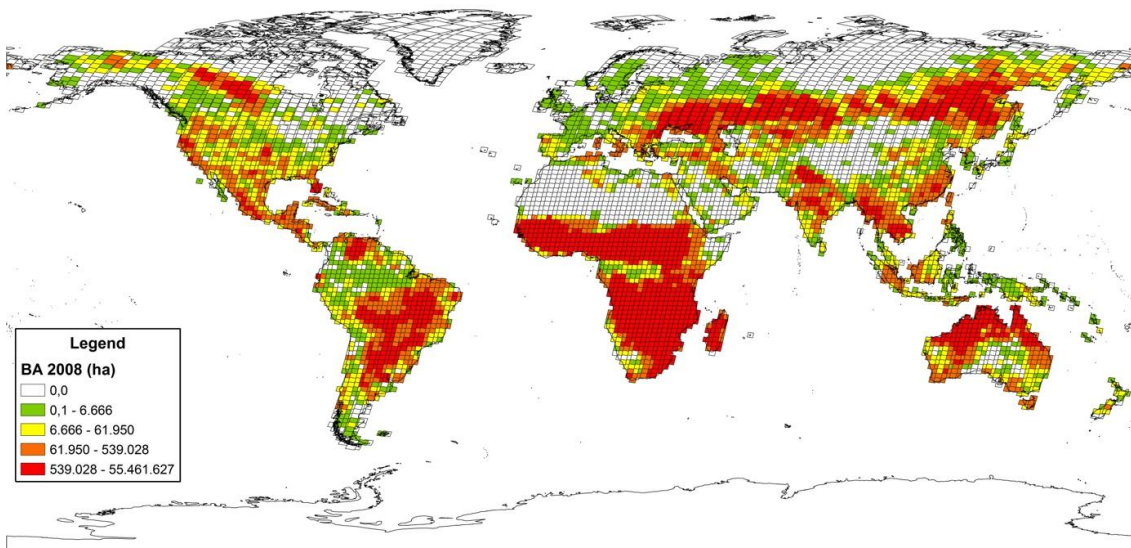


Figura Nº 4 Distribución global de área quemada en el año 2008 por imagen Landsat TM/ETM+ (información de área quemada según GFEDv3.1 (Giglio *et al.* 2010)).

2.2.2 Selección de zonas de estudio de área quemada a nivel global.

Actualmente los productos de área quemada cuentan con zonas de validación que corresponden a pares de imágenes Landsat TM/ETM+, las cuales no se distribuyen de igual manera por toda la Tierra ya que han sido seleccionadas de acuerdo a su disponibilidad o bien porque ya habían sido utilizadas en estudios previos de los desarrolladores de los diferentes productos.

Es así como los productos MCD45A1 y MCD64A1 sólo poseen zonas de validaciones en el este y oeste de América del Norte, sur de África y el noreste de Asia quedando representados los biomas de bosque templado y boreal, praderas y sabana tropical (Boschetti *et al.*, 2006; Giglio *et al.*, 2010; Roy *et al.*, 2006). Por su parte, el producto GLOBCARBON cuenta con 80 zonas de validación distribuidas una en cada continente, abarcando principalmente los biomas tropicales (Plummer *et al.*, 2007).

Debido a que las zonas de validación existentes no representan la totalidad de los biomas terrestres se generaron estas 129 nuevas zonas globales de validación de productos de área quemada, principalmente para los productos *Fire_CCI*, que en este estudio servirán para el estudio de regímenes de incendios.

La distribución de las zonas se realizó por bioma a través de un muestreo aleatorio simple estratificado, para lo cual se ha tomado en cuenta la condición de tener igual intensidad de muestreo en cada bioma, lo que se ha obtenido a partir de la relación entre la superficie cubierta por cada bioma y la superficie terrestre total. Se consideró un número de 7 zonas como mínimo en cada bioma con el objetivo de que los biomas con menos representación cuenten con información (Prodan *et al.*, 1997).

$$N^{\circ} \text{ de zonas} = \frac{\text{superficie del bioma} \times N^{\circ} \text{ de zonas}}{\text{superficie terrestre global}} \quad (1)$$

A partir del cálculo anterior se obtiene el número mínimo de zonas por bioma para contar con una igual intensidad de muestreo en cada uno de ellos. El bioma de sabana tropical representa durante el año 2008 aproximadamente el 75% del área quemada total, siendo además una de las principales fuentes de emisiones de GEI generado a partir del área quemada. Por el contrario, biomas como es el bosque mediterráneo posee una baja representatividad.

La clase “otros biomas” que representa el 28% de la superficie terrestre le corresponderían un total de 34 zonas globales, pero, debido a su bajo impacto en el total de valor vegetacional, se determinó traspasar una serie de zonas a los biomas de sabana tropical por su peso en el área quemada global y al bioma de bosque mediterráneo debido a su relación con las actividades humanas y su alta variabilidad espacial a nivel global que con las zonas asignadas no era posible cubrir. Es así como en “otros biomas” las áreas de estudio se redujeron a 8 y se asignaron 26 zonas más al bioma de sabana tropical y 4 a bosque mediterráneo que en total suman más de las extraídas en el bioma “otros” (Prodan *et al.*, 1997) (Tabla N°6).

Tabla N° 6 Distribución por bioma de superficie total de uso de suelo y área quemada según GFEDv3.1 (Giglio *et al.*, 2010)

| Biomass <i>Fire_CCI</i> | Área Total (ha) | Área quemada 2008 (ha) | Área quemada por bioma/total área quemada 2008 (%) |
|-------------------------|-----------------|------------------------|--|
| Otros | 3.659.802.063 | 16.852.338 | 5.11 |
| Bosque Tropical | 2.349.428.211 | 20.642.525 | 6.26 |
| Bosque Templado | 1.691.720.311 | 7.316.201 | 2.21 |
| Bosque Boreal | 1.512.677.894 | 5.614.351 | 1.70 |
| Sabana Tropical | 2.017.754.910 | 248.409.636 | 75.37 |
| Praderas Templadas | 1.638.069.509 | 29.803.907 | 9.04 |
| Bosque Mediterráneo | 322.038.604 | 940.602 | 0.28 |
| Total | 13.191.491.502 | 329.579.559 | 100 |

2.2.3 Selección de imágenes Landsat TM/ETM+

La iniciativa para el estudio del cambio climático de la ESA (CCI – ESA) consideró el año 2008 como el más adecuado para desarrollar los distintos productos del programa. En consecuencia, elegimos ese año para realizar el muestreo que condujera a contar con una muestra adecuada para la validación global de los productos de área quemada. Además en este año hay mayor proporción de imágenes Landsat 5 TM con respecto a las imágenes Landsat 7 ETM+. Como es sabido a partir de 2003 el sensor ETM+ tuvo un fallo irreparable en el sistema de barrido (Markham *et al.*, 2004), lo que deja unas franjas a ambos lados de la traza del satélite sin cubrir. En una reunión técnica del proyecto *Fire_CCI* se decidió excluir esa zona para la validación, con lo que para nuestros objetivos en la práctica las imágenes ETM+ albergan una zona efectiva mucho más pequeña que las TM (Figura N°5 y N°6).

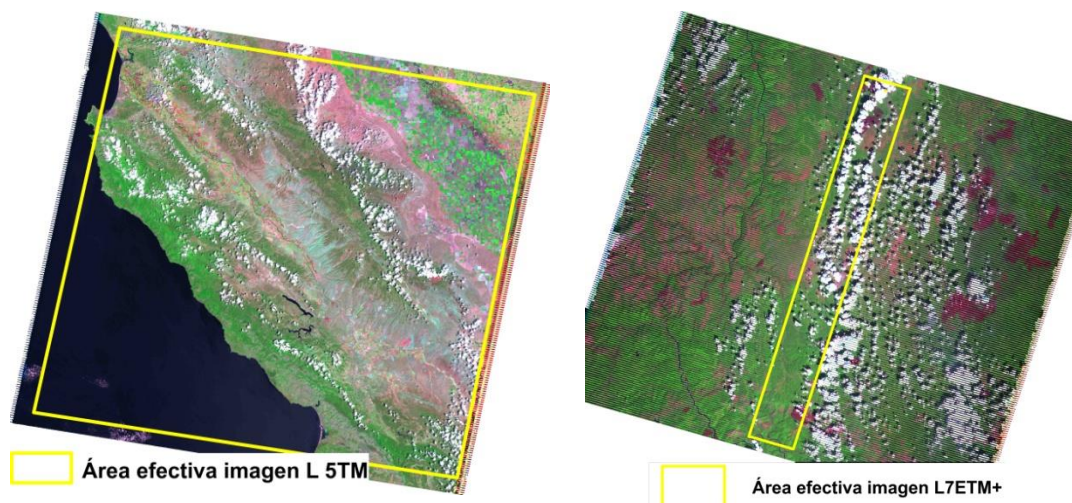


Figura N° 5 Área efectiva utilizada según el tipo de sensor L5 TM o L7 ETM+.

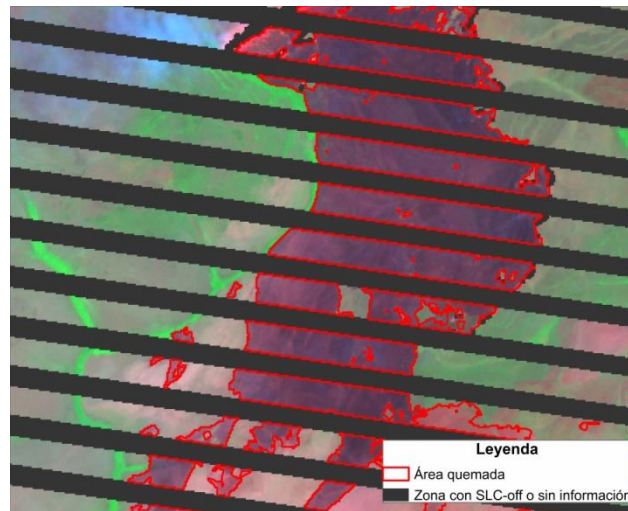


Figura N° 6 Efecto del SLC_off en imágenes L7 ETM+ y vectorizado del área quemada.

En la selección de los pares de imágenes se consideró la existencia de imágenes Landsat 5 TM sobre Landsat 7 ETM+ en las zonas seleccionadas y una cobertura de nubes inferior al 30%. La separación temporal entre cada par de imágenes no debe exceder los 30 días en zonas tropicales y de praderas, y no mayor de 6 meses en zonas de bosques boreal, templado y mediterráneo, debido a la rápida pérdida de señal del incendio en bosque y sabana tropical, la cual por el contrario se mantiene por más tiempo en sectores próximos a los polos (Boschetti *et al.*, 2010a; Stehman, 2009). La distribución de estas áreas por bioma y sensor se presenta en la Tabla N°7.

Tabla Nº 7 Distribución de zonas globales de estudios por bioma

| Biomos <i>Fire_CCI</i> | Zonas Globales de Estudio de Área Quemada | | |
|------------------------|---|-----------------|------------|
| | Landsat 7 ETM+ | Landsat 5 TM | Total |
| Otros | 5 | 3 | 8 |
| Bosque Tropical | 13 | 9 | 22 |
| Bosque Templado | 8 | 8 | 16 |
| Bosque Boreal | 8 | 6 | 14 |
| Sabana Tropical | 17 | 30 | 47 |
| Pradera Templada | 8 | 7 | 15 |
| Bosque Mediterráneo | 5 | 2 | 7 |
| Total | 64 | 65 | 129 |

La distribución global de las imágenes Landsat 5 TM y 7 ETM+ seleccionadas se pueden observar en la Figura Nº7.

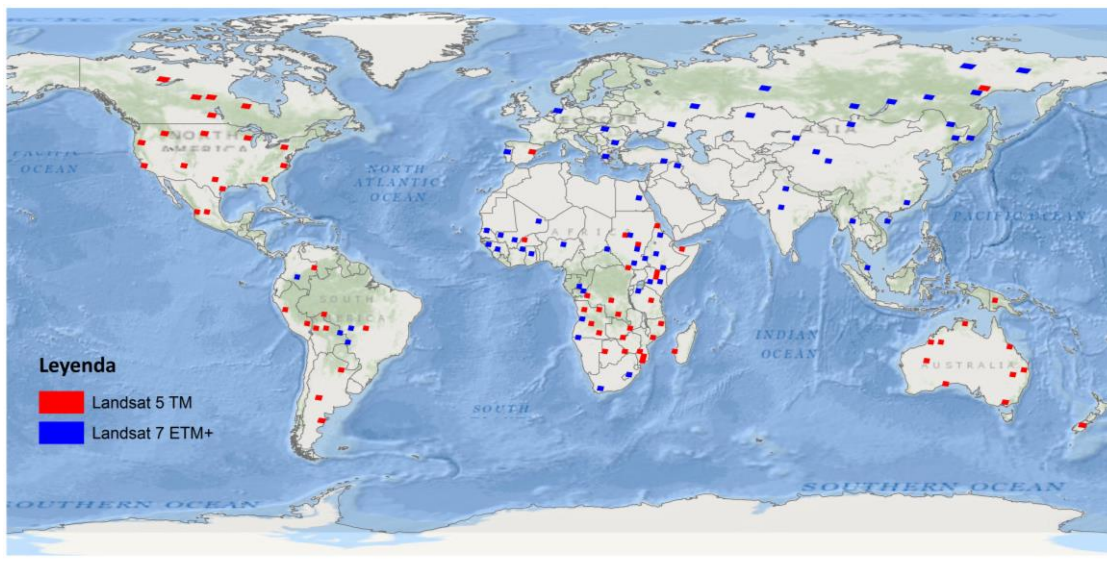


Figura Nº 7 Distribución global de imágenes seleccionadas, Landsat 5 TM y 7 ETM+

2.2.4 Procesamiento multitemporal de imágenes Landsat TM/ETM+ con el programa ABAMS

Las imágenes Landsat utilizadas se han obtenido a partir de diferentes servidores cartográficos en internet; 121 imágenes se descargaron del portal Glovis de la USGS (*United States Geological Survey*). 5 imágenes de América del Sur fueron facilitadas por CONAE de Argentina (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) y 3 imágenes correspondiente a bosque y sabana tropical de la región del Amazonas fueron descargadas desde el portal del INPE de Brasil (*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*). Además, a las imágenes del INPE se les aplicó la corrección estándar de terreno (level 1T) y georreferenciación en el mismo sistema de coordenadas del resto de las imágenes utilizadas (Chander *et al.*, 2009).

Para generar la cobertura vectorial de área quemada se utilizó el programa ABAMS (Bastarrika, 2009; Bastarrika *et al.*, 2011), cuyos algoritmos base se adaptaron a las características biológicas de cada bioma, generándose al menos un nuevo algoritmo para cada uno de ellos, logrando así la calibración del programa de acuerdo al tipo de cobertura vegetal. Se probaron entre 6 y 10 algoritmos por bioma, seleccionándose aquellos que clasificaban más del 60% del área quemada presente en las imágenes estudiadas previa a la corrección manual (Tabla N°8).

La variable de entrada que se utilizaron en este programa para calcular el área quemada son las bandas de reflectividad de Landsat TM/ETM+ (1, 2, 3, 4, 5 y 7). a partir de las cuales se generan automáticamente las siguientes variables:

- Componentes principales (ACP_1, 2, 3, 4 y 5) para la detección de cambios entre dos periodos de tiempo o imágenes (Loughlin, 1991).
- Transformación de Tasseled Cap (TC1, TC2, TC3). para medir los niveles de severidad ocasionados por un incendio (Crist y Cicone, 1984).

- Índices de vegetación y Ratio entre bandas utilizados por el programa ABAMS:

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse *et al.*, 1974).

$$NDVI = \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,R}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,R}} \quad (2)$$

Donde:

$\rho_{i,IRC}$ y $\rho_{i,R}$, señalan la reflectividad del píxel i en las bandas del infrarrojo cercano y del rojo, respectivamente.

- GEMI (Global Environmental Monitoring Index) (Pinty y Verstraete, 1992).

$$GEMI = \eta \times (1 - 0.25 \times \eta) \frac{\rho_R - 0.125}{1 - \rho_R} \quad (3)$$

Donde:

$$\eta = \frac{2 \times \rho_{SWIR} + 1.5 \times \rho_{IRC} + 0.5 \times \rho_R}{\rho_{SWIR} + \rho_{IRC} + 0.5} \quad (4)$$

Donde:

$\rho_{i,SWIR}$ y $\rho_{i,IRC}$, señalan la reflectividad del píxel i en las bandas del corto infrarrojo y medio, respectivamente.

- SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) (Huete, 1988).

$$SAVI_{i,j} = \frac{\rho_{i,j,IRC} - \rho_{i,j,R}}{\rho_{i,j,IRC} + \rho_{i,j,R} + L} + (1 + L) \quad (5)$$

Donde:

L es una constante utilizada para ajustar la línea de vegetación _suelo al origen, el que varía de acuerdo a las características de reflectividad del suelo (color, brillo, etc.).

- BAI (Burned Area Index) (Martín, 1998).

$$BAI = \frac{1}{(\rho_{NIR} - \rho_{cNIR})^2 + (\rho_{SSWIR} - \rho_{cSSWIR})^2} \quad (6)$$

Donde:

ρ_{NIR} es la reflectancia en el infrarrojo cercano y ρ_{SSWIR} es la reflectancia en el infrarrojo de onda corta y los valores de ρ_{cNIR} y ρ_{cSSWIR} son los valores de convergencia de 0,4 y 0,2 respectivamente.

- MIRBI (Mid_Infrared Burned Index) índice específico para generar cartografía de área quemada (Trigg y Flasse, 2001).

$$MIRBI = 10\rho_{LSWIR} - 9.8\rho_{SSWIR} + 2 \quad (7)$$

Donde:

ρ_{LSWIR} es el valor de reflectancia del infrarrojo de onda larga (banda 7 de Landsat TM/ETM+) y ρ_{SSWIR} es la reflectancia del infrarrojo de onda corta.

- NBR (Normalized Burned Ratio) es un cociente normalizado similar al NDVI, que utiliza información del infrarrojo cercano y del infrarrojo medio de onda corta (Rogan y Franklin, 2001).

$$NBR = \frac{\rho_{IRC} - \rho_{SWIR}}{\rho_{IRC} + \rho_{SWIR}} \quad (8)$$

Donde:

ρ_{IRC} y ρ_{SWIR} son los valores de reflectividad en las bandas del infrarrojo cercano y en la banda del infrarrojo medio de onda corta, respectivamente.

- Relación entre bandas (Ratio): 3/7, 5/2, 4/5, 7/4 (Kushla y Ripple, 1998).

El programa a partir de las variables de entrada y de las generadas a partir de ellas, realiza un análisis de separabilidad entre quemado y no quemado. Para ello se utilizan dos fases de clasificación, la primera detecta las áreas con alta probabilidad de estar quemadas, disminuyendo los errores de comisión al descartar zonas con valores espectrales similares a los del fuego. La segunda fase permite la disminución de los errores de omisión al delimitar el perímetro del incendio al analizar los sectores vecinos de las semillas generadas en la primera etapa, posteriormente mediante el crecimiento de regiones basado en semillas comienza a agregar iterativamente los píxeles vecinos con características similares al original (Bastarrika *et al.*, 2011).

Los píxeles semillas se establecen a partir de los diferentes índices generados previamente, los cuales varían según el tipo de bioma que se esté estudiando. Como parte de este trabajo doctoral se desarrollaron y evaluaron más de 18 algoritmos en cada bioma (144 en total). En la Tabla N° 8 se presentan los algoritmos seleccionados para cada uno de los biomas.

Luego de la clasificación generada por el programa ABAMS se realizó una revisión visual de cada uno de los polígonos generados, a través de la comparación de las imágenes pre y post incendio, para lo cual se utilizó la combinación de bandas 7, 4 y 3 de los sensores Landsat TM/ETM+. Esta revisión ha permitido corregir las zonas que presentaban errores de omisión o comisión en el área quemada realizadas por el programa.

Posteriormente se ha realizado la validación de estos resultados por un segundo investigador diferente al autor de esta tesis. Las diferencias se han corregido a través de la digitalización de los vectores faltantes y corrección de los vectores omitidos o falsas zonas (Padilla *et al.*, 2011) (Figura N°8).

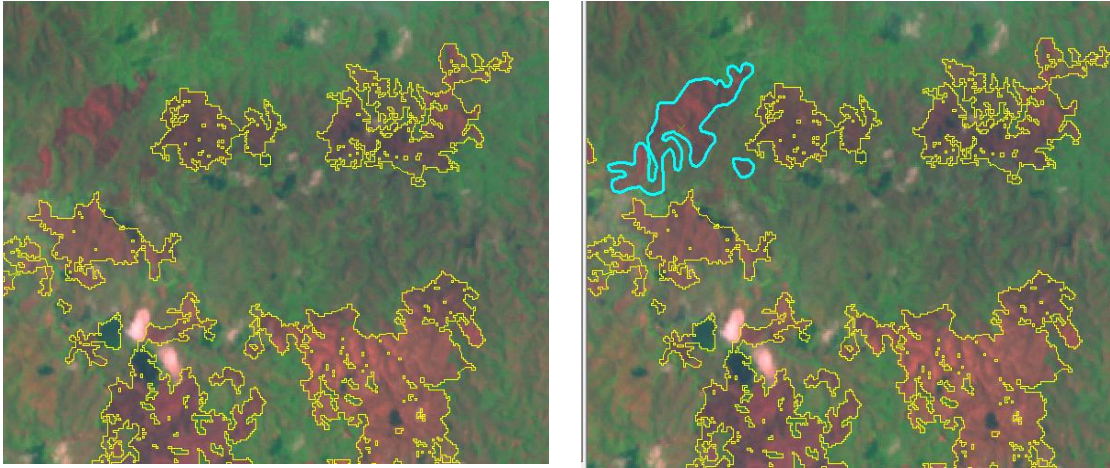


Figura N° 8. Corrección visual de vectores de área quemada generado por el programa ABAMS (polígonos amarillos generados por el programa y polígonos celestes generados por investigador).

El producto final se generó en formato vectorial (shp). a los cuales se le agregaron los metadatos de cada cobertura como son:

- Fecha pre y post de las imágenes utilizadas,
- Número de las imágenes (path_row).
- Tipo de categoría (1 área quemada, 2 sin información y 3 sin incendios).
- Área quemada de cada polígono en metros cuadrados,
- Algoritmo utilizado,
- Nombre del investigador responsable.

Tabla N° 8 Algoritmos y variables utilizados por bioma

| Bioma | variables | fase 1 (semillas) | Fase 2 (Crecimiento) |
|-----------------|-----------------------|---|---|
| Otros | TM1, MIRBI, NBR | TM1_post < 0.2 AND TM1_pre < 0.2 AND (MIRBI_post - MIRBI_pre) > 0.6 AND NBR_post < 0.15 Minimum Seed patch (ha): 0.3 | TM1_post < 0.2 AND TM1_pre < 0.2 AND (MIRBI_post - MIRBI_pre) > 0.6 AND NBR_post < 0.15 Minimum burned patch (ha): 0.7 |
| | BAIM, | BAIM_post > 70 AND MIRBI_post > 1.5 AND | |
| | NDVI | NDVI_pre > 0.1 AND MASK_post == 1 AND MASK_pre == 1 | LR_multi > 5 AND TM4_post < 0.18 AND MASK_post == 1 AND MASK_pre == 1 |
| | LR_multi | Minimum Seed patch (ha): 0.3 | Minimum Seed patch (ha): 0.3 |
| Bosque Tropical | MIRBI, NBR | MIRBI_post < 5 AND NBR_pre > 0.001 Minimum Seed patch (ha): 0.3 | MIRBI_post < 5 AND NBR_pre > 0.001 Minimum burned patch (ha): 1 |
| | Bosque Templado | TM1_post < 0.15 AND TM1_pre < 0.15 AND (BAIM_post - BAIM_pre) > 14 AND NBR_post < 0.55 Minimum Seed patch (ha): 0.3 | TM1_post < 0.15 AND TM1_pre < 0.15 AND (BAIM_post - BAIM_pre) > 12 AND NBR_post < 0.55 Minimum burned patch (ha): 0.7 |
| Bosque Boreal | TM1, MIRBI, NBR | TM1_post < 0.2 AND TM1_pre < 0.2 AND (MIRBI_post - MIRBI_pre) > 0.32 AND NBR_post < 0.2 Minimum Seed patch (ha): 0.3 | TM1_post < 0.2 AND TM1_pre < 0.2 AND (MIRBI_post - MIRBI_pre) > 0.32 AND NBR_post < 0.2 Minimum burned patch (ha): 1 |

Tabla Nº 9 Algoritmos y variables utilizados por bioma

| Bioma | variables | fase 1 (semillas) | Fase 2 (Crecimiento) |
|---------------------------------------|----------------------------|--|--|
| Pradera y Sabana Tropical subtropical | MIRBI, TM3 & NDVI BAIM | NBR_post < _0.15 AND NDVI_post - NDVI_pre) < _0.18 AND (BAIM_post - BAIM_pre) > 56.2 AND MIRBI_post > 1.85 AND MASK_post == 1 AND MASK_pre == 1 Minimum burned patch (ha): 1 | TM3_post < 0.3 AND (MIRBI_post - MIRBI_pre) > 0.38 Minimum Seed patch (ha): 0.3 LR_multi > 60 AND TM4_post < 0.19 AND MASK_post == 1 AND MASK_pre == 1 Minimum burned patch (ha): 1 |
| Pradera y Sabana Templada | TM1, TM4, MIRBI, NDVI, NBR | TM1_pre < 0.2 AND (MIRBI_post - MIRBI_pre) > 0.6 AND NBR_post < 0.13 Minimum Seed patch (ha): 0.3 MIRBI_post > 1.42 AND NBR_post < 0.25 AND TM4_post < 0.16 AND NDVI_pre > 0.25 AND MASK_post == 1 AND MASK_pre == 1 Minimum Seed patch (ha): 0.5 | TM1_pre < 0.2 AND (MIRBI_post - MIRBI_pre) > 0.6 AND NBR_post < 0.13 Minimum burned patch (ha): 1 (MIRBI_post - MIRBI_pre) > 0.1 AND (TM4_post - TM4_pre) < 0.02 AND NDVI_post < 0.45 AND MASK_post == 1 AND MASK_pre == 1 Minimum Seed patch (ha): 1 |
| Bosque Mediterráneo | TM1, MIRBI, NBR | TM1_post < 0.2 AND TM1_pre < 0.15 AND (MIRBI_post - MIRBI_pre) > 0.4 AND NBR_post < 0.1 Minimum Seed patch (ha): 0.3 | TM1_post < 0.2 AND TM1_pre < 0.15 AND (MIRBI_post - MIRBI_pre) > 0.4 AND NBR_post < 0.1 Minimum burned patch (ha): 1 |

Donde:

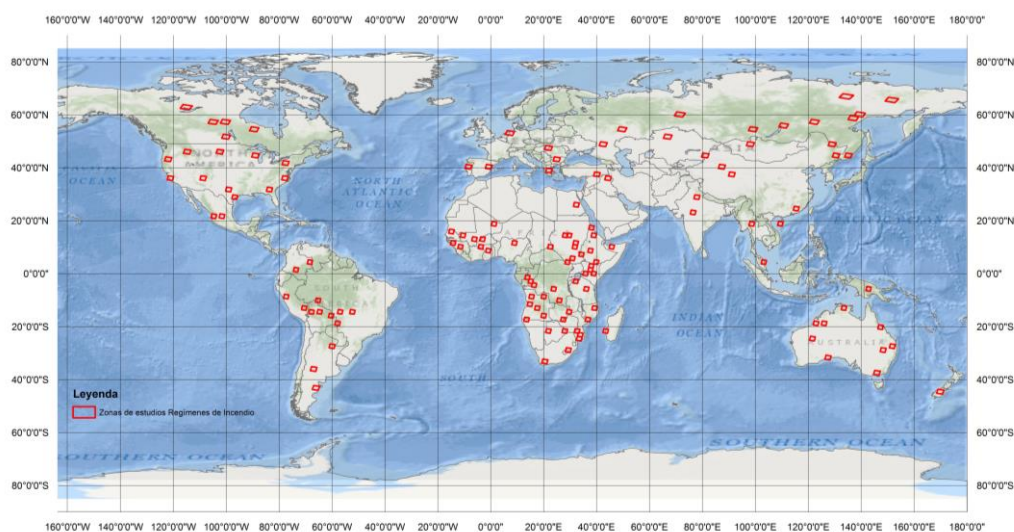
- TM : Banda sensor Landsat TM/ETM+
- NDVI : Normalized Difference Vegetation Index
- MIRBI : Mid-Infrared Burned Index
- NBR : Normalized Burned Ratio
- BAIM : Burned Area Index
- LR : Relación entre bandas

2.2.5 Análisis global de regímenes de área quemada

Se realizó un análisis del nivel de significancia estadística de las zonas de estudio globales con el que se ha buscado determinar si existe o no relación entre el área quemada con las siguientes variables:

- Tipo de bioma,
- Distribución latitudinal y
- Cercanía a sectores poblados.
- Número de habitantes

La información de área quemada generada para cada zona de estudio, utilizando el programa ABAMS, se ordenó en 6 clases de tamaño de manchas quemadas (<10, 10-100, 100-500, 500-1.000 y >1.000 km²). Estas clases, además, se clasificaron por bioma, distancia a centros poblados y franja geográfica cada 20° de latitud. Esta clasificación nos permitió realizar el análisis y comparación de los regímenes de incendios por variable y totales globales de forma más ordenada (Figura N°9).



| Franja Latitudinal | Nº de áreas por franja geográfica |
|--------------------|-----------------------------------|
| 80° N – 60° N | 5 |
| 60° N – 40° N | 25 |
| 40° N – 20° N | 15 |
| 20° N – 0° | 32 |
| 0° – 20° S | 35 |
| 20° S – 40° S | 15 |
| 40° S – 60° S | 2 |
| 60° S – 80° S | 0 |

Figura N° 9. Distribución latitudinal de zonas de estudio.

Para determinar si existe un área de influencia que permita relacionar las características de los regímenes de incendio a cercanía a sectores poblados, como al número de habitantes de cada uno de ellos, se generaron zonas de cobertura (buffer) en rangos de 10, 20, 50 y más de 100 kilómetros de distancias de áreas pobladas hacia cada una de las áreas quemadas generadas en cada una de las 129 zonas.

Para estimar la relación entre el número de habitantes y los regímenes de incendio se clasificó el área quemada por número de habitantes de cada centro poblado en 7 clases:

- Sin habitantes
- menos de 50 mil habitantes,
- entre 50 y 100 mil,
- entre 100 a 250 mil,
- entre 250 y 500 mil,
- entre 500 y 1 millón,
- mayores de 5 millones de habitantes

La información de referencia utilizada de zonas urbanas corresponde a la cobertura vectorial de ciudades de ESRI® de año 2008. Obtenidos de estimaciones históricas, actuales y futuras entre los años 1950 y 2050, relacionado diferentes fuentes de información tanto nacionales como de diferentes organismos (<http://goo.gl/wnR4aG>).

Luego de realizadas las clasificaciones por bioma, franja latitudinal, distancia a zonas pobladas y número de habitantes, se evaluaron los coeficientes de asociación que pudiera existir entre estas variables y el área quemada. Para evaluar estas relación se utilizó el coeficiente de asociatividad ji cuadrado (X^2) que señala la existencia o no de asociación entre dos variables ordinales o nominales (Daniel y Terrell, 1995).

$$\chi^2 = \frac{(n - 1)s^2}{\sigma^2} \quad (9)$$

Donde:

n es el tamaño de la muestra,

s^2 la varianza muestral y

σ^2 la varianza de la población de donde se extrajo la muestra.

Para evaluar los resultados obtenidos de la prueba de χ^2 , utilizamos el coeficiente de contingencia Cramér's V, que nos permite medir el acuerdo estadístico entre dos variables, es una medida de asociación estadística. El coeficiente de Cramér's V es un valor de medida independiente del tamaño de la muestra (Daniel y Terrell, 1995).

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{n(\min[f, c] - 1)}} \quad (10)$$

Donde:

n es el total de casos (número de píxeles totales)

$\min [f, c]$ es el menor valor obtenido entre filas (f) y columnas (c).

El valor de V está entre 0 y 1 y los rangos de valores se pueden interpretar de la siguiente manera (<http://goo.gl/398nm5>):

V = 0: no hay asociación entre las variables analizadas.

V = 0,3: existe una asociación significativa entre las variables analizadas.

V = 0,6: existe una alta asociación entre las variables analizadas.

V = 1: existe una asociación perfecta entre las variables analizadas.

2.4 Resultados y Discusión de Regímenes de incendios

2.4.1 Distribución de área quemada por zona de estudio

El comportamiento de los regímenes de incendios en las zonas de estudio nos ha permitido observar cómo sería la distribución de tamaño de las áreas quemadas por cada tipo de bioma (Tabla N°10). Destaca el tamaño del área quemada en el bioma de bosque boreal donde la media es de 6,45 km² por perímetro; en segundo lugar se encuentra la sabana tropical con una media por perímetro de 0,70 km², por último, en los biomas con una media menor de área quemada por perímetro se observan en bosque templado y tropical con 0,15 y 0,25 km².

Tabla N° 10 Distribución por bioma de área quemada en zonas de estudio durante el año 2008

| Biomos <i>Fire_CCI</i> | Zonas de estudio | Nº de perímetros de área quemada | Área quemada (km ²) | |
|------------------------|------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------|
| | | | Media | Total |
| Otros | 8 | 384 | 0,23 | 89 |
| Bosque Tropical | 22 | 12.504 | 0,25 | 3.171 |
| Bosque Templado | 16 | 1.223 | 0,15 | 186 |
| Bosque Boreal | 14 | 230 | 6,45 | 1.483 |
| Sabana Tropical | 47 | 49.800 | 0,48 | 23.723 |
| Pradera Templada | 15 | 2.522 | 0,79 | 1.893 |
| Bosque Mediterráneo | 7 | 79 | 0,82 | 65 |
| Total | 129 | 66.772 | | 30.610 |

El comportamiento de los regímenes de incendios afecta principalmente a la sabana tropical equivalente al 77% del total de área afectada durante el año 2008. Este resultado es muy similar al estudio de (Stroppiana *et al.*, 2010) que señala que el 73% del área quemada anualmente corresponde a sabana tropical localizada en zonas próximas al ecuador. En un segundo lugar, entre los biomas que se ven más afectados tanto por incendios forestales como agrícolas se encuentra el bosque tropical, equivalente al 10% del área quemada global, praderas con 6% y bosque boreal con el 5%. El 3% restante del total de área quemada se distribuye entre los biomas de bosque mediterráneo y templado (Figura N°10).

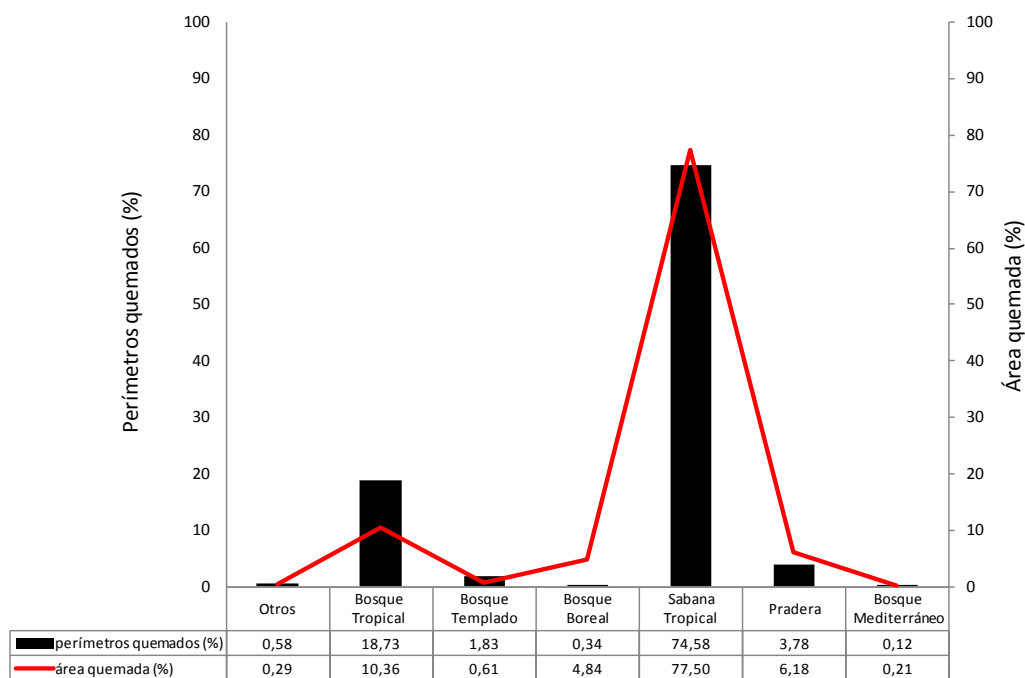


Figura N° 10 Distribución de área quemada y número de perímetros por bioma.

Al observar cómo se distribuye porcentualmente el área quemada por bioma en cada franja latitudinal se concluye que los biomas tropicales presentan una mayor superficie de área quemada en relación a los biomas más templados o fríos (Figura N°10; Tabla N°11). En cuanto a la distribución por biomas, la mayor superficie quemada se localiza entre los 0° y 20° de latitud sur que corresponden principalmente a zonas de sabana tropical, representando el 93% del total de área quemada del año 2008. Una de sus principales causas es que esta franja es una de las más afectadas por cambios de uso de suelo, como es el caso de la Amazonía brasileña, sabana tropical de África Ecuatorial, Asia y Oceanía (Tabla N°11).

En la franja geográfica localizada entre los 40° N y 60° N de latitud los principales usos de suelo afectados son praderas y bosque boreal. En el hemisferio sur la franja latitudinal que se extiende entre los 20° S y 60° S el principal uso de suelo afectado son praderas o suelos agrícolas donde la quema de biomasa es la principal herramienta utilizada para la preparación del suelo para cultivos.

Entre los 0° y 40° de latitud norte la distribución del tamaño de área quemada por incendio es más proporcional en todos los rangos de superficie que se han utilizado en este estudio (Tabla N°11). Esto se debe, principalmente, a lo señalado en el párrafo anterior en lo referente a que estas serían principalmente zonas de uso agrícola que se localizan en el bioma de praderas y sabana templada, donde probablemente las quemadas de limpieza son más frecuentes y controladas.

Tabla N° 11 Distribución porcentual del área quemada por franja latitudinal.

| Franja Latitudinal | Área Quemada (km ²) | Distribución de área quemada por bioma (%) | | | | | | |
|--------------------|---------------------------------|--|-----------------|---------------------|-----------------|----------|-----------------|-------|
| | | Bosque boreal | Bosque templado | Bosque mediterráneo | Bosque tropical | praderas | Sabana tropical | Otros |
| 80° N – 60° N | 550 | 100 | - | - | - | - | - | - |
| 60° N – 40° N | 1.171 | 79 | 8 | - | - | 13 | - | - |
| 40° N – 20° N | 1.523 | - | 2 | 4 | 29 | 2 | 58 | 5 |
| 20° N – 0° | 1.421 | - | - | - | 40 | 1 | 59 | - |
| 0° – 20° S | 22.956 | - | - | - | 7 | 0 | 93 | - |
| 20° S – 40° S | 2.972 | - | 2 | - | 21 | 55 | 22 | - |
| 40° S – 60° S | 16 | - | - | - | - | 100 | - | - |
| 60° S – 80° S | - | - | - | - | - | - | - | - |

Se observa una relación nula entre la cantidad de área quemada y la franja latitudinal, es decir la cantidad de área quemada por cada franja es independiente de esta. En cuanto al tamaño del área quemada utilizado y la franja latitudinal se observa una asociación entre el tamaño del área quemada y la zona en que se distribuye, al obtenerse un valor de χ^2 que es superior (30.127) al valor crítico de la tabla de distribución de este índice (33,196 para 24 grados de libertad) (Tabla N°12), al aplicar el coeficiente de contingencia Cramér's V obtenemos un valor de 0,44 que nos estaría señalando que existe una correlación significativa entre el tamaño del área quemada y la franja latitudinal en que ocurre. Se puede observar en la Tabla N°12 que el área quemada es mayor en franjas latitudinales próximas al ecuador disminuyendo hacia los polos.

En las zonas del hemisferio norte próximas al polo el área quemada se distribuye en pocos perímetros de más de 500 km² cada uno afectando principalmente al bioma de bosque boreal. El tamaño de estos perímetros tanto de Asia como de América del Norte puede que se deba principalmente a la gran cantidad de combustible presente en el terreno (Tabla N°12).

Tabla N° 12 Distribución por Franja Latitudinal del tamaño de área quemada

| Franja Latitudinal | área quemada (km ²) | | | | | Total |
|--------------------|---------------------------------|----------|-----------|-------------|---------|--------|
| | < 10 | 10 – 100 | 100 – 500 | 500 – 1.000 | > 1.000 | |
| 80° N – 60° N | - | - | - | 550 | - | 550 |
| 60° N – 40° N | 41 | 238 | 893 | - | - | 1.171 |
| 40° N – 20° N | 8 | 184 | 418 | 912 | - | 1.523 |
| 20° N – 0° | 25 | 524 | 871 | - | - | 1.421 |
| 0° – 20° S | 18 | 388 | 1.280 | 2.694 | 18.577 | 22.957 |
| 20° S – 40° S | 5 | 176 | 546 | 1.223 | 1.022 | 2.972 |
| 40° S – 60° S | - | 16 | - | - | - | 16 |
| 60° S – 80° S | - | - | - | - | - | - |
| Total | 97 | 1.526 | 2.181 | 5.379 | 19.599 | 30.610 |

2.4.2 Distribución de Área Quemada por cercanía a zonas pobladas

Los biomas correspondientes a bosque mediterráneo y templado, localizados a menos de 50 kilómetros de zonas pobladas y con menos de 250 mil habitantes son los que poseen mayor área quemada. La necesidad de combustibles y el aumento de la demanda de productos alimenticios favorecería la conversión de suelos de uso forestal a suelos de uso agrícola, siendo la principal herramienta de conversión las quemas de biomasa, principalmente en zonas tropicales (Flejzor, 2011) (Tabla N°13).

En cuanto al área quemada por franja latitudinal y distancia a centros poblados (Tabla N°13), la prueba de χ^2 con un valor crítico de 10.497,8 superior al valor de la tabla de distribución de valores críticos para 24 grados de libertad (30,196), el valor de contingencia Cramér's V obtenido para esta prueba de χ^2 es de 0,26 lo que nos indican que el área quemada no existe una relación o esta es poco significativa entre las variables de centros poblados y franja latitudinal.

Tabla N° 13 Área quemada por distancia a zonas urbanas

| Franja Latitudinal | Área Quemada (km ²) según distancia a centros poblados (km) | | | | | Área Quemada Total |
|--------------------------|--|---------|---------|----------|-------|--------------------------|
| | < 10 | 10 – 20 | 20 – 50 | 50 – 100 | >100 | |
| 80° N – 60° N | 550 | - | - | - | 0 | 550 |
| 60° N – 40° N | 4 | 78 | - | 160 | 929 | 1.171 |
| 40° N – 20° N | 530 | - | 974 | 15 | 5 | 1.523 |
| 20° N – 0° | 951 | 1 | 60 | - | 409 | 1.421 |
| 0° – 20° S | 9.636 | 4 | 8.626 | 1.537 | 3.154 | 22.957 |
| 20° S – 40° S | 642 | - | 421 | 785 | 1.124 | 2.972 |
| 40° S – 60° S | - | - | - | - | 16 | 16 |
| 60° S – 80° S | - | - | - | - | - | - |
| Área Quemada Total | 12.313 | 83 | 10.081 | 2.497 | 5.637 | 30.610 |

En cuanto al total de área quemada y número de habitantes del centro poblado más próximo (Tabla N°14), la prueba χ^2 con un valor crítico de 34.864,21 superior al valor de referencia con 36 grados de libertad (43,773). Al aplicar el coeficiente de contingencia de Cramér's V para el valor de χ^2 obtenido, obtenemos un valor de V igual a 0,38 que nos estaría señalando que existe una correlación significativa entre las dos variables analizadas. Esto, posiblemente, quiere decir que zonas con menor número de personas corresponden a zonas agrícolas del bioma pradera y sabana tropical donde ya se ha observado que presentan la mayor superficie de área quemada debido a las limpiezas agrícolas y cambios de uso del suelo. Por el contrario, al aumentar el tamaño de los centros poblados las quemadas de biomasa tenderían a ser más controladas lo que influiría en la disminución del área quemada (Hansen *et al.*, 2007) (Archibald *et al.*, 2012).

Tabla N° 14 Área quemada por Número de habitantes en centros poblados.

| Franja Latitudinal | Área Quemada (km ²) por tamaño de centros poblados (miles habitantes) | | | | | | | |
|-----------------------|---|-----------|--------------|--------------|----------------|------------------|--------------|----------------|
| | < 50 | 50 100 | – 100 250 | – 250 500 | – 500 1.000 | – 1.000 5.000 | – > 5.000 | No poblados |
| 80° N – 60° N | 550 | - | - | - | - | - | - | 0 |
| 60° N – 40° N | 90 | 71 | 4 | - | 3 | 75 | - | 929 |
| 40° N – 20° N | - | 76 | 18 | 434 | 62 | 928 | - | 5 |
| 20° N – 0° | 772 | 66 | 78 | 63 | 1 | 32 | - | 409 |
| 0° – 20° S | 4.787 | 602 | 12.975 | 82 | 308 | - | 550 | 3.654 |
| 20° S – 40° S | 0 | 966 | 817 | 90 | 62 | 2 | - | 1.034 |
| 40° S – 60° S | - | - | 16 | - | - | - | - | - |
| 60° S – 80° S | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Total | 6.198 | 1.781 | 13.909 | 668 | 436 | 1.037 | 550 | 6.031 |

En Figura N°11 se han representado las variables: franja latitudinal, número de habitantes y proximidad a zonas pobladas, y se han distribuido los diferentes biomas en cada uno de sus ejes de acuerdo a la importancia de cada una de estas variables en la distribución del área quemada. Se observa que en los biomas tropicales inciden tanto la cercanía a zonas pobladas, como también la franja latitudinal en que ocurren, principalmente donde el área de cada perímetro quemado es mayor a los 10 km². Para los bosques templados tiene mayor relevancia la cercanía a zonas pobladas y la franja latitudinal. Para los bosques mediterráneos no hay una de las variables que tenga una mayor incidencia en el comportamiento del fuego, sino que se podría considerar que las variables número de habitantes y proximidad a zonas pobladas tienen igual relevancia. Finalmente en el bioma de bosque boreal el área quemada depende principalmente de la franja latitudinal siendo mayor en zonas próximas a sectores poblados.

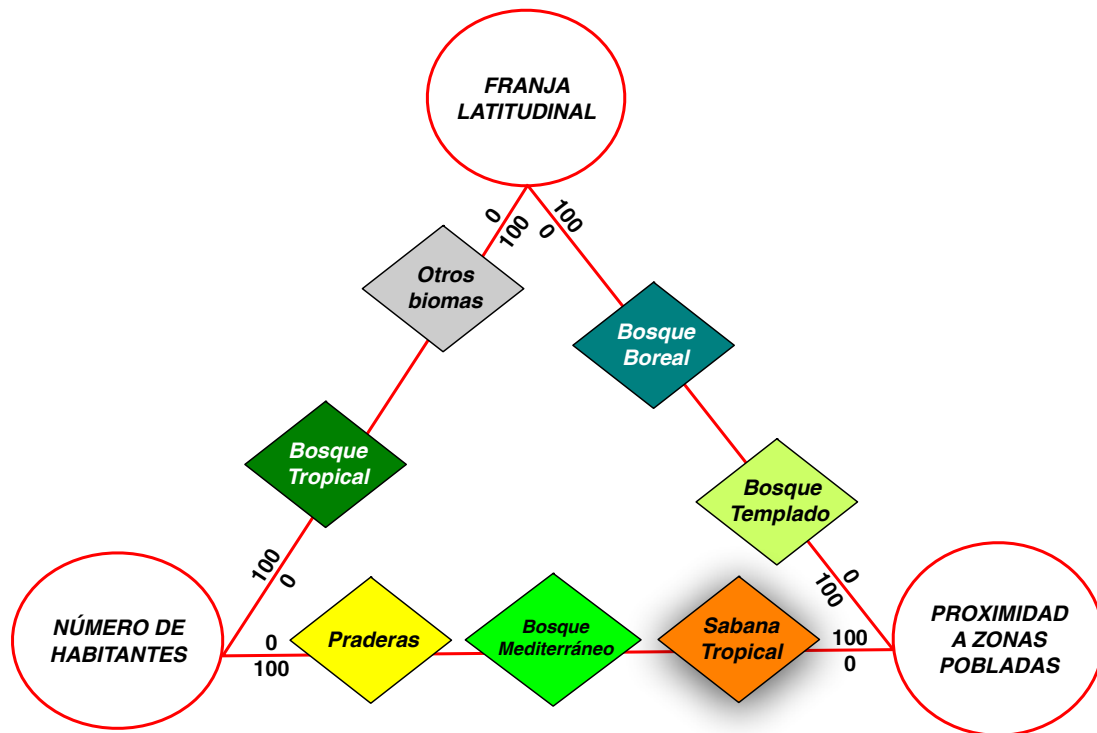


Figura N° 11 Distribución de área quemada por bioma, por peso de variable estudiada

CAPÍTULO 3:
INTERCOMPARACIÓN POR ZONAS DE
ESTUDIO DE PRODUCTOS GLOBALES DE
ÁREA QUEMADA

3 Intercomparación por zonas de estudio de productos de área quemada

3.1 Introducción

En este capítulo se detalla la metodología utilizada y resultados obtenidos de la intercomparación de productos de área quemada. La intercomparación nos permitirá determinar los niveles de acuerdo y desacuerdo observados entre los diferentes productos de área quemada, a través, de la determinación de los niveles de correlación y los índices Kappa y Sörensen-Dice. Globalmente son escasos los estudios relacionados con intercomparación de productos de área quemada destacando los estudios de Chang y Song (2009), Boschetti *et al.*, (2004) y Giglio *et al.*, (2010). El primer estudio realizó una intercomparación entre los productos L3JRC y MCD45A1 entre los años 2000 y 2007, comparando la distribución espacial y temporal de ambos productos y obtuvo como resultado que el producto L3JRC detecta en promedio similar cantidad de área quemada durante todo el año a diferencia del producto MCD45A1 que presenta en los periodos estivales una mayor concentración de área quemada de ambos hemisferios. Para los siete años de estudios el producto L3JRC sobrestimó el área quemada en más de un 20% con respecto al producto MCD45A1 en todos los continentes.

El segundo estudio de Boschetti *et al.*, (2004) comparó los productos GBA2000, GLOBSCAR y la base de incendios activos del Atlas Mundial de Incendios (WFA) durante el año 2000, concluyendo que existen altas discrepancias entre los tres productos, no solamente en zonas con gran cantidad de biomasa, influyendo en las estimaciones de flujos de gases atmosféricos, por lo que estos productos deberían ajustar sus algoritmos.

El tercer estudio de Giglio *et al.*, (2010) comparó los productos GFED2, L3JRC, GLOBCARBON y MCD45A1, observando grandes diferencias entre los productos en todos las coberturas de suelo, destacando que el producto L3JRC es el que sobrestima mayor cantidad de área quemada con respecto a GFED2 y resultados muy similares se obtuvieron con el producto GLOBCARBON, y el producto que obtuvo resultados similares a GFED2 fue MCD45A1. Además, este estudio señala que el producto global de área quemada MCD45A1, generado desde información obtenida desde los sensores

MODIS Terra y Aqua, presenta diferencias entre el área quemada estimada y la realidad de campo produciéndose subestimaciones en regiones de sabana tropical y bosque boreal. Como posible causa de estas subestimaciones se señalan al tipo de cobertura vegetal y a la cantidad de nubes que impiden determinar con mejor precisión el área quemada en estas zonas.

Se han utilizado los productos *Fire_CCI* como los de referencia debido a que es el producto que se desea intercomparar con el resto de productos y evaluar sus resultados. Como zonas de intercomparación se han utilizado 10 áreas de estudio distribuidas en los cinco continentes. Estas zonas están distribuidas en sectores que estadísticamente presentan una alta ocurrencia de incendios forestales y agrícolas. En esta investigación se realizó la intercomparación en estas zonas de estudio al no estar finalizada la primera versión global de los productos *Fire_CCI*.

Los productos intercomparados fueron *Fire_CCI* (*Fusionado, MERIS, VGT y (A)ATSR*). GLOBCARBON, L3JRC, GeoLand2, MCD45A1 y MCD64A1. No se consideraron en este estudio los productos GBA2000 y GLOBSCAR debido a que solamente cuentan con información en el año 2000 (Tabla N°15).

Tabla N° 15 Resolución espacio – temporal y años de cobertura de productos de área quemada evaluados.

| Producto Global | Resolución | | Años de cobertura |
|-----------------|--------------|----------|-------------------|
| | Espacial (m) | Temporal | |
| GLOBSCAR | | | 2000 |
| GBA2000 | | | |
| L3JRC | 1.000 | | 2001 – 2006 |
| GLOBCARBON | | diaria y | 1999 – 2007 |
| GeoLand2 | | mensual | 2000 – 2009 |
| MCD45A1 | | | 2002 – 2009 |
| MCD64A1 | 500 | | 2001 – 2009 |
| <i>Fire_CCI</i> | 300-1000 | | 1999 – 2009 |

Se ha evaluado tanto la sobre como la subestimación de los seis productos globales con respecto a los productos *Fire_CCI*. Para el estudio de intercomparación de productos de área quemada se utilizó la información generada por cada uno de los productos entre los años 1999 y 2009, periodo de tiempo en el cual la mayoría de los productos estudiados presentan información. Este estudio busca determinar la calidad espacial y temporal de cada uno de los productos.

Para determinar en qué zonas estas diferencias son mayores y menores se han realizado dos intercomparaciones: una primera intercomparación ha permitido evaluar la relación espacial y temporal de los productos de área quemada con relación a los productos *Fire_CCI*; la segunda intercomparación nos ha permitido determinar si existe sobrestimación o subestimación del área quemada detectada en cada producto a nivel espacial y temporal. La Figura N°12 nos presenta esquemáticamente la metodología utilizada para la intercomparación de productos de área quemada .

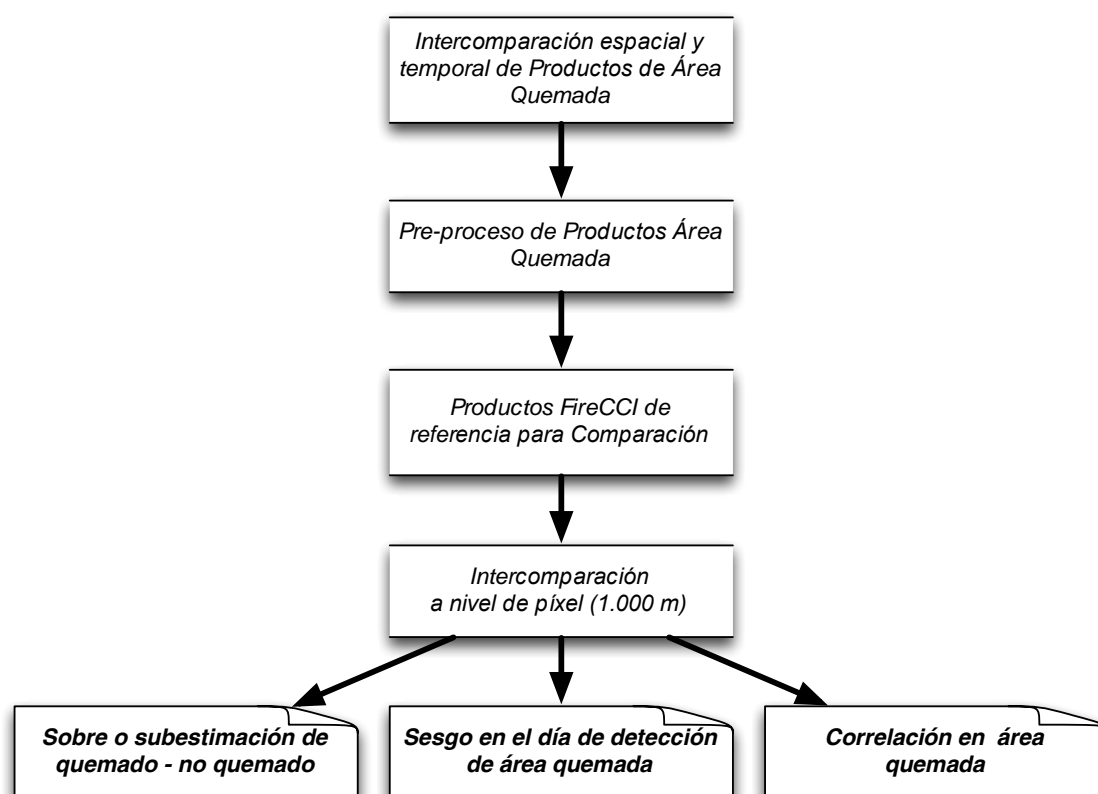
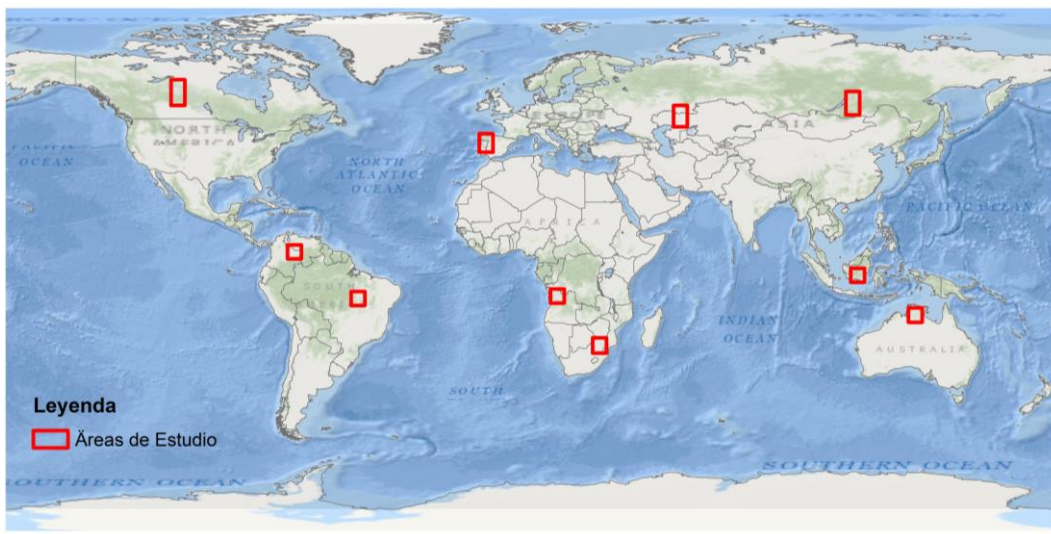


Figura N° 12 Flujo metodológico de intercomparación de productos de área quemada.

3.2 Pre-proceso de los productos de área quemada

Como se observa en la Tabla N°15 existen diferencias en la resolución espacial entre los productos de área quemada que se han estudiado, por lo que antes de realizar la intercomparación, se ha homogeneizado su resolución espacial a 1 kilómetro utilizando el método del vecino más cercano, con el fin de que sus resultados sean comparables entre sí.

Para facilitar el procesamiento y análisis de los datos de los seis productos de área quemada se seleccionaron 10 áreas de estudio de 500x500 km², distribuidas en los diferentes continentes y que intentan representar las zonas más comúnmente afectadas por incendios a nivel global. Estas zonas se han utilizado, además, para ajustar el algoritmo de los tres productos área quemada generado por el proyecto *Fire_CCI* (Figura N°13). Cada zona se ha georreferenciado en coordenadas UTM con datum WGS84 (Tabla N°16).



| Área de Estudio | Continente | País | Bioma |
|-----------------|-------------------|-----------------|---------------------|
| SS01 | América del Norte | Canadá | Bosque Boreal |
| SS02 | América del Sur | Colombia | Sabana Tropical |
| SS03 | América del Sur | Brasil | Sabana Tropical |
| SS04 | Europa | Portugal–España | Bosque Mediterráneo |
| SS05 | África | Angola | Sabana Tropical |
| SS06 | África | África del Sur | Sabana Tropical |
| SS07 | Asia | Kazajistán | Praderas templadas |
| SS08 | Asia | Rusia | Bosque Boreal |
| SS09 | Oceanía | Borneo | Bosque Tropical |
| SS10 | Oceanía | Australia | Sabana Tropical |

Figura N° 13 Distribución de zonas de intercomparación de productos área quemada.

Tabla N° 16 Coordenadas UTM con datum WGS84 de cada una de las zonas de estudios.

| Zona de estudio | Coordenadas UTM (datum WGS84) | | | | Zona UTM | Superficie (km ²) |
|-----------------|-------------------------------|----------|---------|---------|----------|-------------------------------|
| | X máx. | Y máx. | X mín. | Y mín. | | |
| SS01 | 244800 | 6855100 | 481800 | 5915100 | 13 V | 222.780 |
| SS02 | 184600 | 887000 | 680600 | 384000 | 19 N | 249.488 |
| SS03 | 479800 | 9211300 | 975800 | 8701300 | 22 L | 252.960 |
| SS04 | 467100 | 4886900 | 858100 | 4223900 | 29 T | 259.233 |
| SS05 | 368900 | 9296200 | 868900 | 8789200 | 33 L | 253.500 |
| SS06 | 555400 | 7541200 | 1018400 | 6979200 | 35 J | 260.206 |
| SS07 | 294100 | 5919300 | 607100 | 5141300 | 40 U | 243.514 |
| SS08 | 442372 | 6416501 | 751372 | 5566501 | 49 U | 262.650 |
| SS09 | 544000 | 10066000 | 1090000 | 9519000 | 49 C | 298.662 |
| SS10 | 2300 | 8613600 | 491300 | 8095600 | 53 L | 253.302 |

Los productos GLOBCARBON, L3JRC, GEOLAND2 y *Fire_CCI* presentan una imagen por cada mes del año, cortados de acuerdo a las coordenadas de la Tabla N°17. Para esto se procesaron en total 800 imágenes para generar 75 imágenes anuales las cuales se ajustaron a las coordenadas señaladas, en un periodo de tiempo de 480 horas.

Para los productos MCD45A1 y MCD64A1 previo ajuste a las coordenadas de las zonas de estudio se realizó el mosaico con las imágenes que cubren cada zona de estudio. Las ventanas utilizadas de los productos MCD4A1 y MCD64A1 se presentan en la Tabla N°17.

Los productos MODIS de área quemada se organizan en ventanas de 10°x10° para el producto MCD45A1 y 1°x1° para el producto MCD64A1, formando un sistema de referencia mundial. De esta forma, cualquier punto sobre la superficie terrestre puede ubicarse con la intersección de filas (horizontal) y columnas (vertical) de un plano cartesiano. Para nuestra zona de estudio ha sido preciso descargar las ventanas correspondientes.

El Producto MCD45A1 de MODIS posee 24 ventanas de diferentes dimensiones con el objetivo de hacer más fácil su uso a nivel regional; de ellas se seleccionaron las 11 áreas que cubren las 10 zonas de estudio. Cada ventana posee una imagen por mes y año y a partir de ellas se elaboró una imagen anual, agrupándose en una sola banda las 12 imágenes correspondientes a los meses de un año. Luego a partir de estas nuevas imágenes se realizó el mosaico de cada zona global el cual se ha cortado de acuerdo a los límites de la Figura N°13 y Tabla N°16.

El producto MCD64A1 posee 220 ventanas y cada una posee una imagen por mes y cada año, de estas se seleccionaron las 26 ventanas que cubren las 10 zonas de la Tabla N° 18. Este producto se entrega en coordenadas sinusoidales y en formato HDF, por lo que antes de realizar la imagen anual para cada ventana y posterior mosaico como se realizó con el producto MCD45A1 se han debido convertir a formato IMG. Posteriormente se elaboró el mosaico en coordenadas sinusoidales y posteriormente han sido transformadas a coordenadas UTM con datum WGS84 (Tabla N°17).

Los productos MODIS y MERIS, 500 m y 300 m respectivamente, se re proyectaron a una de resolución de 1.000 metros para poder ser intercomparados con el resto de productos de área quemada. Utilizándose el método del vecino más cercano.

Tabla N° 17 Cobertura de zonas de estudio para los productos MODIS de área quemada.

| Área de Estudio | Ventanas de producto MODIS | |
|-----------------|----------------------------|--------------------------------|
| | MCD45A1 | MCD64A1 |
| SS01 | win02 | h11v03, h12v02, h12v03, h13v02 |
| SS02 | win05 | h10v08, h11v08 |
| SS03 | win05, win06 | h12v09, h12v10, h13v09, h13v10 |
| SS04 | win08 | h17v04, h17v05 |
| SS05 | win12 | h19v09, h19v10 |
| SS06 | win13 | h20v11, h21v11 |
| SS07 | win15 | h21v04, h21v05, h22v04 |
| SS08 | win16 | h23v03, h24v03, h25v03 |
| SS09 | win19 | h29v08, h29v09 |
| SS10 | win20 | h30v10, h31v10 |

El producto L3JRC presenta mensualmente la información de área quemada considerando el 1 de abril como el primer día del año y el 31 de marzo como el día 365 o último día del año, por lo que se ha reordenado este producto de tal forma de que sus resultados se presenten entre el 1 de enero como día uno y 31 de diciembre como día 365 (del calendario anual). Este reordenamiento se ha realizado a través de un algoritmo programado en Matlab®.

La información de área quemada del producto GLOBCARBON se obtiene a partir de la combinación de tres algoritmos que corresponden a los sensores utilizados para calcular el área quemada; como se encuentra en un formato diferente al de día del año y área quemada en kilómetros cuadrados, se ha programado en PCI Geomática® un algoritmo que ha entregado los datos en el mismo formato del resto de los productos. El programa ha sido ajustado para que sólo considere el píxel de área quemada cuando este haya sido detectado en los tres algoritmos utilizados por este producto. La programación se realizó en PCI Geomática® (Stijn Hantson comunicación personal).

El producto GEOLAND2 posee seis ventanas globales que corresponden a los continentes de América del Norte, América del Sur, Europa, África, Asia y Oceanía. Al igual que los productos MCD45A1 y MCD64A1 posee una imagen por mes y año. Desde estas imágenes se elaboró una imagen anual, agrupándose en una sola banda las 12 imágenes correspondientes a los meses de cada año, las cuales, posteriormente, se cortaron de acuerdo a las coordenadas de cada área de estudio (Tabla N°17).

El producto GLOBCARBON fue facilitado por el Dr. Stephen Plummer de la ESA. La información global de los productos L3JRC y Geoland2 fue facilitada por el Dr. Kevin Tansey de la Universidad de Leicester. Es importante mencionar que en esta tesis doctoral ha sido la primera vez que se ha realizado la intercomparación del producto GEOLAND2 con otros productos de área quemada.

En la Figura N°14 se presenta como ejemplo la serie de productos globales del año 2006 para la zona de estudio de la península ibérica (SS04).

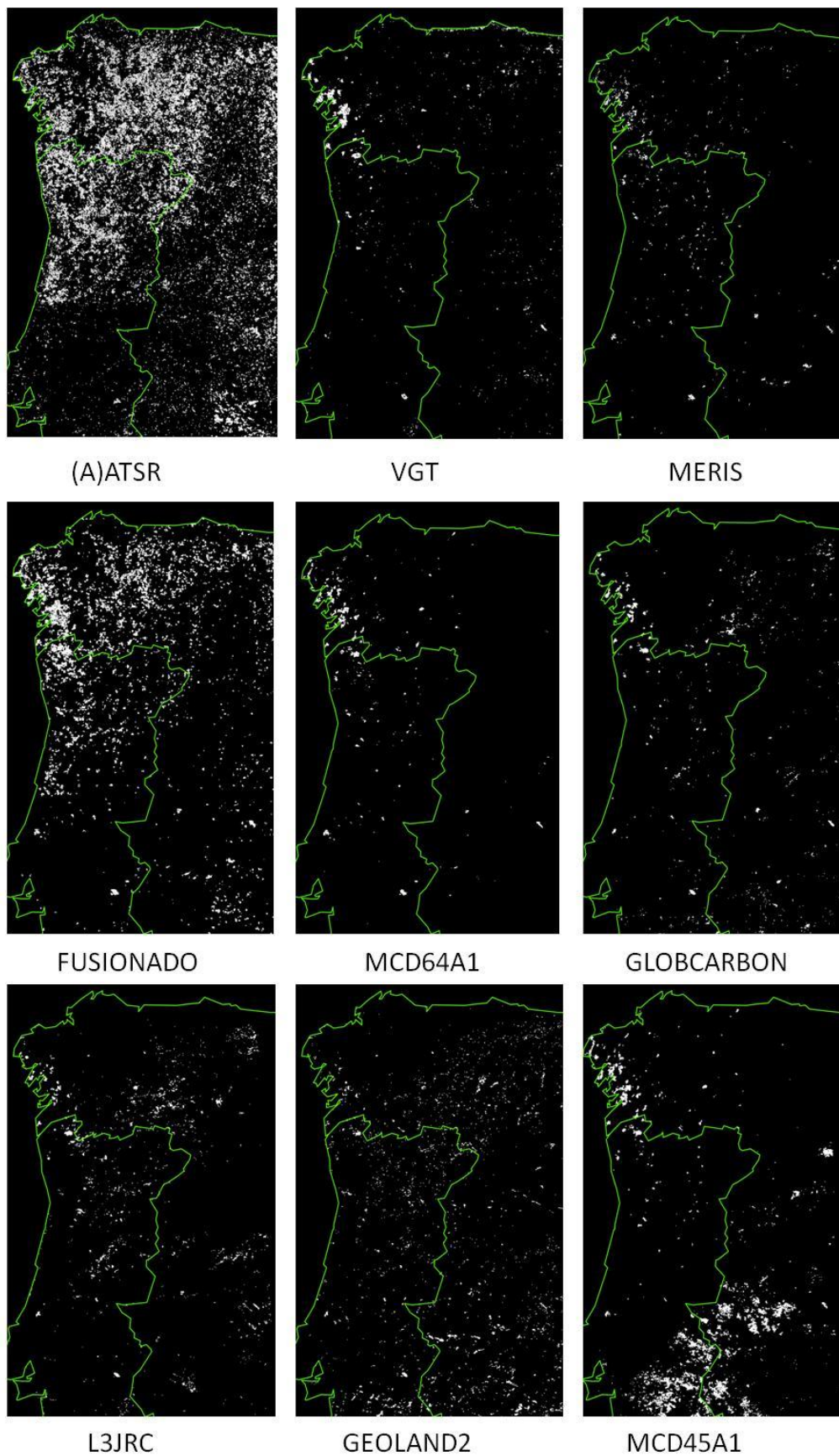


Figura N° 14. Productos globales de área quemada intercomparados en zona de estudio SS04, en blanco se observan los píxeles quemados (año 2006)

3.3 Proceso de intercomparación de productos de área quemada

La intercomparación de los diferentes productos de área quemada se realizó considerando como de referencia los productos *Fire_CCI*; *Fusionado*, *MERIS* y *VGT*, a los que se les determinó su comportamiento con respecto a los 5 productos existentes, además de la intercomparación entre ellos (Tabla N°18).

El producto (A)ATSR no ha sido utilizado como producto de intercomparación debido a la generación de imágenes sin información para una serie de años. Al menos en 4 zonas de estudio el algoritmo utilizado no ha detectado área quemada, lo que influye en la calidad de este producto, al subestimar sus resultados con respecto al resto de productos de área quemada.

Se han determinado los valores de sobre y subestimación de cada una de las relaciones y se han calculado diferentes índices estadísticos que se verán con más detalle en los puntos siguientes, tanto a nivel global como por área de estudio.

Tabla N° 18 Intercomparaciones analizadas

| Productos de área quemada | <i>Fusionado</i> | <i>MERIS</i> | <i>VGT</i> |
|---------------------------|------------------|--------------|------------|
| GLOBCARBON | X | X | X |
| L3JRC | X | X | X |
| GEOLAND2 | X | X | X |
| MCD45A1 | X | X | X |
| MCD64A1 | X | X | X |
| <i>MERIS</i> | X | | X |
| <i>VGT</i> | X | X | |
| (A)ATSR | X | X | X |
| <i>Fusionado</i> | | X | X |

Se realizaron dos tipos de intercomparación, una cualitativa y otra cuantitativa; la primera nos ha permitido evaluar las similitudes y diferencias de los productos de área quemada con respecto a los productos *Fire_CCI*, con relación a detectar o no el área quemada y las diferencias en el día de detección de ella; la segunda intercomparación nos ha permitido determinar la existencia de similitudes y diferencias en el área quemada señalada por cada producto con respecto a los productos *Fire_CCI*.

3.3.1 Intercomparación Cualitativa

Para determinar las diferencias y similitudes entre los cinco productos de área quemada y los de referencia se realizaron diferentes análisis estadísticos a partir de los resultados entregados a nivel de píxel. Para ello, se generó para cada producto una nueva banda en formato binario del área quemada (donde 1 es quemado y 0 es no quemado).

Tanto para las diferencias entre píxeles quemados y no quemados como en las correspondiente a la fecha de detección del área quemada se han generado mapas por zona de estudio para cada una de las intercomparaciones.

Esto nos ha permitido, junto con el análisis de los indicadores estadísticos, determinar las zonas con mayores y menores diferencias en la estimación de área quemada entre productos y sesgo en el día de detección de esta.

La matriz de confusión utilizada en la intercomparación de los diferentes productos de área quemada nos ha permitido aplicar las diferentes variables estadísticas utilizadas y entender la distribución de los píxeles quemados y no quemados en cada zona de estudio (Tabla Nº19).

Tabla Nº 19 Matriz de acuerdo para intercomparación de productos de área quemada

| Producto global de área quemada | Producto <i>Fire_CCI</i> | | Total |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------|
| | Píxel quemado | Píxel no quemado | |
| Píxel quemado | P ₁₁ | P ₁₂ | P ₁₊ |
| Píxel no quemado | P ₂₁ | P ₂₂ | P ₂₊ |
| Total | P ₊₁ | P ₊₂ | P=1 |

Debido a que no es posible saber qué producto de área quemada posee mayor exactitud con la realidad de terreno, este estudio se ha centrado en determinar las concordancias o similitudes del producto *Fire_CCI* con los productos ya existentes. Para ello, se han calculado dos índices de concordancia o similitud, como son los índices Kappa (Cohen 1960) y Sörensen-Dice (Sörensen, 1948).

Los índices de similitud nos permiten medir la existencia de semejanzas entre dos grupos de datos, y se basan en el criterio de que mientras mayor sea el número de datos similares entre ambos grupos mayor será su similitud (Murguía y Rojas, 2001).

Se ha calculado para el píxel quemado y no quemado el índice Kappa, que es un índice de concordancia entre el valor observado (producto de referencia) y el estimado (producto de intercomparación). generando valores entre 0 y 1 que nos indica que no existe concordancia o que hay total concordancia respectivamente (Cohen, 1960).

$$\kappa = \frac{p_{+1} - p_{1+}}{1 - p_{1+}} \quad (10)$$

Donde:

P_{+1} es la proporción de valores observados (producto de área quemada de referencia) y P_{1+} es la proporción de valores esperados (producto de área quemada que se ha intercomparado).

Al momento de interpretar los valores del índice kappa se adoptó una escala de concordancia diseñada por Landis y Koch (1977), que nos ha permitido determinar el nivel de calidad de las intercomparaciones entre los diferentes productos de área quemada (Tabla N°20). Esta escala ha sido utilizada también para evaluar la calidad de los resultados obtenidos con el índice Sörensen-Dice.

Tabla N° 20 Valoración del Índice Kappa y Sörensen-Dice (Landis y Koch (1977))

| Índice (%) | Nivel de concordancia |
|------------|-----------------------|
| < 20 | Pobre |
| 21 – 40 | Débil |
| 41 – 60 | Moderado |
| 61 – 80 | Bueno |
| 81 – 100 | Muy Bueno |

El coeficiente de similitud o índice Sörensen-Dice utiliza en su cálculo los valores de omisión y comisión (valores negativos y positivos); estos nos permite ajustar la calidad de la intercomparación entre los productos *Fire_CCI* y el resto de los productos de área quemada (Sörensen, 1948) (Tabla N°20).

$$S(x_1, x_2) = \frac{2p_{11}}{2p_{11} + p_{12} + p_{21}} \quad (11)$$

Donde:

“ p_{11} ” es el área quemada observada tanto en el producto de referencia como en el que se ha intercomparado (producto X_1 y X_2 respectivamente). “ p_{12} ” es el área quemada observada en el producto X_2 y “ p_{21} ” es el área quemada observada en el producto X_1 . Los valores varían entre 1 y 0, siendo 1 la máxima similitud.

Para determinar el sesgo de días de detección de área quemada se calculó el sesgo o nivel de concordancia (BIAS) del día de detección entre los productos con respecto al valor de referencia; esto se realizó tanto global como por zona de estudio (Beverton y Holt, 1956). El cálculo del sesgo ha permitido determinar si existe o no predisposición de cada uno de los productos de área quemada a sobre o subestimar la fecha de detección del área quemada con respecto al producto *Fire_CCI*.

$$Sesgo [p_{11}] = E[p_{11}] - p_{12} = E[p_{11} - p_{12}] \quad (1)$$

Donde:

$E[]$ es el valor esperado de la distribución área quemada y p son los parámetros analizados (producto global de referencia y con el cual se ha realizado la intercomparación). Mientras los valores resultados sean más cercanos a cero el sesgo es mínimo o no existe.

Se evaluaron las diferencias entre los productos globales a nivel temporal dentro de un año. Con esto se ha buscado corroborar los estudios que señalan que la mayor cantidad de área quemada se origina los meses de agosto y diciembre en los hemisferios sur y norte, respectivamente, señalándose también que algunos de los productos de área quemada subestiman estos resultados, homogenizando la información de área quemada a nivel anual entre los meses de abril y octubre (Anaya y Chuvieco, 2010; Chang y Song, 2010; Giglio *et al.*, 2010; Roy y Boschetti, 2009).

Para determinar el nivel de acuerdo entre los productos *Fire_CCI* y los cinco productos de área quemada que se han intercomparado se calculó la precisión global (*Overall Accuracy PG*) y la sobre (Se) y subestimación (Su) de los resultados con respecto al producto de referencia, lo que ha permitido determinar qué porcentaje del área quemada detectada por los diferentes productos globales es omitida o estimada en cada uno de ellos en relación a los productos *Fire_CCI*.

Precisión global (PG): nos indica el nivel de acuerdo en la determinación común en las dos categorías (quemado y no quemado) en relación al total de la zona de estudio analizada:

$$PG = \frac{p_{11} + p_{22}}{p_{11} + p_{12} + p_{21} + p_{22}} \quad (13)$$

Donde:

p_{11} = píxel quemado detectado en ambos productos.

p_{22} = píxel no quemado detectado en ambos productos

p_{12} = píxel quemado detectada sólo un producto.

p_{21} = píxel no quemado detectado sólo en un producto.

Sobrestimación (Se): son los píxeles quemados detectados solamente en los productos *Fire_CCI* y no en los productos con los cuales se ha intercomparado.

$$Se = \frac{p_{+1} - p_{11}}{p_{+1}} \quad (14)$$

Donde:

p_{11} = total píxeles quemados, detectados en ambos productos.

p_{+1} = total de píxeles quemados detectado en productos *Fire_CCI*

Subestimación (Su): son los píxeles quemados no detectados en los productos *Fire_CCI*, pero si en los productos con los cuales se ha intercomparado.

$$Su = \frac{p_{1+} - p_{11}}{p_{1+}} \quad (15)$$

Donde:

p_{11} = total píxeles quemados, detectados en ambos productos.

p_{1+} = total de píxeles quemados detectado en productos de intercomparación

Para observar y analizar estos resultados se han desarrollado diagramas de caja para ver y analizar la distribución en las distintas zonas de estudio. A partir de este análisis se determinaron tendencias espaciales entre el área quemada y zonas donde ocurren.

3.3.2 Intercomparación Cuantitativa

Con esta intercomparación se han determinado las diferencias en la estimación del total de área quemada generada por cada producto en relación con las estimaciones de los productos *Fire_CCI* de referencia.

Se ha calculado el coeficiente de determinación (r^2) para determinar se existe una relación entre el área quemada estimada en cada producto global intercomparado con los productos *Fire_CCI*, obtenido de la suma de todas las zona de estudio. Esto se realizó para evaluar si los valores de correlación varían entre zonas de estudio o se mantienen en todo el planeta.

$$r^2 = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (16)$$

Donde:

σ_{XY} es la covarianza de X, Y (producto global de referencia y producto global intercomparado respectivamente). σ_X y σ_Y es la desviación típica de la variables X e Y, respectivamente.

3.4 Resultados y Discusión de la intercomparación por zonas

La distribución de las zonas globales de estudio y el bioma donde se encuentran se presenta en la Tabla N°20. Las cubiertas vegetales más representadas son las tropical, tanto bosque como sabana, luego se encuentra el bosque boreal, mediterráneo y praderas templadas. Esto permite destacar la calidad de los diferentes productos de área quemada en los biomas más relevantes en área quemada analizados en la primera parte de la presentación de los Resultados y Discusión.

Es importante señalar que el producto *MERIS* no cuenta con información en la zona de estudio SS08, para ninguno de los cinco años cubiertos por este sensor (2005 – 2009).

3.4.1 Intercomparación Espacial

Para cada zona de estudio se realizó primero una comparación del área quemada detectada, calculándose cuántos píxeles eran detectados por todos o algunos de los productos estudiados. Para facilitar la observaciones se realizaron dos comparaciones de los productos *Fire_CCI*; una con respecto a los productos europeos de área quemada (GEOLAND2, L3JRC y GLOBCARBON) y la segunda con respecto a los productos MODIS (MCD45A1 y MCD64A1). Como ejemplo en las Figuras comprendidas entre la N°15 y la N°24 se presentan para cada zona de estudio un sector representativo del área quemada detectada por el producto *MERIS* y los productos europeos y MODIS, debido a que este producto obtuvo las mejores relaciones con ambos grupos de datos (Tabla N°21). En cada figura se representa cuántos productos de área quemada detectan cada píxel quemado (los colores en que se clasifican los

píxeles detectados por uno o más productos son; azul: 1 producto; verde: 2 productos; rojo: 3 productos y amarillo 4 productos).

Los porcentajes totales de detección de cada píxel por uno o más productos de área quemada con relación a los productos *Fire_CCI* se pueden observar en la Tabla N°21

Tabla N° 21. Porcentaje total para los 11 años de estudio de píxeles de área quemada detectados por los productos *Fire_CCI*, Europeos y MODIS

| Zona de Estudio | N° productos por píxel | % píxeles detectados por productos europeos y <i>Fire_CCI</i> | | | % píxeles detectados por productos MODIS y <i>Fire_CCI</i> | | |
|-----------------|------------------------|---|-----|-----------|--|-----|-----------|
| | | MERIS | VGT | FUSIONADO | MERIS | VGT | FUSIONADO |
| SS01 | 1 | 84 | 86 | 85 | 43 | 60 | 74 |
| | 2 | 12 | 12 | 12 | 41 | 34 | 16 |
| | 3 | 3 | 2 | 3 | 16 | 6 | 10 |
| | 4 | 1 | 0 | 0 | | | |
| SS02 | 1 | 83 | 84 | 81 | 82 | 87 | 88 |
| | 2 | 16 | 16 | 16 | 16 | 13 | 11 |
| | 3 | 3 | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| | 4 | 0 | 0 | 0 | | | |
| SS03 | 1 | 83 | 73 | 89 | 76 | 74 | 84 |
| | 2 | 11 | 21 | 8 | 17 | 22 | 12 |
| | 3 | 5 | 6 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| | 4 | 1 | 0 | 0 | | | |
| SS04 | 1 | 84 | 85 | 93 | 82 | 84 | 95 |
| | 2 | 10 | 9 | 5 | 10 | 9 | 3 |
| | 3 | 4 | 4 | 1 | 8 | 7 | 2 |
| | 4 | 2 | 2 | 1 | | | |
| SS05 | 1 | 51 | 41 | 58 | 47 | 47 | 51 |
| | 2 | 20 | 24 | 16 | 32 | 33 | 29 |
| | 3 | 17 | 21 | 14 | 21 | 20 | 20 |
| | 4 | 12 | 14 | 12 | | | |
| SS06 | 1 | 70 | 72 | 79 | 56 | 62 | 70 |
| | 2 | 19 | 19 | 12 | 26 | 27 | 17 |
| | 3 | 10 | 9 | 9 | 18 | 11 | 13 |
| | 4 | 1 | 0 | 0 | | | |
| SS07 | 1 | 61 | 63 | 66 | 56 | 65 | 53 |
| | 2 | 25 | 26 | 21 | 26 | 25 | 33 |
| | 3 | 12 | 10 | 11 | 18 | 10 | 14 |
| | 4 | 2 | 2 | 2 | | | |
| SS08 | 1 | - | 87 | 67 | - | 65 | 53 |
| | 2 | - | 12 | 25 | - | 25 | 33 |
| | 3 | - | 1 | 7 | - | 10 | 14 |
| | 4 | - | 0 | 1 | | | |
| SS09 | 1 | 95 | 97 | 98 | 62 | 77 | 88 |
| | 2 | 5 | 2 | 2 | 23 | 16 | 6 |
| | 3 | 1 | 1 | 0 | 15 | 7 | 6 |
| | 4 | 0 | 0 | 0 | | | |
| SS10 | 1 | 42 | 38 | 50 | 29 | 32 | 30 |
| | 2 | 24 | 26 | 19 | 34 | 36 | 26 |
| | 3 | 26 | 27 | 24 | 37 | 32 | 44 |
| | 4 | 8 | 9 | 7 | | | |

La serie de imágenes comprendidas entre las Figuras N°15 y N°24 nos permiten observar las diferencias que existen en la detección de un mismo píxel por los diferentes productos de área quemada. Estas diferencias son mayores al comparar el producto MERIS con los productos GLOBCARBON, L3JRC y GEOLAND2 que con los productos MCD45A1 y MCD64A1, lo que estaría señalando que el algoritmo de MERIS presentaría una mejor concordancia con los productos MODIS. Los algoritmos de los productos europeos estarían generando ruido al momento de estimar el área quemada, lo que se puede observar en esta serie de figuras mostrando píxeles quemados en zonas donde el resto de los productos no detectan estos mismos píxeles como afectados por incendios. Diferencias que se acrecientan en zonas boreales (SS01 y SS08, Figuras N°14 y N°22 respectivamente), las que se hacen más evidentes en la zona SS08 donde no se cuenta con información del producto MERIS. En las praderas templadas (SS07, Figura N°21) se observa similar tendencia que las zonas boreales, disminuyendo en zonas de sabanas tropicales de África y Oceanía (SS05 y SS06 en África y SS10 en Oceanía, Figuras N°19, N°20 y N°24 respectivamente) donde la mayoría de los productos detectarían similar área quemada. Este comportamiento no se observa en el resto de zonas de estudio localizadas en sabanas tropicales localizadas en América del Sur (SS02 y SS03, Figuras N°15 y N°16 respectivamente) como en la zona de bosques tropicales del continente asiático (SS09, Figura N°23), donde los porcentajes de concordancia entre los píxeles de área quemada detectadas por más de un producto son bajos (menos del 20%, Tabla N°21). Probablemente una de las posibles causas de la poca relación entre los píxeles detectados por más de un producto se podría deberse a la gran cantidad de cobertura nubosa que incide en estas diferencias. Estas diferencias inciden en los bajos porcentajes de los índices de concordancia Kappa y Sørensen-Dice que se evalúan en las siguientes secciones de esta investigación.

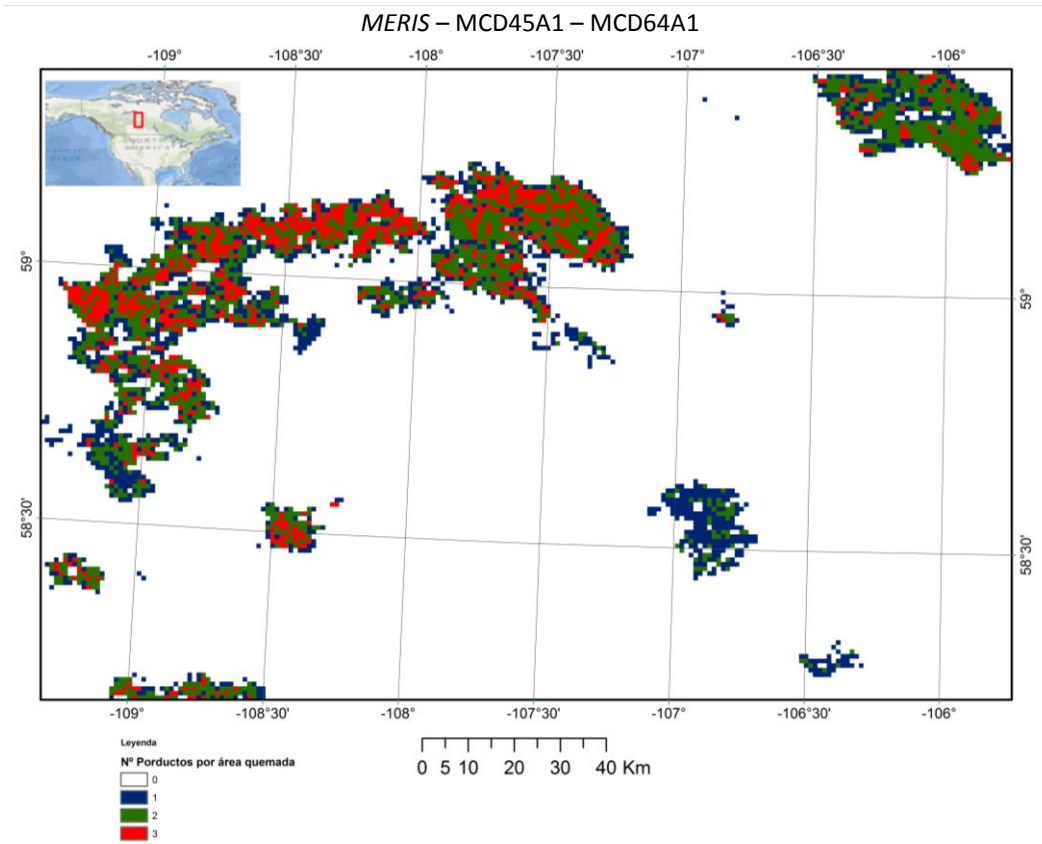
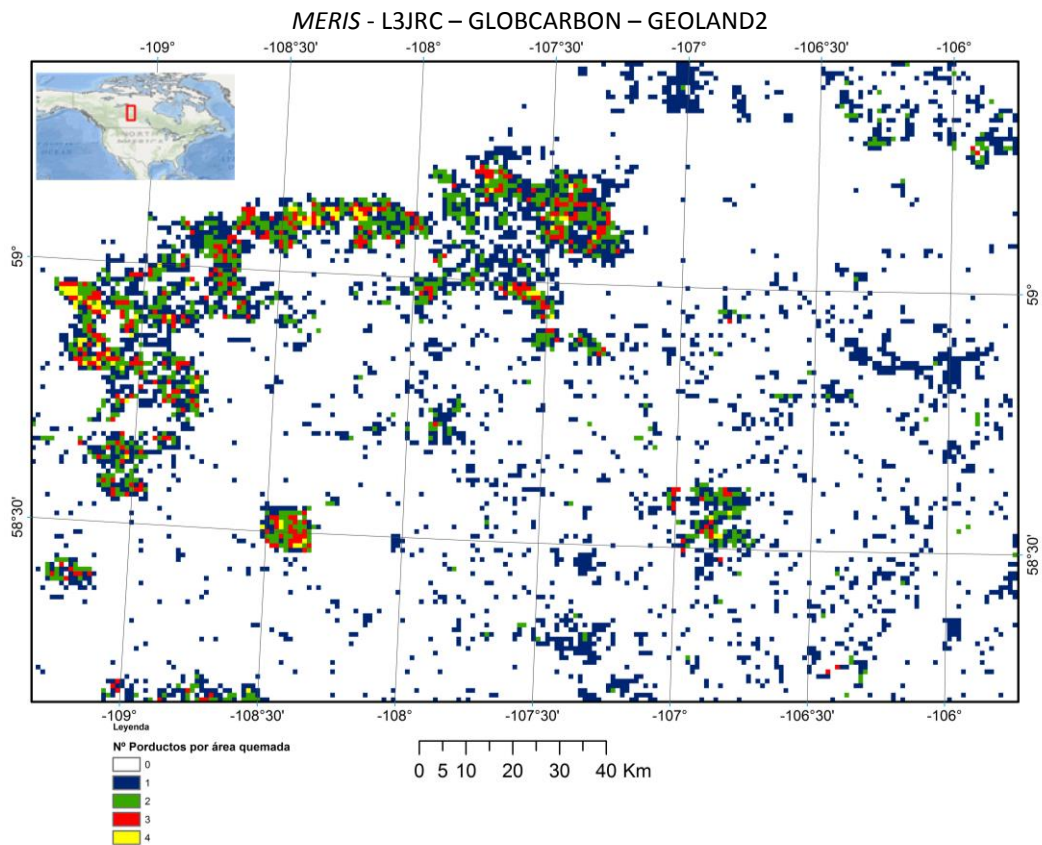
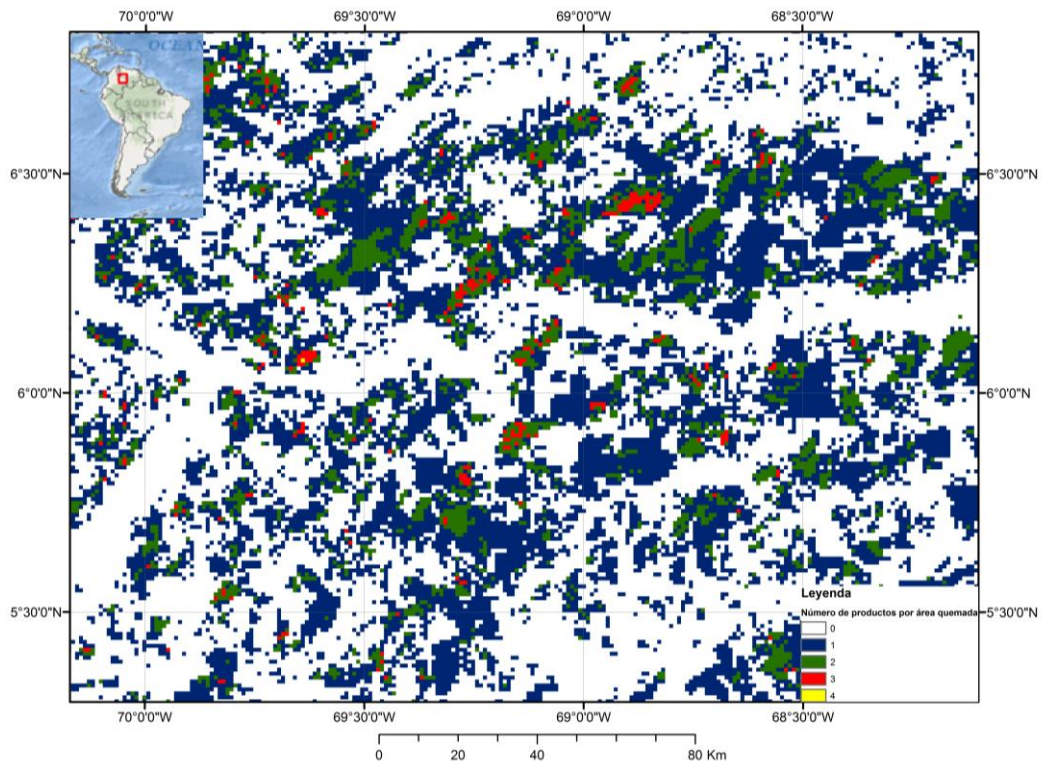


Figura Nº 15 Área quemada detectada por producto *MERIS*, Europeos y MODIS en SS01 (año 2006).

MERIS - L3JRC – GLOBCARBON – GEOLAND2



MERIS – MCD45A1 – MCD64A1

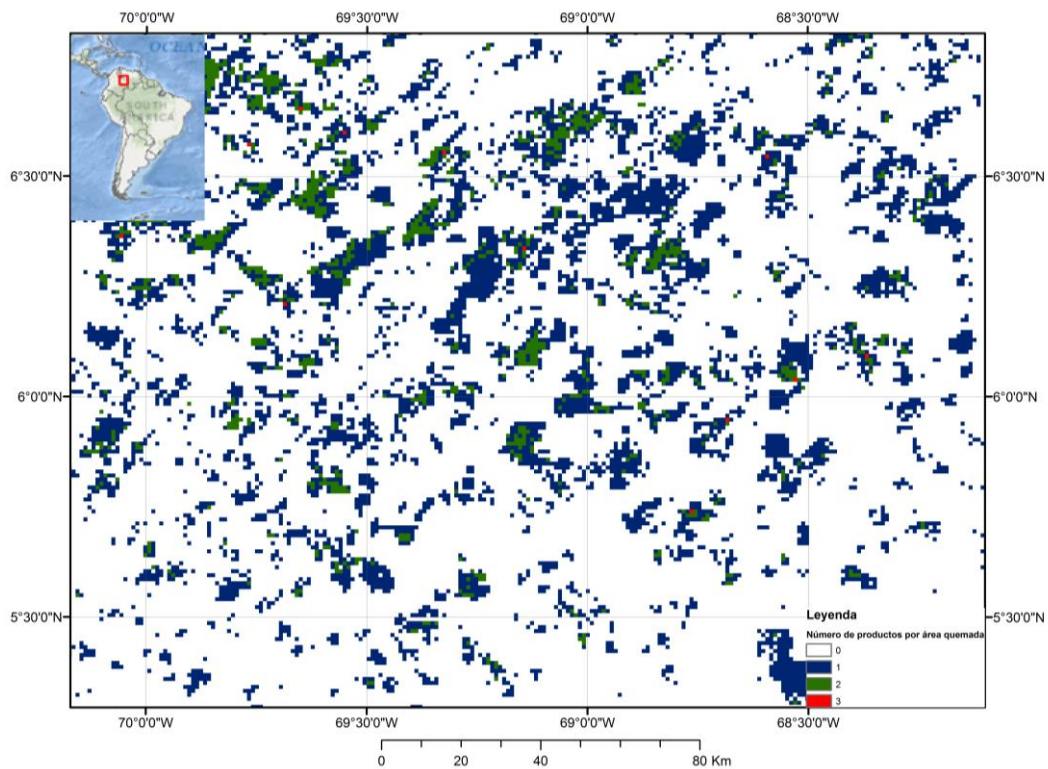


Figura Nº 16 Área quemada detectada por producto MERIS, Europeos y MODIS en SS02 (año 2006).

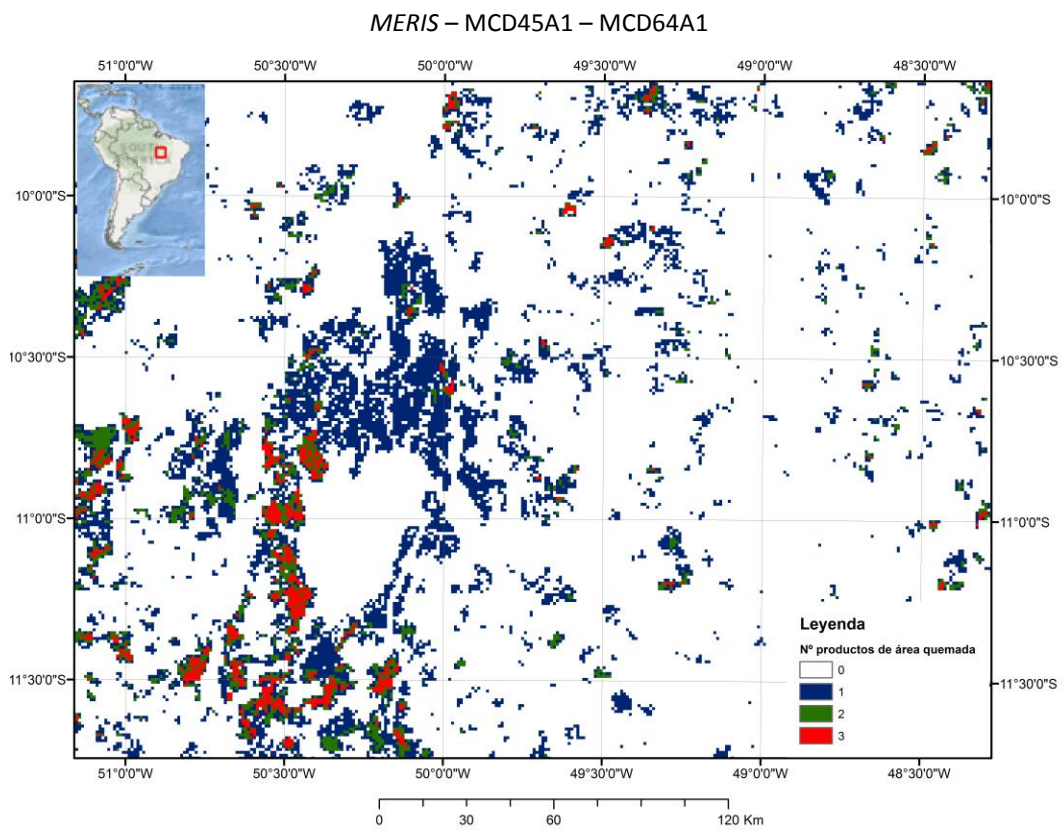
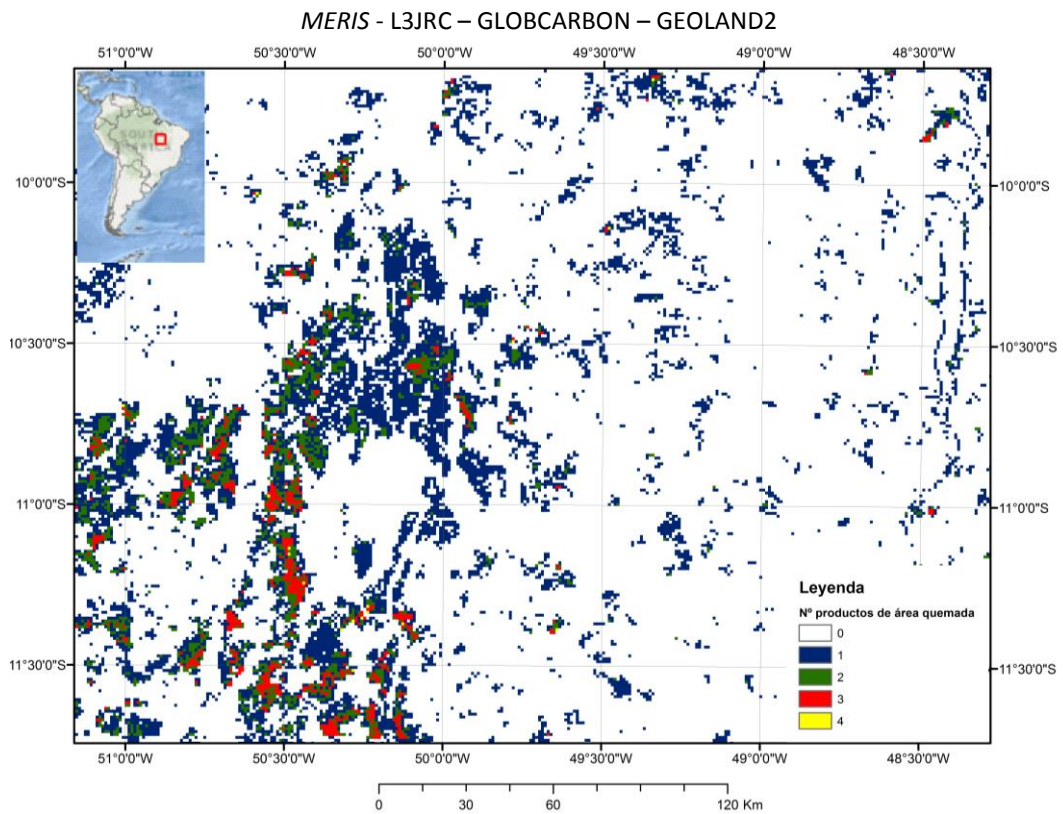


Figura Nº 17 Área quemada detectada por producto *MERIS*, Europeos y MODIS en SS03 (año 2006).

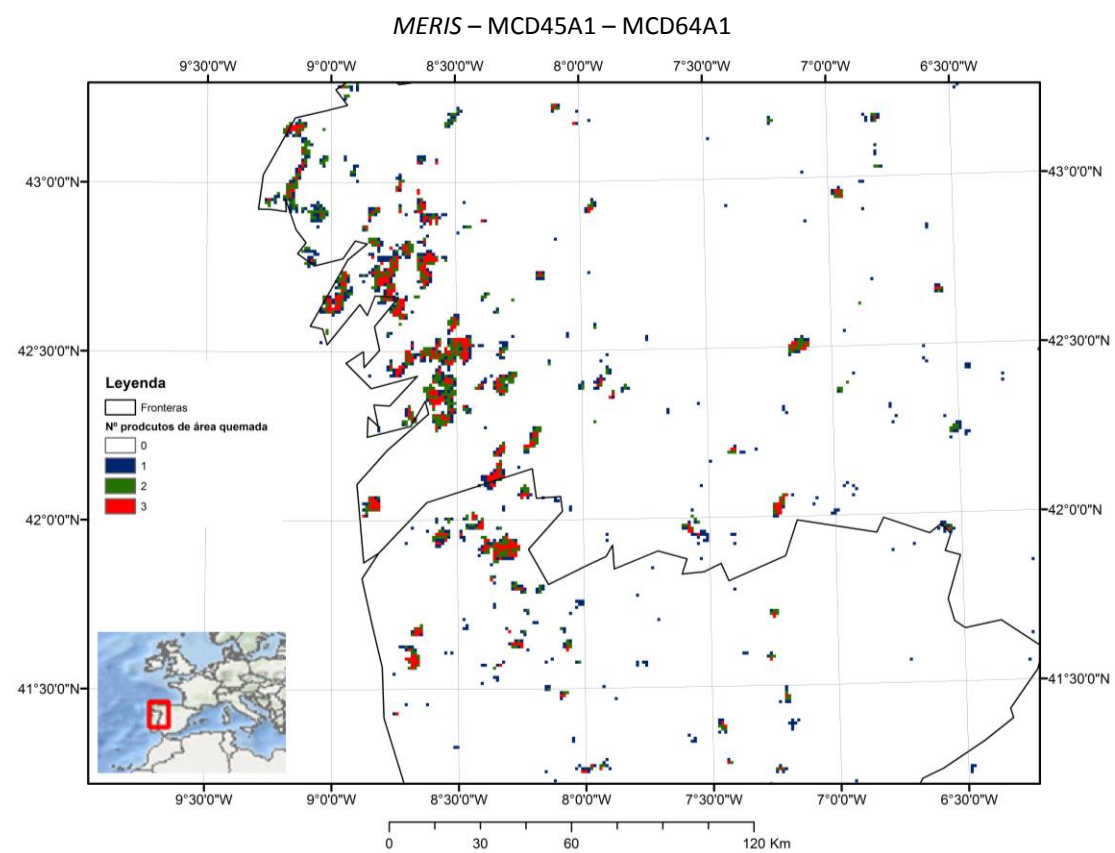
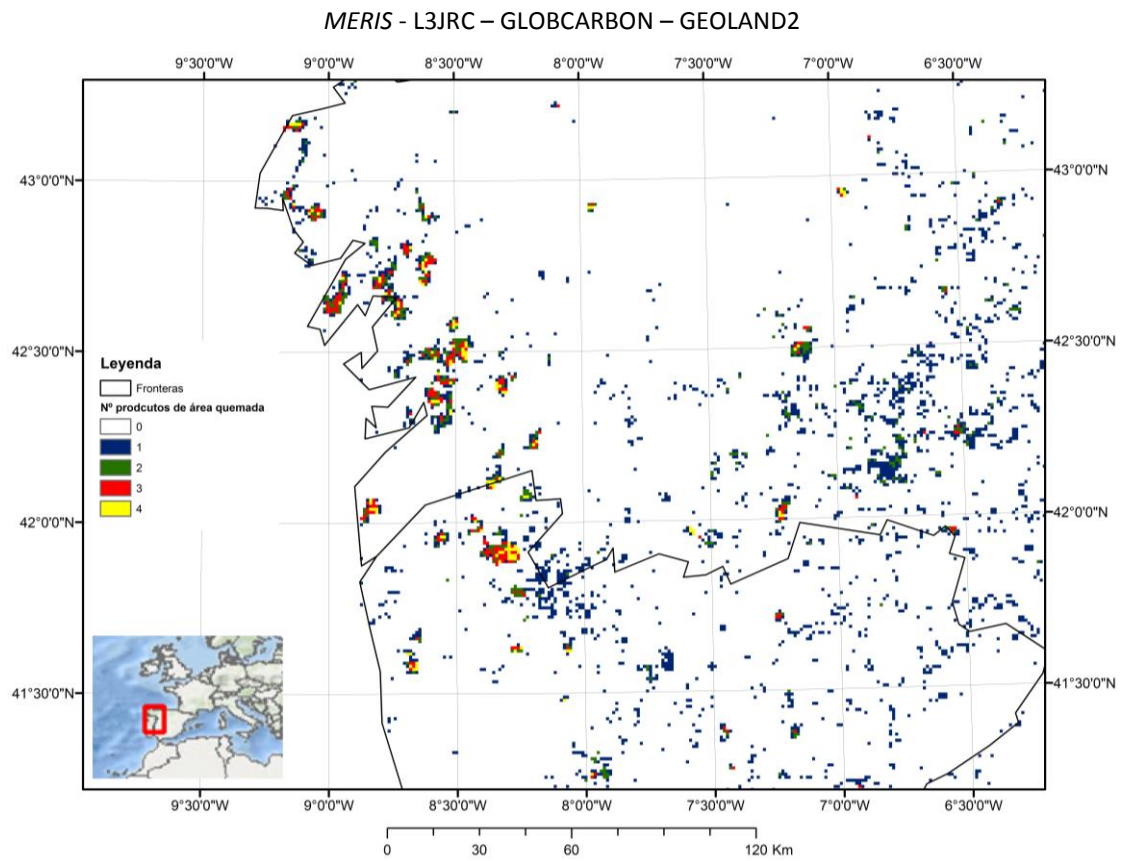
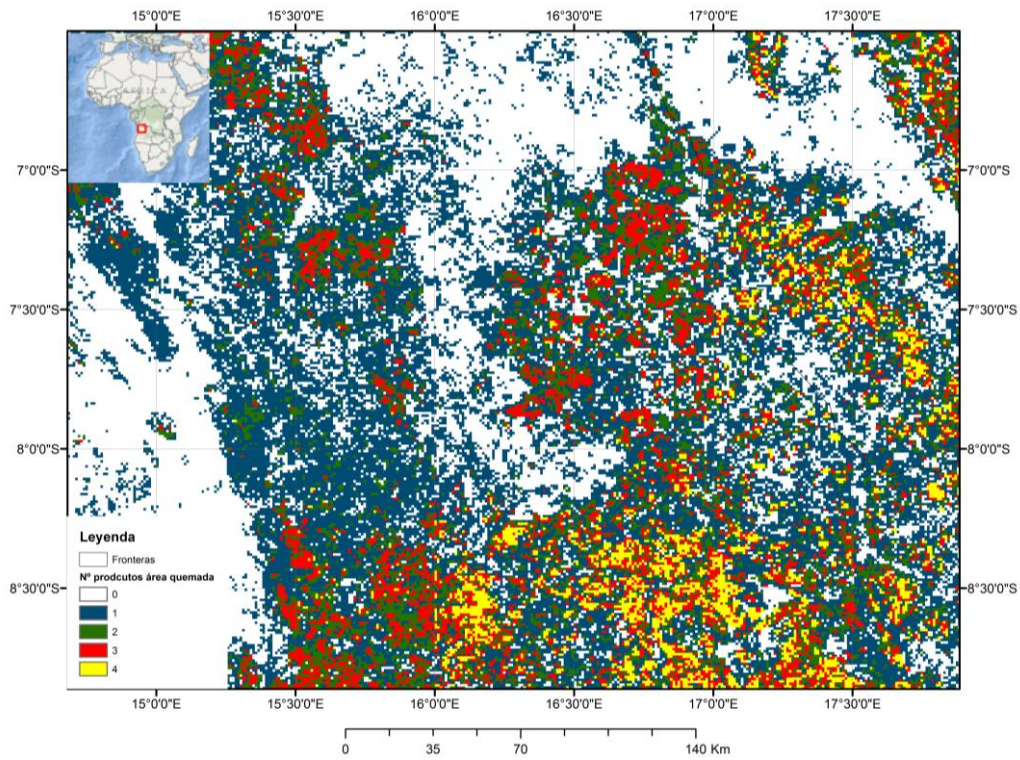


Figura Nº 18 Área quemada detectada por producto *MERIS*, Europeos y MODIS en SS04 (año 2006).

MERIS - L3JRC – GLOBCARBON – GEOLAND2



MERIS – MCD45A1 – MCD64A1

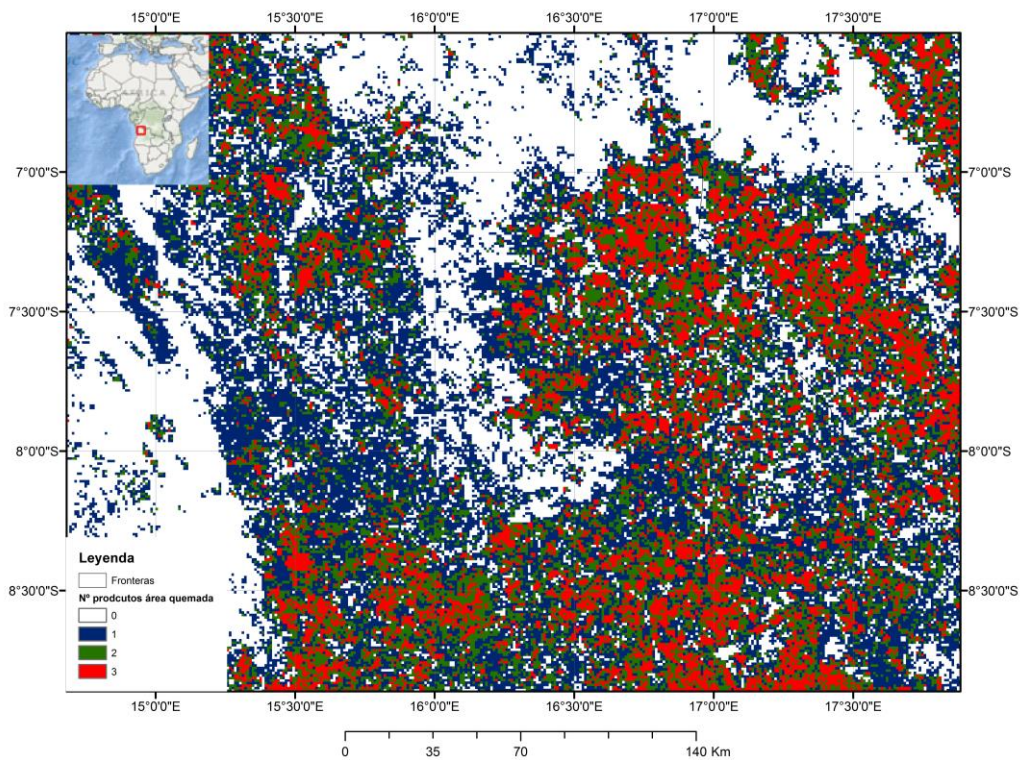


Figura Nº 19 Área quemada detectada por producto *MERIS*, Europeos y MODIS en SS05 (año 2006).

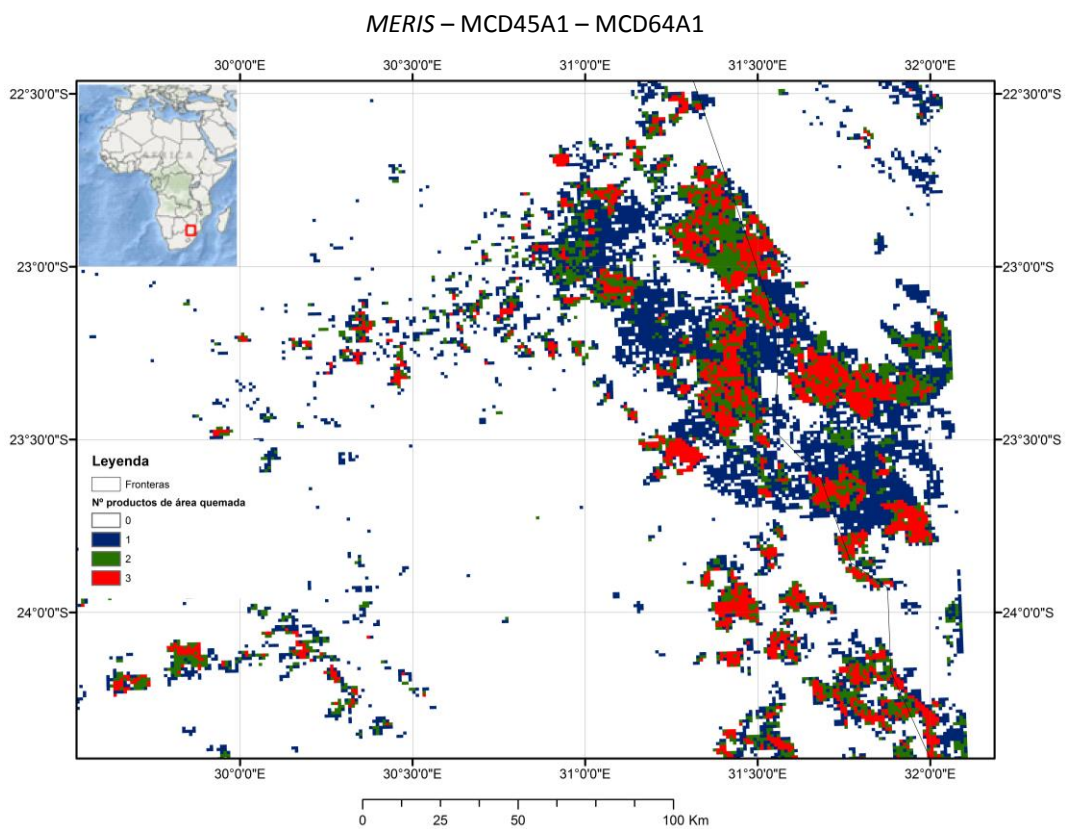
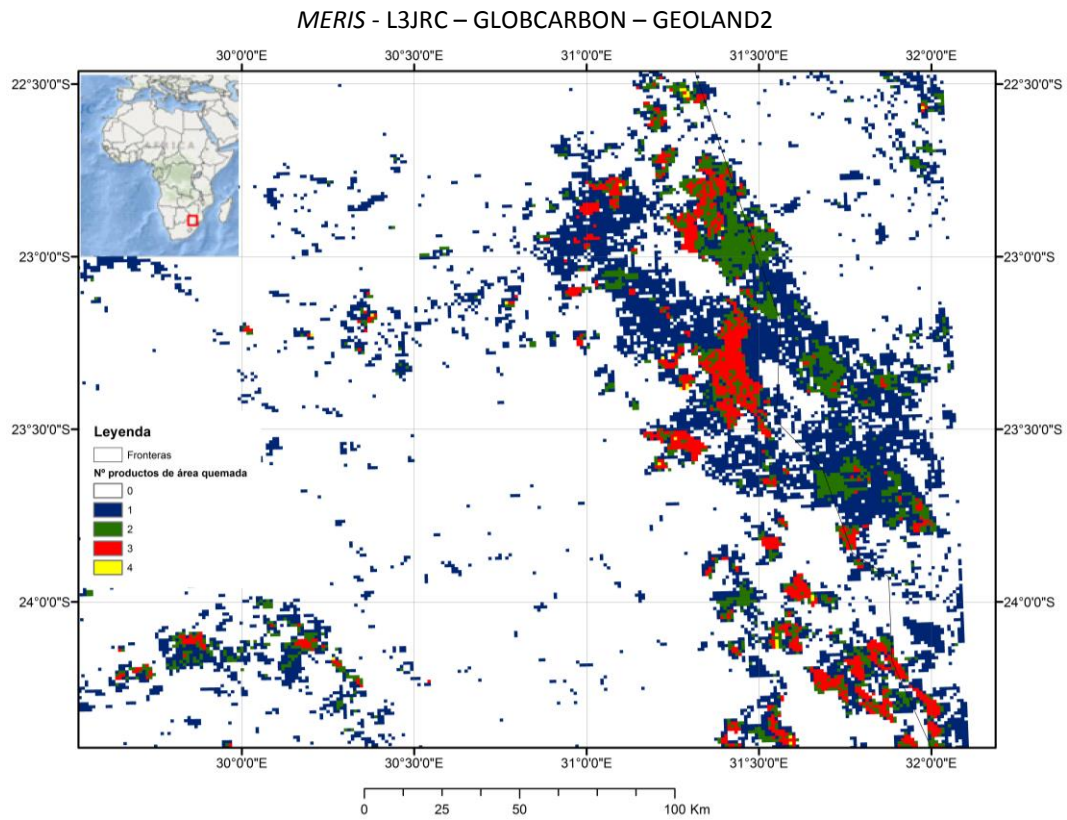
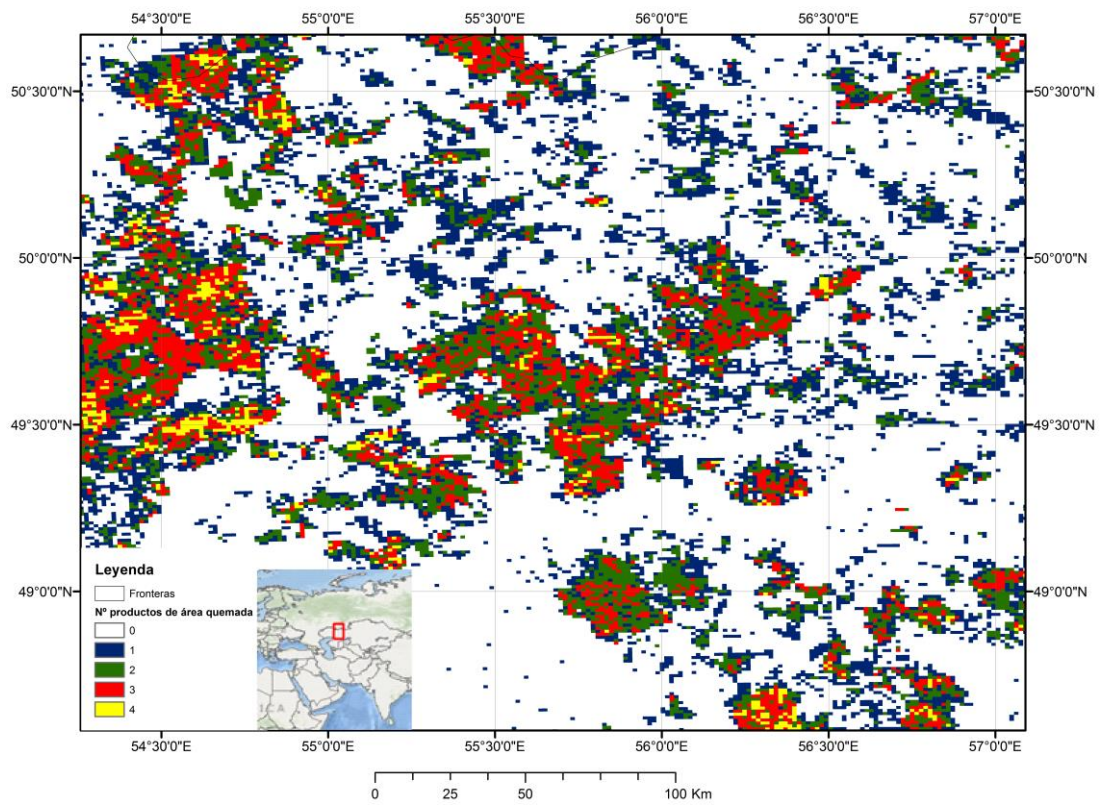


Figura Nº 20 Área quemada detectada por producto *MERIS*, Europeos y MODIS en SS06 (año 2006).

MERIS - L3JRC – GLOBCARBON – GEOLAND2



MERIS – MCD45A1 – MCD64A1

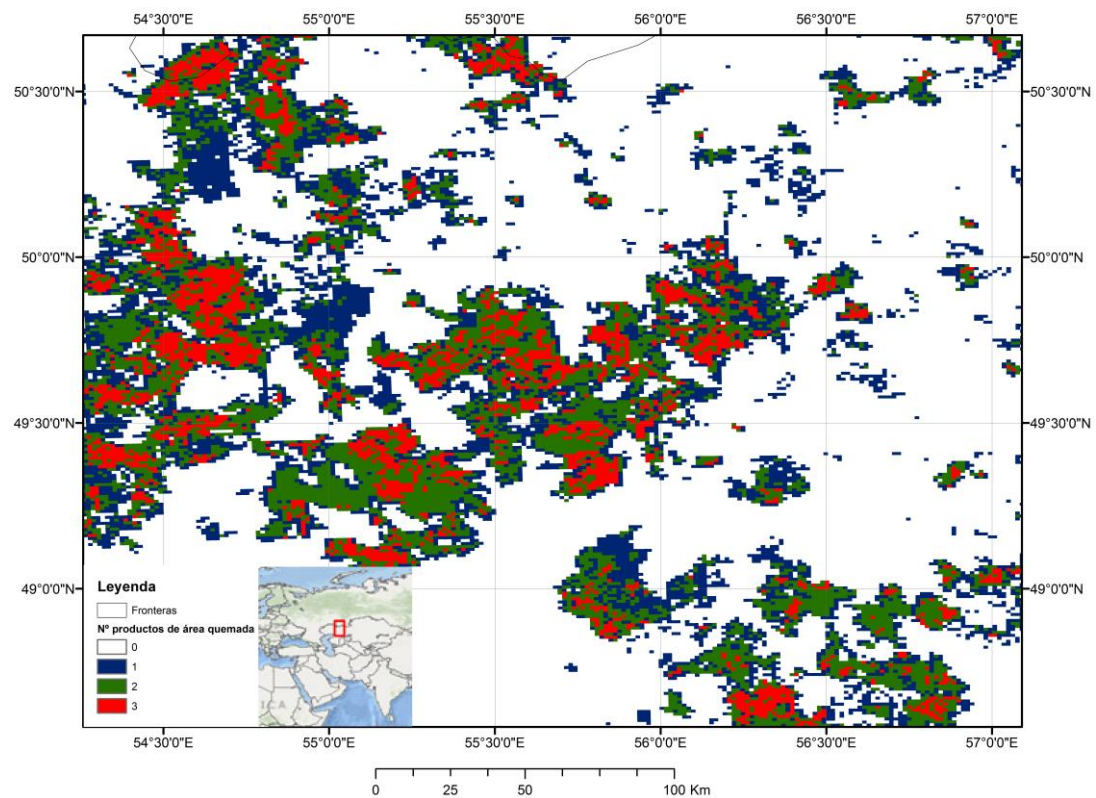
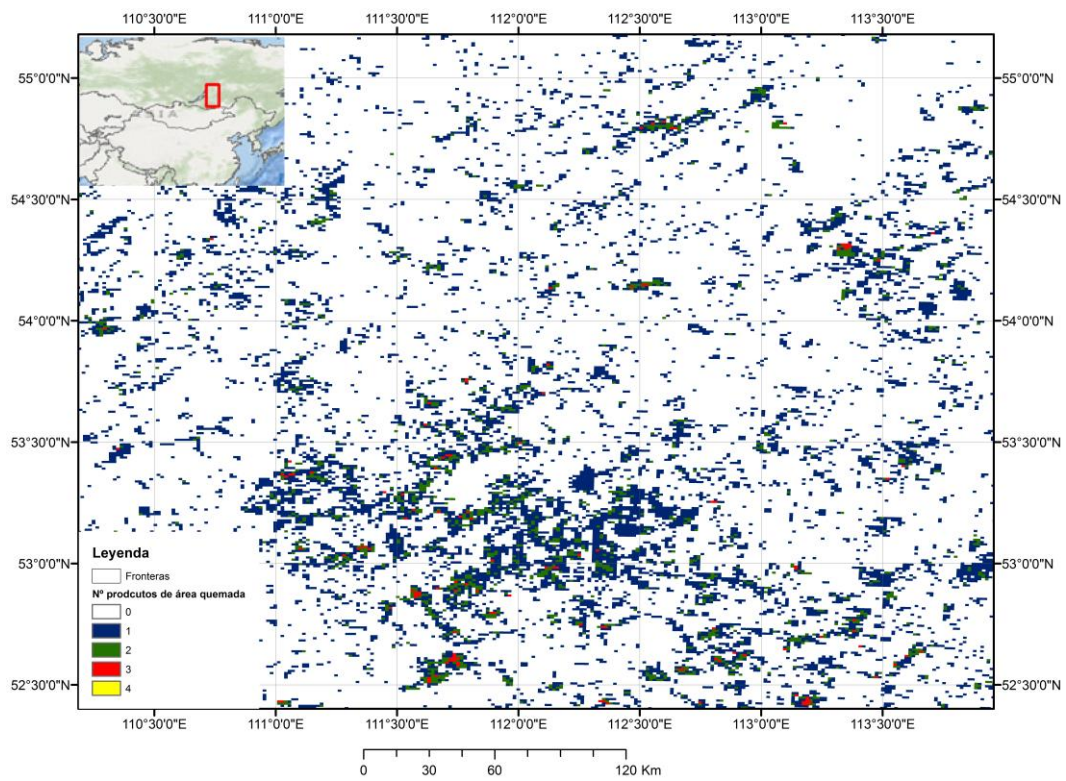


Figura Nº 21 Área quemada detectada por producto MERIS, Europeos y MODIS en SS07 (año 2006).

VGT- L3JRC – GLOBCARBON – GEOLAND2



VGT – MCD45A1 – MCD64A1

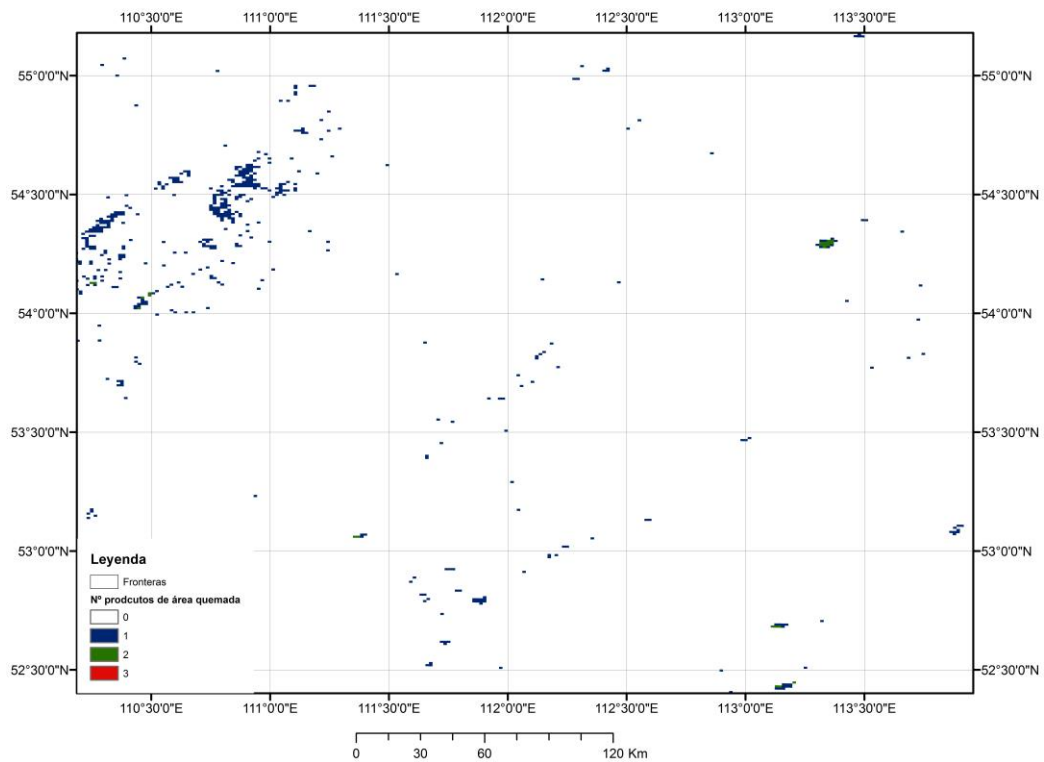
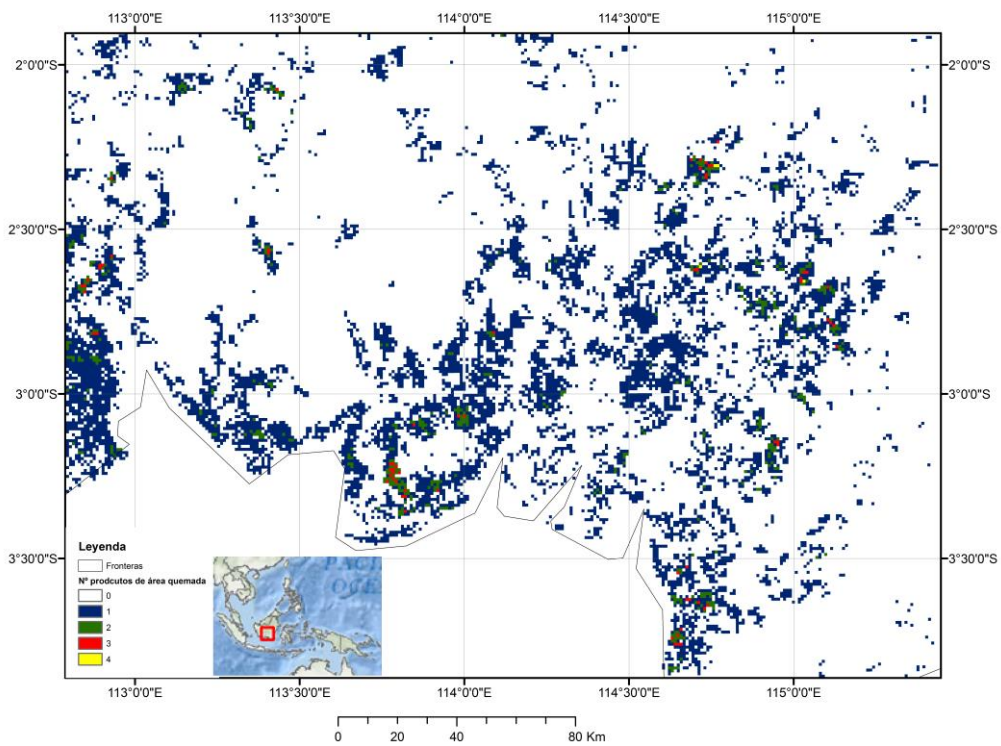


Figura Nº 22 Área quemada detectada por producto VGT, Europeos y MODIS en SS08 (año 2006).

MERIS- L3JRC – GLOBCARBON – GEOLAND2



MERIS – MCD45A1 – MCD64A1

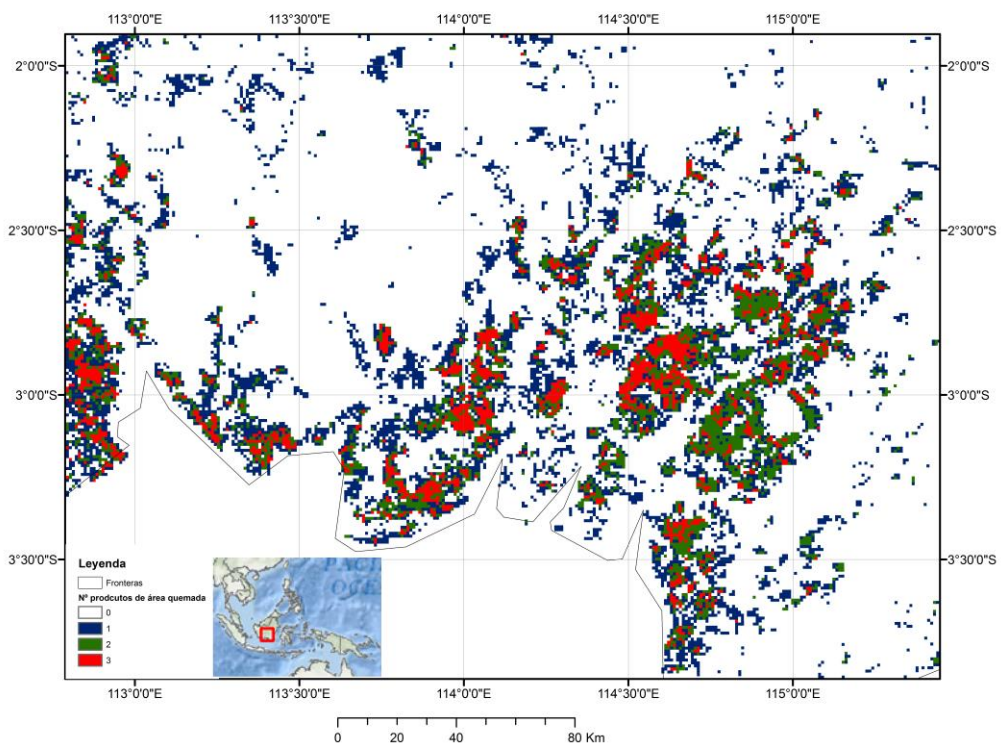
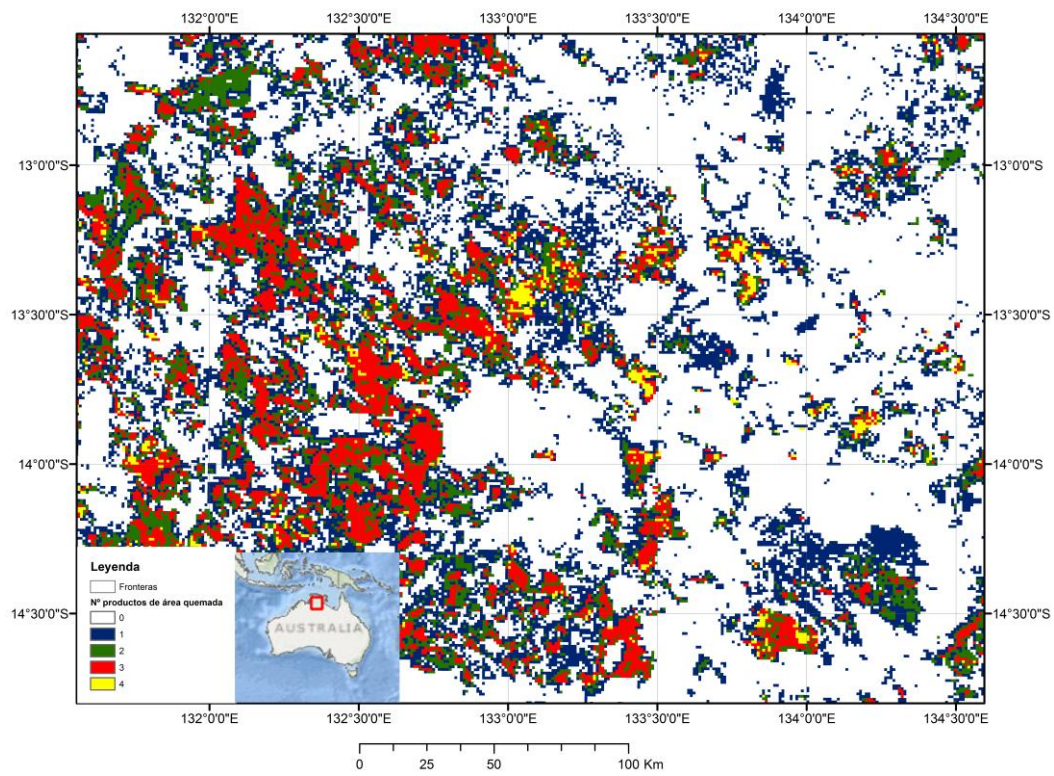


Figura Nº 23 Área quemada detectada por producto MERIS, Europeos y MODIS en SS09 (año 2006).

MERIS - L3JRC – GLOBCARBON – GEOLAND2



MERIS – MCD45A1 – MCD64A1

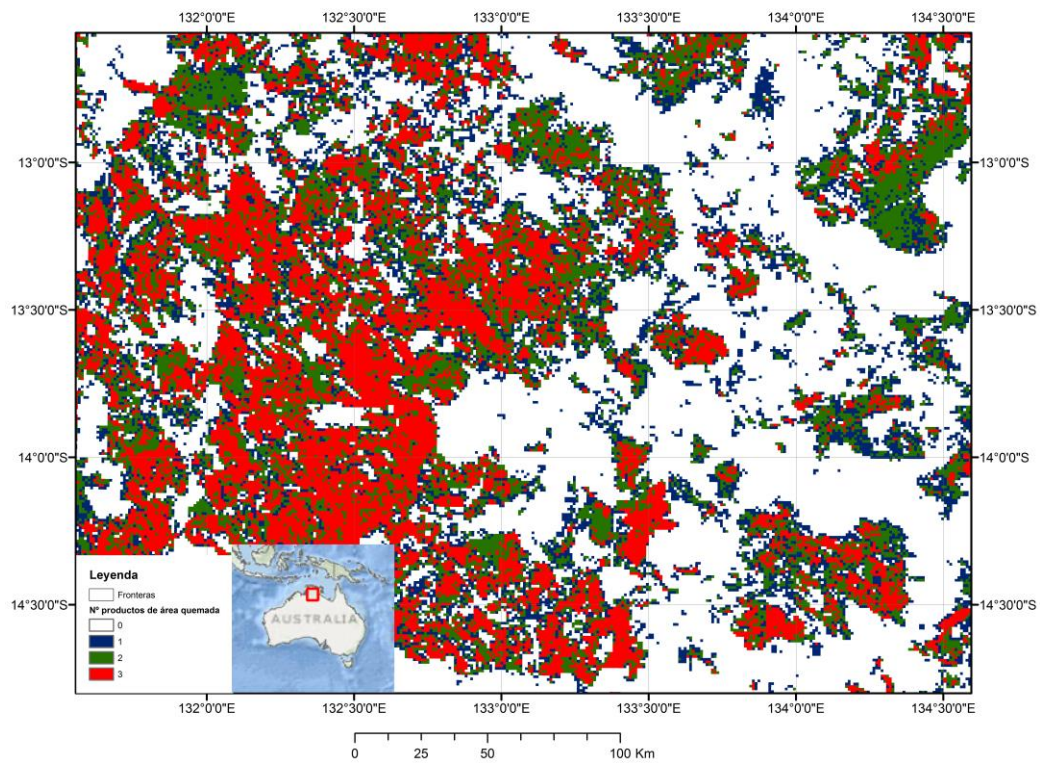


Figura Nº 24 Área quemada detectada por producto MERIS, Europeos y MODIS en SS10 (año 2006).

3.4.2 Intercomparación anual a través del Índice Kappa

La información de las zonas de estudio se agrupó de forma anual para poder contar con una representación global de los resultados obtenidos de la intercomparación. Se observó, como resultado anual, que el producto *MERIS* es el que obtiene los valores más altos de kappa con un valor medio de 32%, obtenido de la comparación con el producto MCD64A1, además, de con la intercomparación con este producto se obtiene una varianza de kappa de 5,29 lo que nos señala que su dispersión con respecto a la media para los 5 años de datos de este producto no es significativamente alta (Figura N°25, Tabla N°22). Que los mejores resultados de kappa se obtengan entre estos dos productos podría deberse a que ambos productos utilizan como fuente de referencia los Hotspots obtenidos de los sensores MODIS.

Al analizar la intercomparación anual del producto *Fusionados* con el resto de *productos de área quemada*, se obtiene una mediana de kappa de 34% para el producto *MERIS*, hecho que es probable se deba a que en el producto *Fusionado de Fire_CCI* el sensor *MERIS* es el que posee mayor peso en la generación de este producto al momento de incorporarse en el proceso de fusión, luego continúa *VGT* y finalmente *(A)ATSR*. Estos valores indican relaciones de concordancia moderada a buena entre el producto *Fusionado* y el generado a partir de *MERIS*.

Los valores del índice kappa obtenidos de la intercomparación entre el producto *Fusionado* y el resto de los productos de área quemada nos indican la escasa relación espacial entre ellos al no superar medianas del 22% en el mejor de los casos obtenido con el producto MCD64A1, lo que indicaría la pobre concordancia entre los productos (Figura N°25, Tabla N°22).

Al realizar la intercomparación del producto VGT con el resto de productos de área quemada se observa que los valores más altos del índice Kappa se obtienen de la intercomparación con los productos MCD45A1 y MCD64A1, resultados que no superan el 20%, similares a los obtenidos por *Fusionado* e inferiores a los generados de la intercomparación de estos productos con *MERIS*. Lo que estaría indicando que el producto VGT globalmente tiene un bajo peso al momento de generar el producto *Fusionado*, cuando se incluye el producto *MERIS* en la generación de este producto (Figura N°25, Tabla N°22).

Se observa que de los productos *Fire_CCI* el que presenta una mayor variabilidad de sus datos en comparación con el resto de este grupo de producto es el producto (A)ATSR, lo que se concluye del mayor tamaño de las cajas de este producto en todas las intercomparaciones y que se puede asociar a los altos valores de Varianza de Kappa obtenidos con este producto (Figura N°25, Tabla N°22).

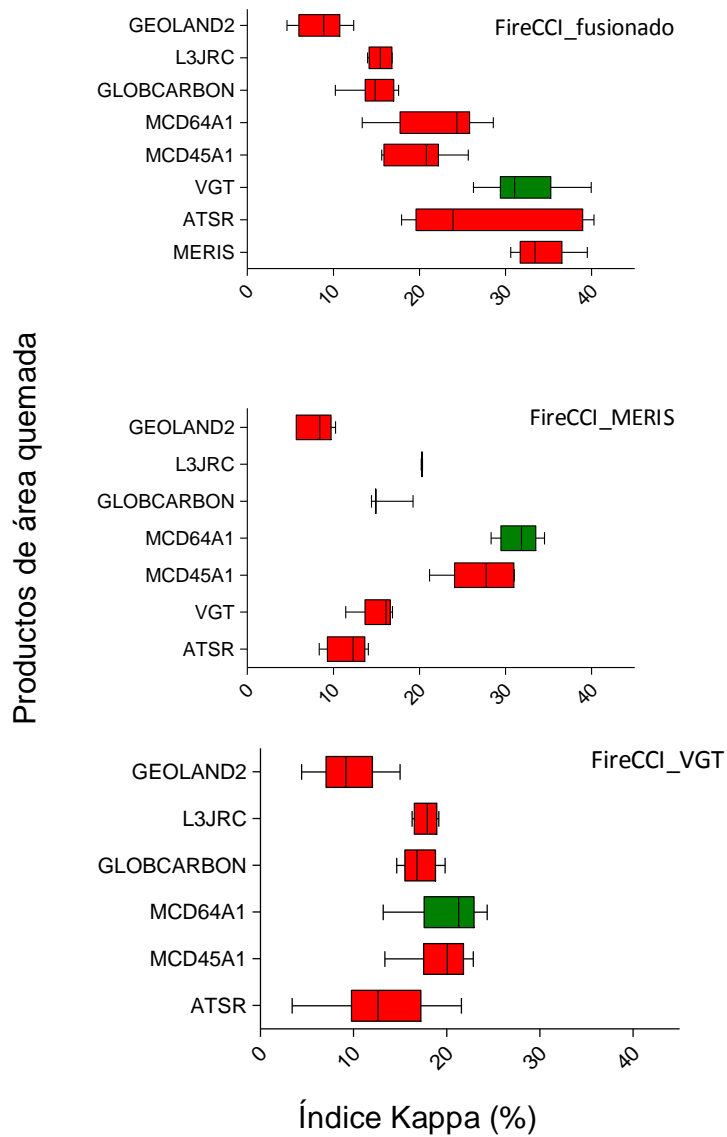


Figura N° 25 Variación media del Índice Kappa entre los Productos *Fire_CCI* y Productos de área quemada.

Tabla N° 22. Variación anual del índice kappa, a partir de intercomparación productos *Fire_CCI* y productos MODIS y europeos de área quemada.

| Año | kappa (%) | | | | | | | |
|-----------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | MERIS | ATSR | VGT | MCD45A1 | MCD64A1 | GLOBCARBON | L3JRC | GEOLAND2 |
| Fusionado | | | | | | | | |
| 1999 | | 25,22 | 35,26 | | | 14,58 | | |
| 2000 | | 26,32 | 34,28 | | | 17,58 | | 12,35 |
| 2001 | | 20,13 | 30,83 | | 13,37 | 16,00 | | 10,99 |
| 2002 | | 22,63 | 34,24 | 15,88 | 16,55 | 14,52 | 13,98 | 10,68 |
| 2003 | | 17,94 | 37,75 | 15,88 | 18,95 | 16,91 | 15,47 | 10,67 |
| 2004 | | 22,18 | 39,96 | 20,93 | 18,96 | 17,09 | 16,84 | 10,49 |
| 2005 | 30,60 | 40,30 | 27,03 | 20,70 | 25,48 | 10,24 | 14,35 | 6,66 |
| 2006 | 33,63 | 38,70 | 26,29 | 21,81 | 24,33 | 14,86 | 16,79 | 6,31 |
| 2007 | 39,50 | 18,06 | 30,99 | 25,68 | 28,58 | 12,90 | | 7,28 |
| 2008 | 32,82 | 39,78 | 31,06 | 22,35 | 26,08 | | | 4,99 |
| 2009 | 33,43 | | 29,41 | 15,60 | 25,59 | | | 4,61 |
| MEDIA | 33,99 | 27,47 | 32,46 | 19,85 | 21,99 | 14,97 | 15,48 | 8,96 |
| VARIANZA Kappa | 10,91 | 103,83 | 21,09 | 13,66 | 26,64 | 5,39 | 1,78 | 5,13 |
| MERIS | | | | | | | | |
| 2005 | | 12,50 | 16,86 | 31,02 | 34,55 | 14,95 | 20,37 | 10,26 |
| 2006 | | 12,15 | 16,36 | 27,00 | 31,85 | 19,27 | 20,22 | 9,20 |
| 2007 | | 8,36 | 15,93 | 30,93 | 32,49 | 14,43 | | 8,43 |
| 2008 | | 14,05 | 16,11 | 27,75 | 30,60 | | | 5,68 |
| 2009 | | | 11,43 | 21,18 | 28,34 | | | 5,69 |
| MEDIA | | 11,76 | 15,34 | 27,57 | 31,56 | 16,21 | 20,29 | 9,73 |
| VARIANZA Kappa | | 5,83 | 4,89 | 16,07 | 5,29 | 7,06 | 0,01 | 0,57 |
| VGT | | | | | | | | |
| 1999 | | 11,80 | | | | 16,80 | | |
| 2000 | | 10,84 | | | | 19,62 | | 15,01 |
| 2001 | | 3,42 | | | 13,19 | 16,82 | | 12,00 |
| 2002 | | 6,67 | | 19,42 | 20,51 | 16,84 | 16,28 | 12,03 |
| 2003 | | 11,00 | | 17,00 | 22,17 | 17,99 | 17,94 | 12,10 |
| 2004 | | 13,47 | | 20,75 | 18,90 | 15,99 | 16,81 | 10,02 |
| 2005 | 18,05 | 15,02 | | 21,86 | 23,02 | 15,01 | 19,16 | 8,37 |
| 2006 | 17,99 | 17,81 | | 19,20 | 22,85 | 19,83 | 18,72 | 7,84 |
| 2007 | 16,04 | 17,04 | | 21,66 | 21,28 | 14,63 | | 8,19 |
| 2008 | 16,73 | 21,58 | | 22,86 | 24,35 | | | 4,45 |
| 2009 | 13,22 | 14,65 | | 13,35 | 16,26 | | | 4,71 |
| MEDIA | 16,41 | 14,65 | | 19,51 | 20,28 | 17,06 | 17,78 | 10,07 |
| VARIANZA Kappa | 3,89 | 23,72 | | 9,60 | 12,95 | 3,32 | 1,50 | 3,96 |

3.5 Intercomparación global a través de Índice de relación de Sörensen-Dice

Al analizar las tendencias anuales del índice Sörensen-Dice se observa que entre la intercomparación del producto *Fusionado* con el resto de los producto *Fire_CCI*, este tiene una mayor relación con el producto *MERIS* con una media del 43% lo que indicaría una relación moderada a buena entre ambos productos.

Similares tendencias a las observadas en el índice kappa se observan de la intercomparación con el resto de los productos *Fire_CCI*. También se constata una leve mejoría de relación con el resto de los productos de área quemada con valores del índice Sörensen-Dice llegando al 28%, obtenido con los productos MODIS (Figura N°26, Tabla N°23).

Al intercomparar el producto *MERIS* con el resto de productos globales, se observa que la mejor relación se obtiene con los productos MODIS MCD45A1 y MCD64A1 con valores medios de 34% y 38% respectivamente. Siendo el producto MCD64A1 con el que presenta un mayor acuerdo en las áreas detectadas entre ambos productos. Esto es similar a lo observado con el índice kappa (Figura N°26, Tabla N°23).

El producto *VGT* si bien presenta una menor variación en los valores del índice de Sörensen-Dice (Figura N°26, Tabla N°23), los porcentajes son los más bajos de los tres productos *Fire_CCI* que se han intercomparado con los *productos de área quemada*, lo que nos señalaría que tiene un menor correlación con estos, que los valores medios no superan al 26% obtenido de la intercomparación con el producto MCD64A1.

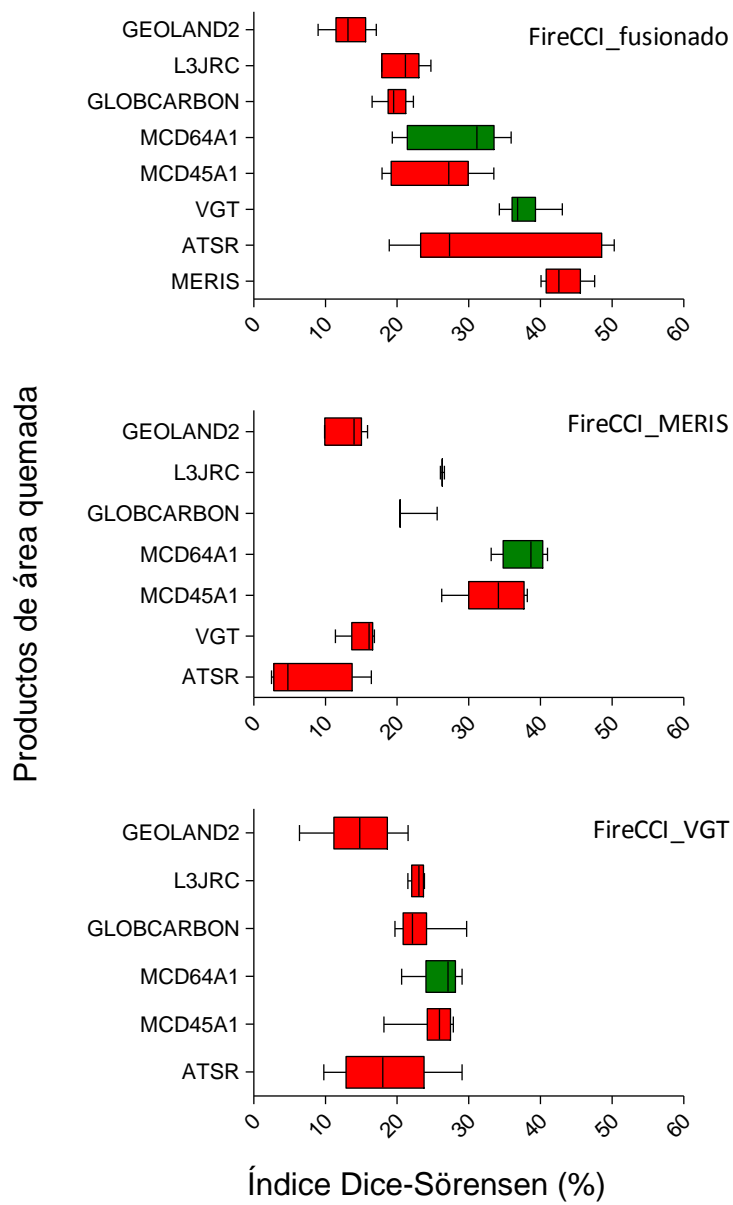


Figura N° 26 Variación anual media del Índice Sørensen-Dice entre los productos *Fire_CCI* y Productos de área quemada.

Tabla Nº 23. Variación anual del índice Sörensens-Dice, a partir de intercomparación productos *Fire_CCI* y productos MODIS y europeos de área quemada.

| Año | Sörensens-Dice (%) | | | | | | | |
|-----------------|--------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | MERIS | ATSR | VGT | MCD45A1 | MCD64A1 | GLOBCARBON | L3JRC | GEOLAND2 |
| Fusionado | | | | | | | | |
| 1999 | | 25,22 | 35,26 | | | 14,58 | | |
| 2000 | | 26,32 | 34,28 | | | 17,58 | | 12,35 |
| 2001 | | 20,13 | 30,83 | | 13,37 | 16,00 | | 10,99 |
| 2002 | | 22,63 | 34,24 | 15,88 | 16,55 | 14,52 | 13,98 | 10,68 |
| 2003 | | 17,94 | 37,75 | 15,88 | 18,95 | 16,91 | 15,47 | 10,67 |
| 2004 | | 22,18 | 39,96 | 20,93 | 18,96 | 17,09 | 16,84 | 10,49 |
| 2005 | 30,60 | 40,30 | 27,03 | 20,70 | 25,48 | 10,24 | 14,35 | 6,66 |
| 2006 | 33,63 | 38,70 | 26,29 | 21,81 | 24,33 | 14,86 | 16,79 | 6,31 |
| 2007 | 39,50 | 18,06 | 30,99 | 25,68 | 28,58 | 12,90 | | 7,28 |
| 2008 | 32,82 | 39,78 | 31,06 | 22,35 | 26,08 | | | 4,99 |
| 2009 | 33,43 | | 29,41 | 15,60 | 25,59 | | | 4,61 |
| MEDIA | 33,99 | 27,47 | 32,46 | 19,85 | 21,99 | 14,97 | 15,48 | 8,96 |
| VARIANZA | 10,91 | 103,83 | 21,09 | 13,66 | 26,64 | 5,39 | 1,78 | 5,13 |
| MERIS | | | | | | | | |
| 2005 | | 12,50 | 16,86 | 31,02 | 34,55 | 14,95 | 20,37 | 10,26 |
| 2006 | | 12,15 | 16,36 | 27,00 | 31,85 | 19,27 | 20,22 | 9,20 |
| 2007 | | 8,36 | 15,93 | 30,93 | 32,49 | 14,43 | | 8,43 |
| 2008 | | 14,05 | 16,11 | 27,75 | 30,60 | | | 5,68 |
| 2009 | | | 11,43 | 21,18 | 28,34 | | | 5,69 |
| MEDIA | | 11,76 | 15,34 | 27,57 | 31,56 | 16,21 | 20,29 | 9,73 |
| VARIANZA | | 5,83 | 4,89 | 16,07 | 5,29 | 7,06 | 0,01 | 0,57 |
| VGT | | | | | | | | |
| 1999 | | 11,80 | | | | 16,80 | | |
| 2000 | | 10,84 | | | | 19,62 | | 15,01 |
| 2001 | | 3,42 | | | 13,19 | 16,82 | | 12,00 |
| 2002 | | 6,67 | | 19,42 | 20,51 | 16,84 | 16,28 | 12,03 |
| 2003 | | 11,00 | | 17,00 | 22,17 | 17,99 | 17,94 | 12,10 |
| 2004 | | 13,47 | | 20,75 | 18,90 | 15,99 | 16,81 | 10,02 |
| 2005 | 18,05 | 15,02 | | 21,86 | 23,02 | 15,01 | 19,16 | 8,37 |
| 2006 | 17,99 | 17,81 | | 19,20 | 22,85 | 19,83 | 18,72 | 7,84 |
| 2007 | 16,04 | 17,04 | | 21,66 | 21,28 | 14,63 | | 8,19 |
| 2008 | 16,73 | 21,58 | | 22,86 | 24,35 | | | 4,45 |
| 2009 | 13,22 | | | 13,35 | 16,26 | | | 4,71 |
| MEDIA | 16,41 | 14,65 | | 19,51 | 20,28 | 17,06 | 17,78 | 10,07 |
| VARIANZA | 3,89 | 23,72 | | 9,60 | 12,95 | 3,32 | 1,50 | 3,96 |

3.5.1 Intercomparación espacial a través de Índices de Concordancia Kappa y Sörensen-Dice

Al analizar los valores obtenidos por zona de estudio de los índices kappa y Sörensen-Dice del producto *Fusionado*, se observa en la Tabla N°24 que sus mayores relaciones de concordancia se obtuvieron con el producto *MERIS* y *VGT*, similar a lo observado en el índice kappa a nivel interanual. Es relevante señalar los altos valores de kappa en la zona de estudio SS10, correspondiente a sabana tropical en Oceanía, de 77% obtenido con los producto *MERIS*. Esta zona de estudio, como se observa en la Tabla N°24, posee los valores más altos de kappa, obtenidos de la relación del producto *Fusionado* con el resto de los productos de área quemada, principalmente con los productos MCD45A1 y MCD64A1, con valores superiores al 58% lo que indica valores de concordancia moderados.

Al analizar los resultados del índice de similitud de Sörensen-Dice obtenido con los productos *MERIS* y *VGT*, los valores son superiores al 69% en las zonas de estudio de Angola y Australia. Similar tendencia se observa con los productos MODIS para las mismas zonas (Tabla N°24). Los altos valores de este índice con relación a los productos *Fire_CCI* nos permite indicar que existe una relación directa en la elaboración del producto *Fusionado* y los productos *MERIS* y *VGT*.

Se observa una tendencia del producto *Fusionado* a tener un comportamiento similar al resto de los sensores en la detección de área quemada en sabana tropical en concordancia con los resultados del capítulo 2 y validado por los estudios de (Archibald *et al.*, 2010; Boschetti *et al.*, 2010b; Stroppiana *et al.*, 2010) que señalan que el tipo de fuego que se origina en esta cobertura vegetal resulta más fácilmente detectable que en otros lugares.

Los productos GLOBCARBON, L3JRC y GEOLAND2 presentan los menores valores de concordancia en la mayoría de las zonas de estudio, superando solamente el 40% y 50% de los índices de Kappa y Sörensen-Dice, respectivamente, en las zonas de sabana tropical de África y Australia, SS05, SS06 y SS10 respectivamente (Tabla N°24).

Los bajos valores de ambos índices de concordancia de VGT obtenidos en las zonas del continente americano (SS01, SS02 y SS03 correspondientes a bosque boreal y sabana tropical), como también en las zonas SS04, SS08 y SS09 (correspondientes a bosque mediterráneo, praderas templadas y sabana tropical, respectivamente), se podrían asociar a que estas zona presentan un menor porcentaje de cobertura de nubes al momento de la captura de la imagen por parte del sensor VGT (mayor al 20%). Lo que influye en un mayor número de áreas quemadas captadas en relación a los productos que no consideran los datos de este sensor en la generación de sus productos de área quemada tales como MCD45A1 y MCD64A1 (Tabla N°24).

Tabla Nº 24 índices de similitud Kappa y Sörensen-Dice, a partir de la intercomparación con productos de área quemada y Fusionado

| Zona de Estudio | MERIS | (A)ATSR | VGT | MCD45A1 | MCD64A1 | GLOBCARBON | L3JRC | GEOLAND2 |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Índice Kappa (%) | | | | | | | | |
| SS01 | 19,46 | 8,95 | 23,46 | 20,11 | 26,85 | 1,85 | 5,23 | 3,57 |
| SS02 | 42,20 | 6,28 | 24,12 | 10,36 | 20,32 | 20,07 | 21,37 | 8,08 |
| SS03 | 40,60 | 41,24 | 41,15 | 21,13 | 21,99 | 21,57 | 16,38 | 7,02 |
| SS04 | 20,72 | 20,74 | 15,99 | 12,37 | 12,95 | 7,21 | 11,44 | 5,09 |
| SS05 | 37,61 | 29,46 | 44,02 | 23,25 | 20,49 | 23,71 | 19,69 | 18,62 |
| SS06 | 44,59 | 28,62 | 41,89 | 28,67 | 26,62 | 20,96 | 18,67 | 5,60 |
| SS07 | 32,52 | 19,96 | 28,77 | 28,10 | 28,17 | 10,32 | 17,74 | 7,72 |
| SS08 | - | 9,42 | 30,62 | 4,80 | 4,43 | 1,65 | 1,55 | 2,12 |
| SS09 | 0,41 | 53,06 | 12,14 | 2,54 | 8,91 | 2,39 | 1,98 | 2,27 |
| SS10 | 67,85 | 43,09 | 62,48 | 46,96 | 49,15 | 38,45 | 40,95 | 24,94 |
| Promedio | 33,99 | 26,08 | 32,46 | 19,83 | 21,99 | 14,82 | 15,50 | 8,50 |
| Índice Sörensen-Dice (%) | | | | | | | | |
| SS01 | 20,07 | 10,34 | 24,02 | 17,92 | 27,47 | 2,80 | 6,50 | 4,36 |
| SS02 | 47,73 | 9,07 | 30,79 | 13,24 | 25,41 | 24,50 | 25,87 | 10,81 |
| SS03 | 49,40 | 44,36 | 43,84 | 25,42 | 26,91 | 24,10 | 19,16 | 9,08 |
| SS04 | 21,50 | 22,18 | 16,76 | 13,24 | 13,51 | 7,86 | 12,52 | 6,35 |
| SS05 | 75,40 | 45,68 | 68,88 | 51,12 | 43,68 | 44,09 | 38,97 | 41,42 |
| SS06 | 51,40 | 32,17 | 44,73 | 33,70 | 31,16 | 24,30 | 23,43 | 9,24 |
| SS07 | 37,00 | 24,27 | 31,79 | 32,10 | 31,65 | 13,85 | 23,43 | 10,96 |
| SS08 | - | 9,95 | 31,13 | 5,41 | 4,91 | 2,60 | 2,72 | 3,13 |
| SS09 | 8,56 | 54,20 | 15,61 | 3,07 | 13,99 | 2,61 | 2,29 | 2,38 |
| SS10 | 76,57 | 51,33 | 69,67 | 58,96 | 61,95 | 49,99 | 51,58 | 36,68 |
| Promedio | 38,76 | 30,35 | 37,72 | 25,42 | 28,06 | 19,67 | 20,65 | 13,44 |

La calidad de los productos *MERIS* y *VGT* a nivel de zona de estudio presenta valores altos de los índices de concordancia, comportamiento similar a lo observado en la intercomparación global de los productos de área quemada.

Los mejores valores de índice Sørensen-Dice se obtienen con la intercomparación del producto *MERIS* y los productos MCD64A1 y MCD45A1, con valores superiores al 50% en las zona de estudio de sabana tropical de África y del 60% en la zona de estudio de Oceanía (SS05 y SS10 respectivamente) para el caso del producto MCD45A1, y de 49% y 69% para las mismas zonas con el producto MCD64A1 (Tabla N°25). Estos valores principalmente se deben a que tanto el producto *MERIS* como el producto MCD64A1 utilizan como una de sus principales fuentes de referencia los Hotspots obtenidos por los sensores de MODIS.

Los bajos valores obtenidos en las zonas de sabana tropical (SS02, SS03 y SS09). en las intercomparaciones de *MERIS* con los productos MCD45A1 y MCD64A1, se debe en gran parte al alto porcentaje de cobertura nubosa presente en estos productos en relación al menor porcentaje de nubes en el producto generado a partir del sensor *MERIS* (Tabla N°25).

Giglio *et al.*, (2010) señala además que el producto MCD64A1 tiende a subestimar en más de un 40% el área quemada en sabana tropical, debido a la rápida pérdida de señal de incendios. Esto podría explicar los bajos valores de los índices de similitud de los productos MCD45A1 y MCD64A1 con respecto a *MERIS*, sobre todo en años en los cuales la cobertura nubosa no es tan alta (Tabla N°25).

De la intercomparación con los *productos de área quemada* generados por diferentes centros de investigación europeos, se observa que no existe una alta concordancia con el producto *MERIS* superando levemente el 35% para el índice Kappa y 47% para el índice Sørensen-Dice en la zona de estudio de sabana tropical en Oceanía (SS10), obtenidos de la intercomparación con el producto L3JRC (Tabla N°25).

Estos valores nos indicarían que existe una concordancia moderada a baja con los productos generados con información de los sensores SPOT-VEGETATION y (A)ATSR (GLOBCARBON, L3JRC, GEOLAND2, (A)ATSR y VGT) esto se puede deber al alto porcentaje de nubes presentes en las zonas de estudio al momento de captura de las imágenes y también al tipo de algoritmo utilizado para generar estos productos y a las características de estos sensores que no favorecerían un mejor ajuste de los algoritmos utilizados.

Tabla Nº 25 índices de similitud Kappa y Sörensen-Dice, a partir de la intercomparación con *productos de área quemada y MERIS*.

| Zona de Estudio | (A)ATSR | VGT | MCD45A1 | MCD64A1 | GLOBCARBON | L3JRC | GEOLAND2 |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Índice Kappa (%) | | | | | | | |
| SS01 | 2,48 | 7,31 | 28,72 | 36,17 | 4,13 | 5,63 | 4,62 |
| SS02 | 5,80 | 7,02 | 6,02 | 16,11 | 13,20 | 11,00 | 2,66 |
| SS03 | 16,42 | 15,81 | 28,09 | 28,40 | 14,52 | 15,00 | 4,26 |
| SS04 | 3,77 | 12,47 | 23,88 | 31,02 | 14,86 | 27,50 | 7,32 |
| SS05 | 12,32 | 17,89 | 27,68 | 21,08 | 19,18 | 16,90 | 17,64 |
| SS06 | 19,40 | 22,54 | 41,51 | 40,39 | 23,28 | 33,50 | 4,26 |
| SS07 | 8,28 | 21,22 | 40,77 | 46,90 | 21,28 | 26,00 | 10,97 |
| SS08 | | | | | | | |
| SS09 | -4,38 | -2,10 | 1,69 | 4,15 | 0,39 | 0,18 | 0,25 |
| SS10 | 24,17 | 35,90 | 49,82 | 59,87 | 35,10 | 46,92 | 18,72 |
| Promedio | 9,81 | 15,34 | 27,57 | 31,56 | 16,21 | 20,29 | 7,85 |
| Índice Sörensen-Dice (%) | | | | | | | |
| SS01 | 3,26 | 7,80 | 29,04 | 36,55 | 4,89 | 6,20 | 4,98 |
| SS02 | 12,11 | 14,58 | 8,72 | 21,14 | 18,33 | 15,50 | 4,50 |
| SS03 | 32,06 | 20,46 | 34,20 | 34,60 | 19,19 | 19,45 | 6,40 |
| SS04 | 4,82 | 13,27 | 24,35 | 31,36 | 15,48 | 28,00 | 8,30 |
| SS05 | 35,65 | 56,01 | 56,25 | 47,71 | 43,56 | 41,24 | 40,89 |
| SS06 | 24,51 | 26,97 | 46,50 | 44,84 | 27,53 | 39,50 | 7,77 |
| SS07 | 13,55 | 25,28 | 43,67 | 49,35 | 25,39 | 31,00 | 14,01 |
| SS08 | | | | | | | |
| SS09 | 3,78 | 4,86 | 2,27 | 5,23 | 0,50 | 0,23 | 0,34 |
| SS10 | 34,63 | 46,58 | 60,29 | 69,33 | 44,48 | 55,84 | 27,91 |
| Promedio | 18,26 | 23,98 | 33,92 | 37,79 | 22,15 | 26,33 | 12,79 |

El producto *VGT* presenta valores de concordancia moderados a buenos principalmente en las zonas de sabana tropical (SS05 y SS10). Llegando a obtener un índice kappa y un coeficiente del índice Sörensen-Dice superior al 52% para las mismas zonas, al realizar la intercomparación con el producto MCD45A1 (Tabla N°26). Para el resto de productos de área quemada las tendencias se mantienen; es decir, los indicadores con mejores resultados se dan en zonas tropicales, pero con valores de índice kappa y Sörensen-Dice 5% más bajo que los obtenidos de la intercomparación con los productos MCD45A1 y MCD64A1 (Tabla N°26).

Al intercomparar *VGT* con los productos de área quemada *MERIS* y *ATSR*, las tendencias se mantienen, observándose mejores niveles de concordancia en las zonas tropicales. Los indicadores más altos (que no superan el 56% en Sörensen-Dice) se obtienen de la intercomparación con el producto *MERIS*. Los bajos resultados obtenidos con (A)*ATSR* pueden tener entre sus causas el alto porcentaje de nubes en la mayoría de las escenas mensuales lo que incide directamente en la no detección de área quemada (Tabla N°26).

Al comparar estos resultados con los desarrollados por (Chang y Song, 2009), se confirma que el producto L3JRC tiende globalmente a subestimar el área quemada, lo cual se podría extrapolar al resto de los productos de área quemada generados a partir de datos del sensor VEGETATION. No se observa en nuestras zonas de estudio obteniéndose en la mayor parte de ellas valores similares al del restos de los productos de diferentes centros de investigación tanto europeos como de Estados Unidos

Tabla Nº 26 índices de similitud Kappa y Sörensen-Dice, a partir de la intercomparación con *productos de área quemada* y *VGT*.

| Zona de Estudio | (A)ATSR | MCD45A1 | MCD64A1 | GLOBCARBON | L3JRC | GEOLAND2 |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Índice Kappa (%) | | | | | | |
| SS01 | 1,96 | 11,23 | 12,56 | 0,83 | 3,23 | 1,98 |
| SS02 | 4,25 | 9,47 | 20,25 | 19,38 | 21,78 | 8,47 |
| SS03 | 24,50 | 18,37 | 21,80 | 24,30 | 19,74 | 8,59 |
| SS04 | 1,94 | 11,18 | 16,03 | 10,98 | 17,39 | 6,99 |
| SS05 | 19,64 | 28,68 | 20,49 | 26,81 | 24,92 | 18,53 |
| SS06 | 21,80 | 31,44 | 33,04 | 28,02 | 21,08 | 8,32 |
| SS07 | 6,16 | 31,48 | 28,17 | 16,70 | 22,60 | 10,52 |
| SS08 | 2,15 | 5,67 | 5,14 | 3,11 | 3,37 | 3,23 |
| SS09 | 9,37 | 0,31 | 5,97 | 0,80 | 0,49 | 0,82 |
| SS10 | 36,27 | 42,83 | 39,36 | 39,66 | 43,21 | 27,28 |
| Promedio | 12,80 | 19,06 | 20,28 | 17,06 | 17,78 | 9,47 |
| Índice Sörensen-Dice (%) | | | | | | |
| SS01 | 3,48 | 11,77 | 13,24 | 8,07 | 4,60 | 3,01 |
| SS02 | 6,56 | 13,97 | 26,53 | 25,86 | 27,60 | 12,70 |
| SS03 | 27,88 | 21,20 | 25,24 | 26,54 | 21,90 | 10,69 |
| SS04 | 3,39 | 15,63 | 16,61 | 11,84 | 18,56 | 8,63 |
| SS05 | 42,77 | 53,56 | 44,96 | 46,44 | 43,71 | 39,15 |
| SS06 | 25,52 | 34,76 | 36,15 | 31,14 | 25,40 | 11,88 |
| SS07 | 12,73 | 35,16 | 32,14 | 21,67 | 28,06 | 15,37 |
| SS08 | 2,82 | 7,01 | 6,35 | 5,81 | 6,11 | 5,64 |
| SS09 | 19,54 | 0,40 | 7,65 | 0,94 | 0,57 | 0,98 |
| SS10 | 45,65 | 53,14 | 52,21 | 50,62 | 52,55 | 38,36 |
| Promedio | 19,03 | 24,66 | 26,11 | 22,89 | 22,91 | 14,64 |

3.5.2 Evaluación de la sobre y sub-estimación y, concordancia global por zona de estudios

La intercomparación del producto *Fusionado* con respecto al resto de los productos de área quemada tiene una concordancia media superior al 77% debido al acuerdo en la clase no quemada. El valor mínimo se observa en el área de estudio SS05 (<60%) obtenido de la intercomparación con los productos GEOLAND2, MCD45A1 y MCD64A1. Zona donde la matriz presenta valores de sobre y sub-estimación relativamente más bajos que en el resto de las zonas de estudio. Esta tendencia se observa también en la zona de estudio SS10 (Tabla N°27).

Estas zonas corresponden a las que en el apartado anterior obtuvieron los valores más altos tanto para el índice Kappa como para Sörensen-Dice en estas mismas intercomparaciones. Existe una tendencia a obtener mayores porcentajes de sobre-estimación con una media del 65% que en los valores de sub-estimación con una media del 60%. La dispersión de los datos (Su/Se) disminuye al presentar los valores más cercanos entre los productos intercomparados (Tabla N°27).

Los productos con los cuales se obtuvieron los valores de sobre y sub-estimación más altos fueron con el GEOLAND2 (83% Se y 74% Su) y GLOBCARBON (77% Se y 71% Su). (Tabla N°27). La intercomparación entre el producto *Fusionado* y los productos *MERIS*, *VGT* y *(A)ATSR* ha obtenido valores de concordancia global levemente superiores a la media total (entre 86% y 88%).

El producto con el que se obtienen menores porcentajes de sobre-estimación es *VGT* con un 40% y de sub-estimación es *MERIS* con un 35%. Las zonas de estudio con las menores sobre y sub-estimaciones son SS05 (28% Se y 11% Su), SS08 (13% Se y 74% Su) y SS10 (34% Se y 8% Su) (Tabla N°27).

Los menores valores de sobre y sub-estimación, y el alto valor de exactitud global (98%) obtenidos en la zona SS08 se deben a que el producto *VGT* es el principal producto utilizado para generar el producto *Fusionado* en esta zona de estudio.

Tabla N° 27. Dispersión por zona de estudio de acuerdos y desacuerdos del producto *Fusionado* frente a otros productos de área quemada

| Zona de Estudio | Producto global de área quemada | | | | | | | |
|-----------------|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | MERIS | ATSR | VGT | MCD45A1 | MCD64A1 | GLOBCARBON | L3JRC | GEOLAND2 |
| | Nivel de exactitud | | | | | | | |
| SS01 | 97,9 | 93,3 | 98,6 | 98,5 | 98,7 | 96,8 | 95,0 | 97,0 |
| SS02 | 88,0 | 90,8 | 84,7 | 88,9 | 88,2 | 89,6 | 88,4 | 88,5 |
| SS03 | 85,4 | 93,1 | 92,0 | 89,3 | 89,2 | 90,9 | 89,9 | 88,9 |
| SS04 | 96,9 | 96,2 | 97,3 | 97,2 | 97,9 | 97,9 | 96,6 | 96,5 |
| SS05 | 69,8 | 67,9 | 72,3 | 60,6 | 58,1 | 64,1 | 62,1 | 58,0 |
| SS06 | 87,4 | 91,1 | 92,3 | 88,8 | 89,4 | 90,9 | 87,3 | 87,3 |
| SS07 | 88,1 | 89,0 | 91,3 | 90,3 | 91,0 | 91,2 | 87,0 | 89,0 |
| SS08 | 0,0 | 98,2 | 98,2 | 96,9 | 96,9 | 94,6 | 92,4 | 94,5 |
| SS09 | 69,8 | 97,8 | 88,5 | 82,1 | 92,5 | 97,2 | 94,8 | 93,5 |
| SS10 | 86,7 | 81,4 | 86,6 | 79,6 | 79,9 | 79,3 | 81,8 | 74,1 |
| MEDIA | 77,0 | 89,9 | 90,2 | 87,2 | 88,2 | 89,2 | 87,5 | 86,7 |
| | sobrestimación (%) | | | | | | | |
| SS01 | 97,92 | 93,33 | 98,65 | 98,51 | 98,70 | 96,83 | 94,97 | 97,01 |
| SS02 | 88,00 | 90,76 | 84,73 | 88,95 | 88,17 | 89,56 | 88,35 | 88,46 |
| SS03 | 85,40 | 93,07 | 91,99 | 89,30 | 89,19 | 90,90 | 89,88 | 88,90 |
| SS04 | 96,90 | 96,20 | 97,32 | 97,21 | 97,95 | 97,86 | 96,56 | 96,46 |
| SS05 | 69,80 | 67,93 | 72,29 | 60,64 | 58,09 | 64,07 | 62,11 | 57,95 |
| SS06 | 87,40 | 91,08 | 92,25 | 88,84 | 89,44 | 90,88 | 87,35 | 87,26 |
| SS07 | 88,10 | 89,04 | 91,33 | 90,31 | 90,98 | 91,22 | 87,02 | 88,98 |
| SS08 | | 98,20 | 98,22 | 96,92 | 96,89 | 94,62 | 92,40 | 94,47 |
| SS09 | 69,80 | 97,80 | 88,51 | 82,09 | 92,50 | 97,15 | 94,78 | 93,50 |
| SS10 | 86,70 | 81,41 | 86,64 | 79,63 | 79,89 | 79,32 | 81,84 | 74,07 |
| MEDIA | 77,00 | 89,88 | 90,19 | 87,24 | 88,18 | 89,24 | 87,53 | 86,71 |
| | subestimación (%) | | | | | | | |
| SS01 | 87,62 | 27,58 | 53,22 | 76,97 | 65,92 | 94,07 | 74,65 | 88,02 |
| SS02 | 61,80 | 92,07 | 42,92 | 87,56 | 74,74 | 68,74 | 66,39 | 85,07 |
| SS03 | 53,40 | 40,57 | 49,85 | 72,29 | 72,06 | 77,84 | 77,45 | 89,95 |
| SS04 | 85,83 | 48,65 | 66,45 | 83,26 | 85,15 | 87,62 | 82,78 | 87,56 |
| SS05 | 34,20 | 53,19 | 28,13 | 52,11 | 63,46 | 62,93 | 64,38 | 64,52 |
| SS06 | 57,40 | 59,46 | 47,01 | 59,18 | 65,06 | 65,65 | 56,81 | 86,72 |
| SS07 | 73,80 | 53,89 | 40,20 | 62,99 | 59,91 | 76,47 | 61,80 | 81,64 |
| SS08 | | 82,45 | 13,92 | 83,67 | 83,48 | 87,91 | 81,20 | 88,40 |
| SS09 | 84,40 | 12,30 | 28,21 | 85,77 | 86,70 | 98,07 | 96,73 | 98,12 |
| SS10 | 34,34 | 49,46 | 34,00 | 37,25 | 29,24 | 51,00 | 51,62 | 63,82 |
| MEDIA | 57,28 | 51,96 | 40,39 | 70,11 | 68,57 | 77,03 | 71,38 | 83,38 |

La intercomparación del producto *MERIS* con respecto al resto de los productos de área quemada presenta un 83% de concordancia global debido a un menor acuerdo en la clase no quemada, por la menor relación con los productos *Fire_CCI*. Los valores mínimos promedio de sobre y sub-estimación se observan en las intercomparaciones con los productos MCD64A1 (63% Se y 50% Su) y MCD45A1 (66% Se y 52% Su), los cuales, además, presentan una menor dispersión de los datos (Su/Se) y los valores más altos de concordancia global (85%) (Tabla N°28).

Estos sensores corresponden a los que en el apartado anterior obtuvieron los valores más altos tanto para el índice Kappa como para Sörensen-Dice en esas mismas intercomparaciones, llegando a obtenerse valores de los índices Kappa y Sörensen-Dice del 32% y 38%, respectivamente, de la intercomparación con MCD64A1 y del 28% (índice Kappa) y 34% (índice Sörensen-Dice) de la intercomparación con MCD45A1. Estos valores se obtienen en las zonas SS05 y SS10 (Tabla N°28).

Existe una tendencia a obtener mayores valores de sobre-estimación con una media del 70% que en los de sub-estimación con una media del 61%, La dispersión de los datos Su/Se en estas zonas disminuye al presentar los valores más cercanos entre los productos intercomparados (Tabla N°28).

Los productos con los cuales se obtuvieron los valores de sobre y subestimación más altos fueron con el *VGT* (77% Se y 67% Su) y *GEOLAND2* (89% Se y 67% Su), que corresponden a los productos con menor concordancia global con un 84% y 85% respectivamente, sin considerar el producto *(A)ATSR* que tiene un nivel de concordancia global de menos del 67%, lo que se debe a la falta de información en una serie de zonas de estudio. El producto *L3JRC* también tiene la misma tendencia, lo cual estaría señalando que el producto *MERIS* tiene menores relaciones con los productos que utilizan como referencia la información del sensor *VGT*, que tienden a detectar área quemada muy dispersa en relación al área observada por el producto *MERIS* (Tabla N°28).

Tabla N° 28. Niveles de acuerdo y desacuerdos del producto *MERIS* y otros productos de área quemada, por zona de estudio.

| Zona de Estudio | <i>Producto global de área quemada</i> | | | | | | |
|--------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | ATSR | VGT | MCD45A1 | MCD64A1 | GLOBCARBON | L3JRC | GEOLAND2 |
| Nivel de exactitud | | | | | | | |
| SS01 | 72,5 | 98,8 | 99,3 | 99,0 | 96,7 | 95,4 | 98,2 |
| SS02 | 84,7 | 82,2 | 90,2 | 89,5 | 87,7 | 89,0 | 90,9 |
| SS03 | 81,9 | 86,2 | 87,0 | 87,5 | 82,6 | 86,0 | 85,4 |
| SS04 | 73,5 | 98,0 | 98,8 | 99,2 | 98,6 | 98,0 | 97,6 |
| SS05 | 44,7 | 57,9 | 63,1 | 59,4 | 56,9 | 55,5 | 57,6 |
| SS06 | 70,0 | 89,7 | 90,6 | 91,2 | 89,6 | 88,5 | 88,6 |
| SS07 | 64,8 | 92,6 | 94,5 | 95,3 | 92,0 | 88,5 | 93,6 |
| SS08 | | | | | | | |
| SS09 | 48,2 | 72,3 | 63,0 | 79,4 | 79,3 | 78,5 | 79,2 |
| SS10 | 62,1 | 80,4 | 82,6 | 84,8 | 81,7 | 84,9 | 77,5 |
| MEDIA | 66,9 | 84,2 | 85,5 | 87,3 | 85,0 | 84,9 | 85,4 |
| sobrestimación (%) | | | | | | | |
| SS01 | 49,47 | 84,81 | 65,35 | 32,92 | 88,08 | 95,50 | 88,17 |
| SS02 | 86,98 | 80,60 | 93,60 | 82,60 | 84,67 | 75,50 | 96,96 |
| SS03 | 74,50 | 86,80 | 74,00 | 73,60 | 88,66 | 37,90 | 96,16 |
| SS04 | 56,24 | 77,71 | 73,33 | 73,46 | 84,04 | 72,00 | 86,65 |
| SS05 | 48,15 | 47,68 | 54,74 | 64,64 | 70,11 | 21,50 | 71,95 |
| SS06 | 59,29 | 80,98 | 59,23 | 64,14 | 81,20 | 53,50 | 95,20 |
| SS07 | 50,27 | 73,19 | 53,37 | 50,47 | 69,96 | 77,00 | 88,30 |
| SS08 | | | | | | | |
| SS09 | 71,45 | 96,00 | 78,20 | 96,60 | 99,00 | 28,50 | 99,30 |
| SS10 | 48,39 | 63,26 | 42,05 | 26,77 | 66,58 | 27,00 | 80,94 |
| MEDIA | 60,53 | 76,78 | 65,99 | 62,80 | 81,37 | 54,27 | 89,29 |
| subestimación (%) | | | | | | | |
| SS01 | 78,27 | 94,46 | 73,88 | 25,74 | 96,83 | 76,50 | 96,24 |
| SS02 | 86,73 | 86,00 | 77,20 | 28,66 | 74,67 | 88,00 | 80,92 |
| SS03 | 54,25 | 48,58 | 44,00 | 56,60 | 30,33 | 88,00 | 55,60 |
| SS04 | 77,17 | 87,50 | 67,87 | 45,07 | 82,23 | 68,50 | 93,80 |
| SS05 | 19,40 | 36,30 | 25,08 | 74,26 | 19,52 | 72,00 | 23,73 |
| SS06 | 47,58 | 51,09 | 45,24 | 60,36 | 47,95 | 65,50 | 77,32 |
| SS07 | 70,59 | 76,37 | 58,69 | 49,84 | 77,84 | 52,00 | 80,96 |
| SS08 | | | | | | | |
| SS09 | 70,23 | 91,14 | 40,80 | 47,00 | 55,00 | 99,00 | 53,00 |
| SS10 | 38,72 | 34,37 | 33,29 | 65,56 | 30,83 | 54,50 | 42,44 |
| MEDIA | 60,33 | 67,31 | 51,78 | 50,34 | 57,24 | 73,78 | 67,11 |

La intercomparación del producto *VGT* con respecto al resto de los productos de área quemada presenta un 85% de concordancia global debido al acuerdo en la clase no quemada. Los valores mínimos promedio de sobre y sub-estimación se observan en las intercomparaciones con el producto *MCD64A1* (70% Se y 68% Su), los cuales, además, presentan una menor dispersión de los datos (Se/Su) y valores más altos de concordancia global (98%). obtenido desde la misma intercomparación en la zona de estudio de Canadá (SS01) (Tabla N°29).

Esta intercomparación corresponde a las que en el apartado anterior obtuvo los valores más altos para los índice Kappa y Sörensens-Dice de 20% y 26% respectivamente, llegando a obtenerse valores de los índices Kappa Sörensens-Dice del 43% y 53%, respectivamente, en la zona de Australia (SS10) (Tabla N°29).

De las intercomparaciones del producto *VGT* con el resto de los productos se observa una tendencia similar al resto de las comparaciones obtenidas de los productos *Fire_CCI* (*Fusionado* y *MERIS*); es decir, de obtener mayores valores de sobre-estimación que los de sub-estimación, con una media del 77% en los primeros y del 72% en los segundos, La dispersión de los datos Se/Su en estas zonas disminuye al presentar los valores más cercanos entre los productos intercomparados (Tabla N°29).

Los productos con los cuales se obtuvieron los valores de sobre y sub-estimación más altos fueron con el *MERIS* (87% Se y 75% Su) y *GEOLAND2* (85% Se y 76% Su). Además, con el producto *GEOLAND2* es con el cual se obtiene una concordancia global con un 75%, inferior a la media del 87%. Como se señaló anteriormente, el producto *VGT* tienden a detectar área quemada muy dispersa en relación al área observada por los productos *MERIS*, *MCD45A1* y *MCD64A1* (Tabla N°29).

Tabla N° 29. Niveles de acuerdo y desacuerdos del producto VGT y otros productos de área quemada, por zona de estudio.

| Zona de Estudio | Producto global de área quemada | | | | | | GEOLAND2 |
|--------------------|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | ATSR | MERIS | MCD45A1 | MCD64A1 | GLOBCARBON | L3JRC | |
| Nivel de exactitud | | | | | | | |
| SS01 | 91,9 | 98,8 | 98,8 | 98,5 | 96,8 | 95,0 | 97,7 |
| SS02 | 84,2 | 84,8 | 86,0 | 85,3 | 85,4 | 86,9 | 67,2 |
| SS03 | 92,5 | 87,5 | 93,8 | 92,8 | 95,4 | 94,6 | 82,5 |
| SS04 | 94,5 | 98,0 | 97,7 | 98,0 | 97,9 | 97,3 | 91,9 |
| SS05 | 64,9 | 57,9 | 66,8 | 63,7 | 67,8 | 69,3 | 46,9 |
| SS06 | 92,5 | 89,5 | 92,9 | 93,7 | 93,9 | 90,1 | 87,5 |
| SS07 | 84,2 | 92,6 | 93,0 | 92,0 | 90,4 | 88,9 | 81,9 |
| SS08 | 96,4 | | 96,5 | 96,5 | 93,6 | 91,2 | 96,1 |
| SS09 | 79,5 | 90,4 | 91,2 | 90,5 | 91,8 | 91,9 | 48,3 |
| SS10 | 82,0 | 80,4 | 82,3 | 78,3 | 82,8 | 84,7 | 57,0 |
| MEDIA | 86,3 | 86,7 | 89,9 | 88,9 | 89,6 | 89,0 | 75,7 |
| sobrestimación (%) | | | | | | | |
| SS01 | 83,4 | 98,8 | 88,2 | 84,3 | 96,0 | 87,3 | 94,6 |
| SS02 | 92,0 | 84,8 | 91,0 | 80,0 | 80,5 | 71,4 | 90,8 |
| SS03 | 59,6 | 87,5 | 69,6 | 65,0 | 77,6 | 78,2 | 90,7 |
| SS04 | 87,5 | 98,0 | 83,9 | 86,2 | 90,3 | 82,1 | 88,2 |
| SS05 | 55,4 | 57,9 | 50,2 | 63,0 | 62,4 | 63,9 | 67,1 |
| SS06 | 67,6 | 89,5 | 46,2 | 50,8 | 65,7 | 57,2 | 86,1 |
| SS07 | 76,8 | 92,6 | 64,7 | 68,4 | 78,8 | 61,8 | 85,6 |
| SS08 | 92,4 | | 88,5 | 88,3 | 90,3 | 84,2 | 89,4 |
| SS09 | 70,0 | 90,4 | 99,8 | 95,3 | 99,5 | 99,5 | 99,5 |
| SS10 | 52,9 | 80,4 | 29,0 | 23,4 | 49,6 | 47,1 | 62,1 |
| MEDIA | 73,8 | 86,7 | 71,1 | 70,5 | 79,1 | 73,3 | 85,4 |
| subestimación (%) | | | | | | | |
| SS01 | 98,02 | 84,81 | 83,93 | 84,38 | 98,59 | 96,95 | 97,70 |
| SS02 | 92,58 | 79,34 | 62,77 | 54,47 | 57,07 | 58,80 | 67,20 |
| SS03 | 76,68 | 85,59 | 81,72 | 78,54 | 65,75 | 74,80 | 82,53 |
| SS04 | 97,45 | 83,71 | 79,60 | 72,54 | 83,65 | 79,20 | 91,88 |
| SS05 | 54,50 | 47,68 | 39,53 | 40,40 | 34,32 | 40,41 | 46,87 |
| SS06 | 77,84 | 80,99 | 73,68 | 70,51 | 69,72 | 80,60 | 87,55 |
| SS07 | 89,87 | 73,19 | 64,66 | 64,66 | 76,54 | 76,40 | 81,87 |
| SS08 | 95,86 | | 93,46 | 93,74 | 95,67 | 96,00 | 96,08 |
| SS09 | 85,30 | 76,92 | 58,74 | 65,31 | 33,11 | 37,00 | 48,28 |
| SS10 | 47,92 | 63,26 | 56,01 | 59,49 | 47,91 | 46,92 | 56,99 |
| MEDIA | 81,60 | 75,05 | 69,41 | 68,41 | 66,23 | 68,71 | 75,69 |

3.5.3 Evaluación del sesgo en el día de detección de área quemada

Al evaluar las diferencias que se ocasionan en el día de detección del área quemada entre los diferentes productos, podemos determinar que el producto GEOLAND2 tiene con los productos *Fire_CCI* las mayores diferencias, siendo en promedio de 33, 38 y 27 días con los productos *Fusionado*, *MERIS* y *VGT* respectivamente. La zona de estudio que presenta el mayor sesgo es la correspondiente a Borneo (SS09), superando en dos productos los 116 días. Esto se debe principalmente al ajuste del algoritmo en zonas tropicales y también posiblemente a la alta cantidad de nubes registradas por el producto L3JRC en esta zona (Tabla N°30).

Los sesgos menores, que en promedio son entre 18 y 22 días en los tres productos *Fire_CCI*, se obtienen de la intercomparación con los productos MCD45A1 y MCD64A1. El producto MERIS presenta con respecto al producto MCD64A1 resultados levemente mejores que el producto MCD45A1, en promedio de 1 y 2 días (Tabla N°30).

En la zona de Colombia (SS02) se obtuvieron valores superiores a la media de aproximadamente 60 días con el producto MCD45A1 y 40 días con el producto MCD64A1, esto para los tres productos *Fire_CCI*. Al observar la información de los productos MCD45A1 y MCD64A1 se observa que en esta zona la cobertura de nubes no ha permitido detectar el día original del inicio del incendio, lo que originaría las diferencias superiores a la media (Tabla N°30).

Las diferencias en día de detección de área quemada entre los tres productos *Fire_CCI* y el producto *Fusionado* presenta valores de 17 días (*MERIS*), 8 días (*(A)ATSR*) y 7 días (*VGT*). Llegando a ser en algunas zonas de un día con el producto *VGT* (Tabla N°30).

Tabla N° 30 Diferencias en días de la detección del área quemada entre productos
Fire_CCI y otros productos

| Zona de Estudio | MERIS | (A)ATSR | VGT | MCD45A1 | MCD64A1 | GLOBCARBON | L3JRC | GEOLAND2 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| <i>Fusionado</i> | | | | | | | | |
| SS01 | 10 | 4 | 4 | 7 | 12 | 29 | 29 | 19 |
| SS02 | 11 | 24 | 15 | 60 | 29 | 17 | 24 | 41 |
| SS03 | 16 | 4 | 3 | 15 | 11 | 9 | 19 | 15 |
| SS04 | 14 | 3 | 4 | 9 | 11 | 31 | 49 | 70 |
| SS05 | 24 | 11 | 10 | 19 | 17 | 15 | 16 | 19 |
| SS06 | 18 | 7 | 6 | 17 | 14 | 14 | 17 | 26 |
| SS07 | 13 | 7 | 5 | 9 | 9 | 19 | 19 | 26 |
| SS08 | - | 2 | 1 | 28 | 14 | 27 | 72 | 44 |
| SS09 | 58 | 5 | 20 | 25 | 24 | 56 | 42 | 51 |
| SS10 | 9 | 9 | 4 | 9 | 24 | 6 | 7 | 14 |
| Promedio | 17 | 8 | 7 | 20 | 16 | 22 | 29 | 33 |
| MERIS | | | | | | | | |
| SS01 | | 12 | 12 | 18 | 18 | 24 | 30 | 20 |
| SS02 | | 57 | 56 | 77 | 42 | 55 | 60 | 74 |
| SS03 | | 21 | 22 | 16 | 16 | 16 | 28 | 33 |
| SS04 | | 26 | 35 | 13 | 13 | 15 | 16 | 39 |
| SS05 | | 17 | 28 | 23 | 20 | 21 | 21 | 22 |
| SS06 | | 17 | 21 | 20 | 18 | 24 | 23 | 27 |
| SS07 | | 16 | 16 | 13 | 12 | 20 | 21 | 21 |
| SS08 | | | | | | | | |
| SS09 | | 109 | 105 | 13 | 28 | 80 | 23 | 94 |
| SS10 | | 11 | 11 | 10 | 15 | 10 | 10 | 16 |
| Promedio | | 32 | 34 | 22 | 20 | 29 | 25 | 38 |
| VGT | | | | | | | | |
| SS01 | | 12 | | 8 | 12 | 48 | 36 | 24 |
| SS02 | | 18 | | 62 | 26 | 19 | 14 | 35 |
| SS03 | | 9 | | 7 | 9 | 7 | 16 | 11 |
| SS04 | | 15 | | 9 | 14 | 26 | 20 | 45 |
| SS05 | | 14 | | 14 | 14 | 12 | 13 | 26 |
| SS06 | | 13 | | 10 | 9 | 9 | 12 | 16 |
| SS07 | | 24 | | 8 | 9 | 23 | 22 | 30 |
| SS08 | | 7 | | 23 | 27 | 39 | 72 | 27 |
| SS09 | | 94 | | 29 | 45 | 55 | 45 | 43 |
| SS10 | | 11 | | 7 | 22 | 6 | 6 | 12 |
| Promedio | | 22 | | 18 | 19 | 24 | 26 | 27 |

3.5.4 Evaluación en la estimación del área quemada

Si bien cada producto de área quemada detecta diferentes valores de superficie tanto anualmente como por zona de estudio, a través de la estimación del coeficiente de determinación se ha buscado determinar si existen relaciones entre los productos *Fusionado*, *MERIS* y *VGT* y con el resto de *productos de área quemada* obteniéndose los siguientes resultados:

- El producto *Fusionado* es el que presenta los valores más bajos de correlación con un r^2 de 0,27 y 0,29 obtenido de la intercomparación con los productos de área quemada L3JRC y GEOLAND2, respectivamente. Se obtienen los mejores resultados de r^2 a partir de la intercomparación con los productos MCD64A1 de 0,47 y de 0,45 con GLOBCARBON. Estos valores se obtienen al seleccionar todos los datos de área quemada que ha detectado cada producto entre los años 1999 y 2009 y entre 2005 y 2009 para el producto *MERIS* (Tabla N°31).
- El producto *MERIS* presenta mejores resultados entre los productos *Fire_CCI* al hacer la relación con el producto *Fusionado* ($r^2=0,91$); esto nos indicaría la importancia o peso específico de cada uno de estos productos al momento de generar el producto *Fusionado*. Los mejores valores de r^2 se obtiene de la intercomparación con el producto MCD45A1 con un valor de 0,63 y 0,70 para los productos *VGT* y *MERIS*, respectivamente. La correlación más baja se obtiene con el producto L3JRC de 0,27 con el producto *Fusionado* (Tabla N°31).

Al realizar el análisis de los coeficientes de determinación de cada uno de los productos de área quemada a nivel de zona de estudio, los resultados obtenidos mejoran con respecto al análisis interanual para el producto *Fusionado* y *VGT*, obteniéndose valores de r^2 de 0,91 a partir de la intercomparación con MCD45A1 y 0,88 a partir de la intercomparación con GEOLAND2, respectivamente. Los valores de r^2 son menores que los obtenidos de la correlación interanual con el producto *MERIS* (Tabla N°31).

Estas diferencias se podría deber a que al ser una menor cantidad de datos por zona de estudio (sólo 10), un valor de área quemada relativamente alto ajusta la línea de correlación a valores que tienden a sesgar positiva o negativamente los resultados. Lo que se suaviza y ajusta estas diferencias al seleccionar la totalidad del área quemada y no por grupo de datos (Tabla N°31).

El producto *MERIS* es el que presenta los mejores valores de correlación con el resto de *los productos de área quemada* al momento de detectar el área quemada, no siendo inferior el r^2 en ninguna de las intercomparaciones al 0,60. La mejor correlación se obtiene con el producto MCD64A1 con un r^2 de 0,64 obtenido a nivel de área de estudio. Este resultado alienta a proponer la utilización de ambos productos como complemento en investigaciones de modelado del clima y/o vegetación (Tabla N°31).

Globalmente este producto también presenta una mejor correlación global en la detección de área quemada con los productos MCD45A1 ($r^2=0,70$), GEOLAND2 ($r^2=0,65$), GLOBCARBON ($r^2=0,61$) y MCD64A1 ($r^2=0,60$). (Tabla N°31).

No se ha calculado el coeficiente de determinación entre los productos *MERIS* y *L3JRC* debido a que la información común solamente afecta a dos años lo que influye en la calidad de los resultados, principalmente al calcular el coeficiente de determinación a nivel de zona de estudio.

La intercomparación del producto *VGT* presenta sus mejores valores del coeficiente de determinación con los productos MCD45A1 con un r^2 de 0,63 y GLOBCARBON con un r^2 de 0,64. Para el resto de las correlaciones realizadas los valores obtenidos de r^2 no superaron 0,50 (Tabla N°31).

Tabla N° 31 Coeficiente de Determinación entre *productos del área quemada* calculada

| | <i>Fire_CCI</i> | | | MCD45A1 | MCD64A1 | GLOBCARBON | L3JRC | GEOLAND2 | |
|---|------------------|-------|------|---------|---------|------------|-------|----------|------|
| | <i>Fusionado</i> | MERIS | ATSR | | | | | | VGT |
| Coeficientes de determinación (r^2) | | | | | | | | | |
| Agrupados Globalmente | | | | | | | | | |
| <i>Fusionado</i> | 1 | 0,91 | 0,56 | 0,61 | 0,39 | 0,47 | 0,45 | 0,27 | 0,29 |
| <i>MERIS</i> | 0,91 | 1 | 0,39 | 0,72 | 0,70 | 0,60 | 0,61 | | 0,65 |
| <i>VGT</i> | 0,61 | 0,72 | 0,42 | 1 | 0,63 | 0,51 | 0,64 | 0,48 | 0,54 |
| Agrupado por zona de estudio | | | | | | | | | |
| <i>Fusionado</i> | 1 | 0,89 | 0,87 | 0,91 | 0,91 | 0,75 | 0,83 | 0,68 | 0,88 |
| <i>MERIS</i> | 0,89 | 1 | 0,78 | 0,86 | 0,74 | 0,61 | 0,64 | | 0,67 |
| <i>VGT</i> | 0,91 | 0,86 | 0,75 | 1 | 0,75 | 0,58 | 0,76 | 0,58 | 0,76 |

De las intercomparaciones entre los productos *Fire_CCI* se observa que existe una mayor correlación del producto *Fusionado* con *MERIS*, tanto globalmente como por zona de estudio; eso se debe a la presencia en ambos productos de un par de valores de área quemada que se escapan de la media y que tienen a ajustar falsamente la línea de regresión. Al analizar el área quemada obtenida en cada producto a nivel anual se puede observar que al intercomparar el producto *Fusionado* con el resto de los productos de área quemada, todos tienden a subestimarla a partir del año 2005 cuando se agrega al cálculo del producto *Fusionado* el producto *MERIS*. Pevio a este evento la mayoría de los productos sobreestimaban el área quemada con relación al producto *Fusionado* y este producto presentaba una tendencia similar a GLOBCARBON (Figura N°27 y Tablas N°32).

Probablemente el producto *Fusionado* debería ajustar el algoritmo que actualmente utiliza con el fin de, al menos, seleccionar tan solo los pixeles quemados que han sido detectados por dos sensores y no sumar la totalidad de pixeles quemados detectados por todos los sensores. El diseño actual del algoritmo está influyendo en la sobreestimación de área quemada detectada por este producto (Figura N°27).

El producto MERIS tiende a sobreestimar el área quemada con respecto al resto de los productos, esto se puede deber a que en las zonas de estudio que corresponden a sabana tropical estima un 40% más de área que la calculada por el resto de los productos. Esto nos permite indicar que estaría más cercano a la realidad de campo que el producto MCD64A1 que, de acuerdo al estudio de Giglio *et al.*, (2010). estos productos estarían subestimando en igual porcentaje el área quemada en estas zonas (Tabla N°32, Figura N°27).

En la Tabla N°32 Y Figura N°27 se observa cómo el producto VGT con excepción de año 2003 tiende a sobreestimar el área quemada con relación a la generada por el resto de los productos europeos y MODIS. Tendencia que se repite a nivel de zona de estudio, sobre todo en zonas correspondientes a sabana tropical en las cuales el área quemada estimada es el doble de la calculada por el resto de los productos.

En la tabla N°32 y Figura N°27 se observa que el producto VGT sólo subestima el área quemada en los años 2005 y 2006 con respecto al producto (A)ATSR. Con respecto al producto MERIS, si bien las superficies de área quemada son aproximadamente similares, tiende a subestimar el área quemada principalmente en zonas de sabana tropical.

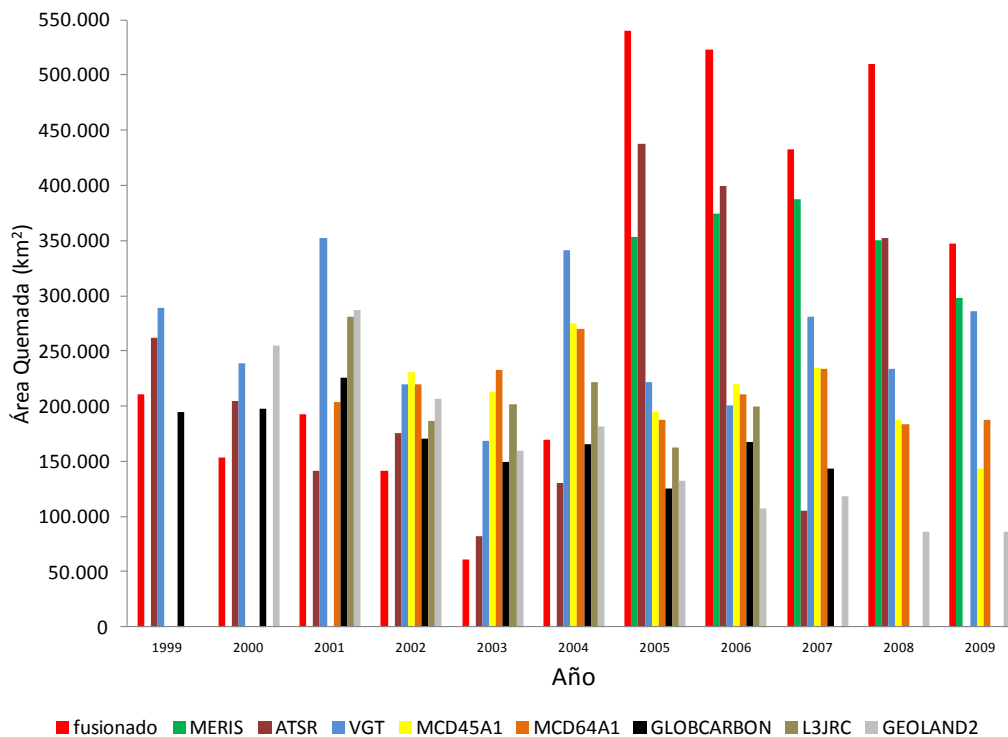


Figura N° 27 Variación anual del área quemada por producto.

Tabla Nº 32 Área quemada (km²) por producto por zona de estudio y por año

| Zona de Estudio | Fire_CCI | | | MCD45A1 | MCD64A1 | GLOBCARBON | L3JRC | GEOLAND2 |
|-----------------|-----------|---------|---------|---------|---------|------------|---------|----------|
| | Fusionado | MERIS | ATSR | | | | | |
| 1999 | | | | | | | | |
| SS01 | 695 | 23.901 | 2.613 | | | 6.213 | | |
| SS02 | 9.109 | 64 | 29.604 | | | 6.823 | | |
| SS03 | 5.574 | 10.955 | 6.084 | | | 6.289 | | |
| SS04 | 1.008 | 10.584 | 1.852 | | | 1.071 | | |
| SS05 | 116.558 | 113.492 | 126.731 | | | 65.134 | | |
| SS06 | 2.897 | 7.567 | 7.562 | | | 14.415 | | |
| SS07 | 2.269 | 36.751 | 14.504 | | | 11.120 | | |
| SS08 | 1.739 | 105 | 10.345 | | | 12.734 | | |
| SS09 | 251 | - | 23.161 | | | 10 | | |
| SS10 | 68.339 | 58.307 | 66.472 | | | 70.431 | | |
| total | 210.418 | 261.726 | 288.928 | | | 194.240 | | |
| 2000 | | | | | | | | |
| SS01 | 372 | 8.610 | 1.251 | | | 5.496 | | 6.386 |
| SS02 | 4.212 | 204 | 24.728 | | | 16.677 | | 23.189 |
| SS03 | 2.964 | 9.596 | 7.204 | | | 3.314 | | 10.416 |
| SS04 | 479 | 3.247 | 2.951 | | | 1.677 | | 7.221 |
| SS05 | 76.781 | 99.484 | 69.492 | | | 67.971 | | 77.918 |
| SS06 | 8.593 | 8.421 | 19.417 | | | 16.044 | | 24.338 |
| SS07 | 1.096 | 33.161 | 18.801 | | | 9.919 | | 13.705 |
| SS08 | 1.569 | - | 8.503 | | | 17.904 | | 22.790 |
| SS09 | 119 | - | 20.877 | | | 1 | | 28 |
| SS10 | 55.619 | 41.912 | 65.679 | | | 58.833 | | 68.393 |
| total | 153.804 | 204.635 | 238.903 | | | 197.836 | | 254.384 |
| 2001 | | | | | | | | |
| SS01 | 61 | 4.601 | 1.425 | | 310 | 3.733 | 9.124 | 5.749 |
| SS02 | 15.069 | 16 | 51.852 | | 14.604 | 14.625 | 17.978 | 16.722 |
| SS03 | 5.867 | 12.187 | 8.500 | | 9.351 | 5.670 | 7.566 | 10.042 |
| SS04 | 747 | 994 | 8.312 | | 927 | 1.817 | 1.705 | 5.012 |
| SS05 | 105.462 | 91.705 | 132.783 | | 67.224 | 58.250 | 56.552 | 74.832 |
| SS06 | 12.328 | 17.681 | 13.148 | | 21.207 | 19.756 | 42.194 | 31.941 |
| SS07 | 3.308 | 8.545 | 31.199 | | 9.237 | 18.634 | 25.945 | 25.718 |
| SS08 | 13 | 16 | 1.792 | | 97 | 8.075 | 15.976 | 11.294 |
| SS09 | 989 | - | 34.272 | | 1.288 | 71 | 989 | 172 |
| SS10 | 47.196 | 5.108 | 68.842 | | 79.735 | 94.602 | 103.247 | 105.026 |
| Total | 193.041 | 140.853 | 352.125 | | 203.980 | 225.233 | 281.276 | 286.508 |
| 2002 | | | | | | | | |
| SS01 | 926 | 16.301 | 2.456 | 1.903 | 2.750 | 5.359 | 6.708 | 6.579 |
| SS02 | 6.011 | 13 | 28.128 | 5.542 | 10.165 | 15.025 | 15.421 | 11.981 |
| SS03 | 3.120 | 16.337 | 4.421 | 20.239 | 17.058 | 4.993 | 9.289 | 8.167 |
| SS04 | 660 | 2.965 | 1.347 | 1.343 | 950 | 1.335 | 2.198 | 5.704 |
| SS05 | 81.176 | 88.539 | 93.125 | 72.433 | 53.663 | 50.201 | 42.987 | 62.675 |
| SS06 | 7.794 | 20.768 | 14.679 | 22.754 | 19.403 | 13.518 | 33.656 | 22.626 |
| SS07 | 5.884 | 5.953 | 18.259 | 20.802 | 22.056 | 21.661 | 20.905 | 22.242 |
| SS08 | 24 | - | 2.878 | 414 | 1.079 | 8.236 | 6.510 | 9.720 |
| SS09 | 85 | - | 15.209 | 285 | 6.045 | 311 | 98 | 739 |
| SS10 | 33.662 | 24.929 | 39.344 | 85.181 | 86.078 | 50.135 | 48.739 | 56.505 |
| Total | 141.344 | 175.805 | 219.846 | 230.896 | 219.247 | 170.774 | 186.511 | 206.938 |

| Zona de Estudio | Fire_CCI | | | | MCD45A1 | MCD64A1 | GLOBCARBON | L3JRC | GEOLAND2 |
|-----------------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|---------|----------|
| | Fusionado | MERIS | ATSR | VGT | | | | | |
| 2003 | | | | | | | | | |
| SS01 | 348 | | 17.813 | 1.576 | 351 | 610 | 6.120 | 10.790 | 3.931 |
| SS02 | 5.154 | | 13 | 23.036 | 14.321 | 17.994 | 17.099 | 18.415 | 10.427 |
| SS03 | 5.299 | | 8.380 | 11.154 | 10.003 | 10.370 | 5.787 | 7.606 | 3.489 |
| SS04 | 1.273 | | 2.928 | 6.921 | 4.418 | 4.372 | 4.009 | 4.324 | 5.092 |
| SS05 | 22.866 | | 1.043 | 59.098 | 86.829 | 69.089 | 55.505 | 60.353 | 64.960 |
| SS06 | 2.361 | | 7.632 | 4.100 | 10.112 | 9.139 | 6.696 | 24.979 | 9.803 |
| SS07 | 594 | | 11.198 | 6.414 | 6.634 | 8.865 | 6.191 | 18.782 | 10.351 |
| SS08 | 1.107 | | 195 | 9.468 | 31.427 | 42.937 | 29.694 | 31.744 | 29.012 |
| SS09 | 384 | | - | 23.967 | 22 | 16.022 | 57 | 116 | 150 |
| SS10 | 21.484 | | 33.358 | 22.485 | 48.888 | 53.471 | 18.485 | 24.944 | 21.814 |
| total | 60.870 | | 82.560 | 168.219 | 213.005 | 232.869 | 149.643 | 202.053 | 159.029 |
| 2004 | | | | | | | | | |
| SS01 | 262 | | 13.310 | 565 | 1.615 | 2.175 | 2.950 | 8.997 | 5.863 |
| SS02 | 21.997 | | 66 | 62.249 | 16.831 | 19.361 | 22.512 | 19.745 | 7.837 |
| SS03 | 8.477 | | 13.844 | 14.949 | 15.899 | 13.853 | 6.473 | 9.893 | 5.091 |
| SS04 | 1.224 | | 7.984 | 6.913 | 6.487 | 1.062 | 2.480 | 3.066 | 6.560 |
| SS05 | 53.905 | | 40 | 104.184 | 91.639 | 69.633 | 34.434 | 55.850 | 61.968 |
| SS06 | 3.557 | | 10.050 | 6.112 | 16.777 | 14.983 | 9.205 | 14.575 | 5.192 |
| SS07 | 7.665 | | 20.880 | 20.859 | 15.497 | 22.129 | 13.331 | 21.479 | 17.270 |
| SS08 | 43 | | 352 | 3.497 | 414 | 1.076 | 12.004 | 20.291 | 14.810 |
| SS09 | 2.483 | | - | 42.801 | 273 | 4.939 | 400 | 94 | 237 |
| SS10 | 69.459 | | 63.862 | 78.575 | 109.613 | 120.827 | 61.250 | 67.784 | 56.379 |
| total | 169.072 | | 130.388 | 340.704 | 275.045 | 270.038 | 165.039 | 221.774 | 181.207 |
| 2005 | | | | | | | | | |
| SS01 | 1.589 | 190 | 9.811 | 2.017 | 262 | 431 | 6.117 | 9.318 | 3.001 |
| SS02 | 46.253 | 22.588 | 25.261 | 28.291 | 4.482 | 11.009 | 11.843 | 10.277 | 3.399 |
| SS03 | 66.734 | 46.020 | 43.267 | 11.683 | 22.092 | 25.975 | 6.324 | 6.993 | 2.598 |
| SS04 | 16.552 | 5.487 | 31.198 | 4.519 | 3.850 | 4.120 | 2.183 | 4.356 | 9.464 |
| SS05 | 194.926 | 139.932 | 119.759 | 101.017 | 79.562 | 62.249 | 48.449 | 43.693 | 60.646 |
| SS06 | 53.452 | 29.963 | 31.435 | 12.401 | 22.611 | 20.588 | 10.319 | 23.812 | 8.110 |
| SS07 | 42.631 | 9.810 | 62.320 | 11.212 | 11.858 | 9.417 | 14.054 | 23.315 | 11.660 |
| SS08 | 1.873 | - | 4.706 | 4.552 | 2.250 | 978 | 8.619 | 17.846 | 11.912 |
| SS09 | 50.697 | 58.643 | 49.312 | 18.192 | 51 | 1.608 | 113 | 19 | 69 |
| SS10 | 65.777 | 40.657 | 60.460 | 27.416 | 47.814 | 50.830 | 17.716 | 23.032 | 21.519 |
| Total | 540.484 | 353.290 | 437.529 | 221.300 | 194.832 | 187.205 | 125.737 | 162.661 | 132.738 |
| 2006 | | | | | | | | | |
| SS01 | 11.163 | 2.289 | 39.239 | 3.333 | 3.562 | 5.896 | 6.839 | 11.005 | 3.893 |
| SS02 | 39.138 | 21.712 | 24.403 | 8.902 | 2.297 | 9.702 | 8.914 | 10.435 | 2.316 |
| SS03 | 30.630 | 28.772 | 9.794 | 4.219 | 8.765 | 7.797 | 3.315 | 6.161 | 1.950 |
| SS04 | 13.751 | 1.519 | 38.103 | 2.344 | 6.962 | 1.531 | 2.059 | 2.932 | 4.105 |
| SS05 | 183.348 | 142.751 | 103.966 | 78.022 | 85.636 | 61.368 | 57.346 | 56.716 | 51.591 |
| SS06 | 43.752 | 25.977 | 18.391 | 16.546 | 21.683 | 14.340 | 10.983 | 17.277 | 2.905 |
| SS07 | 52.380 | 16.158 | 56.502 | 16.660 | 16.906 | 17.741 | 24.361 | 30.062 | 9.921 |
| SS08 | 623 | - | 17.602 | 3.699 | 623 | 664 | 9.269 | 18.951 | 8.826 |
| SS09 | 53.918 | 68.744 | 46.726 | 22.146 | 266 | 7.772 | 795 | 243 | 576 |
| SS10 | 94.721 | 66.878 | 45.181 | 44.723 | 73.462 | 83.667 | 43.362 | 45.859 | 20.833 |
| Total | 523.424 | 374.800 | 399.907 | 200.594 | 220.162 | 210.478 | 167.243 | 199.641 | 106.916 |

| Zona de Estudio | Fire_CCI | | | | MCD45A1 | MCD64A1 | GLOBCARBON | L3JRC | GEOLAND2 |
|-----------------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|-------|----------|
| | Fusionado | MERIS | ATSR | VGT | | | | | |
| 2007 | | | | | | | | | |
| SS01 | 3.172 | 937 | 15.760 | 1.335 | 876 | 1.702 | 6.964 | | 2.853 |
| SS02 | 34.649 | 24.969 | 51 | 62.618 | 16.825 | 18.543 | 21.117 | | 4.137 |
| SS03 | 75.747 | 68.009 | 30.587 | 22.454 | 51.341 | 51.220 | 14.766 | | 7.847 |
| SS04 | 1.914 | 777 | 1.731 | 2.449 | 459 | 276 | 1.171 | | 4.193 |
| SS05 | 174.470 | 141.334 | - | 124.790 | 78.699 | 64.407 | 51.743 | | 53.882 |
| SS06 | 38.253 | 26.797 | 11.566 | 9.331 | 15.733 | 13.725 | 8.325 | | 5.596 |
| SS07 | 15.850 | 7.282 | 10.482 | 9.339 | 9.699 | 6.787 | 8.019 | | 3.442 |
| SS08 | 2.666 | - | 534 | 4.716 | 8.131 | 7.031 | 7.790 | | 8.690 |
| SS09 | 4.712 | 55.713 | - | 20.901 | 9 | 481 | 75 | | 173 |
| SS10 | 81.281 | 62.025 | 34.234 | 22.904 | 53.338 | 69.707 | 23.095 | | 27.251 |
| total | 432.714 | 387.843 | 104.945 | 280.837 | 235.110 | 233.879 | 143.065 | | 118.064 |
| 2008 | | | | | | | | | |
| SS01 | 6.161 | 1.335 | 18.503 | 3.208 | 2.667 | 5.339 | | | 4.212 |
| SS02 | 48.184 | 24.774 | 28.735 | 25.221 | 3.928 | 14.689 | | | 2.473 |
| SS03 | 36.588 | 30.144 | 18.526 | 6.526 | 11.444 | 10.199 | | | 1.886 |
| SS04 | 4.953 | 894 | 12.783 | 1.852 | 213 | 128 | | | 3.732 |
| SS05 | 192.052 | 140.472 | 108.731 | 99.216 | 78.987 | 63.421 | | | 41.105 |
| SS06 | 44.126 | 30.590 | 14.782 | 10.086 | 21.198 | 17.053 | | | 5.763 |
| SS07 | 38.474 | 12.829 | 43.899 | 13.556 | 14.602 | 15.664 | | | 5.646 |
| SS08 | 3.643 | - | 13.681 | 3.670 | 7.319 | 7.488 | | | 7.130 |
| SS09 | 58.462 | 55.100 | 57.226 | 35.737 | - | 62 | | | 28 |
| SS10 | 77.731 | 53.934 | 35.214 | 34.214 | 47.188 | 49.396 | | | 9.121 |
| total | 510.374 | 350.072 | 352.080 | 233.286 | 187.546 | 183.439 | | | 85.958 |
| 2009 | | | | | | | | | |
| SS01 | 118 | 30 | - | 452 | 17 | 112 | | | 3.167 |
| SS02 | 16.365 | 9.789 | - | 34.859 | 2.753 | 11.557 | | | 2.157 |
| SS03 | 7.937 | 9.636 | - | 5.062 | 2.626 | 3.084 | | | 858 |
| SS04 | 5.211 | 2.063 | 4 | 8.760 | 951 | 832 | | | 4.007 |
| SS05 | 156.972 | 103.528 | - | 147.097 | 78.188 | 64.535 | | | 38.629 |
| SS06 | 26.771 | 18.633 | 1 | 5.258 | 16.897 | 12.780 | | | 7.699 |
| SS07 | 17.299 | 10.480 | - | 11.818 | 10.068 | 7.972 | | | 4.932 |
| SS08 | 1.225 | - | - | 3.468 | 757 | 238 | | | 4.493 |
| SS09 | 18.184 | 67.451 | - | 32.235 | 126 | 6.878 | | | 295 |
| SS10 | 97.274 | 76.777 | - | 37.123 | 30.999 | 79.735 | | | 19.721 |
| Total | 347.356 | 298.387 | 5 | 286.132 | 143.382 | 187.723 | | | 85.958 |

Al analizar la distribución mensual del área quemada clasificada por cada producto, observamos cómo el producto *Fusionado* tiende a sobreestimar el área quemada entre los meses de mayo y diciembre en relación al resto de productos. Sólo entre los meses de enero y abril es superado por el producto L3JRC (Figura N°28).

El producto *MERIS*, entre los meses de mayo a septiembre, presenta una tendencia similar a los productos MCD45a1 y MCD64A1 en la distribución del área quemada detectada. Se observa un desfase de aproximadamente 20 días en la distribución del área quemada entre este producto y el producto MCD64A1, este desfase podría ser causa de la disponibilidad de imágenes *MERIS* para el periodo de tiempo que se está analizando o también al porcentaje de nubes de las imágenes más próximas al paso de los sensores *MODIS*. Entre los meses de septiembre y abril el producto *MERIS* presenta una tendencia similar al resto de los productos de área quemada, siendo sobreestimada la detección de píxeles por el producto L3JRC con relación a este y el resto de los productos estudiados (Figura N°38). Las sobrestimaciones del producto L3JRC con respecto a los otros productos de área quemada son similares a las señaladas por Giglio *et al.*, (2010) y Chan y Song (2009) que señalan que este producto tiende a generar en promedio un 20% más de área quemada que los productos MCD45A1 y GFEDv3.1 en los diferentes ecosistemas terrestres, principalmente en sabana tropical.

El producto L3JRC a nivel mensual presenta las mismas tendencias señaladas por el estudio de Chang y Song (2009), que observan que este producto presenta un distribución homogénea del área quemada durante todo el año a diferencia del producto MCD45A1 que presenta durante los meses de agosto y diciembre una mayor cantidad de área quemada. Con nuestro análisis podemos señalar que esta tendencia es similar si se compara el producto L3JRC con el resto de productos de área quemada tanto europeos como los de *MODIS*.

El producto *VGT* a nivel mensual presenta una tendencia similar al producto MCD45A1. Los productos *GEOLAND2* y *GLOBCARBON* subestiman el área quemada con respecto a este producto. Este producto, además, tiende a estimar una superficie levemente superior a la detectada por los productos *MODIS* con excepción del mes de septiembre (Figura N°28).

Entre los productos *Fire_CCI* se observa cómo el producto *Fusionado* sobreestima el área quemada prácticamente durante todo el año, con excepción de los meses de invierno del hemisferio norte, donde el producto *(A)ATSR* tiende a sobreestimar el área quemada detectada por el producto *Fusionado*. El producto *MERIS* tiende a detectar una mayor superficie quemada que el producto *VGT* durante las estaciones de primavera y verano, situación que se homogeniza durante el periodo invernal (Figura N°28).

Que el producto *Fusionado* sobrestime el área quemada con respecto al producto *MERIS* podría ser causa del algoritmo utilizado para generar el producto *Fusionado*, este considera como área quemada los píxeles que han sido detectados por al menos dos sensores (*VGT*, *MERIS* y *(A)ATSR*), lo que influiría en considerar píxeles que han sido detectados por *VGT* y *(A)ATSR* y que no han sido detectados con el sensor *MERIS*.

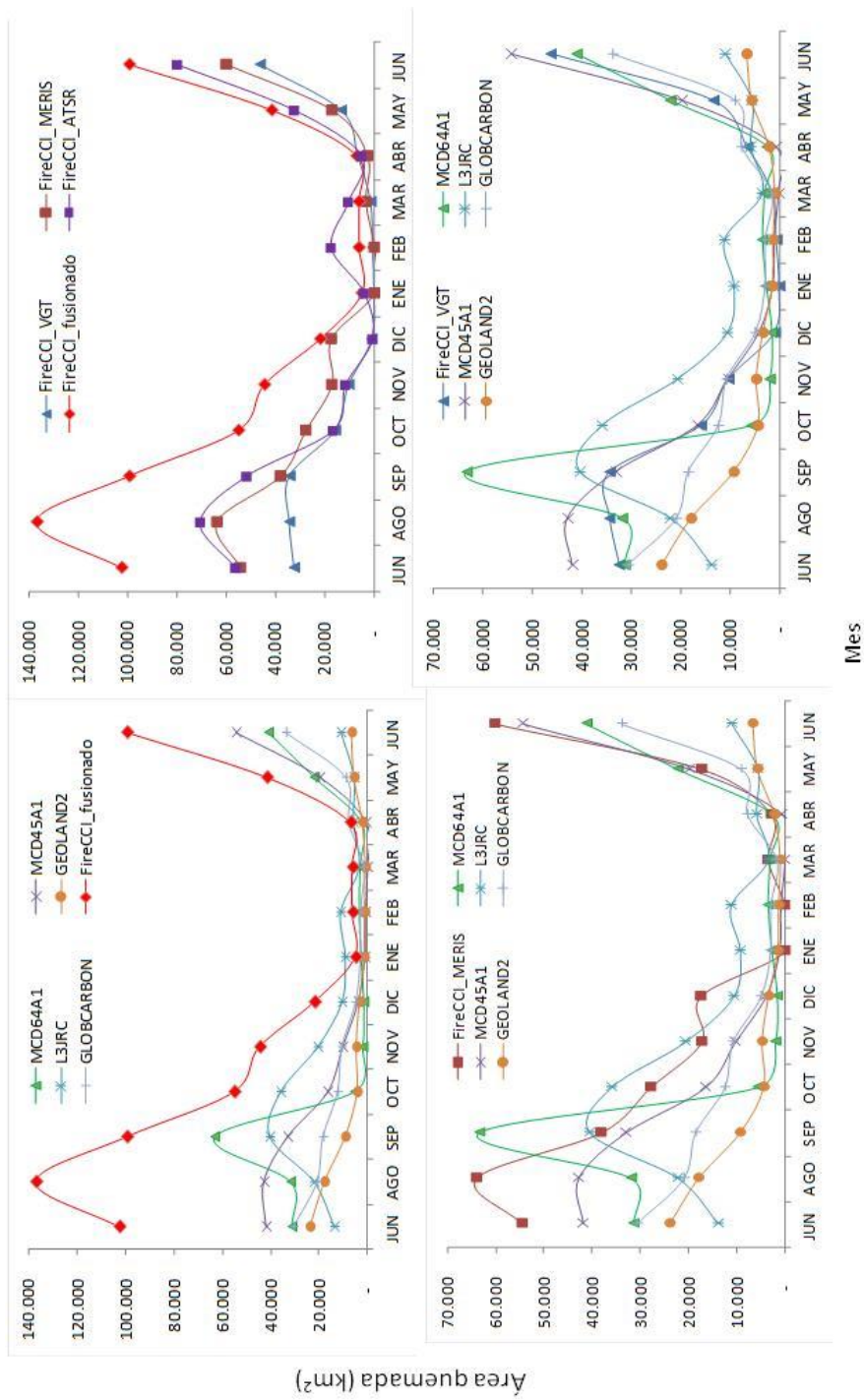


Figura Nº 28 Distribución mensual del área quemada detectada por cada producto

CAPÍTULO 4:

INTERCOMPARACIÓN GLOBAL DE PRODUCTOS DE ÁREA QUEMADA

4 Intercomparación global de *productos de área quemada*

4.1 Introducción

En este capítulo se detalla la metodología utilizada y resultados obtenidos de la intercomparación global y por bioma de los *productos de área quemada* para el año 2008, que ha sido establecido por el programa CCI como año de referencia global. Se ha utilizado en este estudio el GFEDv3.1 como producto de referencia, debido a que actualmente es la fuente de información más reconocida internacionalmente y la más empleada para modelos de clima. Se ha realizado la intercomparación tanto global como por bioma, del área quemada, un esquema de la metodología utilizada se presenta en la figura N°33.

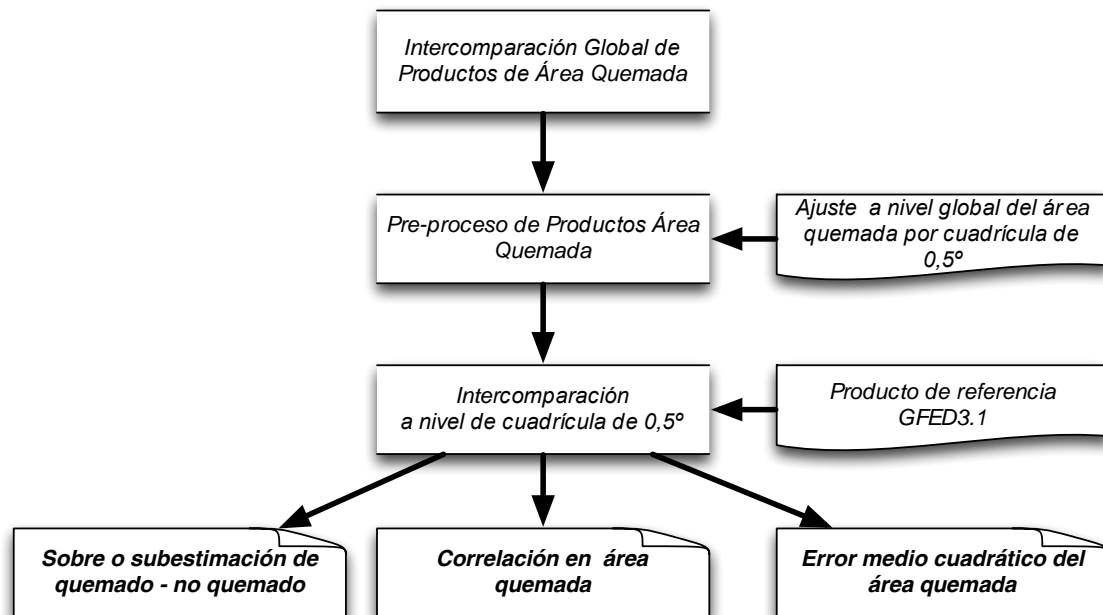


Figura N° 29 Metodología de intercomparación Global de *productos de área quemada*

Los productos intercomparados fueron *Fire_CCI* (*Fusionado*, *MERIS*; *VGT* y (*A*)*ATSR*), *GeoLand2*, *MCD45A1* y *MCD64A1*. No se consideraron en este estudio los productos *GLOBCARBON* y *L3JRC* debido a que no cuentan con información para el año 2008 (Tabla N°33).

Tabla N° 33 Resolución espacio – temporal de *productos de área quemada* evaluados,

| Producto | Resolución | | Años de cobertura |
|------------------|------------|----------|-------------------|
| | Espacial | Temporal | |
| <i>VGT</i> | 1.000 m | | |
| <i>GEOLAND2</i> | 500 m | | |
| <i>MCD45A1</i> | 0,5° | anual | 2008 |
| <i>GFEDv3.1</i> | 300 m | | |
| <i>Fusionado</i> | | | |
| <i>MERIS</i> | | | |

4.2 Pre-proceso de los productos de área quemada

Como se ha señalado previamente se utilizará como *producto de área quemada* de referencia el *GFEDv3.1*, que utiliza como fuente de información el área quemada generada con el producto *MCD64A1* (Giglio *et al.*, 2010), agrupando en cuadrículas de 0,5° la información a nivel de hectárea, en esta tesis doctoral toda la información de área quemada de los diferentes productos se ajustó a esta cuadrícula y se expresó en kilómetros cuadrados, por lo que la información del producto *GFEDv3.1* se convirtió a esta medida de superficie. Para facilitar el procesamiento y análisis de los datos de los seis productos de área quemada todos han sido georreferenciados en coordenadas geográficas con datum WGS84, esto debido a que los producto *MCD45A1*, *MCD64SA1* y *GLOBCARBON* se encontraban en Elipsoide WGS84.

Como se observa en la Tabla N°33 existen diferencias en la resolución espacial entre los productos de área quemada que se han estudiado, por lo que antes de realizar la intercomparación, se procedió a calcular la estadística espacial, a nivel de cuadrícula de 0,5° de cada uno de los productos. Para ello se procedió a homogeneizar el área de cada sensor a píxeles de 0,5° agrupando en cada una el área quemada estimada por cada producto, para calcular luego la superficie quemada en kilómetros cuadrados.

Para estimar el área quemada en cada cuadrícula, se procedió a calcular la proporción quemada por cada sensor y multiplicar este valor por la superficie de cada una de las cuadrículas, las cuales varían según la latitud en que se encuentren. Para realizar el conteo de píxeles para cada una de las cuadrículas se utilizó la función de QGIS® de suma de píxeles por una polígono o vector determinado.

$$\text{Sup. quemada (km}^2\text{)} = \text{sup. de la cuadrícula} \times \frac{\sum \text{píxeles por producto}}{\text{superficie del producto}} \quad (17)$$

La información de área quemada generada por cada producto se ordenó por bioma y total a nivel global. Esta clasificación permitió realizar un análisis comparativo del área quemada por bioma y total, entre los diferentes productos estudiados. Se calculó el porcentaje de área quemada de cada producto por cada cuadrícula, luego se obtuvo la diferencia entre cada producto y el producto *GFEDv3.1*. Lo que nos ha permitido ver las diferencia de sobre y subestimación global y evaluar las zonas con menores y mayores diferencias con respecto al producto de referencia.

A cada cuadrícula de 0,5° se le asoció la información correspondiente a su superficie en kilómetros cuadrados y bioma, los que se pueden observar en la Figura N°34.

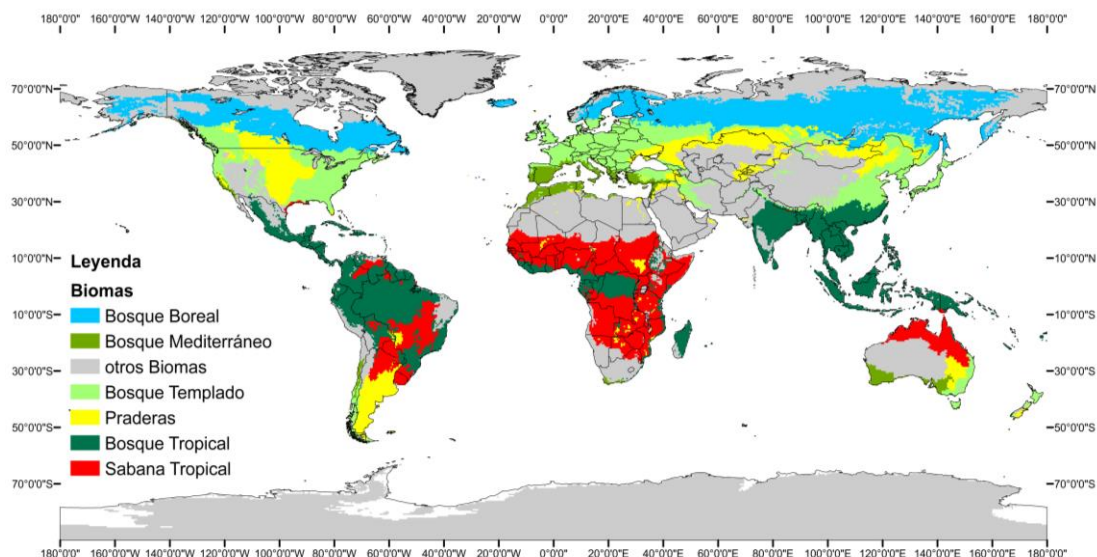


Figura N° 30 Distribución de biomas, por cuadrículas de 0,5°x0,5°

4.3 Métricas para la intercomparación global de *productos de área quemada*

Se han determinado los valores de sobre y subestimación de cada una de las relaciones y se han calculado diferentes estadísticos como coeficientes de determinación y error medio cuadrático, tanto global como por bioma.

Se calculó el porcentaje de área quemada por cuadrícula para cada producto y se estimó su diferencia con el producto de referencia. Estos valores fueron representados en mapas globales y por bioma. Esto nos ha permitido, junto con el análisis de los indicadores estadísticos, determinar los productos globales de área quemada con mayores y menores similitudes en la estimación de área quemada entre ellos, tanto a nivel global como también por bioma.

Para determinar el nivel de error entre el producto de referencia y el resto de productos que se han intercomparado se calculó el error medio cuadrático (RMSE), que equivale a la suma de la varianza y la desviación del cuadrado del valor estimado y el valor real o de referencia. El RMSE se utilizará para determinar la medida en la que el producto global intercomparado no se ajusta con el producto *GFEDv3.1*. El RMSE nos proporcionará un valor que nos permitirá junto con el coeficiente de determinación escoger el producto global de área quemada que presente una mejor correlación con el producto de referencia (Daniel y Terrell, 1995).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{n(n-1)}} \quad (18)$$

Donde:

“D” es la diferencia entre valores de referencia y *productos de área quemada* y, “n” es el total de valores de área quemada.

Se ha calculado el coeficiente de determinación (r^2) para comprobar se existe una relación entre el área quemada del producto de referencia y la generada por cada *producto de área quemada*, tanto global y bioma evaluado.

$$r^2 = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (19)$$

Donde:

σ_{XY} es la covarianza de X, Y (producto global de referencia y producto global intercomparado respectivamente). σ_X y σ_Y es la desviación típica de la variables X e Y, respectivamente.

Para el análisis de todas las variables este estudio se consideró un intervalo de confianza de 0,05 obtenido de la tabla del test estadístico de esta regresión y su pendiente que nos permitirán saber si existe una regresión lineal entre los productos globales intercomparados (Daniel y Terrell, 1995).

4.4 Resultados y Discusión de intercomparación global

La distribución global del área quemada y el bioma donde se encuentran se presenta en la Tabla N°34. Las cubiertas vegetales más representadas son las tropicales, tanto de bosque como de sabana, luego se encuentra el bosque templado y praderas, lo que es similar a lo señalado por Stroppiana (2010) y Archibald *et al.*, (2010) que señalan que más del 70% de área quemada se produce en zonas de tropicales. Esto permite destacar la calidad de los diferentes productos de área quemada en los biomas más relevantes en área quemada analizados.

En el bioma de sabana tropical los productos MCD45A1, GEOLAND2 y VGT subestiman el área quemada con respecto al producto GFEDv3.1, en tanto los producto *Fusionado* y *MERIS* sobre-estiman el área quemada, y este último en sabana tropical en más del 50%, es importante indicar que Giglio *et al.*, (2010) señala que el producto MCD64A1, que es la base del *GFEDv3.1*, subestima en este bioma en aproximadamente un 40% el área quemada, lo que nos estaría señalando que el producto MERIS en cubiertas de sabana tropical obtendría una mejor aproximación a la realidad de campo que el producto de referencia.

Tabla Nº 34 Área quemada global y por bioma detectada por cada producto.

| Bioma | Área quemada (km ²) por producto | | | | | |
|-----------------|--|-----------|-----------|------------------|-----------|--------------|
| | <i>GFEDv3.1</i> | MCD45A1 | GEOLAND2 | <i>Fusionado</i> | VGT | <i>MERIS</i> |
| Otros Biomas | 178.288 | 105.164 | 377.852 | 528.129 | 609.391 | 302.879 |
| B. Boreal | 45.733 | 34.754 | 113.512 | 140.802 | 211.867 | 79.242 |
| B. Mediterráneo | 5.796 | 11.106 | 61.375 | 104.274 | 326.728 | 33.705 |
| B. Templado | 45.255 | 9.489 | 178.627 | 672.475 | 2.077.322 | 232.594 |
| B. Tropical | 175.099 | 119.737 | 90.726 | 957.494 | 909.291 | 707.022 |
| Praderas | 216.807 | 156.169 | 280.021 | 696.912 | 908.069 | 462.187 |
| Sabana Tropical | 2.463.266 | 2.088.806 | 999.182 | 4.342.709 | 2.334.388 | 3.860.066 |
| Total | 3.130.245 | 2.525.225 | 2.101.296 | 7.442.795 | 7.377.057 | 5.677.695 |

4.4.1 Cartografía de intercomparación de productos de área quemada

La cartografía de intercomparación entre los diferentes *productos globales de área quemada* y el producto *GFEDv3.1* nos permitirán validar tanto la información sobre diferencias de superficie estimada por cada uno y de los datos estadísticos obtenidos a partir de esta intercomparación.

De la intercomparación global del producto MCD45A1 y el producto *GFEDv3.1*, se observa que EL MCD45A1 tiende a subestimar el área quemada en la mayoría de los biomas en los que hemos clasificado la cobertura terrestre. Principalmente en el bioma de sabana tropical con 374.760 km² menos de área quemada que el producto *GFEDv3.1* (Figura N°31, Tabla N°34). Estas observaciones son las descritas por Boschetti *et al.*, (2006) para el producto MCD45A1, que señalan que en las zonas tropicales y boreales se observan subestimaciones con relación a las zonas de validación. Como observamos en la Tabla N°34 estos resultados se ajustaron en el producto MCD64A1. Los resultados obtenidos en esta intercomparación son similares a los obtenidos por Giglio *et al.*, (2010) que señalaba la subestimación del área quemada del producto MCD45A1 al comparar sus resultados con los obtenidos con producto *GFEDv3.1*, en las zonas tropicales boreales.

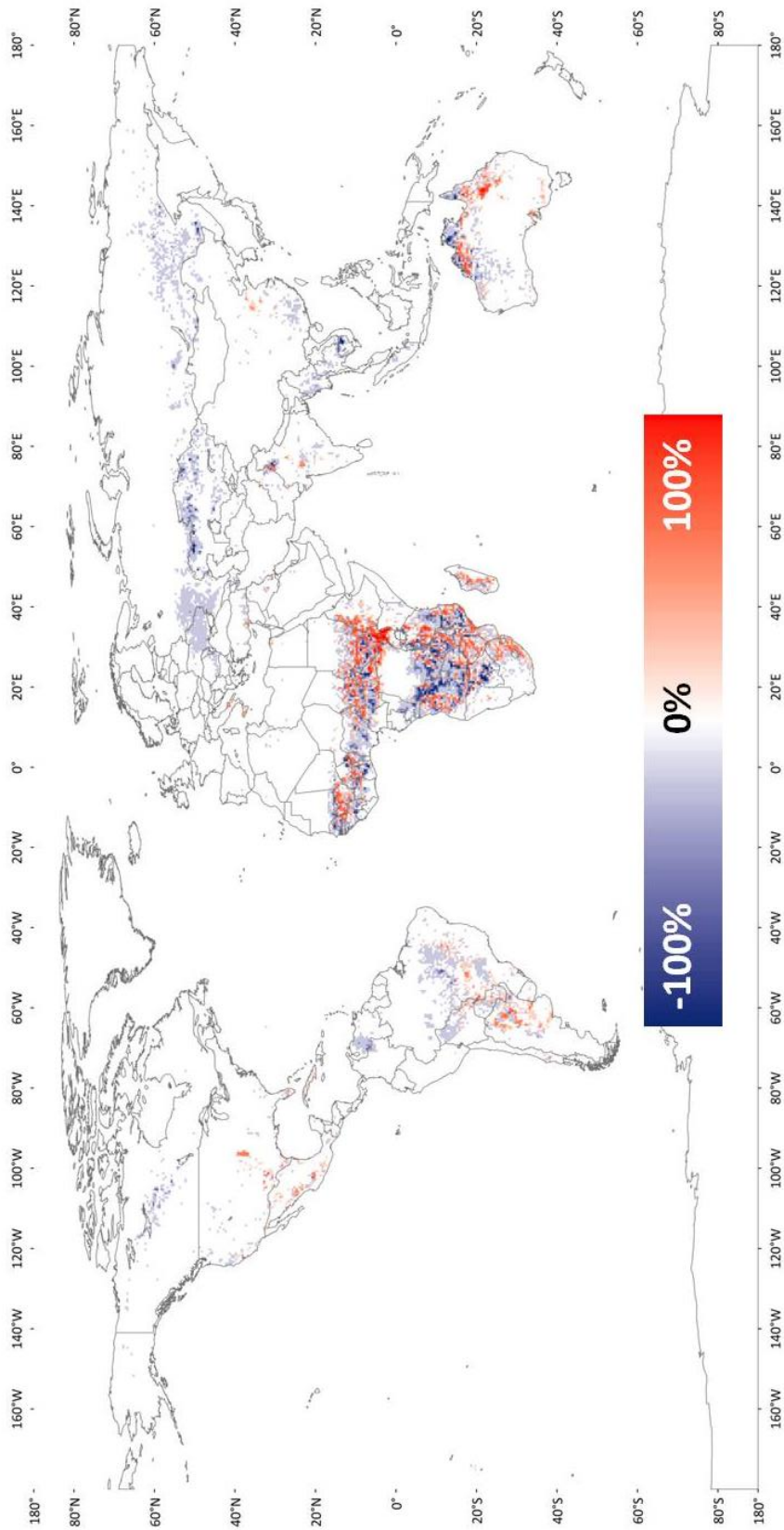


Figura Nº 31. comparación global de proporción área quemada entre producto MCD45A1 y GFEDv3.1 (año 2008)

El producto GEOLAND2 como se observa en la Tabla N°34 y Figura N°32 subestima el área quemada en los biomas tropicales (sabana y bosque) con valores muy inferiores a los generados por el *GFEDv3.1* y sobrestima en el resto de biomas (praderas, otros biomas, bosques mediterráneos, templado y boreales). El producto GEOLAND2 con respecto al producto *GFEDv3.1*, subestima el área quemada e más de 1 millón de kilómetros cuadrados, equivalente al 32% del área estimada por el producto *GFEDv3.1*.

Si consideramos que el producto GEOLAND2 utilizó como algoritmos de referencia los generados para el producto L3JRC estaría generando resultados similares a los señalado por Chang y Song (2009) en su estudio de intercomparación de este producto con MCD45A1, concluyendo que el producto L3JRC subestimaba en zonas tropicales de África y sobrestimaba en el restos del planeta. Estos resultados nos estarían indicando que el producto GEOLAND2, continuación del producto L3JRC, aún debería realizar ajustes en su algoritmo para poder ser considerado como fuente de información de área quemada global.

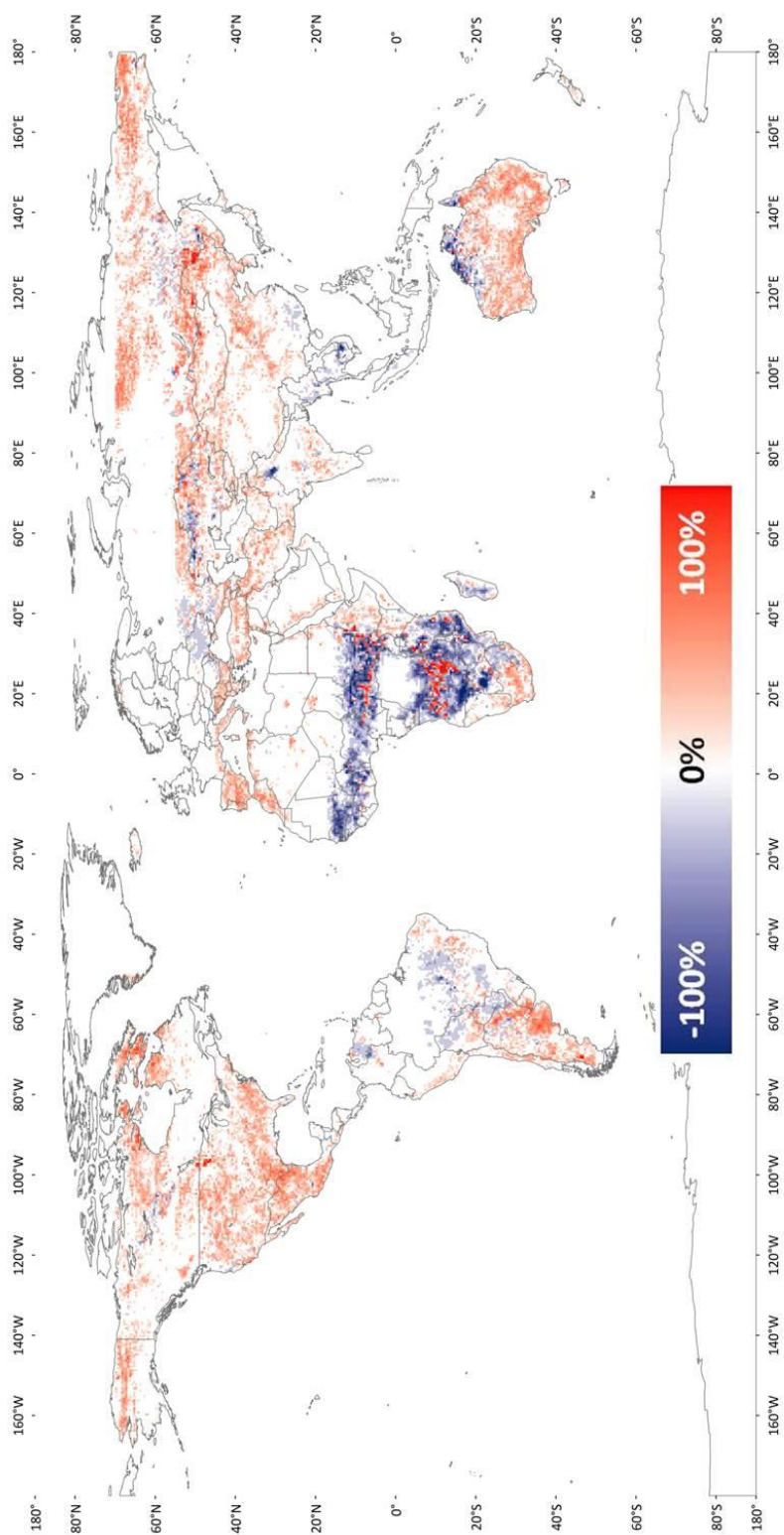


Figura N° 32. comparación global de proporción área quemada entre producto GEOLAND2 y GFEDv3.1 (año 2008)

El producto *Fusionado* como se observa en la Tabla N°34 y Figura N°33, sobrestima el área quemada en todos los biomas con relación al producto *GFEDv3.1*, en más de 4 millones de kilómetros cuadrados. Las principales diferencias ocurren en la sabana tropical que podría tener como causa que los productos VGT y MERIS que son la base del producto *Fusionado*, detectan una gran cantidad de píxeles quemados influyendo en el total de área quemada calculada por este producto. En la Figura N°33 se observa como este producto sobrestima el área quemada en todos los biomas, siendo mayores las diferencias en las zonas tropicales y bosques templados, boreales y mediterráneos (Tabla N°34).

Se observan zonas con altos valores de sobrestimación en los biomas de bosques templados de América del Norte, bosques tropicales de India y en las praderas templadas de Europa del Este y Central. De no ajustarse el algoritmo de fusión de este producto posiblemente no harían posible su utilización por modeladores tanto de clima como de vegetación, al encontrarse fuera de los límites que actualmente se consideran de referencia que son los generados por el *GFEDv3.1* (Giglio *et al.*, 2010).

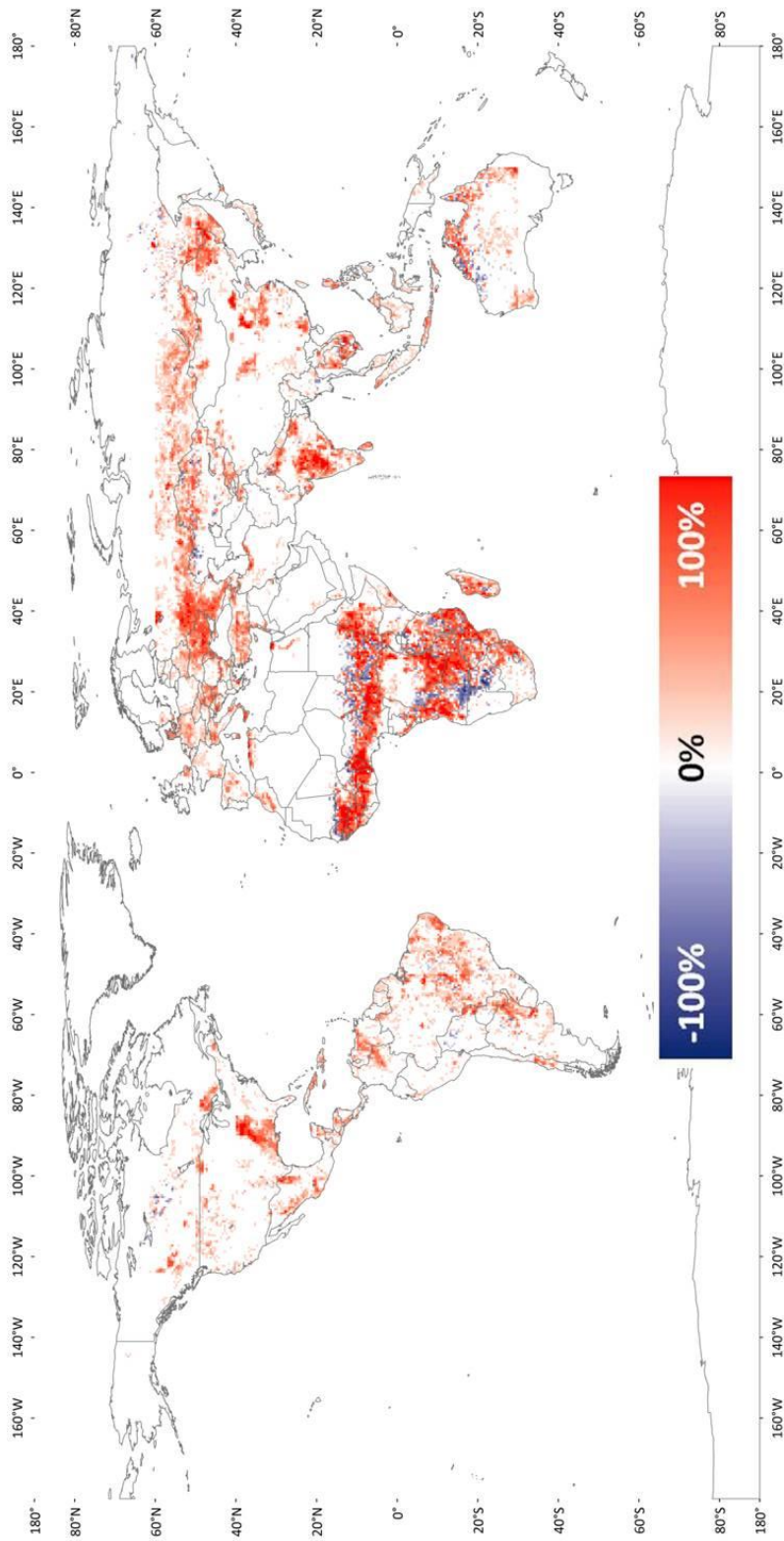


Figura Nº 33. comparación global de proporción área quemada entre producto FUSIONADO y GFEDv3.1 (año 2008)

El producto VGT como se observa en la Tabla N°34 y Figura N°34 sobrestima con relación al producto *GFEDv3.1* el área quemada en todos los biomas, con excepción de la sabana tropical que es subestimado a nivel global. Se observa que este producto presenta una alta sobrestimación en los bioma de bosque templado de América del Norte, Europa y centro de Asia y en las zonas de bosque mediterráneo con respecto al producto *GFEDv3.1*.

Al analizar los valores de área quemada y su distribución global se podría deducir que este producto tiene especial relevancia en la generación del producto *Fusionado*, debido a que es en este producto donde se presentan las sobrestimaciones en los biomas de bosques templado y tropical que figuran en el producto *Fusionado* (Figura N°34 y Tabla N°34). Este producto al igual que el producto *Fusionado*, posiblemente haría inviable su utilización por los modeladores del clima y de vegetación al encontrarse fuera de los límites generados por el producto *GFEDv3.1*.

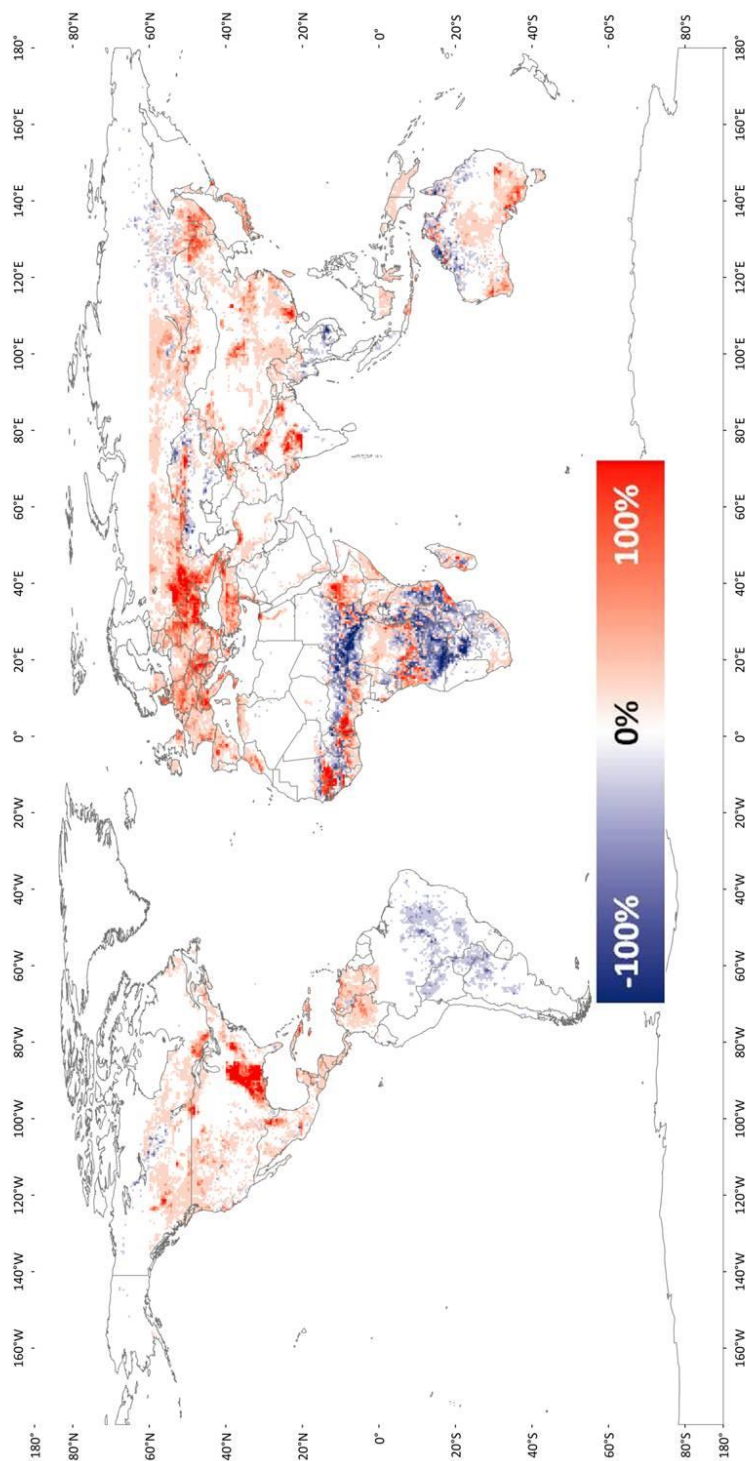


Figura Nº 34. comparación global de proporción área quemada entre producto VGT y GFEDv3.1 (año 2008)

El producto MERIS como se observa en la Figura N°35 y Tabla N°34 presenta los menores valores de subestimación de área quemada con el producto *GFEDv3.1*. Los biomas que sobresalen de esta observación son los tropicales (bosque y sabana). En el continente africano el bioma sabana tropical presenta algunas zonas donde el producto MERIS subestima el área quemada con relación al producto *GFEDv3.1* (Figura N°35). A nivel global los niveles de sobrestimación en este bioma de más de un 40% se asemejan a los valores que señalados por Giglio *et al.*, (2010) sobre la subestimación del producto MCD64A1 en zonas tropicales.

El producto MERIS presentaría a nivel global los valores de área quemada más próximos al producto de referencia (*GFEDv3.1*), por lo que podrían ser considerados complementarios al momento de ser utilizados por los modeladores de clima y vegetación, principalmente en zonas tropicales donde este producto generaría información que no es generada por el producto MCD64A1, fuente del producto *GFEDv3.1*.

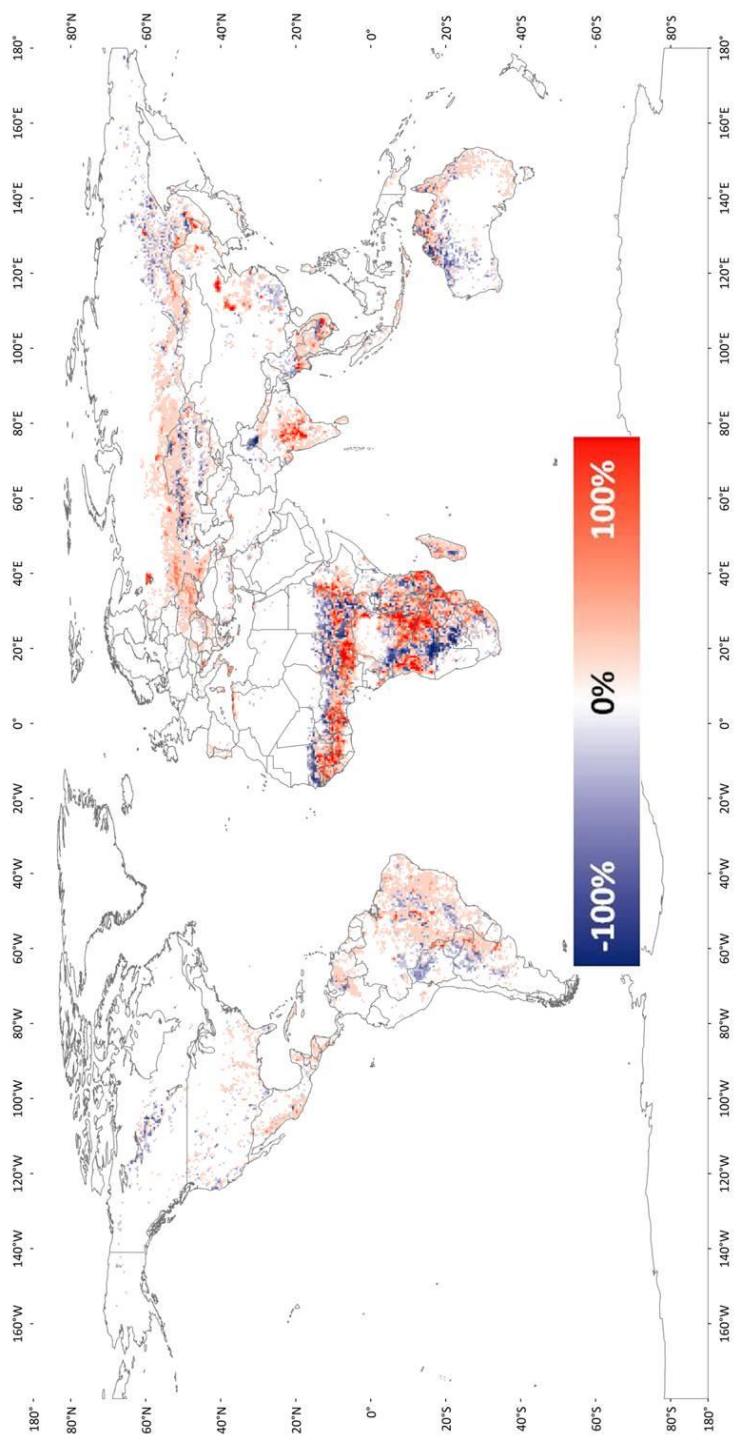


Figura № 35. comparación global de proporción área quemada entre producto MERIS y GFEDv3.1 (año 2008)

Al analizar las cinco intercomparaciones realizadas se observa al sur-este de África que todos los *productos globales* estudiados subestiman el área quemada con respecto al producto *GFEDv3.1*, por lo que sería interesante evaluar que variables se dan en esta zona o en el algoritmo del producto de referencia para que se originen estas diferencias (Figuras N°31 – N°35). Esta zona, además, corresponde a las cuadrículas donde el producto *GFEDv3.1* presenta valores de área quemada superiores a la superficie total de la cuadrícula utilizada como referencia, lo que se debe probablemente a que este producto presenta aquí píxeles que se quema dos veces en el año.

La información generada para elaborar la cartografía global a nivel de cuadrícula de 0,5° nos ha permitido determinar junto con los estadísticos; coeficiente de determinación, pendiente de la regresión y el error medio cuadrático, que *producto global de área quemada* presentan los mejores valores de concordancia con el producto de referencia (*GFEDv3.1*).

Los coeficientes de regresión y error medio cuadrático se presenta en la tabla N°35, representados gráficamente entre las Figuras N°39 a la N°43, donde observamos que el producto *MERIS* y *MCD45A1* son los que tienen los mejores coeficientes de regresión (0,46) respecto al producto *GFEDv3.1* (Tabla N°35). Los menores errores medios cuadráticos globales se obtienen de la comparación del producto *GFEDv3.1* con los productos *MCD45A1* (86,81 km²) y *MERIS* (119,05 km²) (Tabla N°35). Es importante señalar que los bajos valores de error medio cuadrático se deberían al alto número de cuadrículas no quemadas presentes a nivel global. Al analizar las pendientes de cada regresión observamos que el producto *GFEDv3.1* presentaría una mayor similitud con el producto *MERIS* y las menores serían; *GEOLAND2*, *VGT* y *Fusionado*.

A nivel de bioma se ha calculado el coeficiente de determinación que señala la baja relación entre todos los productos de área quemada y el producto de referencia (*GFEDv3.1*). Los valores más altos de correlación se obtienen en los biomas de praderas templadas y sabana tropical con los productos MCD45A1 (0.51 y 0.44, respectivamente), *MERIS* (0.39 y 0.41, respectivamente) y *Fusionado* (0.36 y 0.39, respectivamente). Los valores más bajos de correlación se obtienen de la comparación entre el producto de referencia con los productos GEOLAND2 (0.29 en praderas y 0.31 en sabana tropical) y *VGT* de 0.10 en praderas y 0.21 en sabana tropical). Los bajos valores obtenidos en el resto de los biomas se podría deber a la alta variabilidad en área quemada detectada por cada producto en estas zonas (Tabla N°35).

El producto *MERIS* presenta la pendiente próxima a 1 lo que nos estaría señalando la mejor relación entre este producto y *GFEDv3.1* (Tabla N°35; Figuras N°37 y N°40).

Tabla Nº 35 Índices de correlación y error medio cuadrático entre el área quemada de GFEDv3.1 y otros productos globales de área quemada (año 2008).

| Variables | <i>Fusionado</i> | Productos de área quemada | | | |
|-------------------------|------------------|---------------------------|------------|-----------------|----------------|
| | | <i>MERIS</i> | <i>VGT</i> | <i>GEOLAND2</i> | <i>MCD45A1</i> |
| Global | | | | | |
| r^2 | 0.42 | 0.45 | 0.12 | 0.34 | 0.49 |
| RMSE (km ²) | 145.04 | 119.05 | 176.44 | 94.68 | 86.81 |
| Pendiente | 1,01514 | 0,9388 | 0,5073 | 0,3305 | 0,6731 |
| Bioma | | | | | |
| r^2 | | | | | |
| Otros Biomas | 0.14 | 0.13 | 0.08 | 0.03 | 0.33 |
| B. Boreal | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0,01 |
| B. Mediterráneo | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| B. Templado | 0.07 | 0.05 | 0.03 | 0.02 | 0.00 |
| B. Tropical | 0.13 | 0.15 | 0.02 | 0.07 | 0.10 |
| Praderas | 0.36 | 0.39 | 0.10 | 0.29 | 0.51 |
| Sabana Tropical | 0.39 | 0.41 | 0.21 | 0.31 | 0.44 |

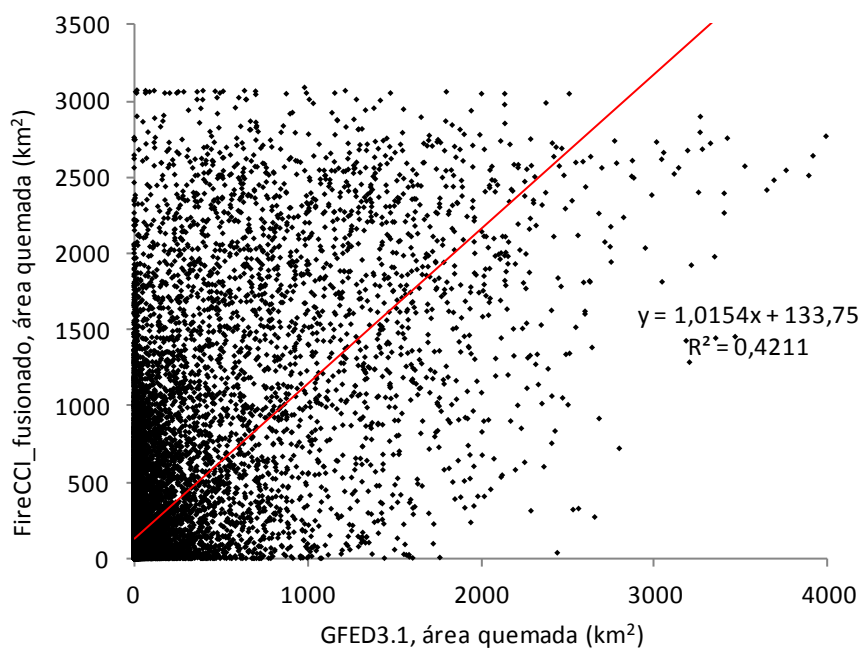


Figura Nº 36 Coeficiente de determinación de área quemada entre producto *GFEDv3.1* y *Fusionado*

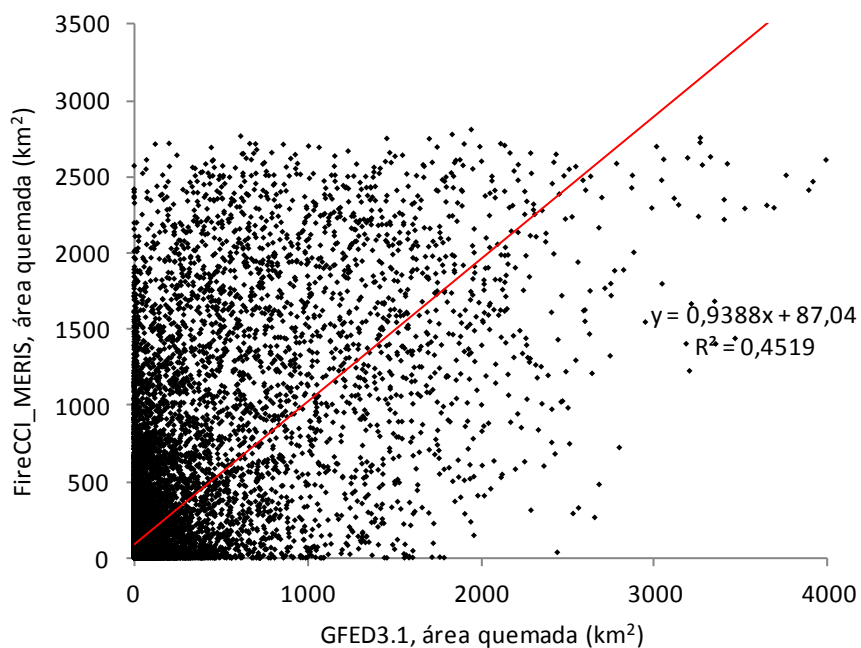


Figura Nº 37 Coeficiente de determinación de área quemada entre producto *GFEDv3.1* y *MERIS*

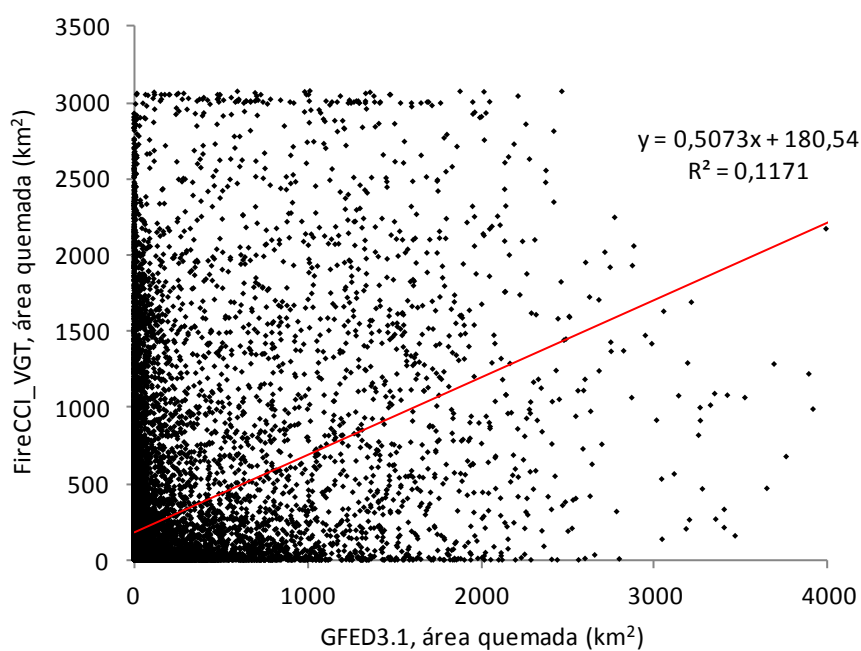


Figura Nº 38 Coeficiente de determinación de área quemada entre producto *GFEDv3.1* y *VGT*

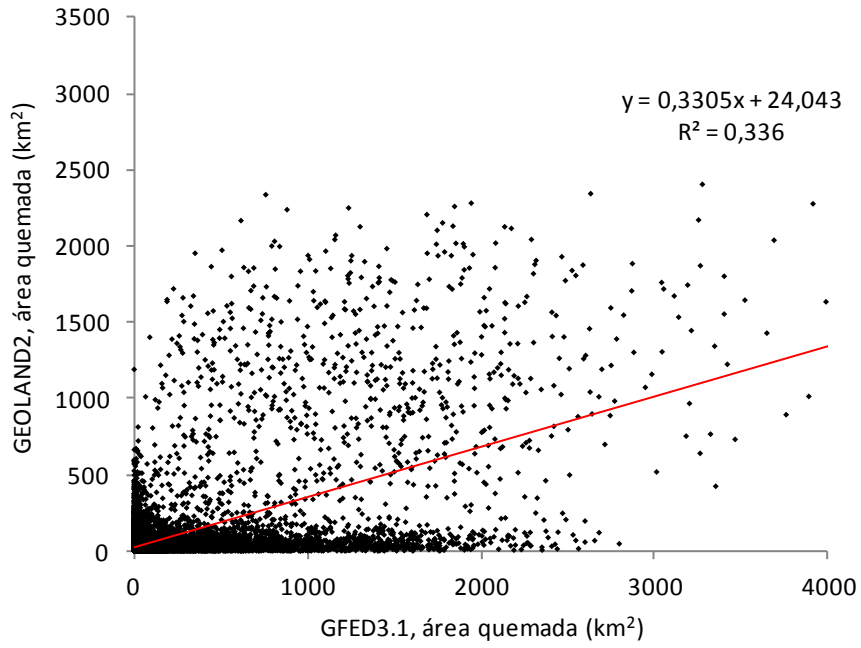


Figura N° 39 Coeficiente de determinación de área quemada entre producto *GFEDv3.1* y *GEOLAND2*

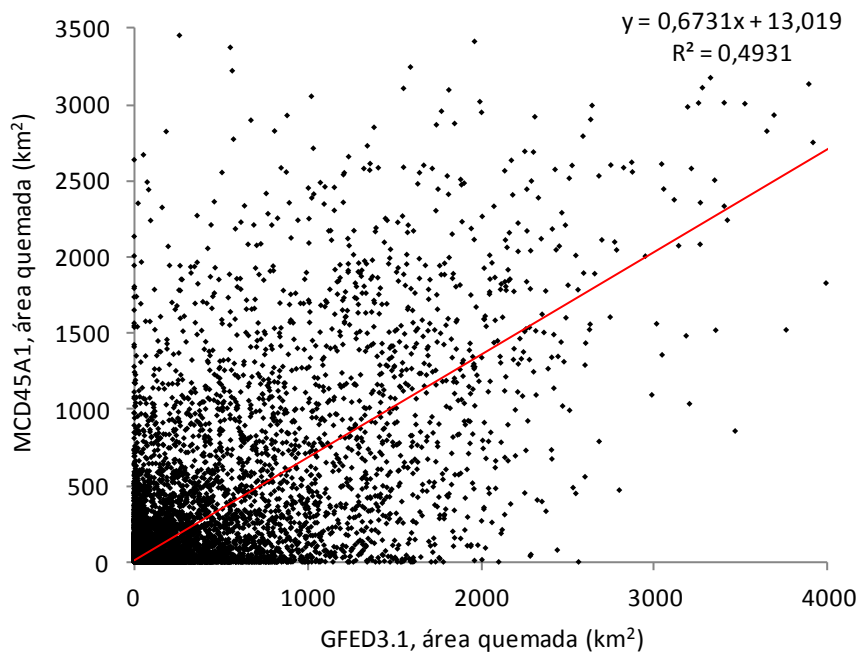


Figura N° 40 Coeficiente de determinación de área quemada entre producto *GFEDv3.1* y *MCD45A1*

CAPÍTULO 5:
CONCLUSIONES Y
LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

5 Conclusiones y Líneas futuras de investigación

5.1 Conclusiones

En esta tesis doctoral se han realizado dos estudios que, en su conjunto, nos han permitido determinar la distribución de tamaños de los incendio, así como la detección del área quemada que realizan diferentes *productos global disponibles públicamente*.

De acuerdo al objetivo principal planteado en esta tesis doctoral, la intercomparación de los diferentes productos *Fire_CCI* de área quemada con los productos ya existentes: MCD45A1, MCD64A1, GLOBCARBON, L3JRC y GEOLAND2, tanto espacial como temporalmente entre los años 1999 y 2009, se obtiene la primera aportación significativa de esta tesis doctoral, se han elegido 10 zonas globales, en sectores con altas incidencias de incendios como los bosques boreales de América del Norte y de Asia, las praderas de Kazajstán, los bosques tropicales de Borneo, los bosques mediterráneos de la península Ibérica y la sabana tropical de América del Sur, África y Oceanía, lo que ha permitido realizar la intercomparación entre los *productos de área quemada* y poder determinar entre ellos las mayores y menores similitudes y, por tanto, definir en cierto modo, la mayor o menor idoneidad de los mismos. La intercomparación de los *producto de área quemada* se realizó entre los existentes actualmente (GLOBCARBON, L3JRC, MCD45A1, MCD64A1 Y GEOLAND2). con los nuevos productos diseñados para el proyecto *Fire_CCI (Fusionado, MERIS, VGT y (A)ATSR)*. Se procedió a la evaluación de las similitudes y diferencias en la estimación de área quemada entre unos y otros. De este análisis se extrajeron las siguientes conclusiones:

- De los productos *Fire_CCI* el que presenta mejores relaciones estadísticas con el resto de los productos de área quemada es el producto *MERIS*, presentando los coeficientes de Kappa y Sörensen-Dice cercanos al 60% en las zonas de sabana tropical al realizar la intercomparación con los productos MCD64A1 y MCD45A1. El producto *VGT* presenta valores cercanos al 50% en las mismas zonas de estudio y productos con los que se

ha intercomparado. El producto *Fusionado* presenta valores intermedios entre los de MERIS y los VGT tanto en el índice Kappa como en el de Sörensen-Dice . Esto puede deberse a que se trata de una mezcla entre los tres sensores: *MERIS* y *VGT (A)ATSR*.

- En cuanto a la precisión temporal de la detección, los tres productos *Fire_CCI* presentan su mayores diferencias con el producto L3JRC siendo en promedio superior a los 60 días, Los mejores ajustes se obtienen para los tres productos con los dos productos MODIS siendo en promedio de 21 días. En cuanto a los acuerdos y desacuerdos entre los diferentes productos *Fire_CCI* y el resto de los productos de área quemada, los resultados obtenidos nos indican que los mayores acuerdos se obtienen para el producto MERIS con los productos MCD45A1 y MCD64A1, GLOBCARBON, L3JRC y GEOLAND2. Al relacionar los valores de los índices Kappa y Sörensen-Dice con los coeficientes de correlación obtenidos a partir del área quemada estimada por cada producto, se puede concluir que el producto MERIS podría complementarse con el producto MCD64A1 al obtenerse los valores de r^2 superiores al 0,87 a nivel global.
- A nivel de distribución del área quemada detectada mensualmente por cada producto se ha podido observar que los productos *Fire_CCI* mantienen la tendencia en la detección de esta durante todo el año que presentan los productos MODIS, GLOBCARBON y GEOLAND2. No así con el producto L3JRC, que tiende a sobreestimar durante el periodo invernal y subestimar durante el periodo estival el área quemada prácticamente durante todo el año, observación similar a la detectada por investigaciones anteriores (Boschetti *et al.*, 2004; Chang y Song, 2009).

Como segunda aportación de este trabajo de tesis doctoral, que tiene relación con el primer objetivo específico, es decir, conocer o determinar la existencia de relaciones en el área quemada y cuatro variables independientes como *son*; franja geográfica, bioma, cercanía a sectores urbanos y número de habitantes por cada uno de ellos, se ha realizado un estudio a partir de 129 pares Landsat, distribuidas de forma equitativa en los 7 biomas reclasificados, lo cual representa la mayor base cartográfica realizada hasta ahora para la validación y calibración de productos de área quemada. Cada zona cuenta con la información completa de metadatos. Las conclusiones de este estudio nos, permiten entender un poco mejor la distribución del área quemada a nivel global. Las conclusiones más relevantes en este sentido serían:

- Se ha podido determinar que el bioma de sabana tropical que se localiza principalmente entre los 20° de latitud norte y sur, es el que se ve mayormente afectado por la ocurrencia de incendios, tanto en superficie como en número de estos. De las relaciones analizadas se ha podido determinar que la cercanía a sectores poblados influye en el número de incendios.
- La mayor cantidad de área quemada por bioma coincide con los biomas tropicales (bosque y sabana), representando el 76% del total del área quemada en estas zonas de estudio, similar a la tendencia señalada por Stroppiana *et al.*, (2010) y Boschetti *et al.*, (2010). A partir del índice de asociatividad ji^2 se demostró que existe una tendencia directa entre el total de área quemada y el bioma en que ocurre, siendo mayor en biomas tropicales que templados.
- En las franjas latitudinales superiores cubiertas por bosques boreales, el número de perímetros es menor (384 en bosque boreal y en sabana tropical más de 63 mil), pero el tamaño de estos es mucho mayor que en las próximas al ecuador (4 km² y 2 km², en bosque boreal y biomas tropicales respectivamente).

- El índice de asociatividad j_i^2 y su coeficiente de contingencia (Cramér's V), nos han permitido determinar que existe una correlación significativa entre la franja latitudinal y el área quemada, siendo mayor en el ecuador y menor en las zonas próximas a los polos.
- Por lo que respecta a su proximidad a sectores poblados si bien el coeficiente de asociación nos señala que no existe una correlación significativa entre esta variable y la franja latitudinal, se puede observar que el área quemada en los biomas de bosque mediterráneo y bosque templado muestran un mejor relación siendo los que más afectados. Si los espacios potencialmente medibles se encuentran a menos de 50 km de distancia el riesgo es mayor. Esto podría hacernos pensar que los biomas están siendo modificados para ser transformados en suelos agrícolas o incluso nuevos espacios residenciales, utilizando como principal herramienta de conversión el fuego. Otra causa probable podría el nivel de desarrollo y calidad de vida de los países, sobre todo en países tropicales.
- Existe una relación significativa obtenido con el coeficiente de Cramér's V entre las franjas latitudinales y el número de habitantes en cada zona poblada, es decir mientras menor es el número de habitantes mayor es el área quemada y más aún si la población de estos centros es inferior a 250 mil habitantes. Los principales biomas afectados, como sabana y bosque tropical, tienen la plena condición de rurales, donde el fuego es la principal herramienta utilizada para la preparación del suelo, con vista a su utilización agraria.

En lo que respecta a la tercera aportación significativa, que se ha generado a partir del objetivo principal y desde el segundo objetivo específico al cuarto de esta tesis doctoral se presenta la primera intercomparación global de los nuevos *productos de área quemada* generados por la iniciativa de cambio climático de la Agencia Europea del Espacio, y el producto *GFEDV3.1* de la NASA Además la comparación de resultados con los productos *GEOLAND2* y *MCD45A1* y poder determinar entre ellos las mayores y menores similitudes y, por tanto, definir en cierto modo, la mayor o menor idoneidad de los mismos. Las principales conclusiones de la comparación global realizada a partir de celdas de 0.5 grados serían:

- Globalmente el producto *MERIS* es el que presenta mayores similitudes con el producto *GFEDV3.1*, presentando los mejores valores del coeficiente de correlación y de concordancia a nivel global.
- Actualmente los *productos de área quemada* y emisiones de GEI más utilizados por los modeladores del clima y vegetación es el *GFEDv3.1/4.0*. Y es aquí donde el producto *MERIS* puede ayudar a ajustar las predicciones de área quemada en zonas donde estos productos subestiman esta información, como es el caso de los biomas tropicales y boreales (Giglio *et al.*, 2010), disminuyendo las limitantes en el uso de estos productos por los modeladores.
- Se observa que no existe una correlación lineal entre los productos de área quemada a nivel de bioma lo que genera los bajos valores obtenidos con excepción de la sabana tropical.
- La información de incendios obtenida desde sensores remotos, proporciona una base de datos respecto al número, intensidad y variaciones anuales, permitiendo además la detección de cambios de cobertura de uso de suelo o pérdida de la vegetación por lo que el uso de esta fuente de datos podría mejorar las simulaciones de los diferentes modelos predictivos. Esta afirmación corrobora la hipótesis de partida que aventuraba la conveniencia de tener una información más precisa de la existencia e impacto territorial de los incendios, elemento de significativa importancia para su inserción en los modelos de clima y vegetación.

5.2 Líneas futuras de investigación

A raíz de las conclusiones descritas, se plantea la necesidad de continuar investigando, en relación al primer objetivo específico, es decir, conocer la existencia de relación entre el tamaño del área quemada y su cercanía a zonas urbanas, como también sus relaciones entre tamaño y bioma, y distribución latitudinal, se plantea como tarea futura de investigación el aumentar el número de zonas globales que permitan aumentar la variabilidad de áreas por cada bioma como también el incluir nueva información global, en la medida de lo posible, de cobertura y calidad de caminos, información climatológica y los índices de desarrollo de las principales zonas de incendios a nivel global, lo que permitirá mejorar o adaptar las teorías planteadas en este trabajo doctoral. Ajustando el triángulo de variables que inciden la distribución del área quemada.

En relación a los objetivos específicos segundo, tercero y cuarto planteados, es decir, la determinación de la interrelación entre productos de área quemada y evaluar la consistencia del producto *Fire_CCI* con respecto al resto de área quemada y determinar si los resultados de cada producto estiman o sobrestiman los resultados de cada uno de los productos *Fire_CCI*, se hace necesario realizar una intercomparación con las nuevas versiones de los productos *Fusionado*, *MERIS* y *GEOLAND2*, una vez producido el ajuste de sus algoritmos que permita generar un resultado final que proceda de la clasificación o detección del área quemada, al menos, en dos de los tres sensores utilizados para el caso del producto *Fusionado*. Además, se hace necesario realizar un intercomparación global de los productos de área quemada que cubran todo el periodo de tiempo comprendido por los productos *Fire_CCI*. Se deberá analizar qué tipo de correlación será la más adecuada para intercomparar los resultados de área quemada a nivel de bioma.

Por último, quedaría el mayor desafío: utilizar los productos *Fire_CCI* en los modelos de clima y vegetación y comparar sus resultados con los obtenidos al emplear principalmente los productos *GFED*.

CAPÍTULO 6:

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6 Referencias Bibliográficas

Alencar, A., Solórazano, L., y Nepstad, D. (2004). Modeling forest understory fires in an eastern Amazonian landscape. *Ecological Applications*, 14, 139-149.

Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A., y Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 660-684.

Anaya, J., y Chuvieco, E. (2010). Validación para Colombia de la estimación de área quemada del productos L3JRC para el periodo 2001-2007. *Actual Biol*, 32, 29-40.

Archibald, S., Scholes, R.J., Roy, D.P., Roberts, G., y Boschetti, L. (2010). Southern African fire regimes as revealed by remote sensing. *International Journal of Wildland Fire*, 19, 861-878.

Archibald, S., Staver, A.C., y Levin, S.A. (2012). Evolution of human-driven fire regimes in Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, 847-852.

Arora, V. K., y Boer, G. J. (2005). Fire as an interactive component of dynamic vegetation models. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (2005–2012), 110(G2).

Bachelet, D., Lenihan, J., Drapek, R., y Neilson, R. (2008). VEMAP vs VINCERA: A DGVM sensitivity to differences in climate scenarios. *Global and Planetary Change*, 64, 38-48.

Bachelet, D., y Price, D. (2008). DGVM responses to the latest IPCC future climate scenarios. *Global and Planetary Change*, 64, 1-2.

Balshi, M.S., McGuire, A.D., Duffy, P., Flannigan, M., Kicklighter, D.W., y Melillo, J. (2009). Vulnerability of carbon storage in North American boreal forests to wildfires during the 21st century. *Global Change Biology*, 15, 1491-1510.

Bastarrika, A. (2009). Cartografía Automática de Área Quemada a Nivel Local-Regional mediante Algoritmos de contexto Espacial. Tesis Doctoral *Departamento de Geografía* (p. 293). Alcalá de Henares. Universidad de Alcala.

Bastarrika, A., Chuvieco, E., y Martin, M.P. (2011). Mapping burned areas from Landsat TM/ETM plus data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1003-1012.

Bellassen, V., Delbart, N., Le Maire, G., Luysaert, S., Ciais, P., y Viovy, N. (2011). Potential knowledge gain in large-scale simulations of forest carbon fluxes from remotely sensed biomass and height. *Forest Ecology and Management*, 261, 515-530.

Beverton, R.J.H., y Holt, S.J. (1956). A review of methods for estimating mortality rates in exploited fish populations, with special reference to sources of bias in catch sampling. *Rapp. P.-v. Réun. Ciem*, 140.

Bonan, G.B., y Levis, S. (2006). Evaluating aspects of the community land and atmosphere models (CLM3 and CAM3) using a dynamic global vegetation model. *Journal of Climate*, 19, 2290-2301.

Bond, W., Midgley, G., y Woodward, F. (2003). What controls South African vegetation-climate or fire? *South African Journal of Botany*, 69, 79-91.

Boschetti, L., Brivio, P.A., Eva, H.D., Gallego, J., Baraldi, A., y Gregoire, J.M. (2006). A sampling method for the retrospective validation of global burned area products. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 44, 1765-1773.

Boschetti, L., Eva, H., Brivio, P.A., y Gregoire, J.M. (2004). Lessons to be learned from the comparison of three satellite-derived biomass burning products. *Geophysical Research Letters*, 31, L21501.

Boschetti, L., Roy, D., y Justice, C. (2010a). International Global Burned Area Satellite Product Validation Protocol Part I, production and standardization of validation reference data (to be followed by part II, accuracy reporting). In. Maryland: Department of Geography, University of Maryland, College Park, USA.

Boschetti, L., Roy, D.P., Justice, C.O., y Giglio, L. (2010b). Global assessment of the temporal reporting accuracy and precision of the MODIS burned area product. *International Journal of Wildland Fire*, 19, 705-709.

Breugem, W., Hazeleger, W., y Haarsma, R. (2006). Multimodel study of tropical Atlantic variability and change. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L23706.

Brovkin, V., Bendtsen, J., Claussen, M., Ganopolski, A., Kubatzki, C., Petoukhov, V., y Andreev, A. (2002). Carbon cycle, vegetation and climate dynamics in the Holocene: Experiments with the CLIMBER-2 model. *Global Biogeochem. Cycles*, 16, 1139.

Brovkin, V., Raddatz, T., Reick, C.H., Claussen, M., y Gayler, V. (2009). Global biogeophysical interactions between forest and climate. *Geophysical Research Letters*, 36, L07405.

Carvalho, A., Monteiro, A., Flannigan, M., Solman, S., Miranda, A.I., y Borrego, C. (2011). Forest fires in a changing climate and their impacts on air quality. *Atmospheric Environment*, 45, 5545-5553.

Chander, G., Markham, B.L., y Helder, D.L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113, 893-903.

Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., & Williams, D. (1983). Fire in forestry. Volume 1. Forest fire behavior and effects. Volume 2. Forest fire management and organization. John Wiley & Sons, Inc.

Chang, D., y Song, Y. (2009). Comparison of L3JRC and MODIS global burned area products from 2000 to 2007. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 114.

Chang, D., y Song, Y. (2010). Estimates of biomass burning emissions in tropical Asia based on satellite-derived data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 2335-2351.

Chen, J., Avise, J., Lamb, B., Salathe, E., Mass, C., Guenther, A., Wiedinmyer, C., Lamarque, J.F., O'Neill, S., McKenzie, D., y Larkin, N. (2009). The effects of global changes upon regional ozone pollution in the United States. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 1125-1141.

Chuvieco, E., Sandow, C., Guenther, K.P., González-Alonso, F., Pereira, J.M., PV©rez, O., Bradley, A.V., Schultz, M., Mouillot, F., y Ciais, P. (2012). GLOBAL BURNED AREA MAPPING FROM EUROPEAN SATELLITES: THE ESA FIRE_CCI PROJECT. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXIX-B8, 13-16.

Cochrane, M.A., y Barber, C.P. (2009). Climate change, human land use and future fires in the Amazon. *Global Change Biology*, 15, 601-612.

Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 37-46.

Collier, M., Jeffrey, S., Rotstayn, L., Wong, K., Dravitzki, S., Moseneder, C., Hamalainen, C., Syktus, J., Suppiah, R., y Antony, J. (2011). The CSIRO-Mk3. 6.0 Atmosphere-Ocean GCM: participation in CMIP5 and data publication.

Collins, W.D., Bitz, C.M., Blackmon, M.L., Bonan, G.B., Bretherton, C.S., Carton, J.A., Chang, P., Doney, S.C., Hack, J.J., y Henderson, T.B. (2006). The community climate system model version 3 (CCSM3). *Journal of Climate*, 19, 2122-2143.

Conard, S.G., y Solomon, A.M. (2009). Effects of Wildland Fire on Regional and Global Carbon Stocks in a Changing Environment. In A. Bytnerowicz, M. Arbaugh, A. Riebau & C. Andersen (Eds.), *Developments in Environmental Science*: Elsevier B.V.

Cox, P.M., Betts, R.A., Collins, M., Harris, P.P., Huntingford, C., y Jones, C.D. (2004). Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology*, 78, 137-156.

Crevoisier, C., Shevliakova, E., Gloor, M., Wirth, C., y Pacala, S. (2007). Drivers of fire in the boreal forests: Data constrained design of a prognostic model of burned area for use in dynamic global vegetation models. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 112.

Crist, E.P., y Cicone, R.C. (1984). A physically-based transformation of Thematic Mapper data The TM Tasseled Cap. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 256-263.

Csiszar, I., Arino, Geraci, R., Giglio, L., Goldammer, J., de Groot, W., Justice, C., Kondragunta, S., Sessa, R., y Tansey, K. (2009). Fire. Fire Disturbance T13. In R. Sessa (Ed.), *Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables* (p. 25). Rome: Global Terrestrial Observing System (GTOS), NRL, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Dai, A. (2006). Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models. *Journal of Climate*, 19, 4605-4630.

Daniel, W.W., y Terrell, J.C. (1995). *Business statistics: for management and economics*: Houghton Mifflin Company Botson, MA.

DeFries, R.S., Morton, D.C., van der Werf, G.R., Giglio, L., Collatz, G.J., Randerson, J.T., Houghton, R.A., Kasibhatla, P.K., y Shimabukuro, Y. (2008). Fire-related carbon emissions from land use transitions in southern Amazonia. *Geophysical Research Letters*, 35.

Delire, C., Ngomanda, A., y Jolly, D. (2008). Possible impacts of 21st century climate on vegetation in Central and West Africa. *Global and Planetary Change*, 64, 3-15.

Ding, Y., Xu, Y., Zhao, Z., Luo, Y., y Gao, X. (2004). Climate change scenarios over east Asia and China in the future 100 years. *Climate Change Newsletter*, 2-4.

Ellicott, E., Vermote, E., Giglio, L., y Roberts, G. (2009). Estimating biomass consumed from fire using MODIS FRE. *Geophysical Research Letters*, 36.

Flannigan, M.D., Krawchuk, M.A., de Groot, W.J., Wotton, B.M., y Gowman, L.M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*, 18, 483-507.

Flejzor, L. (2011). Situacion de los bosques del mundo 2011. *FAO, Roma, Italia*, 193.

Foley, J.A., Levis, S., Prentice, I.C., Pollard, D., y Thompson, S.L. (1998). Coupling dynamic models of climate and vegetation. *Global Change Biology*, 4, 561-579.

Friedlingstein, P., Cox, P., Betts, R., Bopp, L., von Bloh, W., Brovkin, V., Cadule, P., Doney, S., Eby, M., Fung, I., Bala, G., John, J., Jones, C., Joos, F., Kato, T., Kawamiya, M., Knorr, W., Lindsay, K., Matthews, H.D., Raddatz, T., Rayner, P., Reick, C., Roeckner, E., Schnitzler, K.G., Schnur, R., Strassmann, K., Weaver, A.J., Yoshikawa, C., y Zeng, N. (2006). Climate-Carbon Cycle Feedback Analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison. *Journal of Climate*, 19, 3337-3353.

Friend, A., Stevens, A., Knox, R., y Cannell, M. (1997). A process-based, terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v3. 0). *Ecological Modelling*, 95, 249-287.

Giglio, L., Loboda, T., Roy, D.P., Quayle, B., y Justice, C.O. (2009). An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sensing of Environment*, 113, 408-420.

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

Giglio, L., van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Collatz, G.J., y Kasibhatla, P. (2006). Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 957-974.

Glitzenstein, J.S., Platt, W.J., y Streng, D.R. (1995). Effects of Fire Regime and Habitat on Tree Dynamics in North Florida Longleaf Pine Savannas. *Ecological Monographs*, 65, 441-476.

González, P., Neilson, R.P., Lenihan, J.M., y Drapek, R.J. (2010). Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 19, 755-768.

Gregoire, J.M., Tansey, K., y Silva, J.M.N. (2003). The GBA2000 initiative: developing a global burnt area database from SPOT-VEGETATION imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 1369-1376.

Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Kharecha, P., Lacis, A., Miller, R., Nazarenko, L., Lo, K., Schmidt, G.A., Russell, G., Aleinov, I., Bauer, S., Baum, E., Cairns, B., Canuto, V., Chandler, M., Cheng, Y., Cohen, A., Del Genio, A., Faluvegi, G., Fleming, E., Friend, A., Hall, T., Jackman, C., Jonas, J., Kelley, M., Kiang, N.Y., Koch, D., Labow, G., Lerner, J., Menon, S., Novakov, T., Oinas, V., Perlwitz, J., Perlwitz, J., Rind, D., Romanou, A., Schmunk, R., Shindell, D., Stone, P., Sun, S., Streets, D., Tausnev, N., Thresher, D., Unger, N., Yao, M., y Zhang, S. (2007). Dangerous human-made interference with climate: a GISS modelE study. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2287-2312.

Harrison, S.P., Marlon, J.R., y Bartlein, P.J. (2010). Fire in the Earth system. *Changing climates, earth systems and society* (pp. 21-48): Springer.

Hasson, A., Mills, G.A., Timbal, B., y Walsh, K. (2009). Assessing the impact of climate change on extreme fire weather events over southeastern Australia. *Climate Research*, 39, 159-172.

Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Griggs, D.J., y Maskell, K. (1997). Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC. In: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.

Johns, T., Gregory, J., Ingram, W., Johnson, C., Jones, A., Lowe, J., Mitchell, J., Roberts, D., Sexton, D., y Stevenson, D. (2003). Anthropogenic climate change for 1860 to 2100 simulated with the HadCM3 model under updated emissions scenarios. *Climate Dynamics*, 20, 583-612.

Johns, T., Merry, F., Stickler, C., Nepstad, D., Laporte, N., y Goetz, S. (2008). *A three-fund approach to incorporating government, public and private forest stewards into a REDD funding mechanism.*

Jungclaus, J., Keenlyside, N., Botzet, M., Haak, H., Luo, J.J., Latif, M., Marotzke, J., Mikolajewicz, U., y Roeckner, E. (2006). Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM. *Journal of Climate*, 19, 3952-3972.

Justice, C.O., y Korontzi, S. (2001). A review of the status of satellite fire monitoring and the requirements for global environmental change research. In A. Frank J., J.G.G. and C.O. Justice (Eds.), *Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space: Planning a Coordinated International Effort* (pp. 1 - 18)

Justice, C.O., Smith, R., Gill, A.M., y Csiszar, I. (2003). A review of current space-based fire monitoring in Australia and the GOF/GOLD program for international coordination. *International Journal of Wildland Fire*, 12, 247-258.

Justino, F., de Mélo, A.S., Setzer, A., Sismanoglu, R., Sedyama, G.C., Ribeiro, G.A., Machado, J.P., y Sterl, A. (2011). Greenhouse gas induced changes in the fire risk in Brazil in ECHAM5/MPI-OM coupled climate model. *Climatic Change*, 106, 285–302.

Karl, T.R., Diamond, H.J., Bojinski, S., Butler, J.H., Dolman, H., Haeberli, W., Harrison, D.E., Nyong, A., Rösner, S., Seiz, G., Trenberth, K., Westermeyer, W., y Zillman, J. (2010). Observation Needs for Climate Information, Prediction and Application: Capabilities of Existing and Future Observing Systems. *Procedia Environmental Sciences*, 1, 192-205.

Kasischke, E.S., Christensen, N.L., y Stocks, B.J. (1995). Fire, global warming, and the carbon balance of boreal forests. *Ecological Applications*, 5, 437-451.

Katzfey, J.J., McGregor, J.L., Nguyen, K.C., y Thatcher, M. (2009). Dynamical downscaling techniques: Impacts on regional climate change signals. In (pp. 2377-2383)

Keane, R.E., y Karau, E. (2010). Evaluating the ecological benefits of wildfire by integrating fire and ecosystem simulation models. *Ecological Modelling*, 221, 1162-1172.

Kittel, T., Rosenbloom, N., Royle, J.A., Daly, D., Gibson, W.P., HH, F., Thornton, P., Yates, D., Aulenbach, S., Kaufman, C., McKeown, R., Bachelet, D., Schimel, D., y Participants, V. (2004). VEMAP Phase 2 bioclimatic database. I. Gridded historical (20th century) climate for modeling ecosystem dynamics across the conterminous USA. *Climate Research*, 27, 151-170.

Knutson, T.R., Delworth, T., Dixon, K., Held, I., Lu, J., Ramaswamy, V., Schwarzkopf, M., Stenchikov, G., y Stouffer, R. (2006). Assessment of twentieth-century regional surface temperature trends using the GFDL CM2 coupled models. *Journal of Climate*, 19, 1624-1651.

Krawchuk, M.A., Cumming, S.G., y Flannigan, M.D. (2009). Predicted changes in fire weather suggest increases in lightning fire initiation and future area burned in the mixedwood boreal forest. *Climatic Change*, 92, 83-97.

Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., y Prentice, I.C. (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochem. Cycles*, 19, 33.

Kucharik, C.J., Barford, C.C., Maayar, M.E., Wofsy, S.C., Monson, R.K., y Baldocchi, D.D. (2006). A multiyear evaluation of a Dynamic Global Vegetation Model at three AmeriFlux forest sites: Vegetation structure, phenology, soil temperature, and CO₂ and H₂O vapor exchange. *Ecological Modelling*, 196, 1-31.

Kushla, J.D., y Ripple, W.J. (1998). Assessing wildfire effects with Landsat thematic mapper data. . *International Journal of Remote Sensing.*, 19(13): , 2493-2507.

Landis, J., y Koch, G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics Journal*, 33, 159 - 174.

Laurance, W.F., Albernaz, A.K.M., Schroth, G., Fearnside, P.M., Bergen, S., Venticinque, E.M., y Da Costa, C. (2002). Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. *Journal of Biogeography*, 29, 737-748.

Legutke, S., Voss, R., Klimarechenzentrum, D., y Betreuungsgruppe, M. (1999). The Hamburg atmosphere-ocean coupled circulation model ECHO-G. In. Hamburg: DKRZ.

Lenihan, J., Neilson, R., Bachelet, D., y Drapek, R. (2005). Widespread Dieback of Forests in North America under Rapid Global Warming: Response to the VINCERA Future Climate Scenarios Simulated by the MC1 DGVM. In (p. 1025).

Lenihan, J.M. (2006). *The Response of Vegetation Distribution, Ecosystem Productivity, and Fire in California to Future Climate Scenarios Simulated by the MC1 Dynamic Vegetation Model: White Paper*: California Energy Commission.

Levis, S., Foley, J.A., y Pollard, D. (1999). CO₂, climate, and vegetation feedbacks at the Last Glacial Maximum. *Journal of geophysical research*, 104, 31191-31131,31198.

Lloret, F., Pausas, J., y Vilà, M. (2003). Responses of Mediterranean Plant Species to different fire frequencies in Garraf Natural Park (Catalonia, Spain): field observations and modelling predictions. *Plant Ecology*, 167, 223-235.

Loughlin, W.P. (1991). Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57, 1163-1169.

Lucarini, V., y Russell, G.L. (2002). Comparison of mean climate trends in the Northern Hemisphere between National Centers for Environmental Prediction and two atmosphere-ocean model forced runs. *Geophysical Research Letters*, 107, 4269.

Ma, X., Guo, Y., Shi, G., y Yu, Y. (2004). Numerical simulation of global temperature change during the 20th century with the IAP/LASG GOALS model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21, 227-235.

Mann, M.E., y Schmidt, G.A. (2003). Ground vs. surface air temperature trends: Implications for borehole surface temperature reconstructions. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1607.

Manton, M.J., Belward, A., Harrison, D.E., Kuhn, A., Lefale, P., Rvðsner, S., Simmons, A., Westermeyer, W., y Zillman, J. (2010). Observation Needs for Climate Services and Research. *Procedia Environmental Sciences*, 1, 184-191.

Markham, B.L., Storey, J.C., Williams, D.L., y Irons, J.R. (2004). Landsat sensor performance: history and current status. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 42, 2691-2694.

Marlon, J.R., Bartlein, P.J., Carcaillet, C., Gavin, D.G., Harrison, S.P., Higuera, P.E., Joos, F., Power, M.J., y Prentice, I.C. (2008). Climate and human influences on global biomass burning over the past two millennia. *Nature Geoscience*, 1, 697-702.

Marti, O., Braconnot, P., Bellier, J., Benshila, R., Bony, S., Brockmann, P., Cadule, P., Caubel, A., Denvil, S., y Dufresne, J. (2005). The new IPSL climate system model: IPSL-CM4.

Martín, M.P. (1998): Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. Tesis Doctoral. Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá.

Medhaug, I., y Furevik, T. (2011). North Atlantic 20th century multidecadal variability in coupled climate models: sea surface temperature and ocean overturning circulation

Miller, C., y Urban, D.L. (1999). A model of surface fire, climate and forest pattern in the Sierra Nevada, California. *Ecological Modelling*, 114, 113-135.

MOHC, MPI-M, ECMWF, y MétéoFrance (2011). Climate Modelling User Group. Deliverable 4.1 Version 2. Scientific Exploitation Plan (SEP). In (p. 22): ESA.

Murguía, M., y Rojas, F. (2001). BIOGEOGRAFÍA CUANTITATIVA. *Introducción a la biogeografía en Latinoamérica: Teorías, conceptos, métodos y aplicaciones*, 39.

Myers, B., Hill, G., y Russell-Smith, J. (2000). Background to the project - 'The use of fire in land management in Eastern Indonesia and Northern Australia'. *Fire and Sustainable Agricultural and Forestry Development in Eastern Indonesia and Northern Australia, Proceedings*, 13-17.

Nepstad, D.C., Verssimo, A., Alencar, A., Nobre, C., Lima, E., Lefebvre, P., Schlesinger, P., Potter, C., Moutinho, P., Mendoza, E., Cochrane, M., y Brooks, V. (1999). Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature*, 398, 505-508.

Niles, J.O., Brown, S., Pretty, J., Ball, A.S., y Fay, J. (2002). Potential carbon mitigation and income in developing countries from changes in use and management of agricultural and forest lands. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360, 1621-1639.

Olson, D.M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E.D., Burgess, N.D., Powell, G.V.N., Underwood, E.C., D'Amico, J.A., Itoua, I., Strand, H.E., Morrison, J.C., Loucks, C.J., Allnutt, T.F., Ricketts, T.H., Kura, Y., Lamoreux, J.F., Wettengel, W.W., Hedao, P., y Kassem, K.R. (2001). Terrestrial ecoregions of the worlds: A new map of life on Earth. *Bioscience*, 51, 933-938.

Pachauri, R.K., Resinger, A., Head of Technical Support Unit, y Team., T.C.W. (2007). Climate Change 2007: the AR4 Synthesis Report. In. Geneva, Switzerland.: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Padilla, M., Hantson, S., Chuvieco, E., Theis, R., y Sandow, C. (2011). fire_cci. D2.1 - Product Validation Plan (PVP). In. Madrid: Universidad de Alcalá, GAF.

Pausas, J.G., y Ribeiro, E. (2013). The global fire–productivity relationship. *Global Ecology and Biogeography*, 22, 728-736.

Pinty, B., y Verstraete, M.M. (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*, 101, 15-20.

Plummer, S., Arino, O., Ranera, F., Tansey, K., Chen, J., Dedieu, G., Eva, H., Piccolini, I., Leigh, R., Borstlap, G., Beusen, B., Heyns, W., Benedetti, R., y Commun, G.U. (2007). The GLOBCARBON initiative - Global biophysical products for terrestrial carbon studies. *Igarss: 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vols 1-12*, 2408-2411.

Potter, C., Brooks Genovese, V., Klooster, S., Bobo, M., y Torregrosa, A. (2001). Biomass burning losses of carbon estimated from ecosystem modeling and satellite data analysis for the Brazilian Amazon region. *Atmospheric Environment*, 35, 1773 - 1781.

Potter, C., Klooster, S., y Genovese, V. (2012). Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems from 2000 to 2009. In (p. 26): NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA. California State University Monterey Bay, Seaside, CA.

Prodan, M., Peters, R., Cox, F., y Real, P. (1997). *Mensura Forestal*. Costa Rica: Proyecto IICA/GTZ sobre Agricultura. Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible.

Raddatz, T., Reick, C., Knorr, W., Kattge, J., Roeckner, E., Schnur, R., Schnitzler, K.G., Wetzell, P., y Jungclaus, J. (2007). Will the tropical land biosphere dominate the climate-carbon cycle feedback during the twenty-first century? *Climate Dynamics*, 29, 565-574.

Randerson, J.T., van der Werf, G.R., Collatz, G.J., Giglio, L., Still, C.J., Kasibhatla, P., Miller, J.B., White, J.W.C., DeFries, R.S., y Kasischke, E.S. (2005). Fire emissions from C-3 and C-4 vegetation and their influence on interannual variability of atmospheric CO₂ and delta(CO₂)-C-13. *Global Biogeochemical Cycles*, 19.

Rogan, J., y Franklin, J. (2001). Mapping burn severity in southern California using spectral mixture analysis. In, *Igarss 2001: Scanning the Present and Resolving the Future, Vols 1-7, Proceedings* (pp. 1681-1683).

Rogers, B.M., Neilson, R.P., Drapek, R., Lenihan, J.M., Wells, J.R., Bachelet, D., y Law, B.E. (2011). Impacts of climate change on fire regimes and carbon stocks of the U.S. Pacific Northwest. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 116.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., y Harlan, J.C. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation*: Texas A & M University, Remote Sensing Center.

Roy, D.P., y Boschetti, L. (2009). Southern Africa Validation of the MODIS, L3JRC, and GlobCarbon Burned-Area Products. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 1032-1044.

Roy, D.P., Boschetti, L., y Justice, C. (2006). Global mapping of fire-affected areas using multitemporal MODIS data: the MCD45 product. *2006 Ieee International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vols 1-8*, 4165-4168.

Roy, D.P., Boschetti, L., Justice, C.O., y Ju, J. (2008). The collection 5 MODIS burned area product - Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3690-3707.

Roy, D.P., Jin, Y., Lewis, P.E., y Justice, C.O. (2005). Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sensing of Environment*, 97, 137-162.

Russell, G.L., Miller, J.R., y Rind, D. (1995). A coupled atmosphere-ocean model for transient climate change studies. *Atmosphere-Ocean*, 33, 683-730.

Salas-Mélia, D., Chauvin, F., Déqué, M., Douville, H., Gueremy, J., Marquet, P., Planton, S., Royer, J., y Tyteca, S. (2005). Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model. *Note de centre n 103 du CNRM*.

Sato, H., Itoh, A., y Kohyama, T. (2007). SEIB-DGVM: A new Dynamic Global Vegetation Model using a spatially explicit individual-based approach. *Ecological Modelling*, 200(3-4), 279-307.

Seidl, R., Fernandes, P.M., Fonseca, T.F., Gillet, F., Jonsson, A.M., Merganicova, K., Netherer, S., Arpaci, A., Bontemps, J.D., Bugmann, H., Gonzalez-Olabarria, J.R., Lasch, P., Meredieu, C., Moreira, F., Schelhaas, M.J., y Mohren, F. (2011). Modelling natural disturbances in forest ecosystems: a review. *Ecological Modelling*, 222, 903-924.

Seiz, G., Foppa, N., Meir, M., y Pail, F. (2011). The Role of Satellite Data Within GCOS Switzerland. *Remote Sensing*, 2011. 3, 767-780.

Shlisky, A., Waugh, J., Gonzalez, P., González, M., Manta, M., Santoso, H., Alvarado, E., Nuruddin, A.A., Rodríguez-Trejo, D.A., y Swaty, R. (2007). Fire, ecosystems and people: threats and strategies for global biodiversity conservation. *Arlington: The Nature Conservancy*

Simon, M., Plummer, S., Fierens, F., Hoelzemann, J.J., y Arino, O. (2004). Burnt area detection at global scale using ATSR-2: The GLOBSCAR products and their qualification. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 109.

Sitch, S., Huntingford, C., Gedney, N., Levy, P., Lomas, M., Piao, S., Betts, R., Ciais, P., Cox, P., y Friedlingstein, P. (2008). Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs). *Global Change Biology*, 14, 2015-2039.

Skole, D.L., y Tucker, C.J. (1993:). Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. *Science*, 260, 1905—1910.

Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly weather review*, 91, 99-164.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., y Miller, H.L. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In (p. 996). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Sörensen, T. (1948). A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content. *Biologiske Skrifter. Kongelige Danske Videnskabernes Selskab.*, 4, 1 - 34.

Stehman, S.V. (2009). Sampling designs for accuracy assessment of land cover. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 5243-5272.

Stroppiana, D., Brivio, P.A., Gregoire, J.M., Liousse, C., Guillaume, B., Granier, C., Mieville, A., Chin, M., y Petron, G. (2010). Comparison of global inventories of CO emissions from biomass burning derived from remotely sensed data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 12173-12189.

Suppiah, R., Hennessy, K., Whetton, P., McInnes, K., Macadam, I., Bathols, J., Ricketts, J., y Page, C. (2007). Australian climate change projections derived from simulations performed for the IPCC 4 th Assessment Report. *Australian Meteorological Magazine*, 56, 131-152.

Tansey, K., Gregoire, J.M., Defourny, P., Leigh, R., Pekel, J.F.O., van Bogaert, E., y Bartholome, E. (2008). A new, global, multi-annual (2000-2007) burnt area product at 1 km resolution. *Geophysical Research Letters*, 35

Tansey, K., Gregoire, J.M., Stroppiana, D., Sousa, A., Silva, J., Pereira, J.M.C., Boschetti, L., Maggi, M., Brivio, P.A., Fraser, R., Flasse, S., Ershov, D., Binaghi, E., Graetz, D., y Peduzzi, P. (2004). Vegetation burning in the year 2000: Global burned area estimates from SPOT VEGETATION data. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 109.

Thonicke, K., Spessa, A., Prentice, I., Harrison, S., Dong, L., y Carmona-Moreno, C. (2010). The influence of vegetation, fire spread and fire behaviour on biomass burning and trace gas emissions: results from a process-based model. *Biogeosciences*, 7, 1991-2011.

Thonicke, K., Venevsky, S., Sitch, S., y Cramer, W. (2001). The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model. *Global Ecology and Biogeography*, 10, 661-677; 1466-8238.

Trigg, S., y Flasse, F. (2001). An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 2641-2647.

van der Werf, G.R., Morton, D.C., DeFries, R.S., Giglio, L., Randerson, J.T., Collatz, G.J., y Kasibhatla, P.S. (2009). Estimates of fire emissions from an active deforestation region in the southern Amazon based on satellite data and biogeochemical modelling. *Biogeosciences*, 6, 235-249.

van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Collatz, G.J., y Giglio, L. (2003). Carbon emissions from fires in tropical and subtropical ecosystems. *Global Change Biology*, 9, 547-562.

van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Collatz, G.J., Giglio, L., Kasibhatla, P.S., Arellano, A.F., Olsen, S.C., y Kasischke, E.S. (2004). Continental-scale partitioning of fire emissions during the 1997 to 2001 El Niño/La Niña period. *Science*, 303, 73-76.

van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Giglio, L., Collatz, G.J., Kasibhatla, P.S., y Arellano, A.F. (2006). Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 3423-3441.

van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Giglio, L., Collatz, G.J., Mu, M., Kasibhatla, P.S., Morton, D.C., DeFries, R.S., Jin, Y., y van Leeuwen, T.T. (2010). Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 11707-11735.

van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Giglio, L., Gobron, N., y Dolman, A.J. (2008). Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics. *Global Biogeochemical Cycles*, 22.

van Dijk, P., Zhang, J., Jun, W., Kuenzer, C., y Wolf, K.-H. (2011). Assessment of the contribution of in-situ combustion of coal to greenhouse gas emission; based on a comparison of Chinese mining information to previous remote sensing estimates. *International Journal of Coal Geology*, 86, 108-119.

Verseghy, D.L. (2000). The Canadian land surface scheme (CLASS): Its history and future. *Atmosphere-Ocean*, 38, 1-13.

Volodin, E., y Diansky, N. (2006). Simulation of climate changes in the 20th, 21st and 22nd centuries with a coupled atmosphere-ocean general circulation model. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 42, 267-281.

Volodin, E., Galin, V.Y., Diansky, N., Dymnikov, V., y Lykossov, V. (2008). Mathematical modeling of potential catastrophic climate changes. *Russ. J. Earth Sci*, 10.

Wang, A., Price, D.T., Arora, V., y Ministers, C.C.o.F. (2006). *Estimating changes in global vegetation cover (1850-2100) for use in climate models*: Citeseer.

Washington, W., Weatherly, J., Meehl, G., Semtner Jr, A., Bettge, T., Craig, A., Strand Jr, W., Arblaster, J., Wayland, V., y James, R. (2000). Parallel climate model (PCM) control and transient simulations. *Climate Dynamics*, 16, 755-774.

Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., Kato, E., Takata, K., Emori, S., y Kawamiya, M. (2011). MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geosci. Model Dev.*, 4, 845-872.

Westerling, A.L., Hidalgo, H.G., Cayan, D.R., y Swetnam, T.W. (2006). Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. *Science*, 313, 940.

White, J.D., Gutzwiller, K.J., Barrow, W.C., Randall, L.J., y Swint, P. (2008). Modeling mechanisms of vegetation change due to fire in a semi-arid ecosystem. *Ecological Modelling*, 214, 181-200.

Williams, J., Albright, D., Hoffmann, A.A., Eristov, A., y Leonard, M. (2011). Findings and implications from a coarse-scale global assessment of recent selected mega-fires. In (pp. 9-13).

Williams, J.E. (2000). The biodiversity crisis and adaptation to climate change: A case study from Australia's forests. *Environmental Monitoring and Assessment*, 61, 65-74.

Woodcock, C.E., Allen, R., Anderson, M., Belward, A., Bindschadler, R., Cohen, W., Gao, F., Goward, S.N., Helder, D., Helmer, E., Nemani, R., Oreopoulos, L., Schott, J.,

Thenkabail, P.S., Vermote, E.F., Vogelmann, J., Wulder, M.A., y Wynne, R. (2008). Free Access to Landsat Imagery. *Science*, 320, 1011.

Woodward, F., y Kelly, C. (2008). Responses of global plant diversity capacity to changes in carbon dioxide concentration and climate. *Ecology letters*, 11, 1229-1237.

Yukimoto, S., Noda, A., Kitoh, A., Sugi, M., Kitamura, Y., Hosaka, M., Shibata, K., Maeda, S., y Uchiyama, T. (2001). The new Meteorological Research Institute coupled GCM(MRI-CGCM 2)- Model climate and variability. *Meteorology and Geophysics*, 51, 47-88.

Zhou, T., Yu, Y., Liu, H., Li, W., You, X., y Zhou, G. (2007). Progress in the development and application of climate ocean models and ocean-atmosphere coupled models in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24, 1109-1120.

Zorita, E., González-Rouco, F., y Legutke, S. (2003). Testing the Mann et al.(1998) Approach to Paleoclimate Reconstructions in the Context of a 1000-Yr Control Simulation with the ECHO-G Coupled Climate Model. *Journal of Climate*, 16, 1378-1390.

7 Índices de tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla Nº 1. Información de área quemada en los GCM..... | 29 |
| Tabla Nº 2 Información de área quemada en los DGVM. | 35 |
| Tabla Nº 3. Productos globales de área quemada | 48 |
| Tabla Nº 4 Clasificación de Biomas Terrestres*. | 57 |
| Tabla Nº 5 Reclasificación de Biomas de Olson <i>et al.</i> , (Olson <i>et al.</i> , 2001)..... | 58 |
| Tabla Nº 6 Distribución por bioma de superficie total de uso de suelo y área quemada según GFEDv3.1 (Giglio <i>et al.</i> , 2010) | 61 |
| Tabla Nº 7 Distribución de zonas globales de estudios por bioma | 64 |
| Tabla Nº 8 Algoritmos y variables utilizados por bioma | 70 |
| Tabla Nº 9 Algoritmos y variables utilizados por bioma | 71 |
| Tabla Nº 10 Distribución por bioma de área quemada en zonas de estudio durante el año 2008 | 75 |
| Tabla Nº 11 Distribución porcentual del área quemada por franja latitudinal..... | 77 |
| Tabla Nº 12 Distribución por Franja Latitudinal del tamaño de área quemada | 78 |
| Tabla Nº 13 Área quemada por distancia a zonas urbanas..... | 79 |
| Tabla Nº 14 Área quemada por Número de habitantes en centros poblados..... | 80 |
| Tabla Nº 15 Resolución espacio – temporal y años de cobertura de productos de área quemada evaluados. | 86 |
| Tabla Nº 16 Coordenadas UTM con datum WGS84 de cada una de las zonas de estudios. | 89 |
| Tabla Nº 17 Cobertura de zonas de estudio para los productos MODIS de área quemada..... | 90 |
| Tabla Nº 18 Intercomparaciones analizadas | 93 |
| Tabla Nº 19 Matriz de acuerdo para intercomparación de productos de área quemada | 94 |
| Tabla Nº 20 Valoración del Índice Kappa y Sørensen-Dice (Landis y Koch (1977))..... | 95 |
| Tabla Nº 21. Porcentaje total para los 11 años de estudio de píxeles de área quemada detectados por los productos <i>Fire_CCI</i> , Europeos y MODIS | 100 |
| Tabla Nº 22. Variación anual del índice kappa, a partir de intercomparación productos <i>Fire_CCI</i> y productos MODIS y europeos de área quemada. | 115 |

| | |
|--|-----|
| Tabla Nº 23. Variación anual del índice Sörensens-Dice, a partir de intercomparación productos <i>Fire_CCI</i> y productos MODIS y europeos de área quemada..... | 118 |
| Tabla Nº 24 índices de similitud Kappa y Sörensens-Dice, a partir de la intercomparación con <i>productos de área quemada</i> y <i>Fusionado</i> | 121 |
| Tabla Nº 25 índices de similitud Kappa y Sörensens-Dice, a partir de la intercomparación con <i>productos de área quemada</i> y <i>MERIS</i> | 123 |
| Tabla Nº 26 índices de similitud Kappa y Sörensens-Dice, a partir de la intercomparación con <i>productos de área quemada</i> y <i>VGT</i> | 125 |
| Tabla Nº 27. Dispersión por zona de estudio de acuerdos y desacuerdos del producto <i>Fusionado</i> frente a otros <i>productos de área quemada</i> | 127 |
| Tabla Nº 28. Niveles de acuerdo y desacuerdos del producto <i>MERIS</i> y otros productos de área quemada, por zona de estudio..... | 129 |
| Tabla Nº 29. Niveles de acuerdo y desacuerdos del producto <i>VGT</i> y otros productos de área quemada, por zona de estudio..... | 131 |
| Tabla Nº 30 Diferencias en días de la detección del área quemada entre productos <i>Fire_CCI</i> y otros productos | 133 |
| Tabla Nº 31 Coeficiente de Determinación entre <i>productos del área quemada</i> calculada | 136 |
| Tabla Nº 32 Área quemada (km ²) por producto por zona de estudio y por año | 138 |
| Tabla Nº 33 Resolución espacio – temporal de <i>productos de área quemada</i> evaluados, | 148 |
| Tabla Nº 34 Área quemada global y por bioma detectada por cada producto. | 152 |
| Tabla Nº 35 Índices de correlación y error medio cuadrático entre el área quemada de GFEDv3.1 y otros productos globales de área quemada (año 2008)..... | 165 |

8 Índices de figuras

| | |
|---|-----|
| Figura Nº 1 Esquema general de la tesis doctoral..... | 13 |
| Figura Nº 2 Proyectos y variables evaluadas por la Iniciativa para el Cambio Climático de la ESA | 44 |
| Figura Nº 3 Distribución global de biomas por imagen Landsat TM/ETM+ (Olson <i>et al.</i> , 2001)..... | 59 |
| Figura Nº 4 Distribución global de área quemada en el año 2008 por imagen Landsat TM/ETM+ (información de área quemada según GFEDv3.1 (Giglio <i>et al.</i> 2010))..... | 59 |
| Figura Nº 5 Área efectiva utilizada según el tipo de sensor L5 TM o L7 ETM+ | 62 |
| Figura Nº 6 Efecto del SLC_off en imágenes L7 ETM+ y vectorizado del área quemada. | 63 |
| Figura Nº 7 Distribución global de imágenes seleccionadas, Landsat 5 TM y 7 ETM+ .. | 64 |
| Figura Nº 8. Corrección visual de vectores de área quemada generado por el programa ABAMS (polígonos amarillos generados por el programa y polígonos celestes generados por investigador..... | 69 |
| Figura Nº 9. Distribución latitudinal de zonas de estudio..... | 72 |
| Figura Nº 10 Distribución de área quemada y número de perímetros por bioma. | 76 |
| Figura Nº 11 Distribución de área quemada por bioma, por peso de variable estudiada | 81 |
| Figura Nº 12 Flujo metodológico de intercomparación de productos de área quemada. | 87 |
| Figura Nº 13 Distribución de zonas de intercomparación de productos área quemada. | 88 |
| Figura Nº 14. Productos globales de área quemada intercomparados en zona de estudio SS04, en blanco se observan los píxeles quemados (año 2006) | 92 |
| Figura Nº 15 Área quemada detectada por producto <i>MERIS</i> , Europeos y MODIS en SS01 (año 2006)..... | 102 |
| Figura Nº 16 Área quemada detectada por producto <i>MERIS</i> , Europeos y MODIS en SS02 (año 2006)..... | 103 |
| Figura Nº 17 Área quemada detectada por producto <i>MERIS</i> , Europeos y MODIS en SS03 (año 2006)..... | 104 |

| | |
|---|-----|
| Figura Nº 18 Área quemada detectada por producto <i>MERIS</i> , Europeos y MODIS en SS04 (año 2006)..... | 105 |
| Figura Nº 19 Área quemada detectada por producto <i>MERIS</i> , Europeos y MODIS en SS05 (año 2006)..... | 106 |
| Figura Nº 20 Área quemada detectada por producto <i>MERIS</i> , Europeos y MODIS en SS06 (año 2006)..... | 107 |
| Figura Nº 21 Área quemada detectada por producto <i>MERIS</i> , Europeos y MODIS en SS07 (año 2006)..... | 108 |
| Figura Nº 22 Área quemada detectada por producto <i>VGT</i> , Europeos y MODIS en SS08 (año 2006)..... | 109 |
| Figura Nº 23 Área quemada detectada por producto <i>MERIS</i> , Europeos y MODIS en SS09 (año 2006)..... | 110 |
| Figura Nº 24 Área quemada detectada por producto <i>MERIS</i> , Europeos y MODIS en SS10 (año 2006)..... | 111 |
| Figura Nº 25 Variación media del Índice Kappa entre los Productos <i>Fire_CCI</i> y Productos de área quemada. | 114 |
| Figura Nº 26 Variación anual media del Índice Sörensens-Dice entre los productos <i>Fire_CCI</i> y Productos de área quemada..... | 117 |
| Figura Nº 27 Variación anual del área quemada por producto. | 137 |
| Figura Nº 28 Distribución mensual del área quemada detectada por cada producto | 143 |
| Figura Nº 29 Metodología de intercomparación Global de <i>productos de área quemada</i> | 147 |
| Figura Nº 30 Distribución de biomas, por cuadrículas de 0,5°x0,5° | 149 |
| Figura Nº 31. comparación global de proporción área quemada entre producto MCD45A1 y <i>GFEDv3.1</i> (año 2008) | 153 |
| Figura Nº 32. comparación global de proporción área quemada entre producto GEOLAND2 y <i>GFEDv3.1</i> (año 2008) | 155 |
| Figura Nº 33. comparación global de proporción área quemada entre producto <i>FUSIONADO</i> y <i>GFEDv3.1</i> (año 2008)..... | 157 |
| Figura Nº 34. comparación global de proporción área quemada entre producto <i>VGT</i> y <i>GFEDv3.1</i> (año 2008) | 159 |

| | |
|---|-----|
| Figura Nº 35. comparación global de proporción área quemada entre producto MERIS y <i>GFEDv3.1</i> (año 2008) | 161 |
| Figura Nº 36 Coeficiente de determinación de área quemada entre producto <i>GFEDv3.1</i> y <i>Fusionado</i> | 165 |
| Figura Nº 37 Coeficiente de determinación de área quemada entre producto <i>GFEDv3.1</i> y <i>MERIS</i> | 166 |
| Figura Nº 38 Coeficiente de determinación de área quemada entre producto <i>GFEDv3.1</i> y <i>VGT</i> | 166 |
| Figura Nº 39 Coeficiente de determinación de área quemada entre producto <i>GFEDv3.1</i> y <i>GEOLAND2</i> | 167 |
| Figura Nº 40 Coeficiente de determinación de área quemada entre producto <i>GFEDv3.1</i> y <i>MCD45A1</i> | 167 |