

UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**ESTIMACIÓN DE UN INVENTARIO DE  
EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS  
VOLÁTILES GENERADOS POR FUENTES  
BIOGÉNICAS PARA EL DEPARTAMENTO DE  
CALDAS**

ESTIMATION OF A BIOGENIC VOLATILE ORGANIC  
COMPOUNDS EMISSIONS INVENTORY  
GENERATED FOR THE CALDAS DEPARTMENT

**JADE ALEXANDRA LI RAMÍREZ**  
INGENIERA QUÍMICA

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Química  
Manizales, Colombia

2017



# **ESTIMACIÓN DE UN INVENTARIO DE EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES GENERADOS POR FUENTES BIOGÉNICAS PARA EL DEPARTAMENTO DE CALDAS**

**JADE ALEXANDRA LI RAMÍREZ**

INGENIERA QUÍMICA

e-mail: [jalir@unal.edu.co](mailto:jalir@unal.edu.co); [jadeliramirez@gmail.com](mailto:jadeliramirez@gmail.com)

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Química**

Directora:

Ph.D., Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga

Codirectora:

PhD., Jeannette del Carmen Zambrano Nájera

Grupo de Investigación:

Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Línea de Investigación:

Ingeniería Ambiental

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Química

Manizales, Colombia

2017





*Donde mis fuerzas terminan, comienzan las de  
Dios...*



# **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a aquellas personas e instituciones que me apoyaron con su conocimiento y herramientas para llevar a cabo esta investigación:

A DIOS por ser mi padre en todos los sentidos, por darme fuerzas, por nunca desampararme a pesar de mis errores... por nunca fallarme.

A mi MADRE por su ánimo, comprensión y paciencia.

A ANDRÉS por su amor, humildad y compañía.

A mis compañeros del grupo de Calidad de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales con quienes compartí estos años de esfuerzo y fueron un apoyo constante para afrontar los momentos difíciles. Especialmente ANDREA PATRICIA CUESTA, CARLOS DAVID GOMEZ y CARLOS MARIO GONZALEZ.

A las profesoras de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales que dirigieron y apoyaron mi tesis de la mejor manera con completa disposición. Directora de tesis: BEATRIZ HELENA ARISTIZABAL y Co-directora: JEANNETTE DEL CARMEN ZAMBRANO NÁJERA

Al profesor de University of California Irvine ALEX GUENTHER que me recibió en su grupo de investigación y me brindó su apoyo durante una pasantía de investigación bajo su tutoría donde compartió su conocimiento para mejorar esta tesis.

A los profesores y estudiantes del grupo de trabajo académico en INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL quienes siempre me extienden su mano cada vez que necesitaba su ayuda.

Al profesor y director del jardín botánico de la Universidad de Caldas JOSE HUMBERTO GALLEGO ARISTIZÁBAL por su asesoría y disposición.

A la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, a CORPOCALDAS y a COLCIENCIAS por la información y el apoyo financiero entregado durante la investigación mediante la figura de estudiante auxiliar y por la información suministrada.

A UNIVERSITY OF CALIFORNIA IRVINE, DIRECCIÓN DE RELACIONES EXTERIORES –DRE, INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES DE MANIZALES –IDEA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA SEDE MANIZALES y SISTEMA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN UN por su apoyo financiero para eventos y para llevar a cabo la pasantía de investigación.

A mis amigos por darle alegría este proceso.

## **RESUMEN**

Las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles Biogénicos -COVB responden fuertemente a pequeños incrementos de temperatura, lo que puede conducir a niveles de emisión más altos de lo esperado (Lindwall et al., 2016). En la tropósfera, la temperatura tiene una alta correlación con la altitud (IDEAM, 2014a), y en Caldas donde se desarrolló este trabajo, se encontraron factores de correlación ( $R^2$ ) entre éstas dos (2) variables de hasta 0.98. Considerando que en Caldas la altitud varía entre 140 y 5235 msnm en cortas distancias, en este trabajo se desarrolló un modelo para estimar las emisiones biogénicas de compuestos orgánicos volátiles teniendo en cuenta el gradiente altitudinal usando el software Matlab y un Sistema de Información Geográfica SIG, en este caso el software ArcMap. El modelo se destaca por trabajar con resoluciones muy altas (como la mostrada en este trabajo de 90x90m), sin necesitar mucha capacidad computacional. También sobresale por procesar la temperatura en función de la altitud y por permitir analizar la información espacialmente. Adicionalmente, utiliza información local precisa y abierta al público como son las variables temperatura y radiación solar.

En este trabajo, se estimó por primera vez un inventario de emisiones de COV de origen biogénico para el departamento de Caldas, considerando como año base el 2013 y usando factores de emisión -FE reportados en la literatura. Se obtuvieron resultados temporales (horarios), espaciales y por cobertura de suelo. El mapa de uso y cobertura del suelo para Caldas se obtuvo en una escala 1:100.000 construido por el Instituto Agustín Codazzi – IGAC para el año 2010 (el más actualizado a la fecha de este estudio); no se encontraron cambios significativos para el año base 2013. Las categorías principales para uso y cobertura del suelo encontradas para el departamento de Caldas fueron: cultivos (35%), pastos (34%)

y bosques (29%). Estas categorías fueron homologadas con la información de FE disponibles en la literatura.

El análisis preliminar de variables meteorológicas demostró que el año 2013 fue un año que no tuvo influencia de fenómenos como La Niña o El Niño, es decir, es considerado un año normal. El análisis estadístico de los datos de temperatura y radiación solar mostró continuidad y buena cobertura de datos para este año. Para determinar los efectos altitudinales en temperatura y radiación solar se utilizó un modelo de elevación digital disponible del satélite ASTER de la NASA <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>.

Se estimaron emisiones totales de isopreno, monoterpenos y otros COVB, posteriormente se realizó una especiación para monoterpenos. Se evaluaron dos temporadas hidrológicas típicas de esta región, para esto se tomó un día de la temporada húmeda (29 de noviembre del 2013) y un día de la temporada seca (06 de enero del 2013), con cálculos de 24 horas para cada día. Las estimaciones permitieron cuantificar 21200 toneladas de COVB emitidas en el año 2013, siendo mayores hasta en un 35% las emisiones en días de temporada seca que en días húmedos. De las emisiones biogénicas en el departamento, las mayores son dadas por los bosques (70%) y aumentan entre las 13:00 y 16:00 horas donde la radiación solar es mayor. La especiación estimó que el alfa-pineno es el responsable de las 2/5 partes de los monoterpenos totales.

Un análisis complementario a las emisiones de COVB se realizó en este trabajo con datos de ozono, considerando la relación que existe entre la formación de ozono y las emisiones de COV. Datos de monitoreo pasivo y activo para el año 2014 a 2015 estaban disponibles para la región (Cuesta-Mosquera et al., 2017). Se observó que el ozono tiene un creciente aumento de la zona urbana a la rural pasando de 14.65 a 90.14  $\mu\text{g m}^{-3}$  en una distancia de 20 km, representando concentraciones que sobrepasan los promedios de otras regiones de Colombia. Unos de los principales precursores de la acumulación de ozono en la troposfera son los Compuestos Orgánicos Volátiles –COV, que son emitidos mayoritariamente por la vegetación. Para encontrar cual es la relación entre las fuentes biogénicas y las concentraciones de ozono, es necesario estimar los flujos de COV en Manizales y sus

alrededores, además continuar con el monitoreo de ozono y otros contaminantes como los NOx. Por lo tanto, este trabajo es una primera aproximación para entender la dinámica de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en la región y su efecto sobre otros contaminantes.

**Palabras clave:** Emisiones biogénicas, Calidad del aire, Inventario de emisión, Compuestos orgánicos volátiles, Altitud.





## **ABSTRACT**

Biogenic Volatile Organic Compounds –BVOCs respond strongly to small increases of temperature, which can lead to high emission levels (Lindwall et al., 2016). Temperature in the troposphere has a high correlation with altitude (IDEAM, 2014a), in Caldas, the place where this work was developed, correlation factors ( $R^2$ ) were found between temperature and altitude up to 0.98. Considering that in Caldas the altitude changes drastically in short distances with a range between 140 and 5235 m.s.l, in this work, a model was developed to estimate biogenic emissions of volatile organic compounds considering altitudinal gradient using the Matlab software and a Geographic Information system –GIS, in this case ArcMap. The model stands out for working with high resolutions (like showed in this work 90x90m) without requiring much computational capacity. Also, it processes the temperature with altitude and lets the results be shown in a GIS allowing the analysis of the information spatially. Additionally, it uses precise and open to the public local information as meteorological variables.

For the first time, a biogenic VOCs emissions inventory was estimated for this region with 2013 as the base year using emission factors –EF reported in the literature. Temporary (hourly), spatial and per soil coverage results were given. The use and coverage soil map for Caldas was given on a scale 1:100.000 built by Instituto Agustín Codazzi –IGAC for the year 2010 (The most current until the date of the study), showing insignificant changes for the base year 2013. The main soil coverage categories found by the Caldas department were: crops (35%), grass (34%), and forests (29%). These categories were homologated with EF information available in the literature.

Preliminary analysis of meteorological variables proved that the year 2013 is a year without influence of the Niño or Niña; this means it's considered a normal year. Statistical analysis for temperature and solar radiation data evidenced continuity and good quantity of data for this year. A Digital Elevation Model from satellite ASTER available in NASA's page <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> was used to determinate altitudinal effects.

Total emissions of isoprene, monoterpenes and other VBOCs were estimated and later a speciation of monoterpenes were made. Two typical hydrological seasons of that region were evaluated, one (1) day of wet season (November 29<sup>th</sup> 2013) and one (1) day of dry season (January 06<sup>th</sup> 2013) with calculations of 24 hours for each day. Estimations allowed 21200 BVOC tons in the year 2013 to be quantified with the emissions of the dry day being 35% higher than the wet day. The greatest emissions in the department were attributed by the forests (70%), and the maximum was usually between 13:00 and 16:00 hours where the solar radiation was highest. The speciation estimated that alfa pinene emits 2/5 of the total monoterpenes.

A complementary analysis to the BVOC emissions was made for this work with ozone data, considering the relation between ozone formation and VOC emissions. Passive and active monitoring data for 2014 and 2015 years was available for the region (Cuesta-Mosquera et al., 2017). It was observed that ozone has a growing increase from urban to rural zones, passing from 14.65 to 90.14  $\mu\text{g m}^{-3}$  in 20 km, representing concentrations that exceed the averages in other regions of Colombia. One of the major precursors of accumulation of ozone in the troposphere are the VOCs that are emitted mainly by vegetation. To find the relation between biogenic sources and ozone concentrations, it is necessary to estimate BVOC fluxes in Manizales and its surroundings and to continue with ozone monitoring and other pollutants like NOx. Consequently, this research is an initial approximation for understanding the dynamic of the emissions of VOCs in the region and its impacts on other pollutants.

**Keywords: Biogenic emissions, Air quality, Emissions inventory, Volatile Organic Compounds, Altitude.**

# CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	V
CONTENIDO .....	VII
Lista de Figuras .....	XI
Lista de Tablas .....	XV
Lista de Símbolos y abreviaturas .....	XVII
INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN.....	1
HIPÓTESIS .....	5
OBJETIVOS .....	7
ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	9
<b>CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO</b>	
1.1. GENERALIDADES SOBRE CONTAMINACIÓN ATMÓSFERICA .....	13
1.1.1. Contaminantes atmosféricos.....	18
1.2. GENERALIDADES SOBRE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES – COV .....	24
1.2.1. COVB .....	27
1.3. GENERALIDADES SOBRE MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LOS COVB 31	
1.3.1. Modelos y algoritmos de estimación de emisiones biogénicas .....	36
<b>CAPITULO 2. CALIDAD DEL AIRE Y OZONO EN MANIZALES Y ALREDEDORES</b>	
2.1. INTRODUCCIÓN .....	43
2.2. METODOLOGÍA .....	46
Área de estudio .....	46
Monitoreo .....	47
Procesamiento de la información .....	48
Indicadores seleccionados .....	50
Visualización de los indicadores .....	50

Análisis de ozono .....	51
2.3. RESULTADOS .....	52
CDIAC - Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas .....	52
PM <sub>2.5</sub> .....	55
PM <sub>10</sub> .....	58
SO <sub>2</sub> .....	59
O <sub>3</sub> .....	60
2.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	67
<b>CAPITULO 3. DESARROLLO DE UN MODELO PARA ESTIMAR LAS EMISIONES BIOGENICAS DE COVB TENIENDO EN CUENTA EL GRADIENTE ALTITUDINAL – BIGA</b>	
3.1. INTRODUCCIÓN .....	69
3.2. METODOLOGÍA .....	71
Modelación de emisiones biogénicas teniendo en cuenta el gradiente altitudinal .....	71
Selección área y tiempo de estudio .....	73
Obtención de la información .....	76
Análisis de datos y pre-procesamiento de la información.....	82
Aplicación del modelo.....	87
Cálculos anuales .....	88
3.3. RESULTADOS .....	89
Interpolaciones espaciales .....	91
Información de uso y cobertura del suelo.....	94
Primera estimación del modelo BIGA .....	96
3.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	106
<b>CAPITULO 4. ESPECIACION Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO BIGA</b>	
4.1. INTRODUCCIÓN .....	109
4.2. METODOLOGÍA .....	111
Especiación de Monoterpenos.....	111
Cálculo de emisiones con MEGAN .....	112
4.3. RESULTADOS .....	117
Especiación del inventario con BIGA .....	117
Resultados con MEGAN utilizando sólo temperatura y luz (Escenario 1) .....	119
Comparación BIGA-MEGAN.....	123
Comparación incluyendo el balance energético de la hoja (Escenario 2) .....	126
Diferencias BIGA-MEGAN2.1 .....	128
4.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	130
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES .....</b>	<b>131</b>
<b>ANEXOS</b>	
ANEXO A. ARTÍCULO 1 .....	135
<b>Generación y representación de Indicadores de calidad de aire: caso de estudio aplicado a Manizales</b> .....	135
ANEXO B. ARTÍCULO 2 .....	136

<b>Methodology and preliminary assessment of the biogenic contribution to Volatile Organic Compounds (VOCs) of a mountainous and tropical region. ....</b>	<b>136</b>
<b>ANEXO C. MAPAS ESPACIALES DE COVB .....</b>	<b>137</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>159</b>



## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1.1. Cambios de la temperatura con la altitud en la atmósfera .....	14
Figura 1.2. Fenómenos que suceden en la troposfera causantes de efectos adversos sobre el medio ambiente .....	15
Figura 1.3. Destrucción de la capa de Ozono en 13 años.....	17
Figura 1.4. Tipos de fuentes de contaminación atmosférica .....	18
Figura 1.5. Contribución de diferentes fuentes a los COV de Estados Unidos en el año 2014 .....	27
Figura 1.6. Factores que afectan las emisiones biogénicas .....	28
Figura 1.7. Medición experimental de COVB. ....	35
Figura 1.8. Algoritmos y modelos para estimar COV biogénicos .....	37
Figura 1.9. Esquema de funcionamiento de MEGAN.....	42
Figura 2.1. Mapa de Manizales con ubicación geográfica de estaciones de calidad del aire .....	46
Figura 2.2. Procedimiento para analizar datos de calidad del aire .....	48
Figura 2.3. Estructura de la bodega de datos.....	49
Figura 2.4. Pantalla de generación de indicadores de calidad del aire desde la bodega de datos. ....	52
Figura 2.5. Resultados numéricos del ICA calculados desde la bodega de datos. ....	53
Figura 2.6. Grafica de ICA realizada desde la bodega de datos.....	54
Figura 2.7. Calendarios de indicadores de calidad del aire para PM <sub>2.5</sub> . ....	57
Figura 2.8. Tendencia de ICA para PM <sub>10</sub> . ....	58
Figura 2.9. Tendencia por niveles diarios del ICA de SO <sub>2</sub> .....	59
Figura 2.10. Tendencia octohoraria del ICA de O <sub>3</sub> .....	60
Figura 2.11. Análisis de los datos de O <sub>3</sub> de la estación gobernación de Manizales .....	63
Figura 2.12. Comparación de los niveles de O <sub>3</sub> en ciudades de Colombia (promedio horario de monitoreo activo).....	65

Figura 2.13.	Concentraciones de O <sub>3</sub> en Manizales y alrededores (Monitoreo pasivo)..	66
Figura 3.1.	Diagrama de metodología usada para desarrollar el modelo BIGA .....	72
Figura 3.2.	Ejemplos de precipitación mensual (mm) en diferentes zonas de Caldas. ...	74
Figura 3.3.	Ejemplo de cuadrícula del modelo.....	76
Figura 3.4.	Mapa de uso y cobertura del suelo identificado por clases según la metodología Corine Land Cover. Fuente: (CORPOCALDAS, 2015).....	78
Figura 3.5.	Digital Elevation Model de 90x90m para Caldas. Fuente: <a href="https://asterweb.jpl.nasa.gov">https://asterweb.jpl.nasa.gov</a> .....	83
Figura 3.6.	Pantallazo del código realizado en Matlab .....	87
Figura 3.7.	Esquema gráfico que explica cómo el modelo BIGA procesa la información por celdas para calcular COVB.....	88
Figura 3.8.	Ubicación espacial de las estaciones de temperatura y radiación solar en los municipios del departamento de Caldas .....	89
Figura 3.9.	Ejemplos de correlaciones lineales de altitud versus temperatura calculadas por horas. ....	91
Figura 3.10.	Mapas ejemplo de temperatura interpolada teniendo en cuenta la altitud.	92
Figura 3.11.	Temperaturas promedio y valores máximos y mínimos de cada hora para el día seco y para el día húmedo. ....	93
Figura 3.12.	Mapa ejemplo de radiación solar interpolada usando IDW. ....	93
Figura 3.13.	Radiaciones solares: promedio y valores máximos y mínimos de cada hora para el día seco y para el día húmedo. ....	94
Figura 3.14.	Mapa de uso y cobertura del suelo clasificado por factores de emisión definidos en la Tabla 3.6.....	95
Figura 3.15.	Emisiones horarias de isopreno, monoterpenos y. otros COV biogénicos para día seco y día húmedo en Caldas. ....	98
Figura 3.16.	Porcentajes de contribución de cada tipo de COVB para día seco y día húmedo en Caldas. ....	98
Figura 3.17.	Emisiones totales porcentuales de COVB en Caldas para el año 2013 por tipo de cobertura y su área. ....	99



Figura 3.18. Representación horaria espacializada de los COVB para el día seco y húmedo en $\mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$ para isopreno, monoterpenos. y otros COVB .....	103
Figura 4.1. Tipos de vegetación analizados y la ubicación de las estaciones meteorológicas más cercanas .....	113
Figura 4.2. Especiación de monoterpenos totales obtenidos con el modelo BIGA .....	118
Figura 4.3. Contribución por cobertura para el monoterpeno pineno alfa .....	119
Figura 4.4. Resultados de COV para cinco tipos de coberturas en Caldas usando MEGAN2.1 (escenario 1) .....	122
Figura 4.5. Flujos horarios de isopreno y monoterpenos por tipo de vegetación obtenidos con MEGAN2.1 .....	123
Figura 4.7. Comparación entre los resultados horarios de BIGA y MEGAN .....	125
Figura 4.6. Flujos de bosques estimados en BIGA y en MEGAN con y sin balance energético de la hoja .....	127



## Lista de Tablas

<b>Pág.</b>		
Tabla 1.1.	Concentraciones máximas permisibles de contaminantes criterio en Colombia .....	19
Tabla 1.2.	Puntos de corte y escala de valoración de los índices de calidad del aire ....	21
Tabla 1.3.	Medidas preventivas según el nivel del ICA .....	22
Tabla 1.4.	Efectos sobre la salud de acuerdo al nivel de ICA.....	23
Tabla 1.5.	Principales terpenos biogénicos.....	29
Tabla 1.6.	Tiempos de vida de COVB.....	33
Tabla 1.7.	Constantes para el cálculo de los factores de ajuste tomados de (Guenther et al., 1995) .....	39
Tabla 1.8.	Parámetros de corrección que usa MEGAN2.1 para cada compuesto.....	40
Tabla 1.9.	Comparación entre BIGA y MEGAN2.1.....	128
Tabla 2.1.	Contaminantes medidos e información relevante de sus variables.....	47
Tabla 2.2.	Rangos válidos de concentraciones de gases. ....	50
Tabla 2.3.	Porcentaje de excedencia de los límites máximos permisibles.....	55
Tabla 3.2.	Especificaciones de los equipos de radiación solar y temperatura .....	77
Tabla 3.3.	Clases y subclases del mapa de uso y coberturas del suelo de Caldas con su respectiva área.....	78
Tabla 3.4.	Subclases y coberturas de Caldas con su porcentaje de área de Territorios Agrícolas y de Bosques y Áreas Seminaturales.....	79
Tabla 3.5.	Potenciales de emisión en peso seco iniciales, normalizados a temperatura de hoja de 30 °C y PAR de 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	81
Tabla 3.6.	Códigos asignados según grupos de vegetación .....	85
Tabla 3.7.	Reclasificación de las coberturas del mapa de uso y coberturas del suelo de Caldas	85
Tabla 3.8.	Ubicación de las estaciones seleccionadas de temperatura.....	90

Tabla 3.9.	Ubicación de las estaciones seleccionadas de radiación solar .....	90
Tabla 3.10.	Factores de emisión a nivel canopy para cada tipo de cobertura considerado adecuados a la región de estudio.....	96
Tabla 3.11.	Comparación de emisiones con otras estimaciones. ....	105
Tabla 4.1.	Factores para especiar los Monoterpenos más frecuentes en la naturaleza.	111
Tabla 4.2.	Especiación de otros monoterpenos.....	112
Tabla 4.3.	Descripción de las coberturas y tipos de factores de emisión usados en ambos modelos. ....	114
Tabla 4.4.	Datos de temperatura y radiación solar de las tres estaciones usadas para correr MEGAN2.1. ....	114
Tabla 4.5:	Ubicación exacta de las estaciones meteorológicas con las que se corrieron los modelos.....	115
Tabla 4.6.	Configuración usada con MEGAN.....	120

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos y formulas químicas

Símbolo	Definición
Ar	Argón
C	Carbono
CFC	Clorofluorocarbonos
CH <sub>4</sub>	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
COVB	Compuestos Orgánicos Volátiles Biogénicos
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
H	Hidrógeno
H <sub>2</sub>	Hidrogeno
He	Helio
H <sub>2</sub> O	Agua
HFC	Hidrofluorocarburos
HNO <sub>3</sub>	Ácido nítrico
Kr	Kriptón
N <sub>2</sub>	Nitrógeno
Ne	Neón
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
O <sub>2</sub>	Oxígeno
O <sub>3</sub>	Ozono
OCOV	Otros Compuestos Orgánicos Volátiles
PM <sub>10</sub>	Material Particulado menor a 10 micras
PM <sub>2.5</sub>	Material Particulado menor a 2.5 micras
PST	Partículas Suspendidas Totales
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
SO <sub>x</sub>	Óxidos de azufre

## Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
AREA	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
BEIS	Biogenic Emission Inventory System
CDMB	Corporación autónoma regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga
CLM4	Community Land Model versión 4
CORPOCALDAS	Corporación Autónoma de Caldas
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
DEM	<i>Digital Elevation Map</i>
EPA	Environmental Protection Agency
FE	Factor de Emisión
G93	Algoritmo de Guenther 1993
GC-MS	Gas Chromatography-Mass Spectrometry
GLOBEIS	Global Biosphere Emissions and Interactions System
ICA	Índice de Calidad del Aire
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
ISP	Isopreno
LAI	Leaf Area Index
MAVDT	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MEGAN	Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature
MTP	Monoterpeno
OMS	Organización Mundial de la Salud
PAN	Peroxiacetil nitrato
PAR	Photosynthetically Active Radiation
PFT	Plant Functional Types
PNNT	Parque Natural de los Nevados Tayrona
PPFD	Photosynthetic Photon Flux Density
PTR-MS	Proton Transfer Reaction - Mass Spectrometry
SDA	Secretaría Distrital de Ambiente
SMOKE	Sparse Matrix Operator Kernel Emissions
SQT	Sesquiterpeno
UCI	University of California Irvine

## INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Según el documento Conpes 3344, la contaminación del aire se está convirtiendo en el problema ambiental de mayor preocupación para la comunidad colombiana y está entre los tres principales causantes de sobrecostos económicos en el país. Costos que han sido atribuidos a salud pública, mortalidad prematura y morbilidad (CONPES 2005).

Por esto monitorear la calidad del aire que respiramos toma cada vez más importancia. En Colombia esto se hace a través de sistemas de vigilancia de calidad del aire que ahora son implementados prácticamente en todo el mundo. Sus componentes principales son equipos que miden las concentraciones de contaminantes en el aire, los cuales brindan una cantidad de datos que deben ser analizados y procesados para ser comprendidos. Entidades gubernamentales han definido metodologías tanto para el monitoreo como para el análisis de datos. Unos de las más usados a nivel mundial son los índices de calidad del aire -ICA definidos por la Environmental Protection Agency –EPA.

En Colombia se han realizado varios estudios de calidad del aire pero estos se han enfocado principalmente en la contaminación proveniente de las actividades humanas a las que se denomina fuentes antropogénicas, dejando de lado las fuentes naturales (Cárdenas R., 2012). Estas fuentes naturales, más específicamente las fuentes biogénicas, se pueden considerar de gran importancia ya que son las causantes de la mayor parte de la emisión de compuestos de tipo orgánico en el mundo (Finlayson-Pitts & Pitts 1999), mejor conocidos como compuestos orgánicos volátiles biogénicos –COVB.

Los COVB se categorizan principalmente en isopreno ( $C_5H_8$ ), monoterpenos ( $C_{10}H_x$ ), sesquiterpenos ( $C_{15}H_x$ ). De estos, el más abundante es isopreno que abarca el 53% de los

flujos globales seguido de los monoterpenos con el 15% (Bai et al. 2015a). Son importantes constituyentes atmosféricos que afectan tanto la fase gaseosa como la química heterogénea de la atmósfera (IPCC 2013). La mayoría de los Compuestos Orgánicos Volátiles -COV tienen tiempos de vida cortos, en un rango entre treinta (30) minutos y dos (2) horas, debido a que reaccionan rápidamente en procesos fotoquímicos en presencia de NO<sub>x</sub> (Guenther et al. 1993; Kallenbach et al. 2014). Son precursores de contaminantes secundarios, de los cuales el que mayor preocupación genera es el ozono -O<sub>3</sub> troposférico, ya que es catalogado como contaminante criterio por ser considerado nocivo para la salud (MADS 2010c). Un análisis de las concentraciones de ozono en Colombia demostró que Manizales tiene un promedio anual de 24.7  $\mu\text{g m}^{-3}$ , siendo niveles medio altos para el país. De estas, las mayores concentraciones en la región se producen entre las 10:00 y 15:00 horas (Li-Ramírez et al. 2016).

Debido a su importancia en los procesos atmosféricos, la estimación de los flujos de COVB es necesaria para conocer el rol de éstos en modelos regionales y globales (Koca et al. 2013). Los flujos de COVB emitidos se pueden conocer por medios experimentales o por estimaciones realizadas a través de inventarios de emisión que se calculan generalmente con factores de emisión. Estos factores de emisión son el resultado de la multiplicación entre los flujos ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) de COV emitidos por un tipo de vegetación y un factor de actividad que tiene en cuenta el efecto de la luz y la temperatura sobre las emisiones biogénicas (INEEC 2005), para lo que se requiere información de cobertura de la tierra, temperatura, y radiación solar o Radiación Fotosintéticamente Activa –PAR (por sus siglas en inglés), con la cual se estiman las emisiones (Guenther et al. 1996; Bai et al. 2015a; Koca et al. 2013).

La comunidad científica ha desarrollado avanzados modelos numéricos para entender las interacciones entre meteorología, uso del suelo, emisiones biogénicas y dinámica de contaminantes (UNC 2014). Como por ejemplo los modelos BEIS (EPA 2009), GLOBEIS (Sakulyanontvittaya et al. 2010), SMOKE (CMAS 2016), Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature –MEGAN (Guenther, Jiang, et al. 2012), entre otros. Desde el año 1999 la mayoría de los modelos y estudios desarrollados a nivel mundial para estimar COV Biogénicos se han basado en el algoritmo de Guenther et al. 1995 –G95. Este algoritmo calcula las emisiones de tres clases generales de COVB que son isopreno, monoterpenos y



otros COVB requiriendo como entrada información de cobertura vegetal, temperatura y radiación. Actualmente, el algoritmo de Guenther et al se utiliza para estimar los inventarios de los 195 países miembros de las Naciones Unidas y de la Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés) (WMO & UNEP n.d.). También se usa como entrada del modelo WRF-Chem para estimar las emisiones biogénicas (NCAR & UCAR 2016) y ha sido aplicado en numerosos inventarios para estimar las emisiones biogénicas en zonas de todos los continentes (Li & Xie 2014). Sin embargo, modelos como los mencionados anteriormente utilizan software complejos de instalar e implementar, los cuales no se pueden utilizar si no se tiene la suficiente capacidad computacional. Sin embargo, para países y zonas con características no estacionales son pocos los modelos con información aplicable. En estos modelos es necesario considerar que en las zonas de alta montaña el gradiente altitudinal tiene una marcada influencia en las variables meteorológicas y que en zonas tropicales la vegetación es variada y bastante densa lo que afecta las emisiones biogénicas. Un estudio reciente (Gu et al. 2017) reporta que existe una fuerte correlación entre las emisiones de isopreno y la elevación del terreno, lo que impacta de manera significativa la distribución de oxidantes que se predicen por modelos regionales.

En países con características tropicales es más complejo aplicar un modelo como los mencionados. Estos países ubicados en la franja ecuatorial entre latitudes 23.5° N y 23.5° S poseen características climáticas y de cobertura que los hacen diferentes al resto del mundo (Ocampo et al. 2010). Se distinguen por sus bosques tropicales húmedos, alta capacidad fotosintética (Jaramillo 2005) y la riqueza biótica que estos poseen (CORPOCALDAS 2007). También por su complejidad y alta variabilidad espacio-temporal climática, por ejemplo, las temperaturas varían desde las más altas sobre los 313 K hasta las más bajas en los picos de las montañas en la Cordillera de los Andes que han llegado a ser menores que el punto de congelación (Jaramillo 2005). Al usar observaciones satelitales y modelos globales para el cálculo de las emisiones de COVB, toda esta variabilidad puede quedar homogenizada (Gu et al. 2017) debido a que normalmente no tienen resoluciones tan altas como las que demanda la topografía andina que cambia drásticamente de temperatura y altitud en distancias muy cortas.

Inventarios de fuentes biogénicas para zonas con tal complejidad no han tenido suficiente atención. Difícilmente se encuentra información para estimar las emisiones de compuestos biogénicos teniendo en cuenta topografías complejas. Por tal razón, este documento expone la metodología de un modelo elaborado en Colombia para estimar las emisiones de COVB en regiones tropicales y/o montañosas donde fue adecuada la información local y el algoritmo de emisión foliar propuesto por Guenther (Guenther et al. 1995) de manera temporal y espacializada, usando software de fácil instalación y uso como lo son Geographic Information Systems -GIS y Matlab, donde se incorporaron parámetros que hacen referencia a las características orográficas propias de zonas tropicales. Dicha metodología se aplicó para estimar un inventario de fuentes biogénicas en el departamento de Caldas, Colombia, un territorio con características típicas de la región andina tropical. Sin embargo, el algoritmo se puede utilizar para cualquier tipo de región, independiente de sus condiciones orográficas. En este estudio se seleccionó un día representativo para cada temporada típica en climas tropicales: seca (06 de enero de 2013) y húmeda (29 de noviembre de 2013). Se usó información a la cual se puede acceder fácilmente como los datos de las estaciones meteorológicas de la región, un mapa de elevación digital y un mapa de uso y cobertura del suelo.

Estos resultados generan una base de conocimiento y se consideran importantes para complementar los inventarios de fuentes antropogénicas que se han desarrollado en el departamento y con estos realizar estudios con mayor criterio. Ayudan a comprender los procesos de intercambio físico y químico que sucede entre la biosfera como fuente y la atmósfera como receptor de especies químicas atmosféricas. Permiten emprender posteriores investigaciones para el análisis de la formación de contaminantes como el ozono y el aporte de cada fuente de contaminación a sus concentraciones. También pueden ayudar a formular políticas y estrategias apropiadas para reducir y controlar contaminantes, realizar programas de reforestación y planes de prevención y sobre todo sirven como guía para estimar inventarios de fuentes biogénicas a futuro, bien sea a escala regional, nacional o internacional.

## HIPÓTESIS

Caldas tiene una amplia cobertura de bosques y áreas agrícolas, que abarcan el 98.4% del área total del departamento, por esta condición se cree que puede representar una fuente potencial de Compuestos Orgánicos Volátiles Biogénicos (COVB). Al generar el inventario de emisiones de COVB para el departamento de Caldas, se pretende evaluar el enunciado anterior determinando las emisiones totales y cuáles son las especies que más contribuyen a la emisión de estos compuestos.

Además, al ser una región tropical con cambios altitudinales drásticos se pretende encontrar información importante sobre el impacto de variables como la temperatura y la radiación en la dinámica de emisión de estos compuestos.



## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Estimar las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles generados por fuentes biogénicas para el departamento de Caldas.

### **Objetivos específicos**

Seleccionar factores de emisión con aplicación en la vegetación del área de estudio que permitan el cálculo de las emisiones de COV por fuentes biogénicas.

Aplicar un modelo matemático que permita la estimación de las emisiones biogénicas con base en la información recopilada.

Realizar una desagregación espacial de las emisiones de COV por fuentes biogénicas para el departamento de Caldas.



## **ESTRUCTURA DE LA TESIS**

Este trabajo está compuesto por cuatro capítulos. El capítulo 1 constituye el marco teórico donde se revisan conceptos concernientes a calidad del aire y en especial emisiones provenientes de fuentes biogénicas. Se dan pautas para estimar los Índices de Calidad del Aire –ICA, se expone el mecanismo de reacción de ozono donde influyen los COVB así como los principales modelos y algoritmos para realizar inventarios de fuentes biogénicas.

Los capítulos 2, 3 y 4, están conformados por una parte introductoria, generalidades, metodología, resultados y por último conclusiones.

El capítulo dos se realizó como complemento a los objetivos planteados y surgió de la necesidad de conocer mejor el estado de la calidad del aire de la región y la dinámica de sus contaminantes buscando alguna relación con los COVB y asimismo poder analizar los resultados del inventario de fuentes biogénicas con mayor criterio. El capítulo está compuesto por dos temas principales, en el primero se presenta un análisis basado en datos de inmisión provenientes de cinco (5) estaciones de monitoreo de calidad del aire de Manizales ubicadas en diferentes puntos de la ciudad. Este análisis se realizó calculando Indicadores de Calidad del Aire y excedencias de los límites máximos permisibles basados en la legislación colombiana. La segunda parte del capítulo muestra un análisis más profundo enfocado en el contaminante ozono, para entender mejor sus concentraciones y procedencia ya que los COV influyen ampliamente en la formación de ozono.

En el capítulo tres se muestra el cumplimiento de todos los objetivos de la tesis, donde adicionalmente se presenta el desarrollo de un modelo nombrado BIGA que estima las emisiones de COVB teniendo en cuenta el gradiente altitudinal, el cual fue realizado para aplicarse a cualquier región, pero principalmente para lugares andinos y montañosos. Este capítulo presenta los lineamientos y la metodología con la cual se desarrolló el modelo.

Además, se muestra el proceso de búsqueda y selección de información meteorológica, de uso y cobertura del suelo y de factores de emisión, los cuales fueron homologados y validados para Caldas con el experto Alex Guenther, dando así cumplimiento al objetivo **“Seleccionar factores de emisión con aplicación en la vegetación del área de estudio que permitan el cálculo de las emisiones de COV por fuentes biogénicas.”**.

Posteriormente, con esta información se aplicó en Caldas el modelo matemático desarrollado (BIGA) obteniendo resultados parciales y dando cumplimiento al objetivo **“Aplicar un modelo matemático que permita la estimación de las emisiones biogénicas con base en la información recopilada”**. Es importante conocer que este objetivo también puede verse cumplido en el capítulo 4 cuando se aplica el modelo MEGAN también para Caldas.

Entre los resultados obtenidos se lograron estimados temporales, por cobertura y espaciales los cuales se muestran a través de gráficas representativas. Para los resultados espaciales se realizaron mapas por tipo de cobertura y por hora utilizando el software ArcGis que demuestran la distribución de los flujos en todo el departamento. Así cumpliendo el último objetivo que es **“Realizar una desagregación espacial de las emisiones de COV biogénicos estimados para el departamento de Caldas”**.

El capítulo cuatro incluye un enfoque más profundo a las emisiones biogénicas de Caldas, aquí se tomaron los resultados obtenidos con el modelo BIGA y se realizó una especiación de monoterpenos. Por otra parte, los datos locales utilizados para correr el modelo BIGA fueron incluidos en MEGAN para realizar una comparación de los resultados.

Finalmente, el documento tiene una sección de conclusiones y recomendaciones generales y otra sección de Anexos donde se encuentra la información complementaria que no se visualiza en los capítulos.

Parte de los resultados obtenidos durante la maestría están consignados en forma de artículos dirigidos a la comunidad académica y científica, también en documentos presentados en eventos nacionales e internacionales como se presenta a continuación:



## **Publicaciones y participación en eventos**

### ARTÍCULOS

- Li-Ramírez, Jade Alexandra, Pérez-Zapata, Ángela María, Duque-Méndez, Néstor Darío, & Aristizábal-Zuluaga, Beatriz Helena. (2016). *Generación y representación de Indicadores de calidad de aire: caso de estudio aplicado a Manizales*. Iteckne, 13(2), 174-184, from [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1692-17982016000200008&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-17982016000200008&lng=en&tlng=es)
- Li-Ramírez, Jade Alexandra, Zambrano-Nájera, Jeannette del Carmen, & Aristizábal-Zuluaga, Beatriz Helena. (2017). *Methodology and preliminary assessment of the biogenic contribution to Volatile Organic Compounds (VOCs) of a mountainous and tropical region*. Artículo sometido.
- Li-Ramírez, Jade Alexandra, Guenther, Alex, Zambrano-Nájera, Jeannette del Carmen, & Aristizábal-Zuluaga, Beatriz Helena. *Biogenic Volatile Organic Compounds from a mountainous and tropical Region. Estimation with models BIGA, MEGAN and WRF-Chem. Validation with field measurements*. Manuscrito en desarrollo.

### PARTICIPACIÓN EN EVENTOS CIENTÍFICOS

- Li-Ramírez, Jade Alexandra, Pérez-Zapata, Ángela María, Duque-Méndez, Néstor Darío & Aristizábal-Zuluaga, Beatriz Helena. (2015). Presentación oral: Indicadores de Calidad del aire en Manizales: Implemetación y representación. In *V Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública II CMAS SOUTH AMERICAN CONFERENCE* (pp. 24–36). Bucaramanga. Retrieved from [http://casap.com.co/es/memorias/libro\\_memorias.pdf?v=2](http://casap.com.co/es/memorias/libro_memorias.pdf?v=2)
- Li-Ramírez, Jade Alexandra. (2016). Poster: Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire para una Región Tropical y Montañosa del Área Andina. *Curso de Técnicas de Percepción Remota aplicadas a la Química de la Atmósfera*. Ciudad de México

- Li-Ramírez, Jade Alexandra, Zambrano-Nájera, Jeannette del Carmen, & Aristizábal-Zuluaga, Beatriz Helena. (2017). Inventory of Biogenic Volatile Organic Compounds for an Andean region *VI Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública. Gestion de la calidad del aire, retos y alternativas* Cali. Poster aceptado.

## PASANTÍA DE INVESTIGACIÓN

Se realizó una pasantía de investigación bajo la tutoría del profesor Alex Guenther en el departamento Earth System Science de University of California Irvine, Estados Unidos. Esta fue realizada entre 01 de octubre y 30 de noviembre de 2016 con el objetivo de mejorar el inventario y las investigaciones de emisiones biogénicas en Colombia.

Durante la estancia se desarrollaron las siguientes actividades:

- Análisis y sustitución de los factores de emisión del inventario.
- Trabajo de laboratorio: desarrollo de microtubos adsorbentes de COV
- Modelación: programación de MEGAN2.1 en Matlab
- Compilación de la base de datos de factores de emisión para la nueva versión de MEGAN

# CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. GENERALIDADES SOBRE CONTAMINACIÓN ATMÓSFERICA

La atmósfera cubre el globo terráqueo, está conformada por gases que juntos genéricamente reciben el nombre de aire y su composición varía según la altura ya que las reacciones y la dispersión de compuestos tiene una alta correlación con variables como presión, temperatura y velocidad del viento. En general, está constituida mayoritariamente por nitrógeno –N<sub>2</sub> (78.1%) y oxígeno –O<sub>2</sub> (20.9%) (Porcentajes en volumen). El resto de componentes son argón -Ar (9340 ppm), dióxido de carbono -CO<sub>2</sub> (400ppm), neón -Ne (18.18 ppm), helio -He (5.24 ppm), metano -CH<sub>4</sub> (1.7 ppm), kriptón -Kr (1.14 ppm); hidrógeno -H<sub>2</sub> (0.55 ppm) y agua –H<sub>2</sub>O (Williams 2016). La atmósfera tiene una masa de  $5.1 \times 10^{18}$  kg, peso molecular promedio de 28.97, temperatura promedio de 283 K y velocidad del viento que va de 0 a  $100 \text{ m s}^{-1}$  (Williams 2016).

Adicional a los compuestos mencionados, en la atmósfera se encuentran contaminantes de diferente índole. Entre las trazas de contaminantes que componen la atmósfera está el ozono -O<sub>3</sub> el cual, según la capa donde se encuentre, puede ser benéfico o dañino. Si se encuentra en la estratósfera forma la capa de O<sub>3</sub> que protege la tierra, flora, fauna y seres humanos absorbiendo y limitando el paso de la radiación solar ultravioleta. En la estratósfera es una especie de escudo de protección mientras que en la troposfera puede ser dañino para la vegetación y para la salud humana ya que en ciertas concentraciones no muy difíciles de alcanzar, causa daños en el aparato respiratorio y en la piel.

Teniendo en cuenta lo anterior, resulta de gran importancia conocer las capas de la atmósfera para el análisis de los contaminantes del aire. La distribución de estas capas depende de la variación de la presión y la temperatura principalmente. La presión en la atmósfera disminuye prácticamente de forma lineal con la altitud mientras que la temperatura varía drásticamente gracias a diferentes reacciones que se presentan a medida que la altura aumenta (Figura 1.1).

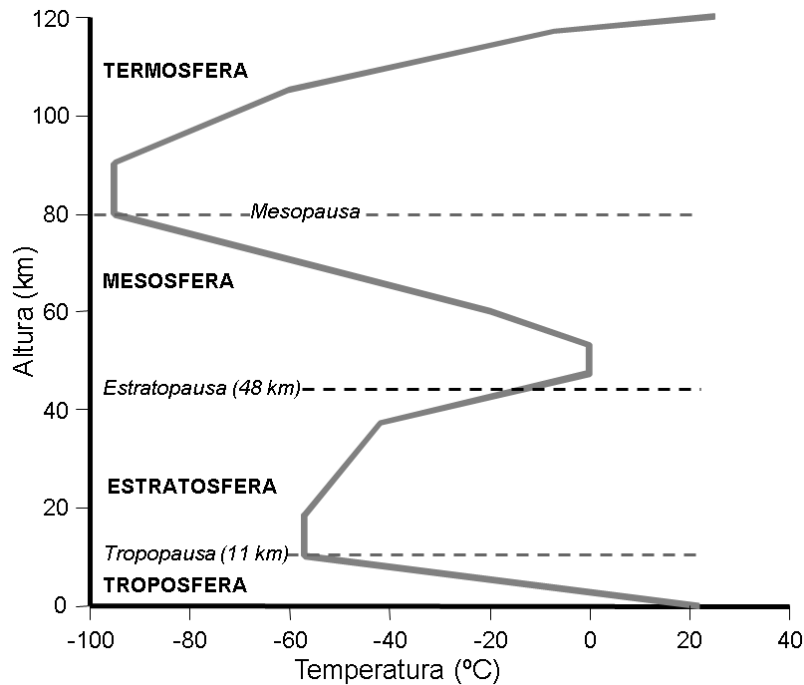


Figura 1.1. Cambios de la temperatura con la altitud en la atmósfera  
Fuente: Modificado de (Pitts 1986)

Estos cambios de temperatura dividen la atmósfera en diferentes capas y a su vez, las capas tienen unas divisiones entre ellas que son tropopausa, estratopausa, mesopausa y termopausa respectivamente (Finlayson-Pitts & Pitts 1999). Las capas principales son:

**Troposfera:** Es la capa más densa, se extiende en promedio 11 km desde la superficie de la tierra, pero puede alcanzar hasta los 18-20 km y la temperatura suele variar  $-6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  por cada kilómetro (km). En esta capa es donde se encuentra la mayor cantidad de oxígeno por lo que es donde se encuentra la vida terrestre, animales, humanos y plantas, además de las nubes. Debido a esto, como lo muestra la Figura 1.2, en la troposfera también ocurren los fenómenos físicos que causan las emisiones y gran parte de los fenómenos químicos que

hacen posible la transformación a contaminantes secundarios. Éstos últimos junto con los contaminantes primarios son depositados en la tierra afectando la vida humana y animal.

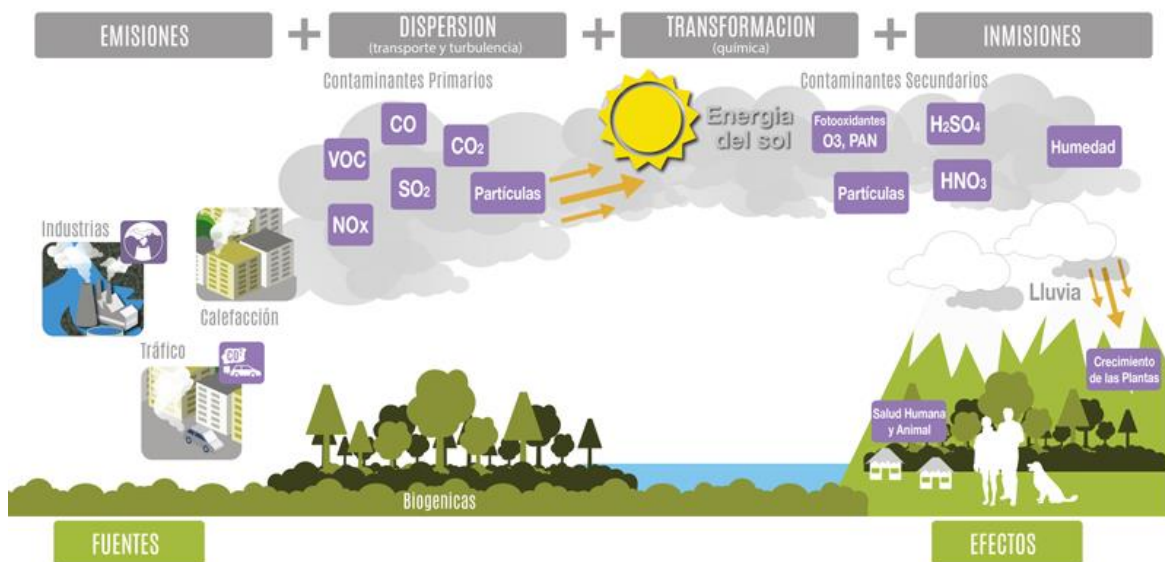
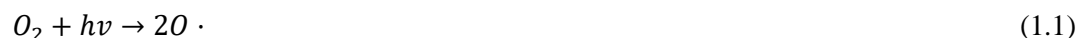


Figura 1.2. Fenómenos que suceden en la troposfera causantes de efectos adversos sobre el medio ambiente

Fuente: (IDEAM 2016b)

**Estratósfera:** Es la segunda capa de la atmósfera y en promedio llega hasta los 48 km de altitud (desde la superficie terrestre). Aquí es donde se concentra la capa de ozono. A diferencia de la troposfera, la estratósfera aumenta su temperatura con la altitud. Esto es debido a las reacciones fotoquímicas llamadas “el ciclo de Chapman” (Ecuaciones 1.1, 1.2, 1.3 y 1.4) descubiertas en 1930 por Sydney Chapman donde se convierte el oxígeno en ozono liberando calor.



**Mesosfera:** Ésta se extiende hasta los 80 km de altura y alcanza las temperaturas más bajas de la atmósfera. Es donde se encuentran los meteoritos o estrellas fugaces.

**Termosfera:** Puede alcanzar hasta los 800 km de altura y su temperatura depende de su cercanía al sol, por lo que aumenta directamente con la altura alcanzando temperaturas

extremadamente altas, de allí se deriva su nombre. Aquí permanecen las estaciones espaciales.

**Exosfera:** Es la última capa y puede llegar hasta los 10.000 km, allí se pueden encontrar los satélites.

En este caso interesa estudiar la capa que nos influye directamente, es decir, la que está más cerca de los seres humanos, la troposfera. Allí es donde ocurren procesos como la capa de mezcla y donde se concentran los contaminantes que se respiran. También en la tropósfera es donde se producen los contaminantes antropogénicos que causan el desbalance natural de la atmósfera dando como resultado, contaminantes secundarios que son los que se forman a partir de reacciones entre los contaminantes primarios, ejemplos de éstos son el O<sub>3</sub>, aerosoles, sulfatos y nitratos.

Es por esto que a medida que pasan los años, la composición de la atmósfera cambia más. La mayoría de los procesos químicos y físicos que se producen en la superficie de la tierra son causados por las actividades humanas como quemar caseras, procesos industriales, deforestación y vehículos automotores (Finlayson-Pitts & Pitts 1999). Los compuestos o contaminantes que se generan por las diferentes fuentes van directamente a la atmósfera y también pueden reaccionar con otros elementos generando contaminantes secundarios que pueden permanecer años en la atmósfera provocando graves daños.

Un ejemplo muy común hoy en día de los efectos de la contaminación son los agujeros en la capa de ozono producidos por los aerosoles, pesticidas y refrigerantes que contienen clorofluorocarbonos -CFC e hidrofluorocarburos -HFC, los que suben hasta la estratósfera y reaccionan con el O<sub>3</sub> convirtiéndolo en otras sustancias, de esta forma se agota el O<sub>3</sub> allí. Este efecto lo muestra la Figura 1.3 por medio de la cual la NASA, 2011 demuestra cómo la capa de ozono se ha destruido entre los años 1984 y 1997.

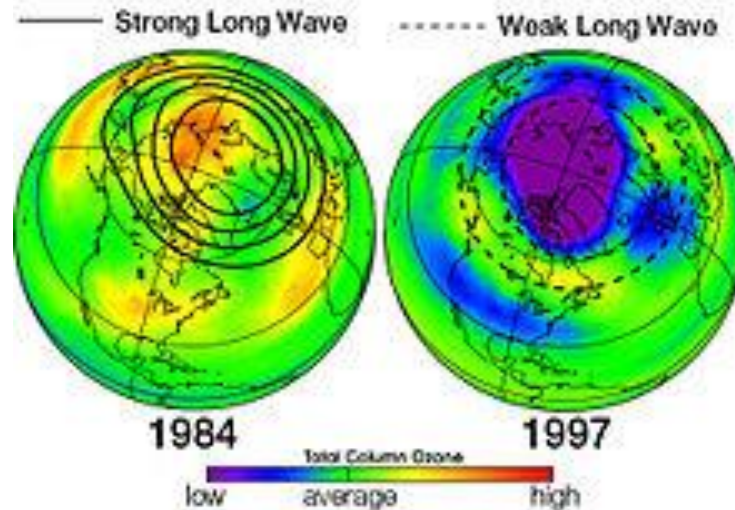


Figura 1.3. Destrucción de la capa de Ozono en 13 años  
Fuente: (NASA 2011)

Otro ejemplo de los cambios en la atmósfera es el calentamiento global que es el incremento de la temperatura de océanos y de la atmósfera de la tierra debido a la emisión de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ , metano  $\text{CH}_4$ , óxido nitroso  $\text{NO}_2$ , ozono troposférico  $\text{O}_3$ , CFC). Uno de los efectos más preocupantes del calentamiento es el derretimiento de los hielos terrestres que a su vez causa el aumento del nivel del mar y muerte de la vida salvaje en los polos.

También se estima que en el mundo una de cada ocho muertes ocurre por exposición a contaminación atmosférica. Lo que ha llevado a superar los 8 millones de muertes en un año (OMS 2016). Por otra parte, su deposición sobre la vegetación causa deterioros y costos, principalmente en la agricultura. Los daños y costos causados por la contaminación del aire son graves y representan una gran pérdida para los países. Un problema que se torna casi imposible de revertir.

Además, no solo las actividades del ser humano generan compuestos que afectan la calidad del aire, la naturaleza también lo hace cuando coincide con una atmósfera contaminada. De manera que las fuentes se dividen en antropogénicas que son las causadas por las actividades del hombre y naturales las que provienen de plantas, suelos y volcanes. A su vez, las fuentes antropogénicas se dividen en fuentes fijas, móviles y de área, y las fuentes naturales en biogénicas y geogénicas como se muestra en la Figura 1.4.

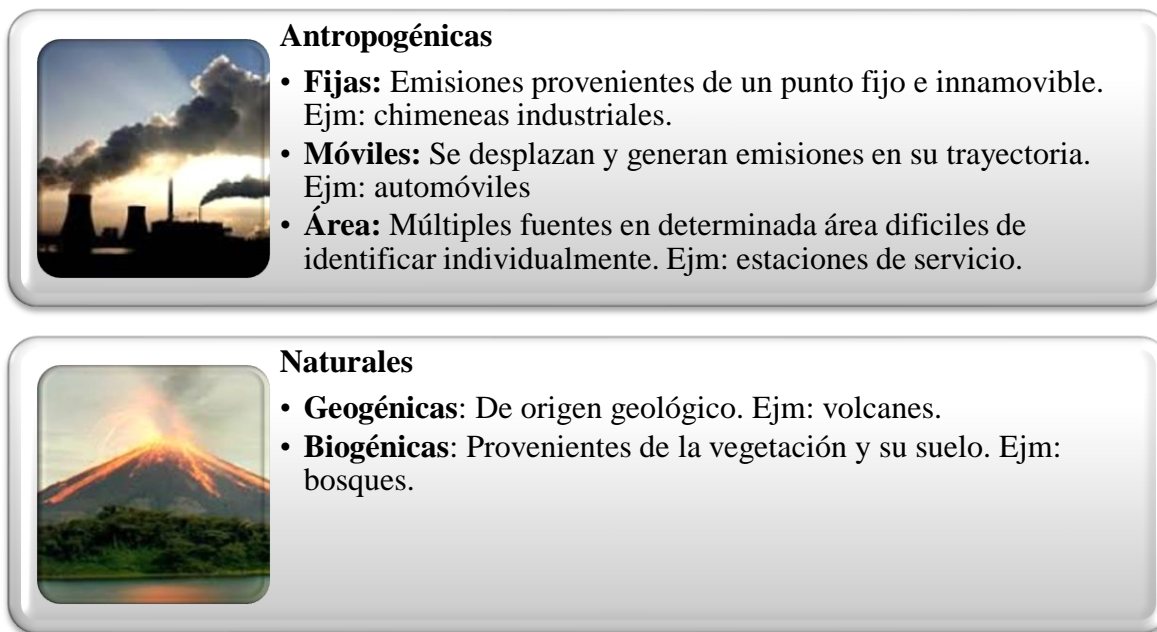


Figura 1.4. Tipos de fuentes de contaminación atmosférica  
Fuente: Autor

Las fuentes antropogénicas y las fuentes geogénicas emiten principalmente material particulado,  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}$ , mientras que las fuentes biogénicas emiten principalmente COV que son altamente reactivos. A continuación se profundizará un poco más en contaminantes que afectan la atmósfera.

### 1.1.1. Contaminantes atmosféricos

Actualmente es muy complicado supervisar todos los contaminantes atmosféricos que existen por lo que se identifica un grupo que se considera de especial atención por ser categorizados nocivos para la salud, llamados contaminantes criterio. Estos son: partículas suspendidas totales -PST, material particulado menor a 2.5 micras - $\text{PM}_{2.5}$ , material particulado menor a 10 micras - $\text{PM}_{10}$ , dióxido de azufre - $\text{SO}_2$ , dióxido de nitrógeno - $\text{NO}_2$ , ozono  $\text{O}_3$  y monóxido de carbono - $\text{CO}$ . La mayoría de países les prestan especial atención a éstos, los monitorean y tratan de regularlos por medio de políticas y lineamientos como se muestra a continuación para el caso de Colombia.



Los contaminantes en forma de gases se ven afectados por las condiciones orográficas de la región que hacen que su volumen y por lo tanto la concentración varíe según la presión y la temperatura local. Por esto, normalmente cuando se publican datos se recomienda convertir las concentraciones a condiciones de presión y temperatura de referencia que son 298.15K y 101325 Pa respectivamente. Así se hace posible la comparación de los datos con otras regiones de una forma coherente.

### ▪ Contaminantes criterio

En Colombia, la resolución 610 del 2010 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS 2010c) instituye la norma de calidad del aire o nivel de inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia. Establece niveles máximos permisibles para los contaminantes criterio en diferentes tiempos de exposición como lo muestra la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Concentraciones máximas permisibles de contaminantes criterio en Colombia

Contaminante	Nivel Máximo Permissible ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Tiempo de Exposición
PST	100	Anual
	300	24 horas
PM <sub>10</sub>	50	Anual
	100	24 horas
PM <sub>2.5</sub>	25	Anual
	50	24 horas
SO <sub>2</sub>	80	Anual
	250	24 horas
	750	3 horas
NO <sub>2</sub>	100	Anual
	150	24 horas
	200	1 hora
O <sub>3</sub>	80	8 horas
	120	1 hora
CO	10000	8 horas
	40000	1 hora

Fuente: (MADS 2010c)

El número de veces en el que se excede la norma se contabiliza y de allí se obtiene la excedencia de los límites máximos permisibles, el cual se realiza calculando promedios aritméticos con las concentraciones medidas por las estaciones de monitoreo, entre los

intervalos de tiempos definidos en la Tabla 1.1 y comparando sus resultados con el nivel máximo legalmente permisible presentado en esta misma. Para obtener el porcentaje de excedencia de los límites máximos permisibles se divide la excedencia de los límites máximos permisibles por el número total de datos analizados y posteriormente se multiplica por 100.

Por otra parte, *The Environmental Protection Agency* -EPA ha establecido Indicadores de Calidad del Aire -ICA (o AQI por sus siglas en inglés -*Air Quality Indexes*) mundiales, que representan una forma más sencilla de comprender las mediciones de contaminantes. Los datos son procesados usando la ecuación 1.5 obteniendo de esta manera valores adimensionales que oscilan entre 0 y 500. Los ICA se clasifican en niveles de acuerdo a ciertos umbrales los que son convertidos en rangos cualitativos identificados a su vez con colores según el grado de daño que puede causar el contaminante (Tabla 1.2). Colombia ha adoptado esta metodología mediante el “Protocolo Para El Monitoreo Y Seguimiento de la Calidad del Aire” y el “Manual De Operación de Sistemas de Vigilancia de Calidad Del Aire”, publicado en 2010 (MADS 2010b).

$$I_{\text{cont}} = \frac{I_{\text{Hi}} - I_{\text{Lo}}}{BP_{\text{Hi}} - BP_{\text{Lo}}} (C_{\text{cont}} - BP_{\text{Lo}}) + I_{\text{Lo}} \quad (1.5)$$

Donde:

$I_{\text{cont}}$  = Índice para el contaminante

$C_{\text{cont}}$  = Concentración medida para el contaminante

$BP_{\text{Hi}}$  = Punto de corte mayor o igual a  $C_{\text{cont}}$  (ver columnas 4-9 de la Tabla 1.2)

$BP_{\text{Lo}}$  = Punto de corte menor o igual a  $C_{\text{cont}}$  (ver columnas 4-9 de la Tabla 1.2)

$I_{\text{Hi}}$  = Valor del ICA correspondiente a  $BP_{\text{Hi}}$  (ver columna 1 de la Tabla 1.2)

$I_{\text{Lo}}$  = Valor del ICA correspondiente a  $BP_{\text{Lo}}$  (ver columna 1 de la Tabla 1.2)

Tabla 1.2. Puntos de corte y escala de valoración de los índices de calidad del aire

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ICA	COLOR	CLASIFICACION	O <sub>3</sub> 8h ppm	PM <sub>10</sub> 24h µg/m <sup>3</sup>	PM <sub>2.5</sub> 24h µg/m <sup>3</sup>	CO 8h ppm	SO <sub>2</sub> 24h ppm	NO <sub>2</sub> 1h ppm
0-50	Verde	Buena	0.000 0.059	0 54	0.0 15.4	0.0 4.4	0.000 0.034	(3)
51-100	Amarillo	Moderada	0.060 0.075	55 154	15.5 40.4	4.5 9.4	0.053 0.144	(3)
101-150	Naranja	Dañina a la salud para grupos sensibles	0.076 0.095	155 254	40.5 65.4	9.5 12.4	0.145 0.224	(3)
151-200	Rojo	Dañina a la salud	0.096 0.115	255 354	65.5 150.4	12.5 15.4	0.225 0.304	(3)
201-300	Púrpura	Muy dañina a la salud	0.116 0.373 (0.155 0.404) (1)	355 424	150.5 250.4	15.5 30.4	0.305 0.604	0.65 1.24
301-500	Marrón	Peligrosa	(2)	425 604	250.5 500.4	30.5 50.4	0.605 1.004	1.25 2.04

Fuente: Tomado de (MADS 2010b)

(1) Los valores entre paréntesis se aplicarán a cálculos de 1 hora sólo si se superponen.

(2) Valores de concentraciones de 8 horas de ozono no aplican para ICA mayores a 301. En esos casos, se harán cálculos con concentraciones de 1 hora de ozono. En Manizales no se tienen concentraciones mayores a 0.404 ppm por eso no se incluyó la columna para realizar cálculos de O<sub>3</sub> a 1 hora.

(3) Para NO<sub>2</sub> se tendrán en cuenta valores de ICA únicamente por encima de 200.

EPA.

Estos estándares son adimensionales y permiten establecer el estado de la calidad del aire de una región específica de acuerdo a un rango establecido para cada contaminante y a un código de colores (OPS/OMS 2012). Los ICA fueron diseñados con el objetivo de estimar el efecto de la calidad del aire sobre la salud humana. Unas medidas preventivas (Tabla 1.3) al igual que la descripción detallada de los efectos sobre la salud en humanos (Tabla 1.4) son reportados por el mismo protocolo (MADS 2010b).

Tabla 1.3. Medidas preventivas según el nivel del ICA

ICA	O <sub>3</sub> 8h Ppm	PM <sub>10</sub> 24h µg/m <sup>3</sup>	PM <sub>2,5</sub> 24h µg/m <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> 24h ppm
BUENA 0 – 50	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Moderada 51-100		Personas extremadamente sensibles con asma y adultos con enfermedad cardiocerebrovascular como hipertensión arterial, enfermedad isquémica del miocardio o pulmonar como asma, enfisema y bronquitis crónica deben reducir la actividad física fuerte o prolongada	Personas extremadamente sensibles con asma y adultos con enfermedad cardiocerebrovascular como hipertensión arterial, enfermedad isquémica del miocardio o pulmonar como asma, enfisema y bronquitis crónica deben reducir la actividad física fuerte o prolongada	
Dañina a la salud para grupos sensibles 101 – 150	Niños activos, adultos y personas con enfermedades respiratorias como asma, deben reducir la actividad física al aire libre	Personas con enfermedades cardiacas o respiratorias, mayores de 60 años y niños deben evitar la actividad física fuerte o prolongada	Personas con enfermedades cardiacas o respiratorias, mayores de 60 años y niños deben evitar la actividad física fuerte o prolongada	Personas con asma deben considerar reducir la actividad al aire libre
Dañina a la salud 151 – 200	Niños y adultos activos y personas con enfermedades respiratorias, deben reducir la actividad física prolongada al aire libre, especialmente los niños.	Personas con enfermedades cardiovascular o respiratorias, mayores de 60 años y niños deben evitar actividad física fuerte o prolongada	Personas con enfermedades cardiovascular o respiratorias, mayores de 60 años y niños deben evitar actividad física fuerte o prolongada	Los niños, los asmáticos y las personas con enfermedades cardiacas y pulmonares deben reducir el esfuerzo al aire libre
Muy dañina a la salud 201 - 300	Niños activos, adultos y personas con enfermedades respiratorias como asma, deben reducir la actividad física al aire libre; especialmente los niños	Personas con enfermedades cardiacas o respiratorias, mayores de 60 años y niños deben evitar cualquier actividad física en exteriores. Las demás personas deben evitar la actividad fuerte o prolongada	Personas con enfermedades cardiacas o respiratorias, mayores de 60 años y niños deben evitar cualquier actividad física en exteriores. Las demás personas deben evitar la actividad fuerte o prolongada	Niños, asmáticos y personas con enfermedades cardiacas y pulmonares deben evitar el esfuerzo al aire libre; todos los demás deben reducir el esfuerzo al aire libre
301-500	Todas las personas deben evitar el esfuerzo al aire libre	Todas las personas deben evitar el esfuerzo al aire libre	Todas las personas deben evitar el esfuerzo al aire libre	Niños, asmáticos y personas con enfermedades cardiacas o pulmonares no deben estar al aire libre; todos los demás deben evitar el esfuerzo al aire libre

Fuente: Modificado de (MADS 2010b)

Tabla 1.4. Efectos sobre la salud de acuerdo al nivel de ICA

ICA	O <sub>3</sub> 8h Ppm	PM <sub>10</sub> 24h µg/m <sup>3</sup>	PM <sub>2,5</sub> 24h µg/m <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> 24h ppm
BUENA 0 – 50	Buena	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Moderada 51-100	Individuos no sensibles pueden experimentar síntomas respiratorios	Posibles síntomas respiratorios en individuos no sensibles. Posible agravamiento de enfermedad del corazón o de pulmón en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores	Posibles síntomas respiratorios en individuos no sensibles. Posible agravamiento de enfermedad del corazón o de pulmón en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores	Ninguno
Dañina a la salud para grupos sensibles 101 – 150	Incremento de la probabilidad de ocurrencia de síntomas y molestias respiratorias en niños activos, adultos y personas con enfermedades respiratorias, como asma	Aumento de riesgo de síntomas respiratorios en individuos sensibles, agravamiento de enfermedad del corazón o de pulmón y mortalidad prematura en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores	Aumento de riesgo de síntomas respiratorios en individuos sensibles, agravamiento de enfermedad del corazón o de pulmón y mortalidad prematura en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores	Incremento de la probabilidad de ocurrencia de síntomas respiratorios, tales como opresión en el pecho y dificultad al respirar en personas con asma
Dañina a la salud 151 – 200	Mayor probabilidad de ocurrencia de síntomas respiratorios y dificultad para respirar en niños activos, adultos y personas con enfermedad respiratoria, como asma; posibles efectos respiratorios de la población en general	Incremento de los síntomas respiratorios y recrudescimiento de las enfermedades pulmonares tales como asma; posibles efectos respiratorios en la población en general	Incremento de los síntomas respiratorios y recrudescimiento de las enfermedades pulmonares tales como asma; posibles efectos respiratorios en la población en general	Incremento de síntomas respiratorios, tales como opresión en el pecho y jadeo en personas con asma; posible recrudescimiento de enfermedades cardíacas y pulmonares
Muy dañina a la salud 201 – 300	Síntomas cada vez más severos y respiración deteriorada probablemente en niños, adultos y personas activas con enfermedad respiratoria, como asma; incremento en la probabilidad de efectos respiratorios en la población en general	Aumento significativo en síntomas respiratorios y aumento de la gravedad de enfermedades pulmonares como asma; incremento de la probabilidad de ocurrencia de efectos respiratorios para la población en general	Aumento significativo en síntomas respiratorios y aumento de la gravedad de enfermedades pulmonares como asma; incremento de la probabilidad de ocurrencia de efectos respiratorios para la población en general	Aumentos significativos en síntomas respiratorios tales como jadeo y respiración corta en personas con asma; recrudescimiento de enfermedades cardíacas y pulmonares
301-500	Efectos respiratorios severos, daños respiratorios en niños activos, adultos y personas con enfermedad respiratoria como asma; incremento de los efectos respiratorios severos probables en la población en general	Riesgo serio de síntomas respiratorios y recrudescimiento de enfermedades pulmonares como asma; probables efectos respiratorios en la población en general	Riesgo serio de síntomas respiratorios y recrudescimiento de enfermedades pulmonares como asma; probables efectos respiratorios en la población en general	Síntomas respiratorios severos como jadeo y disminución de la respiración en personas con asma; incremento de la gravedad de enfermedades cardíacas y pulmonares; posibles efectos respiratorios en la población general

Fuente: Modificado de (MADS 2010b)

Conocer los niveles de inmisión es importante para la población, ya que con esta información se puede tomar medidas preventivas en el hogar. Pero, para la autoridad ambiental es vital conocer las fuentes de contaminación para poder regular y controlar las emisiones de contaminantes, al menos los criterio. Aunque no todos los contaminantes criterio son emitidos, el  $O_3$  es formado en la atmósfera a partir de otras sustancias y es muy importante ya que es el principal componente del smog fotoquímico, una niebla que cubre principalmente las áreas urbanas y disminuye la visibilidad de áreas lejanas. Dicho smog en exceso produce efectos negativos en la salud humana tales como problemas respiratorios, asma, disminuye la capacidad pulmonar, altera el sistema inmunológico haciendo a la población más propensa a enfermedades respiratorias, genera cáncer y en el peor de los casos la muerte (OMS 2016). El  $O_3$  disminuye la capacidad de almacenar y producir nutrientes de las plantas lo cual afecta los cultivos y bosques, también hace la vegetación más propensa a insectos y a factores que le generan estrés (IDEAM 2014b).

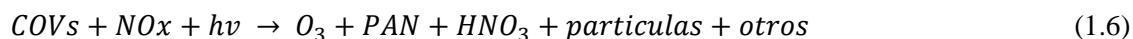
Estudios han demostrado que los COV son uno de los mayores contaminantes que causan la acumulación de  $O_3$  en el mundo (Gadzhev et al. 2011) y que los COV biogénicos isopreno, monoterpenos y sesquiterpenos, son de los compuestos orgánicos con mayores potenciales para la formación de este contaminante (National Research Council 1999; Cárdenas R. 2012). Por esto, a continuación se presentará un poco más sobre estos compuestos.

## 1.2. GENERALIDADES SOBRE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES –COV

Son sustancias de tipo orgánico, es decir, están compuestas por átomos carbono -C e hidrógeno -H, y son volátiles porque tienen una presión de vapor superior a 0.01 kPa a 25 °C (Ministerio de la Presidencia de España 2003). Aunque el metano - $CH_4$  también es un tipo de COV, no contribuye significativamente a la formación de ozono comparado con los otros compuestos orgánicos de cadena más larga (Finlayson-Pitts & Pitts 1999), por eso, los compuestos orgánicos en la troposfera se miden como hidrocarburos diferentes de metano. Los COV se consideran de especial cuidado porque son tóxicos y están compuestos de dobles enlaces que los hacen altamente reactivos.

Actualmente, en la mayoría de áreas caracterizadas por la formación de O<sub>3</sub> intervienen diferentes contaminantes primarios NO<sub>x</sub> y los COV (Finlayson-Pitts & Pitts 1999) ya que el O<sub>3</sub> troposférico se forma y acumula a partir de estos dos compuestos por medio de reacciones fotoquímicas con la luz del sol, como lo muestra el siguiente mecanismo de reacción (Ecuaciones 1.6-1.12). Asimismo, las condiciones meteorológicas juegan un papel importante, la luz que se mide como radiación solar influencia el grado de reactividad, por lo que en las horas diurnas, cerca del medio día suelen presentarse las mayores concentraciones (IDEAM 2014b) y la velocidad del viento, temperatura al igual que la humedad influyen en la dispersión de los contaminantes, si son lo suficientemente bajos, pueden llevar el O<sub>3</sub> a niveles tóxicos (IDEAM 2014b).

Una reacción global (Ecuación 1.6) da una visión de los productos de las reacciones con COV.



Donde PAN es peroxiacetil nitrato (CH<sub>3</sub>C(O)OONO<sub>2</sub>). Los PAN son unos radicales fuertemente irritantes para los ojos. Sin embargo, este documento le dará mayor importancia al ozono troposférico. Este se forma a partir de la fotólisis de NO<sub>2</sub> (<https://oehha.ca.gov>), compuesto que absorbe energía proveniente de la luz solar (hv) y se descompone formando NO y el radical O• (Ecuación 1.7).



Posteriormente (Ecuación 1.8) el radical O• reacciona con el O<sub>2</sub> en el aire en presencia de un catalizador (M) formando finalmente ozono:



En la Ecuación 1.9 ese ozono oxida el monóxido de nitrógeno -NO formado en la Ecuación 1.8 produciendo de nuevo NO<sub>2</sub> y así vuelve a comenzar el ciclo:



Las tres reacciones anteriores juntas equilibran la atmósfera. El ozono se produce, pero al mismo tiempo se está consumiendo, lo cual permite alcanzar un estado estacionario.

Sin embargo, los COV (RH) junto con el radical hidroxilo (HO•) desencadenan una serie de reacciones (Ecuaciones 1.10, 1.11, 1.12) donde se forman radicales orgánicos (ROO•, RO• y R•). El radical peroxialquilo (ROO•) oxidan el NO convirtiéndolo en NO<sub>2</sub> (Guenther, Catchpole, et al. 2012).



Como consecuencia, se agota el NO que consumía el O<sub>3</sub> en la reacción 1.12 dando como resultado la acumulación de O<sub>3</sub> en la troposfera.

Aparte de su rol en la formación de contaminantes secundarios, la exposición humana a los COV dependiendo de sus concentraciones puede causar daños por inhalación como irritación en la nariz y garganta, dolores de cabeza, náuseas, fatiga, daños en el hígado, daños en el sistema nervioso y cáncer, incluso se ha demostrado que causa cáncer sobre los animales (EPA 2016b).

Los COV provienen de diferentes fuentes, tanto naturales o biogénicas (cultivos, árboles, pastos) como antropogénicas (pinturas, desinfectantes, cosméticos) de las cuales varios inventarios a nivel mundial estiman que la mayor producción es causada por las fuentes biogénicas. Un ejemplo de esto se puede observar en la Figura 1.5 que resume los resultados de un inventario de COV realizado en Estados Unidos para el año 2014 (EPA 2016a) dónde se estimó que el 70% de estos compuestos son emitidos por fuentes biogénicas. Esto se puede generalizar a nivel internacional, ya que desde el siglo XIX, Müller (1992) reveló que las plantas tienen las mayores contribuciones a los COV y en general a los hidrocarburos del mundo, con un aporte aproximado al 67% del total global.



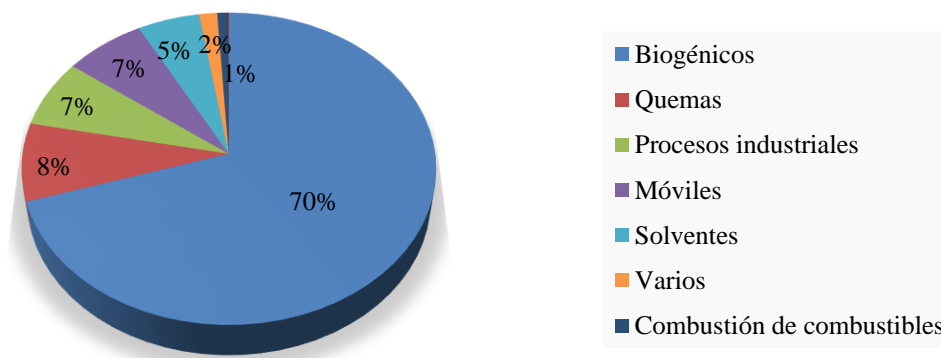


Figura 1.5. Contribución de diferentes fuentes a los COV de Estados Unidos en el año 2014  
Fuente: (EPA 2016a)

### 1.2.1. COVB

Los COVB se forman por diferentes procesos. Uno es cuando los humanos y animales inhalan  $O_2$  y exhalan  $CO_2$ . Las plantas toman el  $CO_2$  y por medio de la fotosíntesis lo convierten en  $O_2$  nuevamente. Gran parte del carbono consumido es asimilado y emitido a la atmósfera en forma de COV biogénicos. No obstante, la cantidad de compuestos emitidos por las plantas varía dependiendo de varios factores como las condiciones atmosféricas locales, los organismos que se encuentren en la planta, los daños físicos que presente la planta y su propia genética, ya que esta determina los procesos de fotosíntesis y respiración (ver Figura 1.6). Por ejemplo, algunas especies emiten terpenos que actúan como repelentes a insectos cuando se sienten amenazadas, lo que también se puede presentar por los cambios de temperatura y de radiación solar.

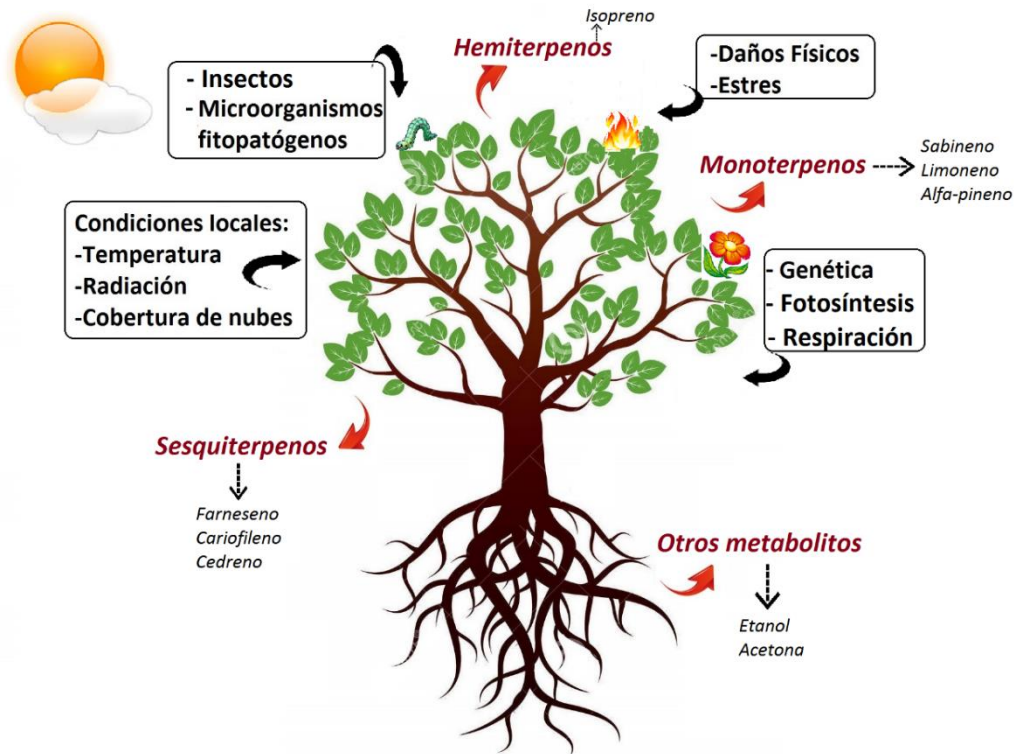


Figura 1.6. Factores que afectan las emisiones biogénicas  
Fuente: Modificado de (Finlayson-Pitts & Pitts 1999)

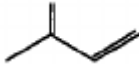
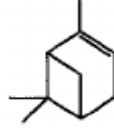
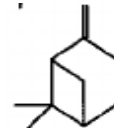
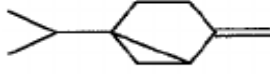
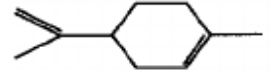
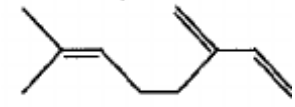
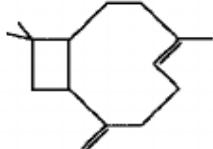
## ▪ Clasificación de los COVB

Los COVB que más se emiten son los terpenos. Normalmente sus estructuras son multicíclicas y se diferencian entre sí por sus enlaces, grupos funcionales y geometría. Los terpenos se forman en múltiplos de 5 carbonos, por lo que se dice que se derivan del isopreno (o 2-metilbuta-1,3-dieno) que es el único hidrocarburo biogénico con 5 átomos de carbono. Dos o más isoprenos se unen por polimerización enzimática formando terpenos como monoterpenos (10 carbonos), sesquiterpenos (15 carbonos), diterpenos (20 carbonos) y sesterterpenoides (25 carbonos). Algunos ejemplos pueden ser vistos en la Tabla 1.5.

Las plantas emiten compuestos diferentes por varias razones como su genética (Baghi et al. 2012), condiciones del suelo (Wu et al. 2015), condiciones climáticas (Nishimura et al. 2015) y estrés (Jardine et al. 2013). El aumento de la tecnología ha hecho posible encontrar cientos de compuestos presentes en las plantas, equipos especializados de espectrometría de

masas como *Proton Transfer Reaction - Mass Spectrometry* -PTR-MS y *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* - GC-MS son los que actualmente generan los mejores resultados. Aun así, con la cantidad de especies vegetales y la variabilidad climática que hay en el mundo, se hace muy difícil y costoso investigar cada tipo. Ya que se ha evidenciado que dos (2) plantas de la misma especie y con condiciones climáticas iguales pueden tener diferentes emisiones cuando alguna ha sido estresada (Behnke et al. 2013).

Tabla 1.5. Principales terpenos biogénicos

Nombre	Tipo	Fórmula	Estructura
Isopreno	Hemiterpeno	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	
α-pineno	Monoterpeno	C <sub>10</sub> H <sub>x</sub>	
β-pineno	Monoterpeno	C <sub>10</sub> H <sub>x</sub>	
Sabineno	Monoterpeno	C <sub>10</sub> H <sub>x</sub>	
Limoneno	Monoterpeno	C <sub>10</sub> H <sub>x</sub>	
Mirceno	Sesquiterpeno	C <sub>15</sub> H <sub>x</sub>	
β-cariofileno	Sesquiterpeno	C <sub>15</sub> H <sub>x</sub>	

Fuente: Modificado de (Guenther et al. 1995)

De todas maneras, los terpenos son parte esencial de las plantas. Están presentes en la clorofila, en algunas hormonas y pigmentos. Son el principal componente de muchos aceites esenciales de plantas aromáticas como el eucalipto, limonero, clavo, naranjo y jengibre. Sus cualidades aromáticas ayudan a las plantas y flores como mecanismo de defensa contra insectos y microorganismos patógenos. También permiten fijar las proteínas en las membranas y son precursores de esteroides y esteroles. El ser humano los usa como aromatizantes, como repelentes de insectos, en sustancias antibacterianas y en la medicina natural para curar múltiples enfermedades

Isopreno es la sustancia más emitida por la vegetación, sus mayores emisiones se presentan en la luz del día ya que son un subproducto de los procesos biológicos de las plantas como la fotosíntesis y la fotorespiración. Por lo tanto, la radiación solar y la temperatura son factores que influyen ampliamente en la formación de isopreno (Seinfeld & Pandis 2006).

Por otra parte, la mayoría de los monoterpenos son producto de los procesos biofísicos de las plantas, de su composición, aceites, material terpenoide, por lo que son independientes de la luz (Seinfeld & Pandis 2006).

Se estima que el 36% de la superficie global está cubierta por árboles, de los cuales la mitad son tropicales y son los responsables de cerca del 80% de las emisiones de terpenos y del 50% de las emisiones de otros COV, mientras que la otra mitad (no tropicales), solo aportan al 10% del total de las emisiones en el mundo (Guenther, Jiang, et al. 2012).

Los árboles colombianos pertenecen a ese 18% de superficie de bosques tropicales que emiten los mayores flujos de COV, por lo que se concluye que los inventarios en zonas tropicales resultan de alta importancia. Aun así, en Colombia se han realizado pocos inventarios de emisiones provenientes de la vegetación (Cárdenas R. 2012; Toro G. et al. 2001) y esto se ve reflejado en falta de datos e información propia de la región. Por esto, si se quiere analizar el comportamiento biosfera-atmósfera local, examinar la formación y dispersión de O<sub>3</sub> y estudiar las emisiones regionales, es importante primero tener un estimado de los COVB que pueda llenar los vacíos de información que se tienen y así permitir posteriores estudios. Respondiendo a lo anterior, la siguiente sección hablará de los métodos para estimar los COVB.

### 1.3. GENERALIDADES SOBRE MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LOS COVB

Existen dos formas principales para estimar las emisiones provenientes de la vegetación, una es por medio experimental donde se realizan mediciones a las plantas por diferentes métodos (Matsunaga et al. 2012; Baghi et al. 2012; Fares et al. 2011; Owen et al. 1997) y la otra es a través de modelos y algoritmos que han sido basados en mediciones experimentales previas y análisis rigurosos (Simon et al. 2006; Chang et al. 2012; Koca et al. 2013).

El método experimental suele ser costoso, complejo y exige equipos de alta tecnología si se quiere realizar un buen análisis y obtener resultados confiables. Normalmente este método se usa para regiones muy pequeñas o para especies específicas con el fin de obtener factores de emisión que puedan ser aplicados en otros inventarios. A través de los años las investigaciones experimentales han tenido más interés, lo que ha llevado a que hoy en día se encuentren innumerables publicaciones que estudian las emisiones provenientes de plantas (Baghi et al., 2012, Wang et al., 2012, Matsunaga et al., 2012, Welter et al., 2012). Aunque para Colombia y América Latina, los avances experimentales han sido casi nulos esto es un factor muy importante a tener en cuenta ya que las emisiones son muy dependientes de las condiciones locales.

Por otra parte, están los inventarios de emisiones que brindan un estimado de la calidad del aire en una zona y tiempo determinados, siendo así una herramienta importante para la gestión de la misma. Generan conocimiento sobre los tipos de compuestos y las cantidades que emite cada tipo de fuente (SEMARNAT 2013). Para realizar un inventario de emisiones biogénicas existen varios métodos de estimación, pero el más común consiste en un producto entre un factor de emisión y un factor de corrección.

El factor de emisión es una medida de la cantidad promedio de un compuesto emitido a la atmósfera y es dependiente del tipo de vegetación o ecosistema que se esté analizando. Mientras el factor de corrección tiene en cuenta el efecto de variables externas que determinan un cierto grado de emisión de ese compuesto, es decir, todas aquellas variables que influyen el nivel de emisión, en este caso la temperatura, la radiación solar y el Leaf

Area Index –LAI (para más información sobre LAI ver la siguiente sección) (INEEC 2005), (Wang et al. 2012).

Normalmente estos cálculos están incluidos en modelos con diferentes niveles de complejidad según los objetivos del inventario, lo que permite utilizar los desarrollos computacionales para realizar procesamiento de gran cantidad de datos. De esta manera, desde 1990 se han desarrollado inventarios de fuentes biogénicas usando diferentes modelos de estimación (Guenther et al. 1993). Países de Europa, Norteamérica y Asia han demostrado gran interés y por tanto los mayores avances en este tipo de inventarios. China debido a su crisis atmosférica, últimamente ha evolucionado más en el tema y por sus necesidades se ha enfocado en caracterizar especialmente los COV (Bai et al. 2015b; Li et al. 2013; Li & Xie 2014; Chang et al. 2012; Koca et al. 2013). En Latinoamérica se han realizado estudios de emisiones biogénicas ocasionalmente en países como México, Chile, Brasil y Colombia (Ruiz Suarez et al. 1998; SEMARNAT et al. 2005; Cárdenas R. 2012; Toro G. et al. 2001)

En Colombia, se han realizado inventarios de fuentes biogénicas para tres regiones del país. Una es el Valle de Aburrá en el año 2001, zona del departamento de Antioquia que reúne 10 de sus municipios, entre ellos su capital Medellín. El Valle de Aburrá es principalmente urbano y su extensión es aproximadamente 1160 km<sup>2</sup>. El inventario se realizó utilizando el modelo Biogenic Emissions Inventory System – BEIS, estimando 6342 Toneladas anuales de compuestos biogénicos, los que representan el 32% de los COV totales en la zona de estudio (Toro G. et al. 2001).

En el 2007 se publicó el primer inventario de fuentes biogénicas realizado en Bogotá, capital de Colombia el que se realizó utilizando factores de emisión de la European Monitoring and Evaluation Programme -EMMEP. Dicho estudio mostró 2390 Ton/año de COV donde las emisiones biogénicas son encontradas principalmente en el perímetro rural y pueden ser responsables hasta de un 35% de la formación de ozono troposférico (Zárate 2007). En el 2012 se publicó otro estudio para Cundinamarca donde la extensión modelada fue de 23685 km<sup>2</sup> utilizando el modelo Global Biosphere Emissions and Interactions System –GLOBEIS e información de cobertura más detallada. Sus resultados de 104390 Ton/año enmarcan una

gran diferencia con respecto al estudio de Zárate, por lo que analizan a profundidad sus posibles causas (Cárdenas R. 2012).

Por último, en el Parque Natural de los Nevados Tayrona -PNNT en Santa Marta con un área aproximada a los 130 km<sup>2</sup>, se realizó un estudio para estimar las emisiones biogénicas de monoterpenos, y se realizó tomando como base un día del año 2007. Sus resultados mostraron que el 59.6% de las emisiones suceden entre las 6:00 y 18:00 horas donde se presentan las temperaturas más altas y el restante en la noche (Guenther, Catchpole, et al. 2012).

A pesar del creciente interés por la calidad del aire en el país, solo se han desarrollado cuatro estudios de fuentes biogénicas en tres zonas de los 32 departamentos de Colombia, que en realidad no son comparables entre sí porque se realizaron en diferentes épocas, áreas y modelos.

Mundialmente durante décadas se han estado realizando inventarios de fuentes biogénicas incluyendo no sólo los COVB principales, sino que se han encontrado nuevos compuestos que emiten las plantas. No obstante, Guenther et al. (1995) han definido cuatro categorías principales que son isopreno (C<sub>5</sub>), monoterpenos (C<sub>10</sub>), otros COV reactivos y otros COV. De los cuales isopreno comprende cerca de la mitad de los COV biogénicos totales (Guenther, Jiang, et al. 2012). Guenther también ha determinado sus tiempos de vida bajo condiciones troposféricas normales como aparece en la Tabla 1.6. Los dobles enlaces de estos compuestos hacen que estos sean bastante reactivos dando como resultado tiempos de vida cortos (Guenther et al. 1995).

Tabla 1.6. Tiempos de vida de COVB

Nombre	Tiempo de vida	Formula
Isopreno	1-2 horas	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
Monoterpenos	0.5-3 horas	C <sub>10</sub> H <sub>x</sub>
OCOV reactivos	<1 día	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> O <sub>z</sub>
OCOV	> 1 día	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> O <sub>z</sub>

Fuente: (Guenther et al. 1995)

Teniendo en cuenta que las emisiones biogénicas dependen de la cobertura de la tierra y de la meteorología local (Guenther, Jiang, et al. 2012), algunos conceptos para realizar un inventario de fuentes biogénicas que no son tan comunes se aclaran a continuación:

### LAI

El Índice de Área Foliar (o *Leaf Area Index* por sus siglas en inglés) es un valor adimensional ( $\text{m}^2/\text{m}^2$ ) que representa la cantidad de materia foliar en un ecosistema y es importante para evaluar el crecimiento y el vigor de la vegetación del planeta. Geométricamente hablando es el área unilateral de tejido fotosintético existente en una superficie de dimensiones conocidas. Existen varios métodos para su estimación como fotografía hemisférica, transmisión de luz a través de copas o a partir de mediciones usando dispositivos ópticos aunque este último requiere información adicional sobre la estructura y arquitectura de la cubierta y distribuciones de tamaño de hueco en las resoluciones espaciales apropiadas (FAO 2017).

### LUZ

En términos biogénicos la luz se mide diferente, las plantas utilizan la radiación en forma de PAR *Photosynthetic Active Radiation* por sus siglas en inglés. Que básicamente es la cantidad de luz o energía radiada en el rango espectral que las plantas utilizan principalmente para hacer fotosíntesis y normalmente está entre 400-700 nm (Cope et al. 2014). Se dice que es aproximadamente entre el 45–50 % de la radiación global total (unidades de energía  $\text{W m}^{-2}$ ) (EMEP/EEA 2016). Pero para las plantas es más relevante representar la luz en densidad de fotones ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), también conocido como Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD) que es la misma PAR, pero convertido en otras unidades.

## FACTORES DE EMISIÓN PARA COVB



Los factores de emisión -FE representan la habilidad genética de una planta para emitir sustancias, es decir corresponden a la velocidad con la que un compuesto se emite en una determinada área o biomasa foliar y se expresa como cantidad de compuesto emitido con base en el área de la hoja ( $\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ) o más comúnmente como cantidad de compuesto emitido con base en masa seca ( $\mu\text{g}/\text{g}$  (peso seco)  $\cdot \text{h}$ ) (Sabillón 2002).

Los FE dependen del tipo de especie, de las condiciones meteorológicas, del estrés que sufren las plantas, del tipo de suelos y del estado de la planta. Son obtenidos a partir de mediciones experimentales como lo ilustra la Figura 1.7 para especies de plantas individuales poniendo áreas de una especie determinada dentro de un recinto cerrado y midiendo, la temperatura, la luz y la acumulación de compuestos emitidos en una trampa de COV que está compuesta por un adsorbente afín con el tipo de sustancia que quiere retener (Pitts 1986). Estas mediciones son adecuadas a condiciones estándar para posteriores usos. Las condiciones de medición y los análisis son un factor indispensable para determinar la calidad de los factores de emisión.

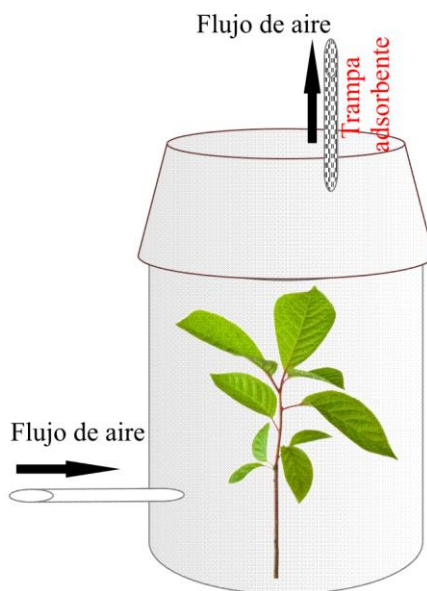


Figura 1.7. Medición experimental de COVB.  
Fuente: Autor

Los FE se pueden encontrar a nivel de hoja y a nivel de dosel o canopy. Utilizando la metodología de la Figura 1.7 se obtienen FE nivel hoja, resultados que pueden ser

extrapolados usando un modelo para llegar a nivel canopy donde se utiliza un factor de ajuste producto de una combinación de variables que influyen en las emisiones debido al LAI. Éstas variables son efectos de la edad, luz, temperatura, humedad y vientos dentro del ambiente del canopy. Como es de esperarse, a condiciones estándar el factor de ajuste es igual a uno (1) (Pouliot & Pierce 2010).

Realizar inventarios con FE aumenta la incertidumbre, la que se incrementa con las diferencias entre las condiciones en las que fueron hechas las mediciones de los factores de emisión usados y las condiciones del área de estudio de interés. En este caso, cuando se habla de condiciones se refiere a la edad de la planta, la humedad del suelo, presencia de organismos patógenos e insectos, exposición normal a la luz, cambios climáticos recientes, condiciones meteorológicas de la medición y otros factores que puedan variar las emisiones de la vegetación. Entre más concordantes con las condiciones locales sean los factores encontrados, menor será la incertidumbre y se tendrá una mejor estimación del inventario. FE han sido reportados principalmente en libros y artículos (Guenther et al. 2006; Fares et al. 2011; Genard-Zielinski et al. 2014), una recopilación pueden ser encontrada en la base de datos de The Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC en la categoría 5: Land-Use Change & Forestry (IPCC 2013).

Adicionalmente, se han desarrollado y mejorado a través del tiempo algoritmos y modelos que pueden disminuir la incertidumbre de los resultados, ya que pueden llegar a simular la orografía y las condiciones de la región de estudio de manera muy precisa, algunos ejemplos se pueden ver en el siguiente ítem.

### **1.3.1. Modelos y algoritmos de estimación de emisiones biogénicas**

Desde el siglo XIX se comenzaron a estudiar las emisiones biogénicas y sus correlaciones con variables climáticas, los modelos y algoritmos que se han desarrollado desde entonces constituyen una gran ventaja en tiempo, principalmente cuando se utilizan altas resoluciones tanto temporales como espaciales. Además, cada nuevo modelo y versión incluye modificaciones y cálculos adicionales que hacen más precisos los resultados.

Algo más detallado se puede ver en la Figura 1.8 donde se muestra que inicialmente se publicaron algoritmos que trataban de explicar la relación de la temperatura y la radiación solar con las emisiones de las plantas. Estos poco a poco evolucionaron incluyendo nuevos factores descubiertos en investigaciones y software que permiten resoluciones y cálculos más avanzados convirtiéndose así en modelos. Aunque utilizar estos modelos muchas veces requiere de alta capacidad computacional, tiempo de instalación y aprendizaje. Es importante tener en cuenta que más allá del tipo de modelo que se use, la calidad de un inventario depende en gran manera de los factores de emisión utilizados.

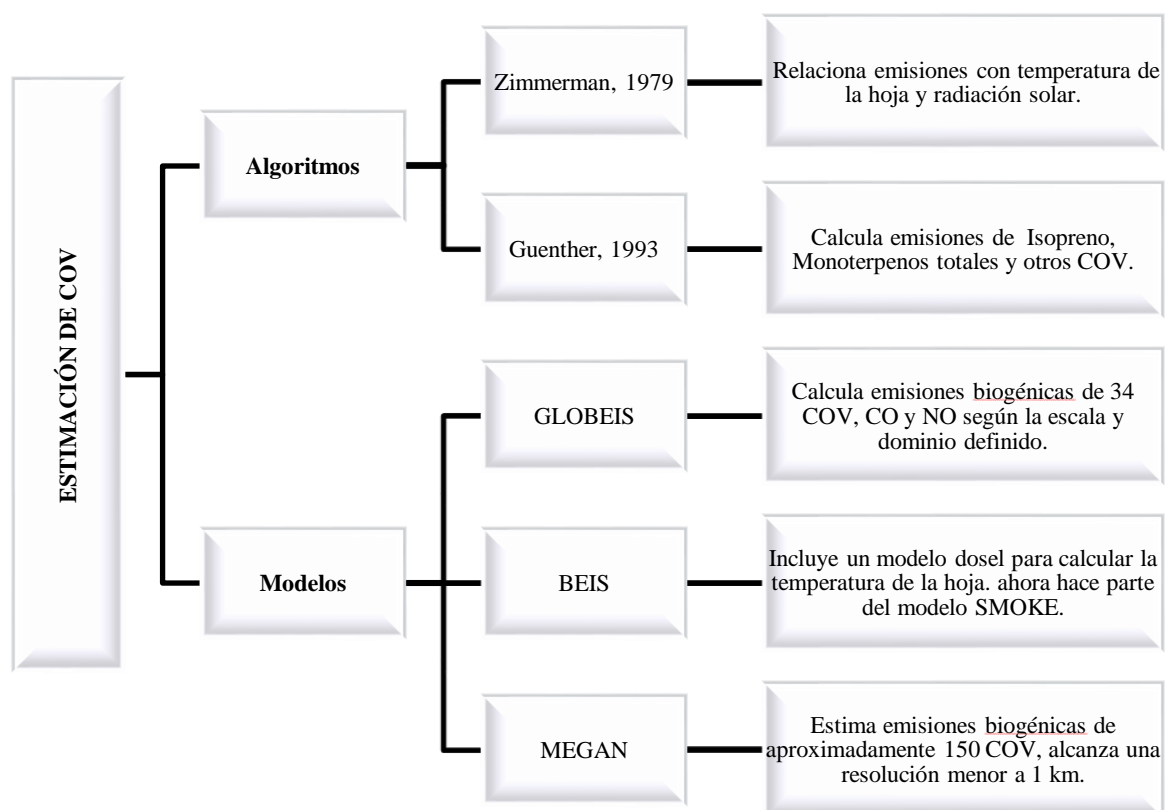


Figura 1.8. Algoritmos y modelos para estimar COV biogénicos  
Fuente: Autor

A pesar de que existen diferentes modelos de emisiones y que se han realizado varios inventarios de emisiones biogénicas en base a estos, utilizarlos no constituye una necesidad ya que básicamente lo que hace un modelo de emisiones es recibir información y procesarla. Lo realmente importante es conocer el algoritmo de cálculo o modelo matemático a aplicar.

Existen algoritmos no tan complejos que han sido utilizados por años y que han generado muy buenos resultados como lo es el G93 (Guenther et al. 1993), el primer algoritmo de Guenther que ha servido como base para diseñar los posteriores modelos publicados. Éste tiene en cuenta la temperatura, la radiación solar y la densidad del dosel. Actualmente, este algoritmo aún es muy usado en el campo de fuentes biogénicas y no requiere de tanta información que muchas veces no es fácil de obtener.

### ▪ Algoritmo G93

El algoritmo propone las siguientes ecuaciones 1.13-1.17 para calcular los flujos de emisión de COVB:

$$F = FE \gamma_i \quad (\text{Ec. 1.13})$$

#### Isopreno

$$\gamma_{iso} = C_L * C_T \quad (\text{Ec. 1.14})$$

$$C_L = \frac{\alpha c_{L1} Q}{\sqrt{1 + \alpha^2 Q^2}} \quad (\text{Ec. 1.15})$$

$$C_T = \frac{\exp \frac{C_{T1}(T - T_S)}{R \cdot T_S \cdot T}}{1 + \exp \frac{C_{T2}(T - T_M)}{R \cdot T_S \cdot T}} \quad (\text{Ec. 1.16})$$

#### Monoterpenos y Otros COV

$$\gamma_{mono} = \exp(\beta * (T - T_S)) \quad (\text{Ec. 1.17})$$

Donde

**FE**= factor de emisión dependiente de la especie o del ecosistema ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )

**$\gamma_i$** = factor de ajuste adimensional para cada tipo de compuesto (isopreno, monoterpenos y otros COVB).

**Q**= Photosynthetically Active Radiation –PAR convertida a  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  o Photosynthetic Photon Flux Density -PPFD

**T**=Temperatura de la hoja (K)

La ecuación 1.13 muestra la forma de cálculo del factor de corrección para isopreno  $\gamma_{iso}$  donde  $C_L$  (Ecuación 1.14) y  $C_T$  (Ecuación 1.15), son factores de corrección que dependen de las variables luz y temperatura respectivamente. La Ecuación 1.16 permite determinar  $\gamma_{mono}$

el factor de corrección para monoterpenos y otros COV que solo dependen de la temperatura.  $T$  (K) representa la temperatura local en el intervalo de medición a usar y  $Q$  representa la PAR que es la porción de luz que las plantas usan para su fotosíntesis. Los demás parámetros ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $C_{L1}$ ,  $C_{T1}$ ,  $C_{T2}$ ,  $T_M$ ,  $T_s$  y  $R$ ) son coeficientes empíricos tomados de la bibliografía del algoritmo (Guenther et al. 1995), cuyos valores y unidades se encuentran en la Tabla 1.7.

Tabla 1.7. Constantes para el cálculo de los factores de ajuste tomados de (Guenther et al. 1995)

Constantes	Valor	Unidades	Definición
$\alpha$	0.0027	$m^2s \mu mol^{-1}$	
$C_{L1}$	1.066	N/A	Coeficientes empíricos los cuales fueron estimados a partir de los mejores ajustes no lineales usando las tasas de emisión de varias especies
$C_{T1}$	95000	$J mol^{-1}$	
$C_{T2}$	230000	$J mol^{-1}$	
$T_M$	314	K	
$T_s$	303	K	Temperatura foliar a condiciones estándar.
$\beta$	0.09	$K^{-1}$	Coeficiente empírico recomendado
$R$	8.314	$J K^{-1} mol^{-1}$	Constante de los gases

Actualmente existen varios modelos de emisiones para estimar emisiones biogénicas y están disponibles para su uso, aunque escoger un modelo depende de la capacidad tecnológica y de la información con la que se cuente. Algunos ejemplos son: Global Biosphere Emissions and Interactions System –GLOBEIS, Sparse Matrix Operator Kernel Emissions con Biogenic Emission Inventory System –SMOKE con BEIS y Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature –MEGAN.

Los modelos actuales han tratado de considerar la mayor cantidad de procesos que impulsan las variaciones en las emisiones, actualmente se pueden encontrar modelos muy avanzados como MEGAN2.1 (Guenther, Jiang, et al. 2012) que tienen en cuenta la dependencia de la luz basada en transporte de electrones, la respuesta a la temperatura basada en actividad enzimática, la edad de las hojas, la composición del suelo, el LAI y las respuestas al  $CO_2$ . Asimismo, se tienen en cuenta diferentes niveles de dosel conociendo que unas hojas apantallan a otras, lo que significa pérdida de luz y temperatura.

## ▪ MEGAN

MEGAN se ha programado en diferentes software, pero la versión disponible para ser descargada requiere acceso y conocimiento del sistema operativo Unix y del lenguaje de programación FORTRAN. También para editar grillas se necesita de un SIG y se recomienda el software licenciado ArcGis que utiliza el lenguaje Phyton. MEGAN calcula inicialmente diecinueve (19) clases de componentes y cada uno tiene sus propios factores de emisión y factores de corrección. Los componentes isopreno, metanol, acetona y acetaldehído han sido evaluados por estudios de distribución de concentraciones globales que proveen cierta confiabilidad donde totales anuales globales con MEGAN están dentro de un factor de dos (2) basado en estimados de emisión top down (Guenther, Jiang, et al. 2012).  $\alpha$ -pineno,  $\beta$ -pineno, mirceno, sabineno, limoneno, 3-careno, t- $\beta$ -ocimeno, camfeno, eteno, propeno, buteno, metil salicilato, y 232- metil butenol han sido menos estudiados, pero se ha logrado identificar un factor de incertidumbre global de tres (3) y por último se estima que mayores incertidumbres pueden ser dadas con las emisiones globales de todos los otros COVB. Hay que tener en cuenta que estas incertidumbres son para emisiones globales anuales y que no han sido investigadas aquellas para un tiempo, lugar, ecosistema y estaciones específicas las cuales Guenther et al., 2012b cree que pueden ser mucho más grandes. Un ejemplo de algunos de los principales 19 COVB se puede ver en la Tabla 1.8 donde cada compuesto cuenta con un factor de dependencia de la luz y factores de estado de madurez de las hojas.

Tabla 1.8. Parámetros de corrección que usa MEGAN2.1 para cada compuesto

Descripción	Isopreno	Mirceno	Sabineno	limoneno	careno <3->	ocimeno <trans beta>	pineno <beta->
<b>Factores de actividad</b>							
Beta	0.13	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Ct1	95	80	80	80	80	80	80
Ceo	2	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83
Factor de dependencia de la luz, LDF	0.999	0.6	0.6	0.2	0.2	0.8	0.2
Anew (Hojas nuevas)	0.05	2	2	2	2	2	2
Agro (Hojas en crecimiento)	0.6	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Amat (Hojas maduras)	1	1	1	1	1	1	1
Asen (Hojas senescentes)	0.9	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05

Fuente:(Guenther, Jiang, et al. 2012)

A partir de los componentes iniciales se puede realizar una especiación, con una capacidad de calcular hasta 150 COV adicionales. Asimismo, el modelo requiere información como humedad relativa, velocidad del viento y LAI para incluirla en otros modelos internos como se muestra en la Figura 1.9. Con valores de temperatura, humedad y velocidad del viento, MEGAN realiza un balance energético a la hoja obteniendo las condiciones climáticas a nivel de la hoja. Si no se tiene información de humedad y velocidad del viento, se ajusta la temperatura de la hoja igual a la temperatura del aire. Para la luz se puede incluir la radiación solar o PPFD -Photosynthetic Photon Flux Density, que es una medida de luz específicamente para las plantas ya que suele ser diferente que la medida global, puesto que las plantas reciben luz o energía en términos de radiación fotosintéticamente activa. En el caso de MEGAN, éste recibe radiación solar e internamente es convertida a PPFD (Guenther et al. 2006; Pouliot & Pierce 2010).

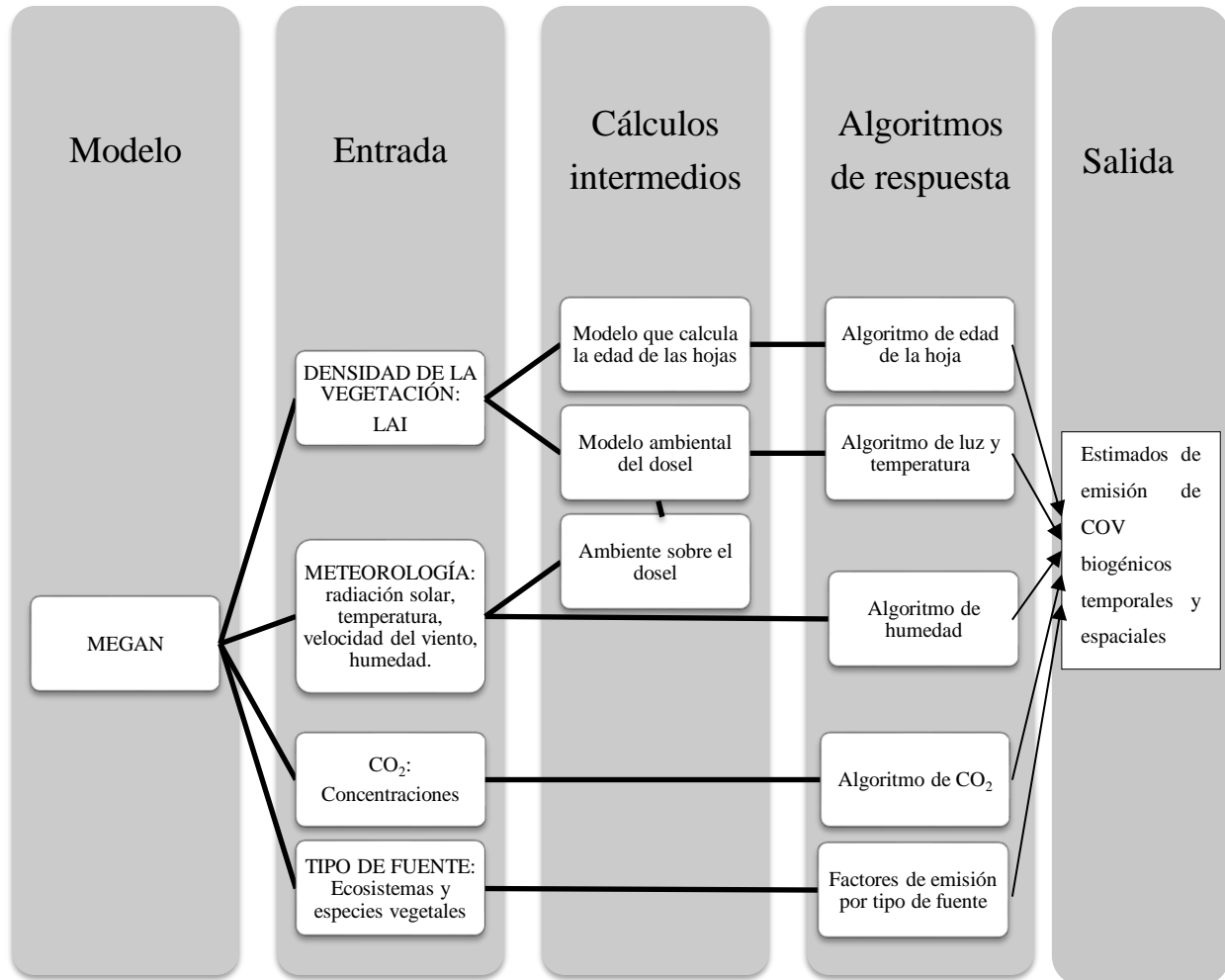


Figura 1.9. Esquema de funcionamiento de MEGAN  
Fuente: (Guenther, Jiang, et al. 2012)

El modelo MEGAN es el modelo biogénico actualmente más completo y por esto mismo requiere también de mayores capacidades tecnológicas a diferencia del algoritmo G93 que es muy sencillo y por esto mismo es de fácil aplicación.



## **CAPITULO 2. CALIDAD DEL AIRE Y OZONO EN MANIZALES Y ALREDEDORES**

### 2.1. INTRODUCCIÓN

Para realizar estudios de contaminación atmosférica es importante tener conocimientos de la región de estudio, entender la composición de la atmósfera y la dinámica de los contaminantes. El deterioro de la calidad del aire representa para Colombia uno de los mayores retos ambientales que ha afrontado el país en los últimos años (IDEAM 2012). La contaminación atmosférica ha sido la responsable de un preocupante aumento en las enfermedades respiratorias de los colombianos (IDEAM 2012). La creciente presencia de sustancias contaminantes en la atmósfera producto de diferentes procesos naturales y antropogénicos están asociados con efectos negativos en el entorno y principalmente en la salud humana. Los contaminantes denominados criterio, entre los cuales están el monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), y material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), son regulados con el objetivo de establecer niveles permisibles que protejan el medio ambiente y el bienestar de la población (INEEC & SEMARNAT 2013). Según el estudio del Departamento Nacional de Planeación “Los costos en la salud asociados a la degradación ambiental en Colombia ascienden a \$20,7 billones”, en el 2015 la contaminación del aire urbano causó 10527 muertes y la contaminación del aire interior 2286 (DNP 2017).

Las medidas correctivas que se han tomado ante esta situación no han sido suficientemente efectivas. Por esto, es importante realizar mediciones específicas de aquellos contaminantes que afectan en mayor proporción a la población y de informar oportunamente sobre el estado de la calidad del aire, para facilitar a las autoridades ambientales y a los mismos habitantes

tomar medidas encaminadas al sostenimiento ambiental y a la protección de la salud pública (Jaramillo et al. 2009).

Estas mediciones se realizan mediante los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) constituidos por una red de estaciones de monitoreo que generan cientos de datos diarios correspondientes a las concentraciones medidas de contaminantes (UN y CORPOCALDAS, 2014). Como complemento a los SVCA se estiman los inventarios de emisiones por fuentes antropogénicas y naturales, los cuales también generan un gran volumen de información. El almacenamiento y procesamiento de este conjunto de datos de forma manual o por métodos convencionales, se convierte en un acto extenuante y que puede generar cierto grado de incertidumbre (Li & Shue 2004).

Teniendo en cuenta lo anterior, se buscan alternativas para el procesamiento de los datos. Las bodegas de datos están orientadas al manejo de grandes volúmenes de datos, provenientes de diversas fuentes de información, y que cubren largos periodos de tiempo (UN y Corpocaldas, 2015). Además, brinda mejores formas de administrar la información, disminuyendo la redundancia, es decir, réplicas innecesarias de la información, y agiliza la localización de datos. Las bases de datos están compuestas o permiten la creación de tablas, vectores o contenedores de datos para almacenar información. La estructura de las tablas se define de acuerdo al propósito de los datos a almacenar, y éstas se pueden relacionar entre sí según lo determine el diseñador o administrador de la base de datos.

En este capítulo se aborda el estudio del estado de la calidad del aire en Caldas y los factores que tienen mayor influencia en ésta, para así desarrollar una metodología lógica y afrontar los resultados del inventario de COVB con mayor criterio. Por esto, se implementaron indicadores de calidad del aire (ver ítem 1.1.1) para el dominio de Manizales ya que es la única zona de Caldas que posee esta información. Se trabajó en la visualización de estos indicadores por medio de una bodega de datos que permite a la población visualizar y obtener esta información gratuitamente. Dos tipos de indicadores fueron calculados: Índices de Calidad del Aire (ICA) y el porcentaje de excedencia de los límites máximos permisibles definidos en la resolución 610 (MADS 2010c). Se analizaron e interpretaron estos indicadores para los contaminantes dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), ozono ( $\text{O}_3$ ) y material particulado ( $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ ), utilizando el software R y la biblioteca Openair. Después fueron

migrados a la bodega de datos que puede ser visualizada desde la plataforma virtual llamada Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas (CDIAC) <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/>, la cual cumple con la función de almacenar, procesar y poner a disposición del público la información obtenida desde las estaciones de monitoreo del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de Manizales. Con éstos se obtuvieron gráficas que dan información sobre los fenómenos y las fuentes que influyen en los contaminantes analizados. Por otra parte, los resultados muestran el nivel de toxicidad de los contaminantes y su influencia sobre la salud humana.

Como producto de éste capítulo fue publicado un artículo en la revista ITECKNE volumen 13 “Generación y representación de Indicadores de calidad de aire: caso de estudio aplicado a Manizales” (Li-Ramírez et al. 2016) donde se da a conocer el trabajo realizado con la bodega de datos y se presentan los resultados y análisis relacionados con la implementación de indicadores de calidad del aire –ICA y excedencia de los límites máximos permisibles en Manizales para los contaminantes SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y Material Particulado. Es de aclarar que el artículo está plasmado en las secciones del presente capítulo, por lo que gran parte del texto, tablas y figuras coinciden (para ver el artículo en su versión de publicación, ir al Anexo A). También se está siguiendo el proceso para licenciar el modelo BIGA como software.

Posteriormente se hizo un análisis más profundo al contaminante ozono ya que se ha demostrado que los COV influyen significativamente su formación (Guenther et al. 2000; Nishimura et al. 2015; Calfapietra et al. 2013; Purves et al. 2004). Se realizó una comparación entre los datos publicados en otras ciudades de Colombia y los datos de monitoreo activo de Manizales. También se analizaron las concentraciones de ozono obtenidas a partir de campañas de monitoreo pasivo en Caldas donde se conocieron las concentraciones en diferentes puntos dentro y fuera de la ciudad, con esto se tuvo una mejor idea de la procedencia y el comportamiento de este contaminante. Asimismo, con los resultados de este capítulo se logró comprender mejor la dinámica de los contaminantes en Caldas y complementar los resultados del inventario de fuentes biogénicas.

## 2.2. METODOLOGÍA

### ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE DE MANIZALES

#### **Área de estudio**

Manizales es la capital del departamento de Caldas ubicada en el centro occidente de Colombia, sobre la Cordillera Central. Se caracteriza por la presencia de microclimas y su variabilidad climática en función de la altitud. Según proyecciones del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), para el año 2016 Manizales cuenta con una población de 397.488 habitantes (DANE 2005).

Estudios de “*Manizales cómo vamos*” revelan que la principal problemática ambiental de la ciudad es la densidad vehicular (Franco 2014). Adicionalmente está ubicada a 28 km del Volcán activo Nevado del Ruiz, que genera emisiones de gases y partículas. La calidad del aire de Manizales actualmente se monitorea en cinco (5) puntos de la ciudad, tal como se presenta en la Figura 2.1.

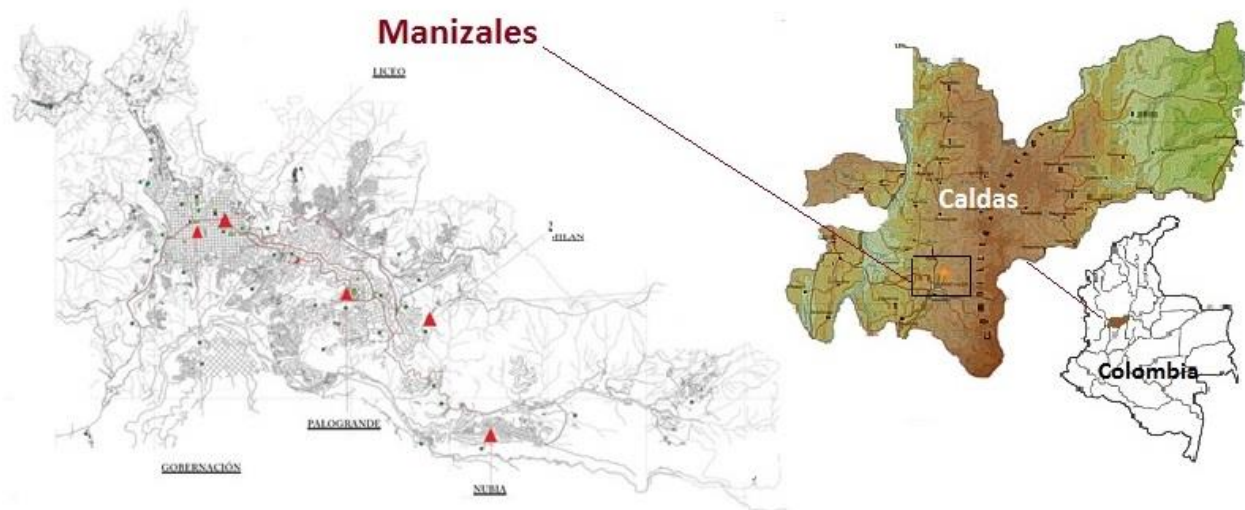


Figura 2.1. Mapa de Manizales con ubicación geográfica de estaciones de calidad del aire

La Tabla 2.1 muestra los contaminantes que son monitoreados en cada una de las 5 estaciones, donde todas tienen monitoreo de material particulado menor a 10 micras -PM<sub>10</sub>.

*Estimación de un Inventario de Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles Generados por Fuentes Biogénicas para el Departamento de Caldas*

Adicionalmente hay equipos automáticos para el monitoreo de ozono y dióxido de azufre localizados en la terraza de la gobernación de Caldas junto con un equipo que monitorea  $PM_{2.5}$ . La Tabla 2.1 presenta los contaminantes definidos con los que se realizaron los análisis que son  $O_3$ ,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  junto con la localización del equipo y la escala temporal para la que se realizaron los cálculos de los indicadores.

## Monitoreo

Tabla 2.1. Contaminantes medidos e información relevante de sus variables.

Contaminante medido	Localización	Tiempo de medición
Ozono ( $O_3$ )	Estación Gobernación	01/07/2014-01/10/2015
Dióxido de azufre ( $SO_2$ )	Estación Gobernación	16/07/2014-01/10/2015
Material particulado menor a 10 micras ( $PM_{10}$ )	Estación Gobernación	22/04/2009-30/12/2014
	Estación Palogrande	01/09/2009-14/01/2015
	Estación Nubia	24/10/2009-17/01/2015
	Estación Liceo	06/01/2010-12/12/2014
	Estación Milán	31/10/2012-30/12/2014
Material particulado menor a 2.5 micras ( $PM_{2.5}$ )	Estación Gobernación	03/06/2009-30/12/2014

Los equipos de medición de material particulado son muestreadores de alto volumen o Hi-Vol. como el que se muestra en la Figura 2.2, los cuales succionan cerca de  $1.13 \text{ m}^3$  de aire por minuto controladamente haciéndolo pasar por un filtro de  $8 \times 10$  pulgadas de fibra de vidrio principalmente, aunque en ocasiones se utilizan filtros de cuarzo microcristalino. El equipo se programa por medio de un timer mecánico para monitoreo por 24 horas continuas cada tres días. La concentración se obtiene con el peso de la muestra recolectada. Ésta metodología se realiza siguiendo lo establecido por los protocolos nacionales (MADS 2010b).

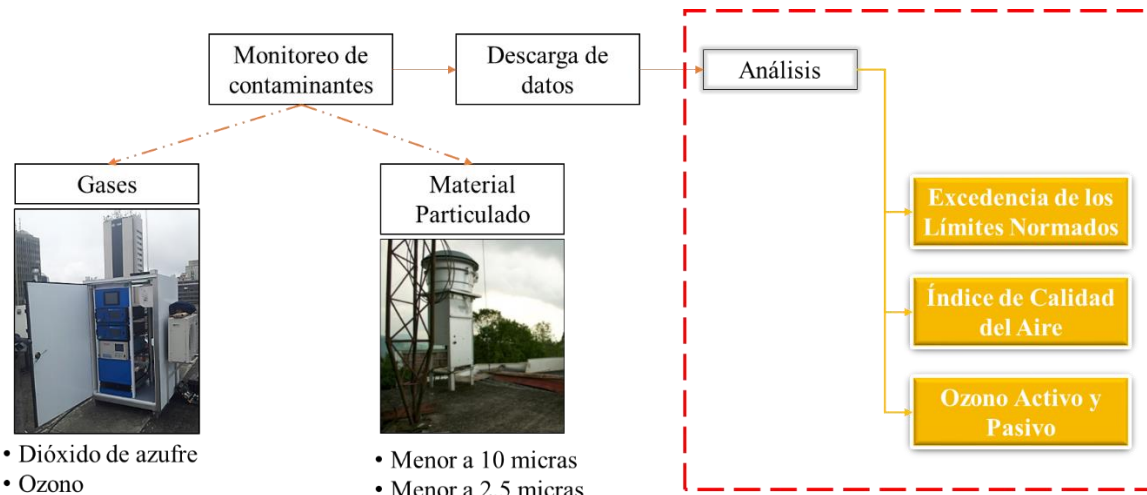


Figura 2.2. Procedimiento para analizar datos de calidad del aire  
Fuente: Autor

Los equipos de  $\text{SO}_2$  y  $\text{O}_3$  son continuos, realizan monitoreos cada minuto y entregan promedios de cinco minutos. Funcionan bajo diferentes principios, el equipo de  $\text{SO}_2$  utiliza el método de Fluorescencia Ultravioleta, mientras que el equipo de  $\text{O}_3$  absorción ultravioleta y el equipo de  $\text{CO}$  Correlación de Filtro de Gas (GFC) que utiliza radiación infrarroja (MADS 2010b). Estos equipos transmiten los datos por medio de un datalogger donde la descarga y la transferencia se hacen manuales en el sitio o remoto usando una plataforma como Team viewer.

La selección de contaminantes para la elaboración de los índices se realizó basada en la cantidad de información disponible y en su relevancia para el área de estudio. Las mediciones se conocieron a partir de los registros provenientes de las estaciones de monitoreo que abarcan la ciudad.

## Procesamiento de la información

Los datos medidos por las estaciones ambientales y los indicadores son obtenidos desde el Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas (CDIAC) (UN y CORPOCALDAS, 2014), una plataforma virtual con una bodega de datos diseñada con el fin de consolidar la información ambiental del departamento de Caldas por integrantes del Grupo de Ambientes Inteligentes Adaptativos –GAIA y el Grupo de Trabajo Académico de Ingeniería Hidráulica

y Ambiental GTA IHA (incluida la autora de esta tesis), ambos grupos de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. La bodega de datos, tiene una estructura llamada “Estrella Descentralizada” como se muestra en la Figura 2.3, en ésta hay dos (2) tablas denominadas tablas de hechos y hay tres (3) tablas conocidas como tablas de dimensiones. Este conjunto permite realizar búsquedas de los datos desde varios enfoques o bajo diferentes características, a lo que se le denomina granularidad de las búsquedas.

Actualmente, en la bodega de datos se almacenan los datos y a través de la plataforma virtual CDIAC, los datos son procesados para obtener los indicadores de calidad del aire y meteorológicos. Los cálculos se validan regularmente al ser reproducidos de forma manual con otras herramientas informáticas auxiliares como el software estadístico R y la herramienta ofimática Excel.

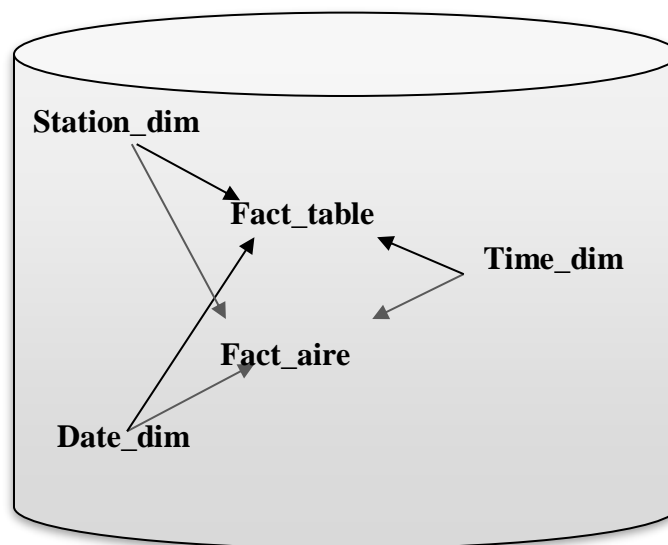


Figura 2.3. Estructura de la bodega de datos.  
Fuente: autores

Antes de entregar los datos, la bodega realiza una depuración como lo que define el “Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire” (MADS 2010b). Para esto se hace un preprocesamiento de información donde se aplican los filtros de Tabla 2.2 que han sido definidos por personal experto en contaminación atmosférica y que conoce las

condiciones locales. En caso tal de que un dato no se encuentre entre los rangos se toma como nulo.

Tabla 2.2. Rangos válidos de concentraciones de gases.

Contaminante	Rango de concentraciones
SO <sub>2</sub>	0-1000 ppb
O <sub>3</sub>	0-600 ppb
CO	0-50000 ppb

Después de depurada la información, se revisa la tendencia de los datos comprobándose que lleve una secuencia sin picos extraños o anomalías. Ya con este proceso listo, los datos se consideran adecuados y listos para usarse.

## Indicadores seleccionados

Siguiendo el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire publicado en el 2010 por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (MADS 2010a), se escogió analizar la información de calidad del aire a través los indicadores:

Porcentaje de excedencia de los límites máximos permisibles usando la Tabla 1.1

ICA usando la Tabla 1.2 y la ecuación 1.5

Estos para los contaminantes seleccionados anteriormente.

## Visualización de los indicadores

Los indicadores se representan en tablas y en gráficas a través de la plataforma web de CDIAC. El aplicativo permitió la descarga de la información en archivos planos (CSV) o imágenes de la representación gráfica donde se pueden visualizar tendencias de los mismos. Adicionalmente se utilizó el software R y la biblioteca Openair para complementar la información con los indicadores generados a través de la plataforma web. Con estas herramientas se realizaron gráficas utilizando la media móvil para los datos continuos, es



decir, los datos de gases. Para material particulado, se usó el dato diario de concentración que se calcula a partir de las mediciones obtenidas de un equipo High-Vol. Todos los indicadores se determinaron con datos a condiciones referencia que “*Son los valores de temperatura y presión con base en los cuales se fijan las normas de calidad del aire y de las emisiones, que respectivamente equivalen a 25 °C y 760 mm Hg (1 atmósfera de presión)*” (MADS 2010c).

Se realizaron gráficas de: calendario, tendencias generales y tendencias por niveles. Cada contaminante se representa por una gráfica diferente de acuerdo a su información.

### **Análisis de ozono**

Inicialmente las concentraciones de COV en la troposfera se estudiaban con el fin de conocer su implicación en la formación de O<sub>3</sub> troposférico. Por esto, cuando se analizaban COV se tenían en cuenta compuestos de cadena larga y se despreciaba el Metano por no contribuir significativamente en la formación de O<sub>3</sub> (Pitts 1986). A pesar de que con el pasar de los años se descubran nuevos motivos para analizar ozono, se sigue demostrando la importancia de los COV en la formación de este contaminante. Motivo suficiente para que en este capítulo se trate un poco más a profundidad el ozono.

Como primera instancia se utilizan los datos provenientes de la estación de monitoreo activo ubicada en la gobernación de Caldas para analizar sus concentraciones anuales y compararlas con las de otras ciudades de Colombia.

También se tomaron resultados de (Cuesta-Mosquera et al. 2017), un estudio donde se realizó monitoreo pasivo de O<sub>3</sub> entre la zona urbana de Manizales y una parte de la zona rural de Caldas, más exactamente en el municipio de Villamaría en la dirección hacia el Volcán Nevado del Ruíz. Allí se hicieron tres campañas de cuatro semanas cada una entre 2015 y 2016 teniendo en cuenta las temporadas húmedas y secas de la región. Cada campaña cuenta con 10 puntos de monitoreo.

## 2.3. RESULTADOS

### ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN MANIZALES

A continuación, se presentan los resultados obtenidos aplicando la metodología anteriormente descrita:

#### **CDIAC - Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas**

En la Figura 2.4, Figura 2.5 y Figura 2.6 se puede observar la plataforma desarrollada a la cual se puede ingresar mediante el link <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/>. Allí es posible visualizar y descargar libremente los indicadores ambientales.

La Figura 2.4 muestra la sección donde se generan los ICA seleccionando el contaminante, la estación de monitoreo y el rango de los años a los que se les desea calcular el indicador.

Figura 2.4. Pantalla de generación de indicadores de calidad del aire desde la bodega de datos.  
Fuente: autor

El resultado de la consulta anterior genera una tabla como la que se visualiza en la Figura 2.5 donde se muestran los resultados del indicador, su clasificación, un análisis de confianza basado en la cantidad de datos utilizados para la generación del indicador y la desviación

estándar con respecto al promedio de la concentración. Estos resultados pueden ser descargados en formato archivos con formato csv.



Figura 2.5. Resultados numéricos del ICA calculados desde la bodega de datos.

Fuente: autor

También se puede generar la respectiva gráfica, tal como se muestra en la Figura 2.6, que en este caso representa los ICA de PM<sub>2.5</sub> para la estación Gobernación durante el año 2014, donde es posible su visualización en la escala de colores como la metodología lo sugiere.

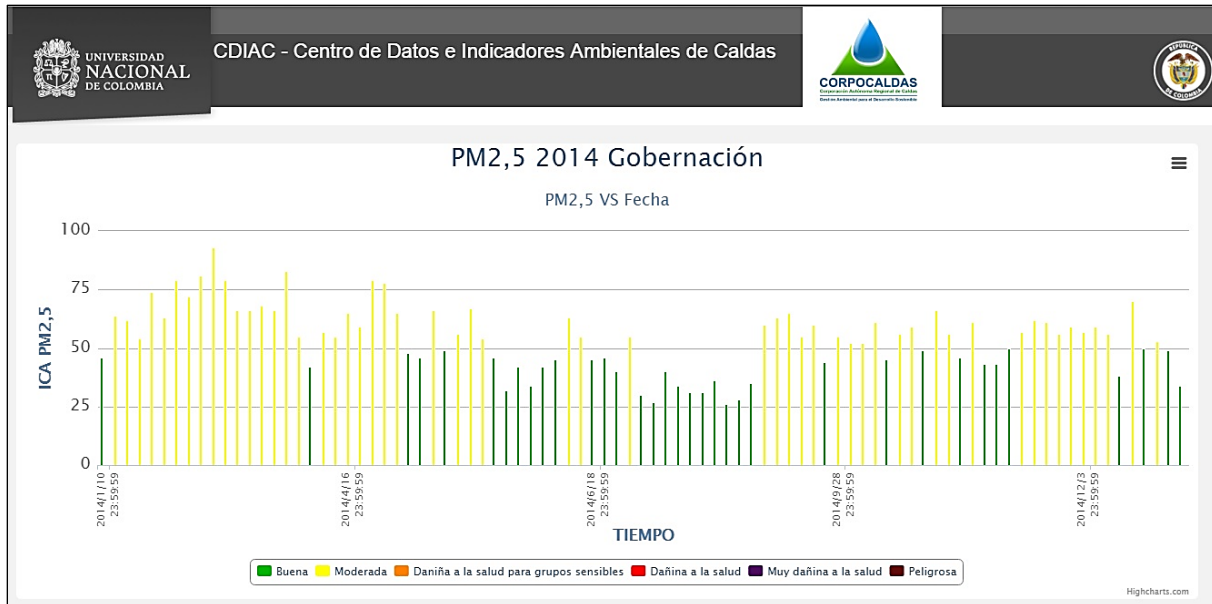


Figura 2.6. Grafica de ICA realizada desde la bodega de datos.  
Fuente: autor

A continuación, se muestran los resultados de ICA mediante gráficos y porcentaje de excedencia de los límites máximos permisibles de forma cuantitativa.

### Porcentaje de excedencia de los límites máximos permisibles

La Tabla 2.3 muestra los resultados de excedencia de los límites máximos permisibles. Las mediciones de  $PM_{10}$  correspondientes a las estaciones Liceo, Milán, Nubia y Palogrande no mostraron excedencias. En cambio, la estación Gobernación tuvo 2 excedencias de los límites, lo que representa un 0.28%. En cuanto a las mediciones ambientales de  $PM_{2.5}$ , se encontró que se superaron los límites 6 veces, equivalentes a un 1.05% respecto al total de datos. Por lo tanto, este es el contaminante con mayor porcentaje de excedencias en Manizales. El  $O_3$  a las 8 horas es el contaminante que más ha alcanzado en cantidad de veces los niveles perjudiciales para la salud con 22 excedencias. Sin embargo, el porcentaje con respecto al total es bajo dando 0.21%. Los niveles de concentración de  $SO_2$  son muy bajos en la ciudad, lo que no ha llegado a representar un riesgo.

Tabla 2.3. Porcentaje de excedencia de los límites máximos permisibles.

Estación	PM <sub>10</sub>				
	Gobernación	Liceo	Milán	Nubia	Palogrande
Tiempo de exposición	24 horas	24 horas	24 horas	24 horas	24 horas
Excedencias	2	0	0	0	0
Registros	707	480	256	301	334
Porcentaje de excedencia de los límites máximos permisibles	0.28%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Estación	PM <sub>2.5</sub>	O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>		
	Gobernación	Gobernación	Gobernación	Gobernación	Gobernación
Tiempo de exposición	24 horas	1 hora	8 horas	24 horas	Anual
Excedencias	6	0	22	0	0
Registros	572	10679	10679	10195	2
Porcentaje de excedencia de los límites máximos permisibles	1.05%	0.00%	0.21%	0.00%	0.00%

## ICA

Se obtuvieron gráficas que siguen los protocolos establecidos en la metodología de la EPA (Clench-Aas et al. 1998). De esta forma se pueden distinguir los valores y colores según las categorías definidas en la Tabla 1.2

## PM<sub>2.5</sub>

Para representar el material particulado menor a 2.5 micras se realizaron calendarios para todos los años de los que se tienen datos. En la Figura 2.7 se muestran los calendarios de los años 2009, 2012, 2013 y 2014, como se puede ver, estos cuentan con una barra lateral derecha que constituye los rangos y la escala de colores que define la metodología y muestra al interior de cada día, el valor correspondiente en ICA.

Los datos resaltados son aquellos que igualan o sobrepasan los límites permisibles de la norma colombiana. En el año 2009 se sobrepasan los límites una vez y en el año 2012 cuatro (4) veces entre los meses octubre y septiembre, lo que pueden asociarse al aumento de la actividad volcánica del Nevado del Ruiz en estas fechas.

Los valores adimensionales de ICA para PM<sub>2.5</sub> en condiciones normales oscilan entre 30 y 60 equivalentes a las clasificaciones Buena y Moderada respectivamente, estas clasificaciones sugieren que el aire no causa efectos secundarios sobre la salud de la población que lo respira.

### Concentraciones PM<sub>2.5</sub> Gobernación año 2009



### Concentraciones PM<sub>2.5</sub> Gobernación año 2012







## PM<sub>10</sub>

El monitoreo de material particulado menor a 10 micras se realiza en cinco puntos de la ciudad, la Figura 2.8 muestra la tendencia del indicador de PM<sub>10</sub> en las 5 estaciones junto con los límites que alcanzan el ICA y el límite máximo permisible colombiano.

La línea verde que cruza el eje “y” representa la categoría Buena del ICA y la línea roja representa el límite máximo permisible.

En la gráfica es notable que la estación Liceo mantiene los valores más altos de ICA alrededor de 40. Esta tendencia se atribuye a que la estación Liceo se encuentra expuesta a mayor flujo vehicular que las otras estaciones. Además, las estaciones ambientales identificadas como la Nubia, Palogrande y Gobernación tienen ICA similares durante todo el periodo monitoreado, conservando valores entre 20 y 32. Por otra parte, datos de las estaciones que se encuentran en el centro histórico de la ciudad (Gobernación y Liceo) sobrepasan el límite de la clasificación Buena llegando a Moderada.

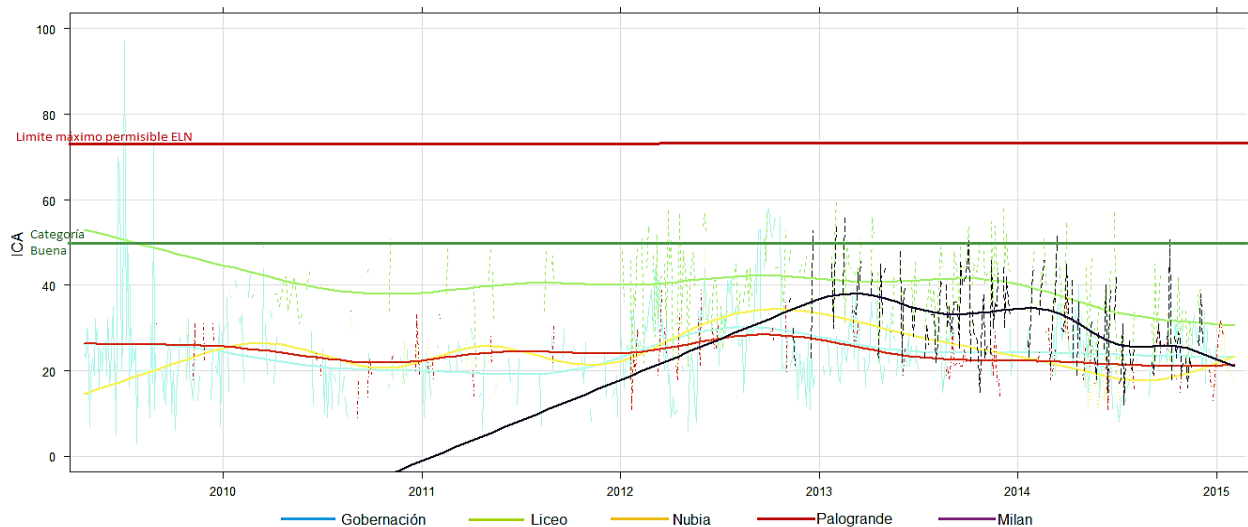


Figura 2.8. Tendencia de ICA para PM<sub>10</sub>.  
Fuente: autor



## SO<sub>2</sub>

Los ICA para SO<sub>2</sub> presentan valores muy bajos como se puede observar en la barra lateral derecha de la Figura 2.9 donde las medias móviles oscilan entre 0 y 2.7. De manera que el ICA permanece en una clasificación Buena, por tal razón toda la gráfica es de color verde. Estos bajos valores se atribuyen a la disminución en la concentración de azufre en el diesel, pasando de 500 ppm a solo 50 ppm a finales del 2012, así como a la implementación del pico y placa para vehículos de transporte público individual y colectivo, a principios del año 2012.

Por otra parte, entre las 16:00 y las 23:00 horas se visualizan las mayores concentraciones de SO<sub>2</sub> del día. Estudios de la dirección del viento en Manizales demuestran que durante esas horas, los vientos provienen desde el Sureste, es decir, desde la ubicación del volcán hacia la ciudad. Lo cual puede explicar las mayores concentraciones de azufre en esas horas.

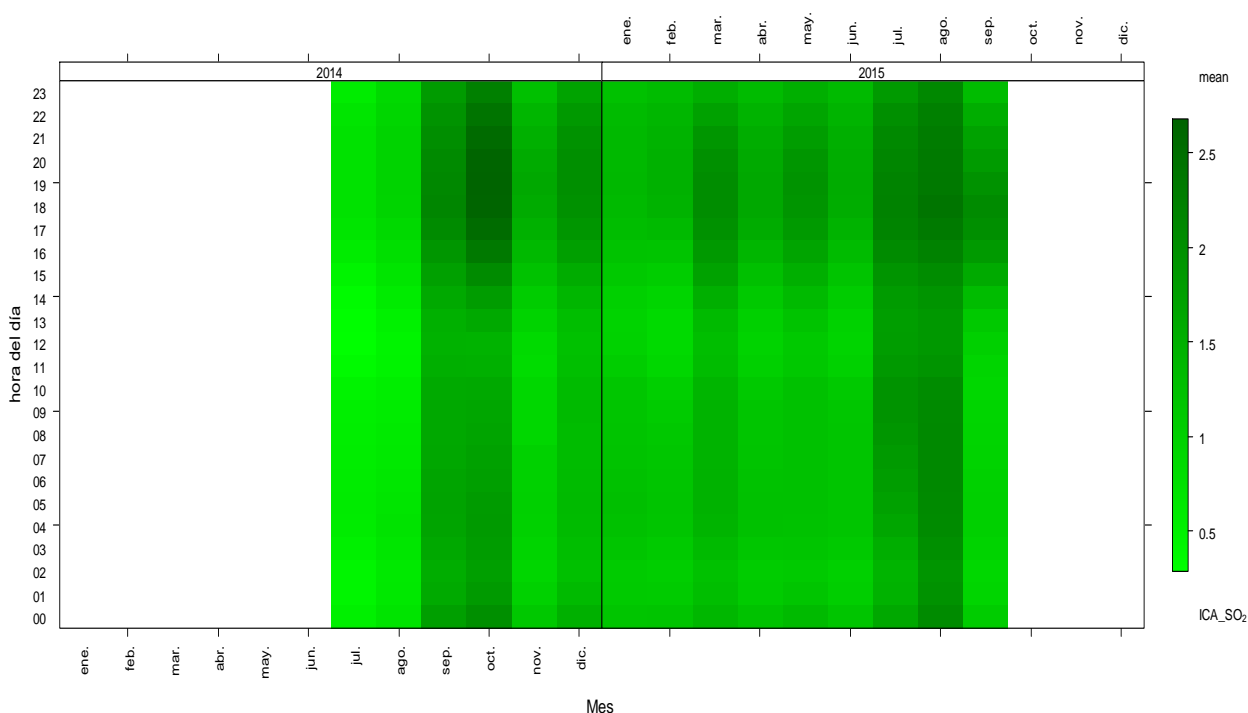


Figura 2.9. Tendencia por niveles diarios del ICA de SO<sub>2</sub>.  
Fuente: autor

### O<sub>3</sub>

Los indicadores de ozono tanto para calcular el ICA como para determinar la excedencia de los límites máximos permisibles se realizan principalmente con promedios de concentración de ocho horas.

La Figura 2.10 muestra los ICA para O<sub>3</sub> de acuerdo con la clasificación de la Tabla 1.2. En este caso para el periodo analizado se reporta valores de ICA correspondientes al color verde, es decir Buena Calidad, ya que como lo muestra la barra lateral el ICA máximo que alcanza el O<sub>3</sub> se aproxima a 26 unidades.

Se puede observar que en la zona central de la gráfica, es decir entre las 10:00 y las 15:00 horas del día se concentran los valores más altos. Teniendo en cuenta que el ozono es un contaminante secundario que se forma a partir de reacciones químicas en presencia de luz (Purves et al. 2004), estos resultados son de esperarse ya que en este intervalo de tiempo se presenta la mayor radiación solar del día, también las mayores temperaturas que promueven la reactividad en la atmósfera.

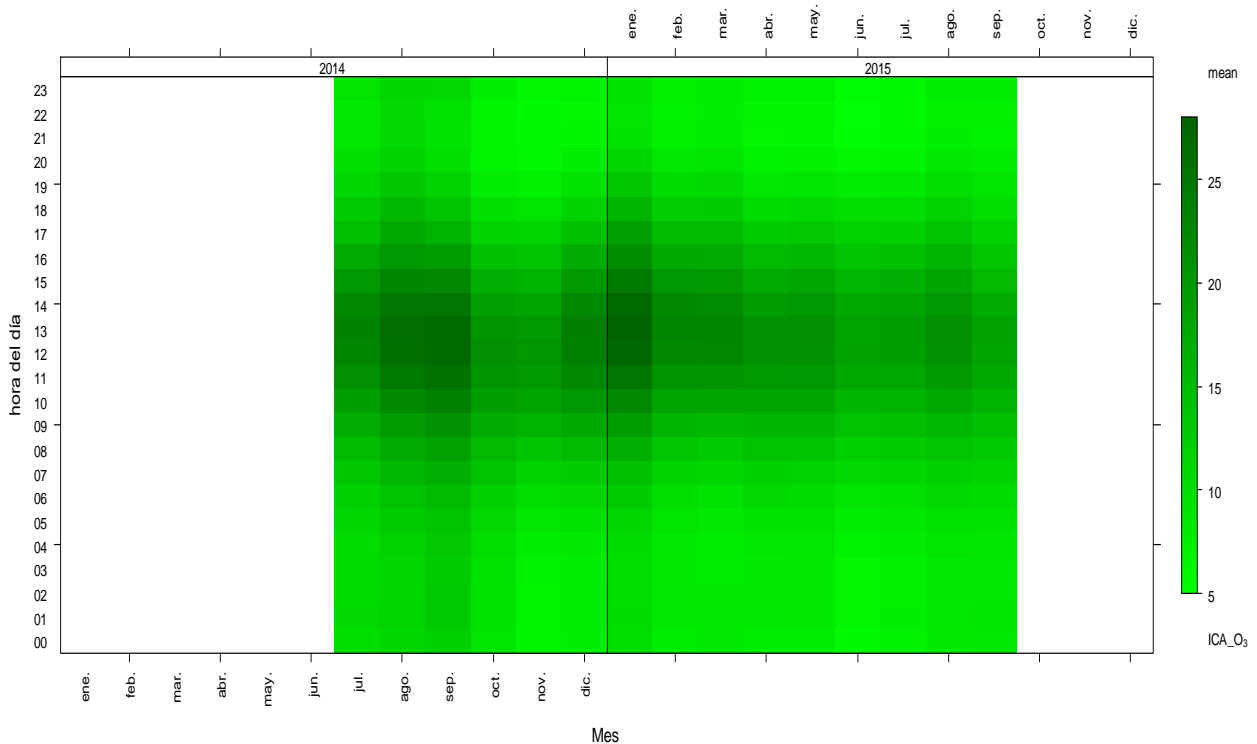


Figura 2.10. Tendencia octohoraria del ICA de O<sub>3</sub>

Fuente: autor

La Figura 2.11 proporciona varias gráficas que analizan los datos históricos de O<sub>3</sub> de la estación Gobernación en concentraciones de referencia. En la gráfica de evolución anual se presenta un resumen (gráficas representativas) de los datos cincominutales y su distribución por años. Se resaltan los periodos con datos faltantes superiores a una (1) hora por medio de una barra inferior color vino. Igualmente, por cada año se muestra el porcentaje de datos cincominutales que hay con respecto al total. Teniendo en cuenta que la estación fue instalada en julio del 2014, en ese año se monitoreó el 48% de los datos posibles, el año 2015 se monitoreó continuamente hasta septiembre por lo que alcanzó el 73% de los datos posibles y el año 2016 solo tuvo 15% de medición correspondiente a marzo y parte de abril. Ya que la norma nacional (MADS 2010a) sugiere un mínimo del 75% de datos para análisis anuales, se hicieron principalmente análisis mensuales y diarios y no se tuvo en cuenta el año 2016.

El histograma muestra la distribución general de los datos donde cerca del 50% están entre 0 y 25  $\mu\text{g m}^{-3}$ . La distribución horaria es similar a lo encontrado en el estudio realizado en Bogotá (Rincón Pérez 2015) donde se presenta una meseta o depresión en horas de la mañana (cerca de las 6:00 ) que posteriormente se extiende hacia un pico mayor entre las 13:00 y las 15:00. La distribución de O<sub>3</sub> presenta correspondencia con el patrón de vientos de Manizales analizados por Cuesta Mosquera (Cuesta Mosquera 2017) para los años 2014 y 2015 donde se evidenciaron dos periodos de calma (menor velocidad) como consecuencia del patrón de vientos montaña-valle: la primera calma se presenta cerca de las 7:00 (velocidades entre 0 y 0.2 m/s), y la segunda entre las 17:00 y 19:00 con velocidades entre 0.3 y 0.4 m/s. Esto da a entender que el O<sub>3</sub> está fuertemente influenciado por los vientos a pesar de que éstos sean bajos, es decir, que la meseta se puede presentar por la falta de dispersión de contaminantes precursores de O<sub>3</sub>.

El pico mostró concentraciones cercanas a 60  $\mu\text{g m}^{-3}$  y se da en horas con mayor radiación solar, velocidad del viento y temperatura donde por la naturaleza fotoquímica del O<sub>3</sub>, su formación es más viable. Semanalmente se visualiza una tendencia similar de los años 2014 y 2015 donde las diferencias entre cada día son muy pequeñas. El año 2016 no se analiza ni

diaria ni mensualmente ya que hubo muy pocos registros (cerca de un mes) que pudieran mostrar una tendencia clara.

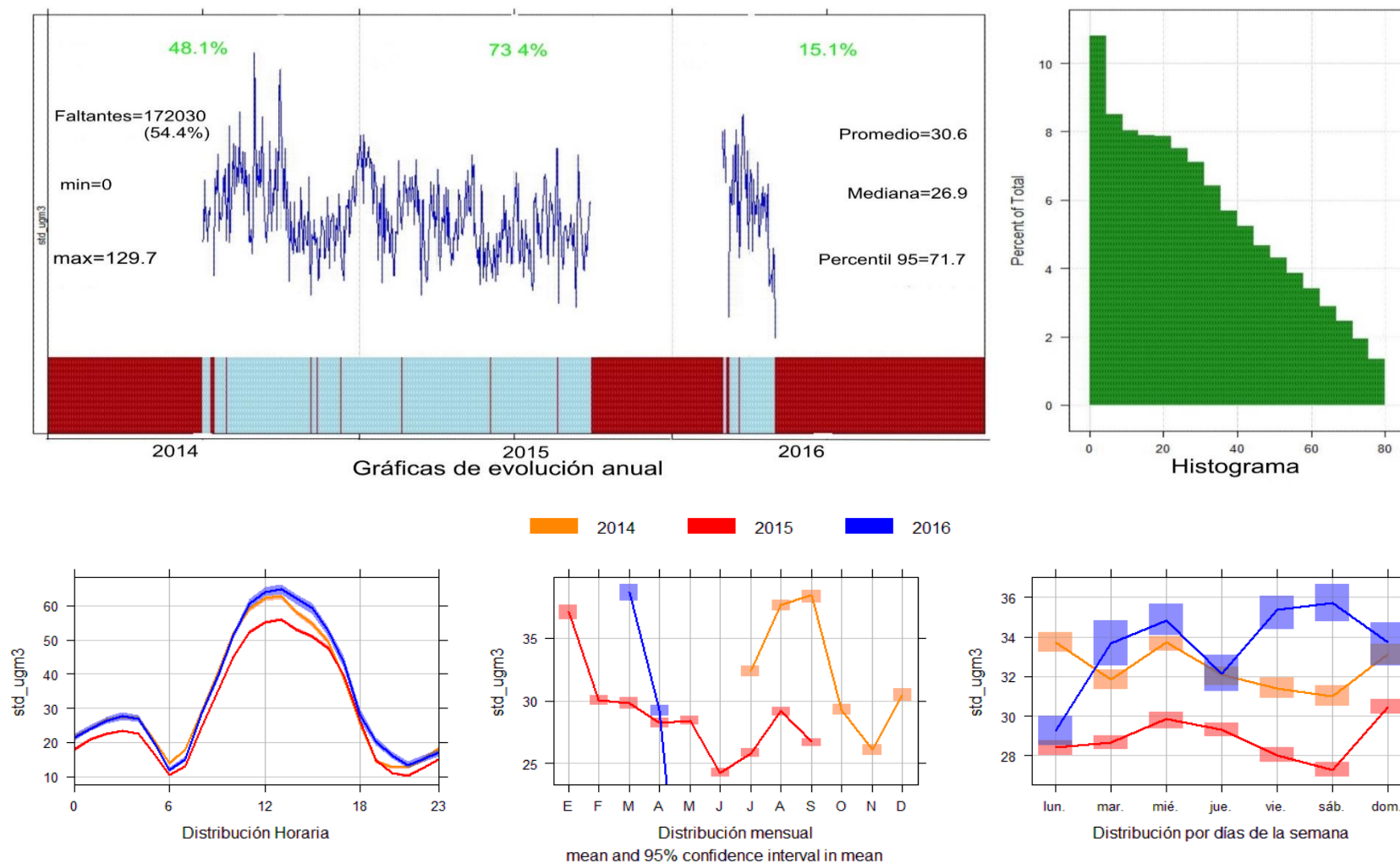


Figura 2.11. Análisis de los datos de O<sub>3</sub> de la estación gobernación de Manizales  
Fuente: autor

## ▪ Comparación espacial

A pesar de que se reconoce el efecto negativo del incremento del O<sub>3</sub> en la salud humana, en pocas ciudades de Colombia se monitorea este contaminante y con menos frecuencia se realizan investigaciones sobre sus fuentes. Razones de la falta de monitoreo en el país son los costosos equipos que se exigen y que la calidad del aire es un tema al que no se le prestaba suficiente atención, y actualmente está tomando fuerza.

De los 32 departamentos de Colombia, el “Informe del Estado de la calidad del aire en Colombia 2007-2010” (IDEAM 2012) recolectó información de O<sub>3</sub> de cuatro (4) Corporaciones Autónomas Regionales que son: Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AREA), la Corporación autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Estas corporaciones presentaron datos anuales (promedio horario) para los años 2007, 2008, 2009 y 2010.

Se encontró información más actualizada en el “Informe del Estado de la calidad del aire en Colombia 2011-2015” (IDEAM 2016a) pero no muestra concentraciones sino número de días que exceden los límites máximos permisibles. También se encontraron otras fuentes como el observatorio de Bogotá <http://oab.ambientebogota.gov.co/> que presenta promedios octohorarios y la página del AREA [www.metropol.gov.co](http://www.metropol.gov.co) que muestra los promedios máximos. Pero por concordancia de unidades y por falta de más información, se utilizaron los datos del informe 2007-2010 para comparar las concentraciones de Manizales. Aunque se tuvo en cuenta que el tiempo de análisis no coincide ya que el equipo de monitoreo de O<sub>3</sub> en Manizales fue instalado en el año 2014. La Figura 2.12 muestra los resultados en unidades de partes por billón (ppb) donde Manizales registró valores de 16.5 y 14.7 ppb en los años 2014 y 2015 respectivamente.

A pesar de que se tienen pocos datos de otras ciudades, se puede evidenciar órdenes de magnitud similares entre las regiones analizadas y que las concentraciones presentes en Manizales pueden superar las concentraciones promedio horarias anuales de Bogotá y Bucaramanga (IDEAM 2012).

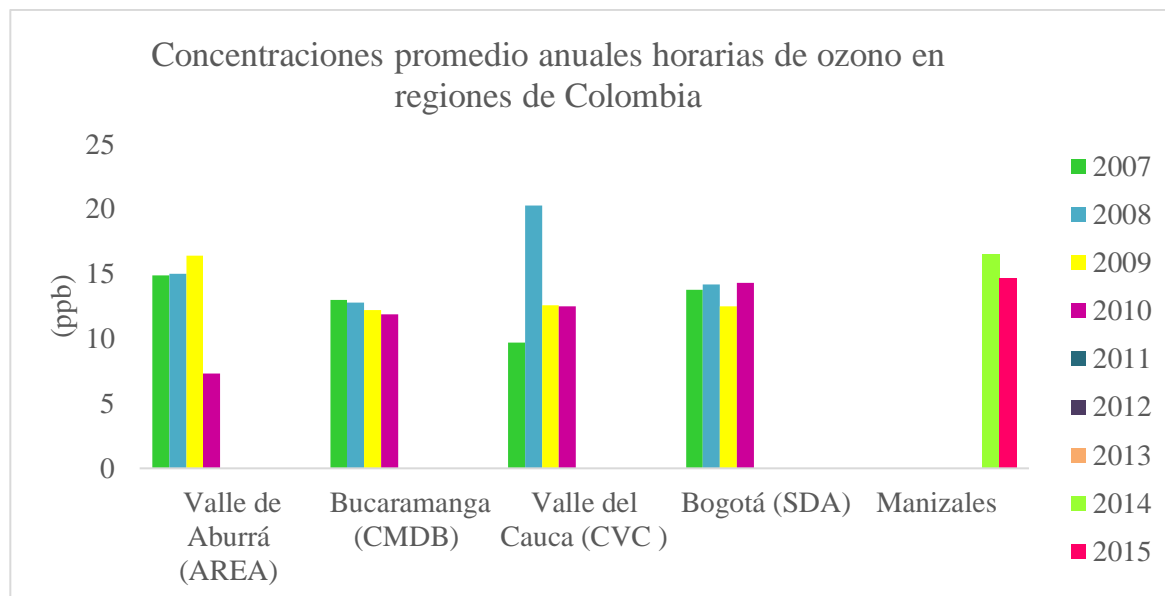


Figura 2.12. Comparación de los niveles de  $O_3$  en ciudades de Colombia (promedio horario de monitoreo activo).  
Fuente: (IDEAM 2012)

Teniendo una idea de lo que representan los niveles de  $O_3$  en Manizales en Colombia, se analizaron las concentraciones de  $O_3$  obtenidas en un estudio de monitoreo pasivo (Cuesta-Mosquera et al. 2017) donde se hicieron tres campañas de monitoreo entre los años 2015 y 2016 (Figura 2.13). Allí se representan los resultados obtenidos de concentraciones de  $O_3$  de cada campaña en el transecto Nevado del Ruiz-Manizales junto con la distancia de cada punto al centro histórico de la ciudad de Manizales. En el centro histórico está concentrada el área más urbanizada de la ciudad, lo que significa que entre mayor sea la distancia al centro, mayor es la densidad de la vegetación.

Los resultados de este estudio demostraron que las concentraciones de  $O_3$  aumentan cuando la vegetación se hace más densa. Los puntos Hostal, La fonda y Hacienda Termales son zonas alejadas de la población y así mismo están rodeadas de grandes cantidades de bosques, cultivos y matorrales. Las concentraciones de los puntos anteriores fueron las más altas, alcanzando hasta los  $90 \mu\text{g m}^{-3}$ , siendo consideradas perjudiciales para la salud humana según la norma nacional (MADS 2010c). Mientras que en el centro histórico se presentan concentraciones entre 22 y  $43 \mu\text{g m}^{-3}$ , valores bajos según la normatividad colombiana. Los datos de monitoreo pasivo fueron comparados con los datos de monitoreo activo poniendo un muestreador (Gobernación) al lado del equipo de medición de ozono y realizando un promedio en el mismo tiempo de medición. Los cuales fueron validados con

los datos de monitoreo activo de la estación Gobernación que se encontraba a un lado del muestreador.

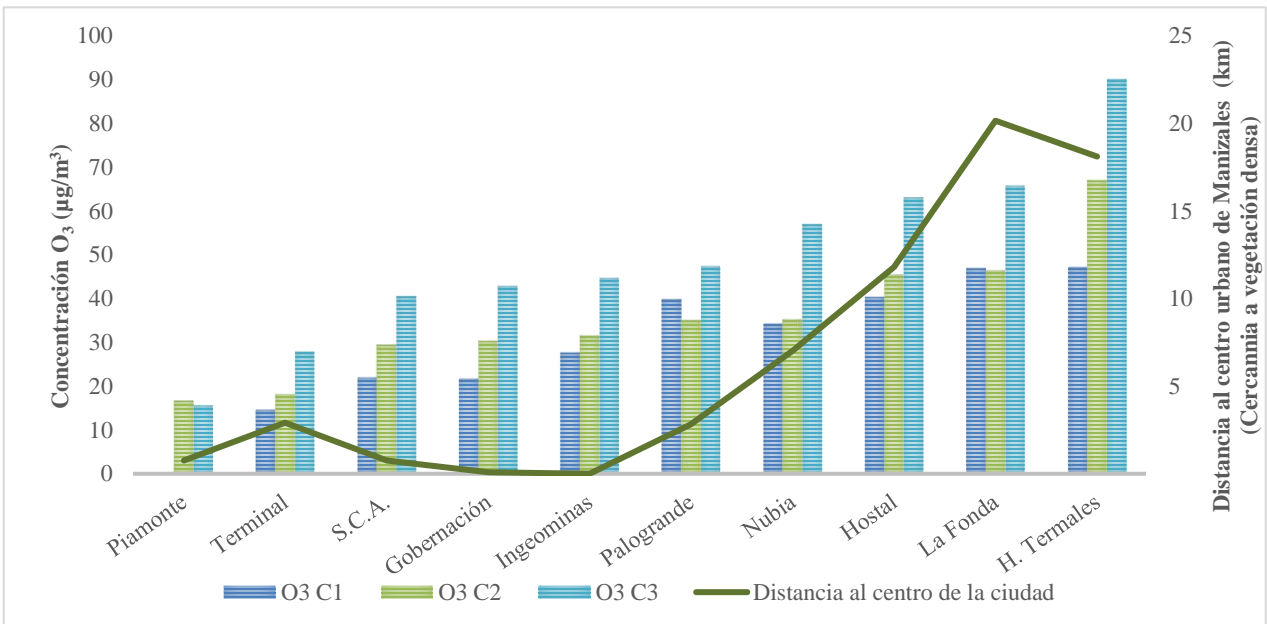


Figura 2.13. Concentraciones de O<sub>3</sub> en Manizales y alrededores (Monitoreo pasivo)  
Fuente: (Cuesta-Mosquera et al. 2017)



## 2.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis realizado en este capítulo brindó un vistazo general al estado de la calidad del aire de Caldas, ayudó a comprender la dinámica de los contaminantes monitoreados y a concluir sobre sus posibles fuentes. Con esto se obtuvo una mejor preparación para comprender los resultados del inventario de fuentes biogénicas y así poder establecer algunas conclusiones. Resultados muy interesantes fueron encontrados con ozono donde se pudo conocer mejor su distribución espacial y temporal que concuerda con las zonas de acumulación de COVB.

El análisis de O<sub>3</sub> cada ocho horas demuestra que los mayores índices se presentan entre las 10:00 y las 15:00 horas donde la radiación solar es mayor, lo cual es de esperarse ya que éste es un contaminante secundario que se forma por reacciones fotoquímicas. Sin embargo, al conocerse el papel que juegan los COVB en la formación de O<sub>3</sub>, se analizó este contaminante con más detalle.

A nivel nacional las concentraciones de O<sub>3</sub> de la estación Gobernación en el centro histórico de Manizales se manifiestan dentro del promedio mientras que estudios de monitoreo pasivo demostraron que las concentraciones de O<sub>3</sub> aumentan a medida que los muestreadores se alejan de la ciudad y se acercan a la vegetación más densa. Mostrando cambios de concentración en la misma campaña de monitoreo de 15.6 a 90.1 µg m<sup>-3</sup> en tan solo 20 kilómetros. Es importante hacer un análisis de O<sub>3</sub> más amplio considerando datos de mayor tiempo. A pesar de que el inventario de COVB se considera un insumo importante para esto, hace falta monitoreo de NO<sub>x</sub> y O<sub>3</sub> en la extensión del departamento de Caldas. Estos resultados permiten concluir que las fuentes biogénicas pueden aportar significativamente a la formación de O<sub>3</sub> local y regional, pero para evaluar su verdadero impacto es necesario primero conocer los flujos de COVB que son emitidos por los diferentes tipos de vegetación. Teniendo en cuenta que ya se han realizado estudios que permiten estimar el aporte por las fuentes antropogénicas como son los inventarios de fuentes fijas y fuentes móviles (González et al. 2017) realizados para Manizales con año base 2014.

Los indicadores para PM<sub>2.5</sub> muestran que la calidad del aire en Manizales puede ser afectada en ocasiones por la actividad del volcán Nevado del Ruiz, eventos que se presentaron en los meses agosto y septiembre del año 2012 que llevaron a sobrepasar durante cuatro días los niveles máximos permisibles por la legislación. En condiciones normales, se presentan ICA entre 30 y 60 que se consideran no ser perjudiciales para la salud de la población.

Los indicadores de  $PM_{10}$  revelan que las concentraciones de cada estación no varían significativamente. Sin embargo, la estación Liceo presenta los ICA más altos, esto es factible, ya que ésta es la estación con mayor concurrencia de tráfico vehicular.

# **CAPITULO 3. DESARROLLO DE UN MODELO PARA ESTIMAR LAS EMISIONES BIOGENICAS DE COVB TENIENDO EN CUENTA EL GRADIENTE ALTITUDINAL –BIGA**

## 3.1. INTRODUCCIÓN

Cada día se publican nuevos estudios que ayudan a comprender la dinámica de la atmósfera, así como las diferentes variables que pueden causar su alteración. Entre estos los inventarios de emisiones provenientes de diferentes fuentes contaminantes, como las biogénicas que han sido ampliamente estudiadas en Europa (Wu et al. 2015), Norteamérica (Guenther et al. 2000) y un poco menos en Suramérica (Cárdenas R. 2012; Toro G. et al. 2001)

El objetivo de un inventario de fuentes biogénicas no es demostrar que la vegetación es perjudicial por ser la precursora de la formación de contaminantes, después de todo, las plantas siempre han existido y así la naturaleza ha mantenido su equilibrio. El problema radica en la inestabilidad que han generado las emisiones provenientes de las actividades humanas. Éstas con el pasar de los años han cambiado el clima y la composición de la atmósfera desencadenando así una serie de reacciones que desequilibran los procesos naturales. Por eso lo mejor que se puede hacer es estudiar y tratar de comprender estos procesos para así encontrar soluciones y acciones preventivas al respecto.

En este trabajo se presenta la metodología de un modelo desarrollado para estimar de forma espacial y temporal las emisiones de compuestos orgánicos volátiles de origen vegetal en regiones tropicales,

de alta montaña y con diferentes pisos térmicos originados por gradientes altitudinales. Se desarrolló un modelo para estimar las emisiones Biogénicas de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVB) teniendo en cuenta el Gradiente Altitudinal, llamado-BIGA. Para este modelo se usó información que normalmente toda región tiene como datos de estaciones meteorológicas (temperatura y radiación solar), un digital elevation model (DEM por sus siglas en inglés) que es un mapa con la representación digital de la superficie y un mapa de uso y cobertura del suelo. El modelo es novedoso en cuanto utiliza la temperatura en función del gradiente altitudinal ya que se demostró que la temperatura tiene una alta dependencia de la altitud. También porque es capaz de utilizar resoluciones muy altas sin necesidad de un equipo de cómputo avanzado y porque procesa toda la información espacialmente en un SIG que permite comparar, editar y analizar entre los mismos datos u otros.

Con el fin de divulgar esta investigación se realizó el artículo “*Methodology and preliminary assessment of the biogenic contribution to Volatile Organic Compounds (VOCs) of a mountainous and tropical region*” que está en proceso de ser sometido (Anexo B).

Éste modelo y unos resultados preliminares fueron previamente analizados y mejorados durante una estancia de investigación realizada en University of California Irvine bajo la tutoría del profesor Alex Guenther, quien tiene una larga trayectoria en el estudio de fuentes biogénicas y ha desarrollado varios algoritmos y modelos para estimar este tipo de emisiones. Ejemplos muy concretos son el algoritmo G93 el cual fue la base matemática usada para desarrollar BIGA y otro ejemplo es MEGAN que es actualmente el modelo líder recomendado por la EPA. El modelo BIGA fue presentado al grupo de investigación del Dr. Guenther donde se presentaron ideas y sugerencias las cuales fueron aplicadas para mejorar el modelo y obtener los resultados mostrados en este capítulo. Es importante resaltar que en este capítulo solo están aquellos resultados que se obtienen directamente al correr el modelo BIGA. Un análisis más profundo como comparaciones con otros modelos y resultados adicionales se puede visualizar en el capítulo 4.

## 3.2. METODOLOGÍA

### CREACIÓN DEL MODELO BIGA

Como objetivo principal de la tesis se planteó estimar las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles provenientes de fuentes biogénicas para el departamento de Caldas, al cual se pensaba dar cumplimiento mediante la aplicación de un modelo previamente desarrollado. Sin embargo, al buscar un modelo se encontraron inconvenientes como:

- Dificultades de instalación: sistemas operativos y lenguajes difíciles de manejar.
- Exigencia computacional: se requieren computadores con alta capacidad.
- Disposición de tiempo: para instalar y aprender a utilizar el modelo.
- Datos difíciles de obtener: solicitan información de entrada muy específica que no siempre se encuentra disponible.
- Variabilidad climática: la mayoría de modelos han sido realizados en regiones con condiciones climáticas estacionales, muy diferentes a las regiones tropicales donde solo se tienen 2 temporadas y donde los cambios de altitud tienen una gran influencia.
- Poca flexibilidad: es complicado agregar nuevas ecuaciones o variables a un programa, por lo que no es una buena opción si se quieren hacer ajustes que puedan mejorar los resultados.

Analizando diferentes modelos para estimar emisiones biogénicas y encontrando en cada uno, alguno o algunos de los problemas anteriores, se llegó a la conclusión de que la mejor opción es desarrollar un modelo donde fuera posible realizar las modificaciones necesarias que permitieran tener en cuenta las características típicas de regiones tropicales y montañosas, también buscando un programa que pudiese usarse en cualquier sistema operativo.

#### **Modelación de emisiones biogénicas teniendo en cuenta el gradiente altitudinal**

La metodología que se usó para diseñar y aplicar el modelo se resume en la Figura 3.1 donde se utiliza información local de temperatura y radiación solar proveniente de estaciones meteorológicas, la altitud obtenida de un DEM, los tipos de vegetación dados por un mapa de uso y coberturas del suelo y factores de emisión tomados de bibliografía. Toda esta información se analizó y procesó usando los software Excel, Matlab y un GIS, en este caso ArcGis.

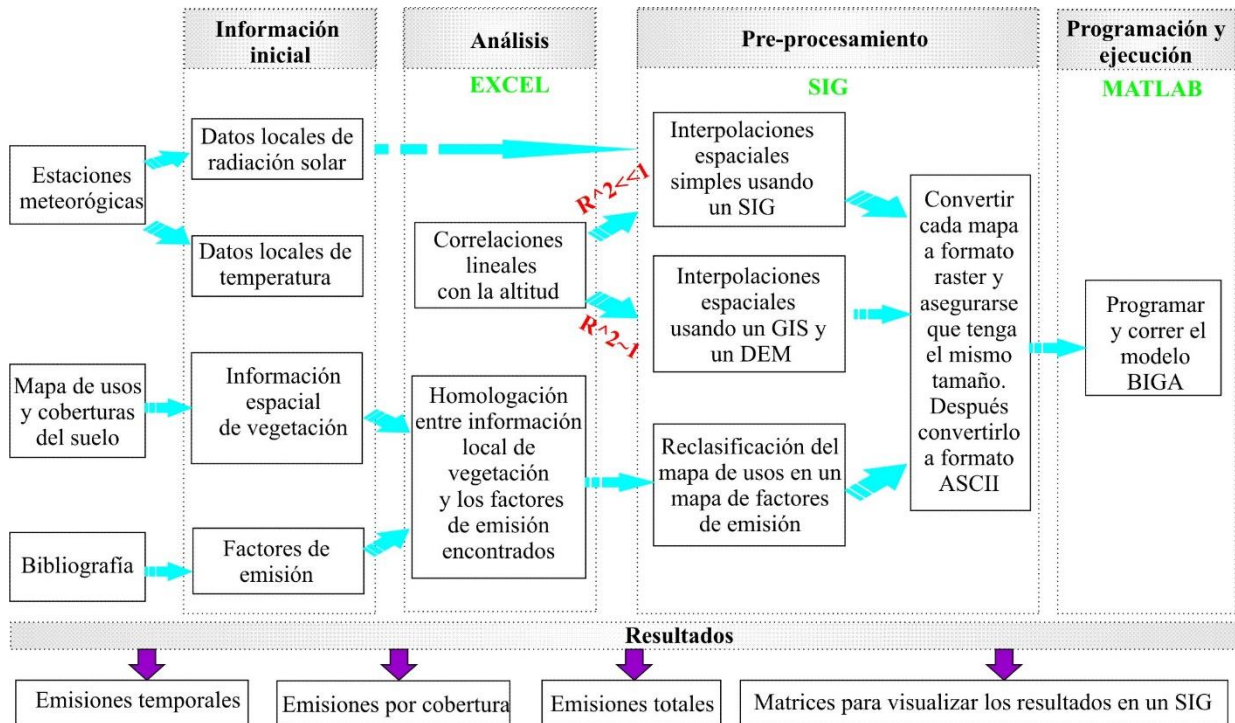


Figura 3.1. Diagrama de metodología usada para desarrollar el modelo BIGA

### Algoritmo de cálculo de las emisiones de COVB

Las emisiones de COV naturales de todo el departamento se calcularon para los grupos isopreno, monoterpenos y otros Compuestos Orgánicos Volátiles –OCOV (diferentes de metano e incluyendo COV oxigenados y no oxigenados) utilizando como base matemática el algoritmo de emisión foliar propuesto por Guenther (Guenther et al. 1995), el cual ha sido adecuado para recibir la información local y utilizar factores de emisión (FE) de las diferentes especies a nivel canopy, lo que constituye una ventaja ya que el modelo puede trabajar con especies específicas y con ecosistemas más generales según las necesidades cada usuario.

Para utilizar FE a nivel canopy en vez de FE nivel hoja, se propone realizar una modificación al código que consiste en usar la temperatura ambiente en vez de la temperatura de hoja e incluir en el algoritmo el Leaf Area Index –LAI que es un factor adimensional que representa la cantidad de material foliar en un ecosistema por unidad de área superficial de suelo. Éstos cambios han sido anteriormente evaluados y aplicados en otros estudios (Potosnak et al. 2013). Por ejemplo, el algoritmo base usado (G95) inicialmente fue diseñado para cálculos con factores de emisión a nivel

de hoja (leaf level emissions factors) pero estudios a través de los años han demostrado que una mejor estimación puede ser dada si se usan factores de emisión al nivel del canopy (canopy emission factors) (Guenther, Jiang, et al. 2012). Éstos FE nivel canopy están basados en resultados de mediciones a nivel de hoja que son posteriormente extrapolados por medio de un modelo matemático (Guenther et al. 2006).

Mediante la ecuación 3.1 se propone calcular los flujos de emisión de COV:

$$F = FE \gamma_i LAI \quad (Ec. 3.1)$$

Donde FE es el factor de emisión dependiente de la especie o del ecosistema a nivel canopy ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  a condiciones estándar) y  $\gamma_i$  es un factor de ajuste adimensional para cada tipo de compuesto y se calcula usando las ecuaciones del algoritmo G93 (ecuaciones 1.14-1.17) donde se representan los efectos de la temperatura y la luz sobre las emisiones en un tiempo corto. En este estudio se trató el canopy como un solo nivel de hojas, lo que se traduce en LAI igual a 1 con FE nivel canopy que fueron tomados de fuentes secundarias y reportados en artículos, libros y bases de datos de modelos como MEGAN (Guenther, Jiang, et al. 2012). Para este trabajo se realizaron cálculos horarios.

En este caso, Q se aproximó como 0.5 de la irradiancia medida localmente ( $\text{W m}^{-2}$ ) y se usó el factor de conversión de  $4.57 \mu\text{mol s}^{-1} \text{W}^{-1}$  para obtener finalmente unidades de  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Thimijan & Heins 1983; Aculinin 2008) requeridas en el algoritmo.

Seleccionado el algoritmo de cálculo se desarrolló el código en el software Matlab, el cual fue diseñado para recibir y entregar información espacial ( $\mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$ ) y temporal ( $\text{ton t}^{-1}$ ; donde t es el tiempo definido con la información de entrada que puede ser hora, mes, temporada o año).

### **Selección área y tiempo de estudio**

El departamento de Caldas, Colombia, es una zona cafetera de  $7436 \text{ km}^2$  localizada en la región Andina colombiana entre las cordilleras Central y Occidental (Vélez et al. 2015). Lo que se traduce en zonas montañosas y con grandes pendientes que van de 0 al 72%. Tiene un amplio rango altitudinal (140-5286 msnm) que permite zonas de vida desde nival hasta bosque seco tropical (Corpocaldas, 2007). Se caracteriza por la presencia de microclimas y su variabilidad climática en función de la altitud. Por estar dentro de la zona de convergencia intertropical, que es el principal generador del cinturón de lluvias tropicales, esta región se caracteriza por poseer dos periodos

predominantes, el seco y el lluvioso, lo que significa que no está influenciado por las cuatro (4) estaciones. Un análisis de precipitación en un periodo de seis años a lo largo de la zona de estudio (Hincapié et al. 2015) demuestra un comportamiento bimodal tanto horario como mensual, mensualmente era algo de esperarse ya que el cinturón de lluvias para dos veces al año en latitudes cerca del Ecuador. Los meses de enero y julio suelen ser los más secos, mientras que los meses de mayo y noviembre tienen los picos más lluviosos con eventos frecuentes entre 2.5-7.6 mm hora<sup>-1</sup>. Horariamente el comportamiento es bimodal, cerca de las 11:00 y de las 22:00 son las horas más secas y alrededor de la 1:00 y de las 15:00 suelen presentarse eventos de lluvia con precipitaciones con intensidades que sobrepasan los 7.6 mm hora<sup>-1</sup>. Unos ejemplos de la precipitación mensual en diferentes zonas de Caldas se muestran en la Figura 3.2 donde en municipios como Villamaría se ha llegado a sobrepasar los 400 mm.

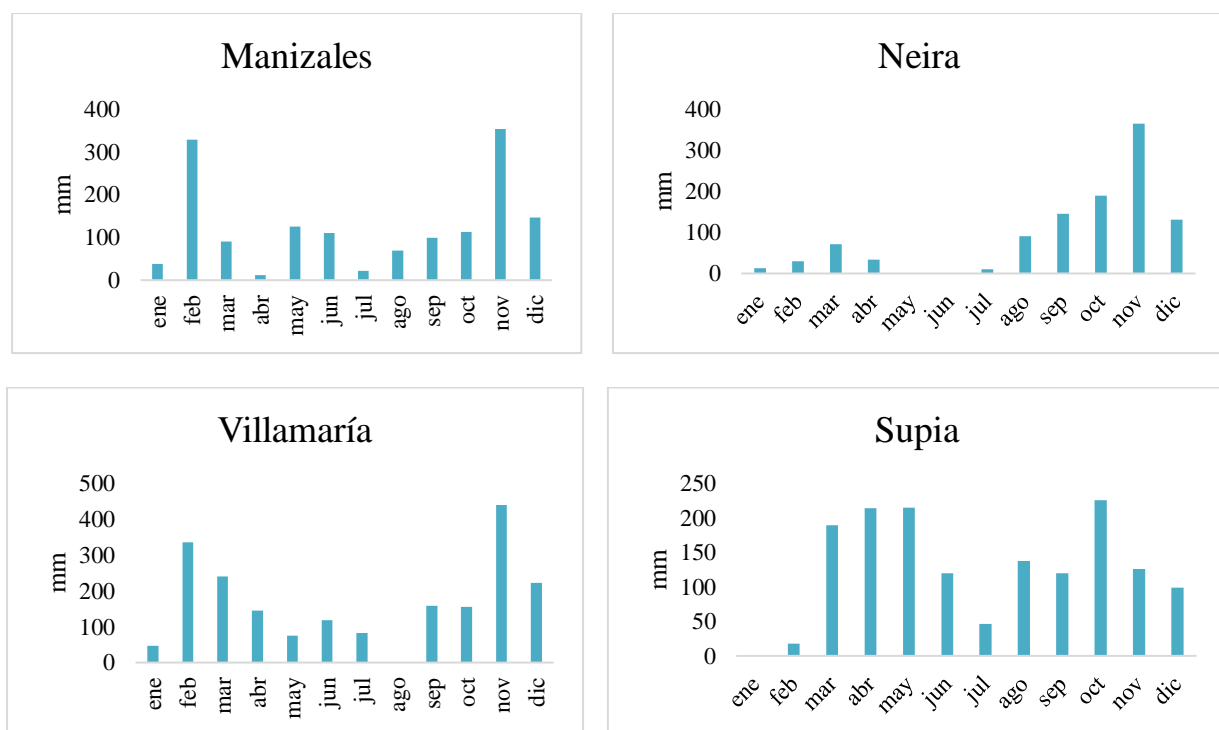


Figura 3.2. Ejemplos de precipitación mensual (mm) en diferentes zonas de Caldas.

Debido a estas características, el inventario se realizó para un día característico del periodo seco (06 de enero del 2013) y otro del periodo húmedo (29 de noviembre del 2013) donde para cada día se hicieron cálculos horarios. Se tomó como año base el 2013 por ser denominado un año con condiciones normales (NOAA 2016) y por tener la base de datos meteorológica más completa.



La resolución se definió teniendo en cuenta varios aspectos como los que se mencionan a continuación:

- Capacidad computacional: de esta depende el tiempo que tarda una corrida.
- Calidad en los resultados: el tamaño de celda debe ser adecuado para representar las condiciones locales. En el caso del departamento de Caldas, existe gran variabilidad espacial y por tanto se requiere mayor resolución, es decir un tamaño de celda menor. Adicionalmente, para mejorar los resultados se requiere contar con gran cantidad y buena información meteorológica de manera que se represente adecuadamente las variaciones del área de estudio.
- Resolución del DEM y del mapa de coberturas: como todos los mapas de entrada al modelo tienen que tener la misma escala y dimensiones, se debe tener en cuenta la resolución de la información cartográfica que se va a utilizar ya que la resolución en el modelo depende de la mínima con que se generaron los mapas originalmente.

El resultado del anterior análisis para este caso es una matriz cuadrada similar a la que se muestra en la Figura 3.3 donde el tamaño de celda se definió de 90x90 metros dando como resultado un área rectangular conformada por 1203x1600 celdas. El área debe tomarse como una matriz rectangular con fines de cálculo en Matlab para que permita visualizar la información final en forma de mapas en SIG una vez concluidos los cálculos. Sin embargo, celdas que no son parte del área de estudio no son tenidas en cuenta en los cálculos en el programa en Matlab para que no afecte los resultados.

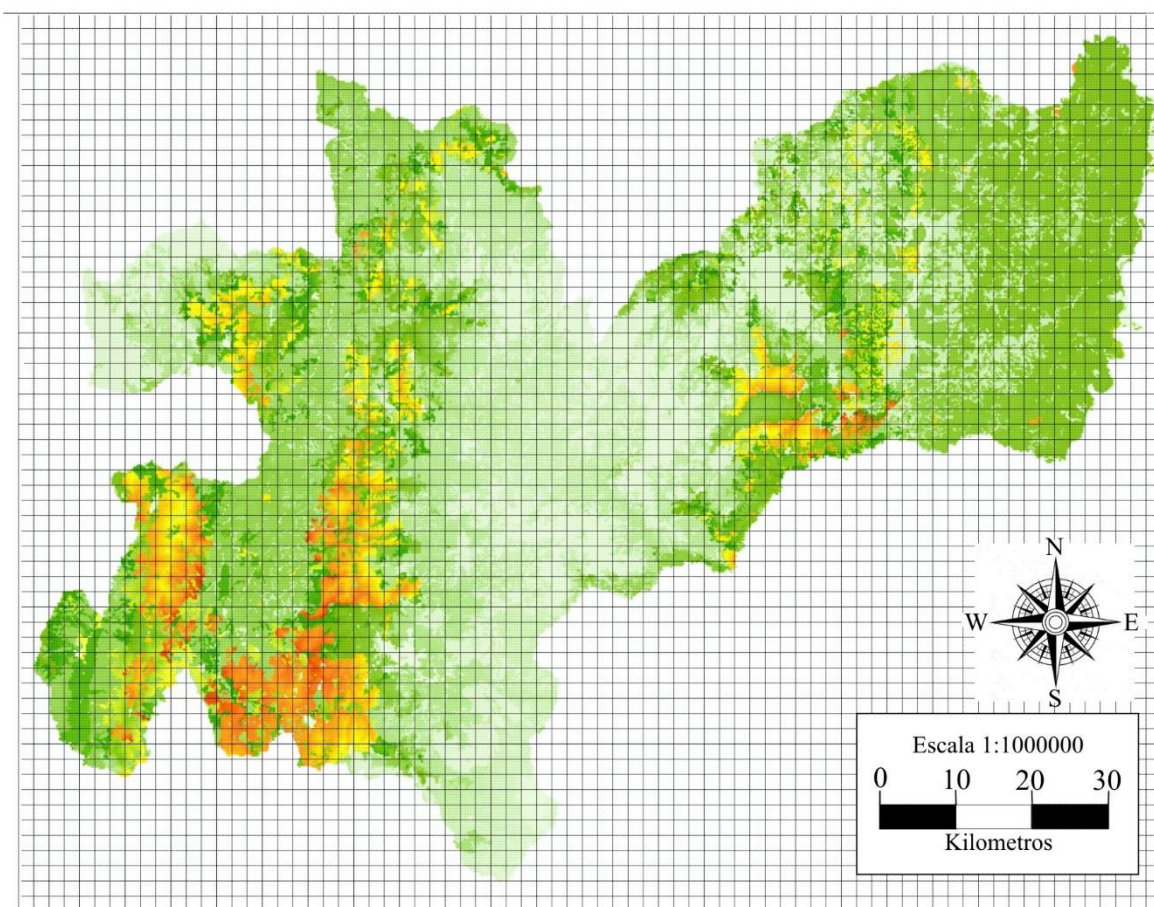


Figura 3.3. Ejemplo de cuadrícula del modelo  
Fuente: Autor

### **Obtención de la información**

Para alimentar el código se usan datos de entrada como los que se mencionan a continuación. Es importante resaltar que la información usada aquí es pública y de importancia para cada región, por lo que normalmente cada departamento la genera y en la mayoría de ocasiones se puede acceder on-line o solicitar gratuitamente.

### **Datos locales de temperatura y radiación solar**

El modelo necesita estos datos según la escala temporal elegida, para este caso que la temporalidad seleccionada fue horaria, se generaron datos de temperatura y radiación solar cada hora para cada celda de la región de estudio. Para obtener esto se toman datos puntuales en formato vectorial que posteriormente se interpolan y se convierten a Raster.

En Caldas, estos datos fueron tomados de las estaciones de clima de la región, los cuales fueron descargados vía on-line en el sitio web [cdiac.manizales.unal.edu.co](http://cdiac.manizales.unal.edu.co) (UN & CORPOCALDAS 2014). El departamento contaba con 62 estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas en el año 2013. A los datos originales se les realizó una depuración seleccionando sólo las estaciones que tenían un porcentaje de datos mayor al 90% para los periodos de estudio, dando como resultado 17 estaciones con información de temperatura y 12 con información de radiación solar, las especificaciones de los equipos que monitorean estas variables climáticas se dan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Especificaciones de los equipos de radiación solar y temperatura

Características	Radiación Solar	Temperatura
Resolución y unidades	1 W m <sup>-2</sup>	0.1°F o 1°F o 0.1°C o 1°C
Rango	0 a 1800 W m <sup>-2</sup>	-40° a +150°F (-40° a +65°C)
Exactitud	±5	±0.5°F (±0.3°C)
Intervalo de actualización	50 segundos a 1 minuto (5 minutos en noche)	1 minuto
Respuesta espectral	400 a 1100 nanómetros	NA

### Información espacial de vegetación

Se requieren datos de cantidad y tipo de vegetación en el área de estudio en formato Raster, los cuales fueron obtenidos del mapa de uso y cobertura del suelo de Caldas escala 1:100.000 construido por el Instituto Agustín Codazzi (IGAC 2017) para el año 2010 (Figura 3.4). A pesar de que el mapa pertenece al año 2010, consultas con expertos permitieron concluir que no hubo cambios significativos en las coberturas entre esos años. El mapa se elaboró con base en la metodología CORINE Land Cover adaptada para el país. Esta leyenda fue estructurada de manera jerárquica, derivando las unidades de cobertura de la tierra con base en criterios fisonómicos de altura y densidad (Costa et al. 2010). Está dividido en cinco (5) clases que son las que se referencian en la Figura 3.4 pero también cada clase tiene subclases como lo muestra la Tabla 3.2 y si se quiere mejor resolución y detalle, se pueden consultar las coberturas que se derivan de cada subclase. La Tabla 3.3 muestra aquellas clases, subclases y coberturas que pertenecen a fuentes biogénicas. En cada una de las tablas anteriores está el porcentaje del área que representa cada tipo de clase, subclase o cobertura respecto al mapa total.

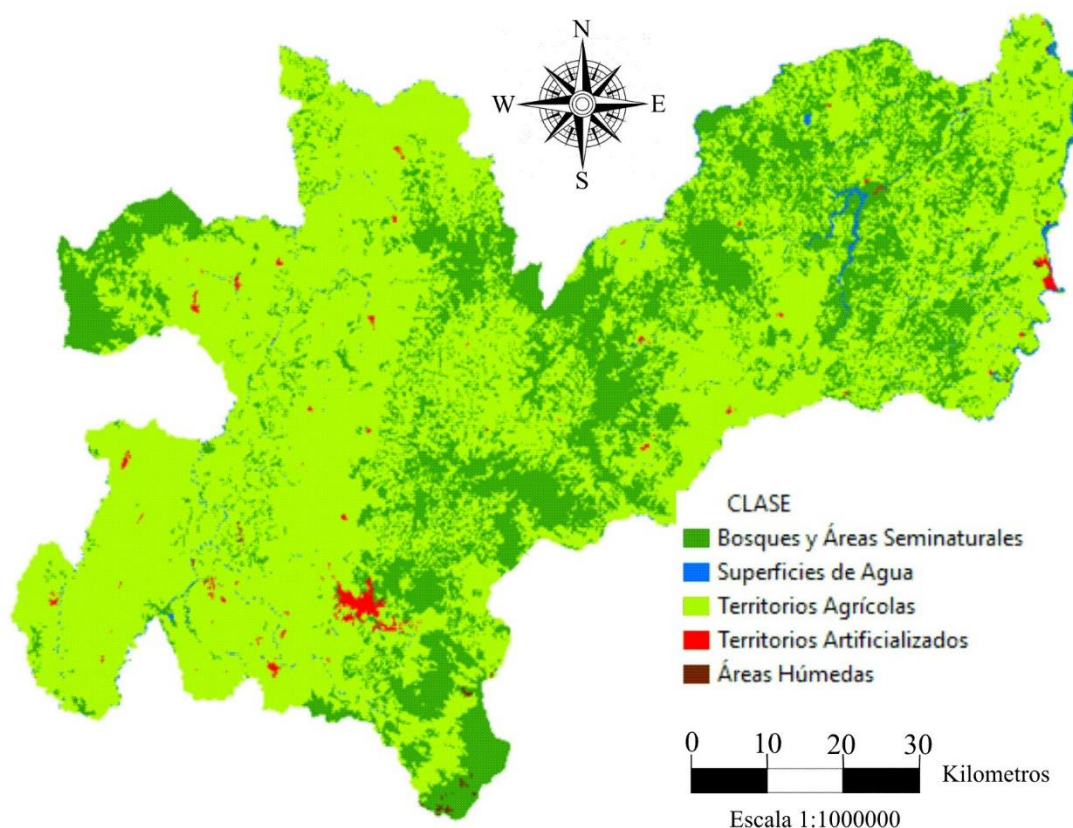


Figura 3.4. Mapa de uso y cobertura del suelo identificado por clases según la metodología Corine Land Cover. Fuente: (CORPOCALDAS 2015)

Tabla 3.2. Clases y subclases del mapa de uso y coberturas del suelo de Caldas con su respectiva área

CLASE O SUBCLASE	AREA (km <sup>2</sup> )	% AREA
Áreas Húmedas	6	0.1%
Áreas Húmedas Continentales	6	0.1%
Bosques y Áreas Seminaturales	2,164	29.1%
Áreas Abiertas, sin o poca Vegetación	36	0.5%
Áreas de Vegetación Herbácea y/o Arbustiva	444	6.0%
Bosques	1,684	22.6%
Superficies de Agua	70	0.9%
Aguas Continentales	70	0.9%
Territorios Agrícolas	5,151	69.3%
Áreas Agrícolas Heterogéneas	1,756	23.6%
Cultivos Anuales y Transitorios	6	0.1%
Cultivos Permanentes	831	11.2%
Pastos	2,557	34.4%
Territorios Artificializados	43	0.6%
Total general	7,435	100.0%

Fuente: (CORPOCALDAS 2015)

*Estimación de un Inventario de Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles Generados por Fuentes Biogénicas para el Departamento de Caldas*

El 98.4% del suelo de Caldas está cubierto de vegetación lo que se considera una porción importante que puede aportar significativamente a las emisiones de COV.

Tabla 3.3. Subclases y coberturas de Caldas con su porcentaje de área de Territorios Agrícolas y de Bosques y Áreas Seminaturales

Territorios Agrícolas		Bosques y Áreas Seminaturales	
	%		%
<b>Áreas Agrícolas Heterogéneas</b>	<b>23.6</b>	<b>Áreas Abiertas, sin o poca Vegetación</b>	<b>0.5</b>
Mosaico de cultivos	0.5	Afloramientos rocosos	0.3
Mosaico de cultivos con espacios naturales	0.2	Arenales	0.0
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	10.4	Playas	0.0
Mosaico de pastos con espacios naturales	5.7	Playas, arenales y dunas	0.0
Mosaico de pastos y cultivos	6.8	Tierras desnudas o degradadas	0.1
<b>Cultivos Anuales y Transitorios</b>	<b>0.1</b>	Zonas glaciares y nivales	0.1
Cebolla junca	0.0	Zonas quemadas	0.0
Hortalizas	0.0	<b>Áreas de Vegetación Herbácea y/o Arbustiva</b>	<b>6.0</b>
Otros cultivos transitorios	0.1	Arbustal denso	3.5
Papa	0.0	Herbazal denso de tierra firme	0.1
<b>Cultivos Permanentes</b>	<b>11.2</b>	Herbazal denso de tierra firme no arbolado	0.0
Café a plena exposición	2.5	Herbazal denso inundable	0.0
Café con semisombra	0.1	Herbazal denso inundable no arbolado	0.0
Café con semisombrío	5.7	Vegetación secundaria o en transición	2.4
Café con sombra	0.0	<b>Bosques</b>	<b>22.6</b>
Café con sombrío	1.5	Bosque de galería y ripario	1.6
Caña de azúcar	0.6	Bosque denso alto de tierra firme	16.0
Caña panelera	0.8	Bosque denso bajo de tierra firme	0.0
Cítricos	0.0	Bosque fragmentado con pastos y cultivos	4.3
Cultivos permanentes herbáceos	0.0	Bosque fragmentado con vegetación secundaria	0.0
Otros cultivos permanentes arbóreos	0.0	Plantación de coníferas	0.8
Otros cultivos permanentes herbáceos	0.0	Plantación de latifoliadas	0.0
Otros cultivos transitorios	0.0		
<b>Pastos</b>	<b>34.4</b>		
Pastos arbolados	0.4		
Pastos enmalezados	2.5		
Pastos enmalezados o enrastrados	0.8		
Pastos limpios	30.7		

## Factores de emisión

Conociendo la incertidumbre que puede generar un modelo y más si no se tienen FE propios de la región, se realizó validación mediante criterio de expertos. Esta validación se hizo con la ayuda del profesor Alex Guenther y su grupo de investigación en University of California Irvine. El Dr. Guenther es un líder internacional en fuentes biogénicas que ha desarrollado y ayudado a desarrollar los modelos más usados en el campo como lo son GLOBEIS, BEIS y MEGAN además de numerosos estudios basados en mediciones de COV provenientes de plantas e inventarios a nivel mundial.

Se realizó revisión de los FE utilizados inicialmente, donde los datos que se tenían eran a nivel hoja, basados en (Arey et al. 1991), (König et al. 1995), (Guenther et al. 1995), (Guenther, Jiang, et al. 2012) y (Owen et al. 1997), tal como se muestra en la Tabla 3.4. Estos datos son normalizados a condiciones de referencia hablando en términos de emisiones biogénicas que incluyen temperatura de la hoja (30 °C) y Photosynthetically Active Radiation –PAR ( $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) que es la radiación emitida en el rango espectral donde ocurre la actividad fotosintética en las plantas (400-700 nanómetros).

Del análisis de los FE de emisión de la Tabla 3.4 se encontró que algunos FE reportados en la bibliografía no presentan la fuente primaria con lo que no se podía validar la calidad del dato. Viendo esto, se sugirió cambiarlos también teniendo en cuenta que en los últimos años se han mejorado las técnicas de medición, se están usando ambientes controlados y análisis más precisos por lo que se considera más confiable usar datos recientes. Por otra parte, se ha encontrado que resultados más aproximados a datos reales se obtienen con factores de emisión a nivel de dosel (Guenther, Jiang, et al. 2012).



Tabla 3.4. Potenciales de emisión en peso seco iniciales, normalizados a temperatura de hoja de 30 °C y PAR de 1000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Isopreno	MT Ps	OCOV	Descripción	Nombre en la bibliografía	Encontrados inicialmente en	Referencia principal
<b>(<math>\mu\text{g m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}</math>)</b>						
9.6	24	14.4	Papa	Potato	(Toro G. et al. 2001)	No encontrado
42.5	42.5	693.7	café	Coffee	(Toro G. et al. 2001)	No encontrado
7000	150	140	Bosques	Broadleaf evergreen tropical tree	(Guenther et al. 2012)	(Guenther, Jiang, et al. 2012)
600	180	140	cultivo de coníferas	Needleleaf evergreen temperate tree	(Guenther et al. 2012)	(Guenther, Jiang, et al. 2012)
<b>(<math>\mu\text{g g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}</math>)</b>						
0.09	0.13	1.5	Áreas agrícolas heterogéneas	Misc. Crops default	(WMO & UNEP n.d.)	(Arey et al. 1991)
0	0.1	1.5	Pastos	Recommended default for grassland	(IPCC 2006)	(König et al. 1995)
0.001	0.02	1.5	Pastos enmalezados	Grassland A1	(IPCC 2006)	(König et al. 1995)
0.002	0.1	1.5	Otros cultivos permanentes herbáceos	Recommended default for grass related crops	(IPCC 2006)	(König et al. 1995)
0.002	0.1	1.5	Caña de azúcar, caña de panela	Recommended default for grass related crops	(IPCC 2006)	(König et al. 1995)
8	0.65	1.5	Matorrales, vegetación secundaria	Maquis	(IPCC 2006)	(Owen et al. 1997) (Guenther et al. 1995)
8	0.65	1.5	Áreas glaciares y nivales	Moorland/heathland	(IPCC 2006)	(IPCC 2006)
0	20	1.5	latifoliadas	default evergreen Oak#1	(IPCC 2006)	(IPCC 2006)
8	0.65	1.5	Zonas pantanosas, Turberas, Herbazales abiertos, Helechal	Garrique	(IPCC 2006)	(Owen et al. 1997) (Guenther et al. 1995)

Por lo tanto, se decidió trabajar con los FE que usa MEGAN 2.1 (Guenther, Jiang, et al. 2012), los cuales fueron determinados a partir de los Plant Functional Types –PFT definidos en el Community Land Model versión 4 -CLM4. Entonces se realizó nuevamente el procedimiento de agrupación de las coberturas del mapa de uso y coberturas del suelo de tal manera que se adecuaron a los PFT que utilizan los FE de MEGAN, como se describe en esta tesis.

## **Análisis de datos y pre-procesamiento de la información**

### Correlaciones con la altitud para temperatura y radiación solar

Las condiciones topográficas influyen en gran medida el clima de una región, por lo cual es importante determinar el grado de correlación de la altitud sobre cada variable meteorológica para determinar el tipo de interpolación a aplicar. Los procesos de interpolación para temperatura y radiación solar, se pueden realizar por técnicas como Kriging, IDW (Inverse Distance Weighted), vecino natural, spline, entre otros ajustando por la altitud si se encuentra relación. Se deben probar las diferentes técnicas para determinar las que proporcionan el mejor nivel de ajuste, validando con la información real. Técnicas de interpolación geoestadísticas son generalmente herramientas poderosas para realizar mapas de temperatura de alta resolución (Fries, Rollenbeck, Göttlicher, et al. 2012). Variables como la pendiente, la altitud y la posición geográfica mejoran las interpolaciones y estas pueden ser obtenidos con la ayuda de un DEM (Fries, Rollenbeck, NauB, et al. 2012). Sin embargo, las técnicas de interpolación son más exitosas cuando existe una amplia cobertura de estaciones.

Se ha demostrado que la temperatura presenta alta correlación con la topografía (Fries, Rollenbeck, Göttlicher, et al. 2012; Goodale et al. 1998) por lo cual los métodos de interpolación deben incluir la altitud. Para corroborar esto se calcularon correlaciones lineales en Excel para así evaluar la posibilidad de aplicar un método de interpolación que tenga en cuenta la elevación. Si los resultados dan un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) mucho menor que 1 (entre 0 y 0.7) significa que la altitud no tiene una influencia significativa y se debe hacer interpolación directa, mientras que si  $R^2$  es cercano a 1 (entre 0.8 y 1) es importante tener en cuenta la elevación y aplicar un modelo con la altitud para interpolar. En este caso, el procesamiento y la extrapolación de los datos se realiza siguiendo la metodología descrita por Fries (Fries, Rollenbeck, NauB, et al. 2012), que evalúa los datos meteorológicos en superficie de una región montañosa teniendo en cuenta el gradiente altitudinal.

La metodología consiste en eliminar el efecto de la altitud sobre los valores estandarizando todas las estaciones de temperatura seleccionadas con respecto a un nivel de referencia, ecuación 3.2.

$$T_{DET} = T_h + (\Gamma * (Z_{DET} - Z_{REAL})) \quad (Ec. 3.2)$$



Donde  $T_h$  es la temperatura real promedio a una hora determinada (K),  $\Gamma$  es la pendiente de la recta que se obtiene con la ecuación de la correlación lineal,  $Z_{DET}$  es una altura de referencia escogida en m.s.n.m, (en este caso se tomó cero (0)) y  $Z_{REAL}$  es la altura real de la estación. Se debe tener en cuenta que para que esta metodología dé resultados confiables la correlación debe ser mayor al 80%.

Posteriormente, se interpolaron los datos de temperatura homogenizada a cero que fue la altitud escogida,  $T_{DET}$ , en el software ArcGis utilizando IDW. Luego con un DEM obtenido de la NASA (Figura 3.5) de 90x90 metros (resolución basada en el Ecuador) se calculó la temperatura para cada celda utilizando la Ecuación 3.3 y la herramienta Calculator de ArcGis.

$$T_{(x,y)} = T_{DET} + \left( \Gamma * (Z_{(x,y)}^{DEM} - Z_{DET}) \right) \quad (Ec. 3.3)$$

Donde  $Z_{(x,y)}^{DEM}$  es la altitud en cada celda x, y en el DEM (m.s.n.m).

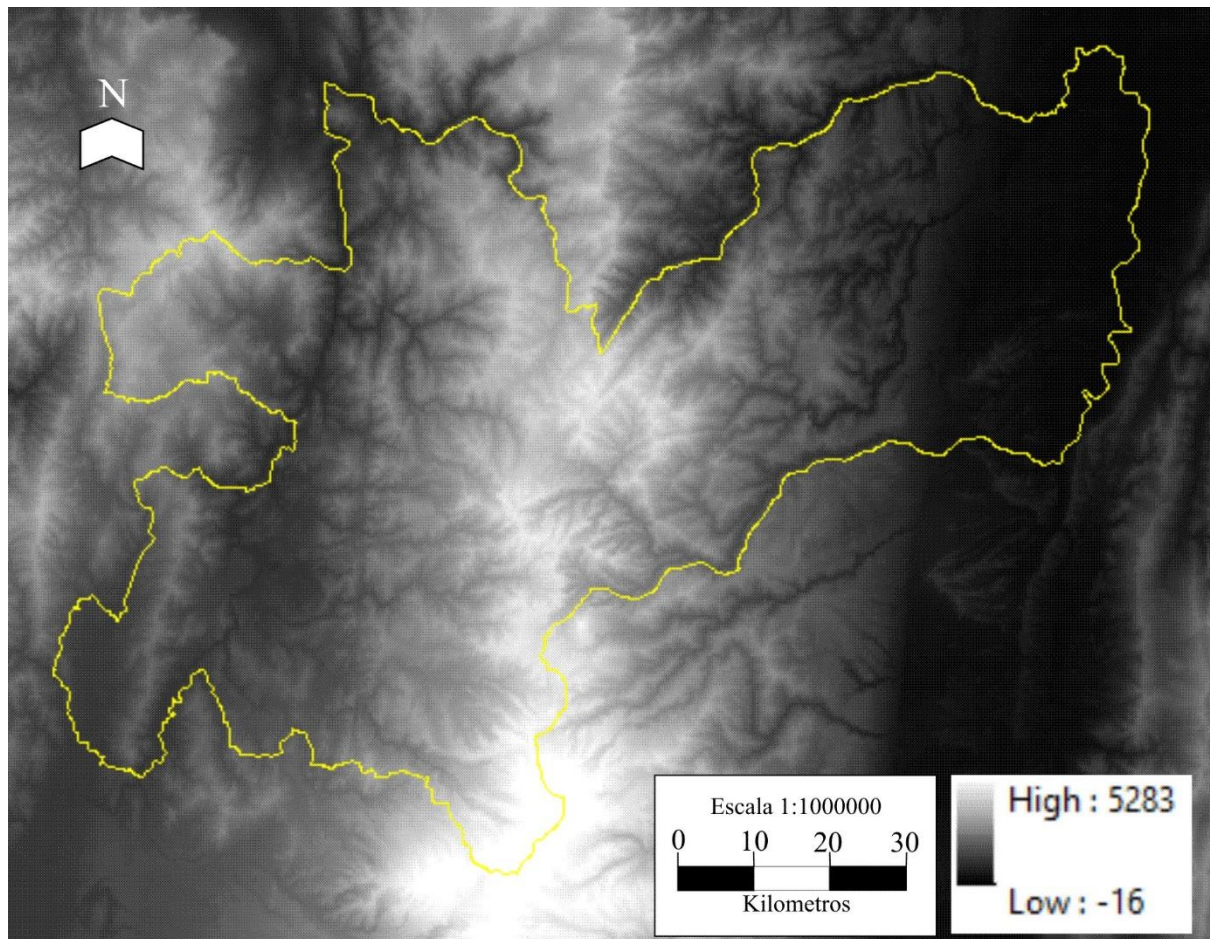


Figura 3.5. Digital Elevation Model de 90x90m para Caldas.

Fuente: <https://asterweb.jpl.nasa.gov>

Diversos estudios han demostrado que la elevación no influencia significativamente la radiación solar ya que también es bastante sensible a nubosidad, precipitación y smog atmosférico (Goodale et al. 1998; Kumar et al. 1997). Por esto, se han desarrollado varios métodos basados en relaciones físicas y empíricas para calcular la radiación solar en horas diurnas. Sin embargo, Goodale et al (Goodale et al. 1998) encontró que en regiones húmedas los métodos de interpolación con topografía no predicen apropiadamente la radiación solar, obteniendo coeficientes de correlación muy bajos entre los valores predichos y los observados. Un factor importante de esto es la alta nubosidad que se suele presentar en regiones montañosas (Hardy et al. 1998). Considerando esto se decide no aplicar un modelo matemático en función de la altitud para radiación solar ya que puede aumentar los errores de los resultados, por lo tanto se aplica la interpolación directa IDW (Goodale et al. 1998; Fries, Rollenbeck, NauB, et al. 2012).

Con lo anterior, tanto para temperatura como para radiación solar se obtienen mapas interpolados con un área rectangular de los cuales se debe extraer la información del área de estudio, en este caso mediante la herramienta “Extraer por máscara” de ArcGis, usando como máscara el mapa de coberturas. Sin embargo, se puede usar como máscara cualquier shape, lo importante es que todos los mapas deben tener exactamente las mismas dimensiones.

### Determinación de los factores de emisión

En este paso se transforma el mapa de uso y coberturas del suelo en términos de factores de emisión. Para esto se reclasificó el mapa usando códigos asignados para cada factor de emisión con la herramienta “Reclasify” de ArcGis, obteniendo finalmente un mapa con un número reducido de coberturas. Para lograr esto, se buscaron factores de emisión a nivel canopy en la bibliografía que se ajustaran a las coberturas de la región. Ya que Colombia no tiene factores de emisión biogénicos, se buscó información tan aproximada como fuera posible teniendo en cuenta las condiciones tropicales. Después de un análisis exhaustivo con personal experto, se decidió hacer ésta primera estimación usando los factores de emisión que fueron estimados usando los algoritmos MEGAN2.1 en Community Land Model versión 4 -CLM4 para el año 2000 (Guenther, Jiang, et al. 2012). Estos diferencian 15 tipos funcionales de plantas (PFT o *Plant Functional Type* por sus siglas en inglés), de los cuales se usaron los que se ajustan a los tipos de cobertura especificados en el mapa de uso y

coberturas de la región de estudio. Éstos fueron escogidos porque presentan FE nivel canopy como lo requiere este modelo y porque han sido actualizados con nuevos estudios. Así las coberturas fueron reclasificadas con nuevos códigos donde cada uno representa un tipo de vegetación seleccionado según los factores de emisión encontrados en la bibliografía, así como está en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Códigos asignados según grupos de vegetación

Descripción	Tipo de FE	Código
Zonas artificializadas menos zonas verdes, superficies de agua, zonas húmedas sin vegetación, arenos	NA	10
Cultivos bajos o no categorizados	ET15: CLM/PFT15: crop 1	20
Papa	ET16: CLM/PFT16: crop 2	21
Café	ET16: CLM/PFT16: crop 2	22
Pastos limpios, enmalezados	ET13: CLM/PFT13: cool C3 grass	23
Pastos Arbolados	ET13: CLM/PFT13: cool C3 grass	231
Otros cultivos permanentes herbáceos	ET15: CLM/PFT15: crop 1	24
Caña de azúcar, caña panelera	ET16: CLM/PFT16: crop 2	25
Bosques	ET4: CLM/PFT4- broadleaf evergreen tropical tree	30
Matorrales, vegetación secundaria	ET9: CLM/PFT9: broadleaf evergreen temperate shrub	31
Zonas glaciares y nivales	ET12: CLM/PFT12: arctic C3 grass	32
Plantaciones de coníferas	ET1: CLM/PFT1- needleleaf evergreen temperate tree	33
latifoliadas	ET6: CLM/PFT6: broadleaf deciduous tropical tree	34
Zonas pantanosas, Turberas, Herbazales abiertos, Helechal	ET9: CLM/PFT9: broadleaf evergreen temperate shrub	41

Esta reclasificación fue aplicada a cada una de las 59 coberturas del mapa de uso y cobertura del suelo de Caldas como se ve en la Tabla 3.6 donde se sustituye el código fuente definido en la metodología Corine Land Cover por el nuevo código.

Tabla 3.6. Reclasificación de las coberturas del mapa de uso y coberturas del suelo de Caldas

COBERTURA	CODCOB	Nueva clasificación
Tejido urbano continuo	111	10
Tejido urbano discontinuo	112	10
Zonas industriales o comerciales	121	10
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	122	10
Aeropuertos	124	10
Zonas de extracción minera	131	10

<b>COBERTURA</b>	<b>CODCOB</b>	<b>Nueva clasificación</b>
Zonas verdes urbanas	141	41
Instalaciones recreativas	142	10
Otros cultivos transitorios	211	20
Hortalizas	214	20
Cultivos permanentes herbáceos	221	20
Pastos limpios	231	23
Pastos arbolados	232	231
Pastos enmalezados	233	23
Mosaico de cultivos	241	20
Mosaico de pastos y cultivos	242	20
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	24
Mosaico de pastos con espacios naturales	244	23
Mosaico de cultivos con espacios naturales	245	20
Bosque de galería y ripario	314	30
Vegetación secundaria o en transición	323	41
Playas, arenales y dunas	331	10
Afloramientos rocosos	332	10
Tierras desnudas o degradadas	333	10
Zonas quemadas	334	10
Zonas glaciares y nivales	335	32
Zonas pantanosas	411	41
Turberas	412	41
Ríos	511	10
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	512	10
Cuerpos de agua artificiales	514	10
Áreas turísticas	1.423	10
Papa	2.151	21
Otros cultivos permanentes herbáceos	2.211	20
Otros cultivos permanentes arbóreos	2.231	20
Cítricos	2.233	20
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	3.131	31
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	3.132	30
Plantación de coníferas	3.151	33
Plantación de latifoliadas	3.152	34
Arbustal denso	3.221	31
Playas	3.311	10
Arenales	3.312	10
Embalses	5.141	10
Condominios	14.231	10
Cebolla junca	21.411	20
Caña de azúcar	22.121	25
Caña panelera	22.122	25

COBERTURA	CODCOB	Nueva clasificación
Café a plena exposición	22.221	22
Café con semisombra	22.222	22
Café con semisombrío	22.223	22
Café con sombra	22.224	22
Café con sombrío	22.225	22
Bosque denso alto de tierra firme	31.111	30
Herbazal denso de tierra firme	32.111	31
Herbazal denso inundable	32.112	31
Bosque denso bajo de tierra firme	311.221	31
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	321.111	31
Herbazal denso inundable no arbolado	321.121	31

Los mapas resultantes de temperatura, radiación solar y el de factores de emisión se exportaron a formato ASCII y estos fueron los archivos de entrada al modelo en MATLAB.

## Aplicación del modelo

El código ( Figura 3.6) realiza el cálculo de emisiones por cada tipo de vegetación, celda por celda obteniendo valores totalmente discretizados (Figura 3.7), lo que permite visualizar los resultados según el lugar de ocurrencia.

Figura 3.6. Pantallazo del código realizado en Matlab

```

91 - [fill, coll]=find(T);
92
93 - for k=1:length(fill)
94 -     [fil, ~]=find(Femision(:,1)==Cob(fill(k), coll(k)));
95 -     dens=Femision(fil,5);
96
97 -     %Cálculo isoprenos
98 -     EFiso=Femision(fil,2);
99 -     Flujoiso{j,1}(fill(k), coll(k))=EFiso*dens*FCiso(fill(k), coll(k)); %ug m-2 h-1
100
101
102 -     %Cálculo monoterpenos
103 -     EFmono=Femision(fil,3);
104 -     Flujomono{j,1}(fill(k), coll(k))=EFmono*dens*FCmono(fill(k), coll(k));
105
106 -     %Cálculo otros
107 -     EFotros=Femision(fil,4);
108 -     Flujootros{j,1}(fill(k), coll(k))=EFotros*dens*FCotros(fill(k), coll(k));
109
110 -     %Cálculo de la emisión

```

El modelo da como resultado, matrices con los flujos de COV por celda que pueden ser visualizadas en un Sistema de Información Geográfica -SIG, además de obtener flujos horarios y totales.

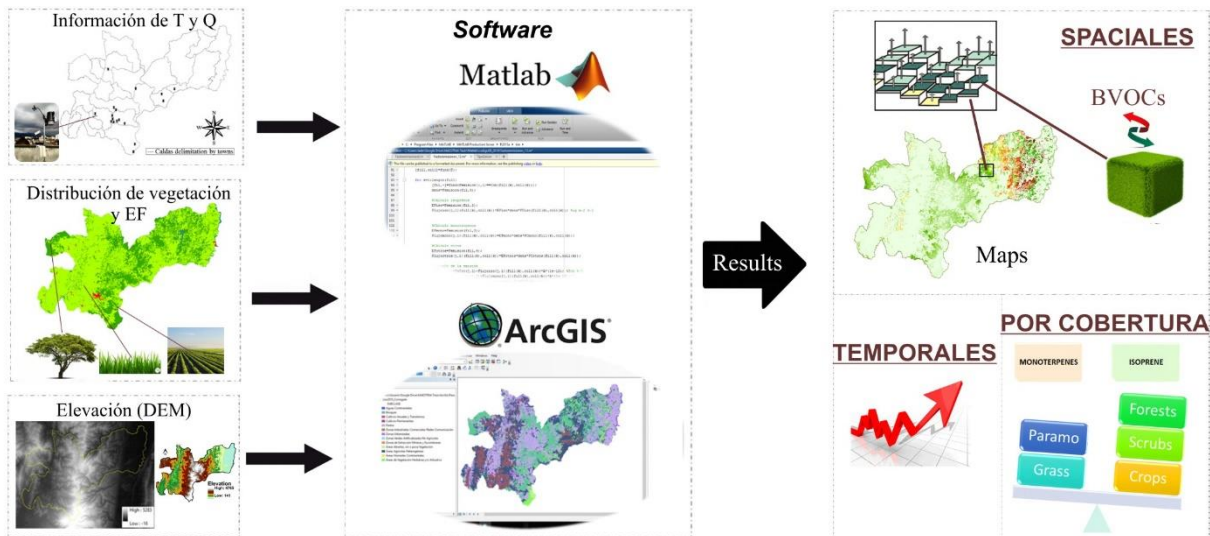


Figura 3.7. Esquema gráfico que explica cómo el modelo BIGA procesa la información por celdas para calcular COVB.

## Cálculos anuales

Para los resultados se realizaron estimados anuales extrapolando la información diaria. El año para el cual se tomó la información meteorológica (2013) tuvo 128 días secos y 237 días húmedos, es decir, el 65% del año llovió en Caldas, comportamiento típico de un año normal. El cálculo de las emisiones por especie se realizó como lo define la Ecuación 3.4.

$$E_{ij} = ds * F_s + dh * F_h \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde:

i= Tipo de compuesto que puede ser isopreno, monoterpenos u otros COVB

j= Tipo de ecosistema según los definidos en la Tabla 3.5

$E_{ij}$ = Emisión del compuesto i por el ecosistema j

$ds$ = Número de días secos en el año

$dh$ = Número de días húmedos en el año

$F_s$ =Flujo total compuesto i por el ecosistema j para día seco

$F_h$ = Flujo total compuesto i por el ecosistema j para día húmedo



### 3.3. RESULTADOS

#### EMISIONES BIOGÉNICAS DE CALDAS

Después de buscar la información meteorológica inicial como se indica en la metodología, se obtuvieron 17 estaciones con información para temperatura y 12 para radiación solar. Su ubicación espacial se muestra en la Figura 3.8. En la Tabla 3.7 y Tabla 3.8 se muestran sus coordenadas exactas.

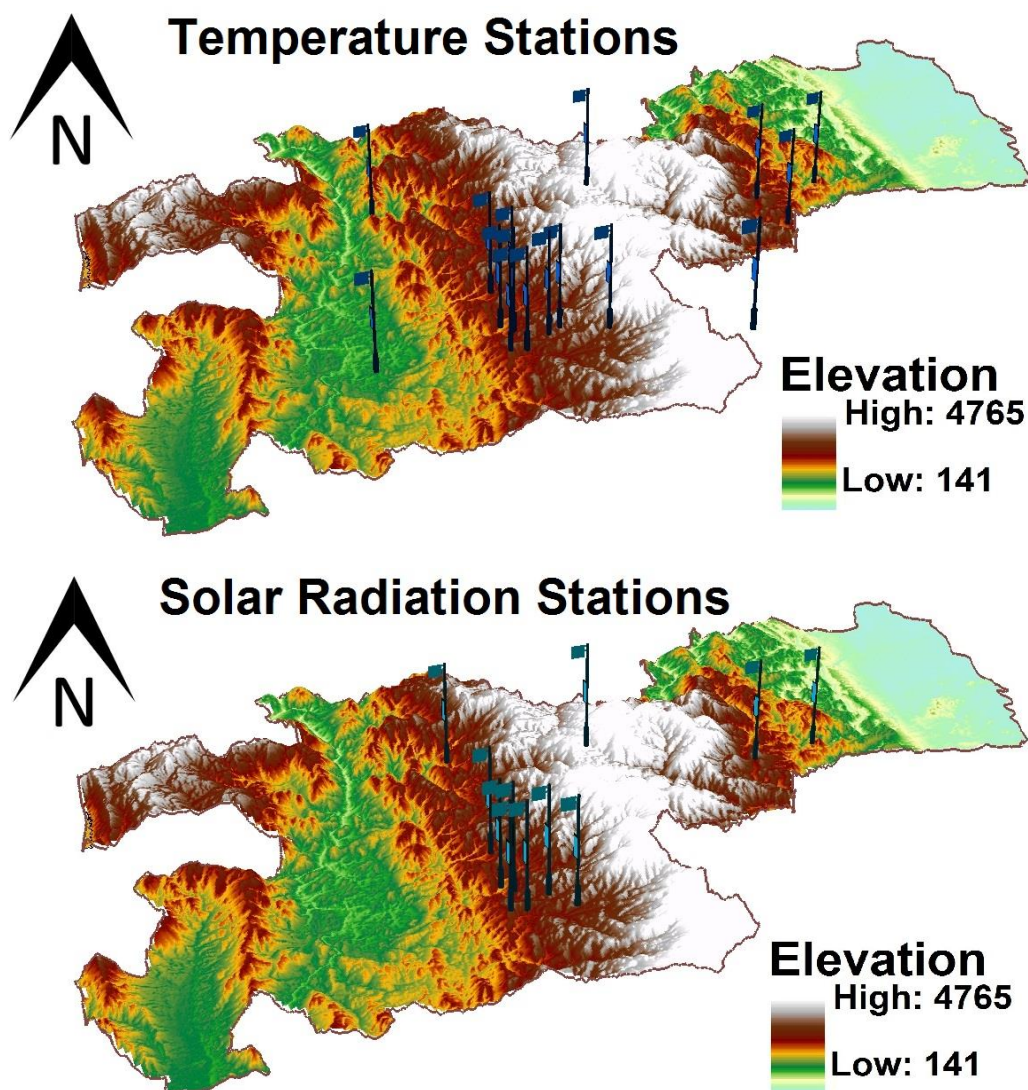


Figura 3.8. Ubicación espacial de las estaciones de temperatura y radiación solar en los municipios del departamento de Caldas

Tabla 3.7. Ubicación de las estaciones seleccionadas de temperatura

Nombre	Latitud	Longitud	Altitud_msnm
T_RioPozo	5,44547222	-75,5599167	840
T_GuacaicaNaran	5,10986111	-75,6584556	929
T_RioSantDomi	5,20897222	-75,1407222	1450
T_Alc_Marq	5,29905556	-75,05725	1591
T_GuacaicaCHEC	5,13980556	-75,49975	1612
T_HospVillaM	5,04844444	-75,5185833	1790
T_checuribe	5,05193056	-75,5350389	1940
T_ViejoBasurero	5,26113889	-75,1539444	1941
T_QOlivares	5,06494444	-75,4772222	1960
T_LaPalma	5,09597222	-75,5294167	1967
T_HogaresJuve	5,15847222	-75,5171389	2053
T_Posgrados	5,05616667	-75,4923056	2179
T_Ingeominas	5,07144444	-75,5243056	2226
T_QuebradaManizale	5,03775	-75,4342389	2314
T_Marulanda	5,30091667	-75,3495278	3110
T_Nereidas	4,88083333	-75,3570833	4450
T_cisneSanta	4,8235	-75,3666389	4812

Tabla 3.8. Ubicación de las estaciones seleccionadas de radiación solar

Nombre	Latitud	Longitud	Altitud_msnm
RS_Alc_Marq	5,29905556	-75,05725	1591
RS_HospVillaM	5,04844444	-75,5185833	1790
RS_checuribe	5,05193056	-75,5350389	1940
RS_ViejoBasurero	5,26113889	-75,1539444	1941
RS_LaPalma	5,09597222	-75,5294167	1967
RS_HogaresJuve	5,15847222	-75,5171389	2053
RS_SalaminaCHEC	5,39041667	-75,4865833	2078
RS_enea	5,02891667	-75,4722222	2092
RS_Posgrados	5,05616667	-75,4923056	2179
RS_Ingeominas	5,07144444	-75,5243056	2226
RS_Marulanda	5,30091667	-75,3495278	3110
RS_cisneSanta	4,8235	-75,3666389	4812



## Interpolaciones espaciales

### Temperatura

Siguiendo la metodología de Fries (Fries, Rollenbeck, Göttlicher, et al. 2012) se obtuvieron factores de correlación superiores a 0.8 en las horas analizadas para la zona de estudio. La Figura 3.9 muestra algunos ejemplos donde se observan estos resultados ( $R^2$  en un rango de 0.85-0.95) lo que significa un alto nivel de ajuste. Las gráficas corroboran que el gradiente altitudinal es inversamente proporcional al cambio de temperatura en la región estudiada.

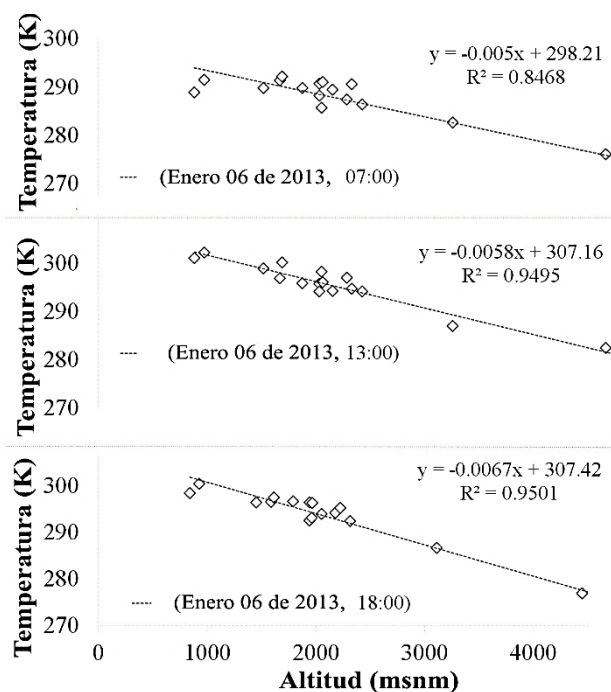


Figura 3.9. Ejemplos de correlaciones lineales de altitud versus temperatura calculadas por horas.

Aplicando las interpolaciones con la metodología de Fries (Ecuaciones 3.2 y 3.3) se obtuvo información de temperatura a lo largo de toda la región en celdas de 90x90 metros.

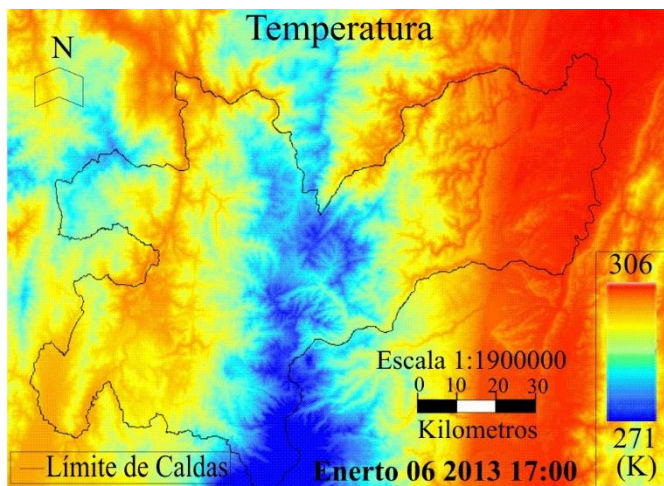


Figura 3.10. Mapas ejemplo de temperatura interpolada teniendo en cuenta la altitud.

En la Figura 3.10 se observa que la zona de estudio tiene un amplio rango de temperaturas que varía significativamente (diferencias de más de 30 K en aproximadamente 100 km de distancia) relacionado con los cambios de altitud. La zona azul marca las menores temperaturas ubicadas en la cordillera central donde existen altas montañas que superan los 5000 msnm. Por el contrario, se evidencia que las temperaturas más altas están en la zona nororiental, es decir, el área más baja del departamento. Estos datos fueron validados por los expertos operadores de las redes hidrometeorológicas de la región.

Un análisis más detallado de esta información, se muestra en la Figura 3.11 donde se observan las temperaturas promedio así como los valores mínimos y máximos de la región en cada hora de los días estudiados, secos y húmedos. Se puede ver que en el día seco las temperaturas cambian fuertemente durante las horas diurnas con valores mayores que en el día húmedo, mostrando diferencias de hasta 5 K. Fries et al., 2012a demostraron que las amplitudes térmicas en regiones montañosas son particularmente bajas durante días lluviosos cuando la nubosidad y la humedad del aire son altas, pero por el contrario son pronunciadamente altas en temporadas secas cuando la radiación aumenta.

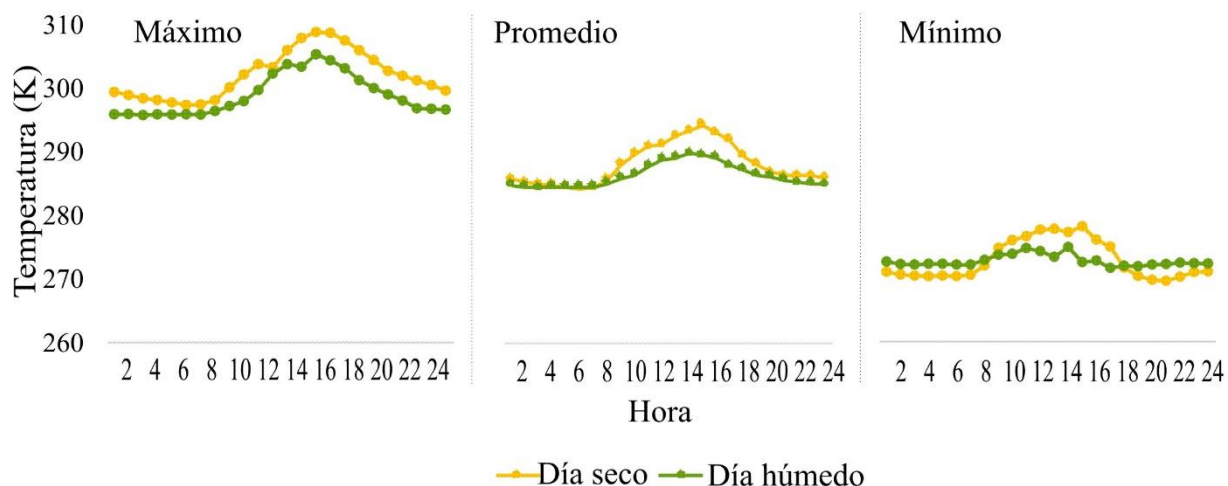


Figura 3.11. Temperaturas promedio y valores máximos y mínimos de cada hora para el día seco y para el día húmedo.

### Radiación solar

Utilizando la metodología descrita para procesar la radiación solar, se obtuvieron los mapas de radiación solar como lo muestra la Figura 3.12 donde se observan puntos con mayor radiación.

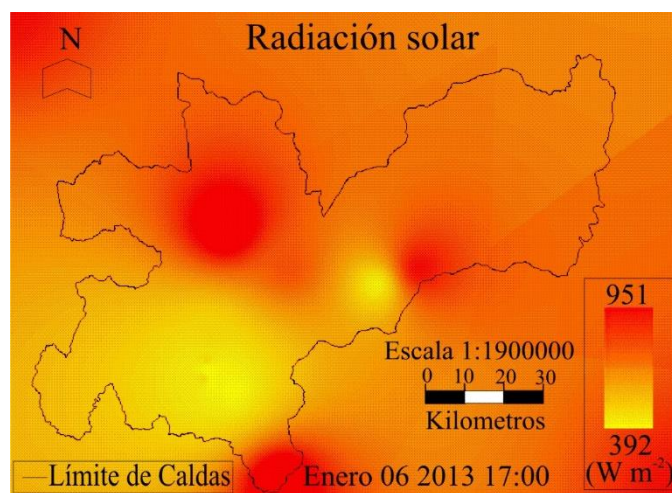


Figura 3.12. Mapa ejemplo de radiación solar interpolada usando IDW

La Figura 3.13 muestra el promedio además de los valores máximos y mínimos de cada hora en la región de estudio. Allí es posible ver que en el día seco las radiaciones diurnas suelen ser altas en toda la región, contrario al día húmedo que tiene una variabilidad o amplitud alta entre los máximos

y mínimos en una misma hora. Lo que puede indicar que en el día húmedo ciertas zonas presentan mayor nubosidad.

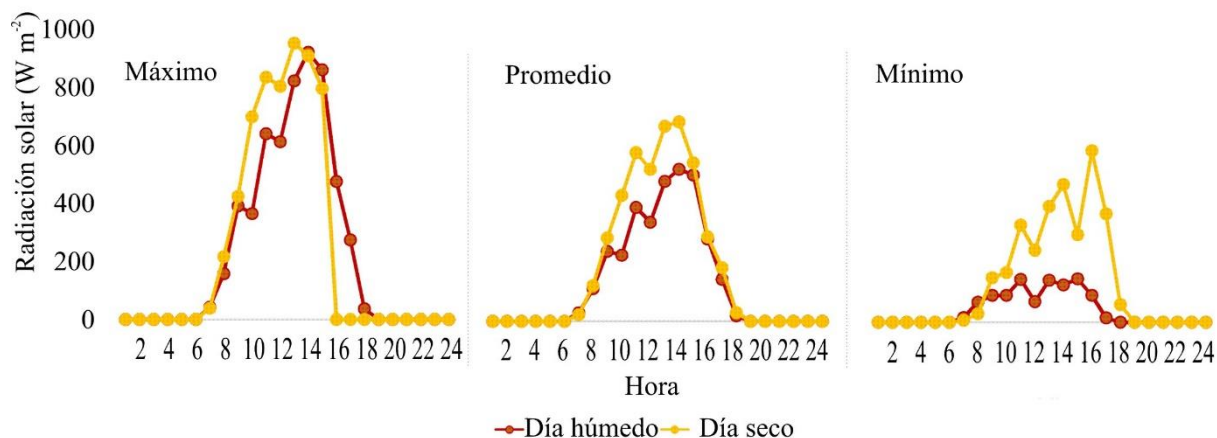


Figura 3.13. Radiaciones solares: promedio y valores máximos y mínimos de cada hora para el día seco y para el día húmedo.

## Información de uso y cobertura del suelo

### Factores de emisión

El mapa de uso y coberturas para Caldas muestra que el suelo está clasificado en cinco (5) clases principales (Figura 3.4) que son áreas húmedas (0.1%), bosques y áreas seminaturales (29.1%), superficies de agua (0.9%), territorios agrícolas (69.3%) y territorios artificializados (0.6%), los cuales a su vez están divididos en otras subclases y coberturas más específicas (Tabla 3.2 y Tabla 3.3) como bosques, matorrales, pastos y cultivos como café, caña y papa. El resultado de la reclasificación del mapa en ArcGis se visualiza en la Figura 3.14 donde los códigos coinciden con la clasificación de la Tabla 3.5 ya que inicialmente las coberturas se reclasificaron así pensando en la importancia y el impacto local que podían causar ciertas especies; un ejemplo son coníferas y latifoliadas que en la región se han convertido en cultivos crecientes para efectos comerciales de madera, existen casos donde se han deforestado los bosques nativos para sembrar estas especies.

Otro ejemplo es el café, especie representativa y principal insumo económico de la región que en general es de gran interés.

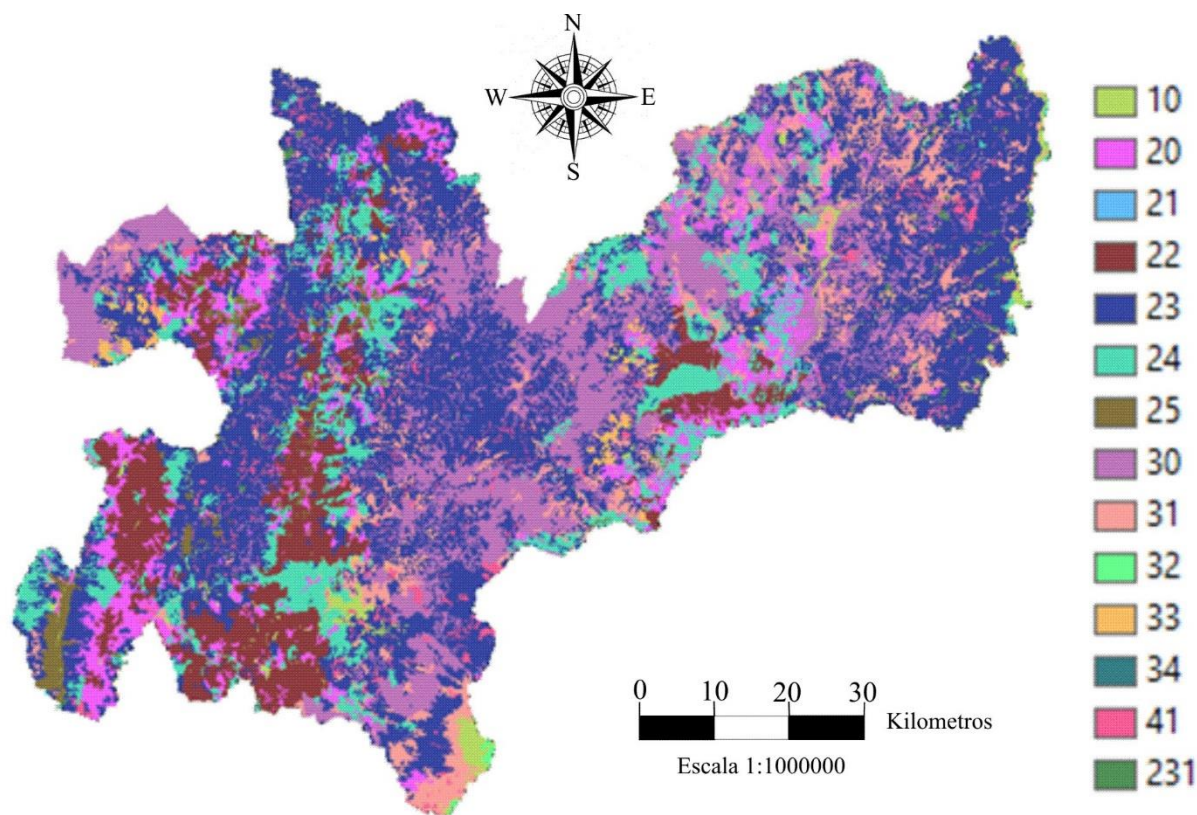


Figura 3.14. Mapa de uso y cobertura del suelo clasificado por factores de emisión definidos en la Tabla 3.5.

De los tipos de vegetación concretados en el mapa reclasificado se definieron aquellas con mayor relevancia como aquellas con áreas significativas como pastos (abarcaban 2557 Km<sup>2</sup> de los 7436 Km<sup>2</sup> del departamento) tanto aquellos que mostraron emisiones significativas después de la primera corrida. Las clasificaciones con menor relevancia se agruparon en categorías similares, según los factores de emisión de cada tipo de vegetación como se ve en Tabla 3.9 donde se muestran los tipos de cobertura en el mapa de uso y cobertura, y su equivalencia en la base de datos de MEGAN2.1, con los factores de emisión usados para dicho modelo.

Tabla 3.9. Factores de emisión a nivel canopy para cada tipo de cobertura considerado adecuados a la región de estudio

Código	Tipo de cobertura en el Mapa de uso y cobertura de Caldas	Equivalente en MEGAN2.1	$\epsilon$ Isopreno ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )	$\epsilon$ Monoterpenos ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )	$\epsilon$ Otros COV ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )
10	Zonas artificializadas menos zonas verdes, superficies de agua, zonas húmedas sin vegetación, areneros	NA	0	0	0
20, 21, 22, 24, 25	Cultivos bajos o no categorizados, otros cultivos permanentes herbáceos, café, papa, cebolla, cítricos.	CLM/PFT15: crop 1	1	13	140
23, 231	Pastos limpios, enmalezados, arbolados	CLM/PFT13: cool C3 grass	6	13	140
30,33, 34	Bosques, coníferas, latifoliadas.	CLM/PFT4- broadleaf evergreen tropical tree	7000	1300	140
31, 41	Matorrales, vegetación secundaria, zonas pantanosas, turberas, herbazales abiertos, Helechal	CLM/PFT9: broadleaf evergreen temperate shrub	2000	670	140
32	Zonas glaciares y nivales	CLM/PFT12: arctic C3 grass	6	13	140

### Primera estimación del modelo BIGA

El modelo fue corrido por primera vez en un computador personal utilizando como sistema operativo Windows 10, procesador AMD A10, un (1) Terabyte de almacenamiento y RAM de 2 Gigas. El tiempo de procesamiento en Matlab de las 48 horas seleccionadas (1 día seco y un día húmedo) fue de nueve (9) minutos. Los resultados arrojaron 144 matrices de 1203x1600 celdas (1 por hora y por tipo de COVB que son isopreno, monoterpenos y otros COVB), 144 totales horarios, y 42 totales por tipo de cobertura. Para estos resultados se considera que el procesamiento fue rápido, aunque el tiempo de procesamiento puede variar según la capacidad del computador, el tiempo analizado, la escala temporal definida, el número de coberturas y principalmente la resolución.

El año 2013 tuvo aproximadamente 237 días con lluvia y 128 días secos los cuales se multiplicaron con sus respectivas emisiones del día dando para este año un estimado total de emisiones para Caldas de 24220 Ton año<sup>-1</sup> de COV. Este valor no pudo ser validado porque no se tienen factores de emisión ni estudios biogénicos en la región, pero comparando con otros resultados de regiones con condiciones similares se permite concluir que es un valor razonable, que está dentro de los rangos de valores obtenidos en otras zonas tropicales (Cárdenas R. 2012) (Toro G. et al. 2001).



El análisis comparativo entre las emisiones producidas en el día seco y el día húmedo permite conocer que las emisiones más altas se dieron en el día seco con 83.6 Ton, mientras que en el día húmedo las emisiones fueron 57.1 Ton de COV. Sin embargo, si se habla de cálculos anuales las mayores cantidades se dan en el periodo húmedo con el 56% de las emisiones totales del año. Esto se presenta porque en la región los días lluviosos abarcan 2/3 del año.

Un análisis más detallado del comportamiento de un día seco y un día húmedo por tipo de COV, se muestra en la Figura 3.15 donde se observa que para cada tipo de COV las mayores emisiones horarias se presentan en el día seco. Las mayores diferencias se encuentran en isopreno donde las emisiones del día seco (46.22 Ton día<sup>-1</sup>) superan en un 59% las emisiones del día húmedo (27.34 Ton día<sup>-1</sup>). Para este COV, los picos de flujos se dan entre las 13:00 y 15:00 horas donde la temperatura y la radiación solar presentan sus mayores valores, así también lo demuestran Greenberg et al. 2004 en un estudio realizado en la Amazonía, donde los mayores flujos se dan cerca del medio día por las condiciones meteorológicas locales. Al respecto, la temperatura máxima en los dos días estudiados fue de 309 K, un valor importante en los análisis ya que investigaciones realizadas por Alves et al. (2014) y Bai et al. (2015b) para plantas representativas de regiones tropicales y templadas respectivamente, demostraron que las emisiones de isopreno y monoterpenos aumentan exponencialmente hasta cerca de los 313 K. Esta es la razón principal por la cual las mayores emisiones de COV se presentan en días secos.

Este comportamiento es especialmente notorio en el caso del isopreno, el COV que más contribuye a las emisiones totales en los periodos secos, en comparación con los otros COV. Esto se presenta, ya que se ha comprobado que las emisiones de isopreno se producen por medio de la fotosíntesis y la fotorespiración siendo así muy dependiente de la temperatura y la luz (Seinfeld & Pandis 2006). Caso contrario ocurre con los monoterpenos y otros COVB, que emiten valores muy similares a cualquier hora del día, pero mucho menores a los valores de isopreno.

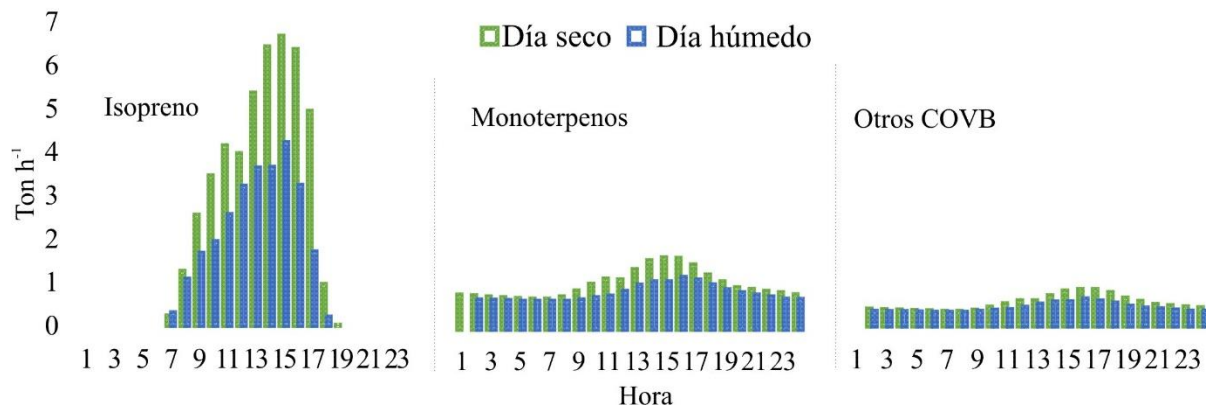


Figura 3.15. Emisiones horarias de isopreno, monoterpenos y otros COVB biogénicos para día seco y día húmedo en Caldas.

Otros resultados de importancia se muestran en la Figura 3.16, observándose que los porcentajes de contribución de isopreno, monoterpenos y otros COVB tanto del día seco como del día húmedo son similares a pesar de las diferentes cantidades que se emitieron cada día las cuales se suponen que están asociadas a la influencia generada por la temperatura y la radiación solar, que también son mayores en el día seco. En ambos días, es notable la predominancia del isopreno que representa aproximadamente la mitad de las emisiones diarias seguido de los monoterpenos que representaron cerca de la tercera parte y por último los otros COVB que fueron el porcentaje restante (15% y 17% para día seco y húmedo respectivamente). Estimados globales también han encontrado porcentajes de isopreno, monoterpenos y otros COVB similares (Pitts 1986; Guenther, Jiang, et al. 2012).

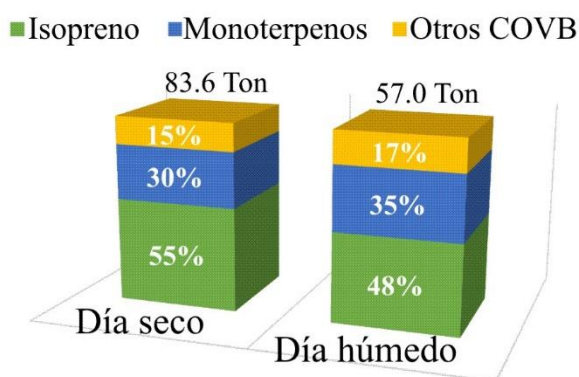


Figura 3.16. Porcentajes de contribución de cada tipo de COVB para día seco y día húmedo en Caldas.



Adicionalmente el modelo permite realizar estimados de COVB por tipo de cobertura, la Figura 3.17 muestra los resultados relacionados con el área que abarca cada tipo de vegetación. Allí es posible comprobar que cada cobertura emite diferentes cantidades de cada COVB (Monson et al. 2013) y que sus emisiones no son proporcionales a su área. Los bosques son los mayores emisores de COVB generando el 66% del total de emisiones promedio en un año, aunque sólo abarquen el 23% de la vegetación del departamento. Los pastos y los cultivos poseen las mayores áreas (34% y 35%) y al mismo tiempo representan las emisiones más bajas (8% y 6% respectivamente) después de los páramos que no fueron representativos ya que sus emisiones totales solo fueron 0.4 Ton año<sup>-1</sup>. Los bosques y matorrales emiten principalmente isopreno, con un estimado promedio de 9896.2 y 2409.0 Ton año<sup>-1</sup> respectivamente, mientras los cultivos, pastos y páramos emiten principalmente Otros COVB

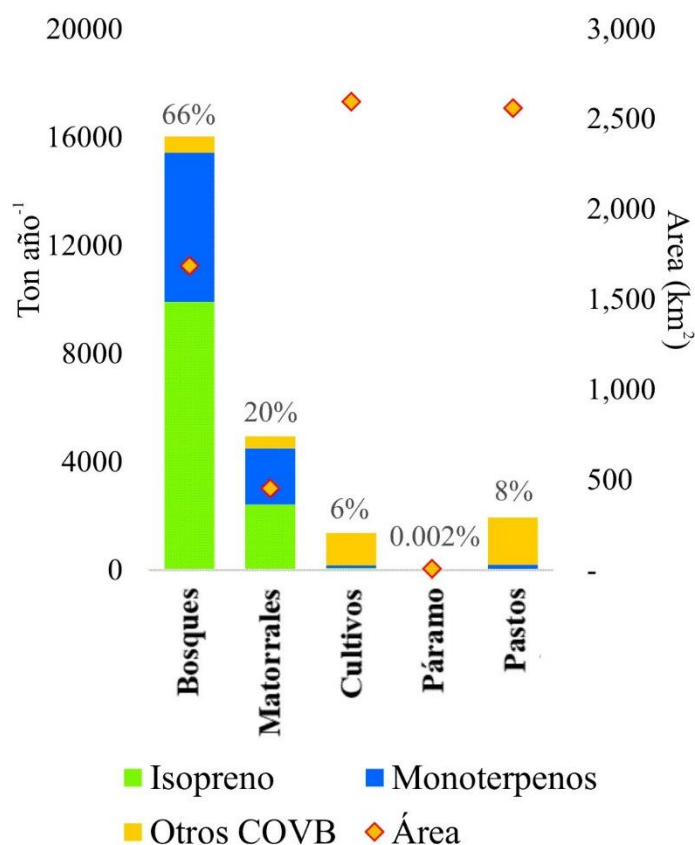
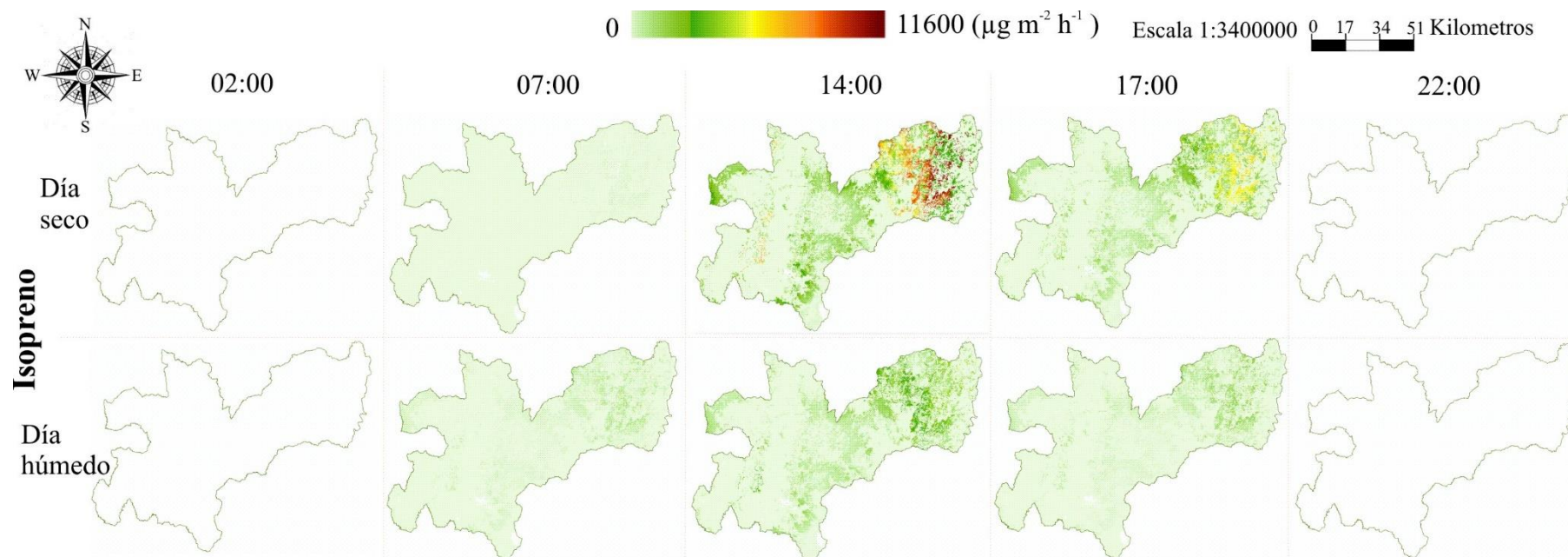


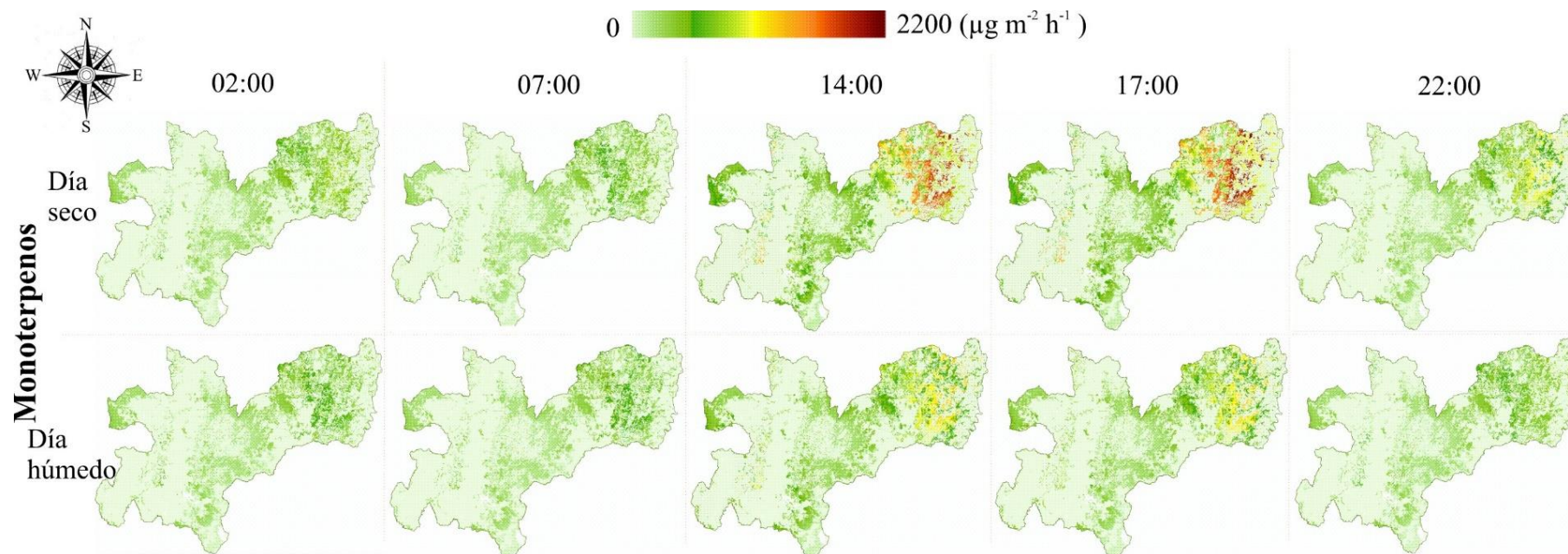
Figura 3.17. Emisiones totales porcentuales de COVB en Caldas para el año 2013 por tipo de cobertura y su área.

Los resultados obtenidos con el código de Matlab fueron espacializados en GIS generando mapas de flujo de COVB de 90x90m como los de la Figura 3.18. Se evidencia en los mapas zonas con altos y bajos flujos de emisión que difieren por horas, temporadas y tipo de COVB, así como una notable influencia de la altitud en sus emisiones. Se estimó que isopreno presentó flujos que van desde  $0 \mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$  en las horas diurnas, hasta  $10500 \mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$  aproximadamente, un amplio rango comparado con otros Monoterpenos y otros COVB. Es notable que las mayores emisiones se presenten en la zona nororiental de la región donde se encuentran las menores altitudes y los días y horas más calurosas. Además, esa zona coincide principalmente con la presencia de bosques tropicales donde ha sido demostrado que éstos son los mayores emisores a nivel mundial (Guenther et al. 2006).

Los monoterpenos presentan una variación de flujos entre 0 y  $8500 \mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$ , estos COVB también se emiten en la noche y varían muy poco con respecto a los resultados diurnos. Se emiten mayoritariamente en la zona centro y nororiente del departamento coincidiendo con las zonas boscosas (nororiente) y matorrales (zona centro), donde el 72% de la emisión de éstos en Caldas es producto de los bosques, el 27% de los matorrales y el restante de otras vegetaciones. En los monoterpenos también se puede apreciar el efecto de la altitud sobre las emisiones, las más altas se presentan en la región nororiente donde se tienen las menores elevaciones.

Por último, los otros COVB se distribuyen más uniformemente con respecto a isopreno y monoterpenos, se puede ver una marcada relación con la topografía de la región, siendo más bajas las emisiones en la cordillera central donde están las mayores elevaciones y a su vez las menores temperaturas. También se ve una fuerte influencia de los cultivos que están presentes en la zona sur occidente ya que los resultados muestran que éstos representan el 53% de las emisiones de otros COVB, seguido por bosques y matorrales con el 26% y el 19% respectivamente.





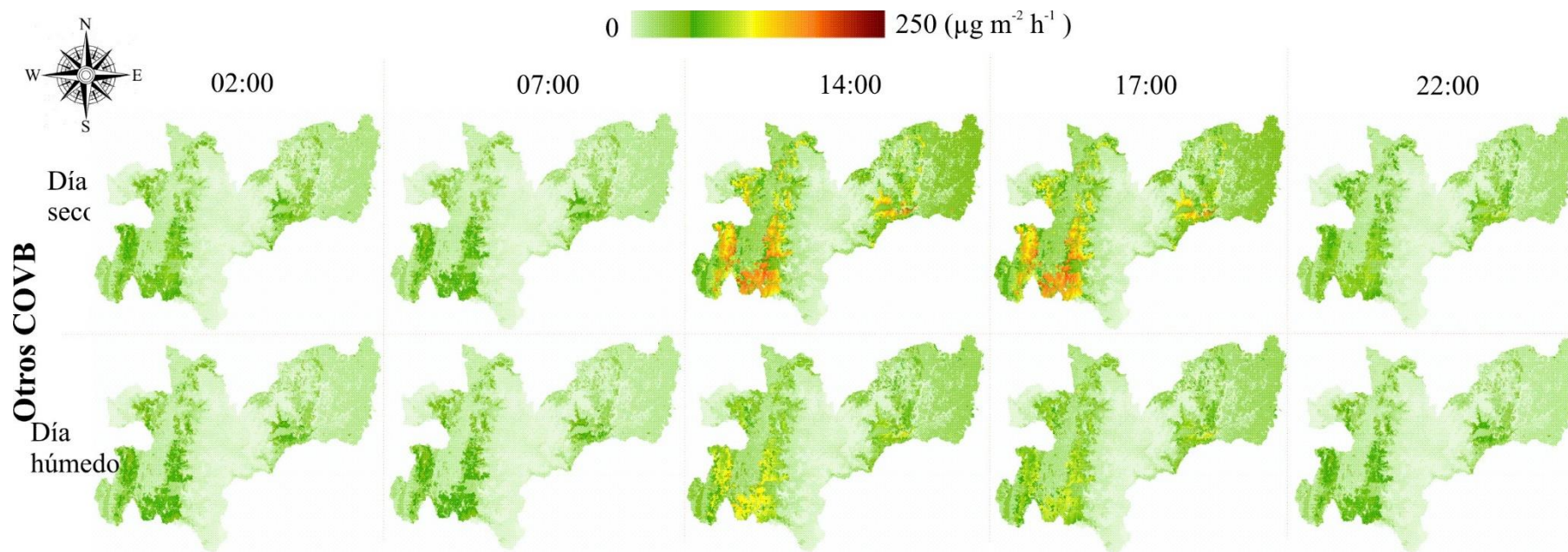


Figura 3.18. Representación horaria espacializada de los COVB para el día seco y húmedo en  $\mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$  para isopreno, monoterpenos, y otros COVB



### Comparación de flujos estimados

Resultados de otros estudios fueron usados para comparar las emisiones de COVB, que son los únicos dos (2) estudios realizados en regiones de Colombia (Cárdenas R. 2012; Toro G. et al. 2001), un estimado del año 1999 en una región de Francia (Simon et al. 2006), uno para China que es una región subtropical (Li et al. 2013) y un estimado global obtenido con MEGAN (Guenther, Jiang, et al. 2012). Todos se presentan en la Tabla 3.10.

Si se comparan los estimados (emisiones/área) obtenidos anteriormente en otras regiones de Colombia, se visualizan algunas diferencias, ejemplo las emisiones por km<sup>2</sup> de todos los compuestos en Cundinamarca son mayores que las de Valle de Aburrá, principalmente con otros COVB que son cerca del doble. En este caso las emisiones de isopreno y monoterpenos por km<sup>2</sup> de Caldas resultaron ser muy similares a las de Cundinamarca mientras las emisiones de otros COVB por km<sup>2</sup> se parecen un poco más a las de Valle de Aburrá. Sin embargo, en cualquiera de los dos casos los resultados son acordes a lo que se ha estimado en Colombia. Diferentes resultados pueden ser causados por diferencias climáticas y de cobertura entre las regiones (Greenberg et al. 2004), el Valle de Aburrá es una zona con clima cálido donde predominan los matorrales 48%, Cundinamarca abarca todos los pisos térmicos pero predominan los cultivos 43% y en Caldas los pastos con 34%. Es importante tener en cuenta que los mayores emisores en Caldas de COVB fueron los bosques que abarcan el 23% de la región mientras que en Valle de Aburrá y Cundinamarca son el 7% y 12% respectivamente.

En general isopreno es el COVB más común seguido de monoterpenos (Alves et al. 2014). Sin embargo, los resultados no siempre suelen tener la misma tendencia, en Berre-Marseilles Francia, un área de 19600 km<sup>2</sup> (aproximadamente 3 veces más grande que Caldas) se estimó un total de 72800 Ton año<sup>-1</sup> donde los mayores aportantes fueron los monoterpenos debido a su vegetación característica de clima mediterráneo. En China, las emisiones principales fueron de isopreno con 23423000 Ton/año<sup>-1</sup> seguido por OCOV causados por sus cultivos subtropicales y por último están los monoterpenos.

Tabla 3.10. Comparación de emisiones con otras estimaciones.

<b>Emisiones Ton año<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup></b>				
<b>Región</b>	<b>Isopreno</b>	<b>Monoterpenos</b>	<b>Otros COV</b>	<b>Referencia</b>
<b>Caldas</b>	1.70	1.06	0.53	Presente estudio. BIGA
<b>Cundinamarca*</b>	1.85	0.97	1.59	(Cárdenas R. 2012)
<b>Valle de Aburrá</b>	2.50	0.52	0.75	(Toro G. et al. 2001)
<b>Berre Marseilles</b>	1.05	1.98	0.68	(Simon et al. 2006)
<b>China</b>	2.70	0.64	1.44	(Li et al. 2013)
<b>Global</b>	0.53	0.16		(Guenther, Jiang, et al. 2012)

\*Ton C año<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>

### 3.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Colombia es un país tropical que atraviesa la franja ecuatorial, además Caldas está en la zona Andina entre las cordilleras central y occidental, por lo que no se hace extraño que 98% del departamento está constituido por vegetación y que tenga amplios cambios de altitud cubriendo todos los pisos térmicos. Esto hace interesante el estudio de esta región ya que presenta condiciones únicas.

Por esto, aplicar un modelo desarrollado en otros países no siempre es conveniente y más un modelo biogénico que es tan dependiente de las condiciones climáticas y altitudinales locales. Para tener una mejor aproximación se desarrolló un modelo para estimar las emisiones de COVB teniendo en cuenta el gradiente altitudinal –BIGA usando software e información normalmente accesible para países en vía de desarrollo.

El modelo fue aplicado en una zona del norte de la cordillera de los Andes que comprende un área de 7436 km<sup>2</sup> de los cuales el 98.4% de la cobertura corresponde a vegetación. Se procesó y adecuó la información local y cartografía teniendo en cuenta el efecto de la altitud con resolución de 90x90m, se programó y ejecutó el algoritmo matemático seleccionado en el software Matlab y se visualizaron por primera vez las emisiones provenientes de la vegetación en esta región usando un SIG, en este caso ArcMap, pero existen otros SIG gratuitos que se pueden usar. Se obtuvieron resultados preliminares que muestran puntos críticos de COVB en las zonas con menor altitud; las mayores emisiones fueron dadas en el día seco con diferencias de hasta el 49% para isoprenos y 20% para monoterpenos entre el día seco y el día húmedo. Los mayores flujos se dieron alrededor de las 15:00 horas con promedios de 3.61 y 1.39 ton m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> para isopreno y monoterpenos respectivamente. Se observó un aporte significativo de contaminantes emitidos por las fuentes biogénicas en la zona de estudio y cambios significativos entre diferentes tipos de Compuestos Orgánicos Volátiles Biogénicos -COVB.

La variable que más influye en la distribución espacial de los flujos de COVB es el tipo de cobertura ya que los mayores flujos de isopreno y monoterpenos son dados por bosques, mientras para otros COVB se presentan mayores flujos donde hay presencia de cultivos. Después del tipo de cobertura, la segunda variable más significativa es la altitud. Dicho nivel



de significancia se vio reflejado en los mapas de flujos de isopreno, monoterpenos y otros COVB donde es notable la coincidencia con la altitud. En las zonas montañosas, principalmente en la cordillera central que presenta las elevaciones más altas del departamento, se registraron las menores emisiones. Caso contrario a la zona noroccidental con elevaciones cercanas al nivel del mar donde los flujos de COVB resultaron ser los más grandes. El isopreno fue emitido principalmente por bosques tropicales y matorrales, en este compuesto se observó la influencia la temperatura y especialmente de la luz. En el día seco se emitió 41% más isopreno que en el día húmedo, con una variación entre 0 y 6.66 toneladas hora<sup>-1</sup> mientras que en el día lluvioso la variación estuvo entre 0 y 4.21 toneladas hora<sup>-1</sup>. Los monoterpenos provienen principalmente de los bosques tropicales y variaron poco entre ambos días analizados, en el día seco los flujos estuvieron entre 0.70 y 1.66 Toneladas hora<sup>-1</sup> y en el día húmedo entre 0.65 y 1.21 Toneladas hora<sup>-1</sup>. Los otros COVB fueron bastante influenciados por cultivos y son los que mayor correlación muestran con la topografía. Temporalmente, en el día seco variaron entre 0.34 y 0.85 Toneladas hora<sup>-1</sup> y en el día húmedo entre 0.32 y 0.63 Toneladas hora<sup>-1</sup>.

Se recomienda actualizar el inventario cada vez que se obtenga un nuevo mapa de uso y cobertura del suelo, ya que en este caso se usó el último disponible que fue del año 2010.



## **CAPITULO 4. ESPECIACION Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO BIGA**

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Una de las formas más precisas para validar un modelo biogénico es comparando con mediciones de campo regionales que concuerden con las especies o ecosistemas usados en el modelo. También teniendo en cuenta que las condiciones meteorológicas fueran iguales o muy parecidas a las que se usaron para modelar.

Sin embargo, cuando no se tienen datos de campo como es el caso de Caldas, es conveniente comparar con otros modelos utilizando la misma información. Así poder analizar tendencias y diferencias que brinden información adicional ya que no se podría saber cuál de los modelos está más cerca de los resultados reales.

Por su amplia trayectoria se usó MEGAN2.1 para comparar con los resultados de BIGA. MEGAN es uno de los modelos disponibles más avanzados hasta ahora, para estimar emisiones biogénicas y permite calcular emisiones de más de 150 COVB de los cuales 40 son monoterpenos y 32 son sesquiterpenos (Guenther, Jiang, et al. 2012). A diferencia de BIGA que calcula isopreno, monoterpenos totales y otros COVB totales.

Sin embargo, al implementar en BIGA los mismos tipos de plantas o PFT que usa MEGAN, se pudo realizar una especiación de monoterpenos los cuales se muestran en este capítulo. Además, se hizo una estimación usando MEGAN 2.1 de 5 tipos de vegetación representativos de Caldas y así se compararon los resultados de ambos modelos. Este capítulo se presenta como complemento a los resultados del capítulo 3 gracias al apoyo y flujo de información que se tuvo con el del profesor Alex Guenther en University of California Irvine.

## 4.2. METODOLOGÍA

### EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES BIOGÉNICAS DE CALDAS

#### **Especiación de Monoterpenos**

BIGA no entrega resultados específicos de compuestos orgánicos de cadena larga ni de especies particulares de monoterpenos y otros COVB, sólo procesa tres tipos generales de compuestos que son isopreno, monoterpenos y otros COVB. Pero al implementar en BIGA los mismos PFT que usa MEGAN, se pudo realizar una especiación inicial convirtiendo los monoterpenos totales en 7 especies principales las cuales son las más comunes y abundantes en la naturaleza que son mirceno, sabineno, limoneno, 3-careno, ocimeno trans beta, pineno alfa y pineno beta. De esta primera especiación también quedan trazas de monoterpenos llamados otros MTPs. Esto se logró utilizando valores de factores de emisión tomados de MEGAN2.1, los cuales fueron normalizados para encontrar los factores de multiplicación que se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Factores para especiar los Monoterpenos más frecuentes en la naturaleza.

	Monoterpenos							
	Mirceno	Sabineno	Limoneno	3 - careno	Ocimeno trans beta	Pineno beta	Pineno alfa	Otros MTPs
<b>ET1: needleleaf evergreen temperate tree</b>	0.05	0.05	0.07	0.11	0.05	0.21	0.34	0.12
<b>ET2: needleleaf evergreen boreal tree</b>	0.05	0.05	0.07	0.11	0.05	0.21	0.34	0.12
<b>ET3: needleleaf deciduous boreal tree</b>	0.05	0.03	0.10	0.06	0.05	0.16	0.41	0.14
<b>ET4: broadleaf evergreen tropical tree</b>	0.06	0.06	0.06	0.03	0.12	0.09	0.46	0.12
<b>ET5: broadleaf evergreen temperate tree</b>	0.03	0.05	0.08	0.03	0.12	0.13	0.40	0.15
<b>ET6: broadleaf deciduous tropical tree</b>	0.06	0.06	0.06	0.03	0.12	0.09	0.46	0.12
<b>ET7: broadleaf deciduous temperate tree</b>	0.03	0.05	0.08	0.03	0.12	0.13	0.40	0.15
<b>ET8: broadleaf deciduous boreal tree</b>	0.03	0.05	0.08	0.03	0.12	0.13	0.40	0.15
<b>ET9: broadleaf evergreen temperate shrub</b>	0.04	0.07	0.09	0.04	0.13	0.15	0.30	0.16

Monoterpenos								
	Mirceno	Sabineno	Limono	3 - careno	Ocimeno trans beta	Pineno beta	Pineno alfa	Otros MTPs
ET10: broadleaf deciduous temperate shrub	0.04	0.06	0.09	0.09	0.13	0.13	0.27	0.18
ET11: broadleaf deciduous boreal shrub	0.04	0.07	0.09	0.04	0.13	0.15	0.30	0.16
ET12: arctic C3 grass	0.02	0.06	0.06	0.02	0.16	0.12	0.16	0.40
ET13: cool C3 grass	0.02	0.06	0.06	0.02	0.16	0.12	0.16	0.40
ET14: warm C4 grass	0.02	0.06	0.06	0.02	0.16	0.12	0.16	0.40
ET15: crop	0.02	0.06	0.06	0.02	0.16	0.12	0.16	0.40

Fuente: Modificado de (Guenther, Jiang, et al. 2012)

Los “otros MTPs” de la Tabla 4.1 fueron desagregados en 33 especies más de monoterpenos usando información que tiene MEGAN 2.1 como opcional para aquellos que quieran obtener información adicional de otras especies. Los monoterpenos especiados son mostrados en la Tabla 4.2. con su factor de multiplicación

Tabla 4.2. Especiación de otros monoterpenos

MONOTERPENO	FACTO R	MONOTERPENO	FACTO R	MONOTERPENO	FACTO R
Camphene	0.18	dimethyl styrene	0.011	thujone <beta->	0.002
linalool	0.138	fenchone	0.011	ionone <beta->	0.002
phellandrene <beta->	0.057	ocimene <allo>	0.011	bornyl acetate	0.001
Terpinolene	0.057	tricyclene	0.011	ipsenol	0.001
cymene <para->	0.057	bornene	0.01	meta-cymenene	0.001
terpinene <alpha->	0.057	borneol	0.008	myrtenal	0.001
terpinene <gamma->	0.057	linalool oxide <cis->	0.007	cymene <ortho->	0.034
cineole <1,8>	0.057	terpineol <4->	0.007	terpineol <alpha->	0.034
phellandrene <alpha->	0.046	estragole	0.003	linalool oxide <trans->	0.03
ocimene <cis beta>	0.046	fenchene <alpha->	0.003	thujene <alpha->	0.011
camphor	0.034	piperitone	0.003	thujone <alpha->	0.011

Fuente: Alex Guenther

## Cálculo de emisiones con MEGAN

Para realizar una comparación entre BIGA y MEGAN, se corrieron ambos programas buscando que sus configuraciones e información de entrada fueran lo más semejante posible. Como la versión de MEGAN con la que se trabajó entrega resultados para puntos específicos (no espacializados), con BIGA se escogieron celdas.

*Estimación de un Inventario de Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles Generados por Fuentes Biogénicas para el Departamento de Caldas*

Para esto, se utilizaron las mismas coberturas e información meteorológica en ambos programas. De esta forma se seleccionaron 5 tipos de vegetación características de la región que son páramos, cultivos, pastos, matorrales y bosques. Posteriormente se buscó en el mapa de uso y cobertura del suelo de Caldas ubicaciones de estas vegetaciones que estuvieran dentro del área de incidencia de alguna estación meteorológica. El mapa de la Figura 4.1 muestra la ubicación aproximada de las zonas escogidas donde se encuentran los tipos de vegetación de interés y se identifica la estación meteorológica más cercana (recuadro verde).



Figura 4.1. Tipos de vegetación analizados y la ubicación de las estaciones meteorológicas más cercanas

La Tabla 4.3 muestra los tipos de vegetación seleccionados con el código con el cual está clasificado cada uno en el modelo BIGA, también los factores de emisión que se usaron para correr ambos modelos y la estación meteorológica asociada de donde se tomaron los datos de temperatura y radiación solar que se muestran en la Tabla 4.4. Es importante tener en

cuenta que MEGAN evalúa un punto por cada corrida, esto significa que para ese punto solo hay un tipo de vegetación y solo acepta un factor de emisión.

Tabla 4.3. Descripción de las coberturas y tipos de factores de emisión usados en ambos modelos.

DESCRIPCIÓN EN MAPA USO Y COBERTURA DEL SUELO	COD	FE o TIPO FUNCIONAL DE PLANTA	Nº ESTACIÓN
Páramos, zonas glaciares y nivales	32	CLM/PFT12: arctic C3 grass	2
Pastos	23	CLM/PFT13: cool C3 grass	3
Cultivos	20	CLM/PFT15: crop 1	1
Matorrales, vegetación secundaria	31	CLM/PFT9: broadleaf evergreen temperate shrub	3
Bosques	30	CLM/PFT4- broadleaf evergreen tropical tree	3

Tabla 4.4. Datos de temperatura y radiación solar de las tres estaciones usadas para correr MEGAN2.1.

Estación	1. Alcaaldía de Marquetalia		2. Cisne		3. Posgrados	
Variable	Temperatura (K)	Radiación Solar (W/m2)	Temperatura (K)	Radiación Solar (W/m2)	Temperatura (K)	Radiación Solar (W/m2)
Día seco	292.58	0.00	271.49	15.00	287.72	0.00
	292.07	0.00	271.11	15.00	287.52	0.02
	291.69	0.00	270.85	15.00	287.34	0.00
	291.83	0.00	270.81	15.00	287.17	0.00
	291.49	0.00	270.86	15.00	286.97	0.00
	291.13	0.00	270.75	15.00	286.79	0.00
	291.39	38.33	270.96	15.00	286.94	31.73
	291.72	127.45	272.40	28.75	288.91	160.19
	292.94	329.80	276.40	335.25	291.53	323.20
	294.27	361.75	277.86	539.00	292.92	428.29
	295.38	424.50	277.47	405.00	294.02	537.04
	294.98	615.25	278.46	803.00	294.79	552.82
	296.89	905.67	279.07	860.25	295.13	520.60
	298.89	855.80	279.62	839.75	295.29	463.41
	299.94	694.90	279.89	770.75	295.20	375.39
	299.26	454.64	278.35	482.75	294.62	266.15
	298.36	256.82	278.35	367.25	293.72	157.91
	296.48	42.58	273.57	60.50	292.18	43.29
	294.89	0.00	271.44	15.00	290.33	0.12
	293.72	0.00	270.42	15.00	289.27	0.00
293.48	0.00	270.19	15.00	288.71	0.00	
293.60	0.00	270.82	15.00	288.36	0.01	
292.96	0.00	271.59	15.00	288.10	0.00	
292.38	0.00	271.57	15.00	287.90	1.23	
Día húmedo	291.01	0.00	273.34	15.00	286.90	0.00
	290.86	0.00	273.00	15.00	286.90	0.00
	290.59	0.00	272.90	15.00	286.80	0.00
	289.83	0.00	272.86	15.00	286.71	0.00
	289.92	0.00	272.96	15.00	286.56	0.00
	290.13	0.00	272.76	15.00	286.55	0.00



<b>Estación</b>	<b>1. Alcaldía de Marquetalia</b>		<b>2. Cisne</b>		<b>3. Posgrados</b>	
<b>Variable</b>	<b>Temperatura (K)</b>	<b>Radiación Solar (W/m2)</b>	<b>Temperatura (K)</b>	<b>Radiación Solar (W/m2)</b>	<b>Temperatura (K)</b>	<b>Radiación Solar (W/m2)</b>
	290.06	39.75	272.75	18.00	286.70	16.25
	290.62	135.92	273.48	78.75	287.62	123.18
	291.19	122.88	274.14	100.00	289.23	265.83
	291.79	216.09	274.15	91.25	289.83	364.25
	292.51	144.58	275.52	235.00	290.21	337.17
	293.76	69.79	275.89	261.00	290.26	477.83
	295.35	374.83	275.03	177.00	293.13	821.50
	294.28	126.89	276.46	279.50	295.32	822.08
	294.48	235.51	274.26	146.50	295.55	682.83
	294.77	118.27	274.94	105.75	293.66	324.86
	294.15	69.50	273.96	85.25	290.63	14.79
	293.53	11.83	273.76	36.75	289.56	0.00
	292.75	0.00	273.21	15.00	288.49	0.00
	292.26	0.00	273.26	15.00	288.14	0.00
	291.64	0.00	273.14	15.00	287.75	0.00
	291.10	0.00	273.05	15.00	287.23	0.00
	290.91	0.00	272.94	15.00	287.17	0.00
	290.27	0.00	272.82	15.00	287.53	0.00

Los datos exactos de la ubicación de las estaciones meteorológicas escogidas para analizar ambos modelos se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Ubicación exacta de las estaciones meteorológicas con las que se corrieron los modelos

<b>Punto</b>	<b>Tipo de estación</b>	<b>Municipio</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud_msnm</b>
1	Meteorológica	Marquetalia	Alcaldía	5.2990	-75.0572	1591
2	Meteorológica	Manizales	UN_Campus Palogrande	5.0561	-75.4923	2179
3	Meteorológica	Villamaría	Parque Natural los Nevados	4.8235	-75.3666	4812

Cada modelo tiene características diferentes y la información de entrada varía según su complejidad.

Para los cálculos con MEGAN se utilizó la versión 2.1 que opera en el software Excel. En este se corrieron los mismos días que el inventario con el modelo BIGA. Es decir, se utilizó la misma información tanto para un día de temporada seca que es el 6 de enero de 2013 como para un día de temporada húmeda que es el 29 de noviembre de 2013. La información de entrada fue en escala horaria.

Con el fin de evaluar más escenarios, también se hicieron corridas adicionales para evaluar el efecto del viento y de la humedad relativa en MEGAN generando con estas dos variables el balance energético de la hoja. Para esto, se tomó el ecosistema “bosques” en el día seco y se corrieron las 24 horas nuevamente. La Tabla 4.6 muestra los datos adicionales usados para este escenario donde la estación N° 3 -Posgrados es la que corresponde al área de cultivos estudiados.

Tabla 4.6. Datos de humedad relativa y velocidad del viento utilizados para bosques.

	Posgrados		
	Hora	Humedad Relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)
Día seco	1:00:00 a. m.	96.9	0.8
	2:00:00 a. m.	97.3	0.7
	3:00:00 a. m.	97.7	0.7
	4:00:00 a. m.	98.0	0.7
	5:00:00 a. m.	98.2	0.7
	6:00:00 a. m.	98.4	0.7
	7:00:00 a. m.	97.9	0.7
	8:00:00 a. m.	92.7	0.4
	9:00:00 a. m.	85.1	0.4
	10:00:00 a. m.	82.2	0.7
	11:00:00 a. m.	79.4	0.8
	12:00:00 p. m.	76.7	0.9
	1:00:00 p. m.	75.2	0.9
	2:00:00 p. m.	74.0	0.8
	3:00:00 p. m.	73.5	0.8
	4:00:00 p. m.	75.2	0.7
	5:00:00 p. m.	78.2	0.6
	6:00:00 p. m.	83.9	0.4
	7:00:00 p. m.	91.0	0.5
	8:00:00 p. m.	94.3	0.7
	9:00:00 p. m.	95.3	0.9
	10:00:00 p. m.	95.7	0.9
	11:00:00 p. m.	96.1	0.9
	12:00:00 a. m.	96.5	0.8

## 4.3. RESULTADOS

### ANÁLISIS DE LAS EMISIONES BIOGÉNICAS PARA CALDAS

#### **Especiación del inventario con BIGA**

La especiación estimó inicialmente resultados para cuarenta (40) monoterpenos emitidos por la vegetación de Caldas. La Figura 4.2 refleja los resultados de algunos de estos. Pineno-alfa dio las mayores emisiones con 2.8 kton año<sup>-1</sup> representando el 42.3% de los monoterpenos totales, seguido por Ocimeno-trans-beta con 0.85 y pineno-beta con 0.66 kton año<sup>-1</sup>.

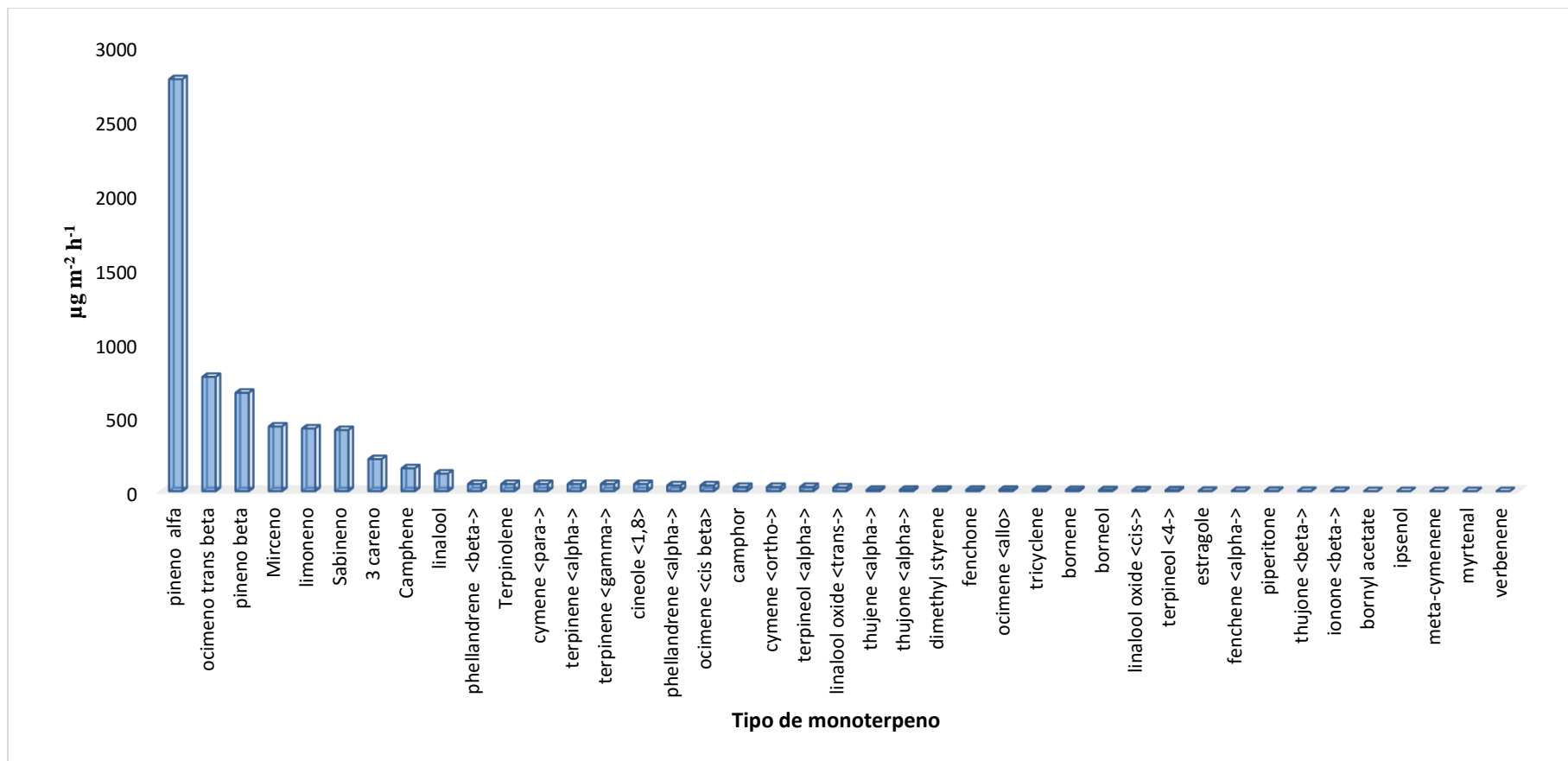
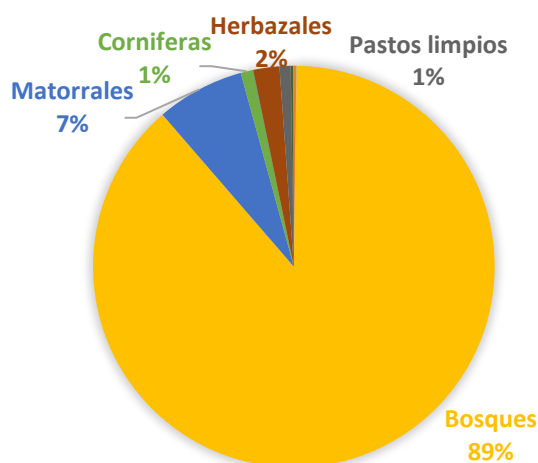


Figura 4.2. Especiación de monoterpenos totales obtenidos con el modelo BIGA  
Fuente: Autor

La contribución por ecosistema fue evaluada dando resultados muy similares entre todos los monoterpenos. En general, para los siete compuestos, los bosques fueron los mayores contribuyentes emitiendo  $\frac{3}{4}$  o más de cada tipo de monoterpeno. El segundo mayor contribuyente fue los matorrales seguido de los herbazales, coníferas y pastos. Un ejemplo lo demuestra la Figura 4.3 donde se evalúa el monoterpeno más abundantes que es pineno alfa.



### Pineno alfa

Figura 4.3. Contribución por cobertura para el monoterpeno pineno alfa  
Fuente: Autor

## Resultados con MEGAN utilizando sólo temperatura y luz (Escenario 1)

Megan tiene la opción de incluir humedad relativa y velocidad del viento. Esto le da la posibilidad al modelo de hacer un balance energético y así obtener la temperatura propia de las hojas. Pero en este escenario no se tuvo en cuenta estas dos variables, con el fin de que MEGAN sea corrido lo más parecido posible a BIGA. Por esto también, se usó LAI=1, se ignoró la mezcla del suelo y la influencia de CO<sub>2</sub>, estas y el resto de configuraciones las muestran la Tabla 4.7. Al incluir radiación solar, el modelo calcula internamente PPFD.

Tabla 4.7. Configuración usada en el escenario 1 con MEGAN

Opciones del modelo	Conf. elegida	Descripción
Temperatura y PPFD de las pasadas 24 horas	0	Ingrese 1 para incluir la influencia de la temperatura y la luz de las pasadas 24 horas; Ingrese 0 para ignorar la influencia de la temperatura y la luz de las pasadas 24 horas. <b>NO use este si no tiene datos horarios continuos</b>
Temperatura y PPFD de las pasadas 240 horas	0	Ingrese 1 para incluir la influencia de la temperatura y la luz de las pasadas 240 horas; Ingrese 0 para ignorar la influencia de la temperatura y la luz de las pasadas 240 horas. <b>NO use este si no tiene datos horarios continuos</b>
Mezcla del suelo	0	Ingrese 1 para incluir la influencia de la mezcla del suelo, 0 para ignorar la mezcla del suelo
CO <sub>2</sub>	0	Ingrese la concentración de CO <sub>2</sub> en ppm (ingrese 0 para ignorarla)
Balance de energía de la hoja	0	Ingrese 1 para calcular el balance energético de la hoja (deberá tener viento y humedad relativa en la hoja de cálculo MetData), 0 para ajustar la temperatura de la hoja igual a la temperatura ambiente.
Solar inputs	2	Ingrese 1 para incluir PPFD (y calcular energía solar), 2 para ingresar energía solar (y calcular PPFD). La variable seleccionada deberá ser ingresada in la hoja de cálculo MetData.

Fuente: (Guenther, Jiang, et al. 2012)

Utilizando MEGAN2.1 se obtuvieron los resultados de emisiones de los principales COVB por tipo de cobertura y temporada, los cuales se muestran en la Figura 4.4 donde los días secos son los que presentan mayores flujos, algo de esperarse debido a la dependencia directamente proporcional que tienen las emisiones biogénicas con la radiación solar y también con la temperatura como es el caso de isopreno, sesquiterpenos y varios monoterpenos (Fares et al. 2012). Las mayores diferencias entre el día seco el día húmedo las presentan los páramos y los cultivos con emisiones que aumentan 60% y 56% respectivamente del día húmedo al seco. A pesar de la pequeña distancia entre las estaciones usadas para correr MEGAN, la variabilidad climática que presentan las zonas tropicales y montañosas es amplia (Ocampo et al. 2010) y así mismo puede afectar las emisiones. Por lo tanto, esta diferencia entre temporadas puede deberse a los cambios meteorológicos que sufre la región de estudio.

Como se ha demostrado a través de los años en diferentes estudios, isopreno es el COV biogénico que más emiten las plantas (Guenther et al. 1996) (Pitts 1986) y los bosques tropicales son los responsables de las mayores emisiones por metro cuadrado en el mundo

(Guenther, Jiang, et al. 2012). En este caso el isopreno para los bosques refuerza dichos estudios, ya que representó el 56% de las emisiones totales.

Después del isopreno, el metanol y el monóxido de carbono demostraron tener las siguientes emisiones más altas en cultivos para el día seco con 1582.20 y 1121.47  $\mu\text{g m}^{-2} \text{día}^{-1}$  respectivamente. Al igual que con BIGA, los resultados con MEGAN mostraron que los principales responsables de las emisiones en Caldas son los Bosques y los Matorrales.

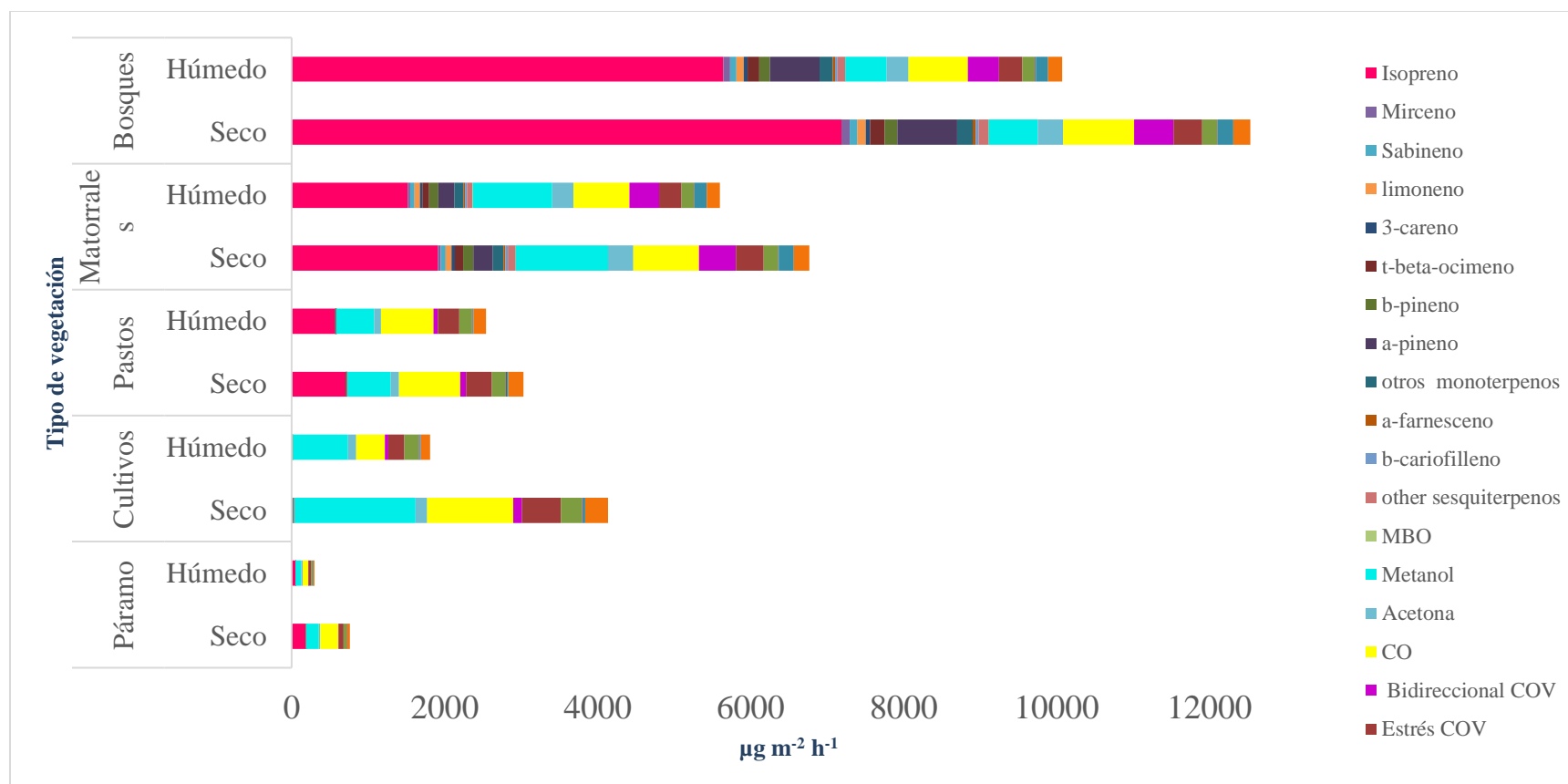


Figura 4.4. Resultados de COV para cinco tipos de coberturas en Caldas usando MEGAN2.1 (escenario 1)  
Fuente: Autor



La Figura 4.5 muestra los flujos horarios promedio (entre el día seco y el húmedo) para isopreno y monoterpenos totales donde se pueden ver las emisiones de cada uno de los tipos de vegetación escogidos. Se puede ver que en las horas sin radiación solar las emisiones de isopreno son nulas, caso contrario a los monoterpenos que se emiten en todo momento ya que dependen solamente de la temperatura (Morrison et al. 2016). Las emisiones más altas se presentan cerca de las 13:00 para ambos tipos de COVB.

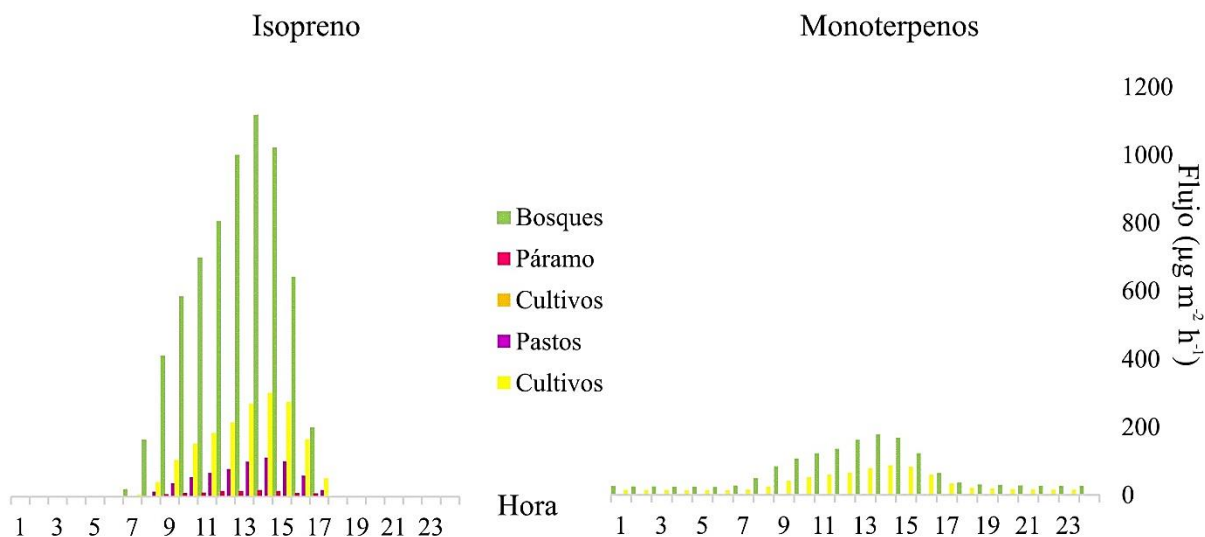


Figura 4.5. Flujos horarios de isopreno y monoterpenos por tipo de vegetación obtenidos con MEGAN2.1

## Comparación BIGA-MEGAN

Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos con los modelos BIGA y MEGAN (Escenario 1) (Figura 4.6). Se puede observar que ambos muestran tendencias temporales similares donde cerca del medio día hay un pico de emisiones los cuales son más notables para isopreno en el día seco, algo que ya ha sido anteriormente encontrado en estudios de regiones tropicales (Gu et al. 2017). Por otra parte, las magnitudes de los flujos son muy diferentes, por ejemplo, para los bosques en el día seco a las 13:00, el flujo de isopreno estimado con BIGA fue  $2982 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$  y con MEGAN fue  $991 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ . El de monoterpenos fue  $697$  y  $169 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$  para BIGA y MEGAN respectivamente. Las

diferencias más bajas fueron mostradas por isopreno en horas sin luz, pero en el día los bosques tuvieron el factor más bajo siendo de 1.4 (resultados BIGA/resultados MEGAN) a las 11:00 horas. En general para isopreno los bosques fueron los más aproximados con factores entre 1 y 2, seguidos por matorrales con factores normalmente entre 2 y 3. Según Guenther et al., 2012b, estimaciones en MEGAN se han evaluado con estudios anuales globales que proveen confiabilidad y normalmente se encuentran incertidumbres en un factor de 2, lo que significa que el modelo BIGA con respecto a bosques y matorrales puede dar resultados muy similares a los reales. Teniendo en cuenta los resultados de isopreno de todos los ecosistemas, más del 50% de los resultados estuvieron en un factor entre 1 y 6 (excluyendo las horas sin luz que siempre tuvieron un factor de 1), algunos casos llegaron a alcanzar factores mayores a 100 dados en las zonas nivales y glaciares.

Para monoterpenos, los factores de diferencia variaron entre 2 y 14, siendo el menor de 2.7 para bosques. Sin embargo, el mayor valor también lo tuvo bosques (14.1). Analizando esto, se encontró una tendencia que muestra que las diferencias de monoterpenos entre BIGA y MEGAN son menores en horas diurnas, mientras pasa lo contrario con las horas nocturnas. Guenther et al., 2012b dice que 13 de los 34 monoterpenos que estima MEGAN han sido evaluados dando frecuentemente factores de incertidumbre cerca de 3 pero el resto de COVB no han sido estudiados y se estima que pueden dar una incertidumbre mayor. En la comparación con BIGA, el 8% de los resultados estuvo en un factor entre 2 y 3, el resto entre 4 y 14, lo que da a pensar que los resultados puede que no estén tan desfasados de los valores reales.

A pesar de que MEGAN es un modelo avanzado y ampliamente estudiado, no se pueden validar los resultados del modelo BIGA con este. Es decir, no se puede asegurar cuál modelo estima mejor las emisiones hasta no tener factores de emisión o mediciones propias de la región con las cuales se pueda comparar. De todas maneras, hacer este ejercicio es importante para comparar comportamientos ya que MEGAN se ha considerado como punto de referencia a nivel mundial y aquí se puede ver que sus tendencias son bastante parecidas principalmente para monoterpenos y otros COVB.

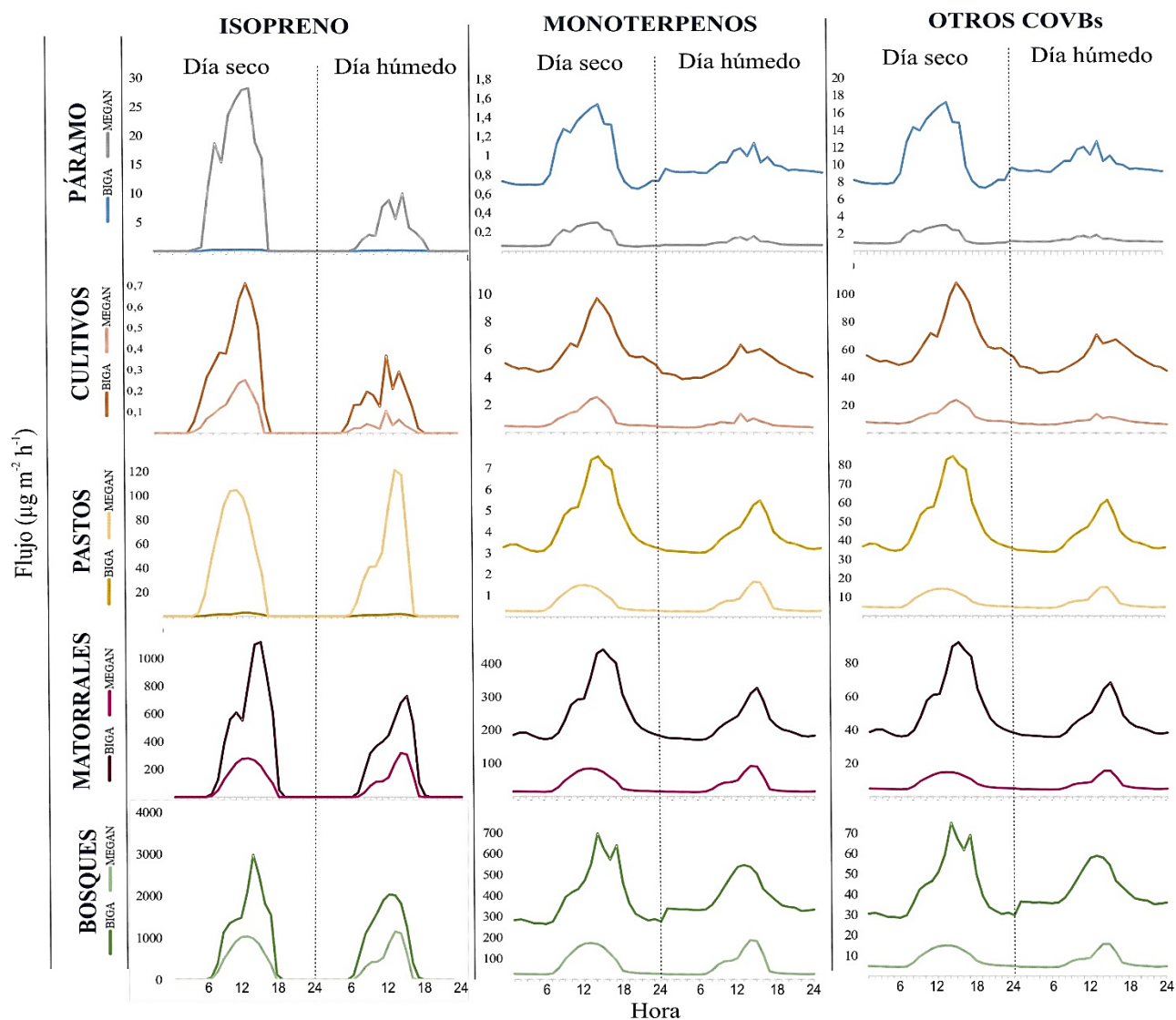


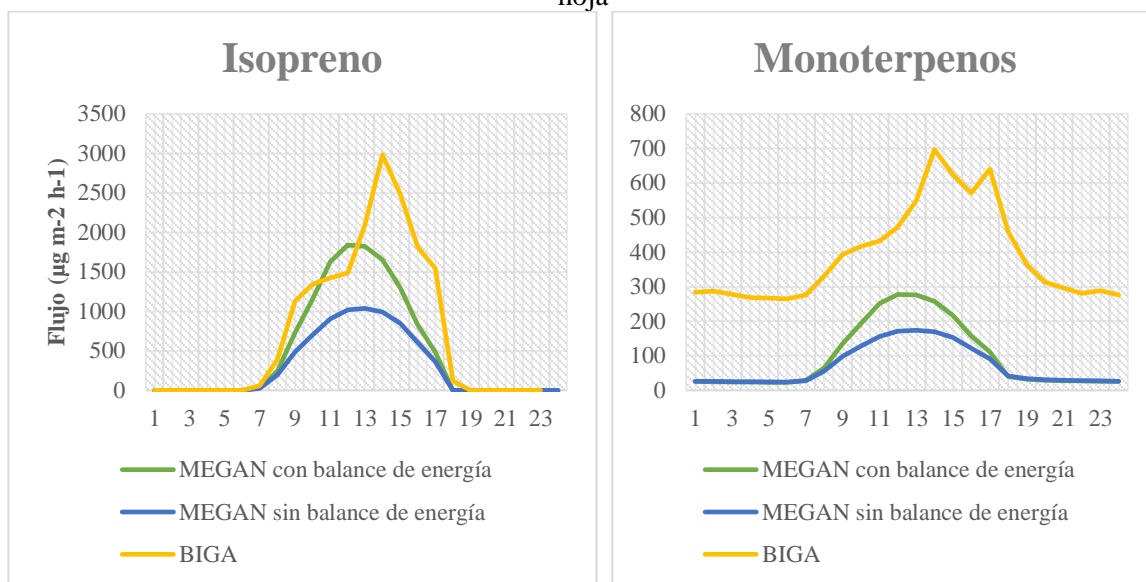
Figura 4.6. Comparación entre los resultados horarios de BIGA y MEGAN

### **Comparación incluyendo el balance energético de la hoja (Escenario 2)**

Se corrió MEGAN nuevamente para bosques en el día seco incluyendo las variables humedad relativa y velocidad del viento, la configuración varía con respecto a la Tabla 4.7 en que en la opción “Balance de energía de la hoja” se ingresó uno (1) en vez de cero (0). Con este cambio se dieron resultados de isopreno entre 0.16 y 1839.23  $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , éste pico mayor se observó a las 12:00 horas. Para monoterpenos totales el flujo menor (23.24  $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) se dio cerca de las 6:00 de la mañana y el mayor fue de 277.55  $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$  a las 12:00 horas.

Las tendencias son muy similares a las mostradas en las corridas anteriores con MEGAN pero varían en valor siendo mayores los flujos cuando se incluye el balance energético. La Figura 4.7 muestra las diferencias horarias que se presentaron al compararse los resultados con balance energético y sin él (escenario 2 vs escenario 1). Allí se muestra que las diferencias son pequeñas cuando los flujos también lo son, pero a medida que van aumentando las emisiones, las diferencias pueden llegar a ser bastantes grandes. En el caso de isopreno la mayor diferencia fue a las 12:00 horas donde se presentó el pico mayor, siendo las emisiones con balance de energía en MEGAN 55% mayores que las que no tienen balance en la hoja. Los flujos entre monoterpenos en MEGAN presentaron una mayor diferencia (62%) a las 11:00 horas.

Figura 4.7. Flujos de bosques estimados en BIGA y en MEGAN con y sin balance energético de la hoja



Cuando se comparan los resultados de MEGAN con los de BIGA para bosques, se pueden ver un mejor ajuste con los resultados del balance energético, las tendencias son iguales pero los valores son más cercanos principalmente en el día. Los factores de diferencia también mostraron cambios (Tabla 4.8), en la mayoría de horas diurnas disminuyeron una unidad y principalmente para monoterpenos. Aquí se rectifica nuevamente que los resultados son más parecidos cuando las emisiones son mayores.

Tabla 4.8. Factores de diferencia para bosques entre BIGA y MEGAN con y sin balance energético

Hora	Isopreno		Monoterpenos	
	Sin balance energético	Con balance energético	Sin balance energético	Con balance energético
1:00	-	-	11	11
2:00	-	-	11	11
3:00	-	-	11	11
4:00	-	-	11	11
5:00	-	-	11	11
6:00	-	-	11	11
7:00	2	2	10	10
8:00	2	2	6	5
9:00	2	2	4	3
10:00	2	1	3	2
11:00	2	1	3	2
12:00	1	1	3	2

Hora	Isopreno		Monoterpenos	
	Sin balance energético	Con balance energético	Sin balance energético	Con balance energético
13:00.	2	1	3	2
14:00	3	2	4	3
15:00	3	2	4	3
16:00	3	2	5	4
17:00	4	3	7	6
18:00	-	-	11	11
19:00	7	7	11	11
20:00	-	-	10	10
21:00	-	-	10	10
22:00	-	-	10	10
23:00	-	-	11	11
24:00	-	-	10	11

### Diferencias BIGA-MEGAN2.1

El modelo BIGA fue diseñado usando el algoritmo de Guenther et al., (1993) -G93 que al igual que el modelo MEGAN fue desarrollado por Alex Guenther. Sin embargo, la ventana de tiempo entre el diseño del algoritmo G93 y MEGAN es de más de 20 años, G93 fue prácticamente el primer algoritmo oficialmente publicado por Guenther y MEGAN2.1 es el modelo y la versión más reciente. Las diferencias entre los modelos BIGA y MEGAN son amplias hablando de capacidad y de estructura, BIGA posee algunas ventajas que MEGAN no tiene y viceversa. La Tabla 1.9 puede sintetizar mejor esto.

Tabla 1.9. Comparación entre BIGA y MEGAN2.1

BIGA		MEGAN2.1
Meteorología	Requiere temperatura y radiación solar	Además de temperatura y radiación solar requiere velocidad del viento y humedad
Uso y cobertura del suelo	Requiere información de cobertura la cual requiere de un SIG para ser procesada	Requiere información de cobertura la cual requiere de un SIG para ser procesada
COV calculados	Inicialmente, isopreno, monoterpenos y otros COV. Es flexible para incluir los factores de emisión que se deseen por lo que se puede realizar especiación y así obtener compuestos específicos.	Calcula hasta 150 COV entre isopreno, monoterpenos, sesquiterpenos y COV producto de estrés entre otros

	<b>BIGA</b>	<b>MEGAN2.1</b>
Factores de emisión	Utiliza FE nivel canopy y se pueden ingresar según las necesidades del usuario. Se pueden utilizar especies particulares y no solamente ecosistemas.	Utiliza FE nivel canopy y ya los tiene predefinidos para 15 ecosistemas.
Suelos	N/A	Mezcla del suelo a los niveles 1 y 2
LAI	Un dato de LAI	Requiere al menos un dato de LAI
Influencia de CO <sub>2</sub>	N/A	Incluir la concentración de CO <sub>2</sub> , opcional

#### 4.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La especiación permitió ampliar la información de monoterpenos y así conocer cuáles son los monoterpenos de posible mayor emisión por la vegetación de Caldas.

Es importante saber que en Colombia nunca se han realizado mediciones directas a la vegetación, lo que se ha hecho hasta ahora, incluyendo el presente trabajo, es estimar las emisiones basados en factores de emisión -FE de otros países. Sabiendo esto, es necesario entender que los resultados de este inventario tienen un alto nivel de incertidumbre, a pesar de que se tuvo precaución al elegir los FE usados. Las condiciones meteorológicas, la genética de las especies y las condiciones que les generan estrés varían bastante entre regiones y también pueden ser fuente de error.

Al compararse el modelo BIGA con MEGAN no se pretende validar los resultados de Caldas ya que esto se hace con estudios de emisión de la región. Lo que se pretende aquí es comparar comportamientos.

Para poder validar se hace necesario tener datos de mediciones en la región de estudio, por esto se recomienda realizar campañas de monitoreo en Colombia y principalmente en zonas tropicales que cuentan con información muy limitada.

Las comparaciones entre BIGA y MEGAN dieron tendencias similares y factores de diferencia que en gran parte concuerda con la literatura donde se han evaluado los resultados de MEGAN con estudios globales anuales. Sin embargo, se da un mejor ajuste cuando se incluye el balance de energético de la hoja para el cual se requiere humedad relativa y velocidad del viento.



## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES**

Se analizó la calidad del aire de Manizales usando índices ICA que permiten comprender fácilmente los datos obtenidos por las estaciones de monitoreo. Los resultados demostraron una calidad de aire “buena” en general, contaminantes como  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  permanecen en un nivel moderado lo que significa que se debe tener control y precaución con estos. Un aumento mínimo en sus concentraciones promedio pueden pasar a ser nocivas para la salud de la población. Los gases  $O_3$  y  $SO_2$  no han llegado a representar un peligro en la ciudad. Campañas de monitoreo pasivo demostraron que las concentraciones de  $O_3$  aumentan cuando la vegetación en los alrededores se hace más densa, las concentraciones varían de 15.6 a  $90.1 \mu g m^{-3}$  en una distancia de 20 kilómetros.

Se recomienda hacer un análisis de  $O_3$  más exhaustivo. Si a solo 20 km de la ciudad se encontraron concentraciones ascendentes alcanzando  $90 \mu g m^{-3}$  se considera imprescindible realizar investigaciones con escalas más amplias y tratar de conocer las fuentes, precursores y condiciones que lo hacen formarse y acumularse rápidamente. Esto fue un motivo para estimar las emisiones de COVB conociendo que los COV son precursores de la formación de  $O_3$  en la troposfera.

Como aporte de esta investigación se desarrolló un modelo especialmente desarrollado para ser aplicado a Colombia -BIGA (que calcula las emisiones Biogénicas teniendo en cuenta el Gradiente Altitudinal) donde se considera características de regiones andinas y montañosas de regiones tropicales. El modelo utiliza información de entrada accesible, que países en vía de desarrollo normalmente poseen como son temperatura y radiación solar, mapas de uso y cobertura del suelo y DEM. BIGA requiere software de fácil acceso como

Excel, Matlab y cualquier tipo de SIG. Utiliza una metodología para interpolar la temperatura teniendo en cuenta la influencia de la altitud (Fries, Rollenbeck, NauB, et al. 2012), y el algoritmo matemático de Guenther et al. 1993 que fue adecuado para utilizar factores de emisión nivel canopy. La metodología descrita en este documento ha sido usada para generar un inventario de emisiones biogénicas en una región con características tropicales y andinas. Los resultados demostraron estimaciones, en el mismo orden de magnitud por km<sup>2</sup> que otros estudios para zonas con similares características (Cárdenas R. 2012). El modelo permite trabajar con la resolución espacial que se desee, incluyendo aquellas muy altas como la usada en el presente estudio de 0.0081 km<sup>2</sup> (90x90m).

Los resultados mostraron un aporte significativo de contaminantes emitidos por fuentes biogénicas en Caldas con un estimado total de 24220 Ton año<sup>-1</sup> de COV. También cambios significativos entre diferentes tipos de COVB donde las mayores emisiones fueron estimadas para el día seco con diferencias de hasta el 49% para isopreno y 20% para monoterpenos entre el día seco y el día húmedo. Los mayores flujos fueron dados entre las 13:00 y 15:00 horas con promedios de 3.61 y 1.39 ton m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> para isopreno y monoterpenos respectivamente.

Una especiación de monoterpenos permitió discretizar estos en 42 especies donde se estimó que pineno-alfa representa el 42.3% de los monoterpenos totales siendo así el mayor contribuyente con 2.8 kton año<sup>-1</sup>, seguido por ocimeno-trans-beta con 0.85 y pineno-beta con 0.66 kton año<sup>-1</sup>.

Para conocer un poco sobre el comportamiento del modelo, se realizó una comparación con el modelo MEGAN2.1 donde se utilizó la misma información meteorológica con la que se corrió BIGA. Los resultados mostraron tendencias muy similares donde los picos de ambos modelos normalmente coinciden en tiempo y forma, aunque las magnitudes de los flujos son muy diferentes, normalmente se muestra que MEGAN subestima. Donde se mostraron diferencias hasta del 93% con respecto a BIGA, estas mayores diferencias fueron principalmente con monoterpenos, con isopreno las diferencias fueron cerca del 67%.

Los resultados obtenidos permiten realizar nuevas investigaciones que amplían el conocimiento de la población sobre la calidad del aire que respiran y ayudan en la toma de

decisiones por parte de entidades gubernamentales. Decisiones como la implementación de planes de prevención y políticas de control de emisiones.

Con el fin de compartir información ambiental que cada día se hace más importante para la población caldense, los datos e indicadores de las estaciones meteorológicas y de calidad del aire de Caldas fueron publicados y pueden ser obtenidas online a través del siguiente link <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/>.

Se recomienda hacer análisis más profundos de O<sub>3</sub> y actualizar el inventario de fuentes biogénicas cada que se publique un nuevo mapa de uso y cobertura del suelo de Caldas.



## **ANEXOS**

### ANEXO A. ARTÍCULO 1

#### **Generación y representación de Indicadores de calidad de aire: caso de estudio aplicado a Manizales**

Estado: Publicado

Autores: Li-Ramírez, Jade Alexandra  
Pérez-Zapata, Ángela María  
Duque-Méndez, Néstor Darío  
Aristizábal-Zuluaga, Beatriz Helena

Revista: Iteckne

Año: 2016

Volumen: 13(2)

Páginas: 174-184

On-line: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1692-17982016000200008&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-17982016000200008&lng=en&tlng=es)

## ANEXO B. ARTÍCULO 2

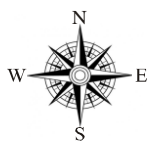
**Methodology and preliminary assessment of the biogenic contribution to Volatile Organic Compounds (VOCs) of a mountainous and tropical region.**

Estado: Sometido

Autores: Li-Ramírez, Jade Alexandra  
Zambrano-Nájera, Jeannette del Carmen  
Aristizábal-Zuluaga, Beatriz Helena

Año: 2017

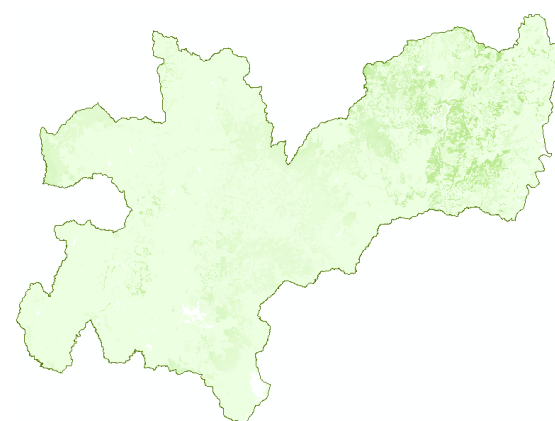
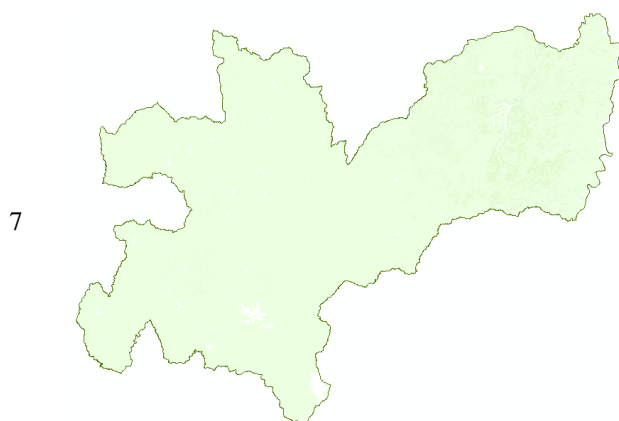
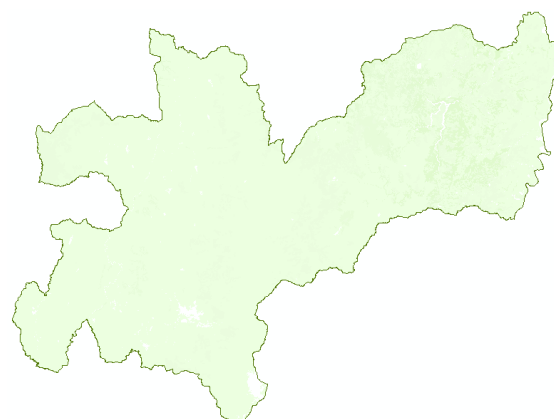
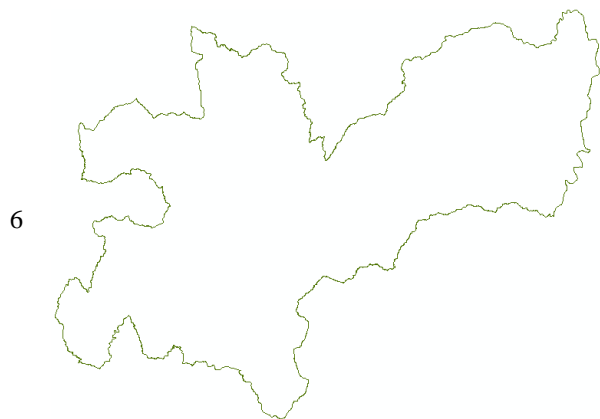
## ANEXO C. MAPAS ESPACIALES DE COVB

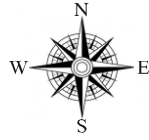
Flujos de isopreno para día seco ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )Flujos de isopreno para día húmedo ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

Escala 1:1900000

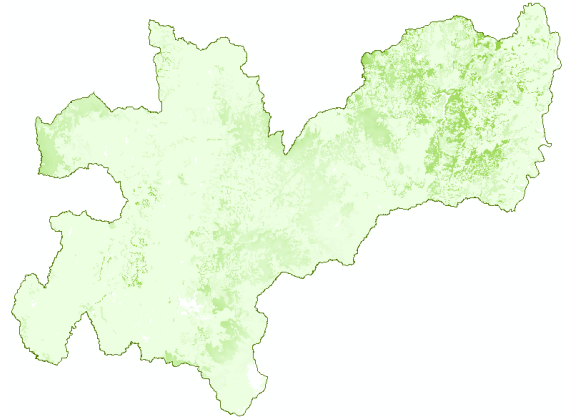
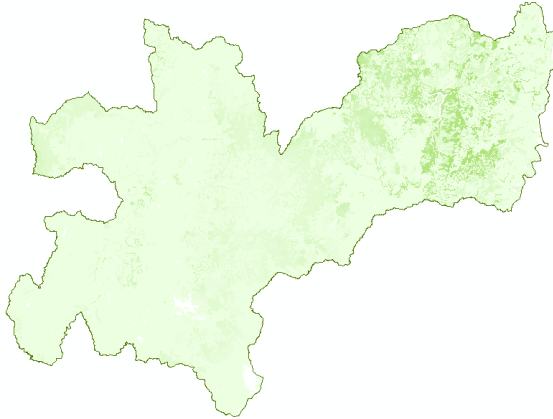
0 10 20 30

Kilometros

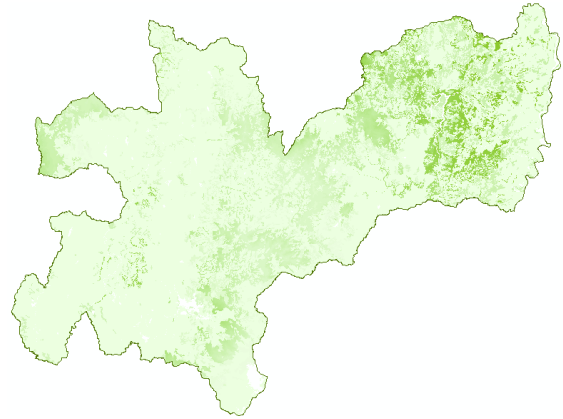
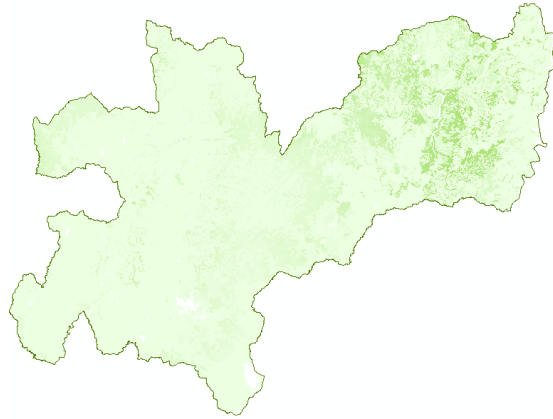


Flujos de isopreno para día seco ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )Flujos de isopreno para día húmedo ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )Escala 1:1900000  
0 10 20 30  
Kilometros

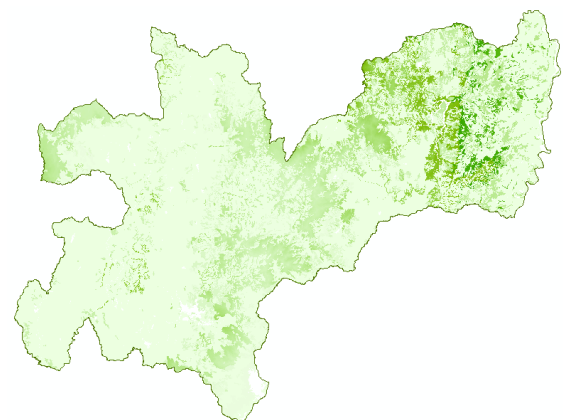
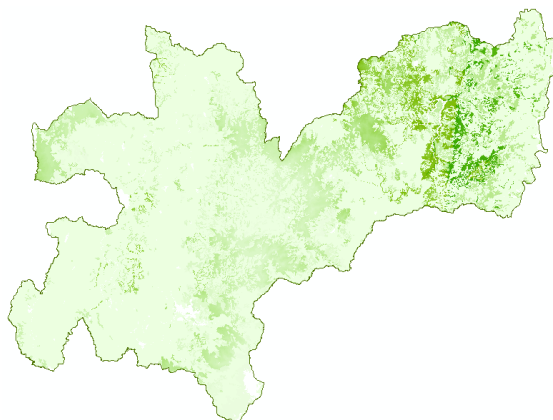
8



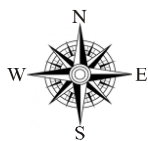
9



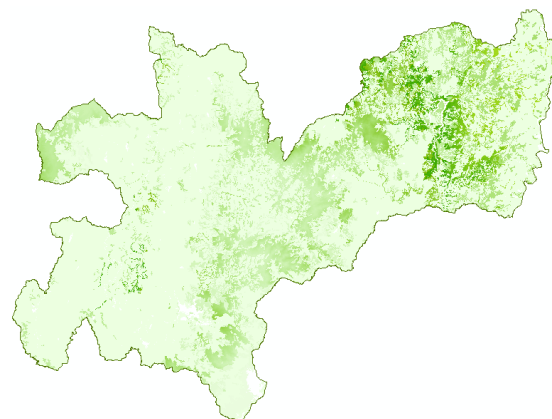
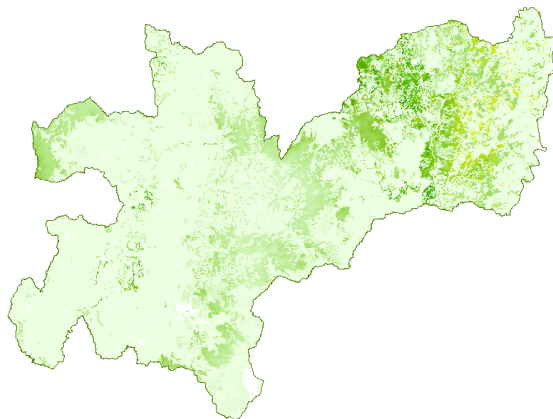
10



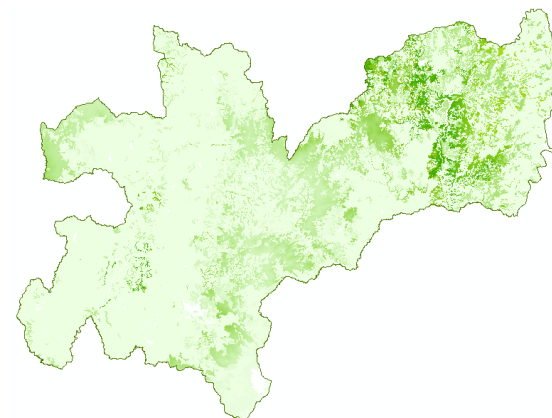
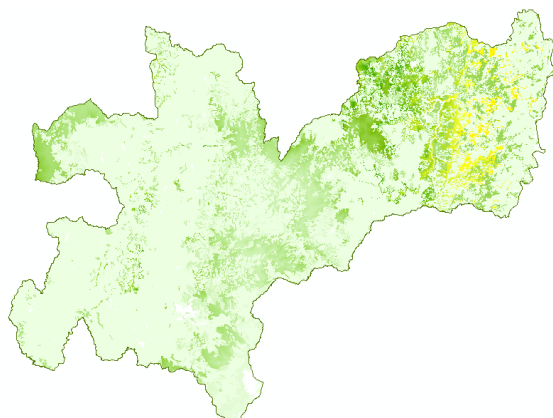


Flujos de isopreno para día seco ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )Flujos de isopreno para día húmedo ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )Escala 1:1900000  
0 10 20 30  
Kilometros

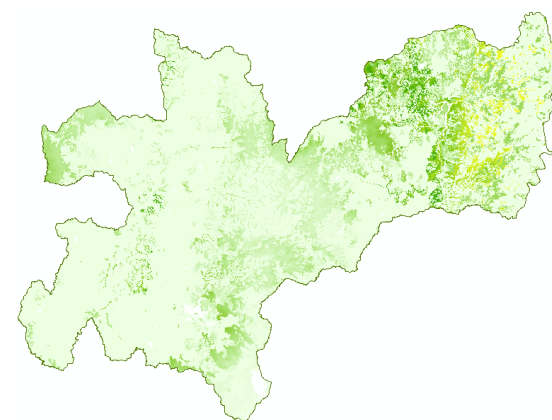
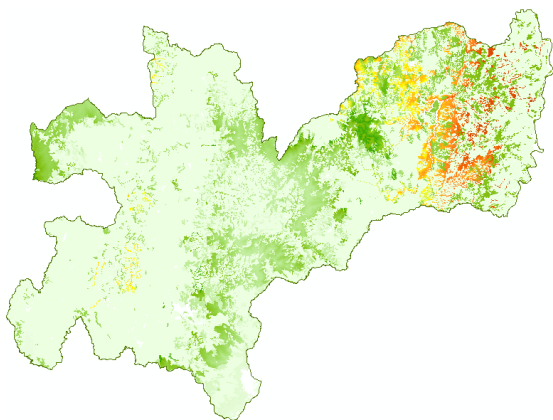
11

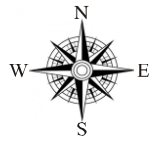


12

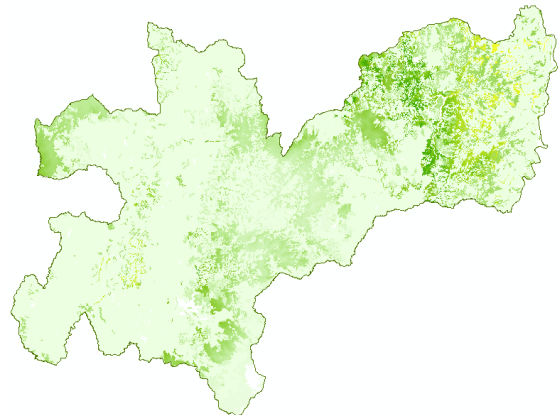
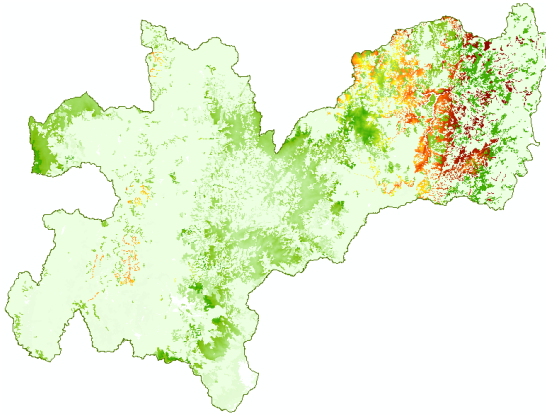


13

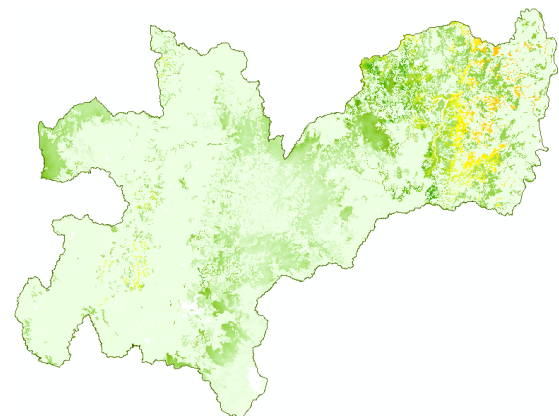
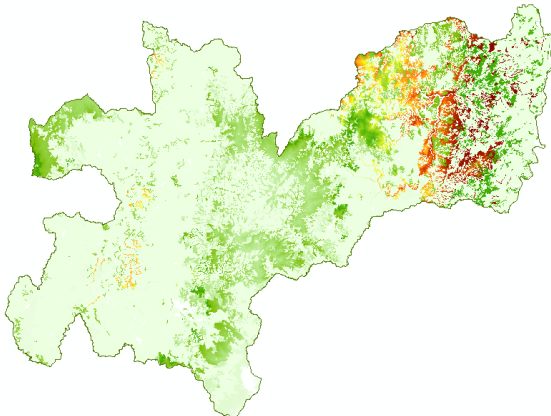


Flujos de isopreno para día seco ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )Flujos de isopreno para día húmedo ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )Escala 1:1900000  
0 10 20 30  
Kilometros

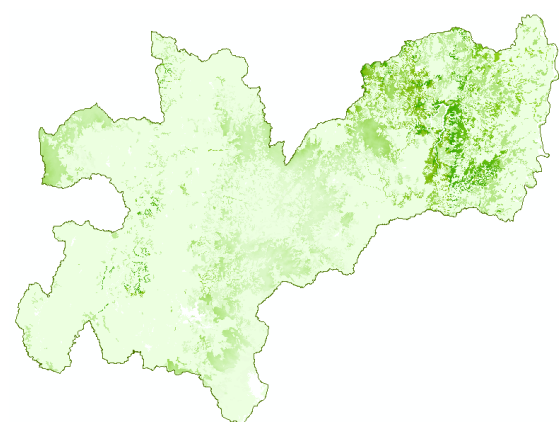
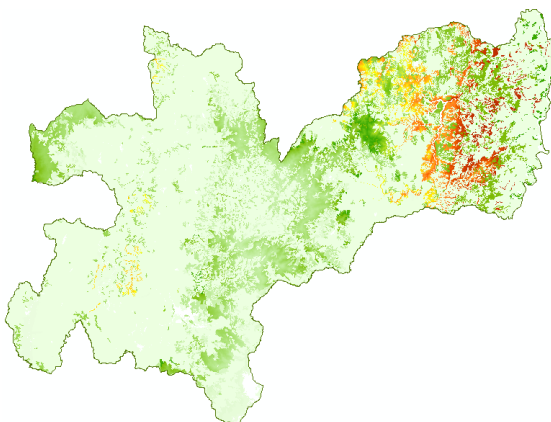
14

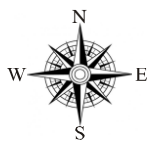


15

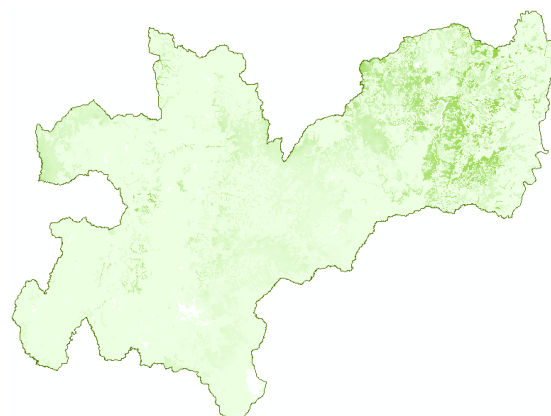
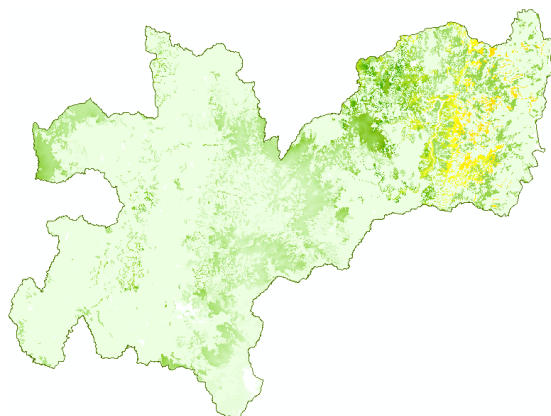


16

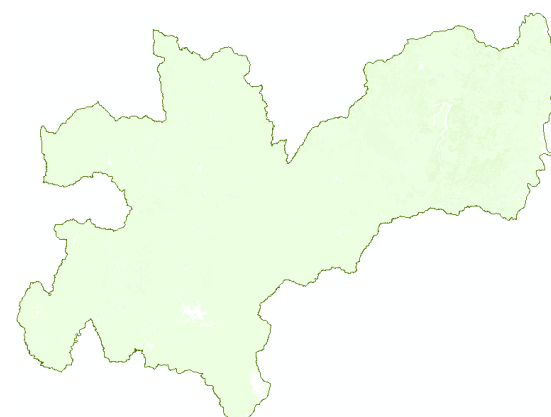
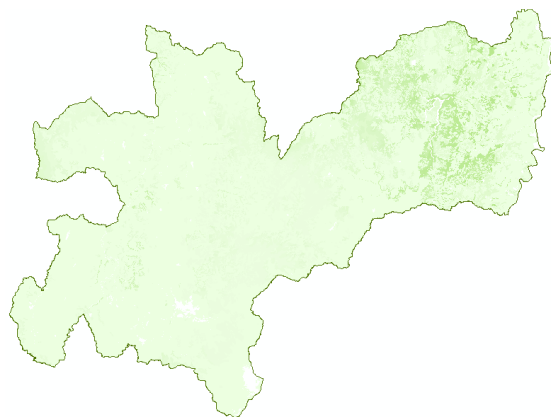


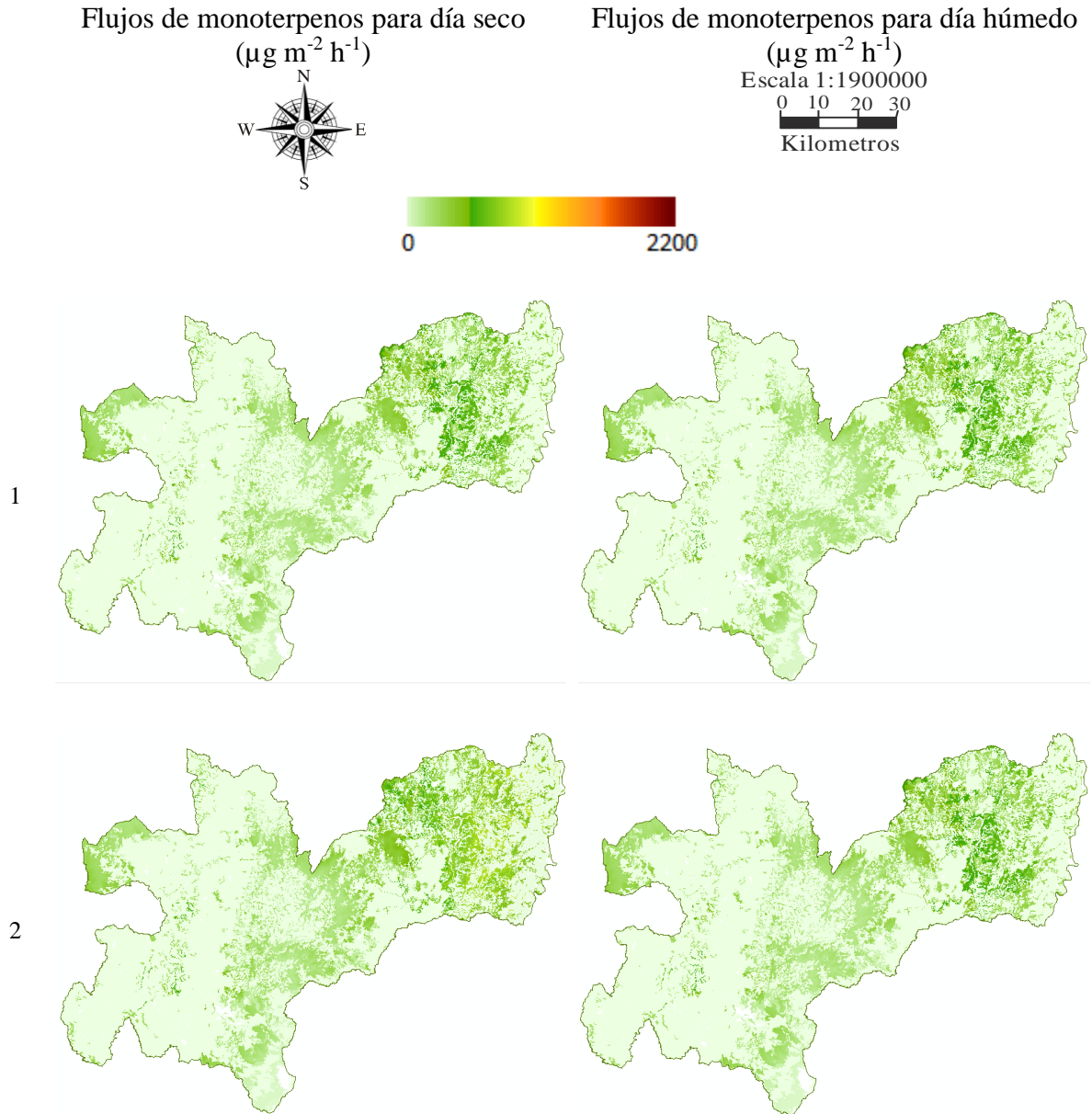
Flujos de isopreno para día seco ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )Flujos de isopreno para día húmedo ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )Escala 1:1900000  
0 10 20 30  
Kilometros

17



18







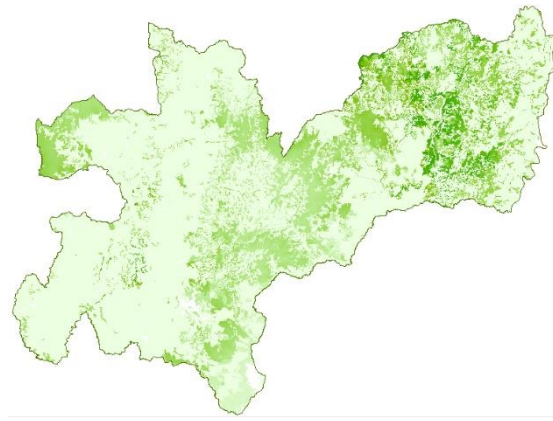
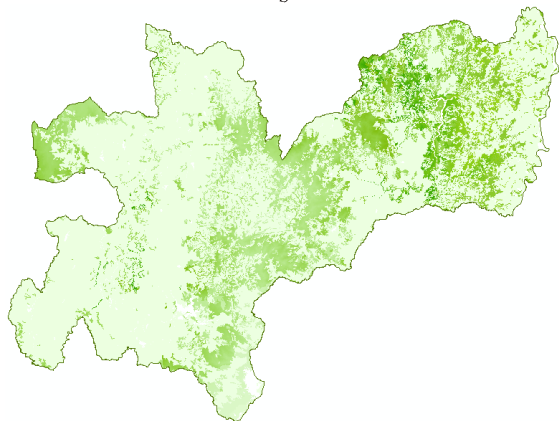
Flujos de monoterpenos para día seco  
( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )



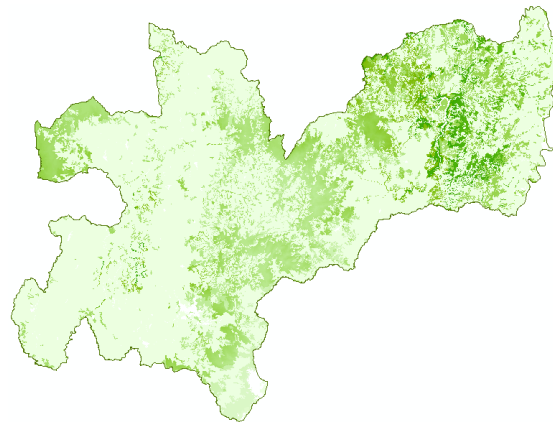
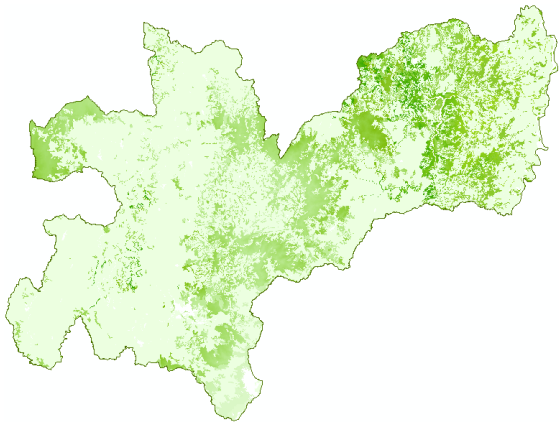
Flujos de monoterpenos para día húmedo  
( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

Escala 1:1900000  
0 10 20 30  
Kilometros

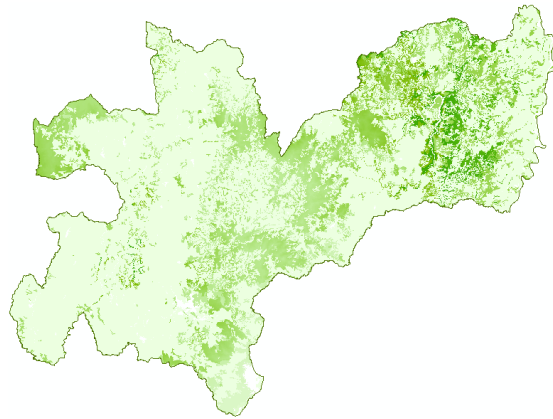
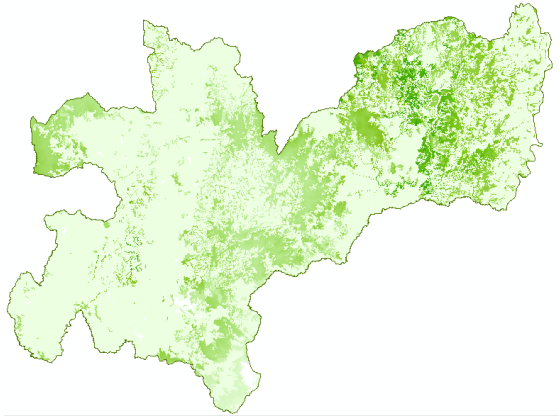
3



4



5





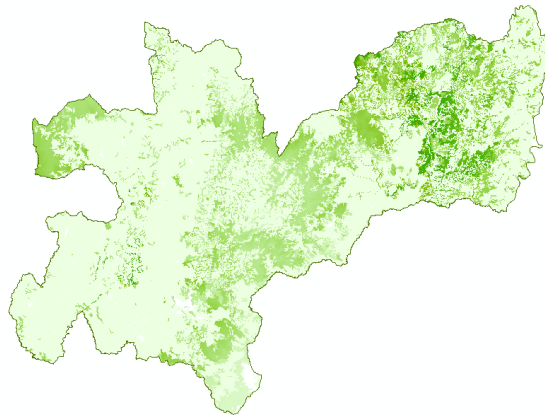
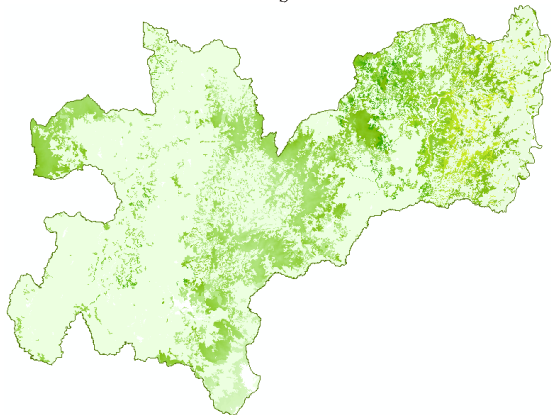
Flujos de monoterpenos para día seco  
( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )



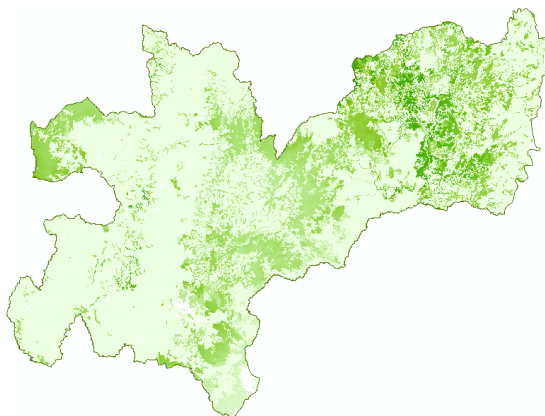
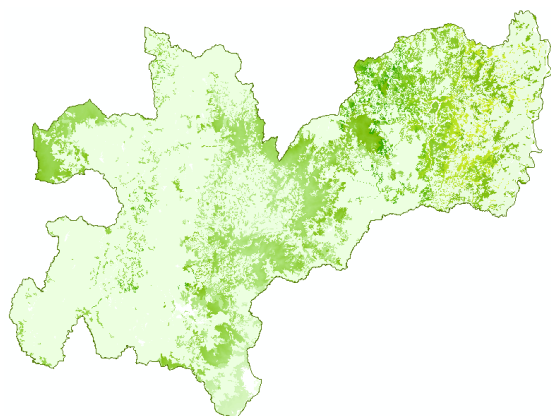
Flujos de monoterpenos para día húmedo  
( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

Escala 1:1900000  
0 10 20 30  
Kilometros

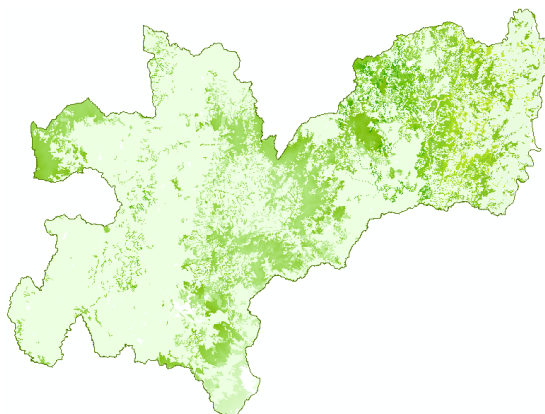
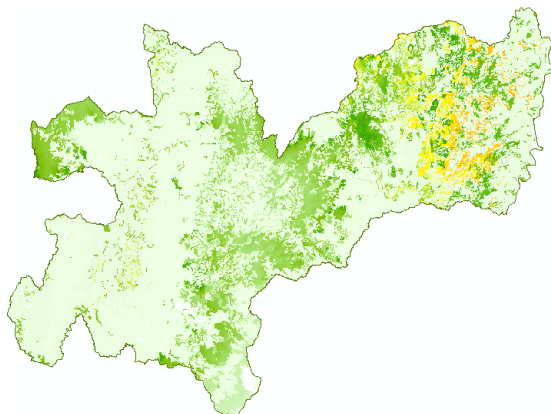
9



10

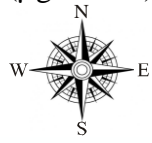


11

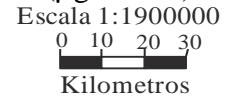




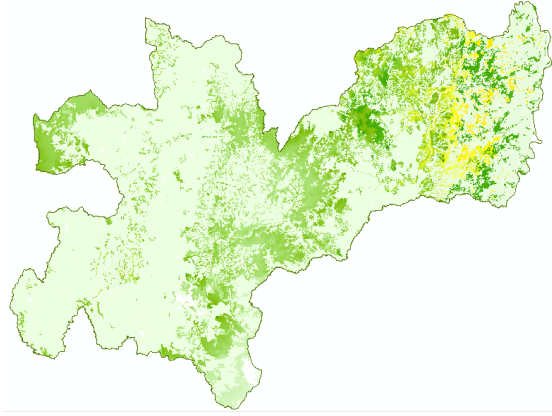
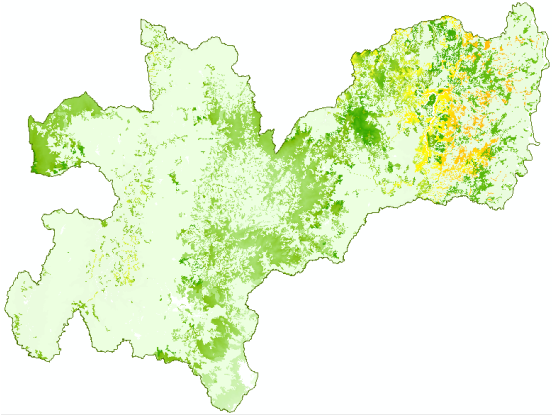
Flujos de monoterpenos para día seco  
( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )



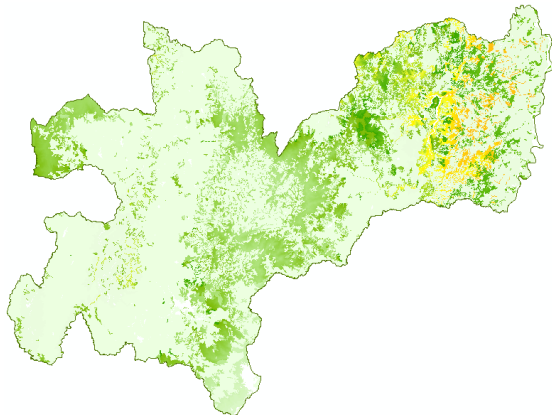
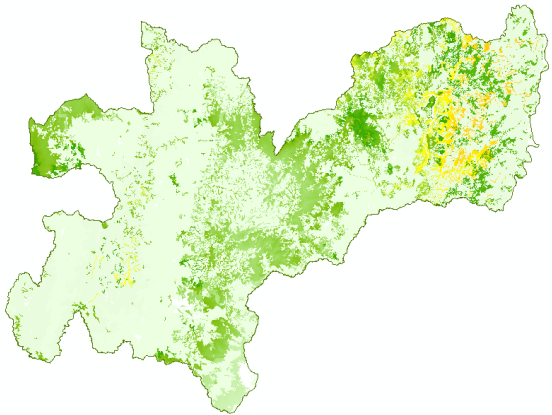
Flujos de monoterpenos para día húmedo  
( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )



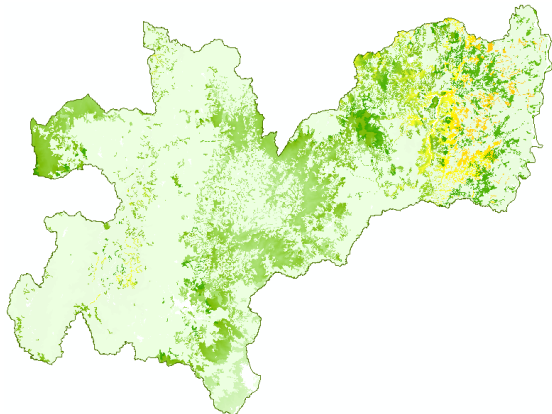
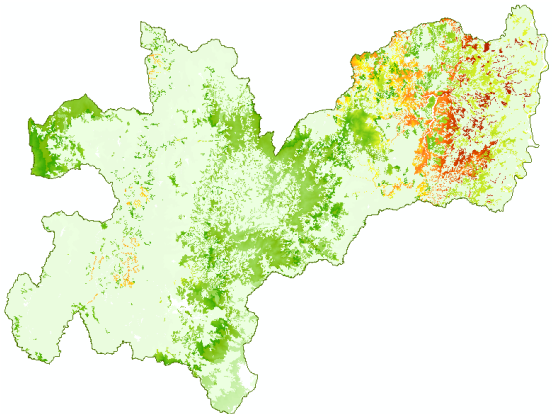
12



13



14





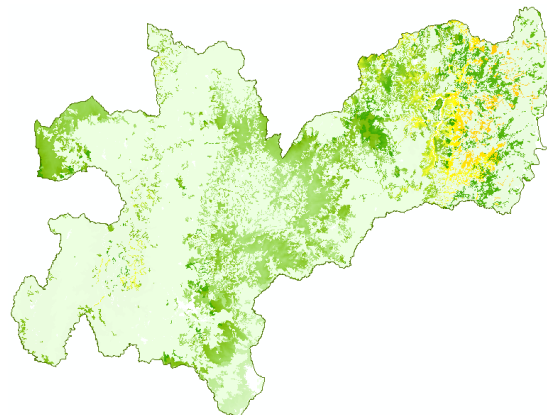
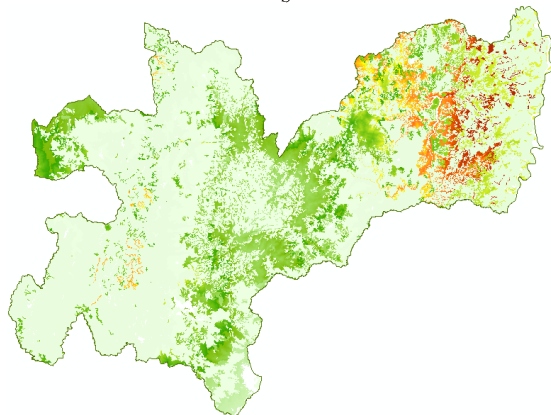
Flujos de monoterpenos para día seco  
( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )



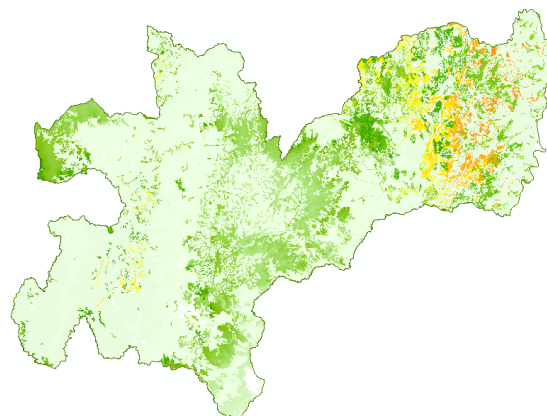
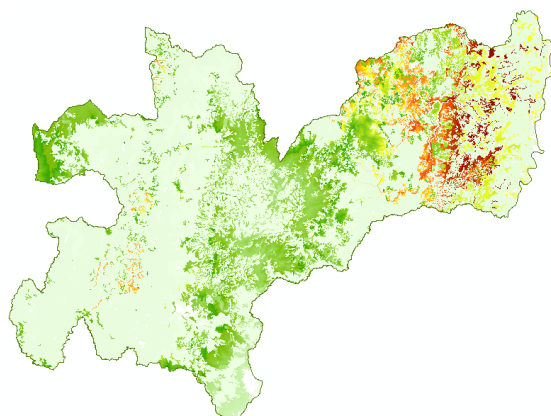
Flujos de monoterpenos para día húmedo  
( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

Escala 1:1900000  
0 10 20 30  
Kilometros

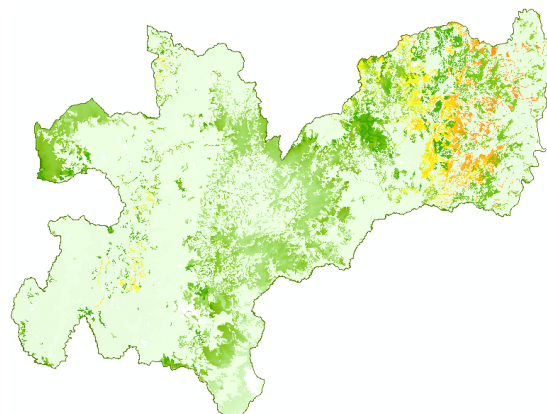
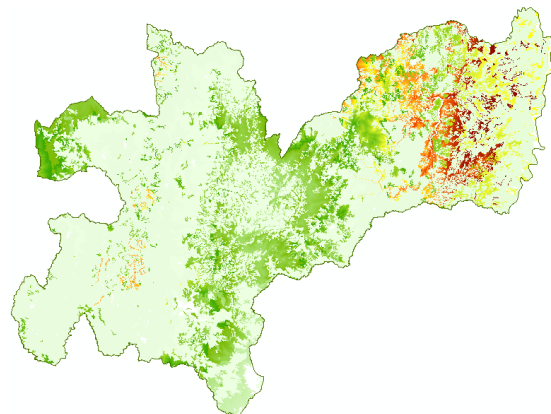
15

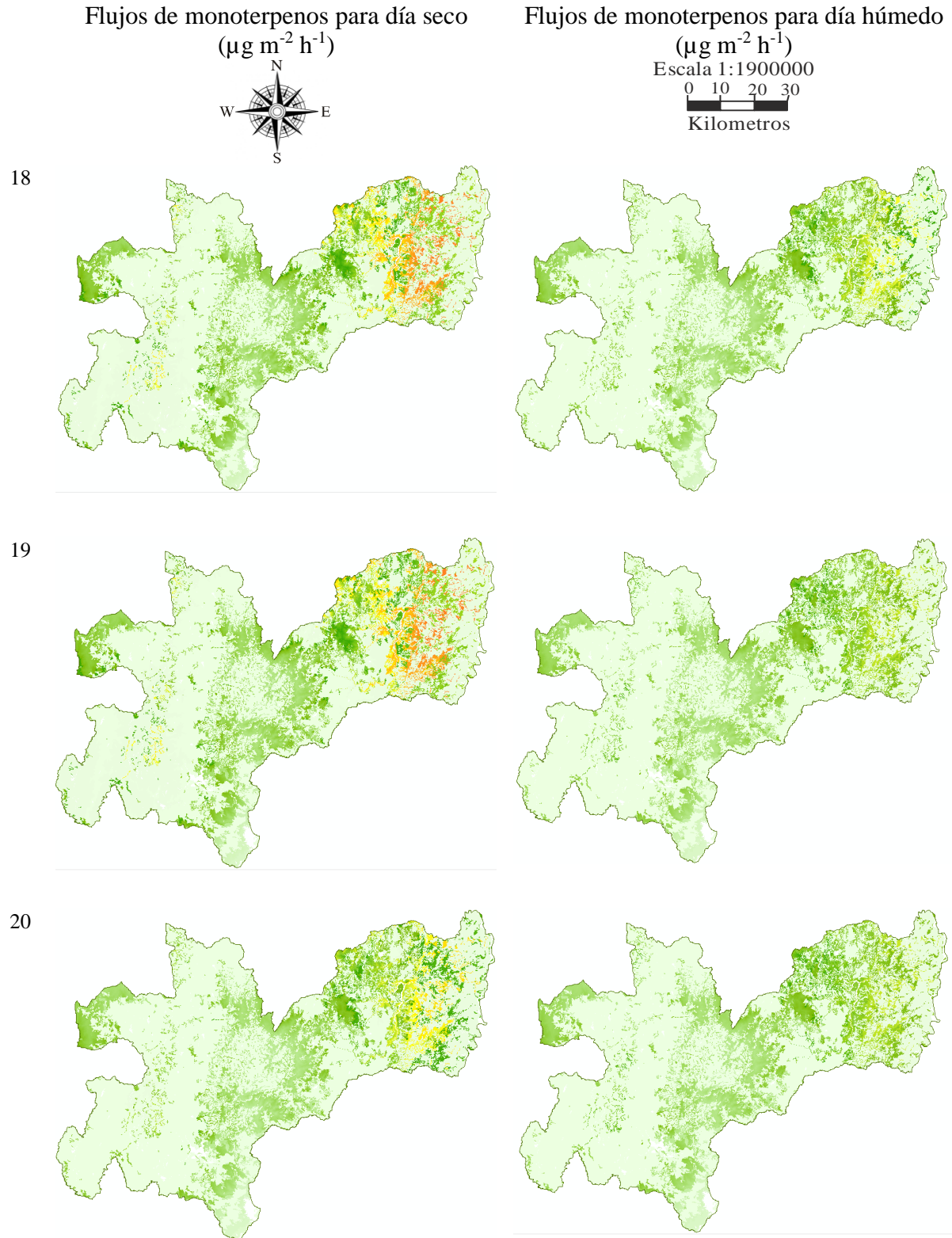


16



17





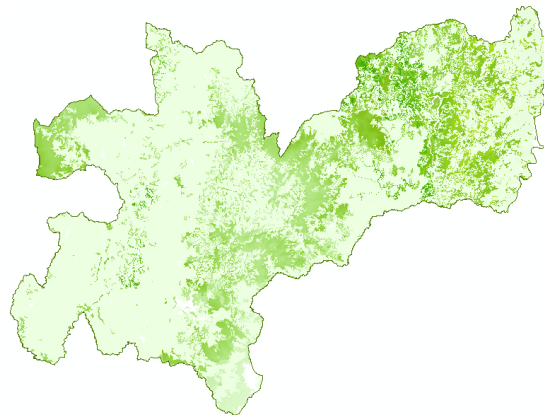
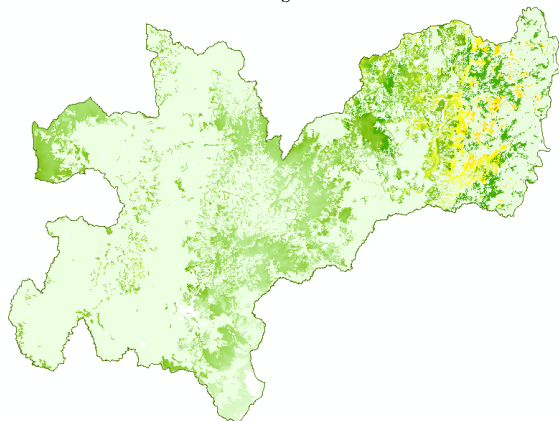
Flujos de monoterpenos para día seco  
( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )



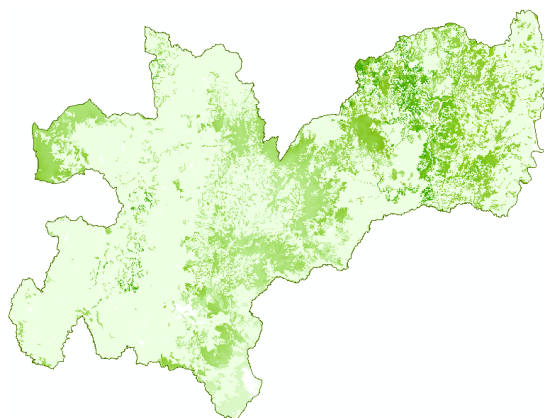
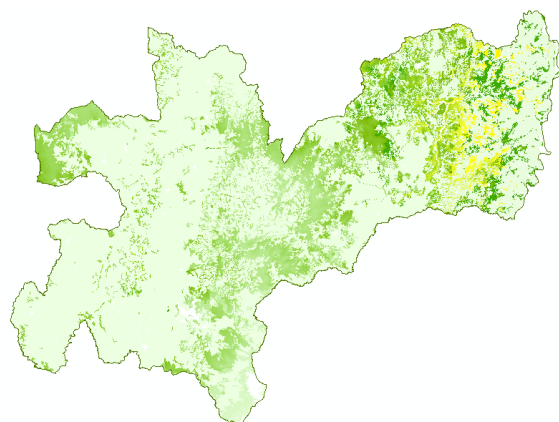
Flujos de monoterpenos para día húmedo  
( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

Escala 1:1900000  
0 10 20 30  
Kilometros

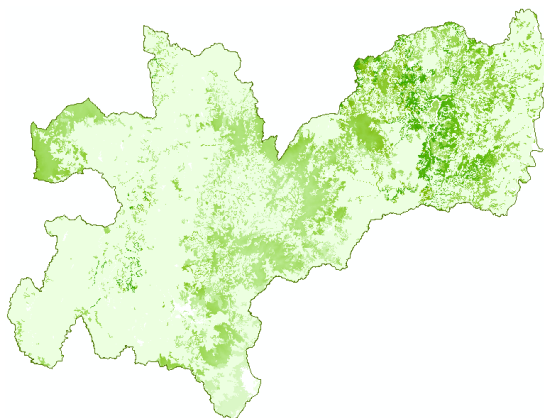
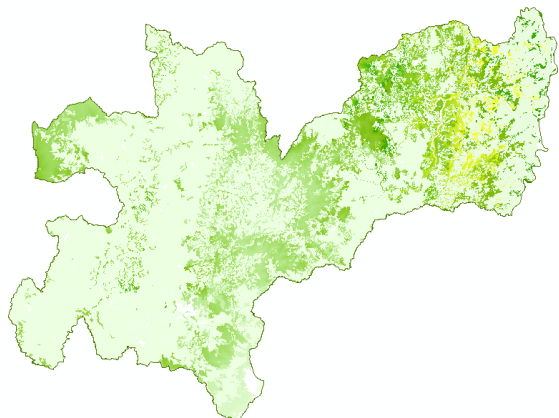
21



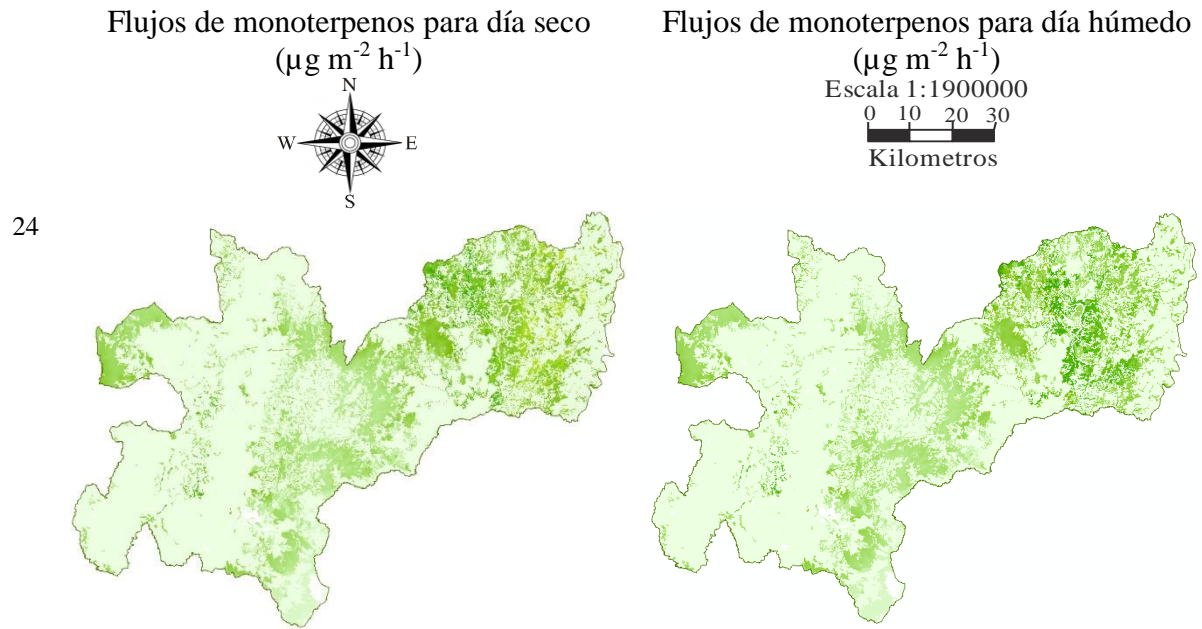
22



23

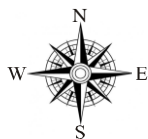




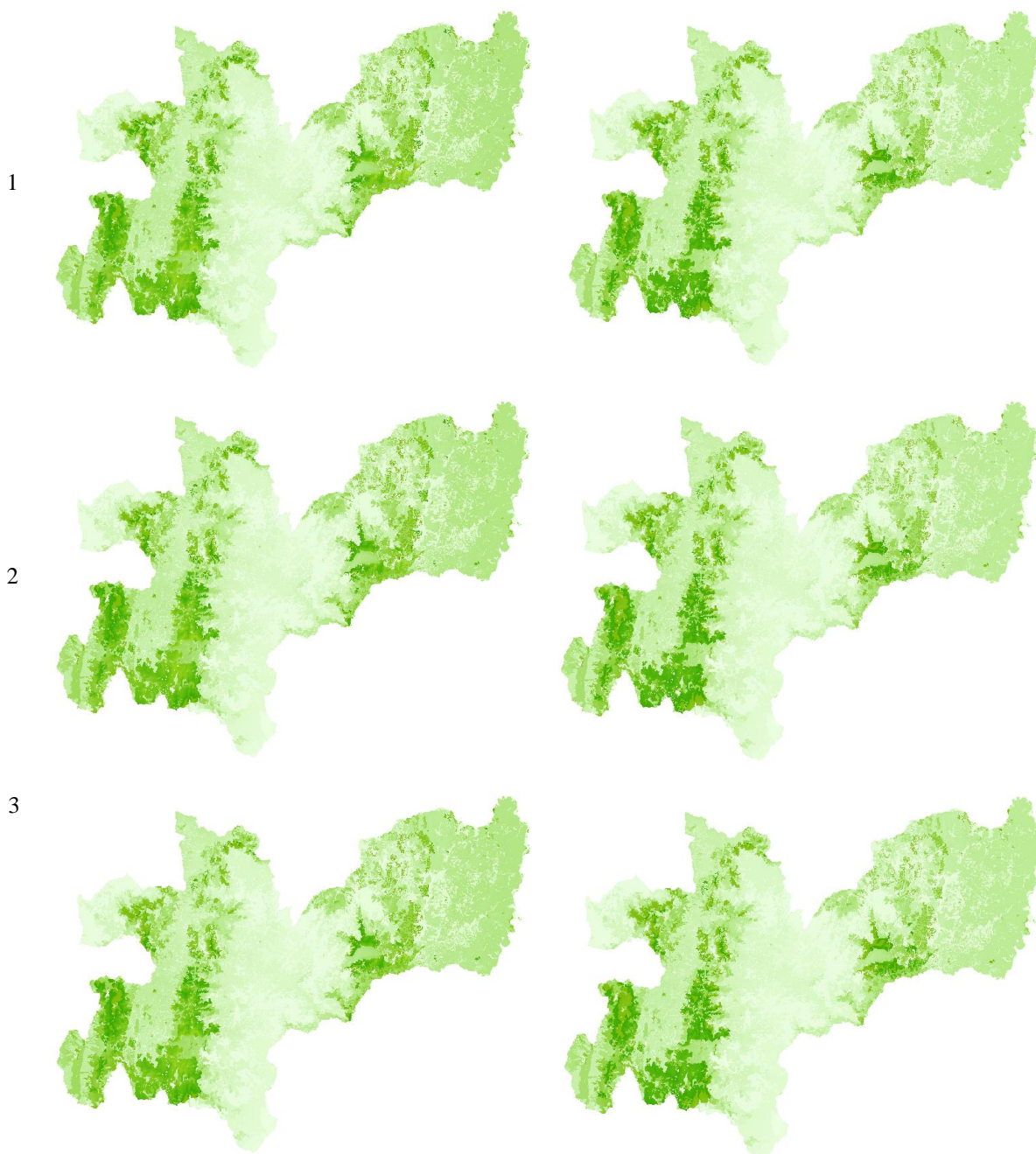


Flujos de otros COV biogénicos para día  
seco ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

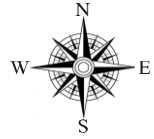
Flujos de otros COV biogénicos para día  
húmedo ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )



Escala 1:1900000  
0 10 20 30  
Kilometros



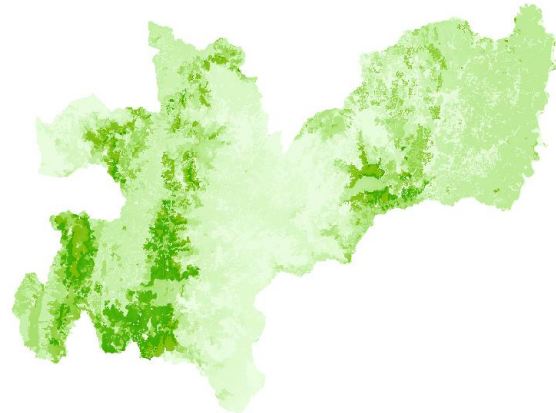
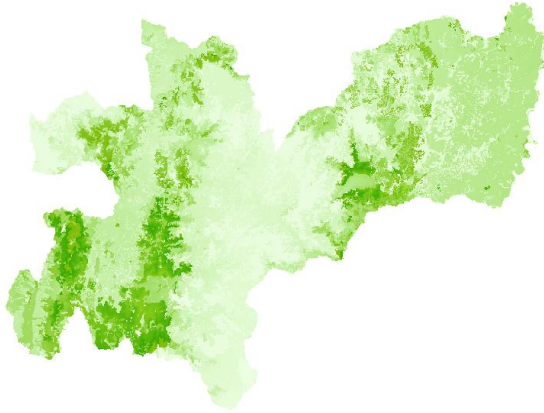
Flujos de otros COV biogénicos para día  
seco ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )



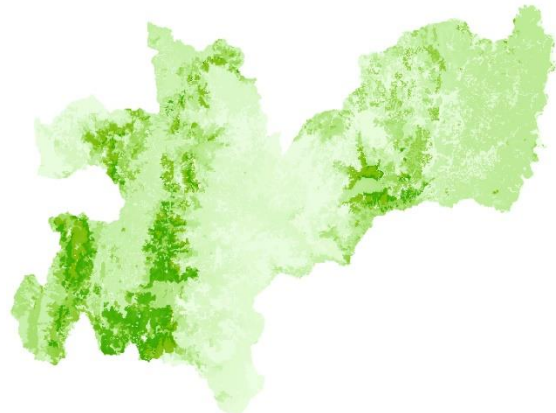
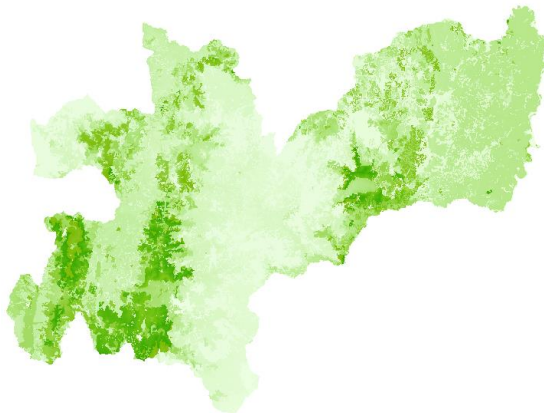
Flujos de otros COV biogénicos para día  
húmedo ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

Escala 1:1900000  
0 10 20 30  
Kilometros

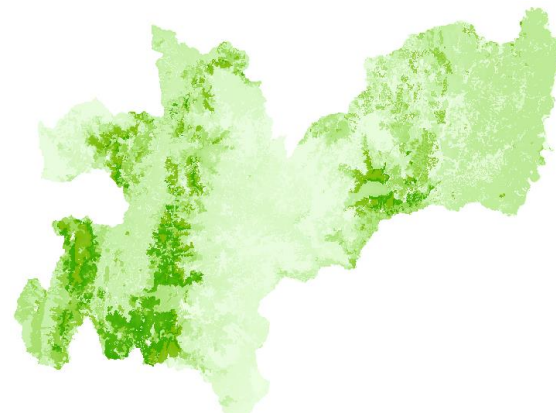
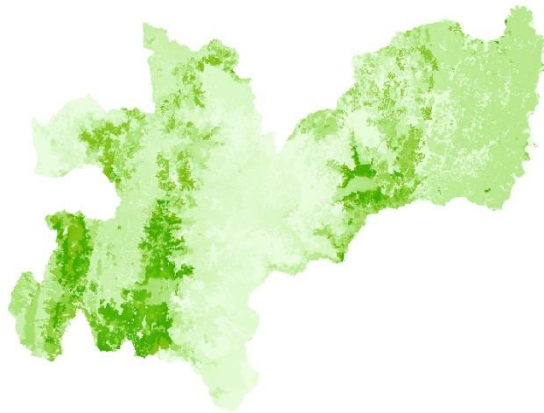
4



5



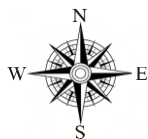
6





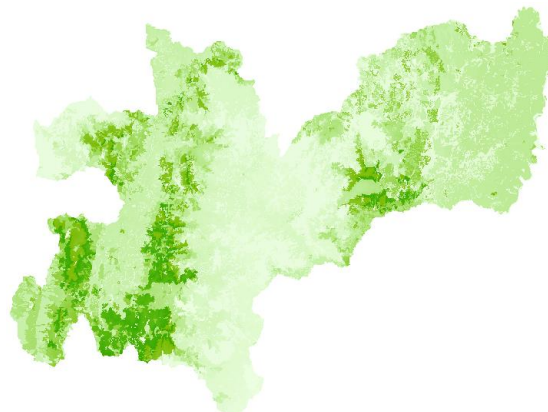
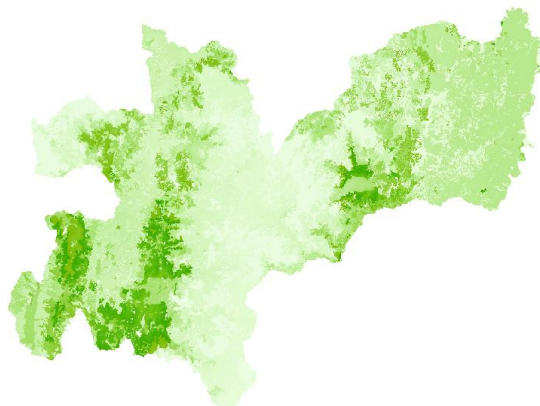
Flujos de otros COV biogénicos para día  
seco ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

Flujos de otros COV biogénicos para día  
húmedo ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

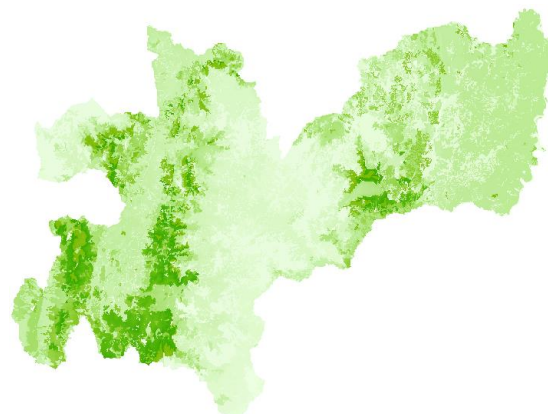
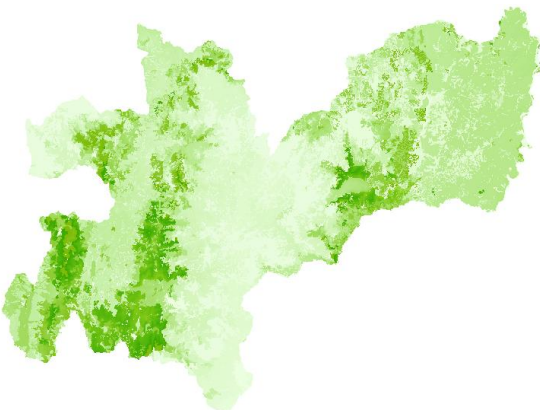


Escala 1:1900000  
0 10 20 30  
Kilometros

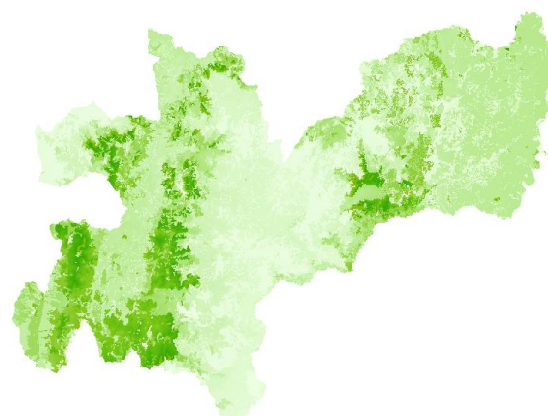
7



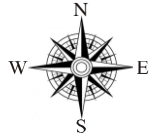
8



9



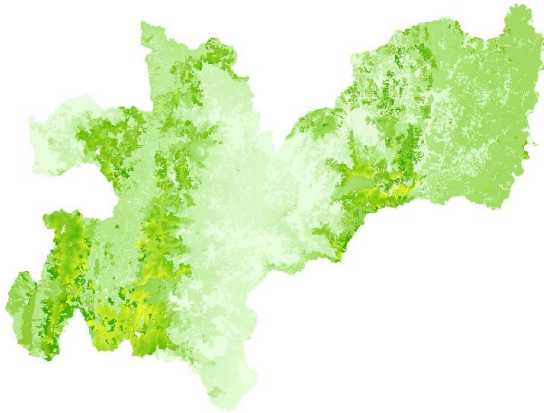
Flujos de otros COV biogénicos para día  
seco ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )



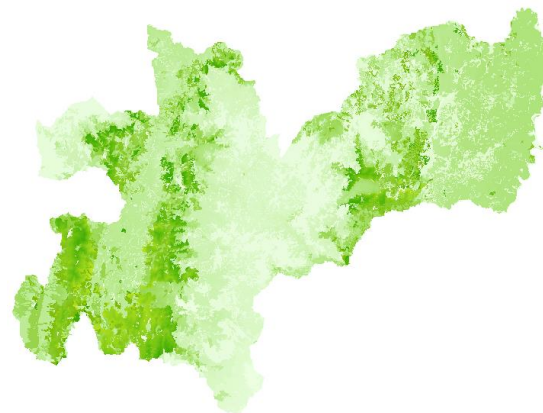
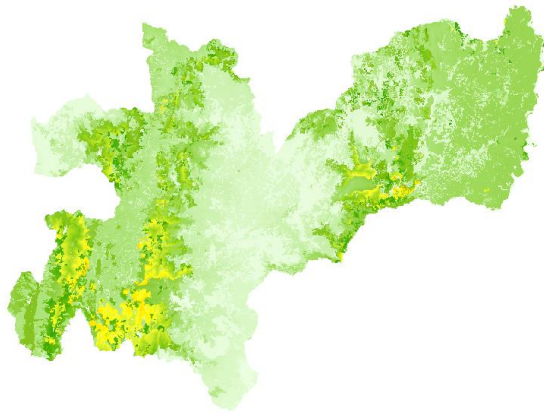
Flujos de otros COV biogénicos para día  
húmedo ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

Escala 1:1900000  
0 10 20 30  
Kilometros

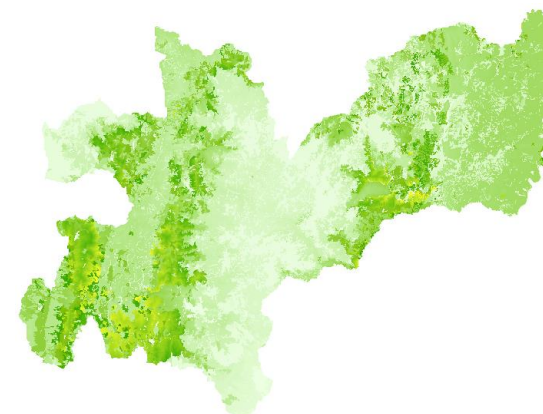
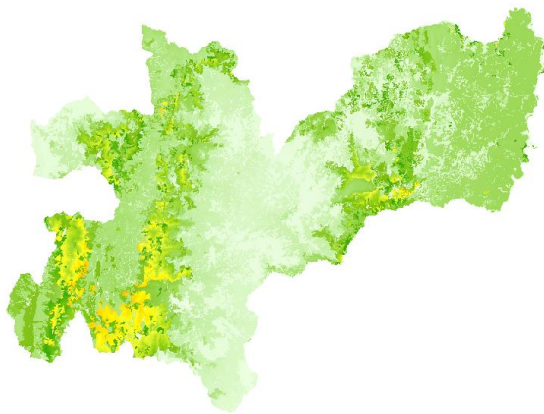
10



11

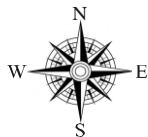


12





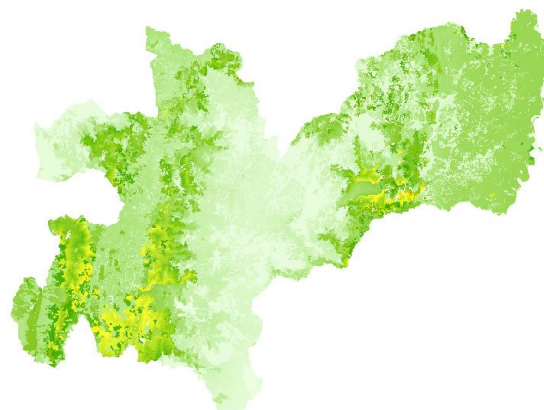
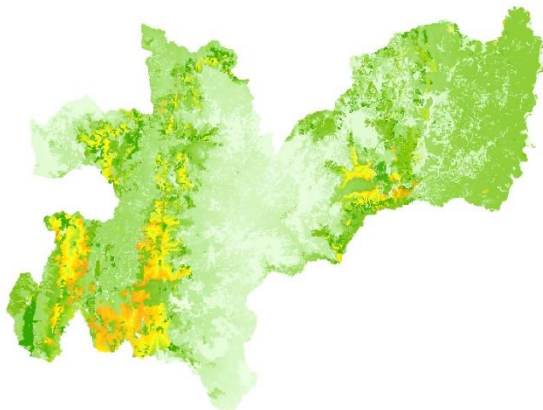
Flujos de otros COV biogénicos para día  
seco ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )



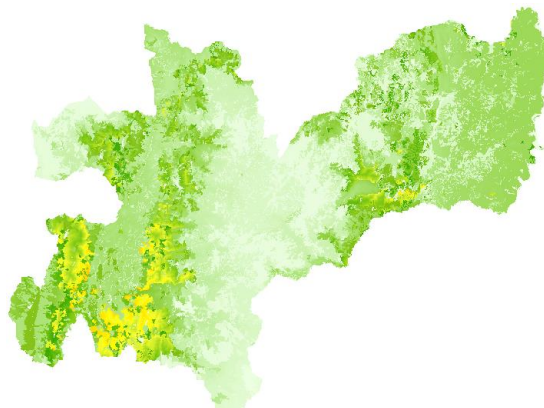
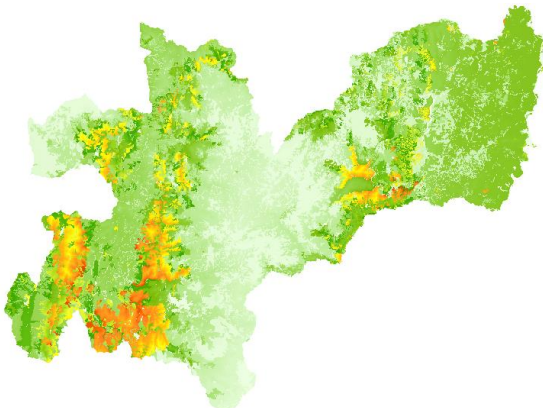
Flujos de otros COV biogénicos para día  
húmedo ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

Escala 1:1900000  
0 10 20 30  
Kilometros

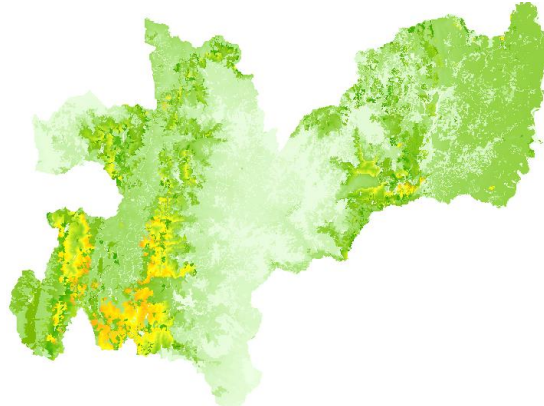
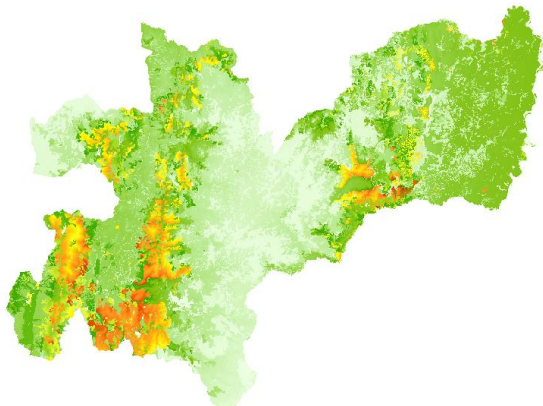
13



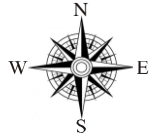
14



15



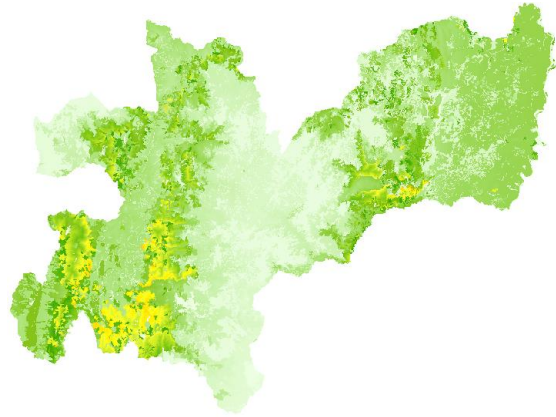
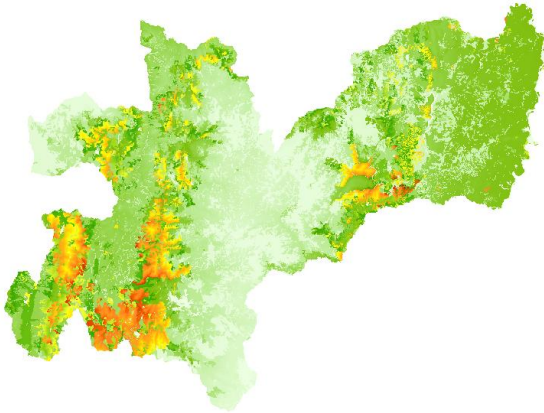
Flujos de otros COV biogénicos para día  
seco ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )



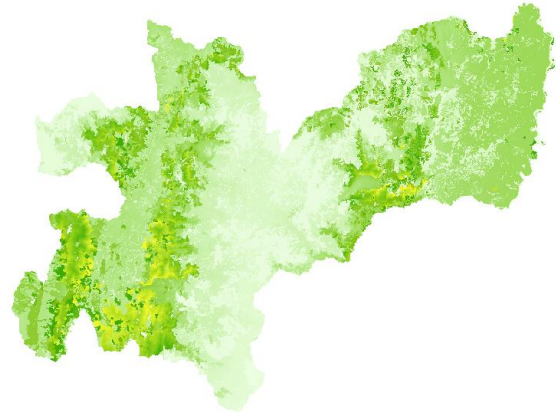
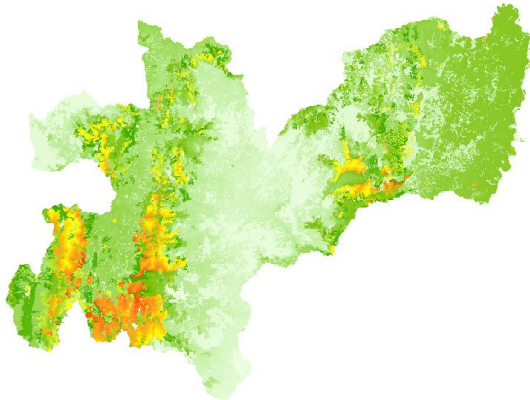
Flujos de otros COV biogénicos para día  
húmedo ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

Escala 1:1900000  
0 10 20 30  
Kilometros

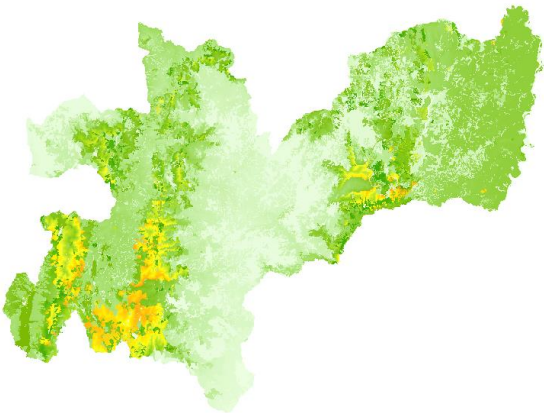
16



17

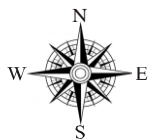


18





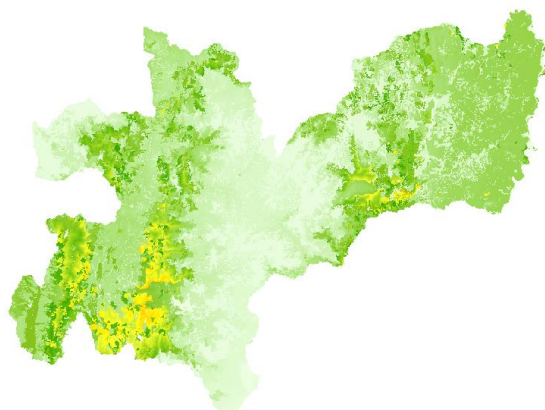
Flujos de otros COV biogénicos para día  
seco ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )



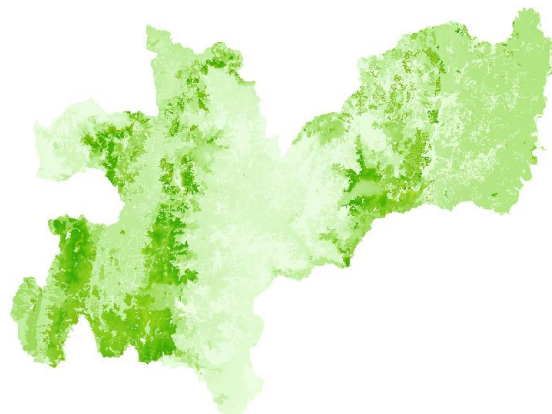
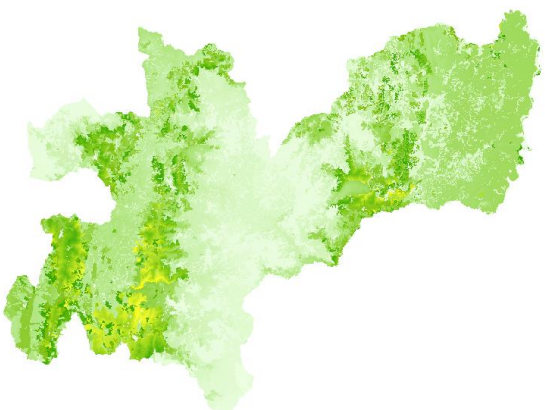
Flujos de otros COV biogénicos para día  
húmedo ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )

Escala 1:1900000  
0 10 20 30  
Kilometros

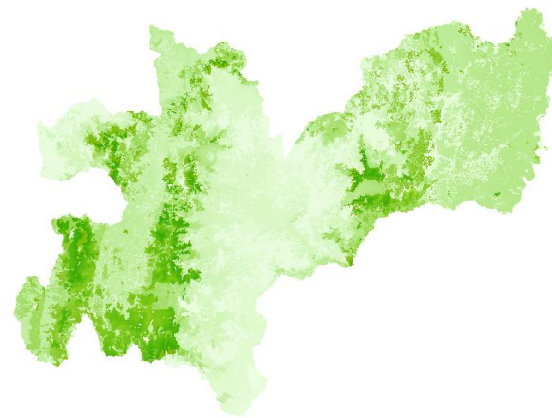
19



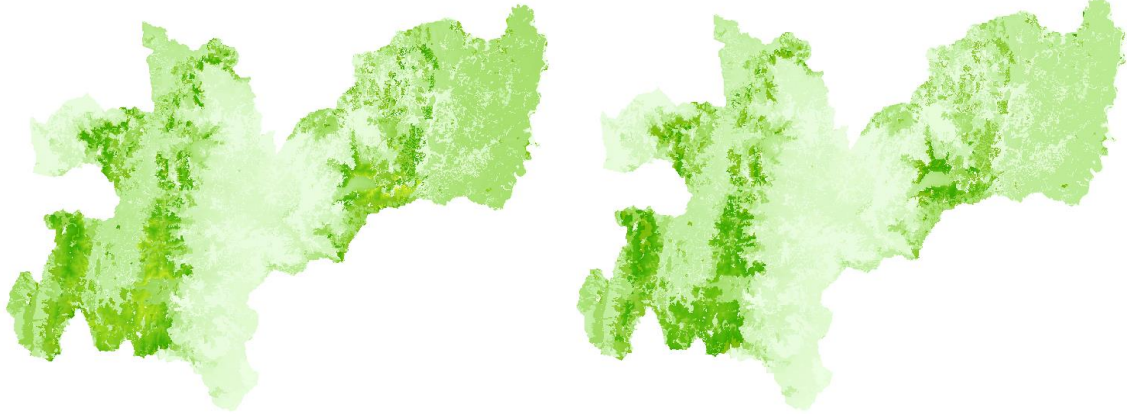
20



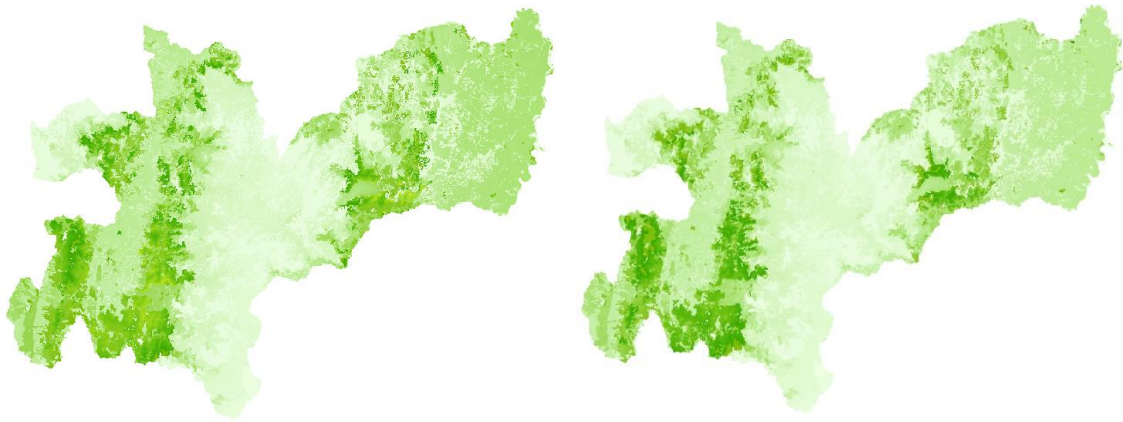
21



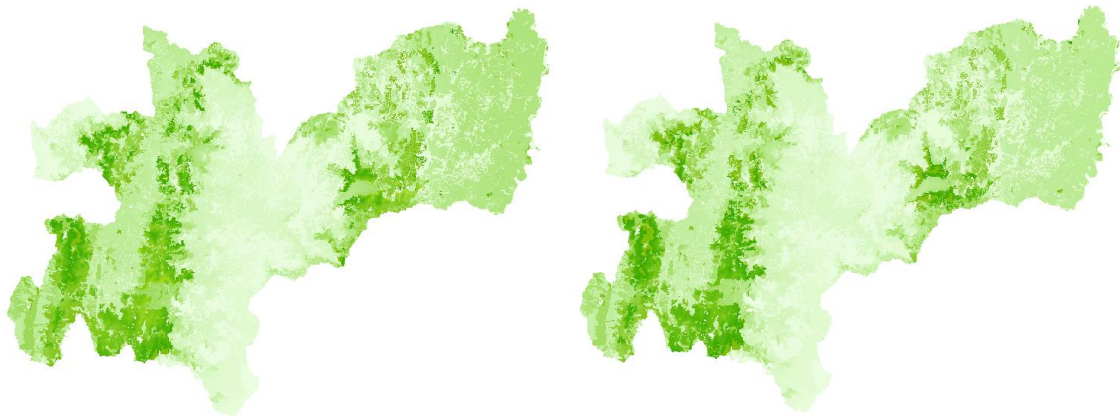
22



23



24



## BIBLIOGRAFÍA

- Aculinin, A., 2008. Photosynthetically Active Radiation in Moldova. *Moldavian Journal of the Physical Sciences*, 7(NI), pp.115–123.
- Alves, E.G. et al., 2014. Effects of light and temperature on isoprene emission at different leaf developmental stages of *Eschweilera coriacea* in central Amazon. *Acta Amazonia*, 44(1), pp.9–18.
- Arey, J. et al., 1991. Terpenes emitted from agricultural species found in California's central valley. *Journal of Geophysical Research*, 96(D5), pp.9329–9336.
- Baghi, R. et al., 2012. Contribution of flowering trees to urban atmospheric biogenic volatile organic compound emissions. *Biogeosciences*, 9(10), pp.3777–3785.
- Bai, J. et al., 2015a. Seasonal and interannual variations in whole–ecosystem isoprene and monoterpene emissions from a temperate mixed forest in Northern China. *Atmospheric Pollution Research*, 6, pp.696–707. Available at: <http://www.atmospolres.com/articles/Volume6/issue4/APR-15-078.pdf>.
- Bai, J. et al., 2015b. Seasonal and interannual variations in whole–ecosystem isoprene and monoterpene emissions from a temperate mixed forest in Northern China. *Atmospheric Pollution Research*, 6(4), pp.696–707. Available at: <http://www.atmospolres.com/articles/Volume6/issue4/APR-15-078.pdf>.
- Behnke, K. et al., 2013. Isoprene function in two contrasting poplars under salt and sunflecks. *Tree Physiology*, 33(6), pp.562–578.
- Calfapietra, C. et al., 2013. Role of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: A review. *Environmental Pollution*.
- Cárdenas R., P.A., 2012. *Desarrollo de un inventario geo-referenciado de emisiones biogénicas para el dominio de modelación meso-escala de Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia.
- Chang, J. et al., 2012. An inventory of biogenic volatile organic compounds for a subtropical urban-rural complex. *Atmospheric Environment*, 56, pp.115–123. Available at:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.053>.

- Clench-Aas, J., Guerreiro, C. & Bartonova, A., 1998. *Air quality indicators*, Kjeller-Norway: Norsk institutt for luftforskning. Available at: [www.epa.gov](http://www.epa.gov).
- CMAS, 2016. SMOKE. Available at: <https://www.cmascenter.org/smoke/> [Accessed June 1, 2016].
- CONPES, 2005. *Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación del aire*, Bogota D. C, Colombia.
- Cope, K.R., Snowden, M.C. & Bugbee, B., 2014. Photobiological Interactions of Blue Light and Photosynthetic Photon Flux: Effects of Monochromatic and Broad-Spectrum Light Sources. *Photochemistry and Photobiology*, 90(3), pp.574–584. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/php.12233> [Accessed February 2, 2017].
- CORPOCALDAS, 2015. Corporación autónoma de Caldas. Available at: [www.corpocaldas.gov.co](http://www.corpocaldas.gov.co) [Accessed October 10, 2015].
- CORPOCALDAS, 2007. *Plan de gestión ambiental regional para caldas. 2007-2019*, Manizales.
- Costa, C. et al., 2010. *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra, Metodología CORINE Land Cover Adapta para Colombia, Escala 1:100.000*,
- Cuesta-Mosquera, A.P. et al., 2017. Distribución espacial de concentraciones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y O<sub>3</sub> en el aire ambiente de Manizales usando muestreadores pasivos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*.
- Cuesta Mosquera, A.P., 2017. *Estudio del impacto de las emisiones antropogénicas y geogénicas de dióxido de azufre, en la calidad del aire de Manizales*. Universidad Nacional de Colombia.
- DANE, 2005. Proyección Municipios de Colombia 2005\_2020.
- DNP, 2017. Departamento Nacional de Planeación. *Los costos en la salud asociados a la degradación ambiental en Colombia ascienden a \$20,7 billones*. Available at: [www.dnp.gov.co](http://www.dnp.gov.co).
- EMEP/EEA, 2016. B1101 Non-managed & managed forests GB2013. In *Technical guidance to prepare national emission inventories*. United Nations.
- EPA, 2016a. Air Emissions Inventories. *National Emissions Inventory (NEI) Data*. Available at: <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/2011-national-emissions-inventory-nei-data> [Accessed January 15, 2017].
- EPA, 2009. Air Emissions Modeling. *Biogenic Emission Inventory System (BEIS)*. Available at: <https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/biogenic-emission-inventory-system-beis> [Accessed June 1, 2016].
- EPA, 2016b. Indoor Air Quality (IAQ). *Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air*

- Quality*. Available at: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality> [Accessed January 5, 2017].
- FAO, 2017. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *LEAF AREA INDEX (LAI)*. Available at: <http://www.fao.org> [Accessed July 19, 2017].
- Fares, S. et al., 2011. Biogenic emissions from Citrus species in California. *Atmospheric Environment*, 45(27), pp.4557–4568.
- Fares, S. et al., 2012. Seasonal cycles of biogenic volatile organic compound fluxes and concentrations in a California citrus orchard. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(20), pp.9865–9880.
- Finlayson-Pitts, B.J. & Pitts, J.N., 1999. *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications*,
- Franco, N., 2014. Encuesta de Percepción Ciudadana Manizales Cómo Vamos. Available at: [www.manizalescomovamos.org](http://www.manizalescomovamos.org).
- Fries, A., Rollenbeck, R., NauB, T., et al., 2012. Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152(1), pp.17–30. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.08.004>.
- Fries, A., Rollenbeck, R., Göttlicher, D., et al., 2012. Thermal structure of a diverse andean mountain ecosystem in southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152(1), pp.17–30. Available at: <https://www.erdkunde.uni-bonn.de/archive/2009/thermal-structure-of-a-megadiverse-andean-mountain-ecosystem-in-southern-ecuador-and-its-regionalization>.
- Gadzhev, G.K. et al., 2011. Atmospheric Composition of the Balkan Region and Bulgaria. Study of the Contribution of Biogenic Emissions. , 209, pp.200–209. Available at: <http://scitation.aip.org/content/aip/proceeding/aipcp/10.1063/1.3659921> [Accessed June 10, 2015].
- Genard-Zielinski, A.C. et al., 2014. Isoprene emissions from downy oak under water limitation during an entire growing season: What cost for growth? *PLoS ONE*, 9(11).
- González, C.M. et al., 2017. Relative impact of on-road vehicular and point-source industrial emissions of air pollutants in a medium-sized Andean city. *Atmospheric Environment*, 152, pp.279–289.
- Goodale, C., Aber, J. & Ollinger, S., 1998. Mapping monthly precipitation, temperature, and solar radiation for Ireland with polynomial regression and a digital elevation model. *Climate Research*, 10, pp.35–49.
- Greenberg, J.P. et al., 2004. Biogenic VOC emissions from forested Amazonian landscapes. *Global Change Biology*, 10(5), pp.651–662.
- Gu, D. et al., 2017. Airborne observations reveal elevational gradient in tropical forest

- isoprene emissions. *Nature Communications*, 8(May), p.15541. Available at: <http://www.nature.com/doi/10.1038/ncomms15541>.
- Guenther, A. et al., 1996. Biogenic hydrocarbon emissions from southern African savannas. *Journal of Geophysical Research*, 101, pp.25859–25865.
- Guenther, A., Catchpole, D., et al., 2012. Emisión de Compuestos Orgánicos Volátiles. In Santa Martha, pp. 81–87. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15003161>.
- Guenther, A. et al., 2006. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, pp.3181–3210.
- Guenther, A. et al., 1993. Isoprene and monoterpene emission rate variability: Model evaluations and sensitivity analyses. *Journal of Geophysical Research*, 98(D7), p.12609.
- Guenther, A. et al., 2000. Natural emissions of non-methane volatile organic compounds , carbon monoxide , and oxides of nitrogen from North America. , 34.
- Guenther, A., Jiang, X., et al., 2012. The model of emissions of gases and aerosols from nature version 2.1 (MEGAN2.1): An extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geoscientific Model Development*, 5(6), pp.1471–1492.
- Guenther, A., Hewitt, C. & Erickson, D., 1995. A global model of natural volatile organic compound emissions. *Journal of geophysical ...*, 100(94), pp.8873–8892. Available at: <http://www.agu.org/pubs/crossref/1995/94JD02950.shtml>.
- Hardy, D.R. et al., 1998. Annual and Daily Meteorological Cycles at High Altitude on a Tropical Mountain. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(9), pp.1899–1913.
- Hincapié, J. et al., 2015. ANALYSIS OF RAINFALL EVENTS FOR WEATHER FORECASTING PURPOSES IN MANIZALES , CALDAS , (1977), p.17569.
- IDEAM, 2014a. Cambio climático - Desarrollo Sostenible. Available at: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/> [Accessed March 28, 2017].
- IDEAM, 2012. *Informe del estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010*, Available at: [http://www.uasf.edu.pe/includes/archivos\\_pre/20112/1035\\_370101\\_20112\\_SEPARATA\\_Calidad\\_de\\_Aire.doc](http://www.uasf.edu.pe/includes/archivos_pre/20112/1035_370101_20112_SEPARATA_Calidad_de_Aire.doc).
- IDEAM, 2016a. *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2011 – 2015*, Bogotá, D.C.
- IDEAM, 2014b. Meteo aeronautica. *Ozono troposférico*. Available at: <http://www.meteo aeronautica.gov.co/ozono-troposferico> [Accessed January 4, 2017].



- IDEAM, 2016b. Sistema de Información Ambiental de Colombia. *Aire*. Available at: <http://www.ideam.gov.co/web/siac/aire> [Accessed January 24, 2017].
- IGAC, 2017. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Available at: <http://www.igac.gov.co/igac> [Accessed September 29, 2017].
- INEEC, 2005. Estimación de emisiones mediante factores de emisión. , pp.175–181. Available at: <http://www.inecc.gob.mx/index.php> [Accessed October 9, 2015].
- INEEC & SEMARNAT, 2013. Contaminantes criterio. Available at: <http://www.inecc.gob.mx/calair-indicadores/523-calair-cont-criterio>.
- IPCC, 2013. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, United Nations. Available at: [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find\\_ef\\_s1.php](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find_ef_s1.php).
- Jaramillo, M., González, D.E. & Núñez, M.E., 2009. Índice integrado de calidad del aire para ciudades colombianas. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 48, pp.97–106.
- Jaramillo, R., 2005. *Clima andino y café en Colombia* Cenicafé, ed., Chinchiná.
- Jardine, K.J. et al., 2013. Emissions of putative isoprene oxidation products from mango branches under abiotic stress. *Journal of Experimental Botany*, 64(12), pp.3697–3709.
- Kallenbach, M. et al., 2014. A robust, simple, high-throughput technique for time-resolved plant volatile analysis in field experiments. *Plant Journal*, 78(6), pp.1060–1072.
- Koca, H. et al., 2013. Preparation of a National Inventory of Biogenic Volatile Organic Compound (BVOC) Emissions in Turkey - China STM Focus. *International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences (IJCEBS)*, 1(4), pp.600–604. Available at: <http://cstm.cnki.net/stmt/TitleBrowse/KnowledgeNet/SAET201309001012?db=STMI8515> [Accessed February 2, 2017].
- König, G. et al., 1995. Relative contribution of oxygenated hydrocarbons to the total biogenic VOC emissions of selected mid-European agricultural and natural plant species. *Atmospheric Environment*, 29(8), pp.861–874.
- Kumar, L., Skidmore, A.K. & Knowles, E., 1997. Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(5), pp.475–497.
- Li-Ramírez, J.A. et al., 2016. Generación y representación de Indicadores de calidad de aire : caso de estudio aplicado a Manizales. *Iteckne*, 13(2), pp.174–184.
- Li, L.Y., Chen, Y. & Xie, S.D., 2013. Spatio-temporal variation of biogenic volatile organic compounds emissions in China. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, 182, pp.157–68. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23916627> [Accessed June 10, 2015].

- Li, L.Y. & Xie, S.D., 2014. Historical variations of biogenic volatile organic compound emission inventories in China, 1981–2003. *Atmospheric Environment*, 95, pp.185–196. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231014004798> [Accessed June 10, 2015].
- Li, S.-T. & Shue, L.-Y., 2004. Data mining to aid policy making in air pollution management. *Expert Systems with Applications*, 27(3), pp.331–340. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957417404000375>.
- Lindwall, F. et al., 2016. Warming increases isoprene emissions from an arctic fen. *Science of The Total Environment*, 553, pp.297–304. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969716303217>.
- MADS, 2010a. Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. In *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire*. Bogotá, p. 137.
- MADS, 2010b. Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. In *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire*. Bogotá, pp. 1–141.
- MADS, 2010c. *Resolución Número 610 “Por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006,”* Colombia: Resolución 601 del 4 de abril del 2006.
- Matsunaga, S.N. et al., 2012. Seasonal variation of isoprene basal emission in mature *Quercus crispula* trees under experimental warming of roots and branches. *Geochemical Journal*, 46(2), pp.163–167.
- Ministerio de la Presidencia de España, 2003. *Real Decreto 117/2003 Obligaciones derivadas del uso de disolventes*, España. Available at: [http://noticias.juridicas.com/base\\_datos/Admin/rd117-2003.html](http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/rd117-2003.html).
- Monson, R.K. et al., 2013. Why only some plants emit isoprene. *Plant, Cell and Environment*, 36(3).
- Morrison, E.C., Drewer, J. & Heal, M.R., 2016. A comparison of isoprene and monoterpene emission rates from the perennial bioenergy crops short-rotation coppice willow and *Miscanthus* and the annual arable crops wheat and oilseed rape. *GCB Bioenergy*, 8(1), pp.211–225.
- Müller, J.-F., 1992. Geographical distribution and seasonal variation of surface emissions and deposition velocities of atmospheric trace gases. *Geophysical research*, 97(D4), pp.3787–3804.
- NASA, 2011. Ozone Hole through the years. Available at: <https://earthobservatory.nasa.gov/> [Accessed April 3, 2017].
- National Research Council, 1999. *Ozone-Forming Potential of Reformulated Gasoline*, Washington, DC: The National Academies Press.
- NCAR & UCAR, 2016. Modeling. *WRF-Chem*. Available at: <https://www2.acom.ucar.edu/wrf-chem> [Accessed June 1, 2016].

- Nishimura, H. et al., 2015. Evaluation of light dependence of monoterpene emission and its effect on surface ozone concentration. *Atmospheric Environment*, 104, pp.143–153. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.011>.
- NOAA, 2016. Cold & Warm Episodes by Season. *Historical El Nino/ La Nina episodes (1950-present)*. Available at: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml) [Accessed May 30, 2016].
- Ocampo, O., Vélez, J. & Londoño, A., 2010. *Análisis de Vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná*.
- OMS, 2016. Organización Mundial de la Salud. Available at: <http://www.who.int/es/> [Accessed December 23, 2016].
- OPS/OMS, 2012. *Protocolo para la vigilancia sanitaria y ambiental de los efectos en salud relacionados con la contaminación del aire en Colombia*, Colombia.
- Owen, S. et al., 1997. Screening of 18 Mediterranean plant species for volatile organic compound emissions. *Atmospheric Environment*, 31, pp.101–117.
- Pitts, 1986. The Atmospheric System. In *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*. pp. 15–42.
- Potosnak, M.J. et al., 2013. Isoprene emissions from a tundra ecosystem. *Biogeosciences*, 10, pp.871–889. Available at: [www.biogeosciences.net/10/871/2013/](http://www.biogeosciences.net/10/871/2013/).
- Pouliot, G. & Pierce, T., 2010. *Integration of the Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature ( MEGAN ) into the CMAQ Modeling System*, North Carolina. Available at: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei18/session3/pouliot.pdf>.
- Purves, D.W. et al., 2004. Human-induced changes in US biogenic volatile organic compound emissions: evidence from long-term forest inventory data. *Global Change Biology*, 10(10), pp.1737–1755. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2486.2004.00844.x> [Accessed June 10, 2015].
- Rincón Pérez, M.A., 2015. *Simulación regional de contaminantes atmosféricos para la Ciudad de Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ruiz Suarez, L., Longoria, R. & Hernandez, E., 1998. Emisiones biogénicas de hidrocarburos no metano y de óxido nítrico en la cuenca de valle de México.pdf.
- Sabillón, D., 2002. Determinación de los factores de emisión de monoterpenos en tres especies típicas de la vegetación terrestre mediterránea: *Pinus pinea*, *Pinus halepensis* y *Quercus ilex*. Available at: <http://www.tdx.cat/handle/10803/6422> [Accessed November 9, 2015].
- Sakulyanontvittaya, T. et al., 2010. Enhancement of GloBEIS. , (582). Available at: [http://www.tceq.texas.gov/assets/public/implementation/air/am/contracts/reports/ei/5820784005FY1029-20100625-environ-GloBEIS\\_Enhancement.pdf](http://www.tceq.texas.gov/assets/public/implementation/air/am/contracts/reports/ei/5820784005FY1029-20100625-environ-GloBEIS_Enhancement.pdf).

- Seinfeld, J.H. & Pandis, S.N., 2006. *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere* 2nd ed., New Jersey: John Wiley & Sons.
- SEMARNAT et al., 2005. 7. Fuentes naturales. In *Inventario de emisiones de los estados de la frontera norte de México, 1999*. pp. 71–78.
- SEMARNAT, 2013. Inventario de emisiones. Available at: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/calidad-del-aire/inventario-de-emisiones> [Accessed December 11, 2016].
- Simon, V. et al., 2006. The biogenic volatile organic compounds emission inventory in France: application to plant ecosystems in the Berre-Marseilles area (France). *The Science of the total environment*, 372(1), pp.164–82. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17011024> [Accessed June 10, 2015].
- Thimijan, R.W. & Heins, R.D., 1983. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion. *HortScience*, 18(December), pp.818–822. Available at: citeulike-article-id:10840080.
- Toro G., M. V., Cremades O., L. V. & Ramirez B., J.J., 2001. Inventario de emisiones biogénicas en el valle de Aburrá. *Revista Ingeniería y Gestión Ambiental*, 17(32).
- UN & Corpocaldas, 2015. CDIAC - Centro de da. *Generador de indicadores climatológicos*. Available at: <http://froac.manizales.unal.edu.co/cube/IDEA/index.php> [Accessed September 4, 2015].
- UN & CORPOCALDAS, 2014. CDIAC - Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas. Available at: <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/> [Accessed October 5, 2017].
- UNC, 2014. Community Modeling and Analysis System CMAS. *SMOKE v3.6 User's Manual*, p.Chapter 1.
- Vélez, J.J. et al., 2015. *Entendimiento de fenomenos ambientales mediante analisis de datos* 1st ed., Manizales.
- Wang, H.J. et al., 2012. BVOCs emission in a semi-arid grassland under climate warming and nitrogen deposition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(8), pp.3809–3819.
- Welter, S. et al., 2012. The diversification of terpene emissions in Mediterranean oaks: Lessons from a study of *Quercus suber*, *Quercus canariensis* and its hybrid *Quercus afares*. *Tree Physiology*, 32(9), pp.1082–1091.
- Williams, D.R., 2016. NASA. *Earth Fact Sheet*. Available at: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html> [Accessed December 17, 2016].
- WMO & UNEP, Intergovernmental Panel on Climate Change. *Task Force on National Greenhouse Gas Inventories*. Available at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/> [Accessed December 9, 2016].

- Wu, C. et al., 2015. Impacts of soil moisture on de novo monoterpene emissions from European beech, Holm oak, Scots pine, and Norway spruce. *Biogeosciences*, 12(1), pp.177–191.
- Zarate, E., 2007. *Understanding the Origins and Fate of Air Pollution in Bogota , Colombia*. Ecole polytechnique federale de Lausanne.