

**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO PARA LOS PROCESOS DE
SUBSOLADO, RASTRO ARADO, SURCADO, APLICACIÓN DE
FERTILIZACIÓN QUÍMICA Y DE HERBICIDAS EN UNA HECTÁREA DE
CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR.**

**JORGE TAFUR
ANGÉLICA GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
NOVIEMBRE DE 2012**

**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO PARA LOS PROCESOS DE
SUBSOLADO, RASTRO ARADO, SURCADO, APLICACIÓN DE
FERTILIZACIÓN QUÍMICA Y DE HERBICIDAS EN UNA HECTÁREA DE
CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR.**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO
DE INGENIERIA INDUSTRIAL**

**TUTORA TEMÁTICA
BEATRIZ SIERRA**

**UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
NOVIEMBRE DE 2012**

Tabla de contenido

Lista de Tablas	6
Lista de Ilustraciones.....	6
Lista de Ecuaciones	7
Lista de Figuras.....	7
Lista de Imágenes	7
INTRODUCCIÓN	9
1. HUELLA DE CARBONO.....	11
1.1 TITULO DEL PROYECTO.....	11
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.2.1 Análisis del problema	12
1.4 DELIMITACION Y ALCANCE.....	14
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo General	15
2.2 Objetivo Proyecto	15
2.3 Objetivos Específicos	15
3. MARCO DE REFERENCIA.....	16
3.1 ANTECEDENTES.....	16
3.1.1 Origen de la huella de carbono	16
3.1.3. Empresa Azucarera con certificaciones ambientales.....	17
3.2 MARCO TEORICO	18
3.2.1 Huella Ecológica.....	18
3.2.2 Efecto invernadero	21
3.2.3 Gases efecto invernadero	21
3.2.4 Cambio climático	22
3.2.5 Huella de Carbono	23
3.2.6 Directrices del IPCC 2006	25
3.2.6.1 Definiciones básicas del IPCC.....	26
3.2.7 PAS 2050	27
3.2.8 ISO 14064	29
3.2.9 Proceso productivo de cultivo de caña de azúcar	29
3.3 APORTE INTELECTUAL.....	33

4	ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO.....	34
4.1	Recursos disponibles.....	34
4.2	Equipo de Investigadores	36
5	DESARROLLO METODOLÓGICO.....	38
5.1	PLANEACIÓN Y EJECUCIÓN.....	38
5.1.1	Entender la delimitación del problema.	38
5.2	ESTRATEGIA METODOLÓGICA.....	26
5.3	METODOLOGÍA DE MEDICIÓN.	28
5.3.1	Recopilación de datos.	28
5.4	ELEMENTOS GENÉRICOS DEL PROGRAMA DE MEDICIÓN DE ACUERDO A LAS DIRECTRICES DEL IPCC.....	28
5.4.1	Objetivo de medición:.....	28
5.4.2	Protocolo de metodología:	29
5.4.2	Plan de medición:.....	29
5.4.3	Factores de emisión:	30
5.4.4	Incertidumbre:	31
5.4.5	Metodología e identificación de categorías principales:	28
5.5	FACTORES DE EMISION	29
5.5.1	USO DE TIERRA	30
5.5.2	COMBUSTION.....	30
5.5.3	Combustión Móvil:.....	32
	Fórmulas para combustión	34
	Cálculo de emisiones de CO ₂ :	34
5.5.4	CALCULO DE EMISIONES DE CH ₄ Y N ₂ O:.....	34
5.6	HERBICIDAS Y FERTILIZANTES	35
	Emisiones de N ₂ O de suelos gestionados:	35
	Emisiones directas de N ₂ O	36
	Fertilizante sintético aplicado (FSN)	36
	Fertilizantes de N orgánico aplicados (FON)	36
5.4.5	FACTOR DE EMISIÓN N ₂ O	37
5.4.6	Emisiones de CO ₂ de fertilización con urea.....	38
5.7	Metodología Para la construcción de herramienta.....	39
5.7.1	Factores:	39

5.8	Cálculos:.....	40
5.8.1	Combustión:.....	40
5.8.2	Fertilizantes:.....	41
5.8.2.1	Urea:.....	41
5.8.2.2	Compost:.....	42
5.8.3	Herbicidas:.....	43
5.8.3.1	Urea:.....	43
6	DESARROLLO DEL PROYECTO.....	46
6.1	Procesos de preparación de Suelo:.....	46
6.1.1	Subsolada.....	46
6.1.2	Rastro-Arado.....	47
6.1.3	Surcado.....	49
6.1.4	Riego:.....	52
6.1.5	Corte para siembra:.....	53
6.1.6	Aplicación de Fertilizante:.....	55
	Urea.....	56
	Compost.....	56
6.1.7	Aplicación de Herbicidas para control de malezas:.....	56
6.2	Resultados Herramienta.....	58
6.3	Análisis de resultados.....	60
6.3.1	Emisiones de CO ₂ :.....	62
6.3.2	Emisión de CH ₄	62
6.3.3	Emisiones de N ₂ O.....	62
6.3.4	Emisiones totales en la combustión.....	62
6.3.5	Emisiones por uso de fertilizantes y herbicidas.....	63
6.3.6	Análisis resultados frente al sector.....	66
6.3.7	Comparación Colombia frente al mundo.....	67
	CONCLUSIONES.....	70
	RECOMENDACIONES.....	72
	BIBLIOGRAFÍA.....	73

Lista de Tablas

Tabla 1. Porcentaje de gases efecto invernadero en la atmosfera _____	22
Tabla 2: Potencial de calentamiento global en unidades de CO2 equivalente para los diferentes GEI _____	27
Tabla 4: Procesos de estudio para la estimación de la caña de azúcar _____	39
Tabla 10 Plan de recolección de datos de la actividad _____	30
Tabla 11 cálculo de incertidumbre método _____	28
Tabla 12 Nivel sugerido de agregación de análisis para el método 1. _____	29
Tabla 13 Valor calórico neto para análisis nivel 1 según el IPCC. _____	32
Tabla 14 Valores por Defecto del Contenido de Carbono. _____	33
Tabla 15 Factores de emisión de CO2 por defecto para la combustión _____	33
Tabla 16 Factores de emisión por defecto para las fuentes y maquinaria todo terreno _____	34
Tabla 17 Factores de Emisión de N2O _____	37
Tabla 18 Conversión de combustible a unidades equivalente de CO2 _____	41
Tabla 19 Conversión fertilización con urea a unidades equivalente de CO2 _____	42
Tabla 20 Conversión fertilización con Compost a unidades equivalente de CO2 _____	43
Tabla 21 Conversión uso de herbicidas con urea a unidades equivalente de CO2 _____	44
Tabla 22 tabla que resume cada uno de los proceso y sus respectivas emisiones _____	45
Tabla 5 Datos de medición Subsolada _____	47
Tabla 6 Datos Medición Rastro arado _____	48
Tabla 7 Datos de Medición Surcada _____	51
Tabla 8: Datos Fertilizante _____	55
Tabla 9 Composición del Fertilizante _____	57
Tabla 23 Resultados _____	59
Tabla 24 Resumen de emisiones para cada labor en cuanto a emisiones por consumo de combustible _____	61
Tabla 25 Resumen de Emisiones de CO2 equivalente en porcentaje por cada labor _____	61
Tabla 26 Emisiones de CO2 Equivalente en el uso de fertilizantes y herbicidas _____	64
Tabla 27 Total de emisiones CO2 equivalente _____	65

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 Delimitación del Terreno _____	39
Ilustración 6 Estructura General de un análisis de Incertidumbre genérico _____	31
Ilustración 2 Recorrido Labor Subsolado _____	47
Ilustración 3: Recorrido Labor Rastro-arado _____	49
Ilustración 4 Recorrido Surcada _____	51
Ilustración 5 Recorrido del Tractor Aplicación de Herbicidas de Forma Mecánica _____	58

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1 Cálculo de Emisiones	26
Ecuación 2 Conversión de Unidades de Energía	31
Ecuación 3 CO ₂ del transporte terrestre	34
Ecuación 4 Emisiones de nivel 1 de CH ₄ y N ₂ O	35
Ecuación 5 Fertilizantes de N orgánico aplicado	36
Ecuación 6 emisiones directa de N ₂ O	36
Ecuación 7 Emisiones anuales de CO ₂ por aplicación de urea	38

Lista de Figuras

Figura 1: Descripción Biocapacidad y Huella ecológica en el tiempo	12
Figura 2: el diagrama causal del problema	13
Figura 3: Cambios de temperatura, nivel de mar y cubierta de nieve	16
Figura 4: Comportamiento de la huella ecológica entre los años 1960 y 2005	20
Figura 5: Proyecciones de la huella ecológica al 2050	20
Figura 6: Procesos productivos cultivo de Caña de Azúcar	32
Figura 7 Equipo CO ₂ Meter GCH-2018 junto con sus especificaciones	34
Figura 8: especificaciones del CO ₂ Meter GCH-2018	35
Figura 9 Decámetro	35
Figura 10 Diagrama procedimiento obtención de datos.	41
Figura 11 Árbol de decisión	28
Figura 12: formulario	45

Lista de Imágenes

Imagen 1 Equipo de medición de CO ₂ GCH-2018	40
Imagen 2 Labor Subsulado	46
Imagen 3 Surcado	50
Imagen 4 Trinchos para riego por canal abierto	52
Imagen 5 Riego por Canal Abierto	53
Imagen 6 Tajos.	53
Imagen 7 Corte para Siembra.	54
Imagen 8 Camión de transporte de las semillas	54
Imagen 9 Aplicación de Herbicidas	57
Imagen 11 Inventario nacional de gases de efecto invernadero: 2000 y 2004	66
Imagen 12 participación de cada sector y emisión total de GEI año 2004 Colombia	68
Imagen 13 Emisiones en Gg de CO ₂ Equivalente países	69

INTRODUCCIÓN

Este proyecto nace con la intención de un ingenio productor de caña de azúcar en hallar la huella de carbono y el impacto generado al medio ambiente respecto a los gases efecto invernadero, con el objetivo a largo plazo de analizar sus procesos de producción y la responsabilidad ambiental que este causa, para implementar un plan de acción y así mejorar su productividad, disminuir su impacto ambiental y buscar nuevos mercados internacionales.

La huella de carbono es un indicador, que tiene en cuenta la totalidad de los gases efectos invernadero generados por las distintas actividades que realizan las personas y las empresas. Teniendo en cuenta el protocolo de Kioto esta medición se centra en los principales gases efecto invernadero, estos son: Dióxido de Carbono (CO_2), Óxido Nitroso (N_2O), Perfluorocarbonados (PFCS), Hexafluoruro de Azufre (SF_6), Hidrofluorocarbonados (HFCS) y Metano (CH_4), basándonos en nuestro trabajo, la huella de carbono se va a centrar sobre el proceso de preparación de suelos para el cultivo de caña de azúcar comercial en una hectárea.

El análisis a realizar está enfocado en estimar las emisiones producidas por el combustible, los herbicidas y los fertilizantes que intervienen en algunos procesos de preparación de suelo como lo son las labores de subsolado, rastro arado y surcado, con esto se busca generar una herramienta que permita cuantificar con una aproximación responsable las emisiones de estos gases en el cultivo de caña de azúcar comercial.

Adicional a esto el indicador tiene implicaciones económicas, sociales y ambientales, por una parte genera competitividad empresarial, debido al cambio climático y la necesidad de las empresas de cumplir con estándares internacionales que les permitan acceder a nuevos mercados, fortaleciendo su posición como proveedores para las diferentes empresas. Por esto es una necesidad anticiparse y tomar acciones que le permitan identificar ineficiencias en los procesos, reducir costos innecesarios o de consumo de combustible. Estas reducciones pueden ser aprovechadas por el ingenio con el fin de invertir estos fondos en proyectos sociales que ayuden a la comunidad que se encuentra en su zona de influencia, pero a su vez existe la posibilidad de que el indicador de huella de carbono sea muy alto, lo que convierta insostenible ambientalmente el proceso de cultivo de caña de azúcar y se tome medidas extremas de detener la producción. Lo que ocasionaría una disminución en la oferta laboral impactando negativamente a la comunidad de la zona.

Por último es importante mencionar que este trabajo se podrá extrapolar para calcular el impacto de las miles de hectáreas con que este ingenio cuenta y que

podría ser de gran apoyo para investigaciones futuras que se efectuaran en busca de certificaciones y nuevos mercados.

1. HUELLA DE CARBONO

1.1 TITULO DEL PROYECTO

Estimación de la huella de carbono para los procesos de subsolado, rastro arado, surcado, aplicación de fertilización química y de herbicidas en una hectárea de cultivo de caña de azúcar.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, en Colombia, el instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM) presentó un informe frente al cambio climático en el que calcularon las emisiones de los principales gases de efecto invernadero, en los principales sectores económicos de nuestro país. Teniendo en cuenta los resultados del sector agrícola, el ingenio plantea la posibilidad de realizar de un estudio de cálculo de huella de carbono para el cultivo de caña de azúcar comercial, con el objetivo de conocer cuánto es su aporte dentro del sector azucarero y agrícola.

El cálculo de la huella de carbono, proporciona al ingenio la oportunidad de cumplir los niveles de emisión exigidos y la promesa ambiental hecha a la sociedad, lo cual les permite mejorar la imagen entre sus diferentes clientes, logrando expandirse hacia nuevos mercados. Para poder alcanzar dichos mercados los ingenios deben alcanzar ciertas certificaciones tanto a nivel nacional como internacional que les den un aval de calidad sobre sus procesos productivo.

Las certificaciones a nivel nacional son:

- PAS 2050 - Verificación de la Huella de Carbono,
- Sello ambiental colombiano
- PAS 2060 Neutralidad de las emisiones de CO₂.
- ISO 14025. Etiquetas y declaraciones ambientales tipo III

Certificaciones a nivel internacional son:

- Certificación AENOR España.
- ISO 14000
- ISO 14064. Reporte de emisiones corporativas.
- ISO 18001

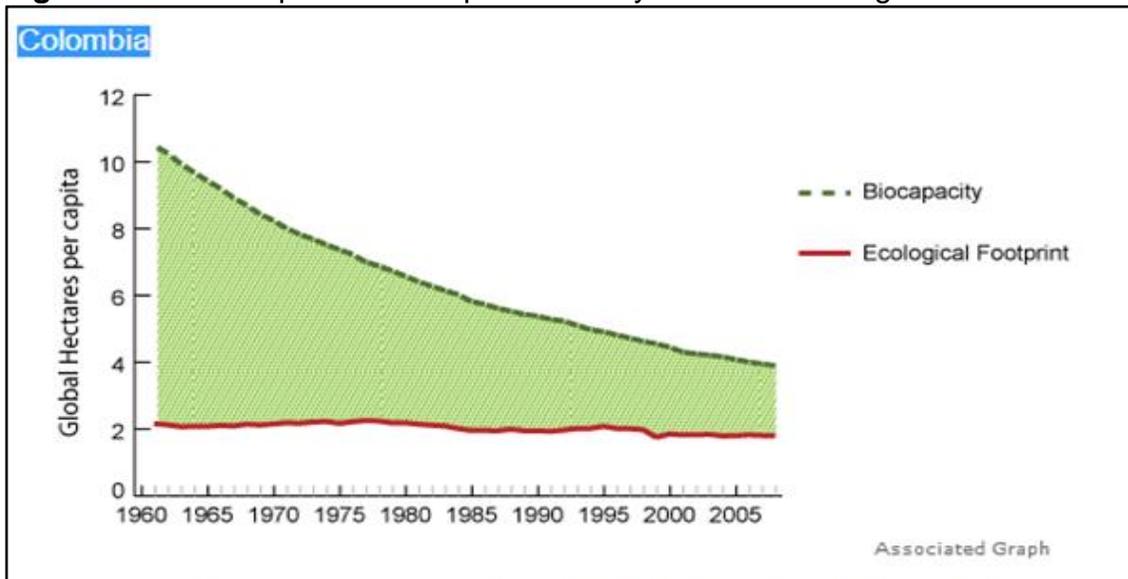
1.2.1 Análisis del problema

“La biocapacidad varía cada año con la gestión de los ecosistemas, las prácticas agrícolas (como el uso de fertilizantes y riego), la degradación de los ecosistemas, el clima y el tamaño de la población y la Huella ecológica varía con el consumo y la eficiencia de la producción”.¹(Figura 1).

Como se puede ver, hay una disminución en la capacidad que tiene el planeta para absorber toda la contaminación producida debido al incremento de la población y las actividades productivas para abastecer la misma. Originando un desgaste y estrés en los ecosistemas debido al cambio climático.

Por otro lado vemos que Colombia permanece casi estable en el consumo de hectáreas por persona sobre la huella ecológica a través del tiempo; esto se debe a la gran capacidad de biodiversidad que mantenemos en el territorio y la ubicación geográfica privilegiada del país. A pesar de eso, se genera una alerta para los diferentes sectores industriales en busca de tomar medidas que ayuden a mitigar los daños ambientales que generan sus procesos productivos.

Figura 1: Descripción Biocapacidad y Huella ecológica en el tiempo



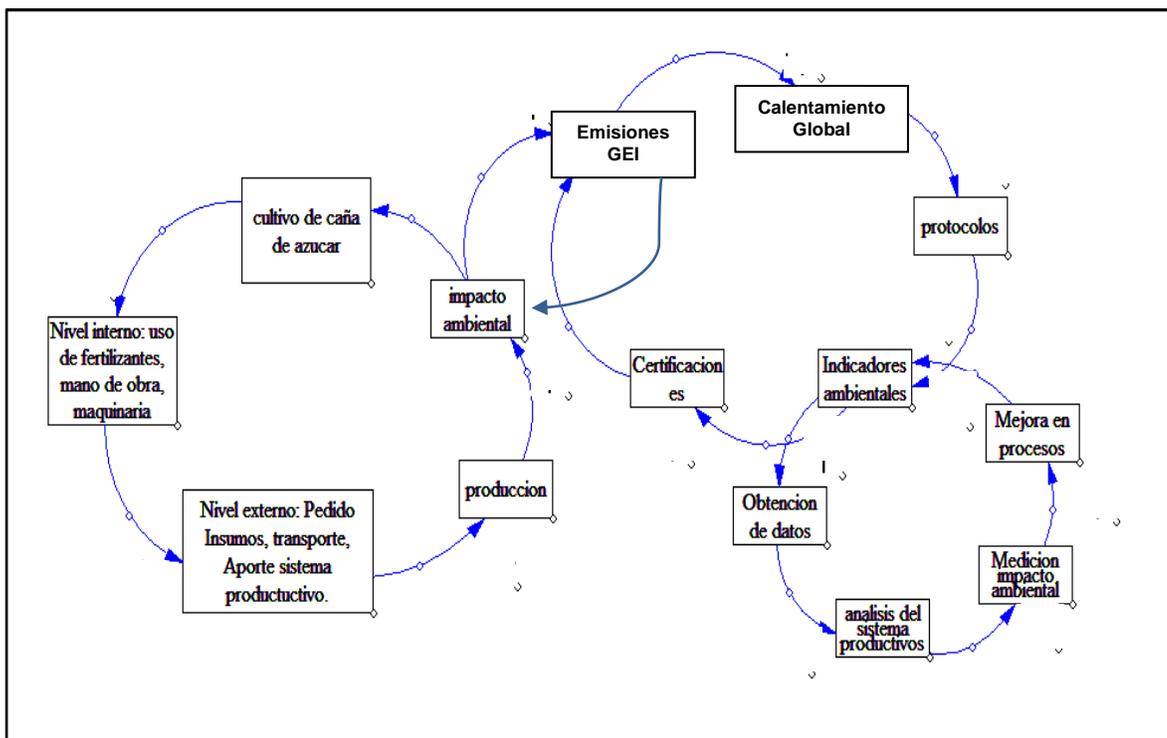
Fuente: (Footprintnetwork, 2012)

Teniendo en cuenta esta información y debido a un incremento en el consumo de productos derivados de la caña de azúcar como el biodiesel y el azúcar como tal,

¹ (Footprintnetwork, 2012)

ha generado que los ingenios azucareros tengan la necesidad de aumentar la producción y el número de hectáreas cultivadas para abastecer esta nueva demanda. En el transcurso de este año la producción de caña molida, es de 14.563.584 TON², lo cual incrementa las necesidades de producción por parte del ingenio y por tanto el consumo de recursos naturales, aumentando la huella ecológica debido a mas uso de maquinaria, aplicación de fertilizantes y herbicidas para disminuir el tiempo de cosecha y aumentar la calidad de la caña. Aumentando las emisiones de gases efecto invernadero, los cuales hacen parte de la huella de carbono que es un subcomponente de la huella ecológica.

Figura 2: el diagrama causal del problema



Fuente: autoría intelectual propia

En la figura anterior se puede observar tres ejes principales para analizar el problema, como lo son el cultivo de caña de azúcar, el impacto que este genera al ambiente y la forma de medición para que el ingenio logre alcanzar la certificación de huella de carbono y ser pioneros a nivel nacional en esta.

En la parte de cultivo de caña de azúcar comercial, se debe tener en cuenta el nivel de producción y los requerimientos a nivel interno, ya que estos tienen un

² (Asocaña, 2002)

papel relevante en el cálculo de la huella de carbono. También es importante conocer cuál es el aporte que genera en cuanto a Emisiones de GEI y cómo estas podrían incrementar el calentamiento global; Posterior a esto hay que determinar que normas establecidas por el acuerdo de Kioto pueden asegurar la reducción y garantizar su cumplimiento. Como solución el uso de indicadores adecuados le permitirá al ingenio medir el impacto que generan al ambiente; lograr una medición adecuada y la obtención de datos para el cálculo de la huella de carbono; analizar su sistema productivo, que le permitirá alcanzar la certificación de huella de carbono. En el largo plazo tener una disminución en las emisiones de GEI y la posibilidad de mejorar sus procesos productivos.

1.4 DELIMITACION Y ALCANCE

El tipo de proyecto que estamos realizamos es industrial aplicado, por medio de una investigación descriptiva, con el fin de lograr una aproximación a la huella de carbono para el cultivo de caña de azúcar en una hectárea, que permitirá extrapolar los datos al cultivo completo. Se creara una herramienta que le brinde al ingenio la posibilidad de aplicarla para estimar la huella de carbono en todo el cultivo de caña de azúcar comercial y en un futuro cercano le permitirá conocer todo el impacto que genera su proceso productivo al ambiente.

En nuestro caso, el cálculo de la huella de carbono, estará enfocada en el cultivo de caña de forma tradicional en una hectárea para un ingenio, ubicado a las orillas del río cauca. Contamos con un periodo de tiempo de aproximadamente 1 año, durante el cual recogeremos datos y conoceremos el alcance de los procesos tanto directos como indirectos y su impacto o efecto sobre el medio ambiente.

Es importante en la descripción del proceso, identificar el aporte de cada una de las actividades que están involucrados de forma directa, como lo son la preparación del suelo con maquinaria (subsulado, rastro arado y surcado), la aplicación y tipo de fertilizantes y herbicidas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Contribuir al mejoramiento del impacto medio ambiental del sector azucarero.

2.2 Objetivo Proyecto

Construir una herramienta para la estimación de la huella de carbono en los procesos de subsolado, rastro arado, surcado, aplicación de fertilización química y herbicidas en una hectárea de cultivo de caña de azúcar.

2.3 Objetivos Específicos

- Caracterizar los procesos de subsolado, rastro arado, surcado, fertilización química y herbicidas en el cultivo de caña de azúcar.
- Identificar cuál de los procesos productivos de estudio tiene más emisiones de gases efecto invernadero.
- Diseñar una herramienta que permita estimar la huella de carbono para los procesos de estudio.
- Calcular un valor estimado de la huella de carbono para una hectárea de caña de azúcar sobre los procesos de estudio.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 ANTECEDENTES

3.1.1 Origen de la huella de carbono

El origen de la huella de carbono nace del concepto de huella ecológica la cual fue una iniciativa a inicios de los años noventa por dos profesionales M. Wackernagel³ y William Rees⁴ de la universidad de British Columbia (Vancouver – Canadá), quienes plantearon inicialmente como objetivo de estudio el impacto que un individuo causa por sus actividades económicas o de consumo sobre terreno productivo el resultado de esta herramienta denominado huella ecológica. La preocupación se basó en estadísticas de las últimas décadas en razón de como cambios de temperaturas, nivel del mar y niveles de hielo en el hemisferio norte afectaban el clima y sus ecosistemas (Figura 3).

Figura 3: Cambios de temperatura, nivel de mar y cubierta de nieve



Fuente: (Guía de huella de carbono para productos, 2006)

La huella ecológica creada era una herramienta que pretendía medir el impacto de las personas sobre el terreno productivo que habitaban. Organizaciones Internacionales como la ONU (Organización de Naciones Unidas) y la

³ (Ingeniero mecánico con doctorado en comunidad y planeación regional, 1996)

⁴ (Profesor y autor del primer libro sobre huella ecológica, 1992)

organización mundial del clima manifestaron la preocupación por el cambio climático mundial convocando reuniones tales como la convención marco para el cambio climático (CMCC-1992) o la confederación de naciones unidas (protocolo de Kioto-1997), en donde buscaban que los países industriales buscaran un equilibrio al consumo de recursos naturales y su preservación, evitando cambios significativos irreversibles para el planeta.

A raíz de esto, los países incorporaron esta metodología ambiental ya aprobada en la convención (CMCC) para encontrar su impacto en el cambio climático. Basándose en 5 áreas fundamentales: urbanizaciones, agricultura, ganadería, pesca, forestal y dióxido de carbono. Por lo cual se dividieron en subhuellas por cada área y se calificó la huella de carbono (gases efecto invernadero) como la sub huella más influyente en la suma de la huella ecológica.

Igualmente se empezaron a caracterizar los sectores que más participación tenían, se identificó que el sector industrial y agrónomo aportaba significativamente, entonces, se procedió a medir los procesos productivos teniendo en cuenta factores internos y externos que intervenían en el producto final de cada tipo de empresa.

Así pues se crearon leyes internacionales ambientales y normas de producción que pretendían estandarizar lo procesos y las emisiones de gases de efecto invernadero, dando como recompensa a las industrias y a los países que cumplían con los requisitos, certificaciones que los reconocían como eco-productores con prácticas empresariales de producción limpia. Entre las normas planteadas encontramos la norma internacional ISO14006, PAS2050, ISO 14000, ISO 14000, entre otras.

3.1.3. Empresa Azucarera con certificaciones ambientales⁵

Azucarera El Viejo S.A es el primer ingenio en Centroamérica en certificarse como Carbono Neutro. El proceso de certificación de neutralidad de carbono inició formalmente en el 2011 cuando Azucarera El Viejo realizó el inventario neto de sus emisiones de Gases Efecto Invernadero, con el apoyo de la Unidad de Carbono Neutro de la Universidad EARTH en costa rica.

Según el último inventario realizado por el comité de carbono neutro de Azucarera el Viejo S.A. el proceso industrial de Azucarera El Viejo S.A. emitió un aproximado de 6255 toneladas de dióxido de carbono de noviembre del 2009 a octubre del 2010. Producto de acciones sistemáticas, se logró mitigar un total de 9657 toneladas, dicha mitigación estuvo conformada por 4668 toneladas de reducción a través de la generación de energía limpia y 4988 toneladas de remoción a través del refugio de bosque secundario que la empresa conserva.

⁵ (Azucarera El Viejo, 2010)

El inventario arroja un balance positivo, al mitigar 3401 toneladas más de dióxido de carbono de la emisión total. Con la verificación efectuada por la Unidad de Carbono Neutro de EARTH, se evidencia que el inventario neto de emisiones de Gases Efecto Invernadero en límites operativos correspondientes a la industrialización del azúcar de Azucarera El Viejo S.A está conforme con la normativa ISO 14064 y la norma nacional 12 01 06 2011.

Como parte de las iniciativas para reducir el consumo eléctrico y mantener la certificación otorgada, la empresa ha optado por sustituir la iluminación ineficiente, aprovechar la luz natural y controlar automáticamente la iluminación y aire acondicionado de las zonas que lo requieren. Por otro lado, se sustituyó el equipo de combustión que emplea combustibles fósiles por equipos eléctricos, se ha implementado la reducción del caudal de aguas residuales a través del no lavado de la caña y se está trabajando en la reducción del consumo de grasas y otros insumos.

3.2 MARCO TEORICO

3.2.1 Huella Ecológica

La huella ecológica es un indicador ambiental generado por la demanda de las personas hacia los recursos naturales existentes en el planeta, teniendo en cuenta la capacidad regenerativa del planeta. Por medio de este indicador se puede medir la cantidad de terreno biológicamente productivo y tierra biológicamente productiva (cultivos, pastos, bosques o ecosistemas acuáticos) necesaria para producir los recursos requeridos por un individuo o población para su consumo y para absorber sus residuos.

Las medidas de huella ecológica se pueden efectuar en diferentes categorías, dependiendo el sujeto de estudio. Individuos (personas), poblaciones (ciudades, regiones, países) o comunidades (agrícola, industrias). Buscando siempre evaluar el impacto que causan en comparación con la biocapacidad que tiene el planeta permitiendo visualizar el alcance y el tipo de demanda que la humanidad está consumiendo en dichos sistemas.

En el estudio de la huella ecológica realmente busca un equilibrio ambiental, en donde el producto o servicio generado por los procesos productivos por el hombre sean también tratados hasta su ciclo final de vida al convertirse en desperdicios, recuperando la materia prima recogida y transformada en productos y logrando un balance ecológico. Dentro del estudio incluye sólo la superficie ecológicamente productiva para usos humanos, excluyendo, desiertos y polos. Considerando así la superficie terrestre y marina que soporta la actividad fotosintética y la biomasa empleada por los humanos.

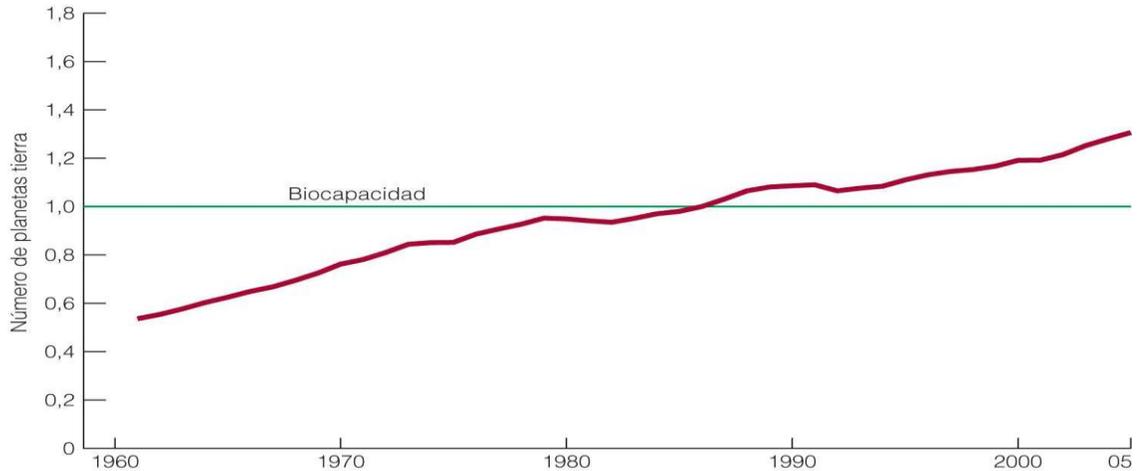
La huella ecológica considera distintas subhuellas, de las cuales las más conocidas son la huella hídrica, huella energética y la huella de carbono (aporta más del 50% a la huella ecológica), basándose en estas categorías:

- Cultivos: aquella superficie en la que los humanos desarrollan actividades agrícolas, suministrando productos como los, fibra, aceites, entre otros.
- Pastos: área dedicada a pastos, de donde se obtienen determinados productos animales como carne, leche, cueros y lana.
- Bosques: la superficie ocupada por los bosques, de donde, principalmente se obtienen productos derivados de la madera, empleados en la producción de bienes, o también combustibles como leña.
- Mar: la superficie marítima biológicamente productiva aprovechada por los humanos para obtener pescado y mariscos.
- Superficie construida: área ocupada por edificios, embalses y otro tipo de infraestructura, por lo que no es biológicamente productiva.
- Energía: al área de bosque necesaria para absorber las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustibles fósiles.

Se distinguen distintas categorías de consumo, de modo que, para cada una de ellas, se establecen las distintas necesidades de superficie: alimentación, hogar, transporte, bienes de consumo, servicios, que a su vez pueden ser divididas en las subcategorías que se consideren oportunas. La demanda de la humanidad sobre el planeta se ha más que duplicado durante los últimos 45 años como resultado del crecimiento de la población y del consumo individual. Las actividades humanas excedieron la biocapacidad total de la tierra por primera vez a principio de los años ochenta, manteniéndose la tendencia al alza, desde entonces En 2005, la demanda fue un 30% mayor que la oferta.⁶

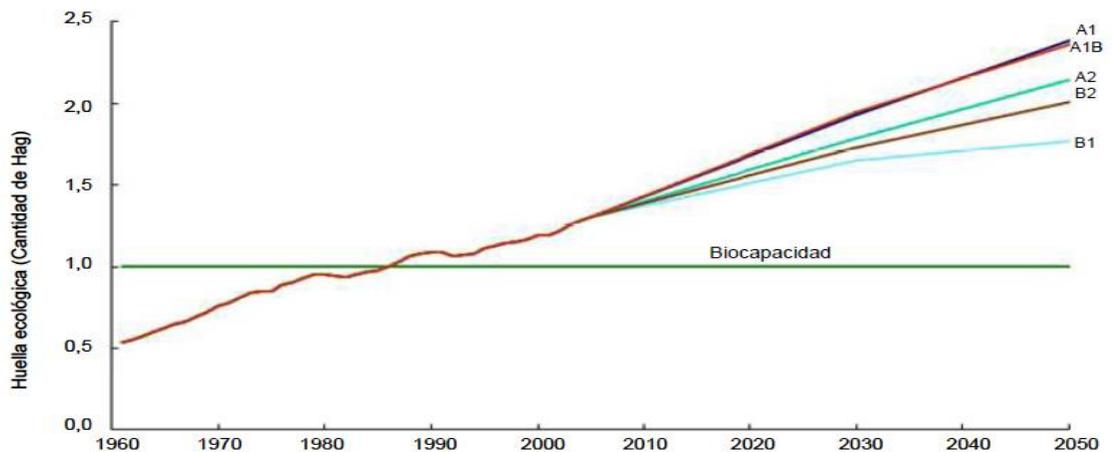
⁶ (WWF, 2008)

Figura 4: Comportamiento de la huella ecológica entre los años 1960 y 2005



Fuente: (WWF, 2008)

Figura 5: Proyecciones de la huella ecológica al 2050



Fuente: (WWF, 2008)

El Panel intergubernamental de cambio climático IPCC, por sus siglas en inglés (Intergovernmental panel on climate change) ha desarrollado cuatro conjuntos de escenarios de emisiones, denominados familias. La familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con rápido crecimiento económico, con una población que se estabiliza hacia mediados del Siglo XXI y la introducción rápida de tecnologías nuevas y más eficientes. La familia de escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. La población mundial está en continuo crecimiento y el desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones; además, el crecimiento económico por habitante así como el cambio

tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en las otras familias de escenarios. La Familia de escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que evoluciona igual que en A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. Finalmente, la familia de escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.⁷

3.2.2 Efecto invernadero

Es un proceso por el cual ciertos gases de la atmósfera retienen gran parte de la radiación infrarroja emitida por el sol y conservada en la tierra, la cual se remite de nuevo a la superficie terrestre calentándola. Estos gases han estado presentes en la atmósfera en cantidades muy reducidas durante la mayor parte de la historia y son necesarios para el planeta, ya que gracias a ellos nuestro planeta mantiene rangos de temperatura adecuada para que sea posible la existencia vida.⁸

Por causa del crecimiento poblacional y el consumo desmedido de productos y actividades originarias de gases de efecto invernadero, se ha incrementado los niveles en la atmosfera lo cual ha causado el fenómeno de cambio climático. Lo cual genera las variaciones de los ecosistemas y los cambios de temperatura extremos que estamos viviendo hoy en día.

Emisiones son todos los fluidos gaseosos, puros o con sustancias en suspensión; así como toda forma de energía radioactiva, electromagnética o sonora, que emanen como residuos o productos de la actividad humana o natural. En nuestro proyecto utilizaremos este concepto para calcular las emisiones de gases invernaderos que emite la plantación de cultivo de caña de azúcar tecnificada, en donde calcularemos dichos gases y su impacto en el ambiente.

3.2.3 Gases efecto invernadero

Los gases efecto invernadero se encuentran naturalmente en el ambiente, el ciclo natural del planeta crea lo necesario para que el efecto invernadero se realice y conserve la vida animal y vegetal del planeta, La industrialización y la producción

⁷ (IPCC, 2006)

⁸ (Efecto invernadero, 2010)

en masa han aumentado los gases en la atmosfera, ocasionando que la capacidad de captura de los Gases Efecto Invernadero (GEI) se encuentra totalmente excedida por los gases emitidos por el hombre, como consecuencia los gases extra en la atmosfera absorben una cantidad mayor de radiación, generando un mayor calentamiento. (Véase Tabla 1).

Algunos gases, como el vapor de agua (H₂O), el dióxido de Carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y el Ozono (O₃) son los principales gases Efecto Invernadero (GEI) que están en la atmósfera. Aunque también se encuentran los Halo carbonos y otras sustancias que contienen Cloro y Bromuro, y otros gases como el Hexafloruro de Azufre (SF₆), los Hidrofluorocarbonos (HFC), y los Perfluorocarbonos (PFC) se encenfran en menores cantidades.⁹

Tabla 1. Porcentaje de gases efecto invernadero en la atmosfera

Gas Efecto Invernadero	Porcentaje de participación en la atmosfera
Dióxido de Carbono	72,3%
Metano	16.6%
Óxido nitroso	7.6%
Clorofluorocarbonos	2.7%
Hexafloruro de azufre	0.4%

Fuente: (Ingeniero Eduardo R Hernandez, 2001)

3.2.4 Cambio climático

El calentamiento global es un término utilizado para referirse al fenómeno de un aumento promedio de la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos; además de éste, el cambio climático implica modificaciones en otras variables ambientales a nivel mundial, que ocasionan impactos negativos no solamente sobre el mismo clima, sino también sobre los ecosistemas naturales y sus procesos, sobre las ciudades y sobre el desarrollo de la vida humana; aunque al mismo tiempo, para algunas regiones, estos cambios han llegado a ser positivos, ya que la productividad de sus tierras ha aumentado como consecuencia de este proceso.

En la década de la revolución industrial algunos científicos empezaron a preocuparse por la creciente amenaza mundial del calentamiento de la tierra debido a la quema de combustibles fósiles. Según la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático, el cambio climático se define como

⁹ (Minambiente, 2012)

“cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos comparables”. Por lo tanto el calentamiento global es una parte del cambio climático y comprende solo el aumento en la temperatura media global.

El cambio climático tiene unos efectos sobre la tierra y son los siguientes:¹⁰

- Incremento del nivel del mar (en los últimos 100 años ya ha subido entre 10 y 25 cm). Se prevé que para el año 2050 puedan subir 20 cm más y otros 50 para el año 2100.
- Deshielo de glaciares y casquetes polares
- Modificación de las lluvias con cambios bruscos entre sequías e inundaciones. Aumento de temporales, tormentas y huracanes tropicales.
- Daños en ecosistemas y agricultura por la imposibilidad de adaptarse con rapidez a los cambios de temperatura.
- Temperaturas extremas, con incremento de las olas de calor y frío.
- Aumento de plagas y enfermedades tropicales.
- Aumento de la mortalidad por el calor y enfermedades provocadas por insectos tropicales.

3.2.5 Huella de Carbono

La huella de carbono es un indicador que mide la cantidad de emisiones de gases efecto invernadero (GEI), generados de forma directa e indirecta por un industria, organización, actividad o persona. Se puede medir este indicador tanto en los productos o servicios generados, como en los procesos productivos para llegar a tal producto (ciclo de vida).

La huella de carbono considera los 6 gases efecto invernadero (GEI) identificados en el Protocolo de Kioto: dióxido de carbono(CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆); Y al momento de definir los parámetros de la huella se debe definir el alcance del proyecto, para tener establecido claramente si se considera sólo emisiones directas como combustible de maquinaria o cantidad materia prima utilizada en el proceso (alcance 1, proceso que se controlan), o también se deben incluir aquellas emisiones generadas indirectamente como la energía utilizada o transporte de materia prima (alcance 2 y 3, procesos de terceros no controlados por la empresa o de la cadena de suministro).

En orden de tener una medida estándar para la generación total de emisiones producidas, se convierten todos los diferentes valores de tipo de gases en uno

¹⁰ (Doménech Quesada, 2009)

común, esta medida es toneladas equivalentes de dióxido de carbono (tCO₂e) y se obtiene multiplicando las emisiones de cada uno de los 6 GEI por su respectivo potencial de calentamiento global (PCG) al cabo de 100 años.

Existen diversas metodologías para poder medir la huella de Carbono, entre las que se encuentran: The Life-Cycle Assessment (La valoración del ciclo de vida), ISO 14064-1, ISO 14069 (guía de aplicación ISO14064-1), The Carbon Trust (El verdadero Carbono) and The EPA SmartWay (Agencia de protección del medio ambiente). En la actualidad el GHG protocol (Protocolo de los gases de la casa verde), es la herramienta más usada tanto por los gobiernos como por las empresas a nivel mundial para realizar las mediciones y la administración de las emisiones de gases de efecto invernadero. En alianza con el Instituto de Recursos del Mundo (The World Resources Institute) y el Concejo de Negocios del Mundo para el Desarrollo Sostenible (The World Business Council for Sustainable Development), están trabajando con diferentes empresas, gobiernos y grupos defensores del medio ambiente para contribuir a la creación de nuevos programas confiables y efectivos que aborden el problema del cambio climático.

La Biblioteca de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) ha desarrollado una bibliografía o guía de investigación dedicada 100% al tema de Huella de Carbono. Las bibliografías son recursos de apoyo a la investigación, que concentran y dan acceso a bases de datos, documentos, enlaces de instituciones, eventos y otros, sobre temas específicos.

Las bibliografías contienen un alto porcentaje de recursos de información CEPAL y ONU de acceso libre, y otro porcentaje de artículos y libros sólo accesibles dentro de la red de CEPAL. A través de su análisis, las organizaciones pueden reducir los niveles de contaminación mediante un cálculo estandarizado de emisiones que tienen lugar durante los procesos productivos. Se trata de un mecanismo para que la empresa disponga de un indicador del impacto ambiental asociado a sus actividades. Además, representa el primer paso en el establecimiento de un programa de reducción de emisiones. La utilización de metodologías contrastadas para el cálculo de la huella de carbono ofrece un mayor grado de credibilidad a los resultados obtenidos y permiten la comparabilidad de resultados entre empresas o productos/servicios.¹¹

Para las organizaciones, representa una medida para la responsabilidad social y un elemento más de concientización entre los empresarios y ciudadanos de prácticas más sostenibles. Con esta actitud se pretende cuantificar la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), medidas en emisiones de CO₂ equivalente, que son liberadas a la atmósfera debido a las actividades productivas que llevamos a cabo día a día.

¹¹ (CEPAL, 2010)

En cuanto a la medición de la huella de carbono de un producto, se puede considerar que crea verdaderos beneficios para las organizaciones. La huella de carbono identifica las fuentes de emisiones de GEI de un producto. Esto por su parte permite identificar y plantear mejores objetivos de reducción de emisiones, y el conocimiento de los puntos críticos de los procesos productivos, que pueden o no pueden ser de responsabilidad directa de la organización⁸

3.2.6 Directrices del IPCC 2006

El Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHG Protocol) ofrece a los países en desarrollo una herramienta aceptada internacionalmente basándose en los parámetros y normas establecidas en las directrices definitivas por el panel intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC por sus siglas en inglés) 2006. Constituido en la convención de marco de las naciones unidas sobre el cambio climático (CMNUCC).

Esta metodología ofrece diferentes herramientas diseñadas para sectores específicos o situaciones que pueden ser comunes a diferentes sectores, que buscan con su implementación reducir y simplificar los costos asociados a la medición de GEI, brindar a las empresas la información pertinente para que puedan orientar su estrategia organizacional hacia la reducción de emisiones de gases causantes de efecto invernadero, y aumentar la consistencia y la transparencia con que se llevan a cabo las mediciones de emisiones de GEI al mismo tiempo que se ocupan de mantener informadas de la situación real tanto a las empresas como a los programas que trabajen con GHG.¹²

Las directrices del IPCC proporcionan una guía de orientación sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre para la elaboración de los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Adicionalmente por medio de estándares para los distintos parámetros y factores de emisión permite el cálculo de los inventarios de GEI para todos los sectores y proporciona metodologías que permite la elaboración de inventarios transparentes, documentados, coherentes a lo largo del tiempo, comparables, con evaluación de la incertidumbre, sujetos a control y garantía de la calidad, eficientes en cuanto al uso de los recursos con que cuentan los organismos encargados de los inventarios, y en el que se trata de reducir la incertidumbre gradualmente a medida que se cuenta con información de mejor calidad.

Las Directrices del IPCC de 2006 contienen 5 volúmenes, uno para cada sector (Volúmenes 2 a 5) Los cuales representan las categorías principales y uno para la orientación general aplicable a todos los sectores (Volumen 1).

- Volumen 1: Orientación general y generación de informes

¹² (GHG PROTOCOL INITIATIVE, 2013)

- Volumen 2: Energía
- Volumen 3: Procesos industriales y uso de productos (IPPU)
- Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU)
- Volumen 5: Desechos

Esta estructura en cinco volúmenes significa que es necesario hacer la referencia cruzada entre dos volúmenes como máximo. El Volumen 1 (Orientación general y generación de informes) y el volumen del sector correspondiente.

Para el desarrollo metodológico de estimación, las Directrices hacen uso del método más común, el cual consiste en combinar la información sobre el alcance hasta el cual tiene lugar una actividad humana (denominado datos de la actividad o AD, del inglés activity data) con los coeficientes que cuantifican las emisiones o absorciones por actividad unitaria. Se los denomina factores de emisión (EF, del inglés, emission factors). Por consiguiente, la ecuación básica es:

Ecuación 1 Cálculo de Emisiones

$$Emisiones = AD \cdot EF$$

Esta ecuación básica varía de acuerdo al nivel de complejidad metodológica seleccionado de acuerdo a los árboles de decisiones establecidos en las Directrices del IPCC, se considera una buena práctica utilizar los métodos de niveles superiores para las categorías principales, a menos que los requisitos de los recursos para hacerlo sean escasos. Existen tres niveles de complejidad: el Nivel 1 es el método básico, el Nivel 2, el intermedio, y el Nivel 3 es el más exigente en cuanto a la complejidad y a los requisitos de los datos.

3.2.6.1 Definiciones básicas del IPCC.

Categoría principales: es una categoría prioritaria en el sistema de inventarios nacionales porque su estimación influye significativamente 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 al compilador del inventario a desplazarse por la orientación y seleccionar la metodología por niveles que sea 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.

Para calcular el total nacional del inventario es necesario sumar las emisiones correspondientes a cada gas estando estas en unidades equivalentes de CO₂ (CO₂ eq). Para llegar a la unidad de equivalencia debo 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 CO₂. 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 CO₂.

Tabla 2: Potencial de calentamiento global en unidades de CO₂ equivalente para los diferentes GEI

Nombre	Formula química	Potencial de calentamiento global	Unidades
Dióxido de carbono	CO ₂	1	Unidades Equivalente de co ₂
Metano	CH ₄	21	
Óxido nitroso	N ₂ O	310	

Fuente: (ADRIANA PEDRAZA GALEANO, 2008)

3.2.7 PAS 2050

La norma PAS 2050:2008 Verificación de la Huella de Carbono, es una especificación publicada por el Instituto Británico de Estándares (British Standards Institution) en 2008 de aplicación voluntaria. Con modificaciones en el 2011.

Cuando una organización decide que va a aplicar la huella de carbono tomando como base esta guía debe tener en cuenta el ciclo de vida del producto conforme a la norma del PAS 2050, se debe garantizar que el análisis del ciclo de vida del producto sea completo.

El análisis del ciclo de vida de un producto se entiendo como una técnica que permite evaluar aspectos ambientales y los potenciales impactos sobre el producto

(según la Norma ISO 14040:2006 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia).

Así PAS 2050 diferencia dos tipos de ciclos de vida, en función del tipo de producto:

- Business to Business, cuando el ciclo de vida considerado del producto finaliza con la entrega del mismo a otra organización para que lo utilice en la elaboración de otro producto.
- Business to Customer, cuando se considera el ciclo de vida completo del producto, incluidas las actividades posteriores a la entrega del producto al cliente/usuario.

Este método consistente en la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida de productos y servicios. Del ciclo de vida de GEI son las emisiones que se liberan en el marco de los procesos de creación, modificación, transporte, almacenamiento, uso, reciclar o desechar de tales bienes y servicios.

La Guía PAS 2050:2011 establece que dentro de sus límites organizacionales, la organización debe cuantificar y documentar las emisiones GEI y las reducciones, mediante los siguientes pasos:

Paso 1: Definición del Alcance

- Describe el producto a ser evaluado y unidad de análisis.
- Dibujar un mapa del ciclo de vida del producto.
- Acordar el “limite del sistema” del estudio.
- Priorizar recolección de información de las actividades.

Paso 2: Recolección de información

- Establecer un plan de recolección de información.
- Acordar con los proveedores la recolección de la información primaria de las actividades.
- Recolectar los factores de emisión secundarios y otra información.
- Chequear información y evaluar calidad de la información.

Paso 3: Cálculo de la Huella

- Compilar la información de las actividades y los balances de flujo de acuerdo a la unidad funcional.
- Múltiple información de las actividades para factores de emisión para generar la huella.

- Chequear los cálculos y registrar todas las fuentes de información y supuestos.

Paso 4: Interpretación de los resultados de la Huella y manejo de reducciones

- Identificar fuentes principales de emisión.
- Evaluación de sensibilidad.
- Identificar oportunidades de reducción
- Asegurarse de la transparencia en la comunicación de resultados.

3.2.8 ISO 14064

La norma ISO 14064, incluye los requisitos para determinar los límites de la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), cuantificar las emisiones de la organización e identificar las actividades o acciones específicas de la compañía con el objeto de mejorar la gestión de estos gases, tiene como objetivo dar credibilidad a los informes de emisiones de GEI y a las declaraciones de eliminación o de reducción de estos.

Incluye requisitos y orientaciones para la gestión de la calidad del inventario de GEI, el informe, la auditoría interna y las responsabilidades de la organización en las actividades de verificación.

La norma se compone de tres partes:

- ISO 14064-1: especificación con orientación, a nivel de las organizaciones: se enfoca en detallar los principios y requerimientos para el diseño, gestión e informe de los GEI.
- ISO 14064-2: especificación con orientación, a nivel de proyecto: se enfoca en proyectos específicamente diseñados para reducir las emisiones o incrementar las absorciones de GEI. Incluye principios y requisitos para determinar la línea base del proyecto y para realizar seguimiento, cuantificar e informar sobre los resultados del proyecto
- ISO 14064-3: especificación con orientación para la validación y verificación de declaraciones: define principios, requisitos y guías para los procesos de validación y verificación de la información GEI.

3.2.9 Proceso productivo de cultivo de caña de azúcar¹³

Para tener un buen cultivo de caña de azúcar, el campo se adecua para hacer más eficiente el riego, mejorar la siembra, el drenaje, las labores mecanizadas y

¹³ (Incauca, 2010)

finalmente, facilitar la cosecha. Por esto, el proceso de campo comienza con la realización de planos topográficos que sirven de base para realizar el diseño de la adecuación de los terrenos. Como apoyo para las labores de topografía y diseño y para el manejo de la información cartográfica.

La adecuación de las tierras para el cultivo de caña de azúcar comprende los trabajos de nivelación y construcción de obras, que se realizan principalmente para facilitar el movimiento del agua por la superficie de los terrenos durante el riego y para evacuar los excesos de agua cuando se presenten. También se construyen las vías necesarias para el transporte de la caña desde el campo hasta la Fábrica.

Posteriormente, se realiza la preparación de los suelos, para proporcionar un ambiente apropiado para la óptima germinación de la semilla y el buen desarrollo del cultivo. En la preparación de suelos, se destruyen las malezas y residuos de cultivos anteriores, Además se logra aumentar la capacidad de infiltración y retención de agua en el suelo así como una mejor aireación e intercambio de aire en el suelo y la atmósfera. Las labores que se llevan a cabo en la preparación de los suelos son la descepada, subsolado, arada, rastrillada y surcada.

Una vez surcado el suelo se procede a la siembra, que se realiza depositando las semillas, que son trozos de tallo de 60 cm. Posteriormente, se procede a tajarla con una delgada capa de suelo, labor que se realiza en forma mecánica o manual, dependiendo de las condiciones del suelo y del clima.

El riego de la caña, se realiza inmediatamente después de la siembra y se repite 15 días después. Se continúa regando con un intervalo de 20 ó 25 días haciéndolo de acuerdo con la programación del balance hídrico, programa que calcula las necesidades de agua de la plantación con base en la capacidad de retención de humedad del suelo, la pérdida por evapotranspiración y el aporte por la lluvia. Para el riego, se utilizan los ríos aledaños, las aguas subterráneas o pozos profundos que se conducen por canales o tuberías y se aplica por gravedad en surcos alternos al cultivo.

A los suelos sembrados con caña, se le debe restituir los elementos nutricionales absorbidos por esta en su ciclo vegetativo, por lo que se hace la labor de fertilización que se efectúa mecánicamente en verano y con “mochilas” de espalda en invierno.

Se hacen aplicaciones con vinaza enriquecida con micro elementos y microorganismos. Adicional a esto, se tienen fertilizaciones aéreas. Se realizan con base en análisis de suelos y en los resultados de experimentos de campo cuidadosamente planificados y llevados a cabo en suelos con diferentes niveles de fertilidad.

Para el control de malezas se utilizan herbicidas en cantidades razonables, aplicados con bombas de espalda, principalmente en época de invierno. La labor de subsuelo en socas, tiene como propósito descompactar el suelo por medio de un tractor de alta potencia y un implemento de dos barras curvas que trabaja dos entresurcos simultáneamente.

El proceso del cultivo de la caña de azúcar termina cuando esta tiene entre 12 y 14 meses de edad, época apta para el corte.

Figura 6: Procesos productivos cultivo de Caña de Azúcar



Fuente: Elaboración propia

3.3 APORTE INTELECTUAL

Con este proyecto se busca generar una herramienta, que aplique algunas técnicas de la ingeniería que permita a la industria azucarera generar procesos más sostenibles, tener un sistema de medición sobre sus procesos productivos y el impacto que estos generan al ambiente.

Adicional a esto como ingenieros industriales por medio de los diagramas causales y de toma de datos se llevara a cabo la construcción de una herramienta con la cual se podrá identificar el impacto a nivel de costos y de disminución de la calidad, con el fin de que el ingenio obtenga una visión más clara sobre sus puntos de mejora permitiéndole generar un análisis sobre la inversión y como estas modificaciones mejoran el impacto medio ambiental, logrando una disminución en multas o impuestos y al mismo tiempo pueda alcanzar distintas certificaciones que les permita llegar a nuevos mercados aumentando su rentabilidad.

Finalmente, vemos este proyecto como una oportunidad para poner en práctica todos los conocimientos adquiridos durante el transcurso de la carrera, ya que de una u otra forma abarca gran parte de nuestras motivaciones y de lo que nosotros como ingenieros vemos como una oportunidad ya que se alinea a nuestras aspiraciones futuras como profesionales y nos permite tener un aporte crítico, tenemos la oportunidad de innovar y conocer una metodología que está a la vanguardia de las necesidades de países que están desarrollados y al mismo tiempo es una oportunidad como país ya que nos da la oportunidad de ser pioneros en la implementación de procesos sostenibles y con un menor impacto ambiental.

4 ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO

4.1 Recursos disponibles

Para el proyecto “Estimación de la huella de carbono para los procesos de subsolado, rastro arado, surcado, aplicación de fertilización química y de herbicidas en una hectárea de cultivo de caña de azúcar” se considerarán los siguientes recursos:

- a. Financiero: Serán suministrados por la universidad Icesi, el Ingenio de estudio y por los autores.
- b. Equipos:
 - Computadores: Se necesitarán dos computadores para documentar el proyecto con de Internet para la búsqueda de información.
 - Los computadores deberán tener los siguientes programas: Microsoft Visio para los diagramas de flujo, Vensim para el diagrama de causa y efecto, y Microsoft Excel para el diseño de la herramienta.
 - Tableta: para la toma de fotos, visualización de los diagramas durante las visitas al ingenio, y grabación de vos con el fin de garantizar la mayor coherencia de la información.
 - Equipo CO₂ Meter GCH-2018, el cual es un instrumento de alta precisión cuyo funcionamiento se basa en dos sondas, una para CO₂ y temperatura, otra, para la medición de la humedad relativa e igualmente temperatura.

Figura 7 Equipo CO₂ Meter GCH-2018 junto con sus especificaciones



Fuente: Manual Equipo de medición

Figura 8: especificaciones del CO2 Meter GCH-2018

ELECTRICAL SPECIFICATIONS (23± 5 °C)

CO2 (Carbon dioxide)

CO2 (Carbon dioxide)	Range	0 to 4,000 ppm
	Resolution	1 ppm
	Accuracy	± 40 ppm * ≤ 1,000 ppm.
		± 5% of reading * > 1,000 ppm ≤ 3,000 ppm.
± 250 ppm typically * > 3,000 ppm, reference only		
Repeatability	± 20 ppm * ≤ 3,000 ppm.	
Temperature 23 + 5 °C.	Range	0 °C to 50 °C, 32 °F to 122 °F.
	Resolution	0.1 degree
	Accuracy	°C - 0.8 °C, °F - 1.5 °F.

Humidity/ Temp./Dew point

Humidity/ Temperature

Humidity	Range	10 % to 95 % R.H.
	Resolution	0.1 % R.H.
	Accuracy	≥ 70% RH : ± (3% reading + 1% RH). < 70% RH : ± 3% RH.
Temperature	Range	0 °C to 50 °C, 32 °F to 122 °F.
	Resolution	0.1 degree
	Accuracy	°C - 0.8 °C, °F - 1.5 °F.

Dew Point

°C	Range	-25.3 °C to 48.9 °C
	Resolution	0.1 °C
°F	Range	-13.5 °F to 120.1 °F.

Fuente: Manual equipo de medición

Figura 9 Decámetro



Fuente: (Google, 2013)

- c. Humanos: Autores (investigadores), Tutor metodológico y temático, Personal capacitado del Ingenio.

4.2 Equipo de Investigadores

Las personas que participarán del presente proyecto son:

- Jorge Eduardo Tafur, estudiante de decimo semestre, Ingeniería Industrial, Universidad Icesi. Áreas de interés en Logística, Proyectos y Compras.
- Angélica María Gómez, estudiante de decimo semestre, Ingeniería Industrial, con simultaneidad en Economía y Negocios Internacionales n noveno semestre, Universidad Icesi. Áreas de interés en Logística, Comercio Internacional y Medio ambiente.
- Beatriz Eugenia Sierra, Bióloga de la Universidad del Valle, tutora temática del proyecto.
- Leonardo Rivera Cadavid, Ph.D. y Jairo Guerrero B. MSc. Ing. tutores metodológico

5 DESARROLLO METODOLÓGICO

5.1 PLANEACIÓN Y EJECUCIÓN

5.1.1 Entender la delimitación del problema.

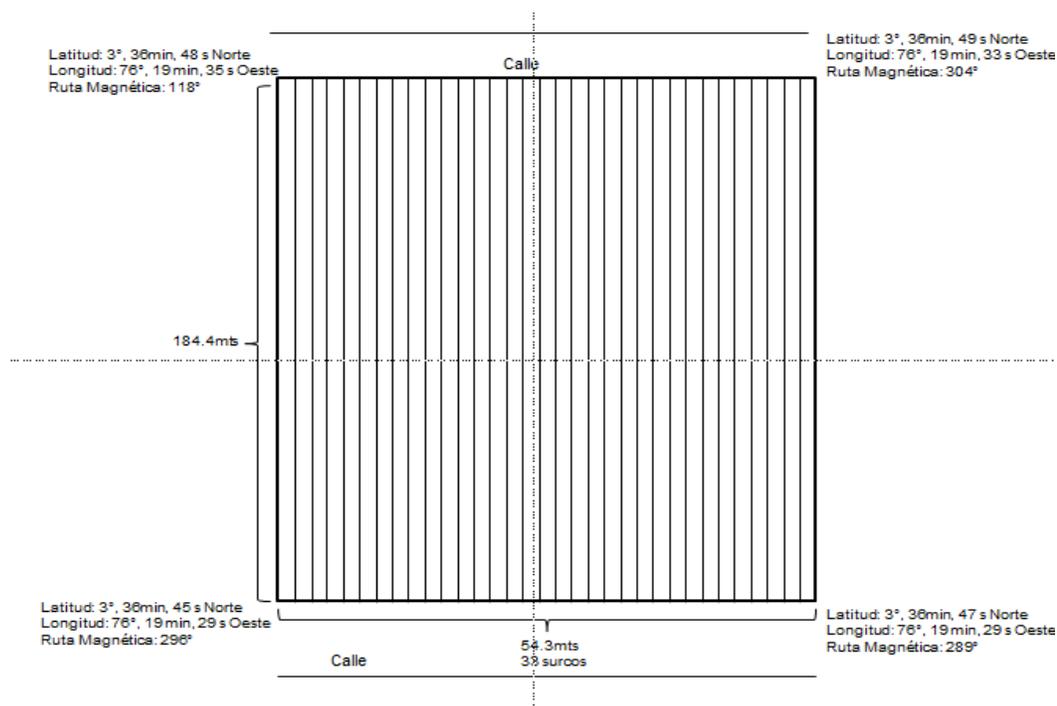
Para el desarrollo del proyecto se llevaron a cabo 5 visitas de campo en el ingenio de estudio durante estas visitas se evaluaron los siguientes aspectos para cada labor: tipo de maquinaria, rendimiento de combustibles, velocidades, revoluciones del motor, tipo y cantidad de combustible y número de pases de cada labor sobre la hectárea. La información se recolecto directamente en el sitio de trabajo con los colaboradores del Ingenio y finalmente para el desarrollo teórico de la herramienta se baso en la cantidad de pases por hectárea y el rendimiento de combustible. Adicional a esto con el equipo de medición se tomó la información de temperatura, nubosidad, humedad relativa y una medida de emisión de CO₂ generada por el tractor en el momento de la labor; cabe aclarar que esta medida obtenida por medio del equipo no es posible compararla con los resultados arrojados por la herramienta realizada durante este trabajo, el motivo yace en que los parámetros de medidas de cada uno de los métodos son distintos: El equipo CO₂ meter mide la emisión directa por fracción de tiempo. Mientras que la Herramienta calcula la emisión sobre labor y producto utilizado en la hectárea.

Para identificar los anteriores parámetros, fue necesario delimitar el terreno en una hectárea de acuerdo a la forma de los surcos, utilizando un decámetro. En cada esquina se ponían unas estacas para que los operarios que conducían los tractores, identificaran el área de trabajo adecuada y pudieran realizar sus labores sobre el terreno delimitado como se muestra en la ilustración 1.

Las labores de estudio en que se desarrolló el trabajo de campo, son descritos en la tabla 4. Allí se realizaron las mediciones correspondientes y se obtuvo la información necesaria que permito caracterizar los procesos para finalmente construir la herramienta de estimación de la huella de carbono.

Por ultimo dentro de los procesos evaluados se descarto el riego porque el método tradicional es de canal abierto por gravedad, en donde el agua recorre los surcos del cultivo hasta hidratar toda el área, por lo tanto no interviene maquinaria, ni productos químicos generadores de CO₂. También se descarta el corte de semilla, ya que es un proceso basado en la mano de obra, por lo tanto el CO₂ generado por lo humanos es despreciable para esta investigación.

Ilustración 1 Delimitación del Terreno



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3: Procesos de estudio para la estimación de la caña de azúcar

PROCESOS	
<p>ADECUACIÓN Y PREPARACIÓN</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 SUBSOLADA 2 RASTRO ARADO 3 SURCADA 	<p>CONTROL DE MALEZAS</p> <ol style="list-style-type: none"> 7 APLICACIÓN DE HERBICIDAS
<p>RIEGOS</p> <ol style="list-style-type: none"> 4 RIEGO POR CANAL ABIERTO 	<p>FERTILIZACIÓN QUÍMICA</p> <ol style="list-style-type: none"> 8 FERTILIZACIÓN MECÁNICA CON CULTIVO Y APORQUE
<p>TRATAMIENTO DE SEMILLA</p> <ol style="list-style-type: none"> 5 CORTE DE SEMILLAS 	

Fuente: Elaboración propia

Durante la primera visita de campo para la toma de datos, se encontró un terreno limoso- arcilloso, características de un tipo de terreno adecuado para el cultivo de la caña, dando equilibrio en la capacidad que tiene el suelo para retener el agua y al mismo tiempo dejarla penetrar, ya que es una combinación del suelo arcilloso que es un terreno más pesado que no permite una ligera filtración de agua reteniendo nutrientes y material orgánico, combinado con un tipo de suelo limoso que es más estéril y permite la filtración de agua rápidamente, permitiendo que la materia orgánica se descomponga, logrando un buen equilibrio para el cultivo de la cepa de la caña de azúcar.

Para la toma de los datos se utilizó un equipo de medición de CO₂ Meter GCH-2018 con dos sondas. Las cuales son utilizadas para medir el CO₂/Temperatura y humedad relativa / Temperatura.

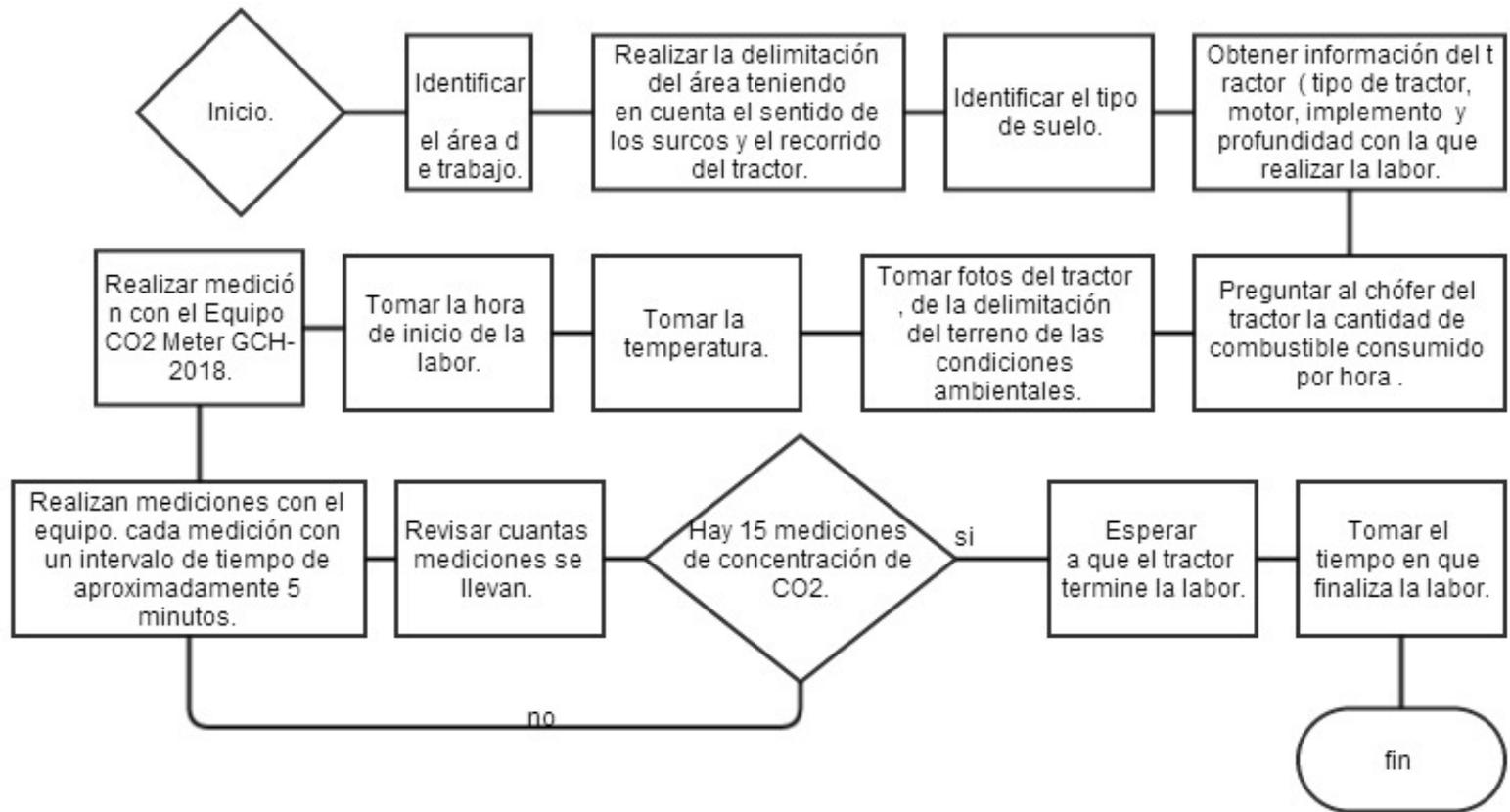
Para la toma de los datos es importante tener en cuenta que se harán distintas mediciones durante el desarrollo de cada una de las labores y en promedio se harán 15 mediciones en distintos momentos mientras que el tractor realiza la labor ver la figura 7 en donde se describe el proceso de medición. Con estos datos se obtendrá el valor promedio de concentración de emisiones de CO₂ partes por millón (PPM). Adicional a esto se obtendrá el valor teórico a partir de los factores de emisión planteados por las directrices del IPCC.

Imagen 1 Equipo de medición de CO₂ GCH-2018



Fuente: Manual del equipo.

Figura 10 Diagrama procedimiento obtención de datos.



Fuente: Elaboración propia.

5.2 ESTRATEGIA METODOLÓGICA

N°	Objetivo.	Etapas del proyecto	Actividades Críticas	Metodología Específica	Cronograma										Indicadores		
					8	9	10	11	12	1	2	3	4	5		6	
1	Caracterizar los procesos de operación en el cultivo de caña de azúcar.	Elaboración marco de referencia.	Investigación sobre el tema, conocimiento de los procesos productivo.	Búsqueda de información y análisis de la misma, bibliográfica	x	x	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Productividad= $\frac{\#consultas\ realizadas}{Tiempo\ utilizado.}$ Eficacia= $\frac{\#consultas\ realozadas}{\#consultas\ utilizadas}$
2		Conocimiento del proceso productivo de caña de azúcar.	Visitas de Campo. Evaluación de recursos de disponibles y conocimiento.	Esquematización de procesos en Visio.				X	x								Visitas de campo.
3	Identificar los procesos productivos que tienen mayor aporte a la huella de carbono.	Identificación de procesos claves.	Análisis de procesos. Procesos causales. Áreas de impacto.	Análisis de causa y efecto, diagramas causales en Vensim e identificación de procesos claves.							x	x					Efectividad= $\frac{\#procesos\ claves}{Proceso\ incluidos\ en\ el\ modelo}$

5.3 METODOLOGÍA DE MEDICIÓN.

Para el desarrollo de los objetivos 3 y 4, los cuales corresponden a:

- Diseñar una herramienta que permita estimar la huella de carbono para los procesos de estudio.
- Calcular un valor estimado de la huella de carbono para una hectárea de caña de azúcar sobre los procesos de estudio.

Es necesario determinar cómo se aplicará la metodología y adicional a esto establecer los factores de emisión que se tendrán en cuenta en la estimación de la huella de carbono para el cultivo de caña de azúcar comercial. Para esto tomaremos como base las directrices del IPCC para el 2006 y empezaremos a descomponer los módulos 1, 2 y 4 con sus respectivos capítulos siendo estos los que describen la metodología necesaria para el desarrollo de la herramienta, los cuales representan las categorías principales.

5.3.1 Recopilación de datos.

Teniendo en cuenta que para nuestro proceso de estudio, no se cuenta con información que haya sido obtenida por diferentes entidades gubernamentales o privados, y dado que este análisis se realiza por primera vez para un proceso de cultivo de caña de azúcar en Colombia; es importante considerarlo como proceso de nivel 1 y realizar la toma de datos desde cero; para esto se debe tener en cuenta la metodología que brinda las directrices del IPCC en el volumen cuatro para procesos de Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU), y el volumen dos para energía. Con el propósito de generar un valor estimado para la huella de carbono y sentar bases para estudios futuros, se identifican los principales procesos que agregan incertidumbre para la obtención de datos y su impacto directo en el resultado; permitiendo al ingenio en un futuro implementar proyectos con la vinculación de entidades oficiales que permitan recabar información más precisa para el proceso y con la coherencia requerida.

5.4 ELEMENTOS GENÉRICOS DEL PROGRAMA DE MEDICIÓN DE ACUERDO A LAS DIRECTRICES DEL IPCC.

5.4.1 Objetivo de medición:

Estimación de la huella de carbono en los procesos de subsolado, rastro arado, surcado, aplicación de fertilización química y herbicidas en una hectárea de cultivo de caña de azúcar.

4.4.2 Protocolo de metodología:

Para nuestro análisis nos vamos a centrar en los procesos de preparación, adecuación, siembra, control de plagas y uso de fertilizantes del cultivo de caña de azúcar de forma comercial.

Los componentes sobre los que se basará nuestro estudio son: uso de maquinaria, fertilizantes y herbicidas ya que son las fuentes principales de emisión para nuestro proceso de cultivo en el área delimitada que en nuestro caso será de una hectárea.

El método que vamos a utilizar es el muestreo directo donde se realizará un estudio del tiempo que tarda la maquina en realizar cada uno de los proceso, con esto se obtendrá las cantidades de combustible, fertilizantes y herbicidas que interactúan en la hectárea dispuesta por el ingenio.

Antes de iniciar la toma de datos, se debe realizar la delimitación de la zona sobre la cual se va a tomar la medición esto se hará con un decámetro de 50 metros y se delimitará la zona en la que se procederá a tomar los datos.

Adicional se tomarán datos como el tiempo, las condiciones de los tractores que intervienen para determinar el consumo de ACPM por hora, y con esto encontrar los valores para cada una de las labores, adicional se tendrá en cuenta la información obtenida con el equipo GCH-2018 que permite obtener la concentración de emisiones de CO₂ con el fin de realizar un contraste entre el resultado obtenido de forma teórica con las factores de emisión que nos provee el IPCC y el real que se obtiene por medio de la herramienta. Para esto es importante tener en cuenta factores como las condiciones ambientales al momento de la toma de datos, como temperatura y nivel de humedad que pueden afectar de manera significativa el resultado obtenido por la herramienta.

5.4.2 Plan de medición:

Para cada labor se tomarán en cuenta los siguientes datos: Condiciones ambientales al inicio y finalización de la toma de datos y el tiempo de duración de cada labor. Adicionalmente se debe tener en cuenta consideraciones especiales tales como la verificación del flujo de los procesos con el fin de identificar si se presentaron algunas variaciones ya sea que se realicen más o menos pasadas durante la toma de los datos, con el fin de especificar la razón por la cual se realizó la variación en la labor y lograr disminuir la variabilidad del este. Esto es importante ya que en nuestro proceso de medición se tendrá la presunción de un proceso estandarizado, es decir un proceso que tiene en cuenta la labores principales que interactúan en todo proceso de cultivo de caña de azúcar y no se tendrán en cuenta las labores que son atípicas es decir labores que depende exclusivamente de las condiciones del terreno o del tipo de la forma en que se

realizó el corte de la caña. Finalmente se deberá describir el tipo de terreno sobre el cual se está desarrollando la labor.

En la toma de datos, se debe tener en cuenta que no es posible recolectar información durante diferentes periodos de tiempo, y que no se cuenta con información anterior; por lo cual el IPCC permite tomar datos durante un periodo de tiempo que no es año calendario y desarrollar este proyecto durante los primeros meses del año. Se debe registrar con exactitud las fechas en que se realice el muestreo con el fin de que en estudios futuros se pueda completar la serie temporal y hacer un uso coherente de estos datos.

Tabla 4 Plan de recolección de datos de la actividad

Datos requeridos	Fuente
Desplazamiento de maquinaria dentro de la suerte	Datos de evaluación de la labor
Consumo de combustible de la maquinaria	Datos secundarios/promedio
Cantidad de herbicidas y fertilizantes que intervienen en la hectárea	Datos evaluación de la labor
Factores de Emisión	Datos secundarios/estándar

Fuente: Ingenio

5.4.3 Factores de emisión:

Son valores que convierten la cantidad de los datos de la actividad (combustión, material, proceso de entradas y salidas) en emisiones de gases de efecto invernadero. Estos se expresan generalmente kilogramos de CO₂ equivalente en unidades de "Kg CO₂e" y suelen provenir de fuentes secundarias.

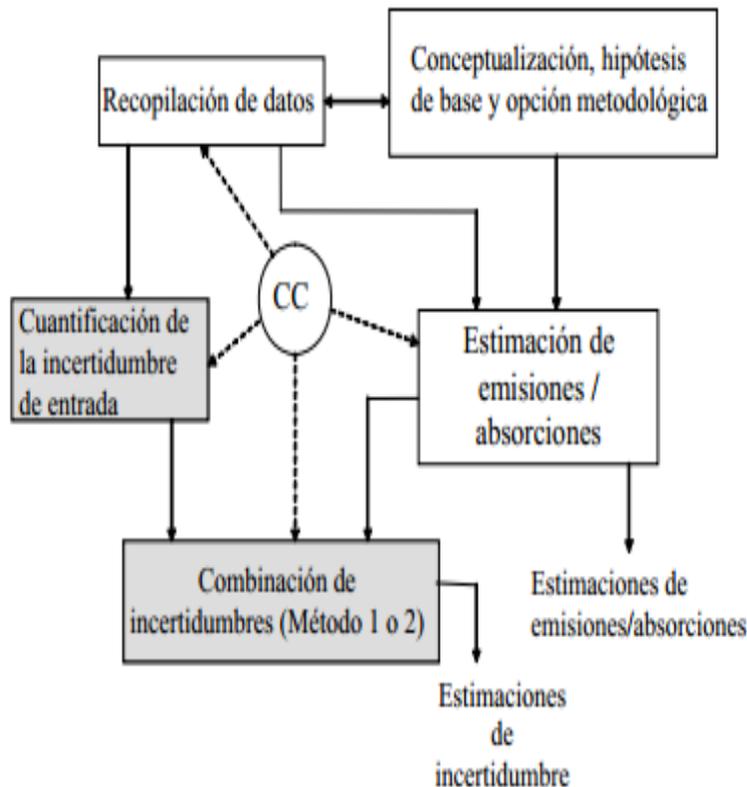
Teniendo en cuenta que no existen estudios disponibles avalados por entes oficiales del país, y que este tipo de estudio se realiza por primera vez en el sector azucarero en Colombia, no existe información para los fertilizantes y herbicidas, por lo tanto se realizara un análisis centrado en los factores por defecto del IPCC y los métodos del Nivel 1 que se enfoca en factores estandarizados a nivel internacional. Por el lado de los combustibles hay que tener en cuenta que en Colombia se han establecido factores de emisión que se pueden utilizar para realizar un análisis de nivel 2. Pero dado que esta en una investigación de nivel 1, también se evaluarán por medio de la metodología del IPCC.

5.4.4 Incertidumbre:

El análisis de incertidumbre se utiliza como un medio que busca que el proceso de medición y evaluación de datos sea el adecuado y que permita identificar problemas críticos en la toma de datos con el fin de que en estudios futuros se reduzca la incertidumbre sobre la toma de estos.

Principalmente en la toma de datos y en el cálculo final de la Huella de carbono es necesario determinar las incertidumbres en las variables individuales utilizadas en el inventario; como lo son las estimaciones de emisiones procedentes de categorías específicas, factores de emisión y datos específicos de la actividad. Con el fin de tenerlas en cuenta al momento de la suma de las incertidumbres de cada actividad componente al inventario total. Finalmente esto sirve ya que permite identificar fuentes significativas de incertidumbre en el inventario, para ayudar a priorizar la recopilación de datos y los esfuerzos destinados a mejorar el inventario en estudios posteriores.

Ilustración 2 Estructura General de un análisis de Incertidumbre genérico



Fuente: (incertidumbre de las directrices del IPCC 2006, 2006)

En la ilustración 6 se presenta la estructura general para tener en cuenta la incertidumbre sobre el proceso a evaluar con el fin de obtener una mejor aproximación a la huella de carbono. A partir de esto se desarrolló la esquematización para nuestro proceso de estudio.

Inicialmente se debe tener en cuenta la conceptualización, para esto es importante plantear un conjunto de hipótesis que permitan identificar las principales fuentes de incertidumbre para el proceso de estimación de la huella de carbono en el cultivo de caña de azúcar de forma tecnificada. En nuestro caso la principal fuente de incertidumbre es la ubicación de la suerte, ya que de esta depende el tipo de terreno sobre el cual se realiza el estudio y esto tiene una influencia directa en el tiempo en que se demoran en realizar la labor y sobre el número de pases que se deben realizar para obtener una labor que cumpla con los requisitos del ingenio ya que esto determina el número de pases que se debe realizar. Otra fuente de incertidumbre es el tipo de corte que se realiza al finalizar el proceso de cultivo de caña de azúcar ya que dependiendo de la forma en que se realice puede dejar más o menos desechos sobre el terreno lo que tiene un impacto directo sobre el número de pases y los procesos que se deben realizar al momento de la preparación del suelo.

Para la combinación de las incertidumbres de las distintas actividades del proceso de medición nos centraremos en el método 1, ya que es un procedimiento relativamente simple, el cual implica el uso de una hoja de cálculo, que parte de las hipótesis antes mencionadas permitiendo simplificar los cálculos. Según las directrices del IPCC en el volumen 1 modulo 3. Existen ocho causas de incertidumbre. Para el desarrollo del proyecto nos centraremos en cuatro causas: la primera es la falta de exactitud dado que para nuestro análisis no se cuenta con un proceso de medición ya establecido por entes estadísticos privados o gubernamentales. La segunda fuente de incertidumbre en el modelo es que a pesar de que para la mayor proporción del cálculo se hará uso de un modelo simple de multiplicación de factores, nos encontramos que para la transformación de los datos de entrada del modelos sobre los procesos donde intervienen fertilizantes y herbicidas se hace un poco más complejo lo que agrega distintas fuentes de incertidumbre como lo son: la base temporal sobre la que se realiza la medición no es lo suficientemente representativa; adicionalmente estas entradas son aproximaciones que se basan en información limitada lo que crea incertidumbres adicionales. La tercera fuente de incertidumbre es el error en la medición este tipo de error se da por un error aleatorio o sistemático, que es el resultado de los errores producidos en las etapas de medir, registrar y transmitir la información, los Instrumentos, los valores inexactos de los parámetros de medición o los valores por defecto de las Directrices del IPCC. Finalmente por datos faltantes puede haber incertidumbres en los casos en los que se intentó efectuar las mediciones, pero no había ningún valor.

Dado que nuestro proceso es una aproximación de la huella de carbono y al basarnos en los factores de emisión que nos brinda el IPCC sabemos que existe un alto nivel de incertidumbre, pero a medida que se creen estudios para el gremio y teniendo en cuenta las condiciones y reglamentaciones ambientales de nuestro país, el nivel de incertidumbre se debe reducir ya que el modelo es más adecuado a nuestras condiciones y por lo tanto se lograra una estimación más acertada.

Como nos muestran las directrices del IPCC es importante que al momento de estimar la incertidumbre de los datos de las emisiones medidas, las consideraciones deben incluir: (a) la representatividad de los datos y el potencial de sesgo; (b) la precisión y exactitud de las mediciones; (c) el tamaño de la muestra y la variabilidad interindividual de las mediciones, así como sus implicancias para la incertidumbre en las emisiones/absorciones anuales medias; (d) la variabilidad interanual de las emisiones/absorciones y si las estimaciones se basan en un promedio de varios años o en un año en particular.¹⁴

Finalmente dado que nuestro cálculo se realiza sobre una medición de categoría 1, donde no existe posibilidad de encontrar información que sea brindada por expertos o por entidades que respalden la información, y adicional a esto no se puede hallar incertidumbres por procesos o actividad dado que no existe esa información, tomaremos como niveles de incertidumbre las establecidas en el volumen 4 para cada uno de los factores de emisión que tengan relación con nuestro proyecto. Pero cabe resaltar que el largo plazo deberá ser posible el cálculo de incertidumbres como lo muestra el volumen 1 capítulo 3 de acuerdo al método 1 de estimación de incertidumbre, lo que permitiría obtener incertidumbres que se adecuen a nuestro proceso de estudio y que de mayor veracidad al proceso de medición.

¹⁴ (incertidumbre de las directrices del IPCC 2006, 2006) Op. cit., p. 16.

Tabla 5 cálculo de incertidumbre método

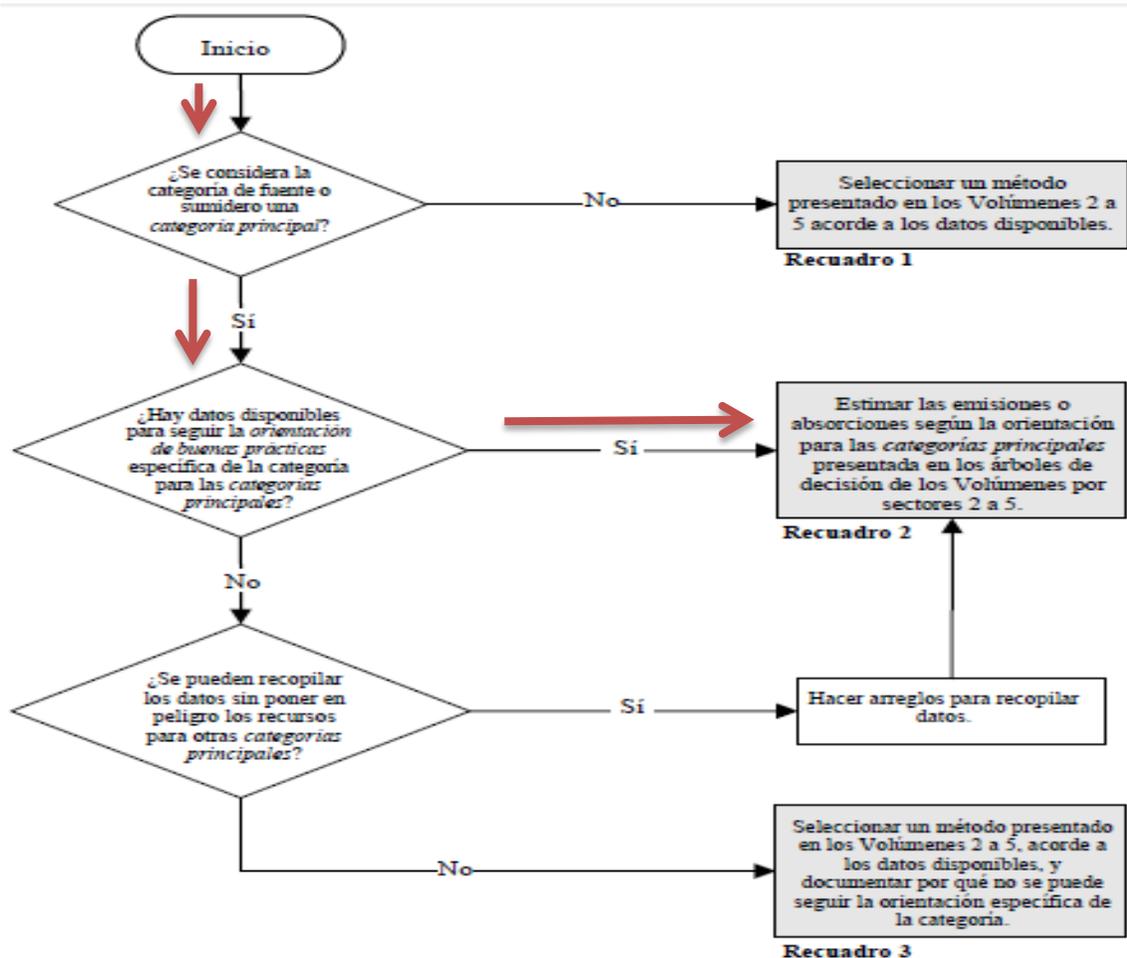
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Categoría del IPCC	Gas	Emisiones o absorciones del año de base	Emisiones o absorciones del año <i>t</i>	Incertidumbre de los datos de la actividad	Incertidumbre del factor de emisión / parámetro de estimación	Incertidumbre combinada	Contribución a la varianza por categoría en el año <i>t</i>	Sensibilidad del tipo A	Sensibilidad del tipo B	Incertidumbre en la tendencia de las emisiones nacionales introducida por la incertidumbre del factor de emisión / parámetro de estimación	Incertidumbre en la tendencia de emisiones nacionales introducidas por la incertidumbre de los datos de la actividad	Incertidumbre introducida en la tendencia en el total de emisiones nacionales
		Datos de entrada	Datos de entrada	Datos de entrada Nota A	Datos de entrada Nota A	$\sqrt{E^2 + F^2}$	$\frac{(G \cdot D)^2}{(\sum D)^2}$	Nota B	$\left \frac{D}{\sum C} \right $	I • F Nota C	J • E • $\sqrt{2}$ Nota D	$K^2 + L^2$
		Equivalente de Gg CO ₂	Equivalente de Gg CO ₂	%	%	%		%	%	%	%	%
P. ej., 1.A.1. Energía Industrias Combustible 1	CO ₂											
P. ej., 1.A.1. Energía Industrias Combustible 2	CO ₂											
Etc.	...											
Total		$\sum C$	$\sum D$				$\sum H$					$\sum M$
					Porcentaje de incertidumbre del inventario total:		$\sqrt{\sum H}$				Incertidumbre de la tendencia:	$\sqrt{\sum M}$

Fuente: (incertidumbre de las directrices del IPCC 2006, 2006) Op. cit., p. 34.

5.4.5 Metodología e identificación de categorías principales:

La importancia de identificar la categoría principal es que permite identificar las categorías que realizan el mayor aporte a la incertidumbre general del inventario, para usar más eficazmente los recursos disponibles, según la definición de las directrices del IPCC se considera una categoría principal porque su estimación influye significativamente 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. Para definir la categoría principal nos basaremos en el siguiente árbol de decisión:

Figura 11 Árbol de decisión



Fuente: (incertidumbre de las directrices del IPCC 2006, 2006) Op. cit., cap.4.

Tomando como base la figura 8 y dado que esta nos sirve para elegir la categoría principal y al contar con la información requerida para realizar el análisis sobre nuestro proceso de estudio, se podrá realizar un análisis de nivel 1. Para esto se utilizarán los factores de emisión del IPCC y adicional se toman los datos de la actividad más básicos y menos desagregados con el fin de crear un punto de partida que permita realizar estudios posteriores.

Para desarrollar el estudio se tomara en cuenta las categorías descritas por el IPCC para las actividades que influyen en el proceso de cultivo de caña de azúcar. Teniendo en cuenta esta información, en la siguiente tabla se muestra las categorías a evaluar y el tipo de emisión a estudiar.

Tabla 6 Nivel sugerido de agregación de análisis para el método 1.

Código de la categoría	Título de la categoría	Gases que deben evaluarse	Proceso
1A3b	Actividades de quema de combustible – Transporte – Transporte terrestre	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄	Todos
3C3	Aplicación de urea	CO ₂	Fertilizante
3	Varios	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Fertilizantes y herbicidas.

Fuente: (incertidumbre de las directrices del IPCC 2006, 2006) Op. cit., cap.4.

5.5 FACTORES DE EMISION

Los factores de emisión de los gases efecto invernadero en cada una de las categorías principales permitirá estimar la huella de carbono, tomando como base el volumen 4 que brinda orientación para la preparación de los inventarios anuales de gases de efecto invernadero en el sector de agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU por sus siglas en inglés). Para el sector AFOLU, las emisiones antropogénicas y absorciones por sumideros de gases de efecto invernadero se definen como aquellas que se producen en «tierras gestionadas». La tierra gestionada es aquella en la que ha habido intervención humana y donde se han aplicado prácticas para la realización de actividades de producción, ecológicas o

sociales.¹⁵ Los gases de efecto invernadero que son mayor motivo de preocupación son el CO₂, el N₂O y el CH₄ que para nuestro estudio pertenecen a los procesos de fertilización y control de malezas con el uso de los herbicidas; adicionalmente haremos uso del módulo 2 donde se tendrá en cuenta la combustión producida por las fuentes móviles que intervienen en los procesos sobre los que se realizara la aproximación de la huella de carbono para el cultivo de caña de azúcar.

5.5.1 USO DE TIERRA

Hay que tener en cuenta que el enfoque de nuestro proyecto es sobre el sector de agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU por sus siglas en ingles), en tierra de cultivo que permanece con el mismo tipo de planta. Para el análisis de preparación de suelo solo tendremos en cuenta el consumo de las maquinas en la realización de los proceso de preparación de suelo en términos de combustible. No se tendrán en cuenta el análisis de pérdida y ganancias de biomasa, y materia orgánica muerta (hojarasca). dado que estas solo se calculan cuando se trata de cultivos leñosos perennes ya que se supone que en los cultivos anuales, el incremento de las existencias de biomasa de cada año equivale a las pérdidas de biomasa producidas por la cosecha y la mortalidad en ese mismo año por ende, no hay una acumulación neta de existencias de carbono.

No se tendrá en cuenta la hojarasca como materia orgánica muerta como un factor que influye directamente en las emisiones de gases efecto invernadero. Por lo tanto se dará un enfoque que se centra en el impacto que esta produce sobre el número de pases que debe realizar la maquinaria para efectuar las labores de preparación de suelo y este impacto se ve sobre las emisiones por combustión ya que implica un mayor uso de combustible. Ya que dependiendo del tipo de corte que se realice sobre la caña es decir de forma mecánica, manual utilizando la quema ya que influye en la cantidad de residuos de las hojas que queda al final de la labor de corte y por tanto en el número de pases.

Finalmente no se contara con las emisiones de gases de efecto invernadero que se produce a partir del quemado de biomasa. Debido a que por medidas sancionarias del gobierno, el ingenio evita el uso de la quema que facilita el corte manual por parte de los cañeros y para esto implementa el corte mecánico para el cual no es necesaria la quema.

5.5.2 COMBUSTION

Una de las principales fuentes de emisión de CO₂ para nuestro inventario es el combustible, este tiene un gran impacto en todas las labores ya que estas se

¹⁵ (Directrices del IPCC, Directrices del IPCC, volumen 4 cap. 1: introducción pág. 5, 2006)

realizan de forma tecnificada. Adicional a esto el sector energético suele ser el más importante de los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero y, comúnmente, aporta más del 90 por ciento al total del inventario¹⁶, ya que el consumo de combustible está presente en todas las labores del proceso de cultivo de caña de azúcar, Teniendo en cuenta esto y utilizando las directrices del IPCC para obtener los factores de emisión y las fórmulas que nos permitan tener una aproximación al cálculo de la huella de carbono.

El 90% de las emisiones de CO₂ que provienen del sector energético se encuentra dividido en dos, las cuales son; La combustión estacionaria donde sus principales fuentes de emisión provienen de las centrales eléctricas y las refinerías y La combustión móvil que incluye el tránsito terrestre provoca alrededor de un tercio de las emisiones del sector energético, finalmente para nuestro estudio nos centraremos en las fuentes de emisión móvil.

Según las directrices del IPCC, la quema del combustible puede definirse como la oxidación intencional de materiales dentro de un aparato diseñado para suministrar calor o trabajo mecánico a un proceso, o para utilizar fuera del aparato.

Para iniciar el análisis es necesario definir el tipo de combustible usado por el ingenio según la definición de las directrices del IPCC. Gas/Diesel incluye los gasóleos pesados, los gasóleos se obtienen de la mínima fracción de la destilación atmosférica del petróleo crudo, mientras que los gasóleos pesados se obtienen por re destilación en vacío del residual de la destilación atmosférica. El gas/diesel se destila entre los 180 °C y los 380 °C.

Ecuación 2 Conversión de Unidades de Energía

$$VC_{neto} = VC_{bruto} - 0,21H - 0,0245M - 0,008Y$$

Unidades: MJ/KG – Mega julios por Kilogramo: 1 MJ/KG=1 Giga julio/Tonelada (GJ/tonelada)

VC= valor calórico

VC bruto (VCB) o valor de calentamiento mayor (VCM)

VC neto (VCN) o valor de calentamiento menor (VCMen)

M es el porcentaje de humedad, H es el porcentaje de Hidrogeno, Y es el porcentaje de oxigeno

¹⁶ (Directrices del IPCC, volumen 2 energía, capítulo 1 pág. 5, 2006)

Tabla 7 Valor calórico neto para análisis nivel 1 según el IPCC.

VALORES CALÓRICOS NETOS (VCN) POR DEFECTO Y LÍMITES INFERIOR Y SUPERIOR DE LOS INTERVALOS DE CONFIANZA DEL 95%				
Tipo combustible	de	VCN (TJ/KG)	Inferior	Superior
Diesel		43	41,4	43,3

Fuente: (Directrices del IPCC, volumen 2 energía, capítulo 1 pág. 5, 2006)

5.5.3 Combustión Móvil:

Las fuentes móviles producen emisiones de gases directos de efecto invernadero como lo son el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) procedentes de la quema de diversos tipos de combustible, en este análisis nos centraremos en el transporte terrestre del ingenio que utiliza para realizar las distintas actividades para el cultivo de la caña de azúcar, el tipo de combustible sobre el que centraremos el estudio es el Diesel y lo enfocaremos en el consumo de los tractores, camiones y camionetas visto desde el punto de vista de kilómetros recorrido y tiempo de duración de las labores de estudio, teniendo en cuenta las Emisiones de la quema y evaporación de combustible.

Los procesos de combustión se optimizan para derivar la cantidad máxima de energía por unidad de combustible consumido, con lo que se logra la máxima cantidad de CO₂. La quema eficaz del combustible garantiza la oxidación de la máxima cantidad de carbono disponible en el combustible. Los factores de emisión de CO₂ correspondientes a la quema de combustible son, por lo tanto, relativamente insensibles al proceso de quema en sí y, por ello, dependen casi en forma exclusiva del contenido de carbono del combustible.

Una pequeña parte del carbono combustible que ingresa en el proceso de combustión escapa a la oxidación. Esta fracción suele ser pequeña (99 a 100 por ciento del carbono se oxida) y los factores de emisión por defecto se derivan sobre la hipótesis de la oxidación del 100 por ciento. En el caso de algunos combustibles, esta fracción puede no ser insignificante en la práctica y si hay disponibles valores representativos específicos del país se los debe utilizar.

Tabla 8 Valores por Defecto del Contenido de Carbono.

VALORES POR DEFECTO DEL CONTENIDO DE CARBONO				
Tipo combustible	de	Contenido de carbono por defecto (kg/GJ)	Inferior	superior
Diesel		20,2	19,8	20,4

Fuente: (Directrices del IPCC, volumen 2 energía, capítulo 1 pág. 5, 2006)

Los factores de emisión de CO₂ se basan en el contenido de carbono del combustible y deben representar el 100 por ciento de oxidación del carbono combustible.

Tabla 9 Factores de emisión de CO₂ por defecto para la combustión

FACTORES DE EMISIÓN DE CO ₂ POR DEFECTO PARA LA COMBUSTIÓN					
Tipo combustible	de	Contenido de carbono por defecto (kg/GJ)	Factor de oxidación de carbono por defecto	Factor de emisión de CO ₂ eficaz (kg/TJ)	
				Valor por defecto	Intervalo de confianza del 95%
		A	B	$C = \frac{A \cdot B \cdot 44}{12 \cdot 1000}$	Inferior superior
Diesel		20,2	1	74100	72600 74800

Fuente: (Directrices del IPCC, volumen 2 energía, capítulo 1 pág. 5, 2006)

Los índices de emisión de CH₄ y N₂O dependen principalmente de la combustión y de la tecnología de control de emisiones presentes en los vehículos.

Tabla 10 Factores de emisión por defecto para las fuentes y maquinaria todo terreno

FACTORES DE EMISIÓN POR DEFECTO PARA LAS FUENTES Y MAQUINARIA MÓVILES TODO TERRENO						
	CO2 (KG/TJ)			CH4(KG/TJ)		
Fuente todo terreno	Por defecto	Inferior	Superior	Por defecto	Inferior	Superior
Agricultura	74100	72600	74800	4,15	1,67	10,4
	N2O(KG/TJ)					
	Por Defecto	Inferior	Superior			
	28,6	14,3	85,9			

Fuente: (Directrices del IPCC, volumen 2 energía, capítulo 1 pág. 5, 2006)

Fórmulas para combustión

Cálculo de emisiones de CO2:

La mejor forma de calcular las emisiones de CO2 es sobre la base de la cantidad y el tipo de combustible quemado y su contenido de carbono.

Ecuación 3 CO2 del transporte terrestre

$$Emision = \sum combustible * EF$$

Dónde:

Emisión = Emisión de CO2 (KG)

Combustible =Combustible Vendido (TJ)

EF =Factor de emisión (Kg/TJ) es igual al contenido de carbono de combustible multiplicado por 44/12

5.5.4 CALCULO DE EMISIONES DE CH4 Y N2O:

Las emisiones de CH4 y N2O son más difíciles de estimar con exactitud que las del CO2 porque los factores de emisión dependen de la tecnología del vehículo,

del combustible y de las condiciones de uso. Tanto de los datos de la actividad basados en la distancia (p. ej., vehículo-kilómetros recorridos).

Ecuación 4 Emisiones de nivel 1 de CH₄ y N₂O

$$Emision = \sum combustible_{ab} * EF$$

Dónde:

Emisión = Emisión en KG.

Combustible =Combustible Vendido (TJ).

EF =Factor de emisión (Kg/TJ).

a =tipo de combustible.

b =tipo de vehículo.

5.6 HERBICIDAS Y FERTILIZANTES

Para realizar una mejor aproximación de la huella de carbono en el cultivo de caña de azúcar comercial es necesario contemplar las emisiones de gases efecto invernadero que genera el uso de herbicidas y fertilizantes y para esto continuaremos haciendo uso de las directrices del IPCC de 2006.

Emisiones de N₂O de suelos gestionados:

De acuerdo a las directrices del IPCC “El óxido nitroso se produce naturalmente en los suelos a través de los procesos de nitrificación y desnitrificación. La nitrificación es la oxidación microbiana aeróbica del amonio en nitrato y la desnitrificación es la reducción microbiana anaeróbica del nitrato en gas de nitrógeno (N₂). El óxido nitroso es un producto intermedio gaseoso en la secuencia de reacción de la desnitrificación y un producto derivado de la nitrificación que se fuga de las células microbianas al suelo y, en última instancia, a la atmósfera. Uno de los principales factores de control de esta reacción es la disponibilidad de N inorgánico en el suelo. Por lo tanto, mediante esta metodología, se estiman las emisiones de N₂O utilizando agregados netos de N a los suelos inducidos por el hombre o por mineralización del N en la materia

orgánica del suelo producido por drenaje/gestión de suelos orgánicos o por cambios en los cultivos/uso de la tierra en suelos minerales”.¹⁷

Emisiones directas de N₂O

Para el análisis se tienen las siguientes fuentes de N que permite estimar las emisiones directas de N₂O de suelos gestionados:

Fertilizante sintético aplicado (FSN)

El término FSN se refiere a la cantidad anual de fertilizante sintético de N aplicado a los suelos. Se estima a partir de la cantidad total de fertilizante sintético consumida por año. Los datos del consumo anual de fertilizante se recopilaron a partir de los datos suministrados por la empresa.

Fertilizantes de N orgánico aplicados (FON)

El término fertilizante de N orgánico aplicado (FON) se refiere a la cantidad de aportes de N orgánico aplicada a los suelos que no provengan de animales en pastoreo. En este cálculo se incluye la cantidad anual de compost.

Ecuación 5 Fertilizantes de N orgánico aplicado

$$F_{ON} = F_{COMP}$$

Donde

FON = cantidad total anual de fertilizante de N orgánico aplicada a los suelos, excepto el de animales en pastoreo, kg N año⁻¹

FCOMP = cantidad anual del total de N de compost aplicada a los suelos (asegurarse de que no haya cómputo doble del N de estiércol del compost), kg N año⁻¹

Para el cálculo de las emisiones de N₂O directa vamos a hacer uso de la siguiente fórmula.

Ecuación 6 emisiones directa de N₂O

$$N_{2O_{directas}} - N = N_{2O} - N_{N_{aportes}}$$
$$N_{2O} - N_{N_{aportes}} = [(F_{SN} + F_{ON}) * EF_1]$$

¹⁷ (Vol 4 IPCC, 2006)

Dónde:

$N_2O_{Directas-N}$ = emisiones directas anuales de N_2O-N producidas a partir de suelos gestionados, kg $N_2O-N/año$

N_2O-N aportes N = emisiones directas anuales de N_2O-N producidas por aportes de N a suelos gestionados, kg $N_2O-N/año$

FSN = cantidad anual de N aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético, kg N/año

FON = cantidad anual de estiércol animal, compost, lodos cloacales y otros aportes de N aplicada a los suelos (Nota: Si se incluyen los barros cloacales, realizar una verificación cruzada con el Sector Desechos para asegurarse de que no hay cómputo doble de las emisiones de N_2O del N contenido en los barros cloacales), kg N /año

EF1 = factor de emisión para emisiones de N_2O de aportes de N, kg $N_2O-N / (kg$ aporte de N)

5.4.5 FACTOR DE EMISIÓN N_2O

El FE1 se refiere a la cantidad de N_2O emitida por las distintas aplicaciones de N sintéticas y orgánicas a los suelos, incluyendo los residuos agrícolas.

Tabla 11 Factores de Emisión de N_2O

FACTORES DE EMISIÓN POR DEFECTO PARA ESTIMAR LAS EMISIONES DIRECTAS DE N_2O DE LOS SUELOS GESTIONADOS		
Factor de emisión	Valor por defecto	Rango de incertidumbre
FE1 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 $N_2O-N/(kg$ N)]	0,01	0,003 – 0,03

Fuente: (Vol 4 IPCC, 2006). Op. cit., Cap. 11.

5.4.6 Emisiones de CO₂ de fertilización con urea

El agregado de urea a los suelos durante la fertilización conduce a una pérdida de CO₂ que se fija en el proceso de producción industrial. La urea (CO(NH₂)₂) se convierte en amonio (NH₄⁺), ión hidroxilo (OH⁻), y bicarbonato (HCO₃⁻) en presencia de agua y de enzimas de ureasa. Esta categoría de fuente se incluye porque la absorción de CO₂ de la atmósfera durante la fabricación de urea se estima en Sector de Procesos industriales y uso de productos.

Dado que no se tiene información referente a datos detallados sobre aplicación de urea y de información como para estimar la formación/disolución de carbonatos minerales, lixiviación y transporte de C inorgánico, e igualmente como no se dispone de datos y factores de emisión específicos del país, es necesario recopilar información para derivar un factor de emisión, por ahora se trabajará con el factor de emisión por defecto que es 0,20 ton C para emisiones de carbono por aplicaciones de urea.

Ecuación 7 Emisiones anuales de CO₂ por aplicación de urea

$$CO_2 - C \text{ emission} = M * EF$$

Dónde:

Emisión de CO₂-C = emisiones anuales de C por aplicación de urea, ton C año-1

M = cantidad anual de fertilización con urea, ton urea año-1

FE = factor de emisión, ton de C (ton de urea)-1

En este caso, se aplicará un factor de emisión general de 0,20 ton de carbono para urea, que es equivalente al contenido de carbono de la urea sobre la base de su peso atómico (20% para CO (NH₂)₂).

Multiplicar por 44/12 para convertir las emisiones de CO₂-C en CO₂

Finalmente al tener todo en emisiones de GEI como lo son el CH₄, CO₂ y N₂O es necesario llevar esto a unidades equivalentes de CO₂, lo que permite integrar los efectos de las emisiones de varios gases con el fin de ser comparados y mirar el impacto de cada uno de los gases sobre las emisiones totales del proceso de estudio.

5.7 Metodología Para la construcción de herramienta

Para el desarrollo de la metodología estudiada para la estimación de la huella de carbono en las labores agrícolas analizadas, la fertilización y uso de herbicidas en el área delimitada (1 hectárea), se elabora una herramienta que nos permite hacer un cálculo con los datos tomados durante las visitas de campo en el Ingenio y el uso de factores de conversión, emisión, corrección y demás, aportados por la metodología estudiada en busca de obtener el mejor resultado posible, teniendo en cuenta el nivel de incertidumbre establecido por las directrices del IPCC en los procesos y cálculos.

Principalmente la herramienta consta de una primera parte teórica en donde se instruye al usuario sobre los procesos productivos evaluados y otros más que más adelante puedan aportar a la herramienta; allí el usuario podrá conocer conceptos básicos de los procesos productivos del cultivo de caña de azúcar, para afianzar conocimientos para un mejor entendimiento.

La segunda parte consta de los datos básicos tales como: factores de conversión, factores de emisión y corrección, conversión de medidas de unidades, densidades y tablas formuladas que apoyan la calculadora de la huella de carbono en los resultados arrojados. Para mayor entendimiento se explicaran los factores y las operaciones que se llevan a cabo:

5.7.1 Factores:

Factores de conversión de unidades: Son proporciones numéricas que sirven para el cambio de unidades de medida.

Densidad: cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia) relación entre masa y volumen)

VCN (Valor Calórico Neto): Cantidad de energía neta que una masa puede liberar al oxidarse.

Factor de emisión: valor que permite calcular una medida de emisión de un tipo de sustancia o/u elemento ya estipulada por el factor.

Factor de conversión: fracción u/o unidad que permite calcular una medida ya estipulada por el factor.

5.8 Cálculos:

5.8.1 Combustión:

Tomamos como base un rendimiento de combustión obtenido en la toma de datos en campo (cantidad de combustible/Ha). Se estandariza el valor de consumo por cada actividad; teniendo en cuenta que la maquinaria agrícola (tractores) varía de una labor a otra.

(Estandarizado consumo de Diesel/Ha) * Factor de conversión de unidades

Se multiplica por la densidad del gas u/o elemento, para convertir la unidad de volumen (Galones, Metros³, Centímetro³), en unidades de masa (Toneladas, Kilogramos, Gramos).

(Unidad de medida masa) = # (unidad de medida volumétrica) * Densidad

Se multiplica la unidad de medida masa, por el VCN (Valor Calórico Neto). El cual es tomado por la metodología estudiada para la creación de la herramienta.

VCN = # (unidad de medida masa) * VCN (Diesel)

Se multiplica el VCN, por el factor de emisión (FE) de cada gas u/o elemento. Factor tomado del IPCC para la creación de la herramienta.

Kg emitidos por el gas (CO₂/NO₂/CH₄) = # VCN * Factor de emisión (FE) (CO₂/NO₂/CH₄)

Se multiplica los Kg emitidos por el gas, por el Factor de Conversión (FC) de cada gas. Factor tomado de GHG protocol para la creación de la herramienta.

CO₂ Kg equivalente = # Kg emitidos por el gas (CO₂/NO₂/CH₄) * factor de conversión (FC) (CO₂/NO₂/CH₄)

Por último se obtiene el total emitido (CO₂ Kg equivalente) en una hectárea específica, multiplicando la cantidad de ocasiones o veces que el tractor incurrió en esa labor, por cantidad de CO₂ Kg equivalente obtenida.

Cantidad total CO₂ Kg equivalente de gas emitido por una hectárea específica = # CO₂ Kg equivalente de gas * cantidad de ocasiones o veces que el tractor incurrió en esa labor en esa hectárea específica.

Tabla 12 Conversión de combustible a unidades equivalente de CO2

Labor 1

	5,15	Galones
	0,0195	m3
	16,5706	Kg
	0,000017	Gg
VCN	0,0007	Tj
	0,7125	Gj
Carbono	15,8183	Kg
CO2	52,7989	Kg
NO2	0,0204	Kg
CH4	0,0030	Kg
FC(CO2)	52,7989	Kg CO2equivalente
FC(NO2)	6,3173	Kg CO2equivalente
FC(CH4)	0,0621	Kg CO2equivalente
Total=	59,1783	Kg CO2equivalente

Densidad Diesel=	850	Kg/m3
1 Galon=	0,0037854	m3
1Gg=	1000000	Kg
1Tj=	1000	Gj
VCN Diesel=	43	Tj/Gg
Carbono=	22,2	Kg/Gj
CO2=	74100	Kg/Tj
NO2=	28,6	Kg/Tj
CH4=	4,15	Kg/Tj
Factor de conversion(CO2)=	1	CO2equivalente
Factor de conversion(NO2)=	310	CO2equivalente
Factor de conversion(CH4)=	21	CO2equivalente

Fuente: Elaboración propia

El procedimiento se repite para cada vehículo (tractor) empleado por cualquier labor que lo necesite y se toma como variable el rendimiento de combustible (Diesel) de cada motor de acuerdo al valor estandarizado.

5.8.2 Fertilizantes:

Para la fertilización del cultivo se requiere de dos cálculos. Emisiones por la combustión de maquinaria utilizada para la aplicación del producto y emisión del producto empleado para la fertilización. El cálculo del vehículo (tractor) ya ha sido explicado en la sección de combustión. Por lo tanto se tomara el cálculo del producto como objetivo principal en esta sección, tomando los productos Urea y Compost como material de cálculo.

5.8.2.1 Urea:

Para la realización de los cálculos tomamos como base una cantidad producto estandarizada obtenida en la toma de datos en campo (cantidad de Urea/año), asumiendo que esta cantidad es necesaria mínimo dos veces por año para una óptima fertilización del cultivo en esa hectárea.

(Estandarizado consumo de Urea/año) * Factor de conversión de unidades

Se multiplica por el factor de emisión (FE), para el hallar las Toneladas de C. Factor tomado del IPCC para la creación de la herramienta.

Ton emitidas de C = # (Estandarizado consumo de Urea/año) * Factor de emisión (Ton C/Ton urea)

Se multiplica las Ton emitidas de C, por el Factor de Conversión (FC) en Ton CO2. Factor tomado de la GHG protocol para la creación de la herramienta.

CO2 Kg equivalente = # Ton emitidas de C * factor de conversión Ton CO2

Tabla 13 Conversión fertilización con urea a unidades equivalente de CO2

Cantidad	300,00	Kg urea/año
	0,3000	Ton urea/año
Factor de emisión	0,0600	Ton C
FC(CO2)	0,2200	Ton CO2 equivalente
	3645,5295	Kg CO2 equivalente

Factor de emisión	0,2	Ton C/Ton urea
Factor de correccion(CO2)	3,67	Ton CO2
1 Ton=	1000,00	Kg

Total=	3645,5295	Kg CO2equivalente
---------------	-----------	-------------------

Fuente: Elaboración propia

5.8.2.2 Compost:

Para la realización de lo cálculos tomamos como base una cantidad producto estandarizada obtenida en la toma de datos en campo (cantidad de Compost/Ha), asumiendo que esta cantidad es necesaria durante cada ocasión o vez que la labor se lleve a cabo en esa hectárea.

(Estandarizado consumo de Compost/Ha) * Factor de conversión de unidades

Se multiplica por el porcentaje de Nitrógeno (N).

Cantidad de N = Kg de Compost * % de nitrógeno en Compost

Se multiplica por el factor de emisión (FE), para hallar las Toneladas de Óxido Nitroso (NO2). Factor tomado del IPC para la creación de la herramienta.

Ton emitidas de NO2 = # cantidad de N * Factor de emisión (Kg NO2/Kg N)

Se multiplica las Ton emitidas de NO₂, por el Factor de Conversión (FC) en Ton CO₂. Factor tomado de GHG protocol para la creación de la herramienta.

CO₂ Kg equivalente = # Ton emitidas de NO₂ * factor de conversión Ton CO₂

Tabla 14 Conversión fertilización con Compost a unidades equivalente de CO₂

	6,00	Ton Compost/Ha
	6000,0000	Kg Compost
% N en Compost	120,0000	Kg N
Factor de emision	1,2000	Kg NO ₂
	0,0012	Ton NO ₂
FC (NO₂)	0,3720	Ton CO ₂ equivalente
Total químico=	372,0000	Kg CO₂ equivalente

Factor de emision	0,01	Kg NO ₂ /Kg N
Factor de conversion(NO ₂)	310,00	Ton CO ₂
Porcentage en Compost	0,02	% N
1 Ton=	1000	Kg

Total=	555,8549	Kg CO₂equivalente
---------------	-----------------	-------------------------------------

Fuente: Elaboración propia

5.8.3 Herbicidas:

Para el control de herbicidas se requiere de dos cálculos. Emisiones por la combustión de maquinaria utilizada para la aplicación del producto y emisión del producto empleado para el control de Herbicidas. El cálculo del vehículo (tractor) ya ha sido explicada en la sección de combustión (vea arriba). Por lo tanto se tomara el cálculo del producto como objetivo principal en esta sección; se evaluara el producto constituido por un 80% de Urea y el 20% restante de Azufre.

5.8.3.1 Urea:

Tomamos como base una cantidad producto estandarizada obtenida en la toma de datos en campo (cantidad de Urea/año), asumiendo que esta cantidad es necesaria para una óptima aplicación de herbicidas en el cultivo por hectárea.

(Estandarizado consumo de Urea/Ha) * Factor de conversión de unidades

Se multiplica por el factor de emisión (FE), para el hallar las Toneladas de C. Factor tomado del IPC para la creación de la herramienta.

$$\# \text{ Ton emitidas de C} = \# (\text{Estandarizado consumo de Urea/Ha}) * \text{Factor de emisión (Ton C/Ton urea)}$$

Se multiplica las Ton emitidas de C, por el Factor de Conversión (FC) en Ton CO2. Factor tomado de GHG protocol para la creación de la herramienta.

$$\# \text{ CO2 Kg equivalente} = \# \text{ Ton emitidas de C} * \text{factor de conversión Ton CO2}$$

Es necesario convertir de toneladas a kg debido a que durante el cálculo las unidades de CO2 equivalente se manejan en KG.

Tabla 15 Conversión uso de herbicidas con urea a unidades equivalente de CO2

	9,60	Galones
	36339,8400	cm ³ urea
	47968,5888	g urea
	0,0480	Ton urea
Factor de emision	0,0096	Ton C
FC(CO2)	0,0352	Ton CO2 equivalente
Total Químico=	105,5309	Kg CO2 equivalente

Factor de emision	0,2	Ton C/Ton urea
Factor de correccion	3,67	Ton CO2
Densidad de la urea	1,32	g/cm ³
1 Galon=	3785,4	cm ³
1 Ton=	1000000	g
1 Ton=	1000	Kg

Fuente: Elaboración propia

Para la aplicación de Herbicida se debe considerar si el terreno es plantilla (terreno al cual se le debe extraer las raíces del cultivo anterior y sembrar nuevas) o es sepa (terreno que posee las raíces en condiciones de obtener otra cosecha). Dependiendo de este factor las labores se deben hacer dos (2) veces para plantilla o tres (3) para sepa.

Por último la herramienta consta con un formulario que interactúa con el usuario para su mejor entendimiento y con una tabla con los valores resumidos que discrimina los resultados obtenidos por Labor, Fertilización y Herbicidas; y

finalmente un resultado estimado de la huella de carbono ocasionado por las actividades realizadas en dicha hectárea.

Figura 12: formulario

BIENVENIDO

Ahora podra estimar la huella de carbono que genera su cultivo de caña de azucar por hectaria.
Por favor diligencie los siguientes campos teniendo en cuentas las veces que ejecuto la labor:

LABORES:

Subsolado:

Rastroarado:

Surcado:

FERTILIZANTES:

Urea:

Compost:

HERBICIDAS:

El cultivo es:

Plantilla Soca

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16 tabla que resume cada uno de los proceso y sus respectivas emisiones

ESTIMACION HUELLA DE CARBONO								
	Combustión					Químico		
		CO2	NO2	CH4	Total CO2	FERTILIZANTE	HERBICIDA	
Labor	mo de ACPM	FC CO2 (Kg equi)	FC CO2 (Kg equi)	FC CO2 (Kg equi)	CO2 (Kg equi)	Urea (Kg equi)	Compost (Kg equi)	Urea 80-20 (Kg equi)
Subsolada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Rastroarado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Surcado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Fertilizacion urea	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Fertilizante Compost	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	
Herbicida urea 80-20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00
TOTAL=	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
					Total Kg CO2 equivalente generados por la hectaria	0,00		

Fuente: Elaboración propia

6 DESARROLLO DEL PROYECTO

Como parte del cumplimiento de objetivos del proyecto de grado se iniciaron las labores de campo en busca de satisfacer los dos primeros, los cuales son:

- Caracterizar los procesos de subsolado, rastro arado, surcado, fertilización química y herbicidas en el cultivo de caña de azúcar.
- Identificar cuál de los procesos productivos de estudio tiene más emisiones de gases efecto invernadero.

A partir de las visitas realizadas al ingenio y teniendo en cuenta los procesos de estudio enunciados en la tabla 4 se realizara la descripción de estos procesos.

6.1 Procesos de preparación de Suelo:

6.1.1 Subsollada

La primera labor evaluada fue la Subsollada, este proceso se realiza con el objetivo de roturar, des compactar, mejorar la aireación y el drenaje interno Durante esta labor interviene un tractor 8420 marca John Deere enllantado dualmente en la parte posterior, con un motor de potencia de 220 H.P, tipo de combustible ACPM y con disposición de enganche hidráulico y de tiro, alcanzando una profundidad de 40 centímetros.

Imagen 2 Labor Subsollado



Esta labor inicio a las 11:19 AM y finalizo a las 1:03 PM con una temperatura de 34,9 grados centígrados para una duración total de 1 hora y 43 minutos con un consumo de ACPM de 6 galones por hora al realizar una regla de tres se determina que el consumo de gasolina total para la duración total del proceso es de 10,3 galones , durante todo el recorrido el conductor mantuvo una velocidad constante de 8, 4 KM cuando el camión se desplaza en línea recta y unas

revoluciones por minuto de 2250 dentro de área y en las vueltas la velocidad fue de 5,3 KM y 1500 revoluciones por minuto.

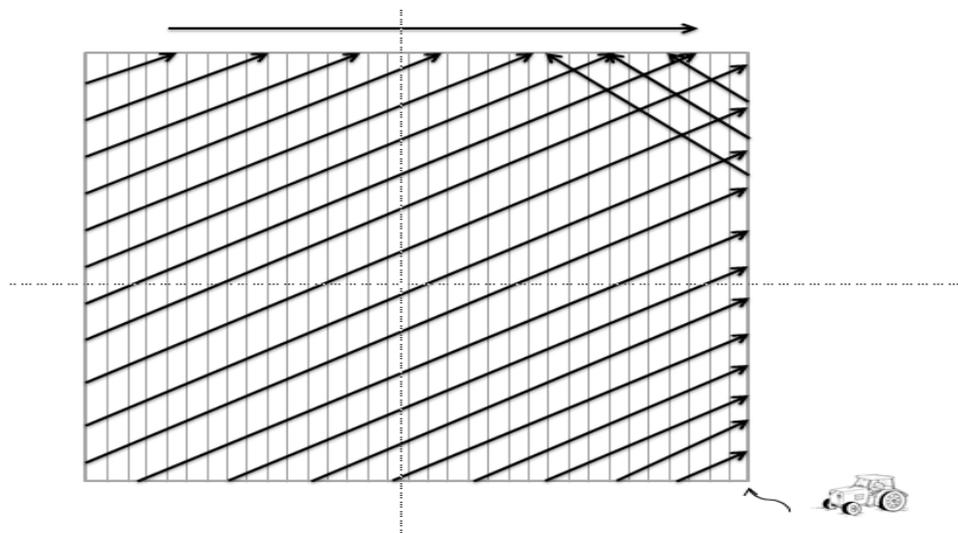
Tabla 17 Datos de medición Subsolada

Proceso	Valor promedio de concentración de CO2 en el ambiente. (PPM/Ha)	Muestras de CO2 (PPM/Ha)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Subsolada	336	311	291	286	416	430	399	346	308
		9	10	11	12	13	14	15	
		287	407	368	323	301	293	274	

Fuente: Cálculos propios

El recorrido que realizó el tractor se puede ver en la ilustración 2 como se puede ver el tractor ingreso al terreno por el lado derecho y realizó desplazamientos en diagonal con el fin de lograr una mayor des compactación y oxigenación del suelo. Finalmente se realizaron dos pasadas.

Ilustración 3 Recorrido Labor Subsulado



Fuente: Elaboración propia

6.1.2 Rastro-Arado

La segunda labor evaluada fue el rastro arado. Esta labor se realiza con el fin de roturar el suelo y continuar con la destrucción de cepas para obtener una

distribución de agregados con un tamaño relativamente uniforme. Durante esta labor interviene un tractor enllantado con potencia mínima de 225 H.P al motor y con disposición de un enganche hidráulico y de tiro.

Esta labor inicio a las 1:03 Pm y finalizo a las 1:33pm con una temperatura de 33 grados centígrados para una duración total de 1 hora y 43 minutos con un consumo de ACPM de 6 galones por hora para un total de 6,5 galones, durante todo el recorrido el conductor mantuvo una velocidad constante de 9, 1km y unas revoluciones por minuto de 2090 y en las vueltas la velocidad fue de 6,3 km y 1740 revoluciones por minuto, se realizó una pasada

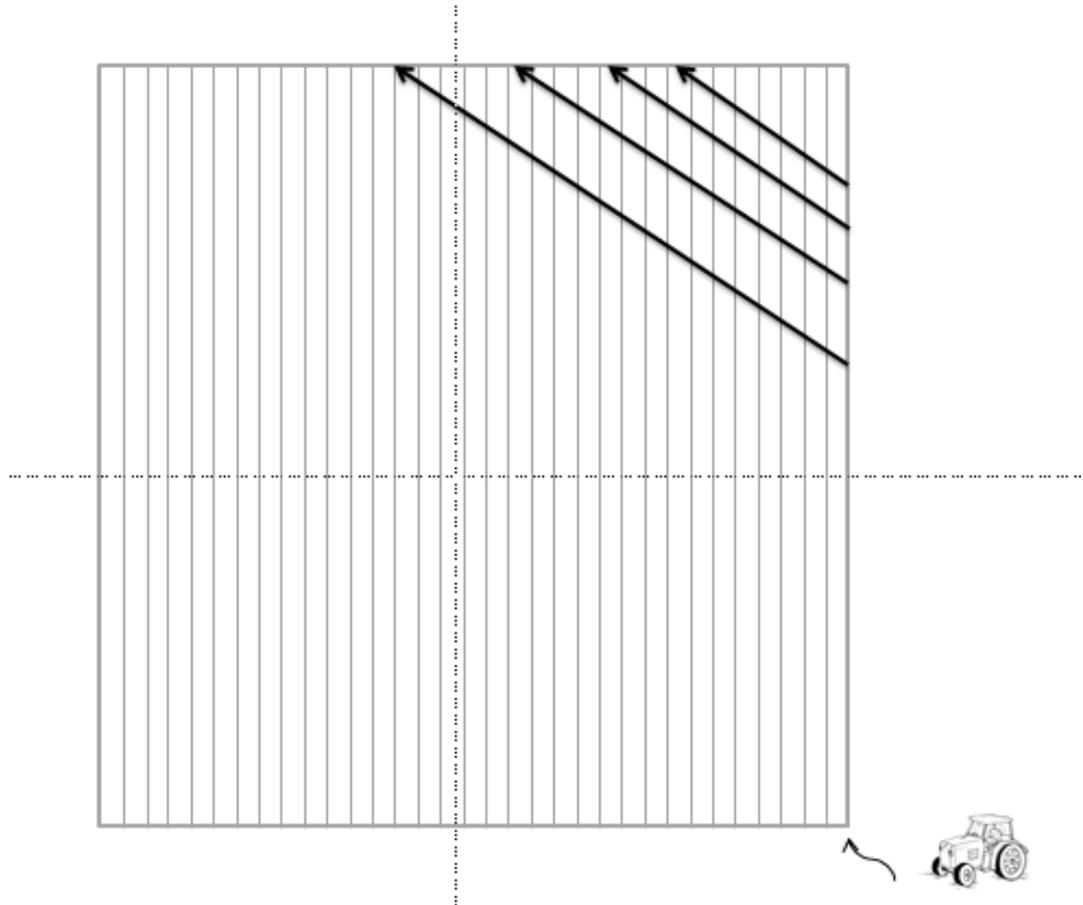
Tabla 18 Datos Medición Rastro arado

Proceso	Valor promedio de concentración de CO2 en el ambiente. (PPM/Ha)	Muestras de CO2 (PPM/Ha)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Rastro arado	275	279	269	283	269	285	273	292	268
		9	10	11	12	13	14	15	
		292	269	263	293	285	257	255	

Fuente: Cálculos propios

El recorrido que realizó el tractor se puede ver en la ilustración 3 como se puede ver el tractor ingreso al terreno por el lado derecho y realizo desplazamientos en diagonal.

Ilustración 4: Recorrido Labor Rastro-arado



Fuente: Elaboración propia

6.1.3 Surcado

La tercera labor evaluada fue el surcado. Esta labor se realiza con el propósito de conformar los surcos (cama), para acomodar la semilla de caña durante la siembra, con una distancia entre surcos de 1,65 y una profundidad establecida de entre 20 y 30cm, esta profundidad depende del nivel de hojarasca existente al momento de realizar la labor. Durante esta labor interviene un tractor 6165 marca John Deere enllantado dualmente en la parte posterior, con un motor de potencia de 220 H.P, tipo de combustible ACPM y con disposición de enganche hidráulico y de tiro.

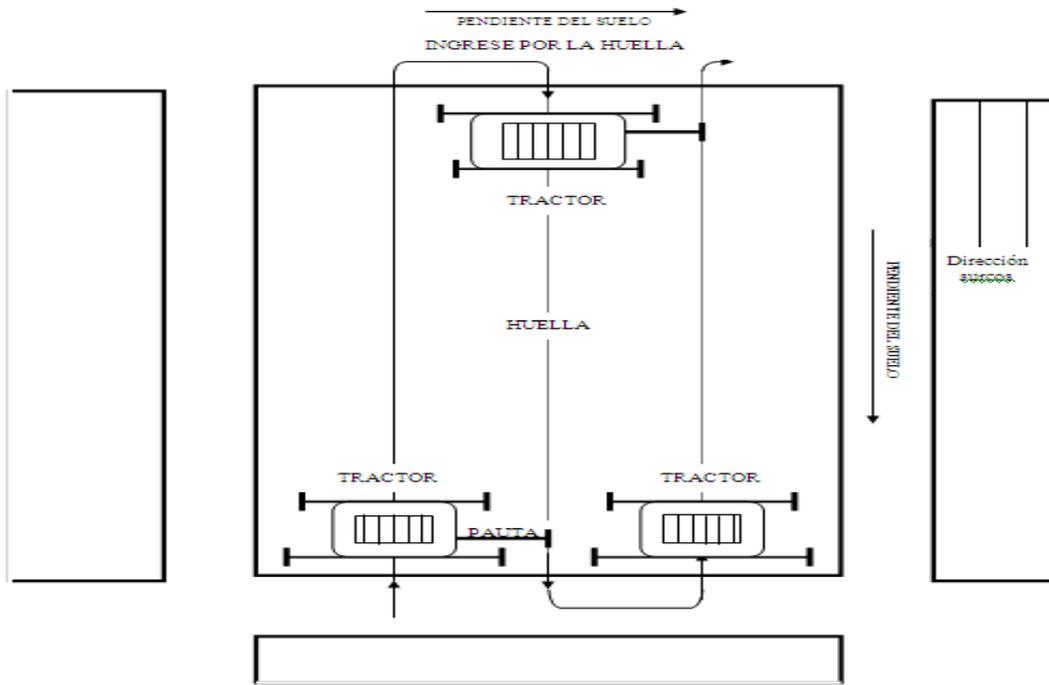
Imagen 3 Surcado



Esta labor inicio a las 1:55pm y finalizo a las 2:22 pm con una temperatura inicial de 32,1°C y una temperatura final de 32,7°C para una duración total de 27 minutos con un consumo de ACPM de 8 galones por hora para un total de 3,6 galones, durante todo el recorrido el conductor mantuvo una velocidad constante de 11,2 Km/h y unas revoluciones por minuto de 2200. Se realizó una pasada.

El recorrido que realizo el tractor se puede ver en la ilustración 4, como se puede ver el tractor ingreso al terreno por el lado derecho y realiza desplazamientos en forma vertical y tiene unas barras horizontales que le sirven de demarcación para iniciar el siguiente surco.

Ilustración 5 Recorrido Surcada



Fuente: Ingenio de estudio.

Tabla 19 Datos de Medición Surcada

Proceso	Valor promedio de concentración de CO2 en el ambiente. (PPM/Ha)	Muestras de CO2 (PPM/Ha)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Rastro arado	288	326	293	298	291	274	269	276	278
		9	10	11	12	13	14	15	
		287	283	275	280	293	301	295	

Fuente; Cálculos propios.

6.1.4 Riego:

La cuarta labor fue el riego, la cual fue realizada por el método de canal abierto, en donde se deja el flujo del agua libre a través de los surcos seleccionados, esperando que alcancen el otro lado o sendero del cultivo, para la adecuada hidratación de la planta. En este proceso no interviene ninguna maquina generadora de CO₂, solamente un trabajador que se encarga de medir la humedad de la tierra con una herramienta llamada calicata, en donde si la medida

Está por debajo de 50 cm requiere riego. Por ultimo esta persona se encarga de cerrar el flujo de agua para la regulación de este recurso.

Durante el proceso de riego por aspersión interviene una motobomba con una potencia de 100HP, Con una bomba cebadora 1.400 - 1.700 rpm la cual genera un caudal del agua de 60 Litros por Segundo (Lt/s), con el fin de garantizar un buen proceso de riego se realizan trinchos para los cuáles se necesita aproximadamente 2 horas y 30 minutos para que se complete el proceso de riego es decir el agua llegue al otro extremo del terreno.

Imagen 4 Trinchos para riego por canal abierto



Un trincho comprende una medida aproximada de 1 metro con 50 centímetros esta medida puede variar de acuerdo a las necesidades del terreno, cada trincho comprende aproximadamente de unos 6 o 7 entradas cada una a una distancia aproximada de 20 o 30 centímetros por la cual se permite la distribución del agua hacia el cultivo. La duración del proceso de riego por canal abierto es de aproximadamente 2 horas y 30 minutos en cual existe un consumo de agua de

540000 Lt. Y un consumo total de ACPM de 0,5 galones/hora, la Motobomba tiene una potencia mínima de 100HP.

Imagen 5 Riego por Canal Abierto



6.1.5 Corte para siembra:

Esta labor tiene como finalidad de establecer un cultivo de caña de azúcar a escala comercial y mantener un balance de cañas, con el fin de evitar la reducción en la producción y rendimiento del Ingenio, el corte para cultivo de caña se realiza sobre la plantilla, este corte para siembra se da debido a que la caña aún está en un punto de vida en donde el aprovechamiento no es del 100% y es la primera vez que va a ser cortada.

Imagen 6 Tajos.



Esta actividad es realizada directamente por mano de obra, empleando 25 trabajadores por hectárea, con un promedio de 100 tajos de 30 tallos de 60 cm de longitud para siembra por cada persona pero de estos un 30% son muy eficientes y tienen un promedio de 150 tajos para un total por los 25 trabajadores de 2875 tajos por hectárea, cada tajo tiene un peso aproximado de 17,37kg. Al mismo tiempo interviene un camión con capacidad de 10 toneladas al cual le caben aproximadamente 461 tajos, para transportar la hectárea se necesitan aproximadamente 7 viajes para retirar de la suerte

Imagen 7 Corte para Siembra.



Cada camión Ford F800 modelo 1950, con un motor Cummins de potencia 155Hp y 5000 RPM tiene un consumo de 2 galones por hora.

Imagen 8 Camión de transporte de las semillas



Es importante resaltar que tanto los procesos de fertilización y de control de malezas se harán de forma teórica y basándonos en la información suministrada por el ingenio; debido a que se presentaron algunos inconvenientes que dificultaron la medición.

6.1.6 Aplicación de Fertilizante:

Esta labor se realiza con el propósito de suministrar e incorporar el fertilizante en el suelo y así, evitar pérdidas del mismo por foto descomposición y evaporación, facilitando y optimizando la absorción del mismo por las plantas de caña; interviene un Tractor con potencia mínima de 150 HP y un consumo de 8 galones por hora. Con sistema hidráulico y enganche de tres puntos la profundidad con la que el tractor incorpora el abono es de aproximadamente de entre 15 y 20cm.

El tiempo de duración de la aplicación del fertilizante es de aproximadamente 30 minutos con un consumo de ACPM de 4 galones

Dado que no se tienen los datos exactos de la medición para el cálculo tomaremos el valor promedio como valor estándar de aplicación.

Tabla 20: Datos Fertilizante

Tipo de fertilizante	Mínimo	Máximo	Promedio	Unidades
Urea	300	400	350	KG/año
Compost			6	Toneladas/año

Fuente: Ingenio

Generalmente, las plantas requieren de grandes cantidades de nitrógeno para crecer normalmente. Por esto es necesario realizar la fertilización con fertilizantes de alto contenido de nitrógeno como lo son la urea y el compost.

Urea

La urea como fertilizante presenta la ventaja de proporcionar un alto contenido de nitrógeno, esencial en el metabolismo de la planta ya que se relaciona directamente con la cantidad de tallos y hojas, quienes absorben la luz para la fotosíntesis.

Compost

Es un Abono orgánico rico y oscuro, producto de la descomposición de desechos, que posee un balanceado contenido de nutrientes, microorganismos y minerales. Este contribuye a la estabilidad de la estructura de los agregados del suelo agrícola al reducir la densidad, aumentar la porosidad y permeabilidad, y aumentar su capacidad de retención de agua. Finalmente Mejora las propiedades químicas ya que aumenta el contenido en macronutrientes N, P, K. El compost tiene un contenido de nitrógeno de 2% y tiene una relación de C/N de 30/1¹⁸

6.1.7 Aplicación de Herbicidas para control de malezas:

La aplicación de herbicidas se hace con el fin de disminuir la competencia de nutrientes por otros cultivos diferentes a la caña, evitar que se reduzca la producción y el rendimiento del cultivo. El control de malezas se realiza 2 veces a los 30 y 60 días aproximadamente en las plantillas y una vez más a los 45 días en socas. Esta labor se hace de forma mecánica si el cultivo es menor a los 3 meses, en este caso interviene un tractor John Deere con una potencia entre 70-120 HP, este proceso tiene una duración aproximada de 30 minutos para cubrir la hectárea con un consumo de ACPM de 6 galones por hora, para un consumo total de 3 galones.

¹⁸ (El Compost, 2009)

Imagen 9 Aplicación de Herbicidas



Las boquillas que se utilizan para la aplicación de herbicidas son boquillas Teejet 150-04 (150 grados de salida, 0.4 galones por minuto) para un total de fertilizante aplicado de 12 galones por hectárea.

El herbicida que se aplica tiene una combinación de urea y azufre y su composición está descrita en la tabla 7:

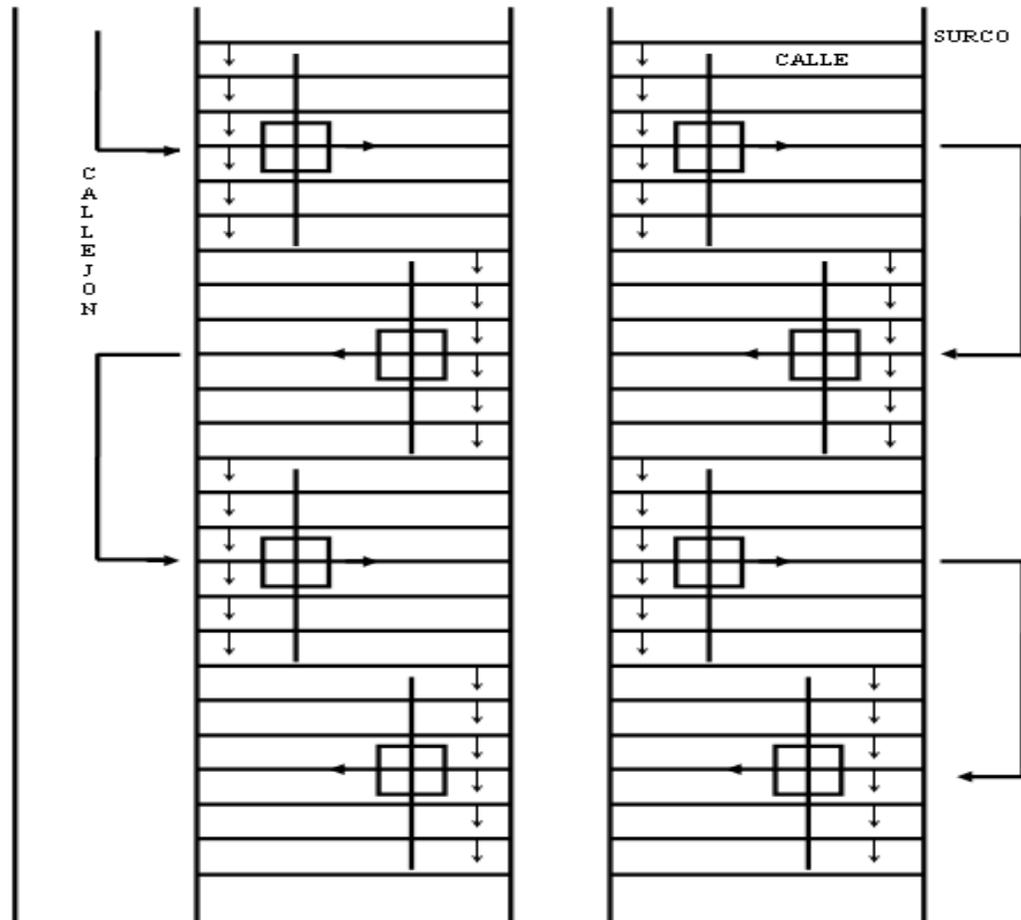
Tabla 21 Composición del Fertilizante

Fertilizante	Cantidad	proporción	%	Cantidad (galones)
Urea 80-20	12	azufre	20	2,4
		Urea	80	9,6

Fuente: Cálculo propios

El recorrido que hace el tractor se puede ver en la ilustración, donde el tractor ingresa al terreno y gracias al aspersor aplica herbicida a 3 surcos a la vez, y de esta forma continua el trayecto en un recorrido de ida y regreso por el terreno.

Ilustración 6 Recorrido del Tractor Aplicación de Herbicidas de Forma Mecánica



Fuente: Ingenio

6.2 Resultados Herramienta

Teniendo en cuenta las labores estudiadas en este proyecto de grado, y la aplicación mínima para una adecuada preparación; se estandarizó a una aplicación para los procesos de Subsulado, Rastro arado, Surcado y fertilizantes, mientras para el proceso de aplicación de herbicidas, tomamos como referencia que el cultivo tiene como base Soca (cultivo cosechado de donde se puede obtener caña de azúcar nuevamente), lo cual se realiza en tres ocasiones por

hectárea. Considerando los anteriores valores se encontraron los siguientes resultados:

Tabla 22 Resultados

ESTIMACION HUELLA DE CARBONO								
	Combustión					Químico		
		CO2	NO2	CH4	Total CO2	FERTILIZANTE	HERBICIDA	
Labor	Consumo de ACPM (gal)	FC CO2 (Kg equi)	FC CO2 (Kg equi)	FC CO2 (Kg equi)	CO2 (Kg equi)	Urea (Kg equi)	Compost (Kg equi)	Urea 80-20 (Kg equi)
Subsolada	5,00	52,80	6,32	0,06	59,18			
Rastroarado	6,50	66,64	7,97	0,08	74,69			
Surcado	3,60	36,91	4,42	0,04	41,37			
Fertilización urea	8,00	82,02	9,81	0,10	91,93	220,00		
Fertilizante Compost	16,00	164,04	19,63	0,19	183,85		372,00	
Herbicida urea 80-20	9,00	92,27	11,04	0,11	103,42			105,53
TOTAL=	53,40	547,47	65,50	0,64	554,44	220,00	372,00	105,53

Total Kg CO2 equivalente	1251,97
---------------------------------	----------------

Fuente: Elaboración propia

6.3 Análisis de resultados.

Después de hacer las debidas conversiones por medio de la herramienta y al implementar la metodología brindada por las directrices del IPCC, podemos establecer los kg equivalentes de CO2 para cada una de las labores de estudio, esto nos servirá para determinar el impacto de cada labor en cuanto emisiones de gases efecto invernadero y para esto procederemos a analizar cada uno de los resultados.

La siguiente tabla muestra un resumen de las emisiones que se producen debido a la quema de combustible para cada una de las labores; es importante recordar que los GEI de mayor relevancia en la quema de combustible son el dióxido de carbono (CO2), Metano (CH4) y el Óxido nitroso (N2O) a partir de esta información realizaremos el análisis respectivo del impacto de las labores en cada uno de estos gases teniendo en cuenta que estos ya fueron llevados a unidades equivalente de CO2.

Tabla 23 Resumen de emisiones para cada labor en cuanto a emisiones por consumo de combustible

CO2	NO2	CH4	Total CO2	concentración de CO2 en el ambiente.	emision CO2 herramienta promedio
FC CO2 (Kg equi)	FC CO2 (Kg equi)	FC CO2 (Kg equi)	CO2 (Kg equi)	CO2 (KG)	CO2 (PPM)
52,80	6,32	0,06	59,18	0,000336	336,00
66,64	7,97	0,08	74,69	0,000275	275,00
36,91	4,42	0,04	41,37	0,000288	288,00
82,02	9,81	0,10	91,93	0,000000	
164,04	19,63	0,19	183,85	0,000445	444,87
92,27	11,04	0,11	103,42	0,000000	
Total			554,44	0,00134387	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 24 Resumen de Emisiones de CO2 equivalente en porcentaje por cada labor

% CO2 equivalente					
Labor	CO2	NO2	CH4	total emisiones	concentración de CO2 en el ambiente.
Subsolada	89%	11%	0,10%	11%	25%
Rastroarado	89%	11%	0,10%	13%	20%
Surcado	89%	11%	0,10%	7%	21%
Fertilizacion urea	89%	11%	0,10%	17%	0%
Fertilizante Compost	89%	11%	0,10%	33%	33%
Herbicida urea 80-20	89%	11%	0,10%	19%	0%

Fuente: Elaboración propia

Los datos que se encuentran en la tabla 25 se realizaron con el fin de suplir información teniendo en cuenta dos enfoques. El primero busca encontrar el % de cada uno de los GEI de estudio ya convertidos en unidades de CO₂ eq. Sobre cada una de las labores y el segundo se realiza con el fin de determinar el impacto de cada una de las labores sobre el total de emisiones. Hay que tener en cuenta que estas labores se pueden comparar dentro de este análisis solo se está teniendo en cuenta las emisiones que salen de la combustión.

6.3.1 Emisiones de CO₂:

La labor que más dióxido de carbono genera desde el punto de vista de la combustión es la fertilización con compost al aportar 164,0419 kilogramos de CO₂ equivalente (k C02 eq), siguiéndole la aplicación de herbicida de urea 80-20, la fertilización con urea, el rastro arado con un aporte 92,27 k C02 eq, 82,02 k C02 eq y 66,54 k C02 eq respectivamente; las labores que menos aportaron fueron la subsolada y el surcado con un aporte de 52,80 k C02 eq y 36,91 k C02 eq respectivamente.

6.3.2 Emisión de CH₄

La labor que más metano genera desde el punto de vista de la combustión es la fertilización con compost al aportar 19,63 k C02 eq, siguiéndole la aplicación de herbicida de urea 80-20, fertilización con urea, el rastro arado con un aporte de 11,04 k C02 eq, 9,81 k C02 eq y 7,97 k C02 eq respectivamente; las labores que menos aportaron fueron la subsolada y el surcado con un aporte de 6,32 k C02 eq, y 4,42 k C02 eq respectivamente.

6.3.3 Emisiones de N₂O

La labor que más óxido nitroso genera desde el punto de vista de la combustión es la fertilización con compost al aportar 0,19 k C02 eq, siguiéndole la aplicación de herbicida de urea 80-20, fertilización con urea y el rastro arado con un aporte de 0,11 k C02 eq, 0,10 k C02 eq y 0,8 k C02 eq respectivamente; las labores que menos aportaron fueron la subsolada y el surcado con un aporte de 0,6 k C02 eq y 0,4 k C02 eq respectivamente.

6.3.4 Emisiones totales en la combustión

Con el propósito de corroborar la información de los procesos analizados en las visitas al ingenio, se hace un análisis de los datos obtenidos con el medidor de CO₂ utilizado en el campo y los valores teóricos obtenidos con base en la metodología estudiada del IPCC.

Principalmente debemos entender que los dos métodos de cálculo estudiados no es posible compararlos ya que la toma de datos real presenta incertidumbre debido a factores externos como viento, fugas o calibración y el dato que se

obtiene es un dato que arroja el medidor electrónico el cual percibió la cantidad de CO₂ equivalente generada por el escape del vehículo en estudio (tractor). Mientras que la calculadora se estructura basada en la metodología del IPCC haciendo uso de los factores de conversión, emisión y corrección lo cual nos arroja un valor que tiene en cuenta el tiempo, el consumo de insumos empleados en un determinado espacio de cálculo (Hectárea).

Vemos que en el cálculo total de emisiones de CO₂ equivalente el dióxido de carbono en todas las labores tiene un aporte del 89% lo que quiere decir que en la quema de combustible el gas más representativo es el CO₂, debido a que principalmente el *CO₂ es un Gas que se produce de forma natural, y también como subproducto de la combustión de combustibles fósiles y biomasa, cambios en el uso de las tierras y otros procesos industriales. Es el principal gas de efecto invernadero antropogénico que afecta al equilibrio de radiación del planeta*¹⁹; por esta razón en la quema de combustible el CO₂ es que genera un mayor impacto dado que este gas se genera principalmente por combustión. Mientras que el metano y el NO₂ representan un impacto menor con un aporte del 11% y del 0,1% respectivamente

El total de emisiones para las labores de estudio es de 554.44 k C02 eq por hectárea al hacer el análisis en términos porcentuales la labor que más emisiones genera desde el de vista de la combustión es la fertilización con compost al aportar 33%, siguiéndole la aplicación de herbicida de urea 80-20, la fertilización con urea y el rastro arado con un aporte del 19%, 17% y 13% respectivamente; las labores que menos aportaron fueron la subsolada y el surcado con un aporte del 11% y 7% respectivamente.

Mientras que los resultados obtenidos por el medidor como se puede ver en la tabla 23 el proceso que más emisiones presento es la Fertilización con compost con un valor promedio de Emisiones kg/ Ha de 4,45e-04 k C02 eq y la subsolada, el rastro arado y el surcado tienen unas emisiones de 3,36e-04 k C02 eq, 2,75e-04 k C02 eq y 2,88e-04 k C02 eq respectivamente como se puede ver esto datos están muy por debajo de los valores obtenidos por la herramienta ya que estos se miden directamente en el aire y como se dijo anterior mente están afectados por el viento, temperatura y que la toma de los datos se hace a campo abierto donde se dispersan en el ambiente.

6.3.5 Emisiones por uso de fertilizantes y herbicidas.

La tabla 26 muestra un resumen de las emisiones que se producen debido al uso de fertilizantes y de herbicidas. En el caso de los fertilizantes es importante recordar que en el caso de la urea se hizo un análisis por emisión de carbono y luego se llevó a dióxido de carbono mientras que en la fertilización con compost

¹⁹ (Ministerio del medio ambiente, 2010)

principalmente se tuvo en cuenta el nitrógeno emitido para luego llevarlo a óxido nitroso y de esta forma poder convertir estos valores en emisiones equivalentes y poder realizar el análisis correspondiente.

Tabla 25 Emisiones de CO2 Equivalente en el uso de fertilizantes y herbicidas

Labor	Emisiones CO2 Equivalente en las labores de fertilización y control de malezas			% de emisiones equivalentes CO2
	(Kg CO2 equi)	(Kg CO2 equi)	(Kg CO2 equi)	
Fertilización urea	220			31,54%
Fertilizante Compost		372		53,33%
Herbicida urea 80-20			105,53	15,13%
		Total	697,53	

Fuente: Elaboración propia

En el caso de los fertilizantes vemos que el compost es el que genera el mayor impacto con un aporte de 372 kilogramos equivalentes de CO2 que equivale al 53,33% de las emisiones totales producidas por el uso de herbicidas y fertilizantes, la fertilización con urea aporta 220 kilogramos equivalentes con un aporte porcentual del 31,54%. El uso de herbicidas solo aporta el 15,13% para un total de 105,53 kilogramos equivalente de CO2. Esto relacionado con 697,53 Kg Equivalente de CO2 que es el total de emisiones que se producen en estas labores.

Finalmente vemos que para los labores de estudio el total de emisiones es de 1251,97 kilogramos equivalentes y como se puede ver en la tabla 27 el uso de fertilizantes es que mayor impacto tiene con un total de emisiones de 592 kilogramos equivalentes de CO2 con una participación del 47% sobre el total de las emisiones, la que le sigue son las emisiones provenientes de la combustión con un aporte de 554,44 kg equivalentes de CO2 para una participación del 44% y finalmente la que la que menos aporta es el uso de herbicidas con una participación del 8%.

Es importante recalcar que a pesar de que la aplicación de herbicidas el dato es anual, mientras que en el caso de la combustión son eventos específico, Pero para el cálculo total de las emisiones de CO2 equivalente, se tuvo en cuenta esto, es decir se realizó el cálculo para la combustión teniendo en cuenta que se había utilizado como estándar la aplicación en una ocasión es decir que durante todo el

cultivo que dura un año esta labor se realiza una sola vez por lo tanto los resultados son comparables.

Tabla 26 Total de emisiones CO2 equivalente

	Emisiones KG CO2 Equi	% Emisiones KG CO2 Equi
Combustion	554,44	44%
Fertilizacion urea	220,00	47%
Fertilizante Compost	372,00	8%
Herbicida urea 80-20	105,53	8%
Total	1251,97	

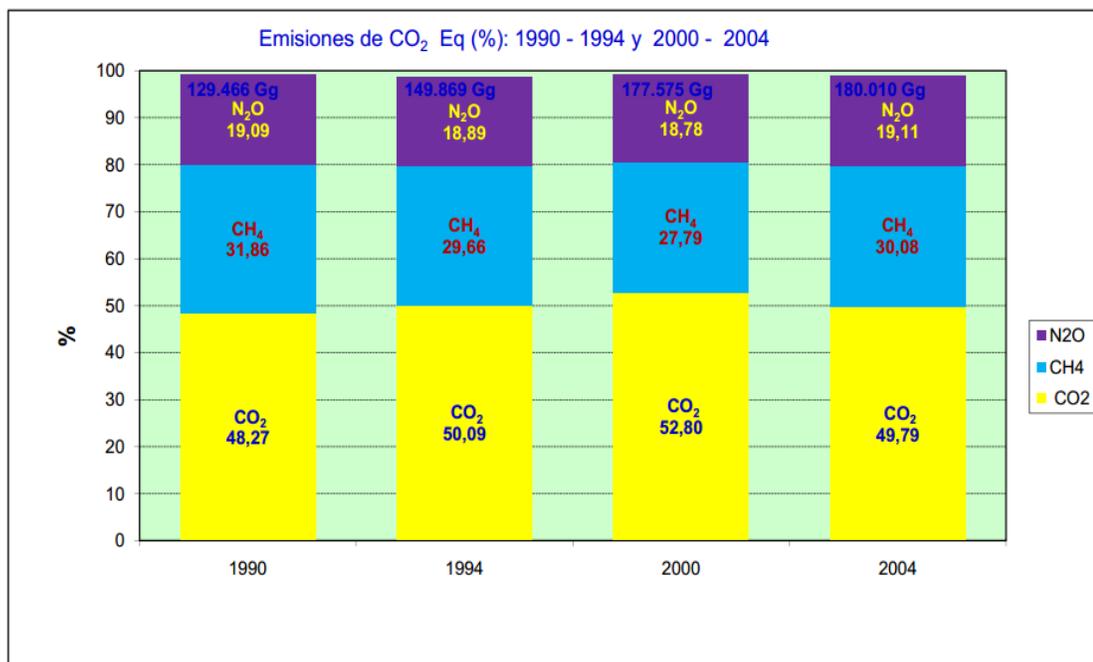
Fuente: cálculos propios

La tabla 26 que representa el % de CO2 equivalente total en el cálculo de las emisiones de gases efecto invernadero para Colombia para los años que va desde el 2000 hasta el 2004 vemos que existe una coherencia con los resultados obtenidos ya que el CO2 sigue representando el mayor impacto sobre el cálculo de las emisiones con una participación que varía entre el 48,27% y el 52,8% mientras que el metano tiene una participación que esta entre el 27,79% y el 31,86%, vemos adicionalmente que a pesar de que el óxido nitroso no representa una participación muy importante en cuanto a la combustión si tiene un gran impacto en el uso de fertilizantes ya que este gas es emitido con los usos de cultivos en tierra y especialmente con el uso de fertilizantes comerciales y orgánicos.

A pesar de que el CO2 tiene una mayor cantidad de emisiones, es importante recalcar que tanto el metano como el óxido nitroso tienen un potencial de calentamiento mayor en el caso del metano su potencial de calentamiento es de 21 veces mayor que es CO2 y en el caso de Óxido nitroso 310 veces más que el CO2 como se puede ver en la tabla 16.

Imagen 10 Inventario nacional de gases de efecto invernadero: 2000 y 2004

Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero: 2000 y 2004.



Fuente: (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2009)

6.3.6 Análisis resultados frente al sector

Los resultados expuestos por la herramienta con los datos obtenidos por el ingenio nos permite evaluar la cantidad de CO₂ equivalentes que genera por sus 28.500 hectáreas de terreno productivo considerando las tres (3) labores en estudio en el estándar planteado de (1 Subsoladas, 1 Rastro arado, 1 Surcada), la fertilización (1 Compost y 1 Urea) y la aplicación de Herbicidas (1 Urea 80-20). Arroja un valor de:

$$28.500 * 1151.97 = 35\ 681.145 \text{ Kg CO}_2 \text{ equivalentes}$$

Esta cantidad nos muestra que el Ingenio realmente produce unas 35,7 Giga gramos de CO₂ equivalente y que en el sector azucarero en el Valle del Cauca maneja en realidad 225.800 hectáreas cultivadas, lo cual es:

$$225.800 * 1151.97 = 260\ 114.830 \text{ Kg CO}_2 \text{ equivalente}$$

Lo cual nos da 260,1 Giga gramos de CO2 equivalente en total.

Por lo tanto, el ingenio en la actualidad aporta a la huella de CO2 en el sector azucarero en el Valle del Cauca un porcentaje 13,72%, lo cual es significativo, teniendo en cuenta que hay más procesos de adecuación que este estudio no tomo y que además falta el cálculo de la planta de procesamiento de caña de azúcar y el consumo de combustible de camiones de transporte de insumos y demás. El ingenio debe de igual forma estudiar métodos de producción más limpia en donde implementen acciones que mejoren o remplacen los procesos productivos que más produzcan emisiones y aportan a la huella de Carbono,

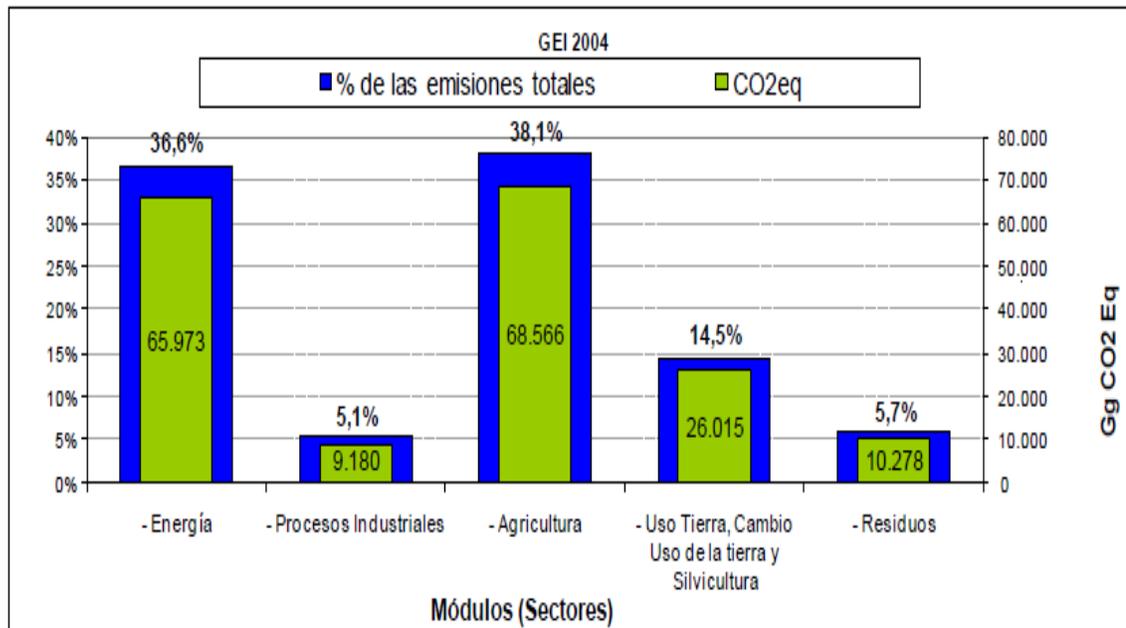
Por otro lado el cultivo de caña de azúcar es una plantación de pasto, por lo tanto no son plantas muy fotosintéticas, por no poseer gran cantidad de biomasa, lo cual como plantación no aporta en gran cantidad al balanceo ecológico de CO2 en busca de la mitigación de emisiones a la atmosfera, como lo haría una plantación de bosque natural. Por el contrario se puede ver que estas plantaciones cada vez son superiores por su interés en biocombustible y que en la actualidad está siendo usada en gran porcentaje por el país.

6.3.7 Comparación Colombia frente al mundo

Colombia realizo en el año 2004 un inventario de gases efecto invernadero (GEI), en donde los resultados de dicho inventario, determinan que los aporte se generan de: dióxido de carbono (50%), metano (30%), óxido nitroso (19%) y (1%) otros.

Así mismo se identificaron la principales fuentes de emisión: Agricultura (38%); Energía (37%); y Uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura –Uscuss– (14%). Seguidos por: Residuos sólidos (6%) y Procesos Industriales (5%). (Ver Imagen 12)

Imagen 11 participación de cada sector y emisión total de GEI año 2004 Colombia



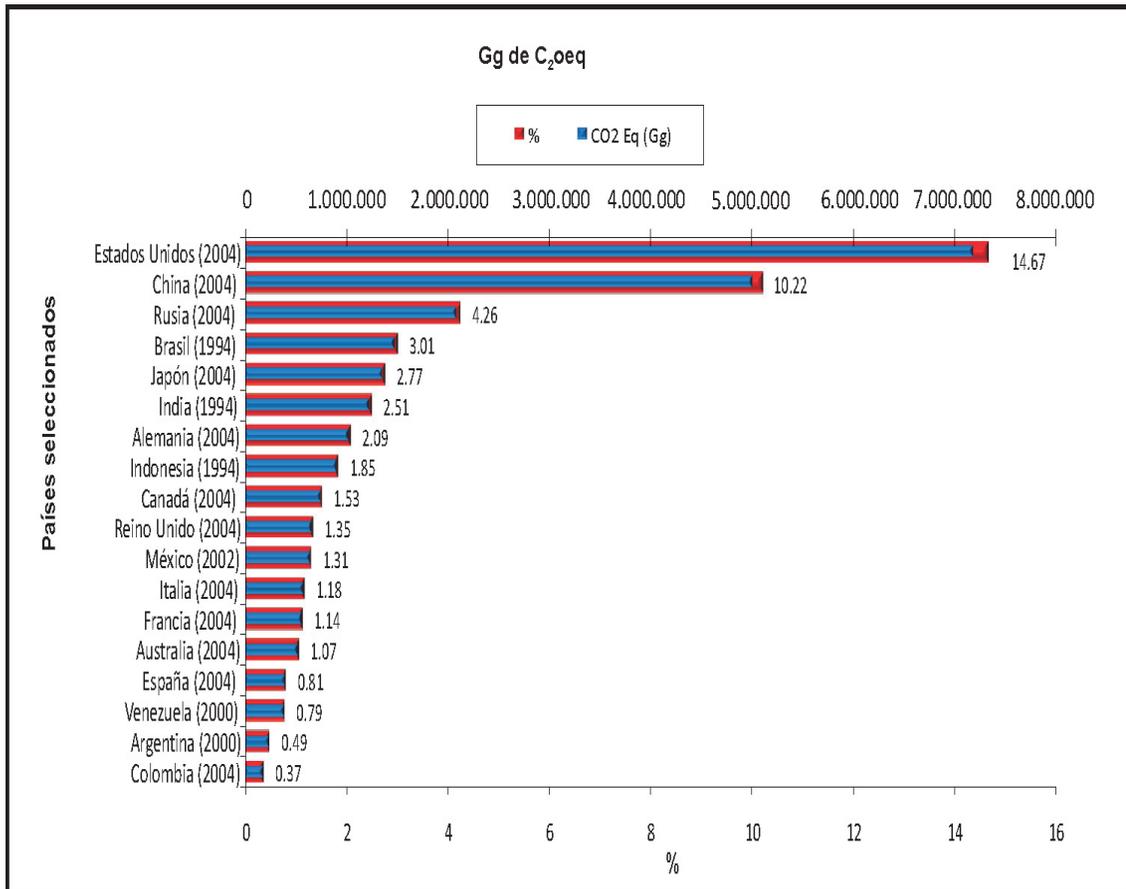
Fuente: (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2009)

Los resultados señalan que el mayor aporte a la huella de carbono a nivel nacional lo hace la agricultura, a donde pertenece nuestra empresa en estudio (Ingenio).

Con la herramienta se realizó el cálculo para una hectárea de caña de azúcar sobre los procesos de estudio y para esta se generan (1251,97 Kg CO2 equivalente/hectárea) o (0,00125197 Gg CO2 equivalente/hectárea), lo cual se multiplica por las 28.500 hectáreas que cultiva el Ingenio de manera directa o indirecta, dando como resultado (35,68 Giga gramos CO2 equivalente), y al compararla con la producción de gases efecto invernadero (GEI) generada por Colombia (180.010 Giga gramos CO2 equivalente) es apenas un 0,0198% del total emitido.

Por otro lado según el IDEAM (Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales en Colombia) Colombia aporta el 0,37% (180.010 giga gramos CO2 equivalente) del total emitido en el mundo (49 Giga toneladas CO2 equivalente), lo que concluye que Colombia no aporta significativamente a la huella de carbono en comparación con países como: Estados Unidos (14,67%), China (10,2%), Rusia (4,26), Japón (2,7), Brasil (3,01), México (1,31). (Ver Imagen 13)

Imagen 12 Emisiones en Gg de CO2 Equivalente países



Fuente: (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2009)

CONCLUSIONES

El dióxido de carbono en todas las labores tiene un aporte del 89% lo que quiere decir que en la quema de combustible el gas más representativo es el CO₂, debido a que principalmente el *CO₂ es un Gas que se produce de forma natural, y también como subproducto de la combustión de combustibles fósiles y biomasa, cambios en el uso de las tierras y otros procesos industriales. Es el principal gas de efecto invernadero antropogénico que afecta al equilibrio de radiación del planeta*²⁰; por esta razón en la quema de combustible el CO₂ es que genera un mayor impacto dado que este gas se genera principalmente por combustión.

La labor que más emisiones genera desde el de vista de la combustión es la fertilización con compost al aportar 33%, siguiéndole la aplicación de herbicida de urea 80-20, la fertilización con urea y el rastro arado con un aporte del 19%, 17% y 13% respectivamente; las labores que menos aportaron fueron la subsolada y el surcado con un aporte del 11% y 7% respectivamente.

El número de pases que realiza la maquinaria en cada una de las labores depende del tipo de corte que se realice sobre la caña. Por lo tanto si el corte se realiza de forma mecánica implica que queda una gran cantidad de hojarasca lo que a su vez aumenta el número de pases que se realizan, mientras que si el corte se realiza manual se debe hacer uso de la quema y por lo tanto queda muy poca hojarasca como residuo disminuyendo así el número de pases.

El total de emisiones es de 1251,97 kilogramos equivalentes. El total se puede descomponer de la siguiente forma el uso de fertilizantes es que mayor impacto tiene con un total de emisiones de 592 k CO₂ eq con una participación del 47% sobre el total de las emisiones, En cuanto a los fertilizantes vemos que el compost es el que genera el mayor impacto con un aporte de 372 kilogramos equivalentes de CO₂ que equivale al 53,33% de las emisiones totales producidas por el uso de herbicidas y fertilizantes

En la actualidad debido a limitaciones impuestas por el gobierno y a la búsqueda del ingenio de realizar procesos que sean sostenibles con el ambiente ha ocasionado una disminución del uso de la quema en el últimos año esto se puede ya que el ingenio ha implementado el corte mecánico como un estándar en su proceso productivo.

La labor que menos aporta es la aplicación de herbicidas con una participación del 8% sobre el total de las emisiones de CO₂ equivalente.

²⁰ (Ministerio del medio ambiente, 2010)

El ingenio posee 28.500 hectáreas de terreno productivo, lo cual por medio de la herramienta y considerando las tres (3) labores en estudio en el estándar planteado de (1 Subsoladas, 1 Rastro arado, 1 Surcada), la fertilización (1 Compost y 1 Urea) y la aplicación de Herbicidas (1 Urea 80-20). Arroja un valor de 35,7 Giga gramos de CO2 equivalente,

El sector azucarero en el Valle del Cauca maneja 225.800 hectáreas cultivadas, lo cual genera 260,1 Giga gramos de CO2 equivalente en total. Resultado obtenido con la herramienta elaborada en este trabajo.

El ingenio en la actualidad aporta a la huella de CO2 en el sector azucarero en el Valle del Cauca un porcentaje 13,72%, lo cual es significativo, teniendo en cuenta que hay más procesos de adecuación que este estudio no tomo y que además falta el cálculo de la planta de procesamiento de caña de azúcar y el consumo de combustible de camiones de transporte de insumos y demás.

El ingenio debe de igual forma estudiar métodos de producción más limpia en donde implementen acciones que mejoren o replacen los procesos productivos que más produzcan emisiones y aportan a la huella de Carbono,

El cultivo de caña de azúcar es una plantación de pasto, por lo tanto no son plantas muy fotosintéticas, por no poseer gran cantidad de biomasa, lo cual como plantación no aporta en gran cantidad al balanceo ecológico de CO2 en busca de la mitigación de emisiones a la atmosfera.

RECOMENDACIONES

Se recomienda aplicar la herramienta a diferentes tipos de suelo; con el objetivo de comparar datos obtenidos entre diferentes terrenos e identificar cuales hectáreas y fincas aportan más a la huella de carbono del ingenio en sus procesos productivos de la caña de azúcar.

Se recomienda ampliar la herramienta a otros procesos productivos para ampliar el impacto que el cultivo de caña de azúcar genera al sector azucarero e identificar el aporte con mayor aproximación del ingenio a la huella de carbono.

Se recomienda que el ingenio plantee métodos de mitigación de CO₂ al ambiente, en busca de obtener certificaciones ambientales y posibles opciones de entrar en mercados internacionales que en el momento exigen el conocimiento del impacto tanto como empresa y como producto.

Se recomienda que la empresa emplee esta herramienta de cálculo de Huella de carbono para cualquier interés que tenga en la investigación, ampliación o uso de la misma, ya su base metodológica es basada en el IPCC, y por lo tanto es de fiar en sus medidas y estimaciones.

La herramienta elaborada durante este proyecto se puede utilizar como base para estudiantes que tendrán nuevos proyectos del cálculo de la huella de carbono.

La herramienta del cálculo de la huella de carbono, se diseñó originalmente para determinar el indicador en kg de CO₂ equivalente de los procesos de subsolado, rastro arado, surcado, fertilizantes y herbicidas. Pero se puede utilizar como base para estudiantes que tengan nuevos proyectos del cálculo de la huella de carbono, buscando mejorarla y permitiendo ampliar los procesos y cada vez mayor exactitud en el cálculo de la misma.

BIBLIOGRAFÍA

- ADRIANA PEDRAZA GALEANO, M. C. (2008). *visión general del inventario nacional de gases efecto invernadero, Cap 1*.
- Asocaña. (2002). *Balance azucarero colombiano Asocaña*. Retrieved 10 15, 2012, from <http://www.asocana.org/>
- Azucarera El Viejo, S. (2010). Retrieved 10 20, 2012, from Primer ingenio en Centroamérica en certificarse como Carbono Neutro: http://www.ingenioelviejo.com/sistema_huella.aspx
- CEPAL. (2010). *Comision Economica Para America Latina*. Retrieved 05 20, 2013, from <http://www.eclac.org/>
- Directrices del IPCC, A. (2006). *Directrices del IPCC, volumen 4 cap. 1: introducción pág. 5*. Retrieved 05 20, 2013, from <http://www.ipcc.ch/>
- Directrices del IPCC, A. (2006). *volumen 2 energía, capitulo 1 pág. 5*. Retrieved 05 20, 2013, from http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf
- Doménech Quesada, J. L. (2009). *Huella ecológica y desarrollo sostenible*. Madrid: Aenor (Asociacion Española de Normalización y Certificación),.
- Efecto invernadero, A. (2010). *GreenPeace*. Retrieved 10 20, 2012, from <http://www.greenpeace.org/espana/es/Trabajamos-en/Frenar-el-cambio-climatico/Ciencia/Efecto-invernadero/>.
- El Compost, A. (2009). *Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)*. Retrieved 10 15, 2013, from <http://noalaincineracion.org/wp-content/uploads/el-compost-inti.pdf>
- FootPrint,[En línea]. [Citado 20-Oct-2012] Disponible en internet: <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/trends/colombia/>. (n.d.). *footprintnetwork*. Retrieved 10 15, 2012, from <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/trends/colombia/>
- Footprintnetwork. (2012). *countries., Curious about the footprints of individua*. Retrieved 10 20, 2012, from <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/trends/colombia/>

- GHG PROTOCOL INITIATIVE, G. (2013, 04 30). *About the GHG Protocol*. Retrieved 10 20, 2012, from <http://www.ghgprotocol.org/about-ghgp>
- Google. (2013). Retrieved 11 28, 2013, from <http://www.google.com>
- Guía de huella de carbono para productos, P. (2006). *ProChile*. Retrieved 10 15, 2012, from <http://www.prochile.gob.cl/sustentabilidad/huella-de-carbono/>
- Incauca. (2010). *Proceso productivo de cultivo de caña de azúcar tecnificado, Ingenio*. Retrieved 05 10, 2013, from <http://www.incauca.com/content/Campo>. [citado en: Noviembre 19 de 2012].
- incertidumbre de las directrices del IPCC 2006, A. (2006). *Volumen 1 capítulo 3.7, incertidumbre de las directrices del IPCC 2006*. Retrieved 05 20, 2013, from <http://www.ipcc.ch/>
- Ingeniero Eduardo R Hernandez, A. (2001, 05 1). Retrieved 10 20, 2012, from <http://www.aie.org.ar/downloads/invernadero.pdf>
- Ingeniero mecanico con doctorado en comunidad y planeación regional, A. (1996). *Creador de la Huellas ecologia-1996 y presidente dr Global footprint network*. Canada.
- IPCC. (2006). Retrieved 10 20, 2012, from <http://www.ipcc.ch/>
- Minambiente, A. (2012). *Gases de efecto invernadero y cambio climatico, ministerio del medio ambiente*. Retrieved 10 12, 2012, from <http://www.minambiente.gov.co/web/index.html>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, I. (2009). *Colombia frente al Cambio Climático*. Retrieved 11 24, 2013, from Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, IDEAM, Colombia frente al Cambio Climático <http://www.ideam.gov.co/>.
- Ministerio del medio ambiente, A. (2010, 08). *chile, reporte cambio climático, capítulo 11*. Retrieved 11 24, 2013, from http://www.mma.gob.cl/1304/articles-52016_Capitulo_11.pdf
- Profesor y autor del primer libro sobre huella ecological, A. (1992). Canada.
- Vol 4 IPCC, A. (2006). *Directrices del IPCC, volumen 4 AFOLU, capítulo 11*. Retrieved 05 20, 2013, from Directrices del IPCC, volumen 4 AFOLU, capítulo 11 <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- WWF. (2008). *World Wildlife Fund*. Retrieved 10 20, 2010, from <http://www.wwf.org.co/index.cfm?uGlobalSearch=huella+ecologica>

