

**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO GENERADA DURANTE  
LA LABOR DE FERTILIZACIÓN EN UNA HECTÁREA DE CULTIVO  
DE CAÑA DE AZÚCAR EN UN INGENIO DEL VALLE DEL CAUCA.**

**CHRISTIAN MAURICIO TÉLLEZ TRIANA  
MARIA CAMILA MONTOYA RAMÍREZ**

**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SANTIAGO DE CALI  
2014**

**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO GENERADA DURANTE  
LA LABOR DE FERTILIZACIÓN EN UNA HECTÁREA DE CULTIVO  
DE CAÑA DE AZÚCAR EN UN INGENIO DEL VALLE DEL CAUCA.**

**CHRISTIAN MAURICIO TÉLLEZ TRIANA  
MARIA CAMILA MONTOYA RAMÍREZ**

**Proyecto de grado presentado para optar por el título de Ingeniero  
Industrial**

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

**Beatriz Sierra Ruiz**

**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SANTIAGO DE CALI  
2014**

## **CONTENIDO**

<b>1. TEMA.....</b>	<b>9</b>
<b>1.1. TÍTULO DEL PROYECTO .....</b>	<b>9</b>
<b>1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA: .....</b>	<b>9</b>
<b>1.3. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>2. DELIMITACIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1. ALCANCE .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2. ESPACIO.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3. TIEMPO .....</b>	<b>12</b>
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1. OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2. OBJETIVO DEL PROYECTO.....</b>	<b>13</b>
<b>3.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>13</b>
<b>4. ASPECTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>14</b>
<b>4.1. MATRIZ LÓGICA .....</b>	<b>14</b>
<b>5. METODOLOGÍA.....</b>	<b>16</b>
<b>5.1. MUESTREOS DE EMISIONES PROVENIENTES DEL SUELO .....</b>	<b>16</b>
<b>5.2. MUESTREO DE EMISIONES PROVENIENTES DE FUENTES MÓVILES.....</b>	<b>18</b>
<b>6. MARCO DE REFERENCIA .....</b>	<b>18</b>
<b>6.1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>18</b>
<b>6.2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>22</b>
<b>7. ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO.....</b>	<b>34</b>
<b>7.1. CRONOGRAMA.....</b>	<b>34</b>
<b>8. DESARROLLO DEL PROYECTO .....</b>	<b>35</b>
<b>8.1. DESARROLLO METODOLÓGICO .....</b>	<b>35</b>

8.1.1 Estimación experimental de emisiones.....	35
8.1.2. Medición GEI en suelo .....	37
8.1.2.1 Definición de terreno y distribución de cámaras .....	37
8.1.2.2. Toma de muestras.....	38
8.1.3. Estimación teórica de emisiones.....	44
8.1.3.1. Medición de GEI de fuentes móviles.....	44
8.1.3.2. Medición GEI en suelo.....	50
8.1.3.2.1. Estimación Óxido Nitroso .....	51
8.1.3.2.2. Estimación Dióxido de Carbono .....	57
8.1.3.2.3. Estimación Metano .....	59
8.1.4. Estimación de GEI por fertilizante.....	60
8.1.4.1. Estimación Óxido Nitroso .....	60
8.1.4.2. Estimación Dióxido de Carbono .....	63
8.1.5. Estimación Huella de Carbono.....	63
<b>9. ANALISIS Y RESULTADOS.....</b>	<b>64</b>
<b>9.1. TIPO DE SUELO .....</b>	<b>64</b>
<b>9.2. FUENTES DE GEI.....</b>	<b>64</b>
<b>9.3. EMISIONES PROVENIENTES DE FUENTES MÓVILES.....</b>	<b>65</b>
<b>9.4. EMISIONES DE GEI.....</b>	<b>69</b>
<b>9.5. CONTRIBUCIÓN DE GEI POR APLICACIÓN DE FERTILIZANTES .....</b>	<b>73</b>
<b>9.6. RELACIÓN DATOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES .....</b>	<b>74</b>
<b>10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>80</b>
<b>11. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>82</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Matriz Lógica .....	14
Tabla 2: Efecto y contribución de los gases para producir efecto invernadero .....	22
Tabla 3: Consumo anual per cápita de la huella de carbono, agua y consumo promedio de los habitantes del mundo .....	24
Tabla 4: Potencial de calentamiento global.....	29
Tabla 5: Cronograma de proyecto con objetivos y actividades a realizar .....	34
Tabla 6: Categoría, código y nombre de la maquinaria.....	36
Tabla 7: Matriz de visitas realizadas .....	40
Tabla 8: Pesos moleculares de GEI.....	43
Tabla 9: Factores de emisión de e Carbono y CO <sub>2</sub> por combustible (Kg/Gj) .....	48
Tabla 10: Factores de emisión de N <sub>2</sub> O .....	54
Tabla 11: Cantidad de fertilizantes aplicados por Ha .....	55
Tabla 12: Cantidad aplicada por fertilizante y contenido de Nitrógeno .....	61
Tabla 13: Identificación de fuentes de GEI .....	65
Tabla 14: Emisiones de fuentes móviles.....	66
Tabla 15: Tasa de crecimiento anual de fuentes de energía - Sector industrial ....	66
Tabla 16: Precio combustible en Colombia .....	68
Tabla 17: Emisiones directas de GEI en Ton de CO <sub>2</sub> equivalente por fertilizantes por HA .....	70
Tabla 18: Emisiones de GEI en Ton de CO <sub>2</sub> equivalentes .....	71
Tabla 19: Cantidad de Ton de CO <sub>2</sub> – eq emitida por cada fertilizante .....	73
Tabla 20: Emisiones directas en Ton de CO <sub>2</sub> – eq de N <sub>2</sub> O y CO <sub>2</sub> por cada fertilizante .....	74
Tabla 21: Aplicación y cantidad emitida de N <sub>2</sub> O por fertilizante y muestreo .....	76
Tabla 22: Proporción de emisiones de Ton de CO <sub>2</sub> - eq .....	79

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Inserción de la jeringa y extracción de la muestra .....	17
Ilustración 2: Toma de muestras .....	17
Ilustración 3: Alcance de emisiones .....	27
Ilustración 4: Descripción resumida del proceso .....	35
Ilustración 5: Tractor John Deere - 7400 .....	96
Ilustración 6: Muestreo emisiones aire .....	37
Ilustración 7: Distribución de cámaras en 1 Ha de cultivo (Suerte 8) .....	38
Ilustración 8: Instalación base de cámara .....	96
Ilustración 9: Parte superior cámara .....	97
Ilustración 10: Cámara sellada e implementos de muestreo .....	97
Ilustración 11: Extracción de muestra .....	98
Ilustración 14: Terreno asignado - Suerte 8 .....	99
Ilustración 12: Tractor empleado en la labor de fertilización de cultivo de caña de azúcar .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Ilustración 13: Terreno destinado al cultivo de caña de azúcar comercial	<b>¡Error! Marcador no</b>
Ilustración 15: Montaje de cámara e implementos para recolección de muestras ..	99
Ilustración 16: Terreno cubierto de Vinaza .....	100
Ilustración 17: Toma de emisiones de gases emitidos por fuentes móviles .....	101
Ilustración 18: Preparación del tractor con mezcla de fertilizante .....	101
Ilustración 19: Cámara con presencia de hierba y nacimiento de caña .....	100
Ilustración 20: Cámara con alto crecimiento de hierba al interior .....	102
Ilustración 21: Suerte 8, en el último día de muestreo .....	102
Ilustración 22: Representación de muestreos .....	42
Ilustración 23: Árbol de decisión para estimar las emisiones procedentes de los vehículos todo terreno .....	46
Ilustración 24: Niveles de estimación para N <sub>2</sub> O .....	52
Ilustración 25: Niveles de estimación para CO <sub>2</sub> .....	57

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Estimación emisiones fuentes móviles del nivel 2 .....	47
Ecuación 2: Emisiones directas de N <sub>2</sub> O de suelos gestionados (Nivel 1) .....	53
Ecuación 3: Emisiones de CO <sub>2</sub> , por aplicación de Urea .....	58
Ecuación 4: Óxido Nitroso obtenido por fertilizante orgánico .....	61
Ecuación 5: Óxido Nitroso obtenido por fertilizante sintético .....	61

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Poder calorífico combustibles líquidos y biocombustibles .....	69
Gráfico 2: Comportamiento de emisiones de GEI en Toneladas de Dióxido de Carbono equivalentes en los muestreos 1, 3 y 4.....	72
Gráfico 3: Comportamiento del N <sub>2</sub> O en los diferentes muestreos .....	75
Gráfico 4: Comportamiento de las emisiones de Metano en Toneladas de Dióxido de Carbono equivalente, en los muestreos 1, 3 y 4 .....	77
Gráfico 5: Comportamiento de las emisiones del Dióxido de Carbono en Toneladas de Dióxido de Carbono equivalente, en los muestreos 1, 3 y 4 .....	78



## **1. TEMA**

### **1.1. TÍTULO DEL PROYECTO**

Estimación de la huella de carbono generada durante la labor de fertilización química en una hectárea de cultivo de caña de azúcar en un ingenio del Valle del Cauca.

### **1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA:**

Hoy en día, la implementación de estrategias y procesos sostenibles con el medio ambiente presenta una gran relevancia debido a las secuelas negativas generadas por las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

A raíz del establecimiento de políticas ambientales por necesidad de un desarrollo sostenible de países en progreso, las empresas vallecaucanas deben ajustarse a las normas de producción y consumo con estrategias que contribuyan a la disminución de GEI y, como consecuencia, de la contaminación ambiental existente. En la actualidad, las empresas con mayor madurez y conocimiento del entorno empresarial valoran las ventajas competitivas que puedan traer estrategias verdes según el sector de producción.

Si bien, el sector azucarero es un componente muy importante en la situación socioeconómica del Valle del Cauca, siendo este el departamento con mayor actividad productiva en el cultivo de caña de azúcar a nivel nacional, pero a su vez contribuye constantemente en la problemática ambiental de la región al implementar gran variedad de procesos industriales en la producción de azúcar y alcohol, y al usar insumos como pesticidas y fertilizantes. De allí la importancia de intervenir en sus procesos para alinearse con la normatividad ambiental y permitir un consumo y desarrollo sostenible para la región, sin verse afectada la economía de la misma.

El inventario de emisiones de gases de efecto invernadero es indispensable para el control y supervisión de dichas políticas verdes por parte de la autoridad ambiental y, además, para la implementación de herramientas de estimación, corrección y mejora por parte de las empresas para reducir las emisiones provenientes por la industria. Colombia realizó el inventario nacional de GEI para los años 2000 y 2004 siguiendo las directrices del Panel Intergubernamental sobre Cambio climático (IPCC) sobre las buenas prácticas y el manejo de la incertidumbre.

En dicho documento se estiman emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Además, se estiman las emisiones

por fuente de hidrofluorocarbonos (HFC's), perfluorocarbonos (PFC's) y hexafluoruro de azufre (SF6), así como los precursores de GEI como monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NOx) y los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (COVDM). También se incluyen otros gases no controlados por el Protocolo de Montreal como son los óxidos de azufre (SOx), que figuran en las Directrices del IPCC.<sup>1</sup>

Este proyecto surge de la necesidad de identificar los efectos desfavorables producidos por los GEI en relación con el sector azucarero, esto con el fin de generar una propuesta de mejora que permita mitigar el impacto negativo. Para ello se trabajará específicamente en el proceso de fertilización en cultivos de caña de azúcar, allí se estimará la huella de carbono con el fin de tener a futuros indicadores que permitan tener un mejor control de los efectos causados por el uso de fertilizantes en el cultivo de caña comercial y, así mismo, efectuar mejoras en su implementación ya que un mal uso puede provocar consecuencias medioambientales negativas, especialmente si se aportan en excesos. El elemento que presenta más problemas es el Nitrógeno, seguido desde lejos por el Fosfato.

El uso del Nitrógeno como fertilizante implica distintas afecciones ambientales, de las cuales la principal es la contaminación de aguas subterráneas con nitratos, impidiendo que puedan utilizarse para el consumo humano. Los excesos de Nitrógeno y de Fosfatos, pueden infiltrarse en dichas aguas o ser lixiviados a cursos de agua cercanos. Esta sobrecarga de nutrientes provoca la eutroficación de lagos, embalses y estanques y da lugar a una explosión de algas que suprimen otras plantas y animales acuáticos.<sup>2</sup>

Del nitrógeno aplicado a muchos cultivos solamente un 10-50% suele ser absorbido por las plantas, mientras que el 50% restante es susceptible de lixiviarse a las aguas subterráneas y superficiales o de perderse en forma gaseosa. Con respecto a las pérdidas gaseosas, se calcula que la agricultura es la responsable de aproximadamente dos tercios de la emisión total de amoníaco (NH3) a la atmósfera, de más de un tercio de las emisiones de N2O, y de alrededor de un cuarto de las emisiones de óxido nítrico (NO). Estos gases tienen numerosos efectos negativos sobre el medio ambiente como la eutroficación de ecosistemas una vez depositados en forma seca o húmeda (NH3 y NO), la producción de ozono troposférico (NO), la disminución del ozono estratosférico (N2O) y el calentamiento global de la atmósfera (N2O). En concreto, se calcula que la agricultura contribuye en cerca de un 80% a las emisiones antropogénicas de N2O y en casi un 40% a sus emisiones globales. Al contrario que el NH3 y el

---

<sup>1</sup> Inventario Nacional de Fuentes y Sumidores de Gases de Efecto Invernadero 2000-2004. En Capítulo 1: Visión general de inventario de emisiones de gases de efecto invernadero. Marzo del 2010, p20

<sup>2</sup> IRANETA Jesús *et al.* Importancia Agronómica y Medioambiental de la Fertilización. En: Agricultura, Fertilización y Medio Ambiente. Noviembre-Diciembre 2010, p 11.

NO, el N<sub>2</sub>O es estable en la troposfera y tiene un tiempo de permanencia en la atmósfera mayor de 100 años, de forma que su efecto relativo como gas invernadero es unas 150 veces superior al del CO<sub>2</sub>. Por lo tanto las implicaciones del N<sub>2</sub>O producido por la agricultura moderna, tanto como gas invernadero como en la destrucción de la capa del ozono estratosférico, durarán durante varias generaciones futuras.<sup>3</sup>

### 1.3. JUSTIFICACIÓN

Éste proyecto se considera un aporte relevante en cuestiones ambientales a los ingenios del valle del cauca y el país, pues las empresas del sector agro-industrial de países en vía de desarrollo buscan estrategias competitivas para garantizar una producción sostenible, haciendo un equilibrio entre el desarrollo económico, social y ambiental y como lo es éste caso, con un proyecto que incluye indicadores ambientales y contribuye a disminuir los efectos negativos generados por los procesos de fertilización en un ingenio.

El ingenio a estudiar, con el interés de preservar el medio ambiente y generar un desarrollo sostenible, busca generar programas de prevención y mejoramiento continuo relacionado con el aprovechamiento de recursos para optimizar su desempeño ambiental. De allí su disposición en trabajar con entidades educativas como la Universidad Icesi para trabajar de la mano con estudiantes universitarios y, de esta manera, llevar a cabo investigaciones efectivas para el mejoramiento de las condiciones ambientales del ingenio.

Siendo la producción sostenible uno de los pilares del ingenio, es necesario desarrollar herramientas que midan y determinen variables de emisión de gases de efecto invernadero. En el valle del cauca existen trece ingenios azucareros encargados de gran proporción de producción de azúcar para el país y se pueden ver beneficiados de estudios de éste tipo con amplia aplicación gracias a las condiciones del suelo que son propicias para el cultivo de la caña de azúcar.

Además, cabe resaltar la importancia del sector azucarero para el Valle del Cauca en cuanto a la situación socioeconómica de la región, en donde desafortunadamente no hay un conocimiento necesario del impacto y de las consecuencias generadas por la agricultura, específicamente de este sector, con respecto a la generación de Gases de Efecto Invernadero. Si bien existe gran cantidad de información acerca del daño ambiental hídrico, pero muy poca de la generación y emisión de gases como tal.

Desde una perspectiva teórica de la investigación, se generará conciencia ambiental con el fin de que se tomen decisiones eficaces y eficientes para el desarrollo de una producción sostenible, y se confrontan términos que no siempre

---

<sup>3</sup> GONZÁLEZ Carmen *et al.* Fertilización nitrogenada y sostenibilidad: contaminación ambiental frente a producción y calidad.

son tenidos en cuenta tanto para la operación de campo. Otro beneficio que ofrece el presente estudio, es utilizar métodos de investigación ya existentes de recolección muestras y análisis de datos en áreas de campo donde se quiere evidenciar la presencia de efectos nocivos para el medio ambiente y hay poca información acerca de cantidades.

## **2. DELIMITACIÓN**

### **2.1. ALCANCE**

La estimación de la Huella de carbono se realizará en caña tradicional, para la labor de fertilización, en el área de campo del ingenio de estudio.

### **2.2. ESPACIO**

El estudio de emisión de gases de efecto invernadero, será realizado en áreas de cultivo de un ingenio ubicado en el municipio de El cerrito, donde específicamente se trabajara con una hectárea (Ha) indefinida que se encuentre en etapa de fertilización.

### **2.3. TIEMPO**

El proyecto tendrá una duración de un año dividido en dos semestres que marcan cada uno una etapa, en la primera se fijan los objetivos y se llevará a cabo la investigación pertinente para la comprensión total del tema culminando con la entrega del anteproyecto, y así durante la segunda etapa realizar las actividades propuestas y su análisis para validar y entregar resultados.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Contribuir en el conocimiento y reducción del impacto ambiental del sector azucarero del Valle del Cauca.

#### **3.2. OBJETIVO DEL PROYECTO**

Estimar la huella de carbono generada por la labor de fertilización, en una hectárea de cultivo de caña tradicional.

#### **3.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Caracterizar el proceso de fertilización e identificar fuentes de emisión que intervienen.
2. Realizar muestreos de las emisiones de suelo y aire presentes en la labor de fertilización.
3. Mejorar herramienta de estimación de emisiones de GEI, diseñada en anteriores proyectos, en el área de fertilizantes.
4. Generar propuestas de mejora para la labor de fertilización.

## 4. ASPECTOS METODOLÓGICOS

### 4.1. MATRIZ LÓGICA

Tabla 1: Matriz Lógica

<b>OBJETIVO ESPECIFICO 1:</b>			
Detallar el proceso de fertilización e identificar fuentes de emisión que intervienen.			
<b>ACTIVIDAD</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>MEDIOS DE VERIFICACIÓN</b>	<b>SUPUESTOS</b>
1) Realizar visita inicial al ingenio y reunirse con personal encargado de guiar el proyecto	Visita realizada o Visita no realizada	Acta de visita que certifique la asistencia al área de estudio.	Ausencia de personal requerido para indicar los procesos a tratar del ingenio.
2) Preparar el área de estudio en visitas de campo.	Visitas realizadas/Visitas programadas *100	Documento con datos obtenidos de la observación.	Desfavorabilidad climática para realizar visitas.
3) Observar maquinaria utilizada en el proceso de fertilización.	Maquinaria observada o Maquinaria no observada	Documento con datos obtenidos de la información y referencia de maquinaria.	Aplazamiento de actividades de fertilización en el ingenio.
<b>OBJETIVO ESPECIFICO 2:</b>			
Detallar el proceso de fertilización e identificar fuentes de emisión que intervienen.			
<b>ACTIVIDAD</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>MEDIOS DE VERIFICACIÓN</b>	<b>SUPUESTOS</b>
1) Recolectar muestras de emisiones de suelo.	Muestras recolectadas/Muestras totales *100	Documento con métodos de recolección y análisis de observaciones del suelo.	Falta de equipo necesario para la recolección de muestras.

2) Recolectar emisiones provenientes de maquinaria.	Muestras recolectadas/Muestras propuestas *100	Documento con métodos de recolección y análisis de observaciones de maquinaria.	Falta de equipo necesario para la recolección de muestras.
<b>OBJETIVO ESPECIFICO 3:</b>			
Complementar herramienta de estimación de emisiones de GEI, diseñada en anteriores proyectos, en el área de fertilizantes.			
ACTIVIDAD	INDICADORES	MEDIOS DE VERIFICACIÓN	SUPUESTOS
1) Procesar los datos emitidos por el laboratorio	Número muestras procesadas/Número de muestras totales *100	Documento con informe de análisis de resultados.	Retraso del procesamiento de la recolección de datos por parte del laboratorio.
2) Identificar metodologías para el cálculo de la huella de carbono.	Número de metodologías aplicables /Número de metodologías consultadas *100	Lista de metodologías existentes para el cálculo de la huella de carbono.	Metodologías no adecuadas o no actualizadas para estimación de huella de carbono.
<b>OBJETIVO ESPECIFICO 4:</b>			
Generar propuestas de mejora.			
ACTIVIDAD	INDICADORES	MEDIOS DE VERIFICACIÓN	SUPUESTOS
1) Comparar resultados obtenidos con teóricos a nivel de maquinaria.	Resultados comparados o Resultados no comparados	Documento donde se establecen diferencias entre los resultados.	Variación considerable de valores obtenidos con teóricos.
2) Revisión bibliográfica		Documentación bibliográfica.	

Fuente: Elaboración Propia

## **5. METODOLOGÍA**

Para el análisis de GEI del proyecto, en la hectárea asignada para el estudio se debe estar realizando el proceso de fertilización de caña de azúcar, terreno al que se implementará la técnica de la cámara cerrada para el respectivo análisis de emisión de GEI proveniente del suelo.

Igualmente se realizará un muestreo de emisiones causadas por fuentes móviles, vehículos utilizados para hacer recorridos dentro de los cultivos en el momento de hacer las aplicaciones de fertilizantes, para esto, se debe tener en cuenta, tipo de combustible utilizado, kilómetros recorridos, tipo de vehículo, entre otras variables.

### **5.1. MUESTREOS DE EMISIONES PROVENIENTES DEL SUELO**

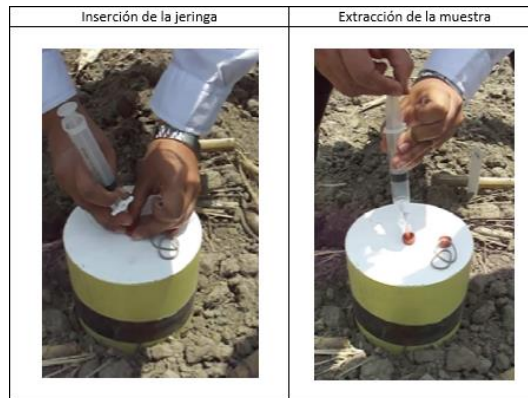
Para realizar los procesos de muestreo de suelos en el ingenio se requiere de un equipo especial para medición de emisiones el cual es suministrado por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) del que adicionalmente se obtiene el servicio de análisis de muestras. Los materiales utilizados para la medición son: cámara estática de pvc para la acumulación y recolecta de gases, un termómetro, un cronómetro, una jeringa de 20 ml, una válvula y cuatro frascos de vidrio al vacío.

La base de la cámara mide 25 cm de diámetro y 7,5 cm de largo, una vez enterrada cada cámara en cada uno de los seis sectores de la hectárea, se debe verificar que cada base alcance a sobresalir entre 3 y 4 cm y no presente deformación en su geometría, pues esto puede ocasionar escape de gases. Posteriormente se tapa con la parte superior de la cámara, la cual cuenta con el mismo diámetro para sellar herméticamente y 10 cm de altura, la tapa de la cámara debe tener dos tapones para la inserción del termómetro y la jeringa.

La jeringa se introduce por el tapón y, con el fin de mezclar los gases, se bombea el contenido cuatro veces, siendo el cuarto la muestra a sacar. (Ilustración 1)



**Ilustración 1: Inserción de la jeringa y extracción de la muestra**



Fuente: Centro internacional de agricultura tropical

Cuando se obtiene la muestra con la jeringa, se inserta en los frascos al vacío y con ayuda de la válvula se deja que el frasco succione el contenido. Éste procedimiento debe efectuarse cada 15 minutos entre todas las cámaras registrando la temperatura entre la primera y la última cada cuarto de hora (Ilustración 2).

**Ilustración 2: Toma de muestras**



Fuente: Centro internacional de agricultura tropical

Cabe resaltar que ésta operación debe realizarse aproximadamente tres días después de realizada la fertilización y sin condiciones de lluvia. Una vez realizado el primer muestreo se realizarán otros dos, uno a los 30 y otro a los 60 días; en total se utilizan seis cámaras en la hectárea y a cada una se le extraen cuatro muestras por jornada para ver el flujo de los gases acumulados, muestras que son procesadas por cromatografía de gases en el CIAT para obtener los niveles de concentración.

## **5.2. MUESTREO DE EMISIONES PROVENIENTES DE FUENTES MÓVILES**

Para la emisión de los GEI vehiculares se utilizó una sonda medidora de CO<sub>2</sub> modelo GCH-2018 de la que se obtuvieron valores y fueron comparados con valores teóricos calculados con ecuaciones existentes.

## **6. MARCO DE REFERENCIA**

### **6.1. ANTECEDENTES**

#### **Protocolos con énfasis ambiental**

##### **Protocolo de Montreal**

Es un acuerdo internacional firmado el 16 de septiembre de 1987, ajustado y enmendado en 1990, 1992, 1995 y 1997.

Tiene como principal objetivo limitar, controlar y regular la producción, consumo y comercio de las sustancias que agotan la capa de ozono, y su reducción gradual hasta su eliminación total. Esto gracias a los esfuerzos de países desarrollados y en desarrollo que son Partes en el Protocolo.<sup>4</sup>

##### **Protocolo de Kyoto**

Proviene de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático en 1992, y es considerado como uno de los acuerdos internacionales más importantes en relación al cambio climático.

Su principal objetivo es controlar y reducir las emisiones de los Gases de Efecto Invernadero, (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HCF, PFC y SF<sub>6</sub>) de los principales países industrializados, responsables del calentamiento global. Para ello, contiene los compromisos asumidos para reducir como mínimo un 5% de dichas emisiones con respecto a los niveles de 1990.<sup>5</sup>

---

<sup>4</sup> PNUMA. Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono.

<sup>5</sup> NACIONES UNIDAS. Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. 1998

## Huella Mundial

*Global Footprint Network* fue establecida en el 2013 con el objetivo de facilitar un futuro sostenible para el planeta.

A nivel mundial, esta organización ha diseñado sus programas en pro de influenciar a diversas instituciones a medir el impacto humano sobre la tierra con el fin de tomar decisiones más informadas, esto a través de la implementación de la *Huella Ecológica* como principal medida mundial y herramienta ecológica de contabilidad de recursos. Esta permite medir cuánta área de la tierra y del agua requiere una población humana para producir el recurso que consume y absorber sus desechos usando la tecnología prevaleciente.<sup>6</sup>

Algunos de sus programas:

Campaña de Diez-en-Diez: busca convencer a los gobiernos nacionales a establecer la Huella Ecológica como una métrica prominente y aceptada gubernamentalmente.

Administración de Cuentas Nacionales de la Huella de Carbono.

Iniciativa Desarrollo Sostenible del ser humano.

Extensión de la Huella de Ecológica a nuevos dominios, desarrollando nuevas metodologías y herramientas con el fin de construir un mercado para la Huella Ecológica.

Desarrollo de Estándares Internacionales para la huella con el fin de hacer progresar la integridad y posibilidad de comparación de usos mundiales.

Es a partir de *Global Footprint Network*, que se ha generado a nivel mundial las conocidas calculadoras ecológicas que estiman la Huella Ecológica en diversas actividades humanas.

## Inventario Nacional GEI

Un inventario de gases de efecto invernadero es una rendición de cuentas de la cantidad de gases de efecto invernadero, emitidos o eliminados hacia la atmósfera durante un período de tiempo específico. Dicho inventario proporciona información sobre las actividades fuentes de emisiones y absorciones, al igual que antecedentes de métodos empleados para sus cálculos.

---

<sup>6</sup> *Global Footprint Network*, Advancing the Science of Sustainability. La Huella. [en línea] [www.footprintnetwork.org](http://www.footprintnetwork.org). [actualizado en 3 de Noviembre de 2010]

En Colombia se realizó para los años 2000 y 2004 siguiendo las directrices del Panel Intergubernamental sobre Cambio climático (IPCC) sobre las buenas prácticas y el manejo de la incertidumbre

Los resultados de dicho inventario, determinan que el aporte de los GEI se compone de: dióxido de carbono (50%), metano (30%) y óxido nitroso (19%); quedando el 1% para el resto de gases que causan efecto de invernadero y están dentro del Protocolo de Montreal, como los hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (CFC) y halocarbonos y hexafluoruro de azufre (Ideam, 2008c)<sup>7</sup>

### **Sector Azucarero en Colombia**

A nivel mundial, Colombia es considerada como un país importante en el mercado azucarero. Según los datos de la Organización Internacional del Azúcar (OIA), la producción de 2,29 millones de toneladas de azúcar durante 2007 ubicó a Colombia como el décimo tercer productor en el mundo y en la décima posición de la lista de principales exportadores de este producto.<sup>8</sup>

El sector azucarero colombiano se encuentra ubicado en el valle geográfico del río Cauca, siendo abarcado por 47 municipios desde el norte del departamento del Cauca hasta el sur del departamento de Risaralda, donde se encuentran 223.905 hectáreas sembradas en caña de azúcar para abastecer a los 13 ingenios de la región. El Valle del Cauca es el departamento con mayor actividad productiva al comprender el 77.3%, seguido por Cauca con el 19.8%, Caldas con 1,4%, Risaralda con 1.2% y Quindío con 0.3%.<sup>9</sup>

A diferencia de otros países, con excepción de Hawai y el norte de Perú, Colombia puede sembrar y cosechar todos los meses del año gracias al clima privilegiado que presenta la región, generando de esta forma un valor competitivo para el país. Esta condición agroclimática, sumada al avance tecnológico impulsado por el Centro de Investigación de la Caña (Cenicaña), que funciona con el aporte de todos los cultivadores e ingenios, ha llevado a que la región se especialice en el cultivo y ostente el liderazgo en productividad a nivel mundial: más de 14 toneladas de azúcar por hectárea al año.<sup>5</sup>

---

<sup>7</sup> Ideam. Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático: INVENTARIO NACIONAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO. Junio de 2010, p 18.

<sup>8</sup> ARBELÁEZ María Angélica. IMPACTO SOCIOECONÓMICO DEL SECTOR AZUCARERO COLOMBIANO EN LA ECONOMÍA NACIONAL Y REGIONAL. L2010

<sup>9</sup> ASOCAÑA. El sector azucarero en la actualidad. [en línea] [www.asocana.org](http://www.asocana.org). [citado en 22 de marzo de 2011]

Sin embargo, a pesar del alto impacto socioeconómico del sector azucarero, este influye en gran medida en las emisiones de GEI.

Las políticas nacionales de producción y consumo sustentable exigen a las empresas la adecuación de sus procesos a la normatividad existente, además una serie de protocolos internacionales entran a controlar las emisiones de gases nocivos a la atmósfera.

El sector azucarero ha venido trabajando en actividades de control y mejoramiento ambiental junto con autoridades ambientales desde los años 70. Actualmente los ingenios en Colombia cuentan con guías ambientales donde existen condiciones de trabajo para los productores del sector agropecuario e influyen en el mejoramiento de la gestión ambiental de los productores de azúcar y destacan temas como producción más limpia, desarrollo sostenible y ecoeficiencia.

### **Ingenio de estudio**

El ingenio de estudio, con el ánimo de preservar el medio ambiente y alcanzar un desarrollo sostenible, ha venido trabajando en sus actividades para que estas sean realizadas en busca de un equilibrio, atendiendo sus responsabilidades económicas, sociales y ambientales. Para ello, están sujetos a las normas ambientales de la legislación colombiana y convenios regionales derivados.<sup>10</sup>

Así mismo, se ha venido involucrando con el diseño de herramientas que ayuden a medir las emisiones de dióxido de carbono. En el 2011, los estudiantes María Ángela Concha y José Luis Rojas, en su proyecto de grado, diseñaron una herramienta para obtener el cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> de tres alternativas de labranza tradicional y de labranza reducida en el cultivo de caña de azúcar. Su objetivo era contribuir a la unión estratégica entre el sistema de gestión ambiental y la productividad del Ingenio, en relación a labores agrícolas que generan impacto al medio ambiente, y de esta manera marcar la pauta para futuras investigaciones en el marco de la huella de carbono y reducción de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, en el 2012 se implementó una herramienta como resultado de una práctica empresarial realizada por Bryan López, joven universitario de ingeniería industrial. Esta herramienta estima la huella de carbono en áreas de trabajo del ingenio a estudiar y de esta manera generar mecanismos de prevención y control en la protección del medio ambiente. En este trabajo se diferenció entre el manejo de cultivos convencionales de los orgánicos con respecto a sus abonos empleados como insumos.

---

<sup>10</sup> Ingenio de estudio

Similar a los trabajos anteriores, y con el objetivo de que pueda ser utilizada en otros ingenios en el futuro, se realiza un proyecto por parte de las estudiantes Katherine Ballesteros y Katherine Sotelo en el año 2013. En este se analiza y estima el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero en cultivos de caña orgánica, en términos de TMCE de insumos, maquinaria, equipos, mano de obra, combustibles, entre otros. Esto a través del diseño de una herramienta para la medición de emisiones GEI y mejoramiento en procesos de cultivo de caña orgánica.

## 6.2. MARCO TEÓRICO

### Efecto invernadero

El efecto invernadero es un proceso que debería ocurrir de manera natural para beneficiar el desarrollo de la vida terrestre, en el que algunos gases retenidos en la atmósfera acumulan parte de la energía emitida por la radiación solar y permiten mantener una temperatura que sin dicho efecto sería aproximadamente  $-20^{\circ}$ . Éste proceso se ha venido viendo alterado por intervención humanas que incide directamente en variabilidad de la concentración de gases, y son consecuencia de actividades industriales, mala administración de generadores de gases y sobre explotación de recursos naturales (Kuklinski, 2011). Dichos gases, según el protocolo de Kyoto, son: vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), Óxido nitroso ( $NO_2$ ), perfluorocarbonos (PFC), Hidrofluorcarbono (HFC) y Hexafluoruro de azufre( $SF_6$ ).

La tabla 2 indica la capacidad de los gases de almacenar calor respecto al Dióxido de Carbono que para efectos de comprensión es uno, por lo que el óxido nitroso tiene 220 veces más capacidad de producir efecto invernadero. Igualmente se exhibe la contribución en cantidades reales presentes en la atmósfera según las cantidades de cada uno en porcentaje.

**Tabla 2:** Efecto y contribución de los gases para producir efecto invernadero

Gas	Efecto	Contribución en %
Dióxido de Carbono	1	60-70
Metano	25	15-30
Óxido nitroso	220	5
Ozono	1800	8
Clorofluorocarbonados	4000-15.000	5 – 10

Fuente: KUKLINSKI, 2011.

Por altas concentraciones de GEI sobre la atmósfera se ha ocasionado otro fenómeno conocido como **calentamiento global**, que no es más que el aumento de temperatura terrestre y de los océanos que se ha venido presentando desde la mitad del siglo pasado, y deja consecuencias irreparables como derretimiento de glaciares, sequías severas que causan escasez de agua, y deforestación que hace surgir desiertos (Adame-Romero, 2010).

La *Cumbre de la Tierra de Johannesburgo* (Sud África - 2002) es una cumbre sobre el Desarrollo Sostenible, organizada por la ONU, en la que participaron 190 jefes de estado acompañado de sus delegaciones nacionales, esto con el objetivo de buscar alternativas para mejorar la calidad de vida y la conservación de los recursos naturales.

Los resultados de esta cumbre quedaron compilados en dos documentos importantes:

La “Declaración de Johannesburgo sobre el Desarrollo Sostenible”, en la cual los altos dignatarios se comprometen a edificar la sociedad humana global, equitativa, bajo fundamentos de desarrollo económico, social y de la protección ambiental, y la importancia de una dignidad humana para todos.

El “Plan de Aplicación de Johannesburgo”, el cual persigue alcanzar los resultados obtenidos en la Conferencia de Río de Janeiro en 1992 de las Naciones Unidas sobre el Ambiente y Desarrollo (CNUAD) al proporcionar los principios fundamentales y el programa de acción para lograr el desarrollo sostenible. Se asume el compromiso de emprender acciones concretas para erradicar la pobreza, cambio en los patrones insostenibles de producción y consumo y protección como también gestión de los recursos naturales.

### **Huella ecológica**

Por el consumo masivo y desmesurado de los recursos naturales aparece un indicador, o herramienta de cálculo, que intenta medir dicho consumo, llamada *huella ecológica*, y lo hace en términos de área terrestre biológicamente productiva, lo que incluye bosques, terrenos de cultivos, y recursos hídricos que se necesitan para generar lo consumido. Ésta herramienta evalúa la capacidad del planeta de producir recursos necesarios para mantener el consumo y paralelamente estima los requerimientos de asimilación de residuos producidos por una población dada, siendo el indicador directamente proporcional a su tamaño. De esta manera la curva de la huella ecológica crece exponencialmente y explica que una vez agotados los recursos propios es necesario empezar a agotar algunos cercanos y ajenos (Franchetti, 2013).

La huella ecológica abarca diferentes aspectos ambientales sin establecer diferencia significativa en cuanto a proporción de impactos negativos al ambiente, por lo que existen otros indicadores que miden específicamente niveles de consumo o generación de desechos, como la huella hídrica, huella de carbono y huella de consumo (tabla 3). (Franchetti, 2013)

**Tabla 3:** Consumo anual per cápita de la huella de carbono, agua y consumo promedio de los habitantes del mundo

<b>Tipo de huella</b>	<b>Unidades</b>	<b>Ciudadano global</b>
Huella de carbono	Kg de CO <sub>2</sub> equivalente per cápita anual	5,6
Huella hídrica	m <sup>3</sup> de agua por cápita anual	1385
Huella de nitrógeno	Kg de nitrógeno reactivo per cápita anual	No disponible
Huella ecológica del consumo	Hectáreas globales per cápita anual	2,7

Fuente: FRANCHETTI, 2013

### **Huella de Carbono**

“La *huella de carbono* se entiende como la totalidad de GEI que se emiten de forma directa o indirecta a causa de una persona, empresa o producto. Este impacto al medio ambiente se mide realizando un inventario de las emisiones de los GEI; en el momento que se conocen las dimensiones de esta huella se abre la posibilidad de implementar las estrategias respectivas para lograr su reducción”<sup>11</sup>.

Más que calcular la totalidad de emisiones, el concepto de huella de carbono ha empezado a desarrollar relevancia en ámbitos comerciales como sinónimo de competitividad en productividad por las empresas, desde ésta perspectiva es visto como un certificado para las industrias, que sigue normas y recomendaciones como las de la “pas 2050” y permite que sus productos puedan ser diferenciados por los clientes interesados en información ecológica. Por eso surge un debate

<sup>11</sup> REDACCIÓN ZONALOGISTICA. ¿Qué es la Huella de Carbono? En: Zonalogística America. Julio-Agosto 2010, Edición 55, p. 28



sobre el concepto aplicado a la huella de carbono, se da una denominación de huella de carbono corporativa que no abarca todos los entornos industriales pero es una de las más usadas; entonces es necesario hacer distinción entre dos enfoques de huella de carbono, uno que está relacionado con el producto y su ciclo de vida, y el otro que comprende el sector comercial y a las empresas en general.

Uno de los factores más influyentes en la huella de carbono, tiene que ver con el tema de *transporte de carga en operaciones logísticas*, que deja como resultado del proceso de combustión gases nocivos como Monóxido de Carbono, Óxidos de Nitrógeno y Metano. El objetivo del análisis de la huella del transporte es reducirla optimizando la eficiencia de distribución, lo que deja una enorme tarea al área de logística de las empresas, puesto que éste tipo de operaciones que en teoría no agregan valor, representan la fuerza más importante de la economía de las naciones, según *la American Trucking Association (ATA)*.

### **Metodologías para el cálculo de la huella de carbono**

Diversas entidades internacionales han establecido una metodología para la medición de una huella de carbono confiable, y aunque no existe una guía universal, existen algunas que establecen reglas claras, estas metodologías son:

- Protocolo de gases de efecto invernadero
- Normas ISO 14000
- Pas 2050
- Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de GEI.

Para el presente trabajo fue empleada las directrices del IPCC para los inventarios nacionales de GEI, siendo esta una fuente confiable y dándole continuidad a anteriores estudios realizados dentro del ingenio.

### **Protocolo de gases de efecto invernadero**

Es una herramienta internacional desarrollada por el World Resources Institute (WRI) y el Business Council for Sustainable Development (WBCSD), con algunas otras empresas y grupos ambientalistas que se utiliza para el cálculo y comunicación de inventario de emisiones y tiene como objetivo la generación de programas efectivos para enfrentar el calentamiento global (Franchetti, 2013)..

En la iniciativa de éste protocolo se identifican cinco principios generales que sirven como guía para el reporte de inventario de los gases:

**Relevancia:** El inventario debe tener información relevante para la toma de decisiones.

**Información completa:** No debe haber exclusión en los reportes de la emisión de GEI.

**Consistencia:** Se deben usar métodos consistentes para permitir comparación entre entidades.

**Transparencia:** Se debe presentar suficiente información para permitir verificación externa y garantizar credibilidad del trabajo.

**Precisión:** No se pueden sobre estimar o sub estimar mediciones para garantizar buenas mediciones (Franchetti, 2013).

Éste protocolo se divide en tres alcances a ser tenidos en cuenta por las empresas, de los cuales los dos primeros son obligatorios:

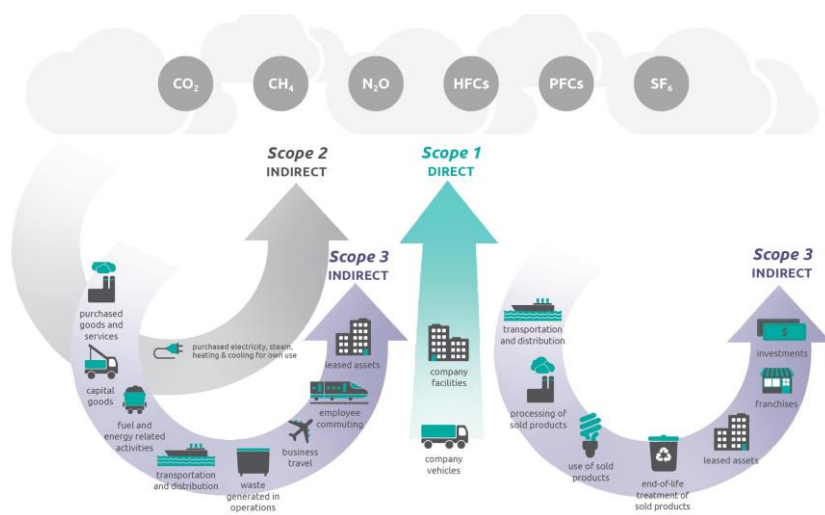
**Alcance 1 Emisiones directas:** Son todas las emisiones generadas por propiedad de una empresa. Pueden provenir de fuentes móviles como vehículos o de estaciones de combustión fijas como las que producen electricidad

**Alcance 2 Emisiones indirectas:** Las emisiones generadas no están operadas por la organización, incluye las emisiones relacionadas con el consumo de energía para producción y funcionamiento de la empresa.

**Alcance 3 Otras emisiones indirectas:** Las emisiones de éste alcance no son consideradas obligatorias en los inventarios de los GEI a diferencia de los dos anteriores. Proviene de fuentes que no son propiedad ni están controladas por la compañía. Por ejemplo, transporte de personal, transporte de residuos sólidos, compra de productos como comida, agua y combustible, etc (Franchetti, 2013).

En la ilustración 3 se muestran las fuentes de cada uno de los alcances, separando las emisiones directas, indirectas y las que no se pueden controlar que corresponden al tercero.

**Ilustración 3: Alcance de emisiones**



Fuente: Greenhouse Gas Protocol

### **Directrices de 2006 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)**

Este grupo fue constituido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), debido a la problemática del cambio climático mundial y a la necesidad de conocer las causas que la conllevan.

Su función principal consiste en analizar de forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender los elementos científicos del riesgo que supone el cambio climático provocado por actividades antropogénicas, sus posibles repercusiones y las posibilidades de adaptación y atenuación del mismo. El IPCC realiza una evaluación periódica de los conocimientos sobre el cambio climático, para ello elabora informes especiales y documentos técnicos sobre temas en los que se consideran necesarios la información y el asesoramiento científicos e independientes y respalda la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) mediante su labor sobre las metodologías relativas a los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. IPCC<sup>12</sup>

Las Directrices del IPCC del 2006 para los inventarios de gases de efecto invernadero proporcionan una estructura común para clasificar los sectores y

<sup>12</sup> (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE)

categorías de fuentes y sumideros a partir de informes que recomienden prácticas y gestión de los Inventarios Nacionales de GEI con base a los datos relativos de los factores de emisión. Dichas directrices incluyen cinco volúmenes:

Volumen 1: Orientación general y generación de informes

Volumen 2: Energía

Volumen 2: Procesos industriales y uso de productos

Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de las tierras

Volumen 5: Desechos

Para el presente trabajo se presta mayor atención en los volúmenes 1, 2 y 4.

### **Definiciones básicas del IPCC.**

**Categoría principal:** categoría prioritaria en el sistema de inventarios nacionales debido a la influencia significativa que su estimación tiene sobre el inventario total de gases de efecto invernadero de un país, en cuanto al nivel absoluto, la tendencia, o la incertidumbre de emisiones y absorciones. Siempre que se utiliza el término categoría principal, incluye tanto las categorías de fuente como de sumidero.

**Árboles de decisiones:** los árboles de decisiones, para cada categoría, ayudan a orientar al compilador del inventario en la selección de la metodología por niveles más adecuada a sus circunstancias, sobre la base de su evaluación de las categorías principales. En general, es una buena práctica utilizar los métodos de niveles superiores para las categorías principales, a menos que los requisitos de los recursos para hacerlo sean prohibitivos.

**Niveles:** un nivel representa un nivel de complejidad metodológica. En general, se presentan tres niveles. El Nivel 1 se basa en los datos estandarizados a nivel internacional, es el método básico, el Nivel 2, se basa en datos del país sobre el que se realiza el análisis y se le denomina nivel intermedio, y el Nivel 3 es el más exigente en cuanto a la complejidad y a los requisitos de los datos ya que requiere que la empresa que realice el análisis construya sus propios factores de emisión de acuerdo a sus necesidades y recursos usados. A veces se denominan los niveles 2 y 3 métodos de nivel superior y se los suele considerar más exactos.

**Emisión de dióxido de carbono-equivalente (CO<sub>2</sub> eq):** Volumen de emisión de dióxido de carbono que causaría el mismo forzamiento radiactivo integrado, en un plazo de tiempo dado, que cierta cantidad emitida de un gas de efecto invernadero suficientemente mezclado.

Las emisiones de dióxido de carbono equivalentes se calculan multiplicando la emisión de un gas de efecto invernadero suficientemente mezclado por su potencial de calentamiento global en el plazo de tiempo especificado. En el caso de las mezclas de gases de efecto invernadero, se suman las emisiones de dióxido de carbono equivalentes correspondientes a cada gas. La emisión de dióxido de carbono equivalente es una unidad de medida normalizada y útil para comparar las emisiones de diferentes gases de efecto invernadero, aunque no implica una equivalencia exacta en las respuestas correspondientes en términos de cambio climático (véase la sección 2.10). IPCC<sup>13</sup>

**Potencial de calentamiento mundial (PCM):** Índice basado en las propiedades radiativas de los gases de efecto invernadero suficientemente mezclados, que mide el forzamiento radiativo, en la atmósfera actual, de una unidad de masa de cierto gas de efecto invernadero suficientemente mezclado, integrado a lo largo de un plazo de tiempo dado, en comparación con el causado por dióxido de carbono.

El PCM representa el efecto conjunto del diferente período de permanencia de esos gases y de su eficacia relativa como absorbentes de radiación infrarroja térmica saliente. El Protocolo de Kioto está basado en el PCM asociado al ritmo de emisión en un período de 100 años. IPCC<sup>14</sup>

Para calcular el total nacional del inventario es necesario sumar las emisiones correspondientes a cada gas estando estas en unidades equivalentes de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> eq). Para llegar a la unidad de equivalencia se debe multiplicar la emisión de cada gas por su potencial de calentamiento que nos brinda el GreenHouse Protocol (GHP)

Cada GEI posee un Potencial de Calentamiento Global (PCG), el cual representa el efecto de calentamiento relativo en comparación con el CO<sub>2</sub> que tiene un PCG igual a 1. Este factor describe el impacto de la fuerza de radiación (grado de daño a la atmósfera) de una unidad de un determinado GEI en relación a una unidad de CO<sub>2</sub>. (Tabla 4)

**Tabla 4:** Potencial de calentamiento global

<b>Gas de efecto invernadero</b>	<b>Tiempo de vida (años)</b>	<b>Potencial de calentamiento global (a 100 años)</b>
Metano	12,4	34
Óxido de Nitroso	121,0	298

Fuente: IPCC, 2013

<sup>13</sup> (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE)

<sup>14</sup> (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE)

## Gases de Efecto Invernadero terrestres

**Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>):** es un gas incoloro, denso y poco reactivo. Forma parte de la composición de la tropósfera (capa de la atmósfera más próxima a la Tierra). El balance del dióxido de carbono es sumamente complejo por las interacciones que existen entre la reserva atmosférica de este gas, las plantas que lo consumen en el proceso de fotosíntesis y el transferido desde la tropósfera a los océanos. (Raynaud et al, 1933)<sup>15</sup>

Este gas de efecto invernadero se encuentra en concentraciones relativamente bajas en la atmósfera, aproximadamente un 0,03%. A pesar de sus bajos niveles, se trata del mayor impulsor del calentamiento global. Actualmente, existen cerca de 3 trillones de toneladas de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, un 27% superior al nivel anterior a la Revolución Industrial. A finales del siglo XIX, los niveles de Dióxido de Carbono eran de 280 partes por millón (ppm); ahora las concentraciones están alrededor de 380 ppm. Algunos científicos advierten que si la cantidad de dióxido de carbono que hay en la atmósfera supera las 450 ppm, la temperatura de la Tierra podría dispararse de manera descontrolada.<sup>16</sup>

**Metano (CH<sub>4</sub>):** El Metano es un gas incoloro, inflamable y no tóxico. Este gas se produce de forma natural por la descomposición de la materia orgánica. Los humedales, el ganado y la energía son las principales fuentes que emiten Metano en la atmosfera, donde actúa como gas de efecto invernadero.

El Metano es además uno de los principales componentes del gas natural. Se extrae fundamentalmente de yacimientos y se utiliza como combustible y con fines industriales.<sup>17</sup>

Es un gas de efecto invernadero relativamente potente. A pesar de su baja concentración, en 100 años, una tonelada de Metano podría calentar el planeta 34 veces más que una tonelada de dióxido de carbono. La atmósfera tiene una concentración de metano de 1.774 partes por billón (ppb), lo que supone un aumento del 59% de la concentración de metano anterior a la Revolución Industrial. Sin embargo, hay 220 veces menos metano que dióxido de carbono en la atmósfera. El metano se crea por la descomposición de la materia orgánica que procede en gran parte de los vertederos, el ganado bovino y el resto del sector ganadero (pollos y cerdos).<sup>18</sup>

---

<sup>15</sup> (RAYNAUD, 1933)

<sup>16</sup> (OCEANA)

<sup>17</sup> (GreenFacts, Facts on Health and the Environment)

<sup>18</sup> (OCEANA)

**Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O):** Es un gas incoloro con un olor dulce y ligeramente tóxico que contribuye al efecto invernadero y tiene una permanencia media de 100 años en la atmósfera. Actualmente se atribuye el 5% del efecto invernadero artificial a este gas. Ataca la capa de ozono reduciendo el ozono a oxígeno molecular y liberando dos moléculas de monóxido de nitrógeno.

El N<sub>2</sub>O es producido durante el proceso de desnitrificación como un subproducto intermedio en la transformación de los nitratos en nitrógeno molecular gaseoso. Los océanos y el suelo son sus principales fuentes naturales. El uso de fertilizantes en la agricultura, la quema de biomasa, la ganadería y la disposición de residuos son fuentes antropogénicas (Denman *et al.*, 2007).

Por otro lado, es el único óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) que actúa como gas de efecto invernadero. El óxido nitroso tendrá en un siglo un efecto de calentamiento global aproximadamente 298 veces superior al del dióxido de carbono. Sin embargo, como el metano, el óxido nitroso se encuentra en concentraciones mucho menores que el dióxido de carbono en la atmósfera, que en la actualidad son de 319 ppb, un 18% superior al periodo anterior a la Revolución Industrial.<sup>19</sup>

### **Fertilizantes Orgánicos:**

**Vinaza:** subproducto obtenido en el proceso de destilación de la caña de azúcar en la fabricación de alcohol que se caracteriza por su alto contenido de materia orgánica, K, Ca, Mg, S y N. Su densidad está alrededor de 1.2 Kg/lit y su contenido de sólidos (% brix) varía entre 10% y 60%, dependiendo de la materia prima utilizada, siendo más rica en elementos la obtenida a partir de la melaza. (Quintero, 2003).

Sirve como substrato para la preparación de fertilizantes líquidos y para la propagación de microorganismos benéficos. (Herrada)<sup>20</sup>

**Compost:** producto estable e higienizado aplicable en la agricultura como abono orgánico o como mejorador del suelo, proveniente del procesamiento de residuos orgánicos generados en la producción de azúcar y etanol, tales como: cachaza, ceniza, basuras de patio de caña y vinaza concentrada.<sup>21</sup>

### **Fertilizantes Sintéticos:**

---

<sup>19</sup> (OCEANA)

<sup>20</sup> (HERRADA Julio, 2006)

<sup>21</sup> (Ingenio de estudio)

**Urea:** Se obtiene por la combinación del dióxido de carbono con el amoníaco y se utiliza como fertilizante nitrogenado en el mundo entero. La urea es el fertilizante nitrogenado sólido comercial con mayor concentración de nitrógeno, 46 por ciento. Se puede aplicar en forma perlada o granulada. A pesar de ser soluble al agua la aplicación en forma líquida es poco corriente.<sup>22</sup>

**Microzinc:** Formulación granulada con alta concentración en zinc (Zn) y azufre (S). Para una mejor absorción, se recomienda aplicarlo con fuentes nitrogenadas y fosfatadas. Su aplicación es muy eficiente particularmente en suelos neutros, donde existe fijación por carbonatos o ácidos por antagonismos con hierro (Fe), aluminio (Al) y por sus bajos contenidos nativos.

**Borogran:** componente fundamental en planes integrales de fertilización tanto en plantillas como en socas.

### **Normatividad Ambiental**

Con la creación del Ministerio del Medio Ambiente y del Sistema Nacional Ambiental (SINA) mediante la Ley 99 de 1993 se establecieron el conjunto de orientaciones, normas, actividades, recursos, programas e instituciones que permiten la puesta en marcha de los principios generales ambientales. En este marco legal se establecieron los institutos de investigación necesarios para apoyar la formulación de políticas, normas y directrices en la materia.

Referente al cambio climático, Colombia aprobó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), mediante la Ley 164 de 1994 y aprobó el protocolo de Kyoto mediante Ley 629 de 2000. Posteriormente se designó al Ideam (Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales) como la entidad coordinadora de la elaboración de las Comunicaciones Nacionales, y se expidió el documento Conpes 3242 de 2003 sobre la “Estrategia Nacional para la venta de servicios ambientales de mitigación de cambio climático”. Finalmente se ajustaron los mecanismos para la aprobación nacional de proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que optan por el Mecanismo de desarrollo limpio (MDL); y se creó el Comité Técnico Intersectorial de Mitigación del Cambio Climático del Consejo Nacional Ambiental.

La Organización Internacional para la Estandarización, ISO por sus siglas en inglés (International Organization for Standardization), es una federación mundial que agrupa a representantes de cada uno de los organismos nacionales de estandarización cuyo objeto es desarrollar estándares internacionales que faciliten el comercio internacional y la comunicación en el mundo.

---

<sup>22</sup> (Fertiberia: Fertilizantes y productos químicos industriales)



En el año 1996, ISO propuso a las organizaciones de todo el mundo un modelo de sistema para la gestión ambiental que se estructuró en la familia de normas ISO 14000, cuyo principal referente es la **norma ISO 14001**.

Esta norma internacional especifica los requisitos necesarios para un sistema de gestión ambiental (SGA), que permite a una organización desarrollar e implementar una política y unos objetivos que tengan en cuenta los requisitos legales y la información sobre los aspectos ambientales significativos.

### **ISO 14000 - Gestión Ambiental**

La familia ISO 14000 aborda diversos aspectos de la gestión ambiental. Proporciona herramientas prácticas para las empresas y organizaciones que buscan identificar y controlar su impacto ambiental y mejorar continuamente su comportamiento ambiental. La ISO 14001:2004 e ISO 14004:2004 se centran en los sistemas de gestión ambiental, mientras que las otras normas de dicha familia en aspectos ambientales específicos, tales como el análisis del ciclo de vida, comunicación y auditoría.

#### **ISO 14001:2004**

Es una norma aceptada internacionalmente que establece cómo implantar un sistema de gestión medioambiental (SGM) eficaz. La norma se ha concebido para gestionar el delicado equilibrio entre el mantenimiento de la rentabilidad y la reducción del impacto medioambiental.

Especifica los requisitos para un sistema de gestión ambiental que permita a una organización desarrollar e implementar una política y unos objetivos que tengan en cuenta los requisitos legales y otros requisitos que la organización suscriba, y la información sobre los aspectos ambientales significativos. Se aplica a aquellos aspectos ambientales que la organización identifica como los que se puede controlar y las que se pueden influir.

#### **ISO 14004:2004**

Esta norma proporciona orientación sobre el establecimiento, implementación, mantenimiento y mejora de un sistema de gestión ambiental y su coordinación con otros sistemas de gestión.

## 7. ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO

### 7.1. CRONOGRAMA

**Tabla 5:** Cronograma de proyecto con objetivos y actividades a realizar

		2013					2014				
Objetivo específico	Actividad	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May
1	Realizar visita inicial al ingenio y reunirse con personal encargado de guiar el proyecto.				x						
	Preparar el área de estudio en visitas de campo.					x		x			
	Observar maquinaria utilizada en el proceso de fertilización.				x			x			
2	Recolectar muestras de emisiones de suelo.					x		x			
	Recolectar emisiones provenientes de maquinaria.							x			
3	Procesar los datos emitidos por el laboratorio.						x	x	x		
	Identificar metodologías para el cálculo de la huella de carbono.				x	x	x	x	x	x	
4	Comparar resultados obtenidos con teóricos a nivel de maquinaria.								x	x	
	Escritura informe final									x	x

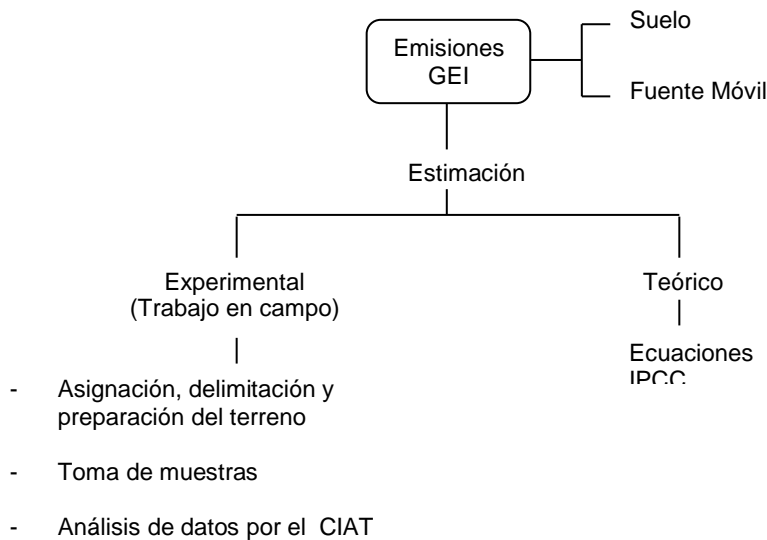
Fuente: Elaboración Propia

## 8. DESARROLLO DEL PROYECTO

### 8.1. DESARROLLO METODOLÓGICO

Como se expuso inicialmente en la metodología del proyecto, para el cálculo y análisis de la huella de carbono se tuvo en cuenta tanto emisiones medidas de forma experimental como teórica, provenientes del suelo y fuentes móviles relacionadas con el área asignada para la labor de fertilización. Para ello, se realiza una descripción del proceso realizado para cada uno. (Ilustración 4)

**Ilustración 4:** Descripción resumida del proceso



Fuente: Elaboración Propia

#### 8.1.1 Estimación experimental de emisiones

##### Medición de GEI de fuentes móviles

Tomando como referencia el IPCC, las fuentes móviles son las que por quema de distintos tipos de combustible, producen emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>), Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) y otros contaminantes como los compuestos orgánicos del Metano (COVDM), el Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), Monóxido de Carbono y Óxidos de Nitrato resultantes del proceso de combustión para generar

energía a la maquinaria móvil, que como en éste caso son empleados para el proceso de fertilización.

El tipo de vehículo terrestre utilizado, según los códigos y categorías definidas por el IPCC, es transporte todoterreno que corresponde a la maquinaria móvil para actividades agrícolas e industriales y que se identifican en el desarrollo de éste trabajo (Tabla 6)

**Tabla 6:** Categoría, código y nombre de la maquinaria

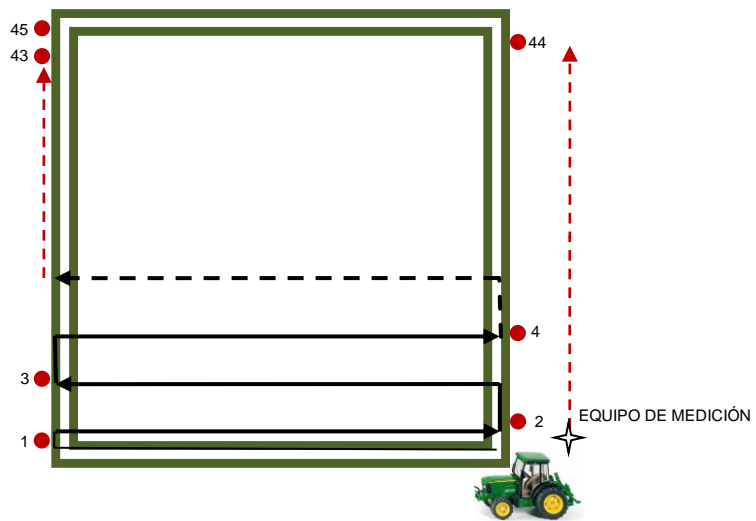
<b>CUADRO 3.1.1</b>			
<b>DIVISIÓN DETALLADA CORRESPONDIENTE AL SECTOR DEL TRANSPORTE</b>			
<b>Código y nombre</b>			<b>Explicación</b>
1 A 3	<i>TRANSPORTE</i>		Emisiones de la quema y evaporación de combustible para todas las actividades de transporte (a exclusión del transporte militar), independientemente del sector, especificado por las subcategorías que se presentan a continuación.  Deben excluirse, lo máximo posible, las emisiones de combustible vendido a cualquier aeronave o nave marítima dedicada al transporte internacional (1 A 3 a j y 1 A 3 d i) de los totales y subtotales de esta categoría; se las debe declarar por separado.
1 A 3	e	ii	<i>Todo terreno</i>
			Emisiones de quema de Otros transportes, a exclusión del transporte por tuberías.

Fuente: IPCC, 2006

Los tractores utilizados para las labores de fertilización en el ingenio corresponden a la línea de la marca John Deere. (Ilustración 5 – Anexo 4)

En total, se tomaron 45 datos del proceso de combustión de fuentes móviles, proceso que duró 22 minutos y del que se obtuvieron ppm de CO<sub>2</sub> en el ambiente. Las emisiones se midieron en dos momentos del muestreo, la primera cuando el tractor se encontraba lo más cerca posible a la sonda de medición y la segunda al encontrarse lo más lejos de esta. Para ello se empleó un CO<sub>2</sub> Meter GCH-2018 marca Luthron, que mide la presencia de CO<sub>2</sub> en el aire en partes por millón (ppm). (Ilustración 6)

**Ilustración 5:** Muestreo emisiones aire



Fuente: Elaboración Propia

Con el fin de conocer el impacto de las fuentes móviles y el proceso de combustión, es necesario convertir las unidades dadas en ppm a toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, para efectos prácticos y tener un número referente, se utiliza el promedio de las muestras, cuyos valores no presentan valores atípicos.

## 8.1.2. Medición GEI en suelo

### 8.1.2.1 Definición de terreno y distribución de cámaras

El cultivo que se trabajó fue la suerte 8, la cual corresponde a un cultivo de caña comercial, específicamente de variedad CC 85-92, siendo esta la más cultivada en la región debido a su alta productividad y resistencia a algunas enfermedades y plagas. (Cenicaña, 2013)<sup>23</sup>

Las labores de preparación de suelo para la siembra de dicha variedad, son iguales a las requeridas para el cultivo de la caña general, e incluyen, principalmente, el arado y pase de rastrillo con la finalidad de permitir la buena aireación y construcción de surcos para la siembra.

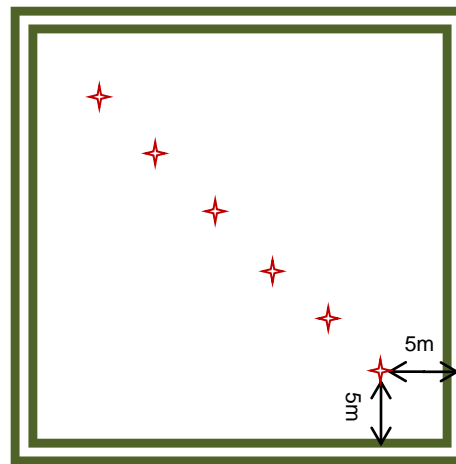
Inicialmente se midió la unidad de muestreo, en este caso correspondiente a una Hectárea (Ha), siendo este el tamaño proporcionado por el ingenio y el mínimo para la implementación de la técnica de cámaras estáticas.

---

<sup>23</sup> (CENICAÑA, 2013)

Teniendo en cuenta el uso establecido del método, las cámaras se ubicaron a 5 metros del punto inicial del cultivo y se ordenaron de forma diagonal.

**Ilustración 6:** Distribución de cámaras en 1 Ha de cultivo (Suerte 8)



Cámaras    \*

Fuente: Elaboración Propia

Tomando como referencia el *Protocolo para muestreo de gases de efecto invernadero del convenio MADR (Ministerio de Agricultura y desarrollo Rural)-CIAT 20120382*, fueron empleadas 6 cámaras de PVC para la recolección y posterior cuantificación de GEI.

Una vez seleccionado los sitios definitivos de instalación para cada una de las cámaras, las bases de estas se enterraron en el suelo sobresaliendo de 2 a 3 cm de la superficie (Ilustración 8 – Anexo 4). Para ello fue necesario prestar atención en mantener su forma cilíndrica y así asegurar un adecuado ajuste con la parte superior y evitar posibles escapes de gases. Una vez instaladas, estas debían permanecer fijas en su lugar durante todo el tiempo del ensayo.

En la parte superior de la cámara se observan los tapones, donde ya está listo el termómetro para toma de temperatura. (Ilustración 9 – anexo 4)

### 8.1.2.2. Toma de muestras

En el momento de cada muestreo se realizó un sellado adecuado de las cámaras ajustando la parte superior a la base, seguido a esto se colocó el termómetro de

forma rectilínea y sin hacer contacto con el suelo para establecer la temperatura al interior de la cámara al momento de la extracción de los gases.

Además, se estableció una secuencia fija para la toma en cada muestreo manteniendo el mismo orden de las cámaras y en cada una de estas se tomaron muestras de aire correspondiente a los tiempos 0, 20, 40 y 60 minutos contados a partir de la primera extracción de gas en la cámara 1. (Ilustración 10 – Anexo 4).

Como primera medida, se insertó una jeringa de 20 mililitros (ml) con una aguja del calibre más pequeño en el orificio central de la cámara, la jeringa debía estar vacía (con el émbolo completamente al fondo de la misma, donde el volumen dentro de la jeringa es de igual a 0 ml) y la válvula en posición abierta (mariposa de la válvula paralela a la jeringa).

Con la aguja completamente adentro se tomó 20 ml de aire (capacidad completa de la jeringa), esta cantidad se expulsaba dentro de la misma cámara y se bombeaba cuatro veces con el fin del homogenizar los gases dentro de la cámara. Posteriormente se tomó la muestra llenando nuevamente la jeringa de aire y se cerró la válvula. (Ilustración 11 –Anexo 4)

Seguido a esto se expulsó 5 ml de la toma e, inmediatamente, los 15 ml restantes fueron insertados en un vial al vacío. Se confirmaba que el vial estuviera vacío si al insertar la jeringa, el émbolo se movía sin necesidad de aplicar algún esfuerzo.

Una vez tomada la muestra, se programó el cronómetro a un tiempo de 20 min y se procedió a repetir el proceso en cada una de las cámaras siguientes. Al pasar exactamente los 20 minutos, se realizaba la siguiente ronda de muestreo.

En cada vial se registró la fecha, el número de cámara, el número de muestra y la temperatura obtenida en cada muestra.

### **Salidas de campo – Visitas**

En el ingenio de estudio, la aplicación de fertilizantes es realizada, después del riego, a los 45 y 75 días en cañas plantillas (cultivo de caña sembrado por primera vez, al cual no se le ha realizado ningún corte), y 30 y 60 días en socas (cultivo posterior al corte de cada ciclo de cultivo), de acuerdo con las recomendaciones del laboratorio de campo basado en un análisis de suelos.

En total se realizaron 7 visitas de las cuales 4 fueron dedicadas a muestreo de suelo y 1 a muestreo de móviles, tal y como se muestra en la tabla 7.

Para cada muestreo de suelo se realizaron 4 tomas en cada una de las cámaras, estableciendo un tiempo definido entre cada una.

**Tabla 7:** Matriz de visitas realizadas

No. Visita	Fecha	Muestra suelo	Muestra móviles	Observaciones
1				Reconocimiento cultivos del ingenio.
2	01/12/2013			Capacitación CIAT.
3	05/12/2013	X		Terreno con soca de caña de azúcar sin presencia de maleza ni crecimiento de cultivo.
4	09/12/2013	X		Terreno con aplicación de vinaza líquida.
5	20/01/2014		X	Emisiones de tractor John Deere
6	25/01/2014	X		Nacimiento de maleza y de caña dentro de las cámaras
7	11/02/2014	X		Toma de muestras con periodos de tiempo diferente a los anteriores. De manera manual se abre camino para facilitar el desplazamiento a las cámaras en el terreno.

Fuente: Elaboración Propia

En la primera visita se hizo un reconocimiento de los terrenos y los procesos de cultivo de caña en general realizado en varias siembras pertenecientes al ingenio, tales como riego, fertilización y aplicación de herbicidas; se observó maquinaria y algunas sustancias utilizadas en el proceso (Ilustración 12 y 13 – anexo 4).

Se hizo una observación de la maquinaria utilizada en la labor de fertilización, además de indagar acerca de los fertilizantes empleados. Teniendo en cuenta esto, se pudieron identificar dos principales fuentes de emisión de GEI:



- Uso de productos químicos en la labor de fertilización (emisiones de GEI derivados de las aplicaciones).
- Vehículos propiedad de la empresa o contratistas empleados en la labor de fertilización (emisiones indirectas de GEI provenientes de fuentes móviles).

En la segunda visita se tuvo un primer acercamiento con los cultivos de caña comercial en un cultivo perteneciente al ingenio, para ello el CIAT realizó una capacitación de la técnica a emplear tomando muestras de ensayo. (Ilustración 14 – Anexo 4).

En la tercera visita se preparó adecuadamente el área de estudio instalando las cámaras para la recolecta de muestras de emisiones (Ilustración 15 – Anexo 4). Seguido a esto, se realizó el primer muestreo con condiciones ambientales normales, sin lluvias y con presencia de fertilizante orgánico y sintético. Cuatro días antes hubo aplicación de Vinaza y Urea, y un día antes de Compost.

En la cuarta visita se realizó un segundo muestreo, cuatro días después del primero y sin ninguna otra aplicación al terreno. (Ilustración 16).

En la quinta visita se llevó a cabo únicamente la toma de muestras de gases emitidos por fuentes móviles que operaron ese día, utilizando un medidor con una sonda y doble función: medición de humedad relativa y partes por millón de CO<sub>2</sub> en el ambiente. Esto se hace mientras se realiza la aplicación de mezcla fertilizante (Urea, Microzinc y Borogran). (Ilustración 17 y 18 – Anexo 4).

En la sexta visita se realizó el tercer muestreo en horas de la mañana y sin presencia de lluvia, pasados cinco días de la aplicación de mezcla fertilizante. Como había presencia de hierba y nacimiento de caña dentro de la base de las cámaras (Ilustración 19 – Anexo 4), se cortó y retiró cuidadosamente para no generar datos atípicos.

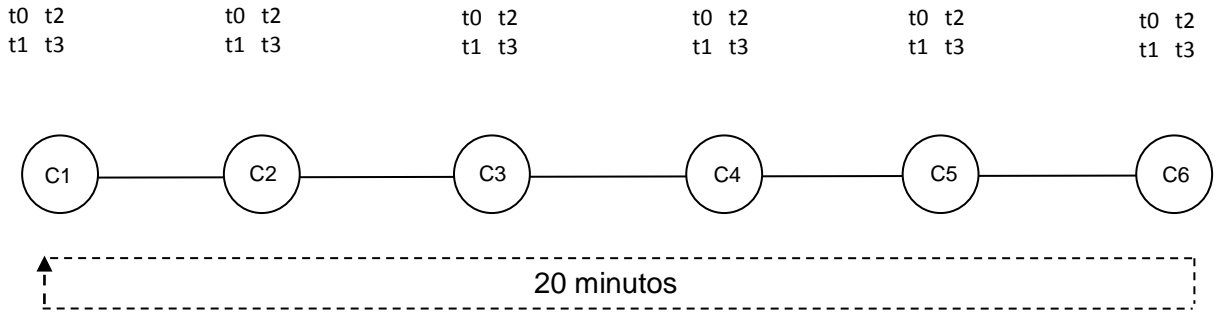
En la séptima visita, se realizó un cuarto muestreo 22 días después de la aplicación de Urea. En esta ocasión había mayor aparición de hierba dentro de las cámaras (Ilustración 20 – Anexo 4) la cual nuevamente tuvo que ser retirada para evitar que estas generaran alteraciones en las emisiones presentes. A diferencia de los muestreos pasados, el tiempo total requerido para el muestreo disminuyó de 20 a 15.

En la ilustración 21 (anexo 4) se observa las condiciones del terreno en el último muestreo.

En general, se destinaron únicamente cuatro visitas para la recolección de emisiones de dichos GEI, realizando un muestreo por cada una de estas.

En cada muestreo se hicieron 4 recorridos de 20 minutos, en donde se recolectaban 4 tomas por cámara en cada uno de estos. En el momento de tomar la muestra, también se tenía presente la temperatura. (Ilustración 22)

**Ilustración 7:** Representación de muestreos



Fuente: Elaboración Propia

Es decir, que se enviaron en total 96 muestras al CIAT para ser analizadas en el laboratorio

### **Conversión de partes por millón de GEI a unidades de Dióxido de Carbono equivalente**

Para obtener la cantidad en partes por millón (ppm) de Metano, Óxido Nitroso y Dióxido de Carbono emitidos por cada muestra, estas fueron procesadas por el CIAT. Para su debido análisis y comparación deben ser convertidas en unidades de Dióxido de carbono equivalentes (CO<sub>2</sub>-eq).

Con el fin de llevar dichas medidas a la unidad de interés de CO<sub>2</sub>-eq para el cálculo de la huella, es necesario convertir dichas unidades en Toneladas para más adelante multiplicarlo por el potencial de calentamiento y así tener todo en términos de Ton CO<sub>2</sub>-eq.

Se tiene que el 1 ppm es equivalente a 0,000001 kilogramos de aire por metro cúbico, que es lo mismo que 0,001 gramos de aire por metro cúbico y que a su vez es 0,000001×0,001 Toneladas de aire por metro cúbico.

$$ppm = \frac{\mu kg}{m^3} = \frac{mg}{m^3} = 10^{-3} \times \frac{\mu Ton}{m^3}$$

Esto significa que, teniendo como referencia el primer dato muestreado en el

proceso de investigación de 130 ppm de Metano, este valor en ppm es igual a  $1,130 \times 0,000001 \times 0,001$  toneladas de aire por metro cúbico

$$130 \text{ ppm } CH_4 = 6.234 \times 10^{-10} \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} CH_4$$

Pero para saber la cantidad de Toneladas del gas, hay que saber la relación entre el peso molecular de dicho gas respecto al del aire. Cabe resaltar que se considera que el aire está formado en un 79% de Nitrógeno, 21% de Oxígeno y 1% de gases raros.

En la tabla 8 se muestra la relación entre los pesos moleculares de los GEI y del aire:

**Tabla 8:** Pesos moleculares de GEI

<b>Molécula</b>	<b>Peso molecular (PM)</b>	<b>Relación PM GEI y PM Aire</b>
CH <sub>4</sub> (Metano)	16 g/mol	16/29
CO <sub>2</sub> (Dióxido de Carbono)	44 g/mol	44/29
N <sub>2</sub> O (Óxido Nitroso)	44 g/mol	44/29
Aire	29 g/mol	

Fuente: Elaboración Propia

Para conocer las toneladas totales en toda la cámara se tiene que multiplicar por el volumen de esta.

$$V_{\text{cámara}} = V_{\text{cilindro}} = \pi \times r^2 \times h$$

$$V_{\text{cámara}} = \pi \times 12.5^2 \times 12$$

$$V_{cámara} = 5890,5 m^3$$

La cantidad total de Toneladas de Metano es pues:

$$6.234E^{-10} \frac{Ton}{m^3} CH_4 \times 5890,5 m^3 = 3,672 \times 10^{-06} Ton CH_4$$

Por último, se multiplica por su potencial de calentamiento y se obtiene la cantidad en CO<sub>2</sub>-eq

$$3,672 \times 10^{-06} Ton CH_4 \times 34 = 1,25 \times 10^{-04} CO_2 - eq$$

Dicho procedimiento se debe realizar con cada uno de los datos obtenidos por el CIAT, teniendo en cuenta cuál es el GEI a convertir.

### **8.1.3. Estimación teórica de emisiones**

Como punto de partida se seleccionó un método de estimación de emisiones desarrollado por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), que según la cantidad de información propone diferentes niveles de cálculo de emisiones de GEI que usualmente están dadas en unidades de masa que serán convertidas posteriormente en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>eq).

Como se mencionó inicialmente, para el cálculo teórico de las emisiones de GEI según el IPCC, existen tres niveles de profundidad, en el que el mayor nivel indica más exactitud debido a que requiere información de mayor complejidad y especificación, donde se construyen los propios factores de emisión de acuerdo a las necesidades y recursos usados.

#### **8.1.3.1. Medición de GEI de fuentes móviles**

Teniendo en cuenta que existen varios métodos de cálculo para el caso de los vehículos todo terreno, categoría correspondiente a los tractores utilizados en la labor de fertilización, se deben tener en cuenta factores importantes para la estimación, tales como: distancia recorrida en la labor, tipo de combustible y consumo, que, en caso de haber ausencia de datos se pueden utilizar los primeros

niveles de cálculo, donde puede haber baja precisión y factores de emisión por defecto.

Para el cálculo del Dióxido de Carbono se precisa básicamente la cantidad y tipo de combustible quemado, a diferencia del Metano y el Óxido Nitroso que dependen de la tecnología del vehículo utilizado y de las condiciones de uso.

Establecida ya la categoría, se identifica el nivel para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, y N<sub>2</sub>O procedentes de la combustión en las fuentes móviles todo terreno, esto a través de la implementación de un árbol de decisión con los criterios para seleccionar el nivel y las ecuaciones a emplear.

Cada nivel presenta unos parámetros específicos. El nivel uno plantea una estimación de emisiones con base a factores de emisión por defecto específicos del combustible, información que se puede extraer del IPCC. El nivel dos utiliza factores de emisión específicos del país y del combustible. Mientras que el nivel tres, utiliza parámetros más complejos que garantizan mayor exactitud en el resultado de la estimación, la ecuación utiliza horas anuales del equipo, potencia nominal, factores de carga y de emisión sobre la base de utilización de energía.

Teniendo como base la información anterior, proveniente del árbol de decisión para estimar las emisiones procedentes de los vehículos todo terreno del IPCC, y la información suministrada por el ingenio, el nivel más adecuado y escogido para la emisión de gases de los tres postulados es el nivel dos, donde cada tipo de emisión es determinado por su factor y se especifica el tipo de combustible y vehículo utilizado. (Ilustración 23)

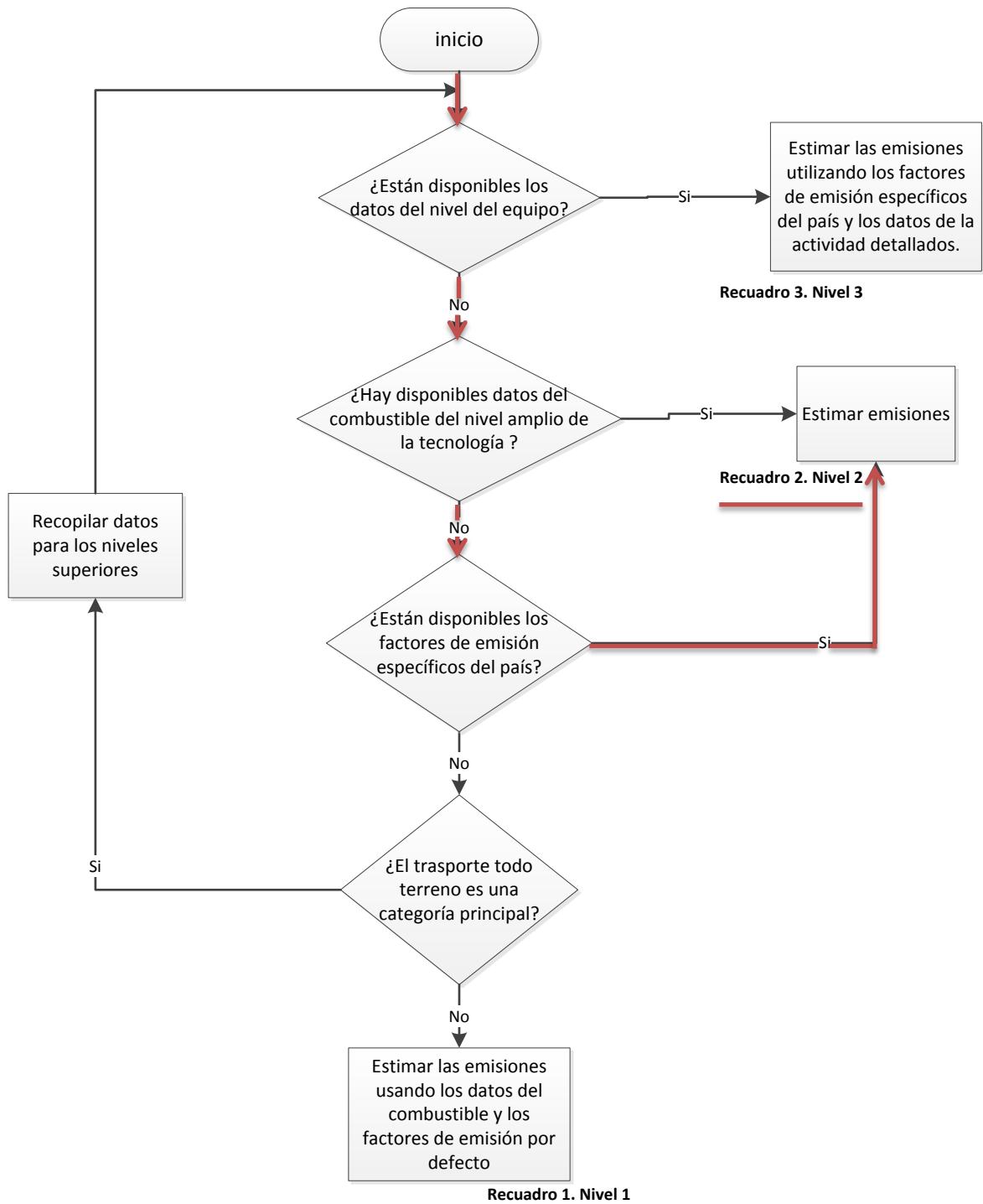
Tal y como se muestra en el siguiente enunciado

*“Para el Nivel 2, se estiman las emisiones usando factores de emisión específicos del país y del combustible, los cuales -si están disponibles- son específicos del tipo más amplio de vehículo o maquinaria. Ir más allá del Nivel 2 para las estimaciones de emisiones de CO<sub>2</sub> ofrece pocos beneficios o ninguno, siempre que haya disponibles datos fiables sobre el consumo del combustible.” (IPCC)<sup>24</sup>*

---

<sup>24</sup> (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006)

**Ilustración 8:** Árbol de decisión para estimar las emisiones procedentes de los vehículos todo terreno



Fuente: IPCC, 2006

Aunque hay ausencia de datos del nivel amplio de la tecnología y de datos del combustible del nivel amplio de la tecnología, se puede usar la ecuación de nivel 2 debido a que es posible obtener la información respecto a factores de emisión de combustible en Colombia a partir de estudios de la unidad de planeamiento minero energético (UPME)

**Ecuación 1:** Estimación emisiones fuentes móviles del nivel 2

$$Emisiones = \sum Combustible_{ij} * EF_{ij}$$

Dónde:

**Emisiones** = emisiones (Kg CO<sub>2</sub>)

**Combustible<sub>i,j</sub>**= combustible consumido, representado por el combustible vendido (TJ)

**EF<sub>i,j</sub>**= factor de emisión (Kg/TJ)

**i**= tipo de vehículo/equipo

**j**= tipo de combustible

A continuación se presenta la tabla 9, la cual presenta los factores de emisión de combustibles líquidos, sólidos, y gaseoso, entre las que se tiene en cuenta el diesel, combustible utilizado por los tractores del ingenio.

**Tabla 9:** Factores de emisión de e Carbono y CO<sub>2</sub> por combustible (Kg/Gj)

<b>Combustible</b>	<b>Estado</b>	<b>Factor de emisión (kg C/GJ)</b>	<b>Factor de emisión (kg CO<sub>2</sub>/GJ)</b>
<b>Carbón</b>	<b>Sólido</b>	<b>26.8</b>	<b>94.53</b>
<b>Crudo</b>	<b>Líquido</b>	<b>20</b>	<b>73.28</b>
<b>Diesel</b>	<b>Líquido</b>	<b>20.2</b>	<b>74.01</b>
<b>Gasolina</b>	<b>Líquido</b>	<b>18.9</b>	<b>69.25</b>
<b>Kerosene</b>		<b>19.5</b>	<b>71.45</b>
<b>Gas propano</b>	<b>Gas</b>	<b>17.2</b>	<b>63.02</b>
<b>GLP</b>			
<b>Natural gas</b>		<b>15.3</b>	<b>56.06</b>

Fuente: UPME

### **Desarrollo ecuación 1**

Para la utilización de la ecuación de nivel 2 se utiliza la información de la tabla 7 y se convierten las magnitudes de los parámetros dados, ya que el factor de emisión está dado en Kg C/ GJ (Kilogramos de carbono por giga joule), y el de la ecuación del IPCC está en TJ (Tera joules), diferencias que no alteran el resultado que finalmente está dado en Kg.

Se utilizó información suministrada por los operarios de los tractores (fuentes móviles) respecto a velocidad promedio y consumo de combustible en Kilómetros por galón, para así poder expresar el consumo en unidades de energía. Además se tiene en cuenta el periodo de tiempo que dura la labor de fertilización en una hectárea para la el muestreo atmosférico que son 20 minutos.

$$Tasa\ de\ consumo = \frac{3gal}{60mn}$$

$$Tiempo\ de\ recorrido = 20\ min/ha$$



Teniendo la tasa de consumo por hora y el tiempo de recorrido por hectárea, se puede saber la cantidad de combustible en galones utilizados por hectárea:

$$\mathbf{Cantidad\ de\ combustible} = \mathbf{Tasa\ de\ consumo} * \mathbf{Tiempo\ de\ recorrido}$$

$$\mathbf{Cantidad\ de\ combustible} = \frac{3gal}{60min} * 20 \frac{min}{ha}$$

$$\mathbf{Cantidad\ de\ combustible} = 1gal/ha$$

Una vez obtenida la cantidad de combustible en la labor, se debe hacer conversión de unidades para ser expresada en unidades de energía, además se necesita tener el peso del combustible usado en kilogramos. Para ello, es necesario tener claridad de la densidad del Diesel Colombiano y así convertir las unidades de volumen a masa.

Según la Unidad de Planeación Minero Energética, tenemos que:

$$\rho_{diesel} = \frac{0.865Kg}{L}$$

Sabiendo que 1 galón es igual a 3.7854118 litros y partiendo de la ecuación que relaciona densidad, masa y volumen se puede obtener el peso del combustible utilizado en una hectárea:

$$\mathbf{m}_{diesel} = \rho_{diesel} * \mathbf{v}_{diesel}$$

$$\mathbf{m}_{diesel} = \frac{0.865Kg}{L} * 3.79 L$$

$$\mathbf{m}_{diesel} = 3.28Kg$$

Para la resolución de este modelo, se debe conocer la cantidad de energía que se desprende por cada unidad de masa (kilogramos) del diesel al producirse la combustión, es decir, el poder calorífico de la sustancia, que para el caso de nuestro país, según la UPME, es de 44.715 (cuarenta y cuatro mil setecientos quince) Kj/Kg, con lo que se puede cuantificar el combustible consumido en Kilo joules:

$$\textit{Combustible consumido} = \frac{3.28Kg}{ha} * \frac{44715Kj}{Kg}$$

$$\textit{Combustible consumido} = 146218 Kj/ha$$

Partiendo de la anterior información, finalmente se puede obtener un resultado teórico de las emisiones de fuentes móviles recorriendo una hectárea de cultivo, utilizando la ecuación de nivel 2, propuesta por el IPCC.

$$\textit{Emisiones} = 146218 Kj/ha * 10^{-6} Kj/Gj * 74,01 Kg CO_2/Gj$$

$$\textit{Emisiones} = 10,82 Kg CO_2 = 0,01082 Ton CO_2/ha$$

Se igualan las magnitudes multiplicando por  $10^{-6}$  y se multiplica por el factor de emisión del diesel, por lo que el resultado está dado en unidades de masa de dióxido de carbono liberado por la labor.

El resultado obtenido representa sólo una muestra, es decir, el recorrido de un vehículo en una aplicación, por lo que para aproximar el resultado a la huella que se creó por consecuencia de utilización de maquinaria en la labor de fertilización, se debe multiplicar el valor anterior por cuatro, siendo este el número de veces que un tractor realizó recorridos para aplicar fertilizantes durante la elaboración del proyecto, por lo que el valor en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente es de 4,34E-02.

### 8.1.3.2. Medición GEI en suelo

Partiendo igualmente de las directrices del IPCC, volumen 4 correspondiente a AFOLU (Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra) por sus siglas en inglés, se procede a seleccionar y a adecuar una serie de ecuaciones existentes con diferentes niveles de cálculo utilizado en varios tipos de terreno, principalmente en tierras de cultivo gestionado con fertilizantes.

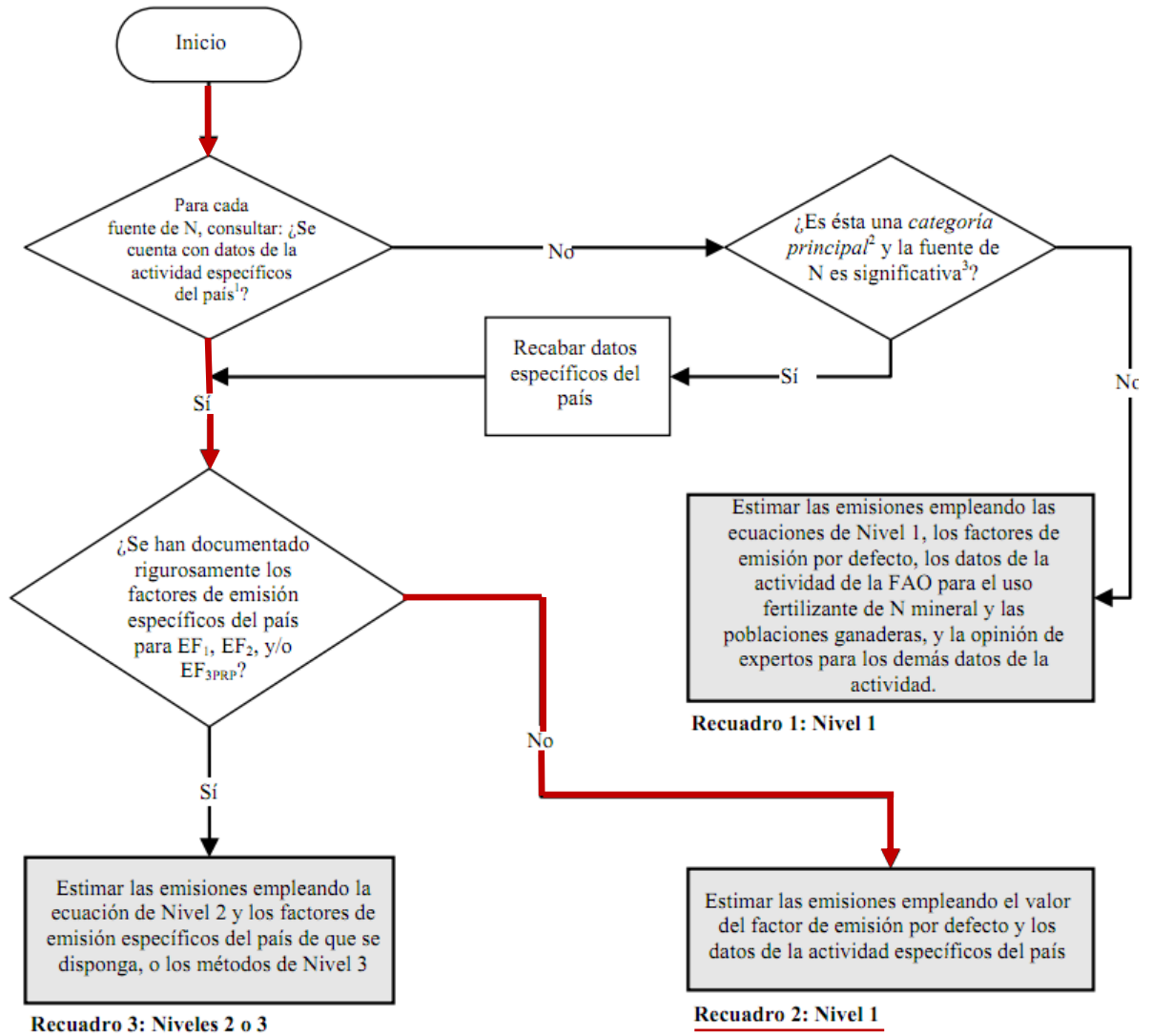
Además, con el fin de complementar una herramienta de Excel para la estimación de GEI realizada anteriormente por un estudiante en su proyecto de grado, se toma como base el modelo matemático de emisiones del proyecto desarrollado por Katherine Sotelo y Katherine Ballesteros, quienes implementan las ecuaciones de los tres gases con mayor impacto, los cuales, basándose en las directrices del IPCC y la labor de fertilización en el ingenio, hacen referencia a Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O), Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) y Metano (CH<sub>4</sub>) por separado.

Al igual que para la estimación de fuentes móviles, cada nivel de emisión de suelo implica parámetros más complejos que aproximan el resultado a uno más real. El nivel 1 es la forma más sencilla de cálculo que utiliza las fuentes de nitrógeno en forma de fertilizantes, residuos y minerales, y un factor de emisión por defecto; el nivel 2 y nivel 3 precisan factores de emisión desarrollados y permiten relacionar las emisiones del suelo; observación que se lleva a cabo en el análisis de resultados de muestreos de suelos.

#### **8.1.3.2.1. Estimación Óxido Nitroso**

Para el cálculo estimado de Óxido Nitroso emitido por la labor de fertilización y siguiendo los parámetros establecidos en el IPCC, la escogencia de la ecuación a utilizar se basa del árbol de decisión de nivel para la estimación de Óxido Nitroso. (Ilustración 24)

**Ilustración 9:** Niveles de estimación para N<sub>2</sub>O



Fuente: IPCC, 2006

En éste caso sólo se disponen datos de la actividad que pertenece a la cantidad de fertilizantes aplicados sobre la hectárea correspondiente, que son las fuentes de N, y el factor de emisión que es proporcionado por el IPCC; como no se han documentado los factores de emisión específicos y no se dispone de varios factores de emisión, se debe utilizar el modelo de nivel 1 que utiliza factores de emisión por defecto. La siguiente ecuación representa el cálculo de estimación para el nivel 1:

**Ecuación 2:** Emisiones directas de N<sub>2</sub>O de suelos gestionados (Nivel 1)

$$N_{2O\text{directas}} - N = N_{2O} - N_{\text{naportes}} + N_{2O} - N_{\text{os}} + N_{2O} - N_{\text{prp}}$$

Teniendo en cuenta que:

$$N_{2O} - N_{\text{naportes}} =$$

$$[(F_{\text{sn}} + F_{\text{os}} + F_{\text{cr}} + F_{\text{som}}) * EF_{\text{fl}}] + [(F_{\text{sn}} + F_{\text{os}} + F_{\text{cr}} + F_{\text{som}})fr * EF_{\text{flfr}}]$$

$$N_{2O} - N_{\text{os}} =$$

$$\begin{aligned} & [(F_{\text{os},gc,temp} * EF_{2cg,temp}) + (F_{\text{os},gc,trop} * EF_{2cg,trop}) \\ & + (F_{\text{os},f,temp,nr} * EF_{2f,temp,np}) + (F_{\text{os},f,temp,np} \\ & * EF_{2f,temp,np}) + (F_{\text{os},f,trop} * EF_{2f,trop})] \end{aligned}$$

$$N_{2O} - N_{\text{prp}} = [(F_{\text{prp},cpp}) * EF_{3prp,cpp}] + [(F_{\text{prp},so} * EF_{3frp,so}]$$

Dónde:

**N<sub>2</sub>O<sub>Directas</sub> - N** = emisiones directas anuales de N<sub>2</sub>O-N producidas a partir de suelos gestionados, kg N<sub>2</sub>O-N año<sup>-1</sup>

**N<sub>2</sub>O-N<sub>naportes</sub>** = emisiones directas anuales de N<sub>2</sub>O-N producidas por aportes de N a suelos gestionados, kg N<sub>2</sub>O-N año<sup>-1</sup>

**N<sub>2</sub>O-N<sub>os</sub>** = emisiones directas anuales de N<sub>2</sub>O-N de suelos orgánicos gestionados, kg N<sub>2</sub>O-N año<sup>-1</sup>

**N<sub>2</sub>O-N<sub>prp</sub>** = emisiones directas anuales de N<sub>2</sub>O-N de aportes de orina y estiércol a tierras de pastoreo, kg N<sub>2</sub>O-N año<sup>-1</sup>

**F<sub>SN</sub>** = cantidad anual de N aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético, kg N año<sup>-1</sup>

**F<sub>ON</sub>** = cantidad anual de estiércol animal, compost, lodos cloacales y otros aportes de N aplicada a los suelos, kg N año<sup>-1</sup>

$F_{CR}$  = cantidad anual de N en los residuos agrícolas (aéreos y subterráneos), incluyendo los cultivos fijadores de N y la renovación de forraje/pastura, que se regresan a los suelos, kg N año<sup>-1</sup>

$F_{SOM}$  = cantidad anual de N en suelos minerales que se mineraliza, relacionada con la pérdida de C del suelo de la materia orgánica del suelo como resultado de cambios en el uso o la gestión de la tierra, kg N año<sup>-1</sup>

$F_{OS}$  = superficie anual de suelos orgánicos gestionados/drenados, ha

$F_{PRP}$  = cantidad anual de N de la orina y el estiércol depositada por los animales en pastoreo sobre pasturas, prados y praderas, kg N año<sup>-1</sup>

$EF_1$  = factor de emisión para emisiones de N<sub>2</sub>O de aportes de N, kg N<sub>2</sub>O–N (kg aporte de N)<sup>-1</sup> (Tabla 10)

En ésta sección sólo se consideran las fuentes de fertilizantes orgánicos y sintéticos por la naturaleza de la labor. De esta manera, la ecuación queda reducida a:

$$N_{2O}directas - N = N_{2O} - N_{nportes}$$

Dónde:

$$N_{2O} - N_{nportes} = (F_{SN} + F_{ON}) * EF_1$$

**Tabla 10:** Factores de emisión de N<sub>2</sub>O

FACTORES DE EMISIÓN POR DEFECTO PARA ESTIMAR LAS EMISIONES DIRECTAS DE N <sub>2</sub> O DE LOS SUELOS GESTIONADOS		
Factor de emisión	Valor por defecto	Rango de incertidumbre
EF <sub>1</sub> para aportes de N de fertilizantes minerales, abonos orgánicos y residuos agrícolas, y N mineralizado de suelos minerales a causa de pérdida de carbono del suelo [kg N <sub>2</sub> O–N (kg N) <sup>-1</sup> ]	0,01	0,003 - 0,03

Fuente: IPCC, 2006

## Desarrollo de ecuación 2

Para el desarrollo de la ecuación es necesario remitirse a la hoja de vida de la suerte donde están los contenidos exactos de aplicación de fertilizantes sintéticos (urea, borogran y microzinc) y orgánicos (vinaza y compost) durante el periodo de muestreos, es decir, aproximadamente dos meses.

La tabla 11 muestra las cantidades de ambos tipos de fertilizantes. Debido a la pequeña proporción que tienen el microzinc y borogran respecto a fertilizantes sintéticos, no serán tenidos en cuenta para el cálculo teórico de emisiones.

**Tabla 11:** Cantidad de fertilizantes aplicados por Ha

Fertilizante	Dosis		Proporción
Vinaza	9000	L	0,08
Compost	100000	kg	0,92
<b>Total Orgánico</b>	109000	kg	1,00
Urea	450	kg	0,96
Borogran	10	kg	0,02
Microzinc	10	kg	0,02
<b>Total Sintético</b>	470	kg	1,00

Fuente: Ingenio de estudio

*“El CH<sub>4</sub>, al ser calculado con base en el CO<sub>2</sub> como se explicó anteriormente tienen el mismo valor, y con una cantidad de 1,46 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, es el N<sub>2</sub>O el que mayores emisiones presenta, debido a su contenido y a su potencial de calentamiento que supera 298 veces al del CO<sub>2</sub>.” (Cenicaña, Quintero)*

Partiendo de estudios realizados por el IPCC, se indica que para cada fertilizante se debe tener en cuenta el porcentaje de nitrógeno contenido en cada uno, en el que para la Urea se utiliza el 46% de la totalidad del peso como indica un artículo publicado por cenicaña; en el caso del compost, tiene un contenido del 1% de nitrógeno respecto a la totalidad de su peso, y para el caso de la vinaza que está dada en unidades de volumen, se tiene que por cada metro cubico aplicado,

existen 0,63 kilogramos de nitrógeno. Por lo que se procede de la siguiente manera:

$$F_{SN} = 450kg * 0.46 = 207kg$$

Al utilizarse el 46% de la totalidad del peso de urea, la cantidad de nitrógeno en fertilizante sintético es 207 Kg. Para la cantidad de abono orgánico, se multiplica la cantidad de vinaza por su contenido de nitrógeno en kilogramos por cada unidad de volumen y se suma el 1% de los 10.000 kilogramos de compost.

$$F_{ON} = \left( 9L * \frac{0.63Kg}{L} \right) + (10000Kg * 0.01)$$

$$F_{ON} = 1005,67 Kg$$

Al sumar ambas cantidades se multiplica el factor de emisión y se obtiene el valor para las emisiones de N<sub>2</sub>O–N:

$$N_2O - N = (105.67 Kg + 207 kg) * 0.01$$

$$N_2O - N = 3.1267Kg$$

La conversión de emisiones de N<sub>2</sub>O–N en emisiones de N<sub>2</sub>O a los efectos de la declaración se realiza utilizando la fracción molar con la siguiente ecuación:

$$N_2O = N_2O - N * 44/28$$

Por lo que el total de emisiones de óxido nitroso para el periodo de estudio, en la hectárea asignada y según la totalidad de aplicación de fertilizantes es:

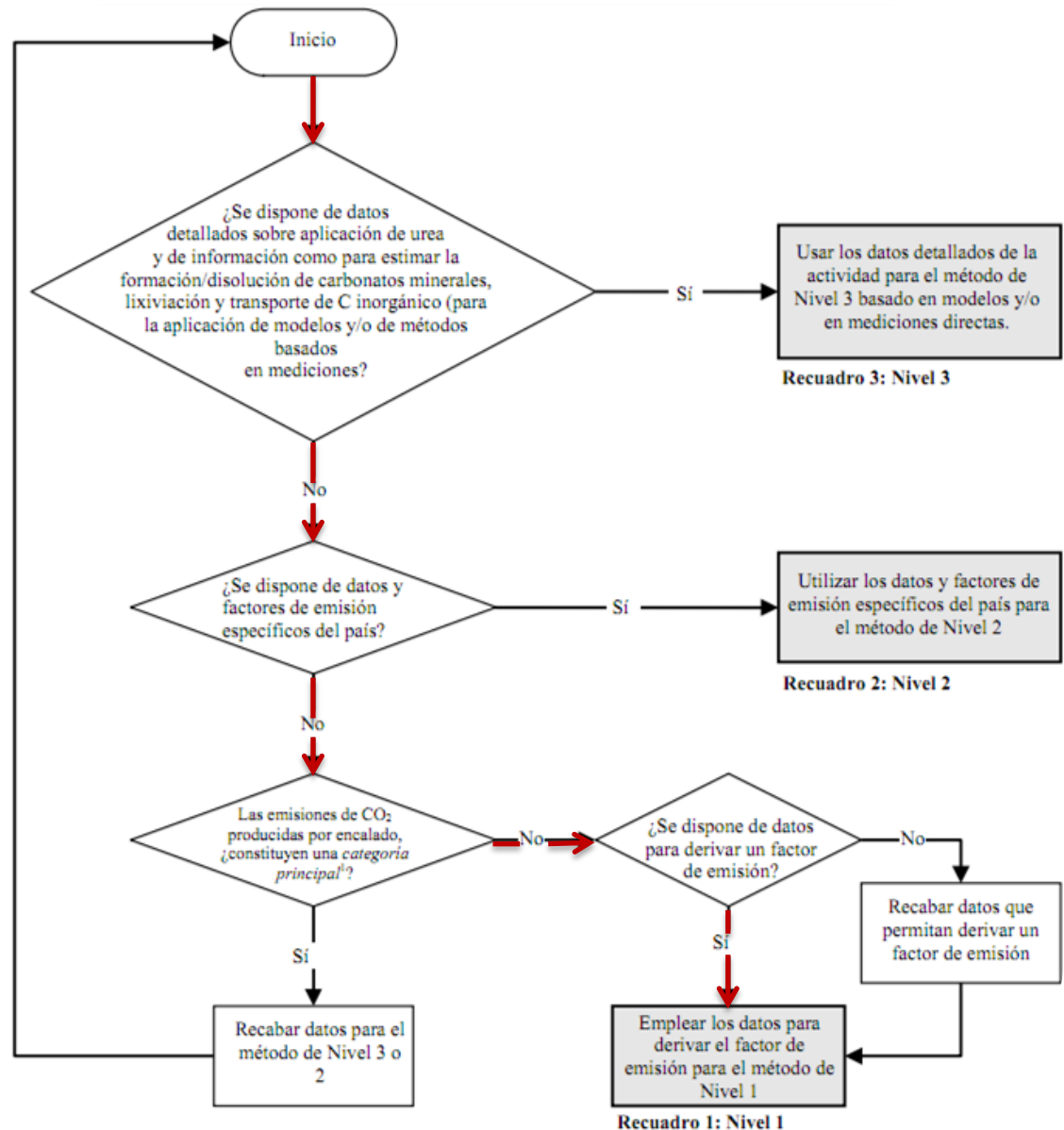
$$N_2O = 4.91 Kg$$



### 8.1.3.2.2. Estimación Dióxido de Carbono

Para el cálculo estimado de dióxido de carbono emitido por la labor estudiada, y siguiendo los parámetros establecidos en el IPCC se debe escoger un nivel de representatividad como lo muestra la figura 22:

Ilustración 10: Niveles de estimación para CO<sub>2</sub>



Fuente: IPCC, 2006

Así como para el gas anterior, tampoco se disponen datos detallados que permitan utilizar el nivel más completo (nivel 3), como información para estimar la formación o disolución de carbonatos minerales, lixiviación y transporte de carbono orgánico; o factores de emisión del país, siendo así, se debe emplear el modelo postulado para el nivel 1 que se diferencia del 2 solamente en el hecho de que no utiliza información específica del país para estimar factores de emisión.

El nivel 1 propone tres pasos para la estimación de emisiones de CO<sub>2</sub>-C por aplicaciones de urea; el primero plantea la “estimación” total de urea aplicada a un suelo, para éste proyecto se utiliza la tabla (La de la hoja de vida) y el periodo de duración de los muestreos; el segundo explica que el factor de emisión corresponde al 2% de contenido carbono del fertilizante sobre la base de su peso atómico; y el último que convierte el resultado de CO<sub>2</sub>-C a kilogramos de CO<sub>2</sub> multiplicando 44/12 (fracción molar del compuesto).

La ecuación 3 pertenece al modelo planteado por el nivel 1 de cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub>.

**Ecuación 3:** Emisiones de CO<sub>2</sub>, por aplicación de Urea

$$CO_2 - C_{emisión} = M * EF$$

Dónde:

**Emisión de CO<sub>2</sub>-C** = emisiones anuales de C por aplicación de urea, ton C año<sup>-1</sup>

**M** = cantidad anual de fertilización con urea, ton urea año<sup>-1</sup>

**FE** = factor de emisión, ton de C (ton de urea)<sup>-1</sup>

### **Desarrollo ecuación 3**

Para el desarrollo de la ecuación se toma la totalidad de urea que fue aplicada durante el periodo de estudio.

$$CO_2 - C \text{ emisión} = 0.45 \text{ Ton} * 0.2$$

$$CO_2 - C \text{ emisión} = 0.09 \text{ Ton}$$

Aplicando el tercer paso del nivel para se obtiene:

$$\text{Emisión } CO_2 = 0.09 \text{ Ton} * 44/12$$

$$\text{Emisión } CO_2 = 0.33 \text{ Ton}$$

#### 8.1.3.2.3. Estimación Metano

Para la estimación teórica de las emisiones de Metano, no existe un modelo matemático adaptado para fertilizantes o para labores en campos de cultivo de caña de azúcar, la mayoría de emisiones de éste gas en ámbitos de agricultura, forestación y otros usos del suelo, provienen de estiércol del ganado, digestión entérica del mismo y disposición de desechos, fuentes para las que si se han desarrollado metodologías numéricas que cuantifiquen el impacto con base en factores ya establecidos.

Existe una relación entre la cantidad de CH<sub>4</sub> producida y el CO<sub>2</sub>, que para éste estudio se estima con las emisiones procedentes directamente de la Urea, por lo que se toma como punto de referencia la cantidad de C contenido en fertilizantes sintéticos que es igual a la cantidad aplicada. Una vez es conocida la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido, se puede hallar la cantidad de CH<sub>4</sub>; para ello se utiliza el potencial de calentamiento de cada gas.

Se tiene la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> en unidades de masa equivalente a 0,33 toneladas que se deben llevar a unidades de CO<sub>2</sub> equivalente, para después ser expresados en unidades de masa de CH<sub>4</sub> multiplicando y dividiendo por el respectivo potencial de cada gas de la siguiente forma.

$$\text{Emisiones de } CH_4 = \frac{\text{Emisiones } CO_2 * \text{Potencial } CO_2}{\text{Potencial } CH_4}$$

Como le potencial de calentamiento del dióxido de carbono es el referente para los otros gases tiene un valor de 1, así las unidades de CO<sub>2</sub> equivalente son las

mismas que la cantidad de emisiones en unidades de masa, por lo que resta dividir por el potencial de calentamiento del CH<sub>4</sub>, cuya magnitud es de 34.

$$Emisiones\ de\ CH_4 = \frac{0,33\ ton * 1}{34}$$

$$Emisiones\ de\ CH_4 = 0,0097\ ton$$

En unidades de masa, el valor de las emisiones de CH<sub>4</sub> es 0,0097 Ton, magnitud que será expresada en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, de esa forma se puede establecer una diferencia y saber que gas impacta más la huella de carbono según las sustancias utilizadas.

#### **8.1.4. Estimación de GEI por fertilizante**

##### **8.1.4.1. Estimación Óxido Nitroso**

Una vez obtenidos los valores teóricos de cada uno de los gases, con el fin de identificar el impacto ambiental de cada fertilizante, se calculó la cantidad de GEI emitidos por cada uno. Debido a que la estimación del Metano se basó en las emisiones de CO<sub>2</sub>, al no existir un modelo matemático adaptado para este, no fue considerado en el proceso

Como se desarrolla en la herramienta y con información suministrada en el ingenio y extraída del IPCC, se realizó el mismo procedimiento para cada fertilizante según el GEI a considerar, con el objetivo de conocer su respectivo nivel de emisiones en unidades de CO<sub>2</sub> equivalente.

Para el cálculo del Óxido Nitroso, fue necesario considerar la cantidad aplicada de cada fertilizante y su contenido de Nitrógeno, tal y como se expone en la tabla x

El cálculo de emisiones de N<sub>2</sub>O se evaluó con un contenido de 1% de Nitrógeno en el Compost, 0,63 Kg/m<sup>3</sup> es la densidad del Nitrógeno en la Vinaza que se aplica en estado líquido, y respecto a la Urea, al ser un fertilizante compuesto en su mayor parte por nitrógeno, se consideró el 100% de contenido, además es el único que se tiene en cuenta para el cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> según el método desarrollado por el IPCC. (Tabla 12)

**Tabla 12:** Cantidad aplicada por fertilizante y contenido de Nitrógeno

Fertilizante	Cantidad aplicada	Contenido de N
Vinaza	9000 L/ha	0.63 Kg/m3
Compost	10000 Kg/ha	1%
Urea	450 Kg/ha	46%

Fuente: Elaboración Propia

Adecuando la ecuación 1 empleada para la estimación total de Óxido Nitroso para cada fertilizante, se tiene que:

**Ecuación 4:** Óxido Nitroso obtenido por fertilizante orgánico

$$N_{20} \text{ Emitido por } F_o = F_o * \text{Contenido N } F_o * EF * FM \text{ GEI}$$

**Ecuación 5:** Óxido Nitroso obtenido por fertilizante sintético

$$N_{20} \text{ Emitido por } F_s = F_s * \text{Contenido N } F_s * EF * FM \text{ GEI}$$

Dónde:

**F<sub>o</sub>:** Fertilizante orgánico, ya sea Vinaza o Compost

**F<sub>s</sub>:** Fertilizante sintético, el cual hace referencia a la Urea

**EF:** Factor de emisión

**FM:** Fracción Molar

Empleando la ecuación 4 se obtuvo lo siguiente:

- **Vinaza**

La cantidad de Óxido Nitroso emitida por la Vinaza es 0,027 Ton CO<sub>2</sub>- eq

$$N20 \text{ Emitido por Vinaza} = \frac{9000 \frac{L}{Ha}}{1000} * 0,63 \frac{Kg}{m^3} * 0,01 * 1,5714$$

$$N20 \text{ Emitido por Vinaza} = 0,089 \frac{Kg}{a}$$

$$N20 \text{ Emitido por Vinaza} = 0.0000891 \frac{Ton}{Ha}$$

Multiplicándolo por el Potencial de Calentamiento

$$N20 \text{ Emitido por Vinaza} = 0,027 \frac{Ton CO2 - eq}{Ha}$$

#### - Compost

La cantidad de Óxido Nitroso emitida por el Compost es 0,468 Ton CO<sub>2</sub> - eq

$$N20 \text{ Emitido por Compost} = 10000 \frac{Kg}{ha} * 0,01 * 0,01 * 1,5714$$

$$N20 \text{ Emitido por Compost} = 1,571 \frac{Kg}{ha}$$

$$N20 \text{ Emitido por Compost} = 0,001571 \frac{Ton}{ha}$$

Multiplicándolo por el Potencial de Calentamiento

$$N20 \text{ Emitido por Compost} = 0,468 \frac{Ton CO2 - eq}{ha}$$

Empleando la ecuación 5 se obtuvo:

#### - Urea

La cantidad de Óxido Nitroso emitida por el Compost es 2,107 Ton CO<sub>2</sub> - eq

$$N20 \text{ Emitido por Urea} = 450 \frac{Kg}{ha} * 0,46 * 0,01 * 1,5714$$

$$N20 \text{ Emitido por Urea} = 3,3 \frac{Kg}{ha}$$

$$N20 \text{ Emitido por Urea} = 0,0033 \frac{Ton}{ha}$$

Multiplicándolo por el Potencial de Calentamiento

$$N20 \text{ Emitido por Vinaza} = 0,98 \frac{Ton CO2 - eq}{ha}$$

#### 8.1.4.2. Estimación Dióxido de Carbono

Para el caso del Dióxido de Carbono, se calculan las emisiones de C por aplicaciones de Urea según lo planteado por el modelo matemático del IPCC, por tal motivo no se tienen presentes los fertilizantes orgánicos. Cabe resaltar que para la Urea se asume el contenido de C como la totalidad de la aplicación, por lo que la cantidad de Dióxido de Carbono en la Urea es el mismo valor teórico estimado en la labor de fertilización.

$$CO2 \text{ Emitido por Urea} = \text{Estimación teórica de } CO2$$

$$CO2 \text{ Emitido por Urea} = 0,33 \text{ Ton } CO2 - eq$$

#### 8.1.5. Estimación Huella de Carbono

Para el cálculo de la huella de carbono se tiene en cuenta tanto las emisiones teóricas de las fuentes móviles (provenientes de la combustión) como las de cada fertilizante, esto con el fin de medir el impacto ambiental en cuanto a GEI, en términos de toneladas de Dióxido de Carbono equivalente, presente en la labor de fertilización.

$$Huella \text{ de Carbono} = \text{Emisiones fuentes moviles} + \sum \text{Emisiones fertilizantes}$$

$$Huella \text{ de Carbono} = (0,0433 + (1,47 + 0,33)) \text{ Ton } CO_2 - eq$$

$$Huella \text{ de Carbono} = 1,84 \text{ Ton } CO_2 - eq$$

## 9. ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 9.1. TIPO DE SUELO

El tipo de suelo sobre el cual se siembra la caña corresponde a la categoría de arenosos, que comprenden a los que están compuestos por más del 70% de arena, y menos del 8% de arcilla, cualidad que evita la compactación del suelo por la aplicación de sustancias líquidas, ya sean fertilizantes o herbicidas.

El tiempo y aplicación de fertilizantes se ve afectado por el tipo de suelo. Existen dos propiedades importantes que determinan la frecuencia y momento de aplicación:

**1. Capacidad de intercambio catiónico (CIC):** parámetro que mide la capacidad de retención y almacenamiento de elementos de carga positiva del suelo.

Los suelos con alta CIC requieren menor frecuencia de aplicación de fertilizantes y como resultado una mayor dosis en cada aplicación. Por el contrario, en suelos de baja CIC, es necesario el fraccionamiento en múltiples aplicaciones y así evitar pérdida de nutrientes.

**2. Textura del suelo:** esta se encuentra fuertemente relacionada con la CIC. Los suelos *arenosos* suelen tener baja CIC, mientras que los *arcillosos* tienen mayor.

La textura del suelo se refiere al tamaño de las partículas de este. Los suelos arenosos pueden retener menos agua que los suelos de textura fina. La frecuencia de riego suele ser mayor en los suelos arenosos, ya que la lixiviación de nutrientes es más fuerte. Por lo tanto, es necesario fraccionar la aplicación de fertilizantes en los suelos de textura arenosa. (SMART, Fertilización inteligente)

Teniendo en cuenta dichas propiedades en el suelo a tratar, el proceso de fertilización se basó en la aplicación de los fertilizantes, en las fechas y dosificaciones planteadas anteriormente

### 9.2. FUENTES DE GEI

Para la labor de fertilización, fueron identificadas dos fuentes de GEI. La primera hace referencia a los fertilizantes (orgánicos y sintéticos) aplicados en el suelo; y la segunda a la combustión procedente de la maquinaria empleada. (Tabla 13)



**Tabla 13:** Identificación de fuentes de GEI

<b>Fuentes de GEI</b>		
<b>Fertilizantes</b>		<b>Maquinaria</b>
<b>Orgánicos</b>	<b>Sintéticos</b>	
Vinaza	Urea	Combustión – Tractor John Deere – 7400
Compost		

Fuente: Elaboración Propia

### **9.3. EMISIONES PROVENIENTES DE FUENTES MÓVILES**

Las emisiones de GEI provenientes de las fuentes móviles están relacionadas con las aplicaciones de fertilizantes, debido a que hace referencia a la utilización de maquinaria y consumo de combustible en dicha labor.

Teniendo en cuenta que se realizó un muestreo como base para la estimación de GEI, el valor obtenido corresponde a 0,01082 Ton de CO<sub>2</sub> el cual al ser llevado a términos de CO<sub>2</sub> equivalente, mantiene el valor debido a que el potencial de calentamiento del CO<sub>2</sub> es 1.

Al considerar las cuatro aplicaciones presentes en la labor de fertilización, la cantidad total de emisiones provenientes de fuentes móviles es de 0,043 Ton CO<sub>2</sub> – eq, el cual representa aproximadamente 1,46% de la Huella de Carbono total.

Por otro lado, a partir de las medición experimental, se puede evidenciar que las emisiones de CO<sub>2</sub> presentan un comportamiento estable, es decir sin tendencia alguna, donde se mantiene en un rango de  $4,46 \times 10^{-07}$  y  $5,22 \times 10^{-07}$  (Tabla 14)

Además, se muestra que el valor promedio de las muestras con un coeficiente de variación del 4% que indica poca variabilidad entre los datos y la media.

**Tabla 14:** Emisiones de fuentes móviles

Variable	Muestras de CO2 (ppm/ha)	Niveles de emisión en Kg/m3	Ton CO2- eq/m3
Max	344	0,000521931	5,22E-07
Min	294	0,000446069	4,46E-07
Promedio	319,4666667	0,000484708	4,85E-07
Desviación	14,24238233	2,16091E-05	2,16E-08
Coef. Variación	0,044581748	0,044581748	4,46E-05

Fuente: Elaboración Propia

A pesar de que se podría considerar como un valor pequeño, se debe tener presente que solo se está tomando en cuenta el recorrido de un solo tractor en un corto periodo de tiempo.

El consumo de combustibles móviles supone cantidades de problemas aparte de las emisiones de GEI, pues es una fuente de energía no renovable y la tendencia al aumento de consumo es constante. (Tabla 15)

**Tabla 15:** Tasa de crecimiento anual de fuentes de energía - Sector industrial

FUENTE	2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021-2025
Electricidad	3.5%	3.0%	3.1%	3.5%
Gas Natural	2.6%	2.7%	2.7%	2.8%
Leña	3.2%	3.3%	2.0%	0.0%
Bagazo	2.0%	2.6%	3.2%	2.8%
Carbón	4.3%	3.9%	3.6%	3.6%
ACPM	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%
Derivados Oil	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%

Fuente UPME

Por eso se estudian los beneficios y se realizan avances de fuentes de energías renovables como el biodiesel.

*“El biodiesel tiene una ventaja ecológica, en comparación con el diésel de origen fósil, ya que reduce las emisiones de gases que provocan el efecto de invernadero. Así, por ejemplo, el uso de una tonelada de Biodiésel, evita la producción de 2.5 toneladas de dióxido de carbono (CO2) y sobre todo elimina, si se usa el biodiesel sólo en los motores, las emisiones de azufre (SO2) del diésel, evitando las lluvias ácidas; además, lo que es fundamental: es un combustible renovable y no finito como los hidrocarburos.”<sup>25</sup>*

El uso de éste tipo de combustibles, supone una alternativa de desarrollo sostenible, ya que además de ser biodegradable, su nivel de producción se ha venido incrementando considerablemente, lo que asegura su disponibilidad sin representar una fuente de contaminación mayor, siendo una opción de reemplazo de combustibles también planteada por la UPME .

*“En Colombia, la producción industrial de biodiesel inició en enero de 2008 y se optó por la utilización del aceite de palma como materia prima, dados los desarrollos alcanzados en ese sector. En este sentido, Colombia tiene una posición privilegiada frente a muchos otros países por ser el mayor productor de aceite de palma en Latinoamérica y el quinto en el mundo. El aceite de palma es uno de los principales aceites vegetales y ha llegado a convertirse en el de mayor producción a nivel mundial.”<sup>26</sup>*

Comparativamente, los precios de los combustibles fijados por el MME (Ministerio de minas y energías) entre el diesel y el biodiesel no son tan variables. En seguida se presentan ambos precios para el mes de junio del 2014

---

<sup>25</sup> (Comisión Nacional para el ahorro de energía, 2007)

<sup>26</sup> (Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, 2009)

**Precio biodiesel:**

Biodiesel Vigencia:

De: **01/07/2014** A: **31/07/2014**

Resolución:

Ministerio de Minas y Energía de Colombia, Resolución 90673 del 26 de Junio de 2014

- **Precio galón:\$8.279,01**
- Precio litro:\$2.187,32 (USD 1,17/Lt)

Fuente federación nacional de biocombustibles de Colombia

**Precio diesel:**

**Tabla 16:** Precio combustible en Colombia

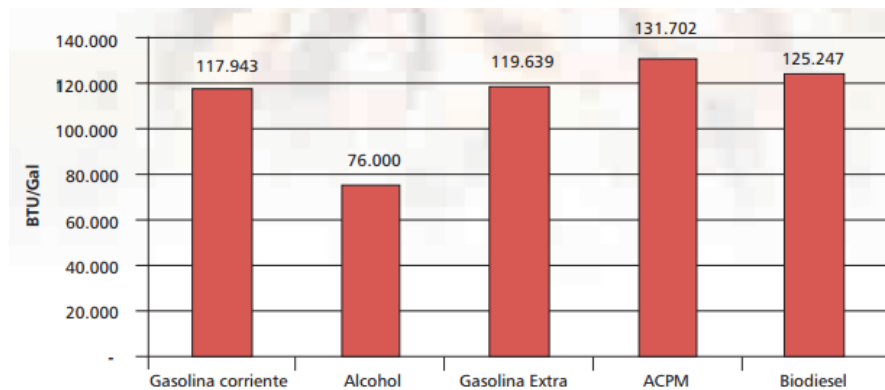
<b>Ciudad</b>	<b>Gasolina</b> \$/galón	<b>ACPM</b> \$/galón
Bogotá	8.569,27	8.425,53
Cartagena	8.361,61	8.210,09
Barranquilla	8.400,93	8.236,80
Santa Marta	8.500,93	8.336,80
Montería	8.611,61	8.460,09
Sincelejo	8.561,61	8.410,09
Villavicencio	8.669,27	8.525,53
Pasto	5.796,02	5.985,14
Tunja	8.703,27	8.559,53
Bucaramanga	8.394,32	8.282,02
Medellín	8.518,04	8.464,90
<b>Cali</b>	<b>8.570,08</b>	<b>8.549,12</b>
Pereira	8.544,30	8.507,47
Manizales	8.545,34	8.499,84
Armenia	8.604,30	8.607,47
Ibagué	8.507,09	8.455,18
Neiva	8.595,40	8.520,79

Fuente: UPME

Al hacer la comparación entre el precio por galón general para el país del biodiesel, se observa que es más económico que el precio por galón del diesel o ACPM para la ciudad de Cali, ciudad que se toma como referencia por la ubicación del ingenio. Esto se convierte en otro aspecto favorable, pues la reducción de costos es un factor que siempre tienen en cuenta las empresas

Por otro lado, la fuerza entregada a los vehículos por parte de biocombustibles, representada en poder calorífico, es menor. La potencia del biodiesel en referencia a otros combustibles comúnmente utilizados se aprecia en el siguiente gráfico:

**Gráfico 1:** Poder calorífico combustibles líquidos y biocombustibles



Fuente UPME

Partiendo de la gráfica, el poder calorífico del biodiesel no es representativamente inferior al del diesel, y es mayor al de la gasolina corriente y extra. Aunque puede haber pérdida de potencia en los vehículos, es un aspecto que no tiene que ver con el foco del ingenio y el hecho de implementar biodiesel en la maquinaria, puede ser un valor agregado competitivamente hablando.

#### 9.4. EMISIONES DE GEI

En cuanto a emisión de gases, se tiene que en niveles de concentración de ppm, es el CO<sub>2</sub> el que mayor presencia tiene por gran diferencia según los resultados del flujo de gases (Anexo 2), es por esto que experimentalmente es el que representa la mayor fuente de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente; pero teóricamente, es decir, en el desarrollo de las ecuaciones, es el Óxido Nitroso el que mayor aporte tiene.

Ya que en el desarrollo de ecuaciones de huella de carbono se ignora la presencia de GEI procedentes de otras fuentes independientes a fertilizantes, y el N<sub>2</sub>O

proviene específicamente de uso de fertilizantes a diferencia del CO<sub>2</sub>, es el primero el que mayor impacto tiene en la huella de carbono.

En la tabla 17 se presentan los resultados obtenidos respecto a emisiones directas de Ton de CO<sub>2</sub> equivalente.

El CH<sub>4</sub> al ser calculado con base en el CO<sub>2</sub>, como se explicó anteriormente, tiene el mismo valor que éste. El N<sub>2</sub>O con una cantidad de 1,46 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, es el gas que mayores emisiones presenta y así mismo, el más contaminante debido a su alto potencial de calentamiento que supera 298 veces al del CO<sub>2</sub>.

**Tabla 17:** Emisiones directas de GEI en Ton de CO<sub>2</sub> equivalente por fertilizantes por HA

GEI	Emisiones directas en Ton de CO <sub>2</sub> equivalente	Porcentaje
N <sub>2</sub> O	1.46	69%
CO <sub>2</sub>	0.33	16%
CH <sub>4</sub>	0.33	16%
<b>Total</b>	<b>2.12</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración Propia

Es importante resaltar que las emisiones obtenidas de forma experimental por si solas no pueden dar un valor exacto de huella, ni identificar diferencias o comportamientos específicos para cada fertilizante ya que, por cuestiones logísticas del ingenio, las visitas programadas no pudieron ser consecutivas a cada una de las aplicaciones, generándose mezcla de fertilizantes en el momento de tomar los muestreos. Sin embargo dichas emisiones permiten evidenciar tendencias que complementan los valores obtenidos teóricamente y que, a diferencia de estos, permiten tener presente la acumulación de fertilizantes en el terreno y el comportamiento de los gases a través del tiempo.

Para el análisis de los resultados obtenidos por el CIAT de las tablas presentes en el anexo 2, se han resumido las emisiones de los GEI en términos de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq para establecer su comportamiento en el transcurso de las tomas, muestreos y según las aplicaciones realizadas de fertilizantes. En dicho anexo se puede evidenciar las emisiones en Ton de CO<sub>2</sub>-eq que representa cada GEI, al igual que la cantidad total sin discriminar el tipo de gas.

En el análisis de gráficos se ha omitido el muestreo dos debido a que presenta datos atípicos en comparación con el resto de muestreos, viéndose reflejado en el incremento significativo de dichos datos. Esto se debe a un problema metodológico correspondiente al CIAT el cual, por cuestiones de tiempo, no se pudo re procesar.

En la tabla 18 se plasman los niveles de emisión en Ton de CO<sub>2</sub>-eq de todos los gases por cada cámara, separados por toma y número de muestreo. Y seguido a esto el gráfico que refleja su comportamiento a través del tiempo.

Cada cuatros datos representa una cámara en el flujo de emisiones. Por otro lado, teniendo en cuenta el cronograma de aplicaciones de fertilizantes, el muestreo 1 presenta presencia de fertilizante orgánico y sintético, mientras que los muestreos 3 y 4 únicamente sintético.

**Tabla 18:** Emisiones de GEI en Ton de CO<sub>2</sub> equivalentes

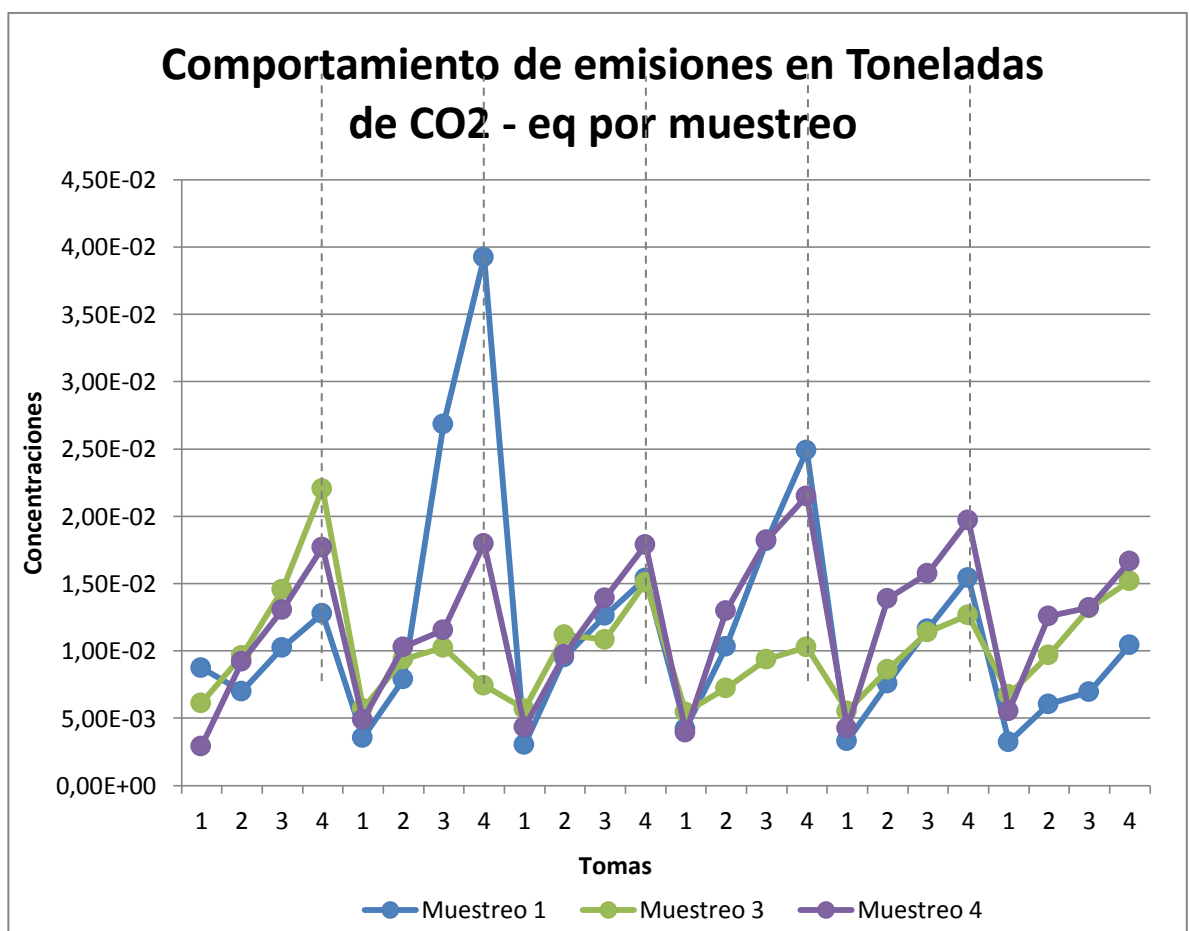
Cámara	Toma	Ton CO <sub>2</sub> – eq			
		Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4
1	1	8,75E-03	5,51E-03	6,14E-03	2,93E-03
	2	6,98E-03	3,43E-02	9,64E-03	9,23E-03
	3	1,02E-02	6,88E-02	1,46E-02	1,31E-02
	4	1,28E-02	1,00E-01	2,21E-02	1,77E-02
2	1	3,56E-03	4,99E-03	5,73E-03	4,90E-03
	2	7,91E-03	1,80E-02	9,38E-03	1,03E-02
	3	2,68E-02	3,36E-02	1,02E-02	1,15E-02
	4	3,93E-02	4,58E-02	7,42E-03	1,80E-02
3	1	3,04E-03	6,31E-03	5,70E-03	4,34E-03
	2	9,52E-03	2,93E-02	1,12E-02	9,71E-03
	3	1,26E-02	5,09E-02	1,08E-02	1,39E-02
	4	1,54E-02	8,25E-02	1,51E-02	1,79E-02
4	1	4,20E-03	7,50E-03	5,46E-03	3,94E-03
	2	1,03E-02	1,10E-02	7,22E-03	1,30E-02
	3	1,82E-02	1,73E-02	9,38E-03	1,83E-02
	4	2,49E-02	2,67E-02	1,03E-02	2,15E-02
5	1	3,32E-03	7,82E-03	5,55E-03	4,25E-03
	2	7,59E-03	5,15E-02	8,62E-03	1,39E-02
	3	1,16E-02	9,05E-02	1,14E-02	1,57E-02
	4	1,54E-02	1,51E-01	1,27E-02	1,97E-02
6	1	3,22E-03	6,52E-03	6,77E-03	5,53E-03
	2	6,06E-03	3,46E-02	9,69E-03	1,26E-02
	3	6,94E-03	7,45E-02	1,32E-02	1,32E-02
	4	1,05E-02	9,40E-02	1,52E-02	1,67E-02

Fuente: CIAT, 2014

En el gráfico 2 se puede observar que, en general, con el paso del tiempo los tres muestreos tienden a incrementar la concentración de emisiones en cada una de las cámaras. Sin embargo cada comportamiento se refleja de forma independiente.

Se ha omitido el muestreo dos por sus altas concentraciones atípicas que impiden ver el comportamiento de los gases de los otros muestreos.

**Gráfico 2:** Comportamiento de emisiones de GEI en Toneladas de Dióxido de Carbono equivalentes en los muestreos 1, 3 y 4



Fuente: Elaboración Propia



## 9.5. CONTRIBUCIÓN DE GEI POR APLICACIÓN DE FERTILIZANTES

De acuerdo a los cálculos presentados en la tabla 19, se puede observar la cantidad en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente emitida por cada fertilizante y el aporte que representa cada gas. Al establecer una comparación de impacto nocivo por fertilizantes, con un porcentaje de 70.71% de las emisiones totales provenientes de las aplicaciones, la Urea es la que mayor huella de carbono presenta por su alto contenido de Nitrógeno y por sus emisiones directas de CO<sub>2</sub> con un valor de 1,29 Ton de CO<sub>2</sub>-eq, seguido por el Compost con un resultado de 0,46 Ton de CO<sub>2</sub>-eq y por último con 0,026 Ton de CO<sub>2</sub>-eq de emisiones que corresponden a la vinaza.

**Tabla 19:** Cantidad de Ton de CO<sub>2</sub>– eq emitida por cada fertilizante

Proporción de emisiones en toneladas de CO <sub>2</sub> -eq			
Fertilizantes	Vinaza	0.0266	1.44%
	Compost	0.4683	25.48%
	Urea	1.2994	70.71%
	Total	1.7942	0.9764

Fuente: Elaboración Propia

La Urea, a pesar de ser el fertilizante con menor dosis de aplicación, es el de uso más frecuente y el más contaminante en esta labor, contribuyendo con el 70,71% de la huella de carbono total, y, aún así, es uno de los fertilizantes más comercializados en la agroindustrial nacional siendo uno de los insumos básicos para fertilizar la tierra, los cuales, en Colombia, superan entre el 30 y 50% el precio mundial.<sup>27</sup>

Cabe resaltar que, a diferencia de la Urea, los fertilizantes orgánicos empleados por el ingenio son obtenidos como subproductos de sus procesos

Además, a partir de la información suministrada por el ingenio de que el tipo de suelo del área trabajada, es el más frecuente; y sabiendo que debido a la posición geográfica del Valle de Cauca el clima puede presentar cambios inesperados, la lixiviación de nutrientes es más fuerte, por lo que en algunos casos se genera la necesidad de aumentar la frecuencia de dosificaciones de fertilizantes.

Se dice que Colombia es uno de los países del mundo que más cantidad de fertilizantes usa por hectárea cultivada. De acuerdo con datos del Banco Mundial, en el país se usan 499 toneladas de fertilizantes por hectárea cultivable. De allí la

---

<sup>27</sup> (El Espectador, 2013)

importancia de identificar su impacto ambiental y así disminuirlo de la mejor forma posible, en este caso teniendo en cuenta que la Economía del Valle del Cauca está directamente ligada a la agroindustria de caña de azúcar.

A partir de los valores teóricos obtenidos de cada GEI y haciendo una clasificación de gases por fertilizante, se puede establecer cuál es el que mayor impacto tiene en la labor de fertilización, siendo este el Óxido Nitroso con un valor de 1,464 Ton de CO<sub>2</sub>-eq. Tal y como se presenta en la tabla 19

**Tabla 20:** Emisiones directas en Ton de CO<sub>2</sub> – eq de N<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> por cada fertilizante

Fertilizante	Cantidad aplicada	Contenido de N	Emisiones directas en Ton de CO <sub>2</sub> equivalente de N <sub>2</sub> O/ha	Emisiones directas en Ton de CO <sub>2</sub> equivalente de CO <sub>2</sub> /ha
Vinaza	9000 L/ha	0.63 Kg/m <sup>3</sup>	0.027	NA
Compost	10000 Kg/ha	1%	0.468	NA
Urea	450 Kg/ha	46%	0.969	0.33
			1.464	0.33

Fuente: Elaboración Propia

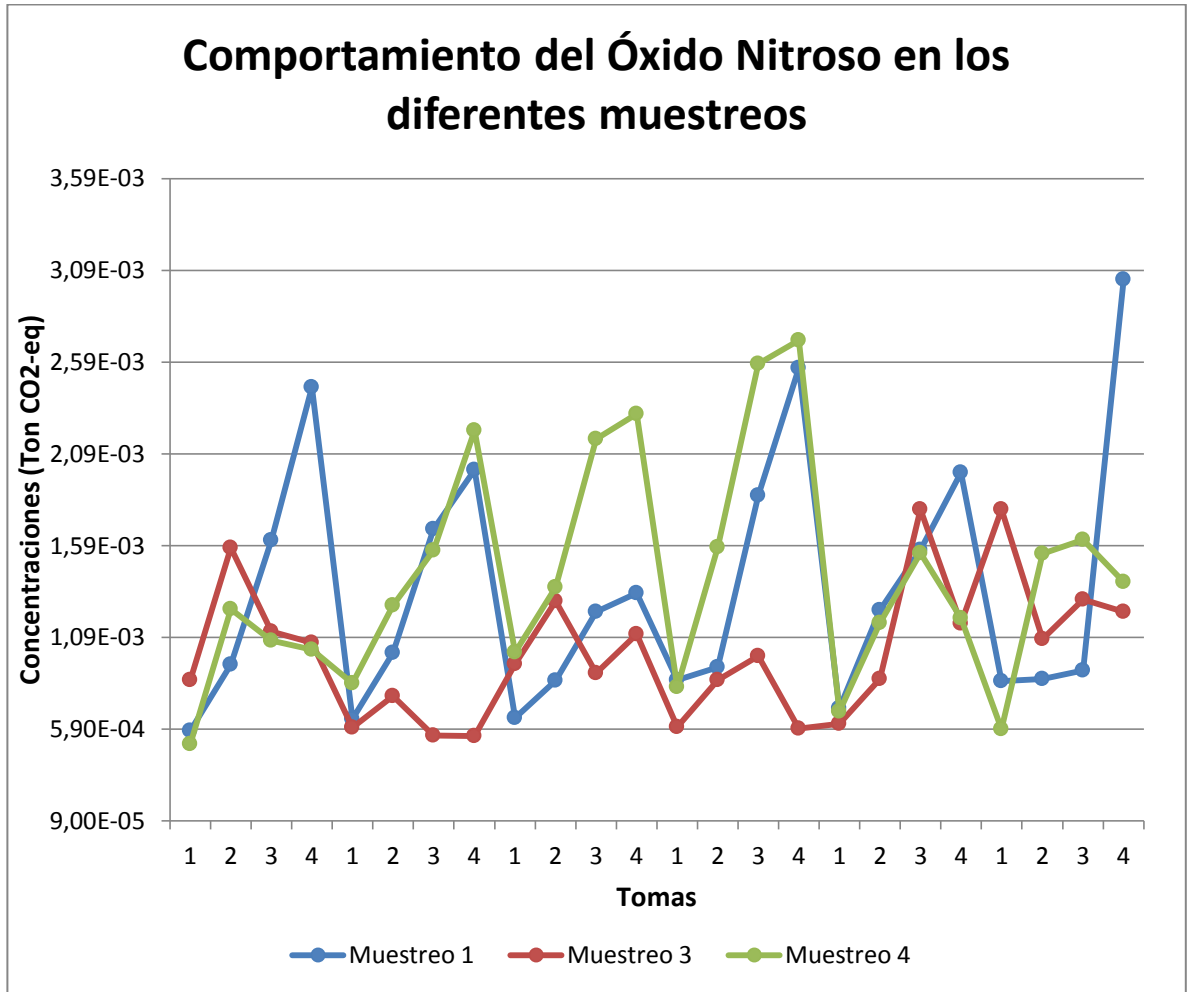
## 9.6. RELACIÓN DATOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES

Al comparar los resultados obtenidos tanto de forma experimental como teórica, se pueden evidenciar similitudes entre el comportamiento de los gases, sin embargo también se presenta diferencias debido a que el cálculo experimental considera la presencia de factores externos presentes en el ambiente. Es por ello que el Dióxido de Carbono es el gas más emitido, mientras que teóricamente es el Óxido Nitroso.

### Análisis Óxido Nitroso

Como se puede observar en el gráfico 3, los muestreos 1 y 4 presentan mayor nivel de concentración de gases que el muestreo 3. Esto se ve relacionado con la cantidad de fertilizante presente en cada uno de estos.

**Gráfico 3:** Comportamiento del N<sub>2</sub>O en los diferentes muestreos



Fuente: Elaboración Propia

Para analizar el comportamiento del Óxido Nitroso es necesario tener en cuenta la cantidad y tipo de fertilizante presente en cada muestreo, al igual que su contribución teórica de gases emitidos.

Para el muestreo 1 hubo aplicación de los tres fertilizantes, mientras que para el 3 y 4 solo hubo presencia de Urea. En la tabla 21 se muestra la cantidad aplicada y la cantidad de N<sub>2</sub>O emitido por cada fertilizante.

**Tabla 21: Aplicación y cantidad emitida de N<sub>2</sub>O por fertilizante y muestreo**

Fertilizante	Fecha de Aplicación	Muestreo 1		Muestreo 3		Muestreo 4	
		Dosis	N2O Emitido	Dosis	N2O Emitido	Dosis	N2O Emitido
Vinaza	Diciembre 5	9000 Lt	0.089	0		0	
Compost	Enero 25	1000 Kg	1.57	0		0	
Urea	Febrero 11	100 Kg	1.57	200 Kg	3.14	150 Kg	2.35
			3.229		3.14		2.35

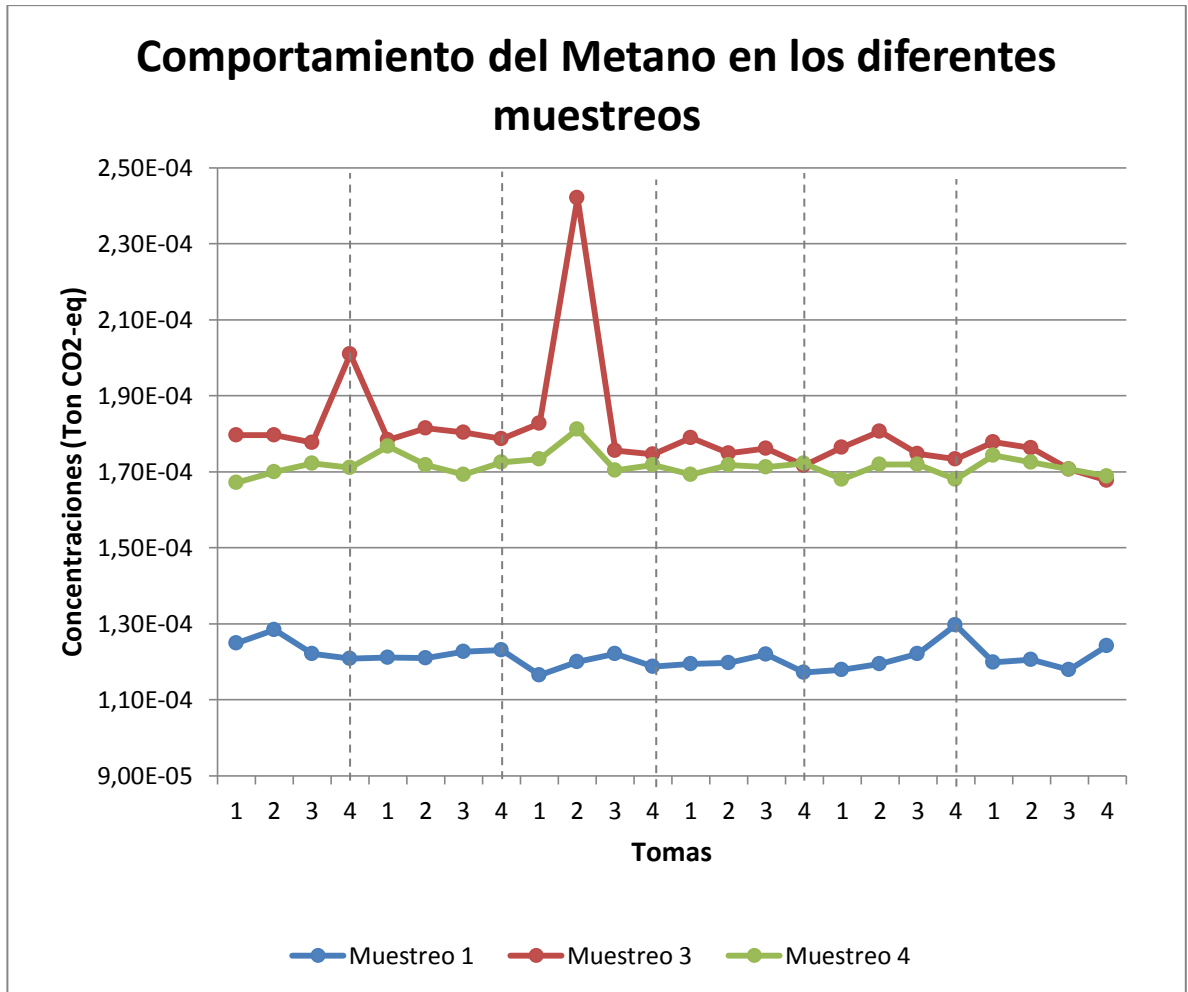
Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar, a partir de los cálculos teóricos el muestreo 3 presenta mayores emisiones que el muestreo 4, pero lo cierto es que no se está teniendo en cuenta la acumulación de fertilizante en el terreno. Es por esto que en el gráfico 3, expuesta anteriormente, el último muestreo presenta mayores niveles de concentración.

### **Análisis Metano**

El Metano en general presenta un comportamiento poco cambiante, sin que se evidencia una tendencia de aumento o disminución en el flujo, manteniéndose entre un rango de oscilación. (Gráfico 4)

**Gráfico 4:** Comportamiento de las emisiones de Metano en Toneladas de Dióxido de Carbono equivalente, en los muestreos 1, 3 y 4



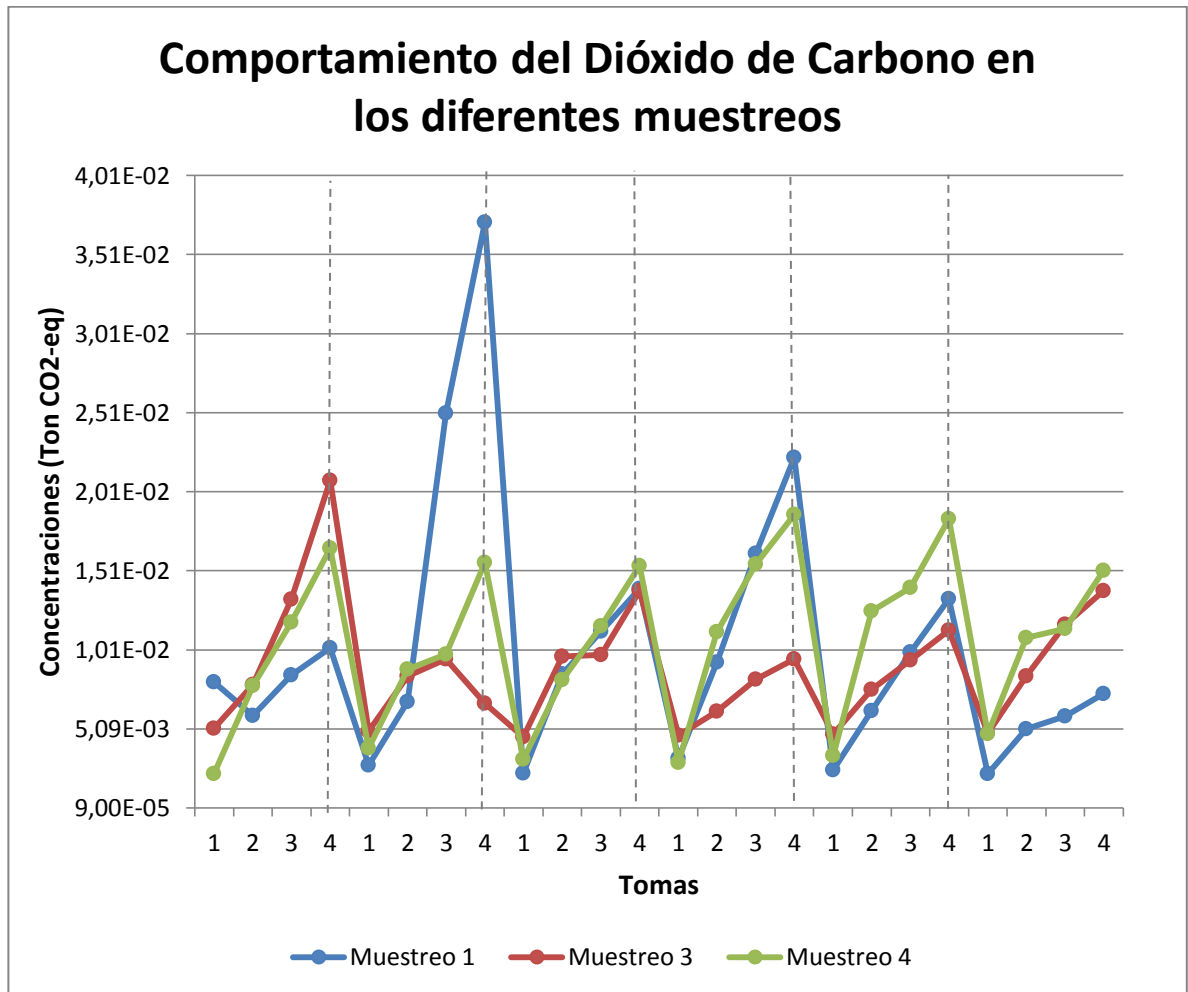
Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, se puede observar que los muestreos que presentan netamente aplicación de fertilizante sintético, es decir el 3 y 4, tienen mayor nivel de concentración en las emisiones. Esto se puede ver relacionado con la cantidad de Urea aplicado en cada muestreo, del que teóricamente se planteó una relación de emisiones, en donde a mayor presencia de Urea mayor Metano emitido.

## Análisis Dióxido de Carbono

A diferencia del Metano, el Dióxido de Carbono tiende a aumentar entre toma y toma en cada una de las cámaras y las concentraciones son similares en cada uno de los muestreos. En esta ocasión, el muestreo 1 es el que presenta los mayores niveles de concentración en las cámaras 2 y 4. Por otro lado, el muestreo 4 es el que presenta mayor similitud en su comportamiento en el transcurso del flujo de emisiones. (Gráfico 5)

**Gráfico 5:** Comportamiento de las emisiones del Dióxido de Carbono en Toneladas de Dióxido de Carbono equivalente, en los muestreos 1, 3 y 4



Fuente: Elaboración Propia

## Huella de carbono

La huella de carbono fue calculada a partir de los valores teóricos obtenidos de fuentes móviles y emisiones del suelo. En la tabla 22 se puede evidenciar el valor correspondiente para cada una.

**Tabla 22:** Proporción de emisiones de Ton de CO<sub>2</sub> - eq

Proporción de emisiones en toneladas de CO <sub>2</sub> -eq			
Fertilizantes	Vinaza	0.0266	1.44%
	Compost	0.4683	25.48%
	Urea	1.2994	70.71%
Fuentes móviles	Tractor	0.0434	2.36%
<b>Total</b>		<b>1.8376</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Elaboración Propia

La huella de carbono teórica en su totalidad, es de 1,8376 Ton de CO<sub>2</sub>-eq, de las que las emisiones por fuentes móviles representan sólo el 2,36%. Es allí donde se puede evidenciar el alto impacto que tiene la aplicación de fertilizantes, especialmente sintéticos, en la huella de carbono total al abarcar más del 90%.

La Vinaza y Compost, siendo subproductos del mismo ingenio, a pesar de presentar dosificaciones mucho más altas que la Urea, impactan en menor medida al ambiente, generando 0 emisiones de CO<sub>2</sub> y un 32% menos de N<sub>2</sub>O aproximadamente.

Se debe considerar que los cálculos presentados anteriormente, equivalen a huella de carbono de una hectárea de cultivo, que representa 0.003% de los terrenos que destina el ingenio para cultivo de caña comercial.

## 10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- A pesar de que la Urea es el fertilizante que presenta menor dosificación en las aplicaciones, es el que mayor impacto ambiental negativo tiene con un total de 1,30 toneladas de CO<sub>2</sub> eq, abarcando un 70,71% de la huella de Carbono Total
- Los fertilizantes, en comparación con las fuentes móviles, son los que aportan en mayor medida a la huella de Carbono, conformando el 97,64% de esta.
- El GEI que más se genera es el Óxido Nitroso, con un porcentaje del 69%
- La temperatura no es un factor influyente en el comportamiento de las emisiones de gases ya que, a pesar de que en el transcurso de los muestreos esta aumentaba constantemente de manera discreta, las concentraciones variaban de manera no proporcional. Esto se ve evidenciado en el comportamiento de los gases en el transcurso del tiempo, en donde no se ve una relación directa entre el incremento o disminución de las concentraciones y el aumento de temperatura.
- La utilidad y precisión de la herramienta está ligada a la calidad de la información suministrada, pese a que no se cuenta con datos nacionales y se usan valores por defecto, el resultado constituye un valor específico. Actualmente muchos consultores sólo utilizan herramientas genéricas en sus trabajos, por lo que el diseño de esta herramienta puede servir para obtener datos más certeros y tener investigaciones más confiables. El documento en Excel desarrollado, más que complemento para una herramienta ya existente, y aunque tiene valores similares en magnitudes a los experimentales, sirve como referente para futuros proyectos a realizar, cuenta con fuerte soporte teórico proveniente del IPCC y datos reales obtenidos del ingenio, y abre la posibilidad de medir la cantidad aproximada de emisión de GEI y huella de carbono generada en labores de fertilización.
- La Huella de Carbono calculada, al igual que los flujos obtenidos de muestreos, representa el impacto que tiene la labor de fertilización en una hectárea del ingenio. Además, a nivel de Huella de Carbono, una hectárea es significativa en términos de levantamiento de información para la definición y descripción de prácticas y hábitos del ingenio (equipos, tiempos, fertilizantes, dosis aplicadas, etc), las cuales no están estandarizadas y son vitales para identificar el impacto directo que se tiene como huella. Es por ello que, como recomendación, sería de gran utilidad evaluar más hectáreas con el fin de obtener un mayor peso estadístico y con ello mejores prácticas para el ingenio.



- Se puede estudiar la posibilidad de reducir y cambiar totalmente el uso de fertilizantes sintéticos y continuar con la implementación de cultivos de caña orgánica. De ésta forma se reduciría considerablemente el impacto de la huella de carbono, ya que teniendo en cuenta que en éste estudio sólo considera una hectárea, se podría llegar a tener un alcance mucho mayor dentro del ingenio y así generar un beneficio mucho más significativo en cuanto a reducción de emisiones. Así mismo, se pueden disminuir los costos en la labor de fertilización debido a que los fertilizantes orgánicos son producidos dentro del mismo ingenio con residuos de otros de sus actividades, aprovechándolos como subproductos y garantizando tener a su disposición la materia prima para sus fertilizantes.
- Al igual que la vinaza, el compost es un fertilizante ambientalmente menos impactante que los sintéticos, no sólo a corto plazo como se demuestra en los cálculos del documento de Excel, sino que al no tener componentes químicos, no se acumularan sustancias en el suelo.
- Una de las principales recomendaciones, para reducir las emisiones específicamente provenientes de las fuentes móviles, sería reemplazar el uso del combustible usado actualmente por biodiesel, un combustible que se puede obtener de aceites animales y vegetales.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- ADAME ROMERO, Aurora. Contaminación ambiental y calentamiento global. Primera edición. México D.F: Editorial Trillas, 2010, p. 91-109.
- ANDI. (s.f.). *El Cambio Climático*. Obtenido de <http://www.cambioclimatico.andi.org.br/content/gases-de-efecto-invernadero-gei>
- ASOCAÑA. (2013). Cali.
- ASOCAÑA. El sector azucarero en la actualidad. [en línea] [www.asocana.org](http://www.asocana.org). [citado en 22 de marzo de 2011].
- CENICAÑA. (2013). CC 85 - 92 ¿Variedad irremplazable? *Carta Informativa*.
- Comisión Nacional para el ahorro de energía. (2007). *Dirección de ahorro de energía del transporte*.
- El Espectador. (7 de Septiembre de 2013). Los dueños de los fertilizantes en Colombia. *El Espectador*.
- Fertiberia: Fertilizantes y productos químicos industriales*. (s.f.). Obtenido de <http://www.fertiberia.es/templates/template2det.aspx?M=280&F=132&L=133&C=805>
- Franchetti, Mathew. CARBON FOOTPRINT ANALYSIS. Boca Raton: CRC Press. 2013. P 10-15.
- Global Footprint Network, Advancing the Science of Sustainability. La Huella. Disponible en internet: [www.footprintnetwork.org](http://www.footprintnetwork.org). [actualizado en 3 de Noviembre de 2010]
- GONZÁLEZ, Carmen. Fertilización nitrogenada y sostenibilidad: contaminación ambiental frente a producción y calidad.
- GreenFacts, Facts on Health and the Environment*. (s.f.). Obtenido de <http://www.greenfacts.org/es/glosario/mno/metano.htm>
- HERRADA Julio, B. R. (2006). Obtenido de [http://corpomail.corpoica.org.co/BACFILES/BACDIGITAL/50400/s2dDE1F7477C148F07315FFBCCFFD010845\\_1.pdf](http://corpomail.corpoica.org.co/BACFILES/BACDIGITAL/50400/s2dDE1F7477C148F07315FFBCCFFD010845_1.pdf)

- Ideam. Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático: INVENTARIO NACIONAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO. Junio de 2010, p 18.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Combustión Móvil*.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (s.f.). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de <http://www.ipcc.ch/pdf/ipcc-faq/ipcc-introduction-sp.pdf>
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (s.f.). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-annex-sp.pdf>
- Inventario Nacional de Fuentes y Sumidores de Gases de Efecto Invernadero 2000-2004. En Capítulo 1: Visión general de inventario de emisiones de gases de efecto invernadero. Marzo del 2010, p20
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. (s.f.). *IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>
- IRAÑETA, Jesús. Importancia Agronómica y Medioambiental de la Fertilización. En: Agricultura, Fertilización y Medio Ambiente. Noviembre-Diciembre 2010, p 11.
- KUKLINSKI, Claudia. Medio ambiente sanidad y gestión. Barcelona: ediciones omega, S.A. 2011. Pág 55-56.
- María Angélica Arbeláez, A. E. (2010). *IMPACTO SOCIOECONÓMICO DEL SECTOR AZUCARERO COLOMBIANO EN LA ECONOMÍA NACIONAL Y REGIONAL*. Cuadernos Fededesarrollo Número 31, Consuelo Lozano - Formas Finales Ltda.
- Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética – UPME. (2009). *Biocombustibles en Colombia*. Bogotá.
- NACIONES UNIDAS. Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Anexo A. Disponible en internet: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>

OCEANA. (s.f.). OCEANA. Obtenido de <http://oceana.org/es/eu/que-hacemos/cambio-climatico-y-energias-renovables/cambio-climatico/mas-informacion/gases-de-efecto-invernadero>

PNUMA. Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono.

RAYNAUD, J. B. (1933). *The ice core record of greenhouse gases*.

REDACCIÓN ZONALOGISTICA. ¿Qué es la Huella de Carbono? En: Zonológica América. Julio-Agosto 2010, Edición 55, p. 28

## 10. ANEXOS

### Anexo 1. Información general de los muestreos

MUESTREO 1	
<b>FECHA:</b>	Diciembre 5 de 2013
<b>LUGAR:</b>	Suerte 8 - La Unión Molina En este lugar se cultiva caña tradici
<b>VARIEDAD:</b>	CC 85- 92
<b>OBSERVACIONES:</b>	Se hizo muestreo en un suelo con SOCA de caña de azúcar, sin presencia de lluvias. Las cámaras quedaron instaladas a 30 metros cada una, en dirección noroccidental.

CÁMARA	TOMA 1: 0 min		TOMA 2: 20 min		TOMA3: 40 min		TOMA 4: 60 min	
	Hora am	Temperatura °C	Hora am	Temperatura °C	Hora am	Temperatura °C	Hora am	Temperatura °C
<b>Primera</b>	9:24	28,8	9:45	33,3	10:05	33,6	10:25	33,1
<b>Segunda</b>	9:27	29,95	9:47	33,6	10:07	33,7	10:27	33,45
<b>Tercera</b>	9:29	31,1	9:49	33,9	10:10	33,8	10:31	33,8
<b>Cuarta</b>	9:31	31,45	9:52	33,95	10:13	33,6	10:35	33,75
<b>Quinta</b>	9:33	31,8	9:54	34,0	10:15	33,4	10:36	33,7
<b>Sexta</b>	9:36	31,8	9:57	34,0	10:17	33,4	10:37	33,7

MUESTREO 2	
<b>FECHA:</b>	Diciembre 9 de 2013
<b>LUGAR:</b>	Suerte 8 - La Unión Molina
<b>VARIEDAD</b> :	CC 85- 92
<b>OBSERVACIONES:</b>	<p>El jueves 5 de diciembre de 2013 se le hizo aplicación de vinaza y compost. Además se le hizo un pase de subsuelo a 30 o 40 cm de profundidad con el objetivo de airear el suelo.</p> <p>La cantidad de compost aplicado fue 10 toneladas por hectárea. La noche del viernes amanecer sábado el suelo recibió 20mm de lluvia y el día del muestreo estaba recibiendo flujo de agua de riego.</p> <p>* La cámara 4 tenía cm de agua cuando se inició el muestreo. Al final del muestreo ya no había agua</p>

CÁMARA	TOMA 1: 0 min		TOMA 2: 20 min		TOMA3: 40 min		TOMA 4: 60 min	
	Hora am	Temperatura °C	Hora am	Temperatura °C	Hora am	Temperatura °C	Hora am	Temperatura °C
<b>Primera</b>	7:54	22,5	8:16	24,1	8:37	25,6	8:58	26,6
<b>Segunda</b>	7:58	22,45	8:18	25,1	8:40	25,65	9:00	26,75
<b>Tercera</b>	8:01	22,4	8:22	26,1	8:43	25,7	9:04	26,9
<b>Cuarta</b>	8:06	22,7	8:26	26,3	8:47	26	9:07	27,55
<b>Quinta</b>	8:09	23	8:30	26,5	8:51	26,3	9:11	28,2
<b>Sexta</b>	8:12	23	8:33	26,5	8:53	26,3	9:13	28,2

<b>MUESTREO 3</b>	
<b>FECHA:</b>	Enero 25 de 2014
<b>LUGAR:</b>	Suerte 8 - La Unión Molina
<b>VARIEDAD:</b>	C85 - 92
<b>OBSERVACIONES:</b>	Fue fertilizada el 20 de Enero de 2014. No hubo presencia de lluvia y apenas se va a hacer riego. El vial de la cámara 5 se estalló en la 2da toma

CÁMARA	TOMA 1: 0 min		TOMA 2: 20 min		TOMA3: 40 min		TOMA 4: 60 min	
	Hora am	Temperatura °C	Hora am	Temperatura °C	Hora am	Temperatura °C	Hora am	Temperatura °C
<b>Primera</b>	8:56	30,1	9:16	32,6	9:37	33,1	9:57	34,5
<b>Segunda</b>	8:59	30,7	9:19	32,8	9:40	33,5	10:00	35,9
<b>Tercera</b>	9:01	31,8	9:21	31,4	9:42	31,5	10:02	34
<b>Cuarta</b>	9:04	31,4	9:24	33,4	9:44	33	10:04	35,4
<b>Quinta</b>	9:06	31	9:26	32,3	9:48	32,2	10:08	34,5
<b>Sexta</b>	9:09	29,3	9:30	33,1	9:51	33,9	10:11	37,2

<b>MUESTREO 4</b>	
<b>FECHA:</b>	Febrero 11 de 2014
<b>LUGAR:</b>	Suerte 8 - La Unión Molina
<b>VARIEDAD:</b>	CC 8E
<b>OBSERVACIONES:</b>	Muestreo de 2da aplicación realizada el 7 de Febrero. Por cuestiones logísticas, las tomas fueron realizadas en un periodo de tiempo diferente a las pasadas (cada 15 minutos) y en un horario un poco más tarde

CÁMARA	TOMA 1: 0 min		TOMA 2: 15 min		TOMA3: 30 min		TOMA 4: 45 min	
	Hora am	Temperatura °C	Hora am	Temperatura °C	Hora am	Temperatura °C	Hora am	Temperatura °C
<b>Primera</b>	11:06	34,2	11:21	36,1	11:36	35,8	11:51	36,7
<b>Segunda</b>	11:08	37,6	11:23	40,9	11:38	39,8	11:53	41,1
<b>Tercera</b>	11:10	41,6	11:25	40,1	11:40	39,2	11:55	41,1
<b>Cuarta</b>	11:13	33,3	11:28	34,2	11:43	34	11:58	35,1
<b>Quinta</b>	11:15	35,8	11:30	37,6	11:45	37,6	12:00	40,1
<b>Sexta</b>	11:16	40,9	11:31	39,8	11:46	39,7	12:02	41,5



## Anexo 2. Resultados emitidos por el CIAT

Los resultados presentados a continuación, son los datos en bruto suministrados por el CIAT. La identificación de la muestra hace referencia al número de cámara (C<sub>x</sub>) y al tiempo (T<sub>y</sub>) que debe pasar entre cada muestra, que son 20 minutos.

<b>Muestreo 1</b>			
<b>Identificación de la muestra</b>	<b>CH<sub>4</sub> (ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (ppm)</b>	<b>N<sub>2</sub>O (ppm)</b>
C1-T0	1,130	900,382	0,218
C1-T20	1,162	661,359	0,354
C1-T40	1,105	951,380	0,608
C1-T60	1,093	1142,598	0,921
C2-T0	1,096	312,313	0,242
C2-T20	1,095	759,396	0,378
C2-T40	1,110	2801,855	0,630
C2-T60	1,115	4154,327	0,752
C3-T0	1,055	253,982	0,245
C3-T20	1,086	955,944	0,321
C3-T40	1,105	1261,136	0,461
C3-T60	1,075	1559,703	0,500
C4-T0	1,081	360,934	0,322
C4-T20	1,084	1038,726	0,348
C4-T40	1,104	1812,118	0,699
C4-T60	1,061	2488,934	0,960
C5-T0	1,066	279,338	0,264
C5-T20	1,081	696,976	0,464
C5-T40	1,105	1113,968	0,588
C5-T60	1,174	1491,318	0,746
C6-T0	1,085	252,078	0,319
C6-T20	1,092	568,080	0,324
C6-T40	1,067	661,132	0,342
C6-T60	1,040	816,179	0,460

<b>Muestreo 2</b>			
<b>Identificación de la muestra</b>	<b>CH<sub>4</sub> (ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (ppm)</b>	<b>N<sub>2</sub>O (ppm)</b>
C1-T0	1,170	452,450	0,504
C1-T20	1,181	3707,062	0,405
C1-T40	1,207	7546,838	0,441
C1-T60	1,224	11076,689	0,473
C2-T0	1,205	402,307	0,473
C2-T20	1,299	1782,434	0,738
C2-T40	1,401	3340,266	1,347
C2-T60	1,544	4656,804	1,520
C3-T0	1,215	553,646	0,460
C3-T20	1,253	3013,250	0,829
C3-T40	1,275	5334,653	1,170
C3-T60	1,318	8758,570	1,525
C4-T0	1,140	676,286	0,501
C4-T20	1,177	1072,047	0,483
C4-T40	1,262	1773,100	0,476
C4-T60	1,439	2819,991	0,493
C5-T0	1,202	619,264	0,808
C5-T20	1,202	4693,522	3,529
C5-T40	1,207	8371,373	5,846
C5-T60	1,189	14232,974	8,752
C6-T0	1,194	617,721	0,326
C6-T20	1,193	3694,891	0,549
C6-T40	1,133	8062,898	0,851
C6-T60	1,125	10165,049	1,141

<b>Muestreo 3</b>			
<b>Identificación de la muestra</b>	<b>Concentraciones (ppm)</b>		
	<b>CH4</b>	<b>CO2</b>	<b>N2O</b>
C1-T0	1,63	570,63	0,32
C1-T20	1,63	881,83	0,59
C1-T40	1,61	1484,43	0,42
C1-T60	1,82	2326,18	0,40
C2-T0	1,61	553,83	0,22
C2-T20	1,64	943,42	0,29
C2-T40	1,63	1064,07	0,21
C2-T60	1,62	748,76	0,21
C3-T0	1,65	511,20	0,35
C3-T20	2,19	1082,28	0,48
C3-T40	1,59	1092,68	0,34
C3-T60	1,58	1545,55	0,42
C4-T0	1,62	523,46	0,23
C4-T20	1,58	692,84	0,32
C4-T40	1,59	919,53	0,37
C4-T60	1,55	1063,29	0,22
C5-T0	1,60	531,86	0,23
C5-T20	1,63	847,39	0,32
C5-T40	1,58	1056,47	0,67
C5-T60	1,57	1268,64	0,44
C6-T0	1,61	537,33	0,67
C6-T20	1,60	943,69	0,41
C6-T40	1,54	1308,49	0,49
C6-T60	1,52	1544,96	0,46

<b>Muestreo 4</b>			
<b>Identificación de la muestra</b>	<b>Concentraciones (ppm)</b>		
	<b>CH4</b>	<b>CO2</b>	<b>N2O</b>
C1-T0	1,51	252,58	0,19
C1-T1	1,54	874,06	0,47
C1-T2	1,56	1323,10	0,40
C1-T3	1,55	1848,28	0,38
C2-T0	1,60	434,62	0,32
C2-T1	1,56	990,65	0,48
C2-T2	1,53	1097,45	0,59
C2-T3	1,56	1745,90	0,83
C3-T0	1,57	353,27	0,38
C3-T1	1,64	914,22	0,51
C3-T2	1,54	1298,13	0,82
C3-T3	1,55	1724,66	0,87
C4-T0	1,53	330,28	0,31
C4-T1	1,56	1255,27	0,59
C4-T2	1,55	1736,17	0,97
C4-T3	1,56	2084,70	1,02
C5-T0	1,52	380,32	0,26
C5-T1	1,56	1403,24	0,44
C5-T2	1,56	1569,20	0,58
C5-T3	1,52	2054,11	0,45
C6-T0	1,58	533,37	0,22
C6-T1	1,56	1214,89	0,58
C6-T2	1,55	1279,32	0,61
C6-T3	1,53	1690,70	0,52

**Anexo 3.** Resultado de muestreo de emisión de fuente móvil

<b># Toma</b>	<b>Muestras de CO2 (ppm/ha)</b>	<b>Niveles de emisión en Kg/m3</b>	<b>Ton CO2-eq</b>
1	333	0,000505241	5,05E-07
2	339	0,000514345	5,14E-07
3	335	0,000508276	5,08E-07
4	331	0,000502207	5,02E-07
5	323	0,000490069	4,90E-07
6	315	0,000477931	4,78E-07
7	324	0,000491586	4,92E-07
8	318	0,000482483	4,82E-07
9	302	0,000458207	4,58E-07
10	301	0,00045669	4,57E-07
11	298	0,000452138	4,52E-07
12	300	0,000455172	4,55E-07
13	300	0,000455172	4,55E-07
14	305	0,000462759	4,63E-07
15	311	0,000471862	4,72E-07
16	316	0,000479448	4,79E-07
17	317	0,000480966	4,81E-07
18	323	0,000490069	4,90E-07
19	340	0,000515862	5,16E-07
20	336	0,000509793	5,10E-07
21	344	0,000521931	5,22E-07
22	338	0,000512828	5,13E-07
23	338	0,000512828	5,13E-07
24	324	0,000491586	4,92E-07
25	332	0,000503724	5,04E-07
26	322	0,000488552	4,89E-07
27	318	0,000482483	4,82E-07
28	320	0,000485517	4,86E-07
29	300	0,000455172	4,55E-07
30	310	0,000470345	4,70E-07

<b>31</b>	315	0,000477931	4,78E-07
<b>32</b>	310	0,000470345	4,70E-07
<b>33</b>	328	0,000497655	4,98E-07
<b>34</b>	333	0,000505241	5,05E-07
<b>35</b>	308	0,00046731	4,67E-07
<b>36</b>	310	0,000470345	4,70E-07
<b>37</b>	308	0,00046731	4,67E-07
<b>38</b>	317	0,000480966	4,81E-07
<b>39</b>	338	0,000512828	5,13E-07
<b>40</b>	339	0,000514345	5,14E-07
<b>41</b>	339	0,000514345	5,14E-07
<b>42</b>	319	0,000484	4,84E-07
<b>43</b>	308	0,00046731	4,67E-07
<b>44</b>	297	0,000450621	4,51E-07
<b>45</b>	294	0,000446069	4,46E-07
<b>Max</b>	344	0,000521931	5,22E-07
<b>Min</b>	294	0,000446069	4,46E-07
<b>Promedio</b>	319,4666667	0,000484708	4,85E-07
<b>Desviación</b>	14,24238233	2,16091E-05	2,16E-08
<b>Coef. Variación</b>	0,044581748	0,044581748	4,46E-05

<b>Proceso</b>	Fertilización
<b>Labor</b>	Fertilización química. Encallado al 2 x 1 en soca (2 surcos aplicados por 1 sin aplicar)
<b>Maquinaria utilizada</b>	Highcross-John deere 7400 - modelo 1994
<b>Mezcla aplicada (Kg/ha)</b>	Urea: 17,54
	Microzinc: 0,877
	Borogran: 0,877
<b>Combustible consumido (Gal)</b>	1,05
<b>Tiempo de ejecución</b>	22,02 min
<b>% Humedad relativa</b>	79,9
<b>Temperatura °C</b>	26,5
<b>Nivel Promedio de Emisiones PPM/Ha</b>	319
<b>Medida</b>	(ppm/ha)

**Anexo 4** Ilustraciones de la metodología

**Ilustración 11:** Tractor John Deere - 7400



Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 12:** Instalación base de cámara



Fuente: Elaboración Propia



**Ilustración 13:** Parte superior cámara



Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 14:** Cámara sellada e implementos de muestreo



Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 15:** Extracción de muestra



Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 17:** Terreno destinado al cultivo de caña de azúcar comercial



Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 16:** Tractor empleado en la labor de fertilización de cultivo de caña de azúcar



Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 18:** Terreno asignado - Suerte 8



Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 19:** Montaje de cámara e implementos para recolección de muestras



Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 20:** Terreno cubierto de Vinaza



Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 21:** Cámara con presencia de hierba y nacimiento de caña



Fuente: Elaboración Propia



**Ilustración 22:** Toma de emisiones de gases emitidos por fuentes móviles



Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 23:** Preparación del tractor con mezcla de fertilizante



Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 24:** Cámara con alto crecimiento de hierba al interior



Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 25:** Suerte 8, en el último día de muestreo



Fuente: Elaboración Propia