UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
VICERRECTORADO ACADÉMICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA MANUFACTURA Y DISTRIBUCIÓN DE PELLETS EN VENEZUELA SOBRE LA HUELLA DE CARBONO EN EL MEDIO AMBIENTE

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO
Presentado ante la
UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
Como parte de los requisitos para optar al título de
INGENIERO INDUSTRIAL

Realizado por: NARANJO P., Adrián A.
PEREIRA M., Daniel A.
Profesor Guía: Ph.D.Henry Gasparín.
Fecha: Octubre de 2014

UCAB Universidad Católica ANDRÉS BELLO
CENTRO CULTURAL PADRE CARLOS G. PLAZA S.J.
BIBLIOTECA CENTRAL - SALA P. PLAZA S.J.
PLANTA BAJA - SALA - TESIS

UCAB Universidad Católica ANDRÉS BELLO
Escuela de Ingeniería Industrial

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA MANUFACTURA Y DISTRIBUCIÓN DE PELLETS EN VENEZUELA, SOBRE LA HUELLA DE CARBONO EN EL MEDIO AMBIENTE.

Realizado por: Naranjo P. Adrián A. y Pereira M. Daniel A.
Profesor Guía: Ph.D. Henry Gasparín.
Fecha: 14 de Octubre de 2014

SINOPSIS

La fabricación de pellets a partir de biomasa forestal representa una forma innovadora de generar energía a partir de un recurso natural renovable, sin embargo, se plantean ciertas incertidumbres al momento de comprobar si los procesos requeridos para su manufactura y comercialización generan un impacto ambiental lo suficientemente grande en magnitud como para considerar la explotación de dichos recursos desde el punto de vista de sustentabilidad ecológica.
La forma más frecuente de cuantificar el impacto ambiental de un proceso es mediante su emisión de dióxido de carbono. El presente Trabajo Especial de Grado consiste en evaluar la magnitud de la huella de carbono generada por los procesos de manufactura y la cadena de logística hasta su consumo de pellets fabricados en el país para una demanda de10.000 $\frac{toneladas}{año}$, y comparar si el carbono emitido es, en magnitud, igual o menor al secuestro de carbono proporcionado por la biomasa en su estado natural en forma de árboles en los bosques. De esta manera se garantiza la renovabilidad ecológica del proceso, proporcionando una fuente de generación de energía limpia y una oportunidad sustentable de comercialización a nivel ambiental en Venezuela.

Palabras Clave: Pellets, Sustentable, Emisión, Carbono, Secuestro, Madera.

INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS I

SINOPSIS II

INDICE DE CONTENIDO III

ÍNDICE DE TABLAS X

ÍNDICE DE FIGURAS XII

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES XIII

ÍNDICE DE ECUACIONES XV

ÍNDICE DE GRÁFICOS XVI

ÍNDICE DE ANEXOS XVII

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I 3

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3

1. Problema 3
2. Justificación 4
3. Objetivo General 6
4. Objetivos Específicos 6
5. Alcances y limitaciones 7
   5.1. Alcance 7
   5.2. Limitaciones 7

CAPÍTULO II 9

MARCO TEÓRICO 9

1. Tipos de madera 9
   1.1. Maderas Duras 9

1.2. Maderas blandas 9
2. Propiedades de la madera 9
2.1 Contenido de Humedad 9
2.2. Densidad Aparente: 10
3. Composición química de la madera 10
3.1. Celulosa 10
3.2. Hemicelulosa 11
3.3. Lignina 11
3.4. Pino Caribe (Pinus caribaea var. Hondurensis) 11
3.5. Biomasa 11
3.6. Biomasa densificada 12
3.7. Biocombustible 12
3.8. Pellets 12
4. Maquinaria 12
4.1 Descortezador 12
4.2. Separador 13
4.3. Astillador 13
4.4. Amoladora (Grinder) 13
4.5. Desfibradora (Shredder) 13
4.6. Molino de martillos 13
4.7. Pelletizadora 13
5. Parámetros de estudio 14
5.1 Huella de carbono 14
5.2. Efecto invernadero 14
5.3. Gases invernaderos 15

5.4. Carbono Secuestrado 15

CAPÍTULO III 15

MARCO METODOLÓGICO 15

1 Tipo de Investigación 15

2. Etapas de Estudio 16

CAPÍTULO IV 18

CARACTERIZACIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE PROCESOS ASOCIADOSCON LA PRODUCCION Y CONSUMO DE PELLETS 18

1. Capacidad Productiva de una Planta Generadora de Pellets en Venezuela ... 18

2. Generación y Ubicación de Materia Prima 19

3. Tala y Recolección 21

3.1. Tala 21

3.2. Desrame 22

3.3. Tronzado 22

3.4. Cargado 22

4 Transporte 22

5. Procesamiento de la Madera 23

5.1. Almacenaje de Materia Prima Entrante 24

5.2. Descortezado 24

5.3. Astillado 25

5.4. Re-Astillado 25

5.5. Almacenamiento de Astillado Fino 26

5.6. Secado 26

5.7. Molienda 26

5.8. Granulación o Pelletización 27

5.9. Enfriamiento de Pellets 27

5.10. Tamizado de Pellets 28

5.11. Almacenamiento y Despacho de Pellets 28

5.12. Equipos de transporte interno para manipulación de Productos a Granel. 28

6. Transporte final 30

CAPÍTULO V 32

CONDICIONES PARA EL ESTUDIO DE HUELLA DE CARBONO 32

1. Parámetros para el estudio de carbono secuestrado por la reserva de pinos de Uverito. 32

2. Cálculo del Carbono Secuestrado por la Reserva de Uverito 33

2.1. Carbono contenido en el árbol por encima del nivel del suelo vs masa del árbol por encima del suelo 34

2.2. Carbono contenido en el árbol por encima del nivel del suelo vs Volumen del tallo35

2.3. Carbono contenido en el árbol por encima del nivel del suelo vs diámetro a la altura del pecho. 36

3 Ingeniería inversa para el cálculo de cantidad de materia prima a recolectar.. 37

3.1. Pérdida de peso en Tamizado 38

3.2. Pérdida de peso en Pelletizado 39

3.3. Pérdida de peso en Secado 39

3.4. Pérdida de peso en Descortezado 39

3.5. Pérdida de peso en Desramado 40

3.6. Peso del tronco 41

3.7. Peso del árbol total 41

3.8. Estimando total de materia prima 41

3.9. Carbono Secuestrado Anual 44

CAPÍTULO VI 45

CALCULO DE HUELLA DE CARBONO GENERADA DURANTE TODO EL PROCESO. 45

1. Calculo de emisiones de CO_2 generadas por la utilización de motosierras en proceso de tala y recolección. 45

1.1. Emisión de Operaciones con Moto-Sierra 45

1.2. Emisiones de Cargador de Rolas de Madera 48

2. Calculo de emisiones de CO_2 generadas por el transporte de Uverito a la Planta. 50

2.1. Ubicación geográfica de la Planta 50

2.2. Emisión del Transporte 52

3. Calculo de emisiones de CO_2 generadas por el funcionamiento de la planta generadora de Pellets 54

4. Calculo de emisiones de CO_2 generadas por el transporte de la planta al puerto de exportación. 54

5. Calculo de emisiones de CO_2 generadas por el transporte desde el puerto de exportación hasta el puerto de clientes en Europa. 56

5.1. Ubicación de Potencial Cliente en Europa 56

5.2. Emisión de los navíos hasta Bélgica Europa 56

6. Emisión total generada por el proceso productivo y logística. 58

7. Comparación entre el carbono secuestrado y el carbono emitido en el proceso de generación y transporte de pellets 58

CAPITULO VII 60

MODELO DE SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE ESCENARIOS 60

1. Evaluación de escenario pesimista 60

1.1 Simulación de peso del árbol, cálculo de materia prima entrante y secuestro en escenario pesimista 61

1.2. Simulación Capacidades productivas de máquinas en escenario pesimista. 62

1.3. Simulación Emisión de Motosierras en escenario pesimista. 63

1.4. Simulación Emisión de Remolcador en escenario pesimista. 64

1.5. Simulación Emisión de Transporte Terrestre en escenario pesimista. 65

1.6. Simulación Emisión de Transporte Marítimo en escenario pesimista..... 66

1.7. Totalización de Emisiones y Balance de Carbono en escenario pesimista. 67

2. Evaluación de escenario ideal..... 68

2.1. Simulación de peso del árbol, cálculo de materia prima entrante y secuestro en escenario ideal..... 68

2.2. Simulación Capacidades productivas de máquinas secuestro en escenario ideal. 69

2.3. Simulación Emisión de Motosierras secuestro en escenario ideal. 70

2.4. Simulación Emisión de Remolcador secuestro en escenario ideal..... 71

2.5. Simulación Emisión de Transporte Terrestre secuestro en escenario ideal. 72

2.6. Simulación Emisión de Transporte Marítimo secuestro en escenario ideal. 73

2.7. Totalización de Emisiones y Balance de Carbono secuestro en escenario ideal. 74

3. Evaluación de escenario optimista..... 75

3.1. Simulación de peso del árbol, cálculo de materia prima entrante y secuestro en escenario optimista..... 75

3.2. Simulación Capacidades productivas de máquinas en escenario optimista. 76

3.3. Simulación Emisión de Motosierras en escenario optimista. 77

3.4. Simulación Emisión de Remolcador en escenario optimista. 78

3.5. Simulación Emisión de Transporte Terrestre en escenario optimista.. . 79

3.6. Simulación Emisión de Transporte Marítimo en escenario optimista. 80

3.7. Totalización de Emisiones y Balance de Carbono en escenario optimista.81

4. Comparación gráfica entre modelos. 82

5. Validación del Modelo 85

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 85

CONCLUSIONES..... 86

RECOMENDACIONES 88

ANEXOS 90

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS..... 99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Motosierras utilizadas en el estudio. Fuente: "Analysis of the duration of basic logging operations performed using a chainsaw" Gałęzia, Tomasz. 21
Tabla 2 Características de camión volquete. Fuente: Delgado & Díaz, 2014. 22
Tabla 3 Características de camión volquete. Fuente: Delgado & Díaz, 2014. 22
Tabla 4 Datos energéticos de remolcador forestal. Fuente: Elaboración Propia..... 24
Tabla 5 Datos energéticos de descortezadora. Fuente: Elaboración Propia. 24
Tabla 6Datos energéticos de Astilladora. Fuente: Elaboración Propia..... 25
Tabla 7 Datos energéticos de Re-Astilladora. Fuente: Elaboración Propia. 25
Tabla 8Datos energéticos del Secador. Fuente: Pirraglia A, González R, Saloni D..... 26
Tabla 9Datos energéticos de Molienda. Fuente: Elaboración Propia..... 26
Tabla 10 Datos energéticos de Pelletizadora. Fuente: Elaboración Propia..... 27
Tabla 11Datos energéticos de Enfriador. Fuente: Elaboración Propia..... 27
Tabla 12 Datos energéticos de Tamizadora. Fuente: Elaboración Propia. 28
Tabla 13Datos energéticos de Válvula Rotativa. Fuente: Elaboración Propia. 29
Tabla 14Datos energéticos de Transportador Tubular. Fuente: Elaboración Propia..... 29
Tabla 15Datos energéticos del Elevador de Cangilones. Fuente: Elaboración Propia. 29
Tabla 16Especificaciones técnicas de contenedor a utilizar (De Santis y Ochoa). 31
Tabla 17 Gases emitidos por motores dos tiempos menores a 25 hp operados manualmente. Fuente: Exhaust Emission Factors for Nonroad Engine Modeling – Spark ignition. (Enviroment Protection Agency, 2007) 46
Tabla 18 Motosierras utilizadas para el cálculo de tiempos de operación en el estudio. Fuente: "Analysis of the duration of basic logging operations performed using a chainsaw" Galezia. 46
Tabla 19 Porcentajes de Utilización de energía promedio para equipos en obra. Fuente: Spon's Civil Engineering and Highway Works Price (Langdon, 2014) 48
Tabla 20Factores de emisión por Consumo de combustible fósil. Fuente: (U.S Climate Registry Organization, 2014)..... 49
Tabla 21 Valores para Tire Rolling Resistance en sus vertientes "Steer" y "Drive". Fuente: "SmartWay Verified Low Rolling Resistances Tires" Envioremental Protection Agency. 53

Tabla 22 Totalización de emisiones de CO2. Fuente: Propia 58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones de dióxido de carbono y otros gases invernaderos generados en las etapas de siembra, producción y consumo. Fuente: Propia 19

Figura 2 Valores de Carbono en el árbol y la línea de tendencia para el modelo seleccionado (1), para predecir el carbono del tallo a partir de la masa del árbol. Fuente: "Estimation of Above Ground Tree Biomass and Carbon of Pinus caribaea (Morelet)" Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011) 35

Figura 3 Distribución Estándar Residual para el modelo (2). Fuente: "Estimation of Above Ground Tree Biomass and Carbon of Pinus caribaea (Morelet)".Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011) 36

Figura 4Distribución Estándar Residual para el modelo (3). Fuente: "Estimation of Above Ground Tree Biomass and Carbon of Pinus caribaea (Morelet)".Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011 37

Figura 5 Desarrollo de ingeniería inversa con pérdidas porcentuales de materia en cada etapa relevante. Fuente: Propia. 38

Figura 6 Contraste de límite inferior para cantidad mínima de producción para balance de carbono positivo. Fuente Propia. 84

Figura 7 Contraste de límite superior para cantidad mínima de producción para balance de carbono positivo. Fuente Propia. 84

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Mapa de distancias entre Uverito y el Bosque de Uverito. Fuente: Google Earth..... 51
Ilustración 2Mapa de distancias entre Uverito y Parque de Distribución Guri. Fuente: Google Earth..... 52
Ilustración 3Mapa de distancias entre Uverito y Puerto Palúa. Fuente: Google Earth. 55
Ilustración 4 Captura de pantalla de la simulación para el cálculo del peso del árbol, cálculo de materia prima entrante y secuestro. Fuente: Propia. 61
Ilustración 5 Captura de pantalla de la simulación para las capacidades productivas de máquinas. Fuente: Propia. 62
Ilustración 6 Captura de pantalla de la simulación para Emisión de Motosierras. Fuente: Propia..... 63
Ilustración 7 Captura de pantalla de la simulación para Emisión de Remolcador. Fuente: Propia. 64
Ilustración 8 Captura de pantalla de la simulación para Emisión de Transporte Terrestre. Fuente: Propia 65
Ilustración 9 Captura de pantalla de la simulación para Emisión de Transporte Marítimo. Fuente: Propia..... 66
Ilustración 10 Captura de pantalla de la simulación para Totalización de Emisiones y Balance de Carbono. Fuente: Propia 67
Ilustración 11 Captura de pantalla de la simulación escenario ideal para el cálculo del peso del árbol, cálculo de materia prima entrante y secuestro. Fuente: Propia. 68
Ilustración 12 Captura de pantalla de la simulación escenario ideal para Emisión de Motosierras. Fuente: Propia. 70
Ilustración 13 Captura de pantalla de la simulación escenario ideal para Emisión de Remolcador. Fuente: Propia 71
Ilustración 14 Captura de pantalla de la simulación escenario ideal para Emisión de Transporte Terrestre. Fuente: Propia 72
Ilustración 15 Captura de pantalla de la simulación escenario ideal para Emisión de Transporte Marítimo. Fuente: Propia..... 73

Ilustración 16 Captura de pantalla de la simulación escenario ideal para Totalización de Emisiones y Balance de Carbono. Fuente: Propia 74
Ilustración 17 Captura de pantalla escenario optimista, de la simulación para el cálculo del peso del árbol, cálculo de materia prima entrante y secuestro. Fuente: Propia. 75
Ilustración 18 Captura de pantalla de la simulación escenario optimista para las capacidad productivas de máquinas. Fuente: Propia. 76
Ilustración 19 Captura de pantalla de la simulación escenario optimista para Emisión de Motosierras. Fuente: Propia. 77
Ilustración 20 Captura de pantalla de la simulación para Emisión de Remolcador. Fuente: Propia 78
Ilustración 21 Captura de pantalla de la simulación escenario optimista para Emisión de Transporte Terrestre. Fuente: Propia 79
Ilustración 22 Captura de pantalla de la simulación escenario optimista para Emisión de Transporte Marítimo. Fuente: Propia 80
Ilustración 23 Captura de pantalla de la simulación escenario optimista para Totalización de Emisiones y Balance de Carbono. Fuente: Propia 81

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Relación entre el carbono por encima del nivel del suelo del árbol y la biomasa por encima del nivel del suelo del árbol.Fuente: "Estimation of Above Ground Tree Biomass and Carbon of Pinus caribaea (Morelet)". Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011.. 34

Ecuación 2 Relación entre Carbono en el árbol y Volumen del Tallo. Fuente: "Estimation of Above Ground Tree Biomass and Carbon of Pinus caribaea (Morelet)". Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011..... 35

Ecuación 3 Relación entre Carbono en el árbol y diámetro a la altura del pecho. Fuente: "Estimation of Above Ground Tree Biomass and Carbon of Pinus caribaea (Morelet)". Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011. 36

Ecuación 4 Cálculo del peso de la corteza para el pino ponderosa. Fuente: "Equations for predicting tree biomass (in kilograms) of Pacific Northwest species". (Gholz, 1978). 40

Ecuación 5 Cálculo del peso de ramas vivas para el pino ponderosa. Fuente: "Equations for predicting tree biomass (in kilograms) of Pacific Northwest species". (Gholz, 1978) 40

Ecuación 6 Cálculo del peso de ramas muertas para el pino ponderosa. Fuente: "Equations for predicting tree biomass (in kilograms) of Pacific Northwest species". (Gholz, 1978) 40

Ecuación 7 Cálculo del peso de follaje para el pino ponderosa. Fuente: "Equations for predicting tree biomass (in kilograms) of Pacific Northwest species". (Gholz, 1978) 40

Ecuación 8 Cálculo del peso del tronco para el pino ponderosa. Fuente: "Equations for predicting tree biomass (in kilograms) of Pacific Northwest species". (Gholz, 1978) 41

Ecuación 9 Emisión de CO2 por motor de motosierra. Fuente: "Exhaust Emission Factors for Nonroad Engine Modeling – Spark ignition". (Enviroment Protection Agency, 2007)..... 47

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Comparación de Escenarios. Fuente: Propia 82
Gráfico 2 Comparación y líneas de tendencia para carbono secuestrado y emisión del proceso en 3 escenarios. Fuente Propia 82
Gráfico 3 Toneladas de CO2 vs Cantidades Requeridas de Producción en distintos escenarios. Fuente: Propia 83

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Camión tipo Volquete con Ficha Técnica. Fuente: http://shanglong.en.alibaba.com/product/1803904410-214215099/SINOTRUK_ZZ3257M3447A_Truck_Howo_6x4_Dump_Trcuk_Left_Hand_Drive.html (octubre de 2014) 90

Anexo 2 Remolcador Forestal Taiwa con Ficha Técnica. Fuente: http://www.alibaba.com/product-detail/timber-grapple-log-clamp-wheel-loader (octubre de 2014) 91

Anexo 3 Cargadores Hidráulicos con Ficha Técnica. Fuente: http://www.alibaba.com/product-detail/manual-hydraulic-loaders-forklifts_349319395.html?s=p (octubre de 2014) 92

Anexo 4 Itinerarios de navíos en rutas al sur del caribe. Fuente: www.vertraco.nl (octubre de 2014) 92

Anexo 5. Calculadora en Excel para determinar emisiones de CO2 en toneladas anuales por la utilizacion de motosierras en un periodo de tiempo determinado. La calculadora contempla las normas EPA fase II. Fuente: Propia 93

Anexo 6. Calculadora en Excel para determinar el peso del árbol y sus componentes utilizando las ecuaciones de Gholz et al. (1979) para pino ponderosa. Los cálculos continúan con la ingeniería inversa del proceso para obtener la cantidad de árboles necesarios para obtener la cantidad de pellets deseados. Fuente: propia 93

Anexo7. Software perteneciente a la Envioremental Protection Agency en base a Matlab. Permite el cálculo de emisión de CO2 para el camión en cuestión. Fuente: www.epa.gov(septiembre de 2014) 94

Anexo 8. Resultados emitidos por el programa presentado en el anexo 7 para el camión en cuestión. Fuente: www.epa.gov (Septiembre de 2014) 94

Anexo9. Ruta Puerto Palua – Antwerp. Calculado con la herramienta electrónica Google MapsDistanceCalculator Fuente:http://www.daftlogic.com/projects-google-maps-distance-calculator.htm (Septiembre de 2014) 95

Anexo 10. Cálculos generados a partir de Software creado por la NationalTechnicalUniversity of Athens. Se presentan las emisiones por parte de un transporte que cumple con las características del Beautrader y Beautriumph, distancia

a recorrer, carga autorizada, velocidad crucero y cantidad de sulfuro en su combustible. Fuente: http://www.martrans.org/emis/ (Septiembre de 2014) 95
Anexo 11 Información detallada generada por el programa creado por la NationalTechnicalUniversity of Athens para el cálculo de emisiones de barcos. Se especifican los días de transporte, tiempo en el puerto, consumo de combustible y sus respectivas emisiones. Fuente: http://www.martrans.org/emis/ (Septiembre de 2014). 96
Anexo 12. Tabla.3 del documento "Greenhouse Gas EmissionsModel (GEM) UserGuide" en donde se comprenden las especificaciones del camión en cuestión y el motivo de la selección de la opción "Medium Heavy-Duty" en el software. Fuente: www.epa.gov (septiembre de 2014) 97
Anexo 13 Especificaciones técnicas de tara para ruta Uverito-Planta. Fuente: http://www.alibaba.com/product-detail/20ft-and-40ft-New-3-axle_60033296377.html (Octubre 2014) 98

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el campo de la generación de combustibles y energías alternativas crece exponencialmente, esto dado al problema que presenta la dependencia de los derivados de combustible fósil debido a su naturaleza no renovable. Los países más desarrollados se ven en busca de nuevas formas de energías que puedan ser suministradas de forma limpia desde su creación hasta su implementación.

La madera como biocombustible posee grandes cualidades sobre los combustibles de origen fósil, siendo la principal ventaja de esta su origen renovable, sin embargo, dicha materia prima debe ser transformada para hacer el uso más eficiente de la misma, tanto en transporte como en generación de energía a partir de su quema.

Así se propone el uso de pellets elaborados a partir de madera, constituidos principalmente de granos de madera aserrada y compactada para facilitar su transporte, dado a que no se carga el peso de agua que contiene la madera húmeda, y sus dimensiones reducidas hacen que su manipulación durante este proceso sea de mayor facilidad. A esto se le agrega que su entrega de energía calorífica se hace mayor en esta forma, dado al bajo contenido de agua que genera una combustión de mayor temperatura.

Ahora, se sabe que la madera proviene de diversas especies arbóreas en el mundo, y Venezuela en la actualidad cuenta con la mayor reserva forestal hecha por el hombre en el bosque de Uverito en Anzoátegui, haciendo que la generación de pellets como combustible para otros países pueda significar una fuente de exportación importante para el país, complementando a la petrolera.

Agregado a esto, a niveles ecológicos, cada vez más países exigen reportes de emisión de dióxido de carbono generado a partir de actividades dedicadas a la

generación de energía y otras, por ende, surge la necesidad de estudios como el del presente Trabajo Especial de Grado.

Se sabe que las especies arbóreas a lo largo de su vida absorben dióxido de carbono mediante el proceso de fotosíntesis para ser convertido en energía en forma de celulosa y clorofila para la planta. Al proponer generar energía a base de una fuente arbórea surge la interrogante a nivel ambiental sobre el balance de carbono obtenido a partir de las emisiones generadas por los procesos de elaboración y comercialización de pellets contrastado con el carbono secuestrado por el árbol durante su vida, hasta su madurez y corte.

El presente estudio tiene como fin responder a dichas interrogantes, mediante la consideración de factores de emisión para cada área de proceso, e igualmente obtener mediante diversas herramientas, factores de emisión y de secuestro unitarios para luego ser multiplicados por la demanda mínima requerida por la exportación de dicho biocombustible. Y finalmente calcular el balance de carbono generado, para determinar la huella ecológica que deja el proceso.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1. Problema

Actualmente existen diversos procesos para la generación de energía calórica, esta usada principalmente para los sistemas de calefacción en hogares donde el clima lo amerite. El transporte de pellets de madera prueba ser un método útil para tal fin, el proceso de elaboración de los mismos permite que estos puedan ser transportados con mayor facilidad que otros tipos de combustibles para calefacción dado su bajo contenido de humedad y alta densidad de la madera.

Se sabe que la gran mayoría de los procesos energéticos en el presente emiten ciertas cantidades CO2 para su desarrollo. Siendo el impacto ambiental una realidad cada vez más alarmante, se realizan estudios sobre cuál proceso energético es más amigable al medio ambiente, siendo factor fundamental para el estudio, las emisiones de dióxido de carbono que este pueda producir, de manera que al seleccionar una fuente de energía, en este caso calórica, se tomen en cuenta no solo los costos de producción, transporte, manufactura, etc. sino también su sustentabilidad ambiental. En este caso al trabajar con madera como material energético se habla de "bioenergía", dicho término es referido a toda la energía generada a partir de cualquier material orgánico que haya guardado energía a través de la recepción de luz solar.

Ahora siendo esta una fuente de energía renovable, se toma en cuenta el concepto del término donde se puede generar energía en forma cíclica, para el caso de la madera, durante la cosecha de árboles, crecimiento, hasta el momento de la tala, estos generan a través de procesos de fotosíntesis un consumo de dióxido de carbono para producir oxígeno. Por ende es importante conocer el impacto de dióxido de carbono en el proceso de pelletización de madera, para luego este pueda ser comparado con la cantidad de oxigeno emitido por los arboles a ser usados en dicho proceso. El balance energético que se plantea en este caso se le llama el carbono

"secuestrado" del proceso, donde el oxígeno generado mitiga la emisión de carbono también generada haciendo un ciclo.

Para el caso Venezuela, en el siglo XX, la explotación del petróleo cambió cualitativamente la estructura económica y social del país, la madera se utilizó sólo en elaborados proyectos residenciales y de uso recreativo. Todo esto aun cuando el país dispone de una riqueza forestal abundante. Según el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, en su último Informe de Venezuela sobre recursos filogenéticos (2011).

Hoy en día Venezuela cuenta con un gran potencial de madera proveniente de plantaciones de pino Caribe en los estados Anzoátegui y Monagas, manejada en gran escala por Productos Forestales de Oriente C.A. (PROFORCA-CVG) de la Corporación Venezolana de Guayana. Para el estudio propuesto se evaluarán las huellas energéticas de pellets elaborados con la madera proveniente de la especie pino caribe.

Finalmente, el siguiente estudio es un complemento a la posibilidad del establecimiento de una industria cuyo fin sería la elaboración de pellets para la exportación como combustible energético a los países con alta demanda de los mismos (la mayoría de los países europeos, y un mercado creciente en Asia) y proveer una fuente energética ambientalmente sustentable, innovadora y distinta a la ya marcada dependencia petrolera de nuestro país.

2. *Justificación*

El siguiente estudio representa la parte final del conjunto de tesis que tratan con la implementación de una planta generadora de pellets en Venezuela.

Siendo la tesis de Díaz & Delgado (2014) sobre el diseño de la planta, y la de De Santis & Ochoa (2014) sobre la cadena de suministro que abastece a la misma. El presente estudio abarca el impacto ecológico que tiene el proceso de generación y transporte de

pellets en el país debido a la reciente consideración, por parámetros internacionales del resguardo del ambiente.

En la actualidad, nos encontramos con un campo comercial sumamente avanzado, donde las competencias de negocios no solo deben garantizar un rendimiento monetario lucrativo, sino un bajo impacto al medio ambiente. Por ende los estudios de emisiones de carbono que genera cualquier proceso son cada vez más necesarios durante el desarrollo conceptual de cualquier proyecto, siendo este en algunos países, requerido obligatoriamente antes de siquiera comenzar su desarrollo físico, dado a que el control de emisiones es cada vez más restringido en diferentes comunidades alrededor del mundo.

Dentro del proceso de generación de pellets en el país, en esta oportunidad se trata de algo con un enfoque no solo de emisión, sino también de secuestro de carbono. Esto es dado a que los árboles requeridos para la producción, también son capaces de absorber carbono del ambiente. Por ende, se desea saber, si verdaderamente, el proceso de generación y comercialización genera un balance positivo o neutral a nivel ecológico, este es el motivo principal del estudio, verificar si el proceso es ecológicamente sustentable.

Sin embargo en la actualidad, el principal problema de los estudios de emisiones de carbono, es que se enfocan en un área principal del proceso de producción, en lugar de enfocar la totalidad del mismo, Por ende, en este caso, se propone la selección de parámetros que disminuyan el incremento de la huella de carbono generada mientras se mantienen los márgenes de producción intactos, considerando la producción totalitaria.

3. *Objetivo General*

Evaluar el impacto de la manufactura y distribución de pellets en Venezuela, sobre la huella de carbono en el medio ambiente.

4. *Objetivos Específicos*

- Analizar las emisiones de operaciones y equipos requeridos en los procesos de elaboración y transporte de pellets.
- Estimar la eficiencia de las operaciones y equipos requeridos en los procesos de elaboración y transporte de pellets.
- Seleccionar las operaciones más eficientes en los procesos de elaboración y transporte de pellets.
- Determinar los factores que influyen en el incremento o disminución de las concentraciones de dióxido de carbono en la fabricación y transporte de pellets.
- Diseñar un modelo de simulación que represente el comportamiento de los factores contemplados dentro del proceso de fabricación y transporte de pellets.
- Verificar la validez que tiene el modelo de simulación diseñado para representar el comportamiento de los factores contemplados dentro del proceso de fabricación y transporte de pellets.
- Evaluar posibles escenarios de incremento o disminución de las concentraciones de dióxido de carbono y de los procesos de fabricación y transporte de pellets.

5. *Alcances y limitaciones*

5.1. Alcance

Este Trabajo de Grado busca presentar el desarrollo de un modelo para la determinación de la huella de carbono en el proceso de pelletización en Venezuela, abarcando los procesos de tala, producción y uso de los pellets, al igual que el transporte de los mismos. La implementación y puesta en marcha del modelo a gran escala no será contemplada.

La madera a usar en el estudio será de la especie "pino caribe" ubicada en las reservas forestales de Uverito, en estado Anzoátegui, Incluye el desarrollo técnico, diseño experimental, prueba del modelo y conclusiones hechas para las especies madereras en Venezuela basada en sistemas de investigación proporcionados por el CIDI en la UCAB (centro de investigación de ingeniería) y sus contactos con el departamento de bosques y biomateriales en la Universidad de Carolina del Norte, así como el departamento de sustentabilidad ambiental a cargo del ingeniero Joaquín Benítez. Consultas de fuentes digitales, y otros trabajos de grado presentados anteriormente también fueron consultados para entregar dicho estudio.

5.2. Limitaciones

- La innovación del campo de las energías alternativas, y procesos con bajas emisiones de carbono hacen que las herramientas de estudio no cuenten con amplios antecedentes a diferencia de otros campos energéticos.

- Dentro del estudio de huellas energéticas para cualquier causa, se presentan un elevado número de factores a considerar que añaden una emisión de carbono dentro del proceso a estudiar, por ende el alcance debe ser sumamente restringido, a consideración del tiempo de entrega del presente estudio.

- La limitación de la magnitud de la muestra a analizar dado al tiempo de desarrollo del estudio y los recursos con que se cuentan pueden crear incertidumbres a grandes escalas, per ende las simulaciones consideran una tolerancia.

- Existen limitados equipos y procesos de pelletización para consumo como energía calórica en Venezuela, dificultando la variabilidad de las emisiones de CO2 a ser estudiadas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Con la finalidad de comprender a fondo lo discutido en el presente documento, se presentan una serie de conceptos y definiciones clave, en los que se desarrolla la siguiente investigación:

1. *Tipos de madera*

1.1. *Maderas Duras*

Generalmente uno de los grupos botánicos de árboles que se caracterizan por tener poros o vasos y hojas frondosas que tienden a caducar. Se tienen especies como el nogal, arce, fresno, olivo, encina, cerezo, castaño, olmo y roble, entre otros. El término "maderas duras" no se refiere a la verdadera dureza de las especies. (McConnell & Irby, 2013)

1.2. Maderas blandas

Grupo botánico de árboles que no poseen poros o vasos y tienden a tener hojas de tipo aguja o escamosa. Las especies contenidas en este grupo incluyen las coníferas y entre las más destacadas se tiene el pino, abeto, álamo. carcoma y cicuta. El término "maderas blandas" no se refiere a la verdadera dureza de las especies. (McConnell & Irby, 2013)

2. *Propiedades de la madera*

2.1. Contenido de Humedad

Relación del peso del agua contenido en la madera expresado de forma porcentual tomando como referencia la diferencia de peso existente entre la muestra de madera original versus la misma muestra luego de ser secada en un horno. El procedimiento para su obtención esta normalizado por organización ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers) bajo el código S358.3 (revisión de mayo 2012).

En el mismo se dicta que debe ser utilizada una muestra mayor a los 25 gramos, ser pesada con tres cifras significativas y posteriormente ser colocado dentro del Horno secador por un periodo de 24 horas a una temperatura alrededor de los 100 grados Celsius. Para muestras con contenidos volátiles, se permite un tiempo de secado de 72 horas a una temperatura de 55 grados Celsius. Cumplido el tiempo de secado, se pesa nuevamente la muestra y la diferencia permite obtener el contenido de humedad de la misma. (Pirraglia, Velarde, & Saloni, 2013)

2.2. *Densidad Aparente:*

Se define como la masa (peso) de la muestra solida seca en relación al volumen de la muestra total que contiene humedad. Esta no es una propiedad intrínseca del material, varía dependiendo de cómo es manejado. Esta relación permite conocer que tanta cantidad (en peso) de un material puede ser almacenado en un volumen deseado, siendo una herramienta muy útil para el movimiento de mercancía. (Pirraglia, Velarde, & Saloni, 2013)

La medición de la densidad aparente se encuentra normalizada por la ASAE (American Society of Agricultural Engineers) bajo el código S269.4. En el documento se explica cómo debe ser llevado a cabo el proceso para cubos, pellets y migas. (Pirraglia, Velarde, & Saloni, 2013)

3. ***Composición química de la madera***

3.1. *Celulosa*

Carbohidrato que es el principal constituyente de la madera y formador de la estructura de las células de las madera. Este está hecho por unidades de glucosa ordenadas en estructuras constituidas colocadas en una larga y recta cadena molecular. Las maderas de tipos duras y blandas contienen entre 40 % y 44% de celulosa. (McConnell & Irby, 2013)

3.2. *Hemicelulosa*

Polímeros de carbohidratos de cadena ramificada que consiste en glucosa y varios otros azucares. Se presentan en cantidades del 15% al 35 % en maderas duras y del 20% al 32% en maderas blandas (basado en el peso seco de cada tipo). (McConnell & Irby, 2013)

3.3. *Lignina*

Conocida coloquialmente como la pega que une la madera. Es un polímero complejo de alto peso molecular el cual está intimamente asociado con la celulosa y hemicelulosa. Se consigue en proporciones del 18% al 25% en maderas duras y del 25% al 35% en maderas blandas (basado en el peso seco de cada tipo). (McConnell & Irby, 2013)

3.4. *Pino Caribe (Pinus caribaea var. Hondurensis)*

Árbol perennifolio, de 20 a 30 m (hasta 45 m) de altura con un diámetro a la altura del pecho de 50 a 80 cm, y hasta 1,35 m. De excelentes condiciones de adaptación de madera blanda capaz de crecer en altitudes de 0 a 1000 metros sobre el nivel del mar a temperaturas entre 20 y 27 °C y un clima que genere lluvias entre 660 a 4000 mm. Su madera se caracteriza por ser de alta durabilidad, fuerte, resinosa, tosca, textura mediana y grano típicamente recto. (Barrett et Golf. 1962). Cuenta con una densidad que puede variar desde 416 hasta 817 kg/m^3 a un 12% de humedad. (U.S Department of Agriculture, 2007).

3.5. *Biomasa*

Recurso energético derivado de materia orgánica. Entre estos se encuentran la madera, desechos provenientes de la agricultura y cualquier otro material formado por células orgánicas que al ser transportados producen energía calórica. Este grupo también incluye algas, aguas residuales y otras sustancias orgánicas que tratadas bajo un proceso químico pueden ser utilizadas para la obtención de energía calórica. (McConnell & Irby, 2013)

3.6. *Biomasa densificada*

Material resultante de la compresión de aserrín y astillas de madera o cualquier otro compuesto orgánico con potencial energético que permita obtener un producto de calidad con bajo contenido de humedad, alta densidad energética, tamaño homogéneo y sea fácil de transportar. (Chartis Inc., 2009)

3.7. *Biocombustible*

Material energético proveniente de fuentes renovables los cuales no tienen ningún fundamento o vínculo con el petróleo y sus derivados. Se utiliza la biomasa como materia prima y se transforma de múltiples maneras para la creación de energía. (Washington State University, 2012)

3.8. *Pellets*

Forma de biomasa densificada compuesta por trazas de madera y polvo, así como otros materiales orgánicos utilizados para la obtención de energía calórica a través de su transporte en un horno especializado. Estos tienen dimensiones comprendidas entre 6 a 8 milímetros de diámetro y 38 milímetros de longitud. Suelen tener una densidad aparente de 40 libras/pie^3 y un contenido de humedad entre 9 y 11%. (Saloni & Guillermo, 2013)

Los pellets de madera producen volúmenes menores de hidrocarburos, como el metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Para este último, se considera ser carbón neutro, es decir, que vuelve a ser absorbido por las plantas para la generación de oxígeno, por lo que este tipo de combustible no añade ni elimina carbono al ambiente. (Saloni & Guillermo, 2013)

4. ***Maquinaria***

4.1. *Descortezador*

Maquina encargada de eliminar la corteza del árbol a procesar|. (Virginia Tech Forestry, 2014)

4.2. Separador

Tiene como finalidad producir una grieta longitudinal sobre el tronco con el objetivo de obtener 2 o más piezas sin la necesidad de utilizar herramientas de corte. Suele ser utilizado cuando la forma del producto y sus propiedades mecánicas no son relevantes. (Virginia Tech Forestry, 2014)

4.3. Astillador

Permite producir virutas o astillas de madera con el objetivo de continuar el proceso del material. Son utilizados en la industria del papel y producción de pulpa, además de ser utilizadas para facilitar su transporte en la industria de la biomasa y procesa tanto maderas duras como blandas. (Virginia Tech Forestry, 2014)

4.4. Amoladora (Grinder)

Máquina que permite procesar troncos completos alimentados por una banda transportadora. (Virginia Tech Forestry, 2014)

4.5. Desfibradora (Shredder)

Maquina a la cual se alimenta pedazos procesados del tronco con el fin de disminuir el tamaño del material. (Virginia Tech Forestry, 2014)

4.6. Molino de martillos

Por medio de un motor giratorio al cual están unidos una serie de martillos que, al girar, desfibran las astillas de madera al punto de volver prácticamente aserrín el material. Las partículas tienden a ser entre 1 y 3 milímetros de longitud. Procesa tanto maderas duras como blandas. (Virginia Tech Forestry, 2014)

4.7. Pelletizadora

Maquina a la cual se alimenta con el material procesado por el molino de martillos con la finalidad de densificarlo. Al introducir la materia prima en la tolva, esta

progresivamente alimenta un sistema que permite, por medio de un motor giratorio, impulsar por fuerza centrífuga las partículas y hacerlas pasar por una plancha que contiene la forma deseada del pellet. Con la ayuda de un aditivo aglutinante y el calor generado en la máquina, se genera un producto consolidado capaz de resistir ciertas tensiones, principio importante para su transporte. (Virginia Tech Forestry, 2014)

5. *Parámetros de estudio*

5.1. *Huella de carbono*

"Una huella de carbono es una medida de la cantidad de dióxido de carbono emitido a través de la combustión de combustibles fósiles. En el caso de una organización empresarial, es la cantidad de CO2 emitido ya sea directa o indirectamente como resultado de sus operaciones diarias. También podría reflejar la energía fósil consumida para la generación de una actividad o producto en el mercado." (Grub & Ellis, 2007)

Según la "Paliamentary Office of Science and Technology" (POST) la huella de carbono se puede definir como "la cantidad de total de CO2 y otros gases que forman el efecto invernadero, emitidos a lo largo del ciclo de vida de un proceso o producto. Se expresa como gramos de CO2 equivalente por kilovatio hora de la generación (gCO2eq/KWh), que representa los diferentes efectos del calentamiento global de otros gases del efecto invernadero."

5.2. *Efecto invernadero*

"Término que hace referencia a una propiedad física de la atmosfera de la tierra. Si la tierra no tuviese atmosfera la temperatura promedio en la superficie seria alrededor de los -18◦C en vez de los cómodos 15◦C encontrados hoy en día. La diferencia entre estas temperaturas es generada por un conjunto de gases llamados gases invernaderos, los cuales afectan el balance energético de la tierra absorbiendo radiación infrarroja. El funcionamiento de la atmosfera terrestre permite absorber radiación solar logrando despedir la radiación infrarroja al espacio. Los gases

invernaderos causan que la atmosfera absorba una cantidad mayor de energía infrarroja de la que se despide al espacio, resultando en un calentamiento neto de la atmosfera y superficie terrestre. Esto vendría siendo el "efecto invernadero natural". Cuando las actividades humanas generan emisión de este tipo de gases y aumenta la concentración de los mismos en la atmosfera, más radiación infrarroja es atrapada en la superficie de la tierra aumentando el efecto invernadero"

5.3. *Gases invernaderos*

Los principales gases del efecto invernadero son el dióxido de carbono (55%), metano (15%), óxido nitroso (6%) y clorofluorocarbonos (24 %). En la atmosfera también se encuentra el ozono (O3) y vapor de agua atmosférico (H2O) el cual genera una alta contribución al efecto natural invernadero y su presencia no es afectada directamente por actividades humanas.

5.4. *Carbono Secuestrado*

Terrestre o biológico, el secuestro de carbono es el proceso donde los árboles y las plantas absorben el dióxido de carbono, liberan oxígeno, y almacenan el carbono.

5.5. Resistencia a la rodadura (Rolling Resistance):

"Perdida de energía (o energía consumida) por unidad de distancia recorrida" (National Highway traffic safety Administration , 2009)

Esta se puede clasificar en "Tire Rolling Resistance" y "Steer Rolling Resistance". La primera hace referencia a las ruedas de un vehículo pertenecientes al tren trasero mientras que la segunda se refiere a las ruedas pertenecientes al tren delantero.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

1. Tipo de Investigación

Cumpliendo con los objetivos planteados, el siguiente trabajo especial de grado tiene propiedades de investigación documental, ya que en la misma se presenta una

investigación basada en fuentes documentales existentes presentadas por antiguas investigaciones que forman la base del objetivo general del trabajo así como fuentes actuales en la red que permiten complementar el siguiente trabajo. Además, se incluye el diseño de un experimento que permite, por medio de herramientas de simulación, determinar los factores deseados según el estudio.

Por último, la comparación de diversos casos y variables permitirán obtener un informe descriptivo según los escenarios planteados.

2. *Etapas de Estudio*

Fase	*Objetivos*	*Actividades*	*Herramientas*
1	Establecer las emisiones y secuestro de dióxido de carbono, derivado del uso para generación de energía a partir de la especie de madera venezolana 'Pino Caribe"	Recopilar toda la información certificada necesaria para fundamentar el estudio.	***Investigación documental.***
2	*Analizar las operaciones y equipos requeridos en los procesos de elaboración de pellets.*	*Desarrollar información desde la tala del árbol hasta la recepción del cliente principal.*	***Investigación documental.***
3	*Verificar el consumo de energía de las operaciones y equipos requeridos en los procesos de elaboración y transporte de pellets*	*Comparar valores de producción contra emisión de CO2 de los distintos tipos de operaciones realizadas para la elaboración de pellets.*	***Investigación documental.***

4	*Proponer las operaciones y equipos que generen el menor impacto en la huella de CO2 en los procesos de elaboración y transporte de pellets*	*Calcular los factores de emisión de cada equipo y operación y reportar el uso más apropiado de los mismos para disminuir el CO2 generado.*	***Investigación documental.***
5	*Determinar los factores que influyen en el incremento o disminución de las concentraciones de dióxido de carbono y de la energía calórica entregada en la transporte de pellets.*	*Densidad de la madera, contenido de humedad, tipo de máquina.*	***Investigación documental.***
6	*Diseñar un modelo de simulación en Excel que represente el comportamiento de los factores contemplados dentro del proceso de fabricación y transporte de pellets.*		***Microsoft Excel, Software específicamente diseñado para el cálculo de ciertas variables, investigación documental.***
7	*Evaluar posibles escenarios de incremento o disminución de las concentraciones de dióxido de carbono respecto a la cantidad demandada anual de pellets.*		***Investigación documental.***

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE PROCESOS ASOCIADOSCON LA PRODUCCION Y CONSUMO DE PELLETS

1. *Capacidad Productiva de una Planta Generadora de Pellets en Venezuela*

Al establecer el alcance del presente estudio, se toma en cuenta la capacidad de producción de materia prima que debe tener la planta.

"En este sentido se sabe que en Venezuela existe una compañía llamada "Venezuela Pellets Company C.A", ubicada en Puerto Ordaz, y esta estima que su capacidad de producción debe ser de 10.000 toneladas anuales para incursionar en el mercado de pellets de madera, dicha información es sustentada por expertos en el área forestal venezolana que están a disposición de la empresa exclusivamente" (Delgado & Díaz, 2014).

Por ende se plantea como escenario principal, una planta productora con capacidad de 10.000 toneladas anuales. De igual manera se considera basar los cálculos de costo energético en una planta diseñada "Para trabajar 220 días al año por 10 horas diarias de forma continua a fin de garantizar el producto terminado de 10.000 toneladas anuales" (Delgado & Díaz, 2014). Es importante entonces la siguiente conversión:

$$10.000\,\frac{toneladas}{año}\cdot\frac{1\,año}{220\,días}=45{,}5\,\frac{toneladas}{día}\cdot\frac{1\,día}{10\,horas}=4{,}55\,\frac{toneladas}{horas}$$

En base a este parámetro de producción, se realizará el estudio de generación de huella de carbono por el proceso a estudiar en sus distintas etapas. La progresiva desagregación de las actividades a realizar en cada subproceso permitirá identificar las maquinarias que contribuyen con las emisiones de gases invernaderos.

A continuación se presenta un diagrama en el cual se demuestran los tres procesos claves a analizar en el presente estudio en la producción de pellets a base de madera:

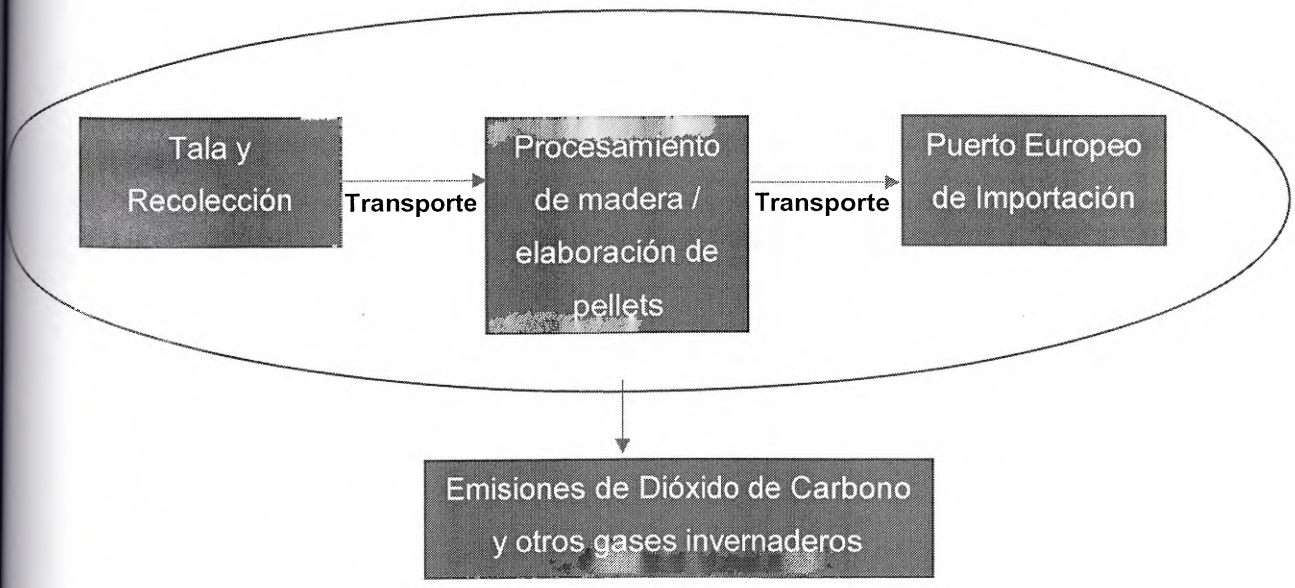


Figura 1. Emisiones de dióxido de carbono y otros gases invernaderos generados en las etapas de siembra, producción y consumo. Fuente: Propia

2. *Generación y Ubicación de Materia Prima*

Se contemplan las reservas forestales de Uverito, ubicadas en el sur del estado Anzoátegui y del estado Monagas. Este lugar, representa la reserva forestal más grande del mundo, constituida en 1988 para impulsar el desarrollo de la industria maderera al oriente del país. Maneja una superficie plantada de pino Caribe de más de 400 mil hectáreas, concentradas en un lote boscoso ubicado al sur de los estados Anzoátegui y Monagas. Su misión es desarrollar plantaciones forestales de manera sustentable y competitiva, comercializar sus productos y promover su industrialización.

A partir del año 2001, produce semillas de pino genéticamente mejoradas y adaptadas a nuestras condiciones de suelo y clima, que además de satisfacer la demanda interna, generará excedentes para la comercialización.

Impulsa proyectos que utilicen pino Caribe como materia prima, entre los que se cuentan la construcción de viviendas con componentes de madera. (CVG Proforca, 2014).

Según un estudio elaborado por estudiantes de la Universidad Nororiental Privada Gran Mariscal de Ayacucho de la Escuela de Ingeniería de Ambiente y de los Recursos Naturales titulado "Situación actual de las Plantaciones de Pino Caribe al Sur del Estado Monagas", se expresan los siguientes resultados referentes a siembra, cosecha y estado de la reserva para el año 2011:

- La creación de un sustrato para la siembra se encuentra constituido por 80% de corteza de árbol pino caribe y 20% arena, este material es molido y tamizado para obtener una consistencia homogénea en el sustrato.

- Se rellenan envases de plástico de 15 cm de largo con hendiduras en la parte inferior con el sustrato para la colocación de semillas.

- Las semillas han sufrido un proceso de mejoramiento, en un ciclo que se hace de agosto a diciembre.

- Previamente se hace un muestreo para verificar la cantidad de conos que se puede recolectar por cosechas, los cálculos se hacen a partir de muestras de aproximadamente el 3% de pinos de cada área y se realizan las posteriores estimaciones, para el curso 2011-2012 se estimó recoger 4.500.000 conos.

- La siembra se realiza en mesas, donde hay aproximadamente 128 envases con semillas mejoradas.

- Después de 15 cm de altura, la siembra de la planta ya está apta para la plantación.

- Para el 2011 existían 8 millones de plantas, cuya siembra estaba programada para el 6 de junio del mismo año.

- Al culminar el período de 15 años, los pinos son seleccionados con criterios técnicos para su explotación y ganancias monetarias respecto al volumen de madera extraída de los mismos. (Arnáez, Benavides, & Toro, 2011)

3. *Tala y Recolección*

Los procesos asociados con la tala y recolección de materia prima para su debido procesamiento en la planta se realizan en la plantación de Uverito, donde se ejecutan las siguientes actividades según previos estudios elaborados con la finalidad de establecer orden eficiente en la práctica.

3.1. Tala

Siendo la primera etapa de todo el proceso, se debe localizar un espacio en la plantación que cumpla con las especificaciones para el corte del árbol. Se procede a utilizar motosierras a gasolina para el corte desde la base del mismo.

Los equipos utilizados para el estudio son los presentados por el informe realizado por Tomasz Gałęzia titulado "Analysis of the duration of basic logging operations performed using a chainsaw". Estos son:

Marca	Modelo	Desplazamiento (cc)	Potencia (hp)	capacidad de combustible (L)
Stihl	361	59	4.6	0.6
	362	59	4.6	0.6
Husqvarna	357XP	56.5	4.4	0.68
	346XPG	50.1	3.7	0.5
	550XP	50.1	3.75	0.52

Tabla 1Motosierras utilizadas en el estudio. Fuente 'Analysis of the duration of basic logging operations performed using a chainsaw" Gałęzia, Tomasz.

3.2. Desrame

Se eliminan cualquier tipo de extremidad unida al tronco del árbol, tales como ramas y plantas que crecen del mismo. Se utilizan motosierras a gasolina para su ejecución (Galezia).

3.3. Tronzado

Se corta el tronco libre de ramas en secciones de cierta longitud de manera que sea más fácil de transportarlo y procesarlo en operaciones subsecuentes (Galezia).

3.4. Cargado

Una vez generada la materia prima para la planta, se utiliza un tractor con cargador adaptable para la carga de rolas en el camión volquete.

4. Transporte

El transporte a utilizar será el dispuesto por Delgado y Díaz para ambos movimientos de material, tanto en la ruta de la reserva forestal de Uverito a la planta como de esta a el puerto de exportación.

El equipo presentado tiene las siguientes características (Ver anexo 1):

Marca	Modelo	Tipo de combustible	Capacidad (ton)	Capacidad de motor (L)	Potencia (hp)	Peso (ton)	Capacidad de combustible (L)
SINOTRUK	ZZ3257M3447A	Diesel	25	8	290	12.22	300

Tabla 2 Características de camión volquete. Fuente: Delgado & Díaz, 2014.

Dimensiones	Largo(mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)
Exteriores	7835	2496	3170
Interiores	5400	2400	1400

Tabla 3 Características de camión volquete. Fuente: Delgado & Díaz, 2014.

Se considerará que para el movimiento de los troncos desde la etapa inicial hasta la planta, el camión poseerá las mismas especificaciones, con la opción de ser modificado con una tara de dimensiones 18 metros largo por 3,2 metros ancho (Ver anexo 13) en la parte de carga con el fin de facilitar la introducción de los mismos dentro del depósito, ya que según De Santis y Ochoa (2014), el modelo ideal para esta operación sería un semitrailer o camión semirremolque, siendo "un vehículo que consta como mínimo de chasis" (De Santis y Ochoa) con el cual se busca maximizar la carga de transporte del vehículo sin agregarle peso por barreras metálicas que ayuden a contener carga como productos a granel.

5. *Procesamiento de la Madera*

La selección de la mayoría de los equipos y los distintos procesos de esta área, se encuentra contemplada bajo el marco de la tesis de grado "Diseño de la ingeniería básica de una planta productora de pellets elaborados a partir de biomasa forestal" (Delgado & Díaz, 2014), cuyos parámetros de producción de diseño se ubican en 10.000 toneladas anuales, esto añadido a la falta de precedentes de plantas pelletizadoras en el país que cumplan con la demanda mínima de un mercado internacional.

Cabe destacar que en la tesis de grado mencionada anteriormente se especifican las razones técnicas de operación para la selección de los equipos mencionados a continuación, sin embargo para motivos del presente estudio , ciertos equipos fueron modificados por ser de menor consumo energético y proporcionar una capacidad de carga o producción adecuada a la demanda establecida. Así se propone generar el menor consumo energético sin afectar a las cantidades de producción de producto determinado

5.1. Almacenaje de Materia Prima Entrante

En esta fase se recibe la materia prima (rolas de pino caribe). Aquí se hace uso de una maquinaria de trabajo, siendo esta una grúa de trasbordo de madera.

Se considera el siguiente equipo en base a su potencia promedio generada y capacidad de carga (Ver Anexo 2):

Marca	Taida
Nombre	Remolque Forestal
Potencia Promedio	36,8 KW
Capacidad de Carga Promedio	1.500 kg
Fuente de energía	Combustible Fósil (Gasolina)

Tabla 4 Datos energéticos de remolcador forestal. Fuente: Elaboración Propia.

5.2. Descortezado

Tiene como objetivo eliminar la corteza superficial que recubre a las rolas de pino. Se usan en esta área equipos descortezadores (Delgado & Díaz, 2014).

Se considera el siguiente equipo:

Modelo	Descortezadora KMCE
Capacidad	7-8 t/h
Porcentaje de Pérdida de madera	2%
Potencia	168 KW
Fuente de Energía	Eléctrica

Tabla 5 Datos energéticos de descortezadora. Fuente: Elaboración Propia.

5.3. Astillado

El objetivo del astillado es moler directamente las rolas de madera provenientes de la fase anterior, a astillas pequeñas, que son de mayor calidad dado al gran tamaño de entrada del producto. Para este proceso se requiere el uso de astilladoras de troncos de madera. (Delgado & Díaz, 2014).

Se considera el siguiente equipo:

Modelo	Astilladora KMCE
Capacidad	8-12 t/h
Potencia	55 KW
Fuente de Energía	Eléctrica

Tabla 6Datos energéticos de Astilladora. Fuente: Elaboración Propia.

5.4. Re-Astillado

El pre- tratamiento de la madera finaliza con este proceso, el que consiste en un astillamiento fino, para ello se hace pasar las astillas de madera del astillado por un equipo de molienda que deja como producto terminado un grano bastante delgado de polvo de madera llamado aserrín (Delgado & Díaz, 2014).

Se considera el siguiente equipo:

Modelo	TCMH-1500 B
Capacidad	10 t/h
Potencia	200 KW
Fuente de energía	Eléctrica

Tabla 7 Datos energéticos de Re-Astilladora. Fuente: Elaboración Propia.

5.5. *Almacenamiento de Astillado Fino*

Etapa del proceso encargada de recolectar las astillas finas. No se requiere de un equipo especializado, solo de un espacio destinado para ser almacenado dicho producto.

5.6. *Secado*

El secado está encargado de extraer humedad del astillado fino para producir pellets más eficientes a su transporte y transportar menos peso de agua., Se hace a través de un secador rotativo, el que reduce la humedad hasta llegar a un rango de 10% al 12% (Delgado & Díaz, 2014).

Se considera el siguiente equipo:

Modelo	Heil Triple Pass Dryer
Capacidad	5 t/h
Consumo Energético (KW/TON)	310
Fuente de energía	Eléctrica

Tabla 8Datos energéticos del Secador. Fuente: Pirraglia A, González R, Saloni D.

5.7. *Molienda*

Aquí se obtiene la uniformidad del producto secado mediante un equipo de molienda (Delgado & Díaz, 2014).

Se considera el siguiente equipo:

Modelo	Molienda BNB50
Capacidad	6-7 t/h
Consumo Energético (KW/TON)	200 KW
Fuente de energía	Eléctrica

Tabla 9Datos energéticos de Molienda. Fuente: Elaboración Propia.

5.8. Granulación o Pelletización

El producto es comprimido mediante un equipo a través de una matriz de orificios cuyos diámetros son de 6 u 8mm transformándolos a través de esta reducción de volumen en pellets (Delgado & Díaz, 2014).

Se considera el siguiente equipo:

Modelo	Pelletizadora BPP-PM 960
Capacidad	4.5-5.5 t/h
Consumo Energético (KW/TON)	400 KW
Fuente de energía	Eléctrica

Tabla 10 Datos energéticos de Pelletizadora. Fuente: Elaboración Propia.

5.9. Enfriamiento de Pellets

El enfriado se establece en un equipo de refrigeración encargado de endurecer los pellets y solidificar su forma final (Delgado & Díaz, 2014).

Se considera el siguiente equipo:

Modelo	Enfriador BRBR-67-4
Capacidad	7,25 t/h
Fuente de energía	Eléctrica

Tabla 11Datos energéticos de Enfriador. Fuente: Elaboración Propia.

5.10. *Tamizado de Pellets*

El Tamizado se hace a través de un equipo que cuenta con un sistema de vibración que sacude los pellets para que estos liberen el polvo de materia prima aún adheridos a ellos, evitando de esta manera granos no deseados en el producto final.

Se considera el siguiente equipo:

Modelo	Tamizador TV2
Capacidad	5-15 t/h
Consumo Energético (KW/TON)	1,5 KW
Fuente de energía	Eléctrica

Tabla 12 Datos energéticos de Tamizadora. Fuente: Elaboración Propia.

5.11. *Almacenamiento y Despacho de Pellets*

Almacenamiento de producto seco en silos con salida cónica y válvula de descarga con control manual para el fácil llenado de sacos.

El despacho se realizará mediante embolsados en sacos de 15 kg estos serán cargados al camión contenedor mediante cargadores manuales hidráulicos con capacidad de levantamiento entre 500 y 2000 kg (Ver anexo 3). De esta manera, esta operación no agrega valor a la huella de carbono en el proceso.

5.12. *Equipos de transporte interno para manipulación de Productos a Granel*

Para el transporte dentro de la planta se consideran los siguientes equipos:

- Válvula Rotativa

Equipo desarrollado para la transferencia de producto final al silo de almacenamiento mediante una descarga controlada (Delgado & Díaz, 2014).

Se considera el siguiente equipo:

Modelo	Válvula Rotativa RWN2
Potencia Nominal (KW/TON)	1,1 KW
Fuente de energía	Eléctrica

Tabla 13Datos energéticos de Válvula Rotativa. Fuente: Elaboración Propia.

- Transportador Tubular

Diseñado para el manejo de productos a granel mediante un contenedor tubular cerrado para el transporte horizontal o inclinado.

Se considera el siguiente equipo:

Modelo	Tornillo sin Fin
Potencia Nominal (KW/TON)	7,5 KW
Fuente de energía	Eléctrica

Tabla 14Datos energéticos de Transportador Tubular. Fuente: Elaboracion Propia.

- Elevador de Cangilones

A la entrada del enfriador es necesario elevar el sub-producto que viene del pelletizado para dar inicio al enfriado. Este equipo se encuentra diseñado para la manipulación del aserrín comprimido, facilitando la carga del material. (Delgado & Díaz, 2014).

Se considera el siguiente equipo:

Modelo	Elevador Direct Industries
Potencia Nominal (KW/TON)	-
Fuente de energía	Eléctrica

Tabla 15Datos energéticos del Elevador de Cangilones. Fuente: Elaboración Propia.

6. *Transporte final*

El movimiento del producto final desde la planta hasta el puerto se realizará con los equipos descritos en el cuarto punto. El puerto en cuestión se encuentra ubicado en Ciudad Guayana, conocido como el Puerto Palúa, en la milla 178 del rio Orinoco. Este cuenta con una longitud de 276 metros, eslora de 255 metros y un calado máximo en aguas bajas de 30 pies; manejado por la empresa COPAL. (COPAL, 2014)

El movimiento de mercancía se realizará en conjunto con la empresa "Europe Caribbean Line" en su vertiente "South Caribbean Service". Este contacto es presentado por la empresa Orinoco Liner Service. Los barcos utilizados para el transporte son el BEAUTRADER y BEAUTRIUMPH, ambos idénticos con las siguientes especificaciones:

BARCO				
Nombre	**año**	**Velocidad crucero (nudos)**	**tanque (m3)**	**combustible**
BEAUTRADER	2009	13.7	558	diésel marino
BEAUTRIUMPH				

Tabla 16 Especificaciones técnicas de BEAUTRADER y BEAUTRIUMPH. Fuente: Elaboración Propia.

Motor				**Carga**	
marca	**cilindros**	**rpm**	**potencia (kW)**	**TEU (Twenty foot equivalent unit)**	**capacidad (ton)**
Caterpillar motoren	9	750	2970	336	2891

Tabla 17 Especificaciones Motor y carga de BEAUTRADER y BEAUTRIUMPH. Fuente: Elaboración Propia.

Dimensiones (m)			**grúas**	
Largo	**Ancho**	**calado (máximo)**	**cantidad**	**capacidad (ton)**
118,14	15.9	6.54	2	40

Tabla 17 Especificaciones sobre dimensiones y grúas de carga para BEAUTRADER y BEAUTRIUMPH. Fuente: Elaboración Propia.

La exportación tiene como destino Bélgica, específicamente la ciudad de Antwerp con la cual se tiene conexión por este medio. En el capítulo IV se presenta el análisis que justifica la exportación de la mercancía.
Considerando el calendario de transporte presentado por la empresa en cuestión (Ver anexo 4), se estima que el viaje del BEAUTRADER y BEAUTRIUMPH tenga como máximo 29 días de viaje sentido Palúa – Antwerp, estando intercalados en sentido, es decir, mensualmente se podrán realizar envíos por este medio.

Para la Exportación de los pellets se hará uso de contenedores de 40 pies los cuales cuentan con las siguientes dimensiones:

Dimensiones			**Capacidad**		
Largo(mm)	**Ancho (mm)**	**Alto (mm)**	**Capa inferior**	**Capa superior**	**Carga (ton)**
12000	2352	2697	20 paletas con 80 sacos	20 paletas con 50 sacos	39

Tabla 16Especificaciones técnicas de contenedor a utilizar (De Santis y Ochoa).

Los contenedores serán llenados con paletas en dos niveles, como se describe en la tabla anterior, teniendo en su primera planta 20 paletas de 80 sacos y en la parte superior 20 paletas con 50 sacos, sabiendo que los sacos toleran una carga de 15 kg (De Santis y Ochoa). Esto cumple con las limitaciones establecidas por las grúas de los barcos a utilizar.

CAPÍTULO V

CONDICIONES PARA EL ESTUDIO DE HUELLA DE CARBONO

Habiendo planteado la selección de equipos para las distintas áreas de proceso, así como las tareas que cada uno de estos realizan, se hace la referencia al valor energético que genera cada una de estas actividades y los equipos involucrados en las mismas.

De esta manera se pretende asignar, dependiendo del origen de la energía implementada (transporte de combustible fósil, energía eléctrica generada a partir de una planta hidroeléctrica o termo eléctrica), un valor de emisión de carbono directamente proporcional al consumo energético generado, para luego poder establecer un modelo lo suficientemente flexible como para cambiar parámetros elementales (distancias recorridas, capacidades de producción) y observar el impacto ambiental que estos puedan generar.

1. *Parámetros para el estudio de carbono secuestrado por la reserva de pinos de Uverito.*

Basado en estos históricos, otras tesis de grado en el área de elaboración de pellets en Venezuela, y a la falta cifras más actuales de la fuente oficial de CVG Proforca, se establecen los siguientes parámetros para este estudio:

- Existen 400.000 hectáreas dedicadas al desarrollo de pino caribe.

- El mínimo requerido a producir por una planta generadora de pellets en Venezuela es de 10.000 toneladas por año. (Delgado & Díaz, 2014).

- Los pinos son cortados al cumplir 15 años de vida. Donde alcanzan su madurez definitiva. (Arnáez, Benavides, & Toro, 2011).

- Por declaraciones del Vicepresidente para el área económico-productiva, Ricardo Menéndez para el año 2012 se cumplió la meta de 20.000 hectáreas plantadas de pino caribe, lo que representa cerca de 20.000.000 de pinos plantados, por ende, según estos datos de siembra, se cuentan con aproximadamente 1.000 pinos por hectárea en Uverito.

2. *Cálculo del Carbono Secuestrado por la Reserva de Uverito*

Como se planteó anteriormente, los requerimientos mínimos para una planta de pellets son de 10.000 toneladas anuales. Ahora, basados en el estudio de la universidad de Nebraska realizados sobre las especies arbóreas al sur-este de los Estados Unidos titulado "Heating with wood: Producing, Harvesting and Processing Firewood" la taza de secuestro de carbono depende de las características de crecimiento de las especies arbóreas, las condiciones donde el árbol es plantado y la densidad de la madera del mismo. La absorción de CO2 es máxima en las etapas jóvenes de la vida del árbol (de 20 a 50 años). Sin embargo, la cantidad de estudios que se ha hecho en especies tropicales es considerablemente menor respecto a especies de zonas templadas. (DeWald, Josiah, & Erdkamp, 2005)

Los bosques absorben CO2 y lo almacenan en forma de celulosa y otros materiales, en las primeras etapas de crecimiento, los árboles absorben carbono rápidamente, en consecuencia, cuando el crecimiento se vuelve más lento, también lo hace el secuestro de carbono. (Enviroment Protection Agency, 2010)

El presente cálculo está basado en ecuaciones desarrolladas a través de un estudio de la universidad de Sri Jayewardenepura, en Sri Lanka en una plantación de 27 años de pino caribe en la parte sur del mismo país, donde el promedio de lluvias anuales se

ubica en 4.000 mm y una temperatura entre los 27 y 28°C. Condiciones similares a las encontradas en el Bosque de Uverito.

En el estudio se establecen ecuaciones para el contenido de carbono usando tres modelos, que reportan las siguientes ecuaciones:

2.1. Carbono contenido en el árbol por encima del nivel del suelo vs masa del árbol por encima del suelo

Inicialmente, veinticinco modelos fueron identificados para identificar la relación entre el carbono contenido en el árbol por encima del suelo y la masa del árbol por encima del suelo, el modelo seleccionado (1) indicó una buena tendencia (Figura 2) con un valor de R^2 =97,7%. La forma original del modelo $\overline{C_{ag}} = 0{,}624 + 0{,}744\ \overline{m_{ag}}$ tuvo la mejor relación. En un análisis más detallado de este modelo, se probó que la intersección no fue significante (p-valor=0,420). Por ende fue removida del modelo y re-ajustada para obtener la ecuación (1). (Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011)

$$\overline{C_{ag}} = 0{,}777\ \overline{m_{ag}} \qquad (1)$$

Ecuación 1.Relación entre el carbono por encima del nivel del suelo del árbol y la biomasa por encima del nivel del suelo del árbol.Fuente: "Estimation of Above Ground Tree Biomass and Carbon of Pinus caribaea (Morelet)" Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011.

Donde: C_{ag} = $carbono\ en\ el\ árbol\ por\ encima\ del\ nivel\ del\ suelo\ en\ kg$

m_s = $masa\ árbol\ por\ encima\ del\ nivel\ del\ suelo\ en\ kg$

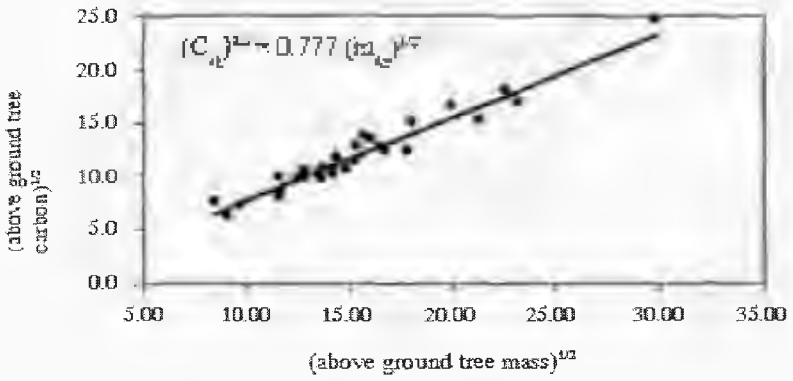


Figura 2 Valores de Carbono en el árbol y la línea de tendencia para el modelo seleccionado (1), para predecir el carbono del tallo a partir de la masa del árbol. Fuente: "Estimation of Above Ground Tree Biomass and Carbon of Pinus caribaea (Morelet)". Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011)

2.2. *Carbono contenido en el árbol por encima del nivel del suelo vs Volumen del tallo*

Similar la modelo al procedimiento anterior, el carbono del árbol por encima del suelo fue comparado contra el volumen del tallo en una regresión lineal, y el modelo seleccionado está expresado en la ecuación (2). El mejor modelo de la distribución estándar residual dado en la figura 3 fue $C_{ag} = 9{,}08 + 352v$, este no tenía un valor significante de intersección (P valor=0,618) y arrojando un valor de R^2=96,0%. (Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011)

$$C_{ag} = 364v \qquad (2)$$

Ecuación 2. Relación entre Carbono en el árbol y Volumen del Tallo. Fuente: "Estimation of Above Ground Tree Biomass and Carbon of Pinus caribaea (Morelet)". Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011.

Donde: $v = volumen\ del\ tallo\ en\ m^3$

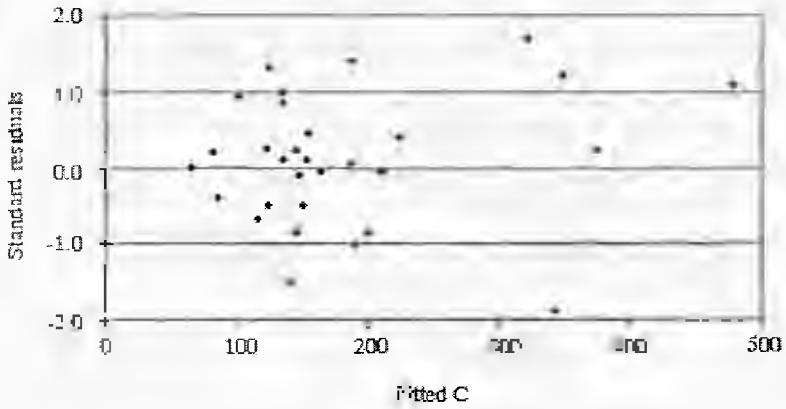


Figura 3 Distribución Estándar Residual para el modelo (2). Fuente: "Estimation of Above Ground Tree Biomass and Carbon of Pinus caribaea (Morelet)".Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011)

2.3. Carbono contenido en el árbol por encima del nivel del suelo vs diámetro a la altura del pecho.

Los modelos (1) y (2) identifican la relación del carbono contenido en el árbol por encima del nivel del suelo del Pino Caribe respecto a la masa del árbol por encima del suelo y el volumen del tallo. Sin embargo, para el uso práctico, ambos modelos son imposibles de usar, dado a la dificultad de medir las variables explicativas (masa y volumen del árbol). Pon ende, como una solución, otro modelo fue desarrollado comparando la cantidad de carbono contenido en el árbol por encima del nivel del suelo y el diámetro a la altura del pecho del árbol que es mucho más sencilla de medir en el campo. Así se presenta el modelo (3), que tiene un valor de R^2=92,7%. Y también cuenta con una buena distribución estándar residual (Figura 4). (Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011)

$$C_{ag} = 0{,}271d^2 \qquad (3)$$

Ecuación 3Relación entre Carbono en el árbol y diámetro a la altura del pecho. Fuente: "Estimation of Above Ground Tree Biomass and Carbon of Pinus caribaea (Morelet)". Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011.

Donde: $d = diámetro\ del\ árbol\ a\ la\ altura\ del\ pecho\ en\ cm$

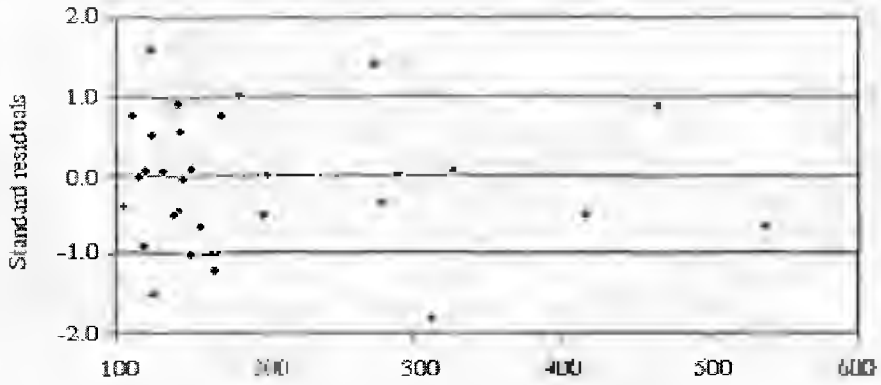


Figura 4Distribución Estándar Residual para el modelo (3). Fuente: "Estimation of Above Ground Tree Biomass and Carbon of Pinus caribaea (Morelet)".Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011

Ahora. sabiendo que el diámetro a la altura del pecho del Pino Caribe es de 80 cm, y haciendo uso de la ecuación (3) se tiene:

$$C_{ag} = 0{,}271(80)^2$$

C_{ag} = 1.734,4 kg

C_{ag} = 1,7344 toneladas por árbol.

Se considera este valor como el carbono acumulado en el pino caribe para cuando alcanza su madurez definitiva, es decir, a su momento de corte en la reserva de Uverito a los 15 años a partir de su siembra.

3. *Ingeniería inversa para el cálculo de cantidad de materia prima a recolectar*

Partiendo de la cantidad total anual en peso de producto terminado, se procederá a calcular las cantidades a ingresar por peso en cada proceso, tomando en cuenta las perdidas porcentuales de materia prima por etapa.

El proceso se presenta en la figura 5 donde se puede apreciar cómo se plantea el modelo de estudio para calcular la entrada de materia al sistema con el fin de cumplir con la meta proyectada.

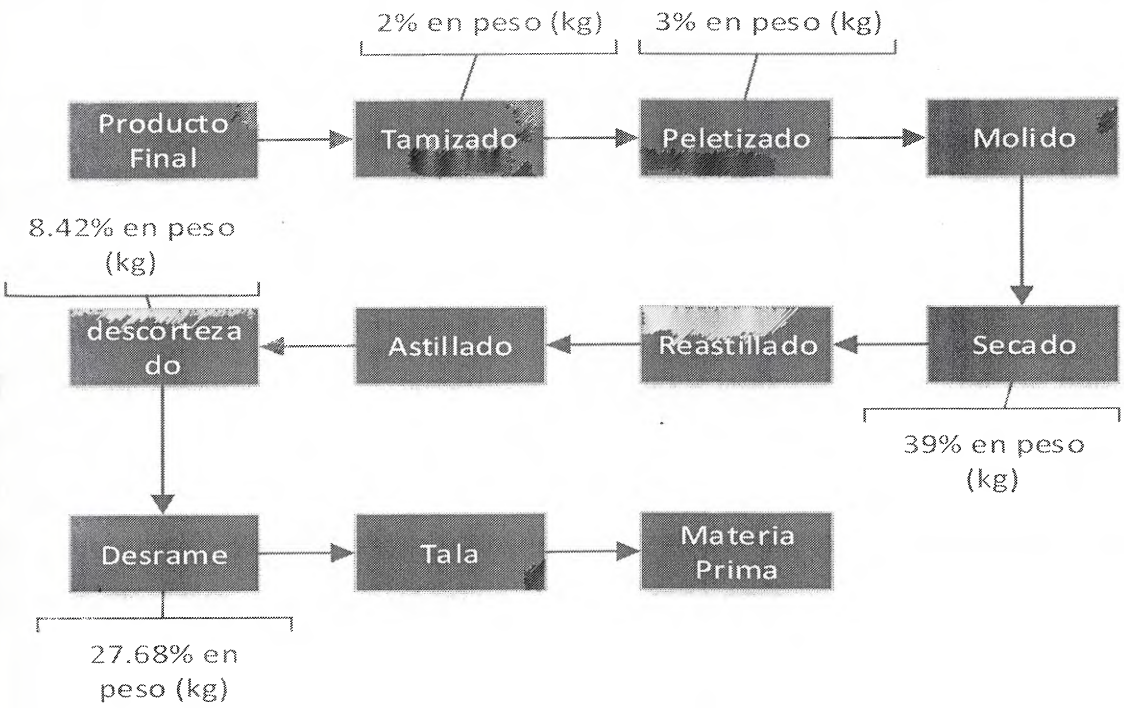


Figura 5 Desarrollo de ingeniería inversa con pérdidas porcentuales de materia en cada etapa relevante. Fuente: Propia.

A continuación se explica la procedencia de dichos valores:

3.1. Pérdida de peso en Tamizado

Según estudios realizados por Guillermo González en su tesis "Diseño de una planta de pelletización en castilla y león" (2011) se plantea una pérdida de 2% de peso como parte del desprendimiento de virutas y polvo del producto final, se asume para objetos de este estudio, que dicho porcentaje es sobre el peso húmedo del árbol justo después de su corte, es decir, la materia prima en su estado inicial.

3.2. Pérdida de peso en Pelletizado

Delgado y Díaz (2014), en su tesis "Diseño de la ingeniería básica de una planta productora de pellets elaborados a partir de biomasa forestal" indican que la meta de su proceso de densificación es obtener un contenido de humedad igual al 8% del peso total. Por lo que se plantea una pérdida de 3% del peso en agua del producto dado que entra este a la maquina con un valor de 11% de humedad. Se asume para objetos de este estudio, que dicho porcentaje es sobre el peso húmedo del árbol justo después de su corte, es decir, la materia prima en su estado inicial.

3.3. Pérdida de peso en Secado

Basando el estudio en lo planteado por Delgado y Díaz (2014), la materia entrante a este proceso cuenta con un peso en agua de 50%, siendo reducido al 12%, generando una pérdida de humedad de 39% (maquinaria seleccionada). Se asume para objetos de este estudio, que dicho porcentaje es sobre el peso húmedo del árbol justo después de su corte, es decir, la materia prima en su estado inicial.

3.4. Pérdida de peso en Descortezado

Tomando en cuenta las ecuaciones planteadas por Gholz et al. (1979) en su informe "Equations for predicting tree biomass (in kilograms) of Pacific Northwest species."Donde se elabora una regresión lineal sobre las variables que afectan al peso de un árbol contra el diámetro a altura del pecho del árbol, de manera similar al estudio anterior sobre el carbono secuestrado por el pino, se selecciona la siguiente ecuación que aplica para la especie "Pinus Ponderosa" el cual según la base de datos electrónica de "The Wood Database" (Meier, 2014)es una especie relacionada al "pinus caribaea".

Dicha aproximación es realizada sobre una especie similar al pino caribe, dado a la carencia de estudios sobre valores de peso del pino caribe húmedo después de este ser cortado. Inicialmente se proponía calcular el volumen aproximado del Pino y multiplicar este por su densidad, pero todos los valores de densidad de una especie

arbórea se encuentran reportados por estándar internacional al 12% de humedad, y esta oscila entre un rango de valores considerablemente alto. (Ver "pino caribe" en marco teórico).

$$Ln\,Y = -4.2063 + 2.2312\,x\,Ln\,X \qquad (4)$$

Ecuación 4 Cálculo del peso de la corteza para el pino ponderosa. Fuente: "Equations for predicting tree biomass (in kilograms) of Pacific Northwest species". (Gholz, 1978).

Donde: Y es el peso de la corteza del árbol en kg.

X es el diámetro a altura de pecho del árbol en cm.

Sustituyendo X=80 cm se obtiene un peso por corteza equivalente a 262,66 kg.

3.5. Pérdida de peso en Desramado

Haciendo uso del mismo grupo de ecuaciones para el "Pinus Ponderosa", se puede calcular utilizando las siguientes tres fórmulas el peso correspondiente a ramas vivas, ramas muertas y follaje:

$$Ln\,Y = -5.3855 + 2.7185\,x\,Ln\,X \qquad (5)$$

Ecuación 5 Cálculo del peso de ramas vivas para el pino ponderosa. Fuente: Equations for predicting tree biomass (in kilograms) of Pacific Northwest species". (Gholz, 1978)

Donde: Y es el peso de las ramas vivas del árbol en kg.

X es el diámetro a altura de pecho del árbol en cm.

Sustituyendo X=80 cm se obtiene un peso de ramas vivas equivalente a 683,37 kg.

$$Ln\,Y = -2.5766 + 1.444\,x\,Ln\,X \qquad (6)$$

Ecuación 6 Cálculo del peso de ramas muertas para el pino ponderosa. Fuente: "Equations for predicting tree biomass (in kilograms) of Pacific Northwest species". (Gholz, 1978)

Donde: Y es el peso de las ramas muertas del árbol en kg.

X es el diámetro a altura de pecho del árbol en cm.

Sustituyendo X=80 cm se obtiene un peso de ramas muertas equivalente a 42,56 kg.

$$Ln\,Y = -4.2612 + 2.0967\,x\,Ln\,X \qquad (7)$$

Ecuación 7Cálculo del peso de follaje para el pino ponderosa. Fuente "Equations for predicting tree biomass (in kilograms) of Pacific Northwest species". (Gholz, 1978)

Donde: Y es el peso del follaje del árbol en kg.

X es el diámetro a altura de pecho del árbol en cm.

Sustituyendo X=80 cm se obtiene un peso de follaje equivalente a 137,91 kg.

Entonces, sumando el peso de ramas vivas, ramas muertas y follaje se obtiene un total de 863,84 kg por desramado.

3.6. Peso del tronco

De igual manera se continúa con el uso de ecuaciones para estimar el peso de total del árbol en partes, esta vez, del tronco, en la siguiente expresión:

$$Ln\,Y = -4.4907 + 2.7587\ x\ Ln\,X \qquad (8)$$

Ecuación 8 Cálculo del peso del tronco para el pino ponderosa. Fuente: "Equations for predicting tree biomass (in kilograms) of Pacific Northwest species". (Gholz, 1978)

Donde: Y es el peso del tronco del árbol en kg.

X es el diámetro a altura de pecho del árbol.

Sustituyendo X=80 cm se obtiene un peso del tronco equivalente a 1.994,19 kg

3.7. Peso del árbol total

Estimando el peso total por árbol, se procede a sumar las pérdidas de peso de las operaciones previamente mencionadas y el peso del tronco, teniendo un peso general sobre tierra de 3.120,70 kg equivalente a 3,12 toneladas por árbol aproximadamente. De donde se tienen:

- Peso por corteza: 262,66 kg, representando un 8,41% del peso del árbol.
- Peso por ramas vivas, ramas muertas y follaje: 863,84 kg representando un 27,68% del peso del árbol.
- Peso por tronco: 1.994,19 kg representando un 63,90% del peso del árbol.

3.8. Estimando total de materia prima

Para alcanzar la producción de 10.000 toneladas de pellets anuales con humedad de 8%, se procede a hacer uso de la información suministrada en la figura 5. Por lo que se tiene:

Peso antes del tamizado:

$$10.000\ ton\ x\ 1{,}02\% = 10.200\ ton$$

Peso antes de pelletización:

$$10.200\ ton\ x\ 1{,}03\% = 10.506\ ton$$

Peso antes de secado:

$$10.506\ ton\ x\ 1{,}39\% = 14.603{,}34\ ton$$

Peso antes de descortezado (Obtenido a partir de Ecuación 4):

$$14.603{,}34\ ton\ x\ 1{,}0841\% = 15.831{,}48\ ton$$

Peso antes de desramado (Obtenido a partir de Ecuaciones 5,6 y 7):

$$15.831{,}34\ ton\ x\ 1{,}2768\% = 20.215{,}08\ ton$$

Para obtener la cantidad de árboles anuales requeridos como materia prima se divide la cantidad de toneladas anuales requeridas entre el peso del árbol con diámetro a altura de pecho de 80 cm.

$$cantidad\ de\ arboles\ anuales = \frac{20.215{,}08\ ton}{3.120{,}70\ kg}\ x \frac{1\ kg}{0{,}001\ ton} =$$

$$6.478\ arboles\ por\ año$$

Sabiendo que existen aproximadamente 1.000 árboles por hectárea en el bosque de Uverito, las hectáreas solicitadas para la producción planteada quedan definidas por:

$$Hectáreas solicitadas = \frac{6.478\ árbolespor año}{1.000\ árbolespor\ hectárea} = 6{,}478\ \text{héctareas anuales}$$

La reserva como se dijo anteriormente posee 400.000 hectáreas dedicadas al pino caribe, esto demuestra que el bosque tiene amplia capacidad para el desarrollo de dicha actividad en su extensión.

3.9. Carbono Secuestrado Anual

Finalmente, al multiplicar la cantidad de carbono presente en un árbol, por la cantidad de árboles requerida para la producción, se tiene:

$$\text{Total Carbono Secuestrado Anual} = \frac{1{,}7344 \text{ ton de CO2}}{árbol} \times \frac{6478\ árboles}{año}$$

$$\text{Total Carbono Secuestrado Anual} = 11.235{,}44\ ton\ de\ CO2\ anuales$$

Este es el "crédito" de carbono generado por los árboles durante sus 15 años de crecimiento, estos se deben cortar para la producción de 10.000 toneladas de pellets anuales, este es el margen a considerar en el balance positivo de carbono que se verificará posteriormente.

CAPÍTULO VI

CALCULO DE HUELLA DE CARBONO GENERADA DURANTE TODO EL PROCESO.

A continuación se presenta el cálculo de emisiones en cada área del proceso de elaboración y transporte de pellets consideradas para el presente estudio. Se desarrollan las ecuaciones obtenidas para cada tipo de emisión, su origen y la justificación del uso de las mismas.

En los cálculos presentados a continuación, en conjunto con calculadoras creadas en base al software Microsoft Excel cargadas con las ecuaciones planteadas, se introducirá la cantidad de producto final deseado. Esta arrojará como resultado las emisiones generadas por los distintos equipos utilizados tanto en operaciones como en la cadena logística (ver anexo 6). Posteriormente se comparará la emisión generada contra el carbono secuestrado para determinar si el proceso, hasta nuestro alcance, es ecológicamente sustentable.

1. *Calculo de emisiones de CO_2 generadas por la utilización de motosierras en proceso de tala y recolección.*

1.1. Emisión de Operaciones con Moto-Sierra

Las asociaciones ambientales EPA (Envioremental Protection Agency) y CARB (California Air Resources Board) han establecido regulaciones para los fabricantes de estos productos en modelos de motores de combustión interna con el fin de regular las emisiones de dióxido de carbono generado por los mismos. En el informe "Exhaust Emission Factors for Nonroad Engine Modeling - Spark ignition"generado por la primera agencia mencionada en julio de 2010, se presentan datos sobre los gases emitidos durante la combustión para motores dos tiempos utilizados en motosierras.

A continuación, la siguiente tabla está compuesta por los valores de dichos gases para la última normativa planteada en 2007 (fase 2), la cual indica la utilización de un catalizador mejorado en la salida del sistema. En ella se pueden apreciar las tres clases propuestas (Clase III, Clase IV, Clase V) para diferenciar los motores.

Tipo de Motor	HC g/hp-h	CO g/hp-h	NO_x g/hp-h	PM g/hp-h	BSFC lb/hp-h
Clase III (<20 cc)	26.87	141.69	1.49	7.70	0.822
Clase IV (≥20 cc y < 50 cc)	26.87	141.69	1.49	7.70	0.822
Clase V (≥50 cc)	47.98	283.37	0.91	7.7	0.608

Tabla 17 Gases emitidos por motores dos tiempos menores a 25 hp operados manualmente. Fuente: Exhaust Emission Factors for Nonroad Engine Modeling – Spark ignition. (Enviroment Protection Agency, 2007)

Para el estudio en cuestión se contará con la información recolectada en el informe "Analysis of the duration of basic logging operations performed using a chainsaw" (2013) donde el autor hace uso de las siguientes motosierras para el cálculo de tiempos de operación:

Marca	Modelo	Desplazamiento (cc)	Potencia (hp)	capacidad de combustible (L)
Stihl	361	59	4.6	0.6
	362	59	4.6	0.6
Husqvarna	357XP	56.5	4.4	0.68
	346XPG	50.1	3.7	0.5
	550XP	50.1	3.75	0.52

Tabla 18 Motosierras utilizadas para el cálculo de tiempos de operación en el estudio. Fuente: "Analysis of the duration of basic logging operations performed using a chainsaw". Galezia.

Por las características de los arboles estudiados por Tomasz Gałęzia, el pino silvestre (*Pinus Sylvestris L.*) es aquel que posee mayor similitud con el Pino Caribe, por lo que será el punto de referencia para el cálculo de los tiempos de producción y por ende la cantidad de equipos requeridos para cumplir con la capacidad estimada.

Según Gałęzia (2013), el tiempo promedio de operación incluyendo talado, desramado, tronzado y cambio de lugar de trabajo para un Pino Silvestre usando una motosierra Clase V es de 20 minutos aproximadamente.

Ahora bien, para obtener el dióxido de carbono generado por cada tipo, se presenta la siguiente ecuación la cual permite calcularlo en base a los gases mencionados en la tabla 17.

$$CO_2 = BSFC\ x\ 453.6 - HC\ x\ 0.85\ x\ {}^{44}\ {}_{12} \qquad (9)$$

Ecuación 9Emisión de CO2 por motor de motosierra.Fuente: "Exhaust Emission Factors for Nonroad Engine Modeling – Spark ignition" (Enviroment Protection Agency, 2007)

En ella se puede leer que:

- CO_2 tendrá como unidades ${}^{g}\ {}_{h}$.
- BSFC representa el consumo de gasolina y tendrá como unidades ${}^{lb}\ {}_{h}$
- 453.6 será el factor de conversión de libras a gramos.
- HC representa la emisión de hidrocarburos y tendrá como unidades ${}^{g}\ {}_{h}$
- 0.85 es la fracción de masa de carbono de la gasolina
- ${}^{44}\ {}_{12}$ representa la relación de masa de CO_2 a la masa de carbono.

Utilizando esta información y relacionándola, se puede decir que para motosierras con un desplazamiento mayor a 50cc, para talar, desramar y tronzar 6478 árboles en 220 días, cada uno con 8 horas laborales y sabiendo que toman alrededor de 20 minutos por árbol, se tiene:

$$\frac{6478\ arboles\ x\ 0.333\ \frac{horas}{árbol}}{220\ \frac{días}{año} \times\ 8\ \frac{horas}{día}} \approx 2\ \frac{motosierras}{año}$$

Ahora, sustituyendo los parámetros de la tabla 17 en la ecuación 9, se tiene:

$$CO_2 = 0.608\ x\ 453.6 - 47.98\ x\ 0.85\ x\ {}^{44}\ {}_{12} = 710{,}0040\ \frac{g\ de\ CO2}{h}$$

$$CO_2 = 708{,}867\ \frac{g\ de\ CO2}{h}\ x\ \frac{1\ ton}{1.000.000g}\ x\ 8\ \frac{horas}{día}\ x220\ \frac{días}{año} = 1{,}2496\ \frac{ton\ CO2}{año}$$

$$CO_2\ total\ por\ motosierras = 1{,}247\ \frac{ton\ CO2}{año} \times 2\ motosierras \approx 2{,}4992\ \frac{ton\ CO2}{año}$$

1.2. Emisiones de Cargador de Rolas de Madera

Al contar con un Remolcador que cuenta con una potencia promedio de 36,8 KW, y asumiendo que este tendrá un funcionamiento diario de 8 horas, dado a que las operaciones de carga y descarga son las que toman menos tiempo, se tiene:

$$Energía\ consumida\ diaria = 36{,}8kw \times 8\ horas = 294{,}4\ kwh\ por\ día$$

$$Energía\ consumida\ anualmente = 294{,}4\ \frac{kwh}{día} \times 220\ \frac{días}{año} = 64.768\ kwh\ por\ año$$

Según el libro titulado "Spon's Civil Engineering and Highway Works Price", se estima que el porcentaje de utilización por energía promedio entregada de equipos para en obra son los siguientes:

Typical utilization factors:	Utilization factor	Typical utilization factors:	Utilization factor
Excavators	0.75	Compressors, mixers, generators	
Dozers/Scrapers	0.80	Tractors	0.75
Loaders/Shovels/Graders	0.75	Hoists, etc	0.65
Mobile Cranes	0.50	Drills and Saws	0.80
Crawler Cranes	0.25	Rollers/Compaction Plant	0.75
Dump Trucks (not Tippers)	0.75	Piling/Asphalt Equipment	0.65
Dumpers	0.80	All other items	1.00

Tabla 19 Porcentajes de Utilización de energía promedio para equipos en obra. Fuente: Spon's Civil Engineering and Highway Works Price (Langdon, 2014)

Se observa que para una máquina de este tipo (Dumper) es el porcentaje de utilización es de 0,80, por ende:

$$Energía\ real\ consumida\ anualmente = 64.768\ kwh\ por\ año \times 0{,}80$$
$$= 51.814{,}4\ kwh\ por\ año$$

Se sabe que esta potencia es generada a partir de un motor de combustión interna cuyo combustible es gasolina, ahora haciendo uso de factores de emisión obtenidos a partir del informe titulado "U. S Default Factors for Calculating CO2 Emissions from

Fossil Fuel and Biomass Combustion" liberado el 10 de enero del 2014, se tiene la siguiente tabla:

Fuel Type	Heat Content	Carbon Content (Per Unit Energy)	Fraction Oxidized	CO_2 Emission Factor (Per Unit Energy)	CO_2 Emission Factor (Per Unit Mass or Volume)
Petroleum Products	MMBtu / gallon	kg C / MMBtu		kg CO_2 / MMBtu	kg CO_2 / gallon
Distillate Fuel Oil No. 1	0.139	19.98	1	73.25	10.18
Distillate Fuel Oil No. 2	0.138	20.17	1	73.96	10.21
Distillate Fuel Oil No. 4	0.146	20.47	1	75.04	10.96
Residual Fuel Oil No. 5	0.140	19.89	1	72.93	10.21
Residual Fuel Oil No. 6	0.150	20.48	1	75.10	11.27
Still Gas*	0.143	18.20	1	66.73	9.53
Used Oil	0.135	20.18	1	74.00	9.99
Kerosene	0.135	20.51	1	75.20	10.15
LPG	0.092	17.18	1	62.98	5.79
Propane (Liquid)	0.091	16.76	1	61.46	5.59
Propylene	0.091	17.99	1	65.95	6.00
Ethane	0.069	17.08	1	62.64	4.32
Ethylene	0.100	18.39	1	67.43	6.74
Isobutane	0.097	17.70	1	64.91	6.30
Isobutylene	0.103	18.47	1	67.74	6.98
Butane	0.101	17.77	1	65.15	6.58
Butylene	0.103	18.47	1	67.73	6.98
Naptha (<401 deg F)	0.125	18.55	1	68.02	8.50
Natural Gasoline	0.110	18.23	1	66.83	7.35

Tabla 20Factores de emisión por Consumo de combustible fósil. Fuente: (U.S Climate Registry Organization, 2014)

Donde expresa que el valor de emisión en kg de CO2 por MMBTU consumido para la gasolina común es de 66,83. Ahora, se tiene:

$$CO_2\ de\ Remolcador = 51.814{,}4\ kwh\ por\ año \times \frac{0{,}003412\ MMBTU}{1\ Kwh} \times \frac{66{,}83\ Kg\ CO2}{1\ MMBTU}$$
$$= 11.814{,}92\ kg = 11{,}815\ ton\ de\ CO_2\ por\ año$$

Según el "Forestry Handbook" (Wiley, 1984), para las operaciones de cargado de troncos en un camión de transporte promedio para especies sureñas de pino con un diámetro a altura de pecho superior a 20 pulgadas y usando un (1) equipo de remolque forestal con capacidad de carga entre 1.000 y 2.000 kg es aproximadamente a 1 hora. Ahora para estimar el número de remolcadores en el proceso se tiene:

$$\frac{585\ camiones\ cargados\ de\ rolas}{220\ \frac{días}{año}} \approx 3\ \frac{camiones}{día}$$

$$\frac{3\ \frac{camiones}{día}\ x\ 1\ \frac{remolcador}{camión-hora}}{8\ \frac{horas}{día}} \approx 1\ remolcador$$

Sabiendo que se necesita 1 equipo en Uverito para la carga y 1 equipo en planta para la descarga, entonces se establece:

$$Emisión\ total\ por\ remolcadores = 11{,}815\ ton\ de\ CO_2\ por\ año \times 2\ remolcadores$$
$$= 23{,}630\ ton\ de\ CO_2\ por\ año$$

2. *Calculo de emisiones de CO_2 generadas por el transporte de Uverito a la Planta.*

El primer parámetro a considerar es la distancia de viaje desde la reserva hasta la planta. Se propone lo siguiente:

2.1. Ubicación geográfica de la Planta

Se considera la población de Uverito ubicada a 106 km del Bosque de Uverito (Vía Troncal 10). Aproximadamente a 1 hora con 26 minutos de recorrido desde la planta hasta el bosque y viceversa.

Haciendo uso de la herramienta creada por la organización EPA denominada "Greenhouse Gas Emissions Model (GEM) for Medium- and Heavy-Duty Vehicle Compliance" se puede obtener de manera automatizada la emisión generada por un vehículo de carga tipo volquete en gramos de CO2 por tonelada-milla.

El programa presenta la configuración apreciable en el anexo 7. El mismo viene acompañado del documento "Greenhouse Gas Emissions Model (GEM) User Guide" en el cual se explica cada uno de las opciones las cuales dependen del tipo de vehículo a calcular. En el caso en cuestión, se especifica que el camión tipo volquete utilizado se encuentra clasificado como "Medium Heavy-Duty Vocational Truck" debido a su potencia y capacidad de carga (ver anexo 12).

Entre la información adicional a ser introducida, el programa requiere el "Steer Tire Rolling Resistance" y "Drive Tire Rolling Resistance" ambos en Kilogramos por tonelada métrica. Estos valores fueron extraídos del Documento "SmartWay Verified Low Rolling Resistances Tires" de la organización EPA, en la cual se explica cómo se realiza el cálculo de este valor por tipo de caucho a utilizar y presenta unos valores estándar para cada una de las variables. Debido al alcance del estudio se tomará como valores los propuestos en dicho documento.

Tire Rolling Resistance (Kg/tonelada metrica)	
Steer	6.6
Drive	7

Tabla 21 Valores para Tire Rolling Resistance en sus vertientes "Steer' y "Drive". Fuente: "SmartWay Verified Low Rolling Resistances Tires". Enviorementa Protection Agency.

Una vez ejecutado el programa, se genera un archivo Excel en el que se presenta el valor deseado. En este caso se obtuvo para dicho camión 229.22 gramos de CO2/Ton-milla.

Ahora bien, sabiendo que el recorrido de Uverito a la planta es de aproximadamente 106 km, se tiene:

$$\frac{229.22\ g\ CO2}{ton\ milla} x \frac{1\ milla}{1.6093\ Km} x \frac{1\ ton}{1x10^6 g} x\ 106\ km\ x\ 25\ ton = 0.3775\ ton\ CO2\ por\ viaje$$

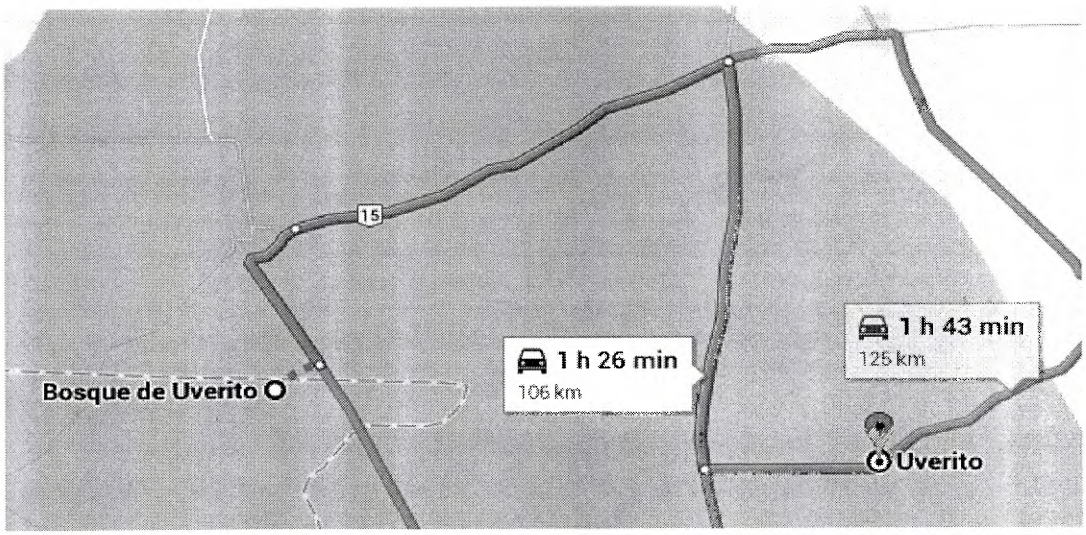


Ilustración 1 Mapa de distancias entre Uverito y el Bosque de Uverito. Fuente: Google Earth.

El criterio de selección se basa en dos factores determinantes, el primero siendo la cercanía de la planta a la fuente de materia prima provista por el bosque de Uverito, reduciendo así las emisiones generadas por el transporte de esta fase.

El segundo criterio viene se refiere a la fuente de generación eléctrica que proveerá energía a la planta. Se sabe que el principal aporte energético el sistema eléctrico nacional es la represa de Gurí ubicada en el estado Bolívar a 144 km de la hipotética planta pelletizadora en Uverito. Por lo que se garantiza una alimentación total de la fuente de generación mencionada, se sabe que la represa hidroeléctrica funciona aprovechando la caída de agua de un salto para generar un potencial eléctrico, y no depende de ninguna forma de combustión fósil, por ende la emisión de CO2 generada por dicho proceso es considerada nula. A esto se le agrega, que dado a la poca distancia que existe entre Guri y la planta, las pérdidas de tensión son mínimas, y las termo-eléctricas existentes en el sistema de generación venezolano encargadas de compensar dichas pérdidas, no agregan valor considerable a la generación. Esto hace que los equipos y cargas conectadas a este sistema posean un valor de emisión completamente despreciable.

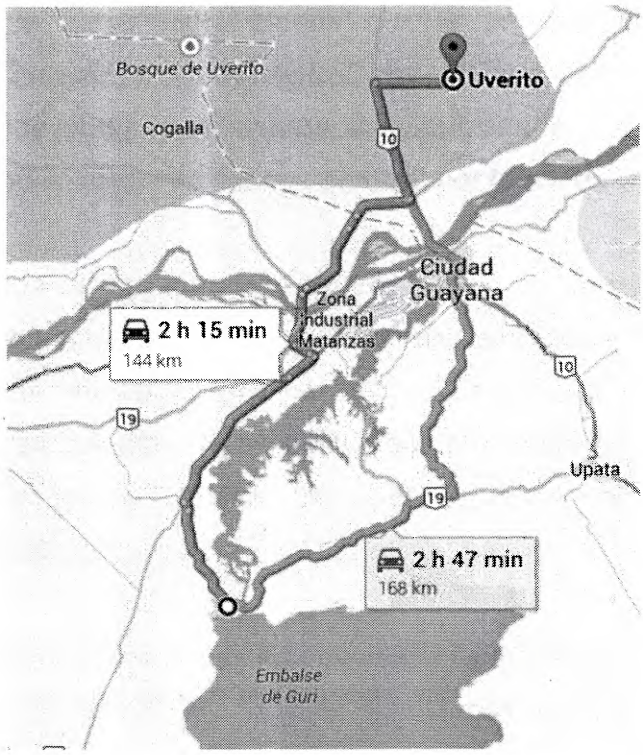


Ilustración 2Mapa de distancias entre Uverito y Parque de Distribución Guri. Fuente: Google Earth.

2.2. Emisión del Transporte

Considerando las especificaciones del camión para el transporte de rolas de madera desramadas, provenientes del Bosque de Uverito, y los requerimientos de entrada en toneladas de la planta se establece lo siguiente:

$$Peso\ de\ rolas\ desrramadas = \ Peso\ del\ Tronco * Peso\ de\ Corteza\ \ * Árboles\ requeridos$$

El valor de las variables mencionadas es contemplado en el Capítulo V del estudio en el cálculo de materia prima requerida. Entonces, ya calculado el peso de las rolas desramadas se tiene:

$$\frac{14.619{,}95\ \ ton\ de\ rolas\ desramadas}{25\ ton\ de\ capacidad\ por\ camión} = 585\ viajes\ de\ camión\ por\ año$$

Tomando en cuenta la cantidad de viajes realizados la emisión es equivalente a:

$$0.3775\ toneladas\ CO2\ x\ 585\ viajes = 220{,}8092\ \frac{toneladas}{año}$$

3. ***Calculo de emisiones de CO_2 generadas por el funcionamiento de la planta generadora de Pellets.***

La energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de la planta y sus equipos es considerada libre de emisiones de CO2 por los principios anteriormente mencionados, y otros factores de emisión fuera de estos parámetros son considerados despreciables para el estudio. (Ej.: Consumo de agua, deforestación y acondicionamiento de terreno para expansión de la planta, etc.)

4. ***Calculo de emisiones de CO_2 generadas por el transporte de la planta al puerto de exportación.***

El puerto de exportación se encuentra ubicado en Ciudad Guayana, conocido como el Puerto Palúa, ubicado a 53,9 km (Vía Troncal 10), aproximadamente a 1 hora 14 minutos desde la planta hipotética en Uverito. Dicho puerto es seleccionado en base de minimizar la distancia recorrida por el transporte desde la planta, y así reduciendo la emisión de los camiones destinados a dicha tarea.

Ilustración 3Mapa de distancias entre Uverito y Puerto Palúa. Fuente: Google Earth.

Para cumplir con los criterios de producción, se considera que la capacidad del camión se ve afectada por la forma de carga del producto terminado, siendo esta en paletas de acuerdo a las especificaciones de tabla 16. Tomando en cuenta las dimensiones de carga interna del camión, y las dimensiones de una paleta estándar de 1mx1,20m, por distribución de espacios se determina que la capacidad de la tolva cargando las paletas será:

$$Capacidad = 10\,paletas \times \frac{80\,sacos}{paleta} + \frac{50\,sacos}{paleta} \times \frac{15\,kg}{saco}$$

$$Capacidad = 19.500\,kg = 19{,}5\,ton$$

Ahora, con el valor establecido de demanda y la nueva capacidad, se tiene:

$$\frac{10.000\ ton\ de\ pellets\ al\ año}{19{,}5\ ton\ por\ camión} \approx 513\ viajes\ de\ camión\ por\ año$$

Haciendo uso del mismo valor obtenido en el segundo punto y sabiendo que el recorrido es de 53,9 km se tiene finalmente:

$$\frac{229.22\ g\ CO2}{ton\ milla} x \frac{1\ milla}{1.6093\ Km} x \frac{1\ ton}{1x10^6 g} x\ 53{,}9\ km\ x\ 19{,}5\ ton = 0{,}1497\ ton\ CO2$$

Por ende:

$$0{,}1497\ toneladas\ CO2\ x\ 513\ viajes = 76{,}7991\ \frac{toneladas}{año}$$

5. *Calculo de emisiones de CO_2 generadas por el transporte desde el puerto de exportación hasta el puerto de clientes en Europa.*

5.1. Ubicación de Potencial Cliente en Europa

Se establece como destino principal y único para el estudio, los puertos de Antwerp en Bélgica, Europa. Esto dado a que el mercado de pellets de madera en Bélgica se encontraba para el 2008 entre 920.000 toneladas aproximadamente, de las cuales 800.000 fueron consumidas para la generación de energía eléctrica. Este sector cuenta con grandes importaciones de Alemania, Europa del este y Norteamérica, y se espera un crecimiento significante del mismo en los próximos años. (Barel, 2009).

5.2. Emisión de los navíos hasta Bélgica Europa

Tomando en cuenta lo expresado en el sexto apartado del capítulo IV, se sabe que cada contenedor cargará 39 toneladas totales de mercancía:

$$\frac{10.000\ ton\ de\ pellets\ al\ año}{39\ ton\ de\ capacidad\ por\ contenedor\ de\ navío} = 257\ contenedores\ por\ año$$

Y sabiendo que el barco realiza viajes cada 29 días, teniendo aproximadamente 1 viaje mensual, se deben enviar 22 containers de mercancía por viaje. Esta cantidad representa un total de aproximadamente 858 toneladas de pellets a exportar.
Para el cálculo de las emisiones generadas por los barcos en cuestión, se hizo uso del software creado por la "National Technical University of Athens" en su departamento de laboratorio para Transporte Marítimo. En su documento "Ship Emissions Study" (mayo, 2008), se explica cómo se utiliza el programa y como se toman en cuenta las opciones a considerar. (Ver anexo 10 y 11)

Para el presente estudio se sabe que la distancia del Puerto de Palúa al Puerto de Antwerp en Bélgica (ver anexo 9) es de aproximadamente 7765 km. Se presenta la siguiente tabla para completar la información requerida por el programa:

consumo de combustible (ton/dia)	
en transito	11.9
en puerto con operación de gruas	1.8

Tabla 20. Consumo de combustible en tonelada por día de los navíos BEAUTRIUMPH y BEAUTRADER en su modalidad de tránsito y estacionario" Fuente: Vertraco

Además, se sabe que por norma estos navíos consumen diesel con un máximo de 0.5 % de sulfuro (Vertraco). El programa calcula la generación de dióxido de carbono por el viaje completo y toma en cuenta que el mismo va cargado en su primera dirección y sin carga de regreso al punto de partida, incluyendo los días de parada en el puerto.

El programa luego de ser cargado con la data necesaria (Ver anexo 10), arroja como resultado que el BEAUTRADER y BEAUTRIUMPH generan 339.98 kg CO2 por tonelada transportada, lo que quiere decir que si se transportan 858 toneladas de pellets por viaje y se realizan 12 viajes al año, se obtiene el siguiente cálculo:

$$\frac{339.98\ kg\ CO2}{tonelada\ transportada} x \frac{1\ tonelada}{1000\ kg} x \frac{858\ toneladas\ transportadas}{viaje} x \frac{12\ viajes}{año}$$

$$= 3500.4341\ toneladas\ CO2\ por\ año$$

6. *Emisión total generada por el proceso productivo y logística.*

Sumando las emisiones anuales para un proceso de 10.000 toneladas anuales, se tiene que por utilización de motosierras, transporte de Uverito a la planta, transporte de la planta al puerto y transporte marítimo se tiene:

Operación	Emisión de CO2 (ton/año)
Motosierras	2,4992
Remolcadores	23,6300
Transporte Bosque- Planta	220,8092
Procesos de Planta	0
Transporte Planta – Puerto Palúa	76.7991
Transporte Puerto Palúa- Puerto Bélgica	3500,4341
Total	3824,171

Tabla 22 Totalización de emisiones de CO2. Fuente: Propia

7. *Comparación entre el carbono secuestrado y el carbono emitido en el proceso de generación y transporte de pellets*

El carbono total secuestrado durante los 15 años de vida de los pinos destinados a la producción de 10.000 toneladas anuales, es equivalente a 11.235,44 toneladas mientras que el carbono emitido por las operaciones es de 3824,171 ton. Obteniendo entonces el siguiente balance:

$$\text{Balance de CO2} = 11.235{,}4432\ \text{ton secuestradas} - 3824{,}171\text{ton emitidas} = 7411{,}272\ \text{ton}$$

El balance es ampliamente positivo en favor del carbono secuestrado, se asume que para los parámetros establecidos a lo largo del estudio el proceso es ecológicamente rentable, dejando un crédito de carbono aún disponible.

Sin embargo, el valor de secuestro es desarrollado a lo largo de 15 años, y el valor de emisión es generado en solo un año, los ciclos de siembra y cosecha deben ser planteados considerando esta condición de tiempo. Sabiendo que los árboles usados en el estudio acaban de alcanzar su madurez para el corte y no pueden ser cortados antes dado a que se alterarían las condiciones de materia prima para la producción.

CAPITULO VII

MODELO DE SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

El modelo de simulación fue desarrollado en base a las ecuaciones usadas para el cálculo de cantidad de materia prima requerida, secuestro y emisión desarrolladas en el capítulo V y VI del presente estudio.

Se asume como escenario ideal la producción de 10.000 toneladas anuales con el que fueron desarrollados los cálculos previos. A partir de estos se obtuvieron factores unitarios de secuestro y emisión para las diferentes áreas de proceso, que serán utilizados en la evaluación de dos escenarios, uno pesimista con capacidad productiva de 8.000 toneladas anuales, y uno optimista con capacidad de producción de 15.000 toneladas anuales, escenarios sugeridos por nuestro tutor PhD. Henry Gasparín.

Se debe recordar, que para el presente estudio, las emisiones generadas por equipos con alimentación eléctrica son nulas, por ende, independientemente de cuanto aumenta o disminuya la producción, la adición o sustracción respectivamente de estos equipos no afecta el cálculo de emisión dentro del modelo de simulación establecido.

1. Evaluación de escenario pesimista

Se toma como variable de entrada del usuario la cantidad requerida de producción, en este escenario será de 8.000 toneladas.

1.1. Simulación de peso del árbol, cálculo de materia prima entrante y secuestro en escenario pesimista.

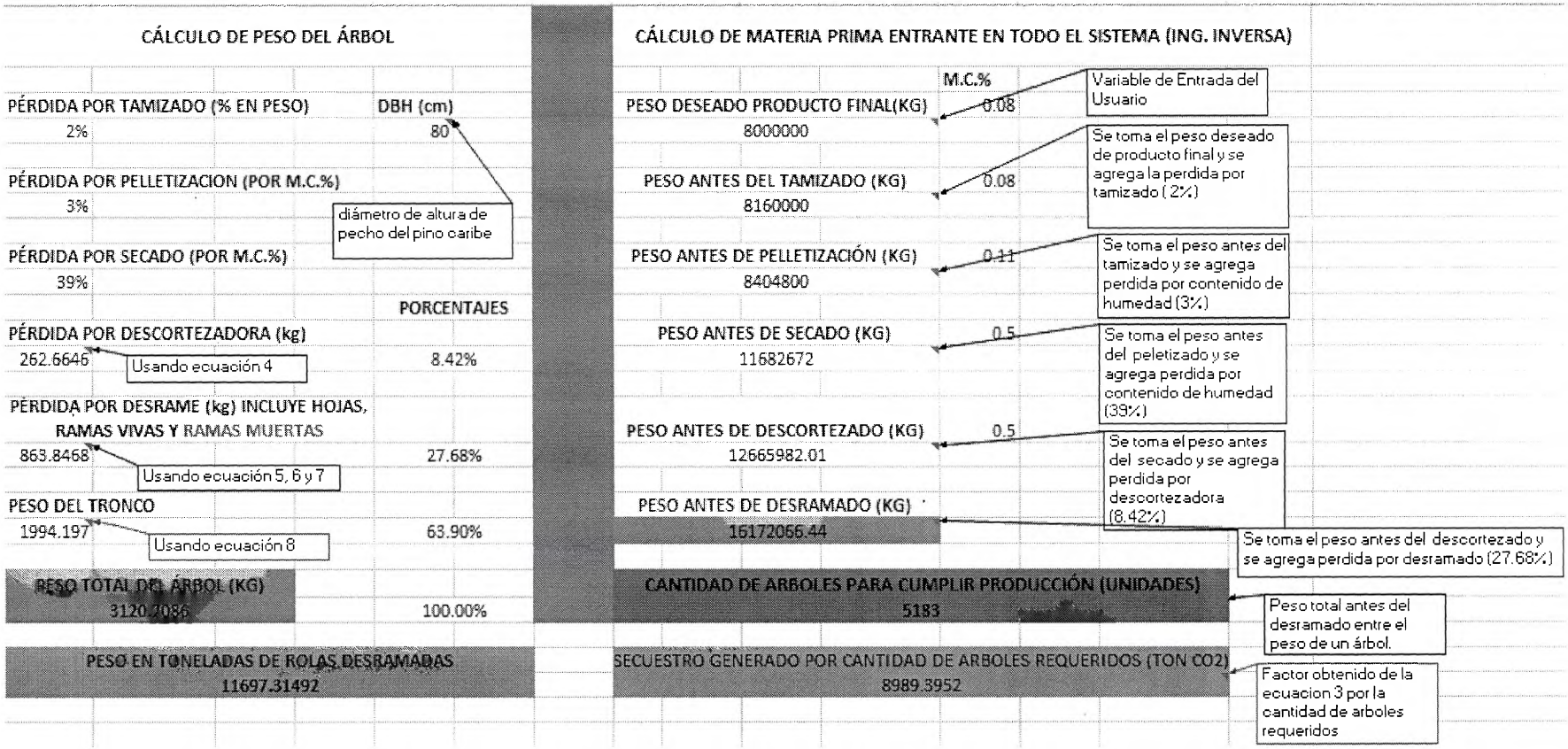


Ilustración 4 Captura de pantalla de la simulación para el cálculo del peso del árbol, cálculo de materia prima entrante y secuestro. Fuente: Propia.

1.2. Simulación Capacidades productivas de máquinas en escenario pesimista.

CAPACIDADES PRODUCTIVAS DE MÁQUINAS (TON/HORA)

MÁQUINA (ton/h)	CAPACIDAD (ton/h)	MÁQUINA (ton/h)	CAPACIDAD (ton/h)
PELLETIZADORA	4.5 A 5.5	MOLIENDA	6 A 7
3.8	1	3.8	1
SECADORA	5.5	ENFRIADORA	7.25
5.31	1	3.71	1
REASTILLADORA	10	TAMIZADORA	5 A 15
5.31	5	3.71	1
ASTILLADORA	8 A 12		
5.31	1		
DESCORTEZADORA	7 A 8		
3.76	1		

Para cada máquina, se toma la cantidad en kg de entrada al proceso, se convierte a toneladas y se divide entre el tiempo operativo de maquina anual (10 horas diarias, 220 dias al año).

Cantidad de equipos requeridos calculados en base a la capacidad de cada máquina basado en una estructura lógica condicional que automaticamente sugiere el numero de maquinas necesario para cumplir con los requerimientos de producción.

Ilustración 5 Captura de pantalla de la simulación para las capacidades productivas de máquinas. Fuente: Propia.

1.3. Simulación Emisión de Motosierras en escenario pesimista.

Marca	Modelo	Desplazamiento (cc)	Potencia (hp)	capacidad de combustible (L)
Stihl	361	59	4.6	0.6
	362	59	4.6	0.6
Husqvarna	357XP	56.5	4.4	0.68
	346XPG	50.1	3.7	0.5
	550XP	50.1	3.75	0.52

1 operario con motosierra

cantidad de arboles a cortar(anual)	tiempo de operación por arbol (hora)	horas laborables (hora)	dias laborables(hora)	cantidad de motosierras requeridas
5183	0.333333333	8	220	1.0

Cantidad de árboles generados para el valor de entrada (producto terminado)

Tiempo extraido de paper "Analysis of the duration of basic logging operation performed using a chainsaw"

Cantidad de árboles a cortar por tiempo de corte entre tiempo operacional anual contemplado.

Normativa EPA para motores de motosierras					
Tipo de Motor	HC	CO	NO_x	PM	BSFC
	(g/hp-h)	(g/hp-h)	(g/hp-h)	(g/hp-h)	(lb/hp-h)
Clase III (<20 cc)	26.87	141.69	1.49	7.7	0.822
Clase IV (≥20 cc y < 50 cc)	26.87	141.69	1.49	7.7	0.822
Clase V (≥50 cc)	47.98	283.37	0.91	7.7	0.608

Cálculo de em[illegible] motosierras utilizadas

cantidad de motosierras	Clase (III, IV o V)	CO2 generado (ton/año)
1.0	V	1.249607204

Toneladas de CO2 anuales generadas por la multiplicación de la ecuación 9 alimentada de los valores de la tabla 17 por la cantidad de motosierras necesarias.

Opción lógica basada en la tabla 17 que permite extraer los valores necesarios para el cálculo del CO2 generado dependiendo del desplazamiento de la motosierra (cc).

Ilustración 6 Captura de pantalla de la simulación para Emisión de Motosierras. Fuente: Propia.

1.4. Simulación Emisión de Remolcador en escenario pesimista.

Huella de carbono generada por remolcador forestal

Potencia promedio (kw)	36.8		porcentaje de utilización	0.8	Factor de utilización extraído de tabla 19	Camiones de materia prima diarios	3	Cantidad de días de camión anuales en ruta (viaje-Planta anual la cantidad de días de trabajo al año	Emisión de CO2 anual por remolcador (ton) 23.6298	Factor de emisión por energía real de máquinas por cantidad de máquinas
tiempo de uso (h)	8	Potencia nominal por tiempo de uso								
energía consumida por día (kwh)	294.4	Energía diaria por días de uso anuales	energía real consumida anualmente (kwh)	51814.4	Energía consumida anual por factor de utilización	tiempo de carga de camion (h)	1	Factor unitario obtenido a partir del estudio de Forestry Handbook		
energía consumida anual (kwh)	64755		factor de emisión por uso de gasolina (Kg CO2/MMBTU)	66.33	Factor unitario obtenido a partir de tabla 20	cantidad de remolcadores	2	Cantidad de camiones a cargar diarios por tiempo de carga entre horas operacionales en base al tiempo de trabajo (3 horas en vuelto, 10 horas en planta)		

Ilustración 7 Captura de pantalla de la simulación para Emisión de Remolcador. Fuente: Propia

1.5. Simulación Emisión de Transporte Terrestre en escenario pesimista.

Huella de carbono generada por transporte terrestre

cantidad a cargar Uverito - Planta (ton)	11697.3	distancia uverito a planta (km)	106	CO2 generado por camión (g CO2 / ton milla)	toneladas de CO2 generada por camión por viaje (uverito - planta)	toneladas de CO2 generada por camion por viaje (Planta - puerto Palúa)	
capacidad de carga por camión Uverito - Planta(ton)	25	distancia planta a puerto Palua (km)	53.9	229.22	0.377451687	0.149705885	
cantidad a cargar Planta - Puerto Palúa (ton)	8000				toneladas de CO2 anuales (Uverito - planta)	toneladas de CO2 anuales (Planta - puerto Palúa)	
capacidad de carga por camión Planta - Palúa(ton)	19.5				176.6473895	61.5291188	
cantidad de viajes por camión anuales (uverito - planta)	468						
cantidad de viajes por camión anuales (planta - puerto palúa)	411						

Peso de rolas desramadas

Factor de emisión multiplicado por distancia del trayecto y la carga establecida para dicho recorrido, ambas

Variable de entrada del usuario.

Factor unitario de emisión obtenido a partir del programa de simulación "Greenhouse Gas Emissions Model (GEM) for Medium- and Heavy-Duty Vehicle Compliance"

Total de toneladas de CO2 generadas en el año para la ruta establecida, ambas celdas contienen el mismo principio.

Peso de rolas desramadas entre capacidad de carga de camión de Uverito - Planta.

Peso de producto terminado entre capacidad de carga de camión en trayecto Planta - Palúa.

Ilustración 8 Captura de pantalla de la simulación para Emisión de Transporte Terrestre. Fuente: Propia

1.6. Simulación Emisión de Transporte Marítimo en escenario pesimista.

Huella de carbono generada por transporte marítimo

cantidad a cargar (ton)	8000	Variable de entrada del usuario	CO2 generado por transporte (kg/ ton transportada)	Factor unitario de emisión obtenido a partir del programa de simulación de National Technical University of Athens en su Ship Emissions Study	CO2 generado anual (ton)	Factor de Emisión por toneladas transportadas anuales
capacidad de carga por container (ton)	39	Cantidad a cargar entre capacidad por container	339.98		2863.99152	
cantidad de containers	206		Toneladas transportadas por viaje			
cantidad de viajes por transporte marítimo anual	12	Cantidad de containers entre entre cantidad de viajes marítimos	702	Capacidad de carga del container por cantidad de containers por viaje		
cantidad de containers a enviar por viaje	18					

Ilustración 9 Captura de pantalla de la simulación para Emisión de Transporte Marítimo. Fuente: Propia

1.7. Totalización de Emisiones y Balance de Carbono en escenario pesimista.

Huella de Carbono Total			
CO2 generado por Motosierras (ton CO2/año)	1.24961	CO2 total generado por manufactura y distribución de pellets (ton CO2/año)	3127.05
CO2 generado por Remolcador forestal (ton CO2/año)	23.6298		
CO2 generado por transporte Uverito - Planta (ton CO2/año)	176.647		
CO2 generado por transporte Planta - Puerto Palúa (ton CO2/año)	61.5291	Balance de carbono (Ton CO2)	5862.35
CO2 generado por transporte maritimo (ton CO2/año)	2863.99		

sumatoria de todas las emisiones generadas en cada etapa

Resultados obtenidos en calculos previos para cada etapa.

Diferencia entre CO2 generado por manufactura y distribución y carbono secuestrado por la cantidad de arboles requeridos.

Ilustración 10 Captura de pantalla de la simulación para Totalización de Emisiones y Balance de Carbono. Fuente: Propia

2. *Evaluación de escenario ideal*

Se toma como variable de entrada del usuario la cantidad requerida de producción, en este escenario será de 10.000 toneladas.

2.1. Simulación de peso del árbol, cálculo de materia prima entrante y secuestro en escenario ideal.

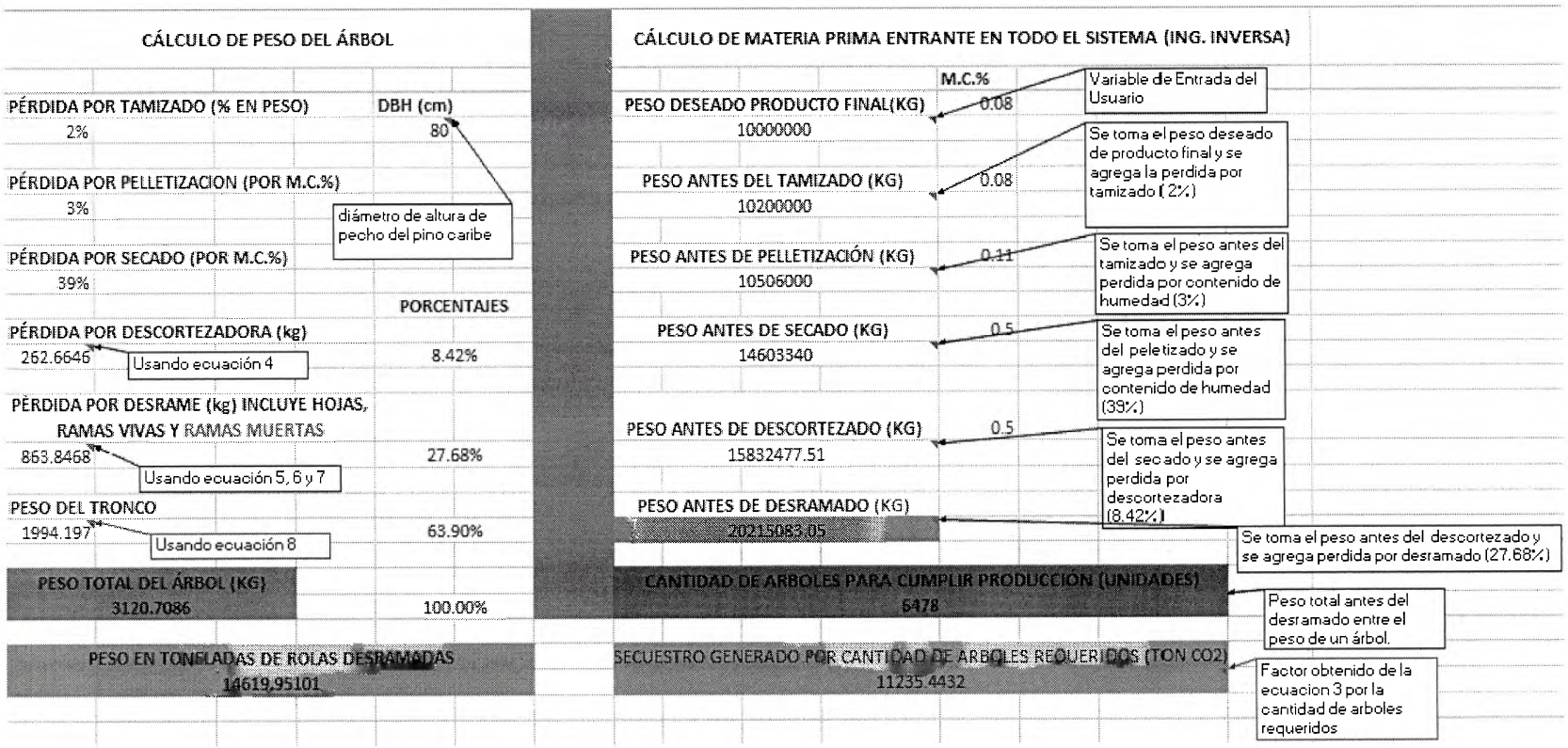


Ilustración 11 Captura de pantalla de la simulación escenario ideal para el cálculo del peso del árbol, cálculo de materia prima entrante y secuestro. Fuente: Propia.

2.2. Simulación Capacidades productivas de máquinas secuestro en escenario ideal.

CAPACIDADES PRODUCTIVAS DE MÁQUINAS (TON/HORA)

MÁQUINA (ton/h)	CAPACIDAD (ton/h)	MÁQUINA (ton/h)	CAPACIDAD (ton/h)
PELLETIZADORA	4.5 A 5.5	MOLIENDA	6 A 7
4.8	1	4.8	1
SECADORA	5.5	ENFRIADORA	7.25
6.64	2	4.64	1
REASTILLADORA	10	TAMIZADORA	5 A 15
6.64	1	4.64	1
ASTILLADORA	8 A 12		
6.64	1		
DESCORTEZADORA	7 A 8		
7.20	1		

Para cada máquina, se toma la cantidad en kg de entrada al proceso, se convierte a toneladas y se divide entre el tiempo operativo de maquina anual (10 horas diarias, 220 dias al año).

Cantidad de equipos requeridos calculados en base a la capacidad de cada máquina basado en una estructura lógica condicional que automaticamente sugiere el numero de maquinas necesario para cumplir con los requerimientos de producción.

Se puede observar un incremento en el requerimiento de maquinarías en el área de secado.

2.3. Simulación Emisión de Motosierras secuestro en escenario ideal.

Huella de carbono generada por transporte marítimo

cantidad a cargar (ton)	10000	Variable de entrada del usuario	CO2 generado por transporte (kg/ ton transportada)	Factor unitario de emisión obtenido a partir del programa de simulación de National Technical University of Athens en su Ship Emissions Study	CO2 generado anual (ton)	Factor de Emisión por toneladas transportadas anuales
capacidad de carga por container (ton)	39	Cantidad a cargar entre capacidad por container	339.98		3500.43408	
cantidad de containers	257		Toneladas transportadas por viaje	Capacidad de carga del container por cantidad de containers por viaje		
cantidad de viajes por transporte marítimo anual	12	Cantidad de containers entre entre cantidad de viajes marítimos	858			
cantidad de containers a enviar por viaje	22					

Ilustración 12 Captura de pantalla de la simulación escenario ideal para Emisión de Motosierras. Fuente: Propia.

2.4. Simulación Emisión de Remolcador secuestro en escenario ideal.

Huella de carbono generada por remolcador forestal

Potencia promedio (kW)	36.8	Potencia nomina por tiempo de uso	porcentaje de utilización	0.8	Factor de utilización extraido de tabla 19	Camiones de materia prima diarios	3	Cantidad de viajes de camión anuales en ruta Uverito- Planta entre la cantidad de dias de trabajo al año	Emisión de CO2 anual por remolcador (ton) 23.6298
tiempo de uso (h)	8				Energia ocasionada anual por el factor de utilización				Factor de emisión por energía real de máquinas por cantidad de máquinas
energia consumida por dia (kwh)	294.4	Energía ciara por dias de uso anuales	energia real consumida anualmente (kwh)	51814.4	Factor unitario obtenido a partir de tabla 20	tiempo de carga de camión (h)	1	Factor unitario obtenido a partir del estudio de Forestry Handbook	
energia consumida anual (kwh)	64768		factor de emisión por uso de gasolina (Kg CO2/MMBTU)	66.33		cantidad de remolcadores	2	Cantidad de camiones a cargar diarios por tiempo de carga entre horas operacionales en cada sitio de trabajo (8 horas en uverito, 10 horas en planta)	

Ilustración 13 Captura de pantalla de la simulación escenario ideal para Emisión de Remolcador. Fuente: Propia

2.5. Simulación Emisión de Transporte Terrestre secuestro en escenario ideal.

Huella de carbono generada por transporte terrestre

cantidad a cargar Uverito - Planta (ton)	14619.95101	distancia uverito a planta (km)	106	CO2 generado por camión (g CO2 / ton milla)	toneladas de CO2 generada por camión por viaje (uverito - planta)	toneladas de CO2 generada por camión por viaje (Planta - puerto Palúa)	
capacidad de carga por camión Uverito - Planta(ton)	25	distancia planta a puerto Palua (km)	53.9	229.22	0.377451687	0.149705885	
cantidad a cargar Planta - Puerto Palúa (ton)	10000				toneladas de CO2 anuales (Uverito - planta)	toneladas de CO2 anuales (Planta - puerto Palúa)	
capacidad de carga por camión Planta - Palúa(ton)	19.5				220.8092369	76.79911909	
cantidad de viajes por camión anuales (uverito - planta)	585						
cantidad de viajes por camión anuales (planta - puerto palúa)	513						

Peso de rolas desramadas

Variable de entrada del usuario.

Factor unitario de emisión obtenido a partir del programa de simulación "Greenhouse Gas Emissions Model (GEM) for Medium- and Heavy-Duty Vehicle Compliance"

Factor de emisión multiplicado por distancia del trayecto y la carga establecida para dicho recorrido, ambas

Total de toneladas de CO2 generadas en el año para la ruta establecida, ambas celdas contienen el mismo principio.

Peso de rolas desramadas entre capacidad de carga de camión de Uverito - Planta.

Peso de producto terminado entre capacidad de carga de camión en trayecto Planta - Palúa.

Ilustración 14 Captura de pantalla de la simulación escenario ideal para Emisión de Transporte Terrestre. Fuente: Propia

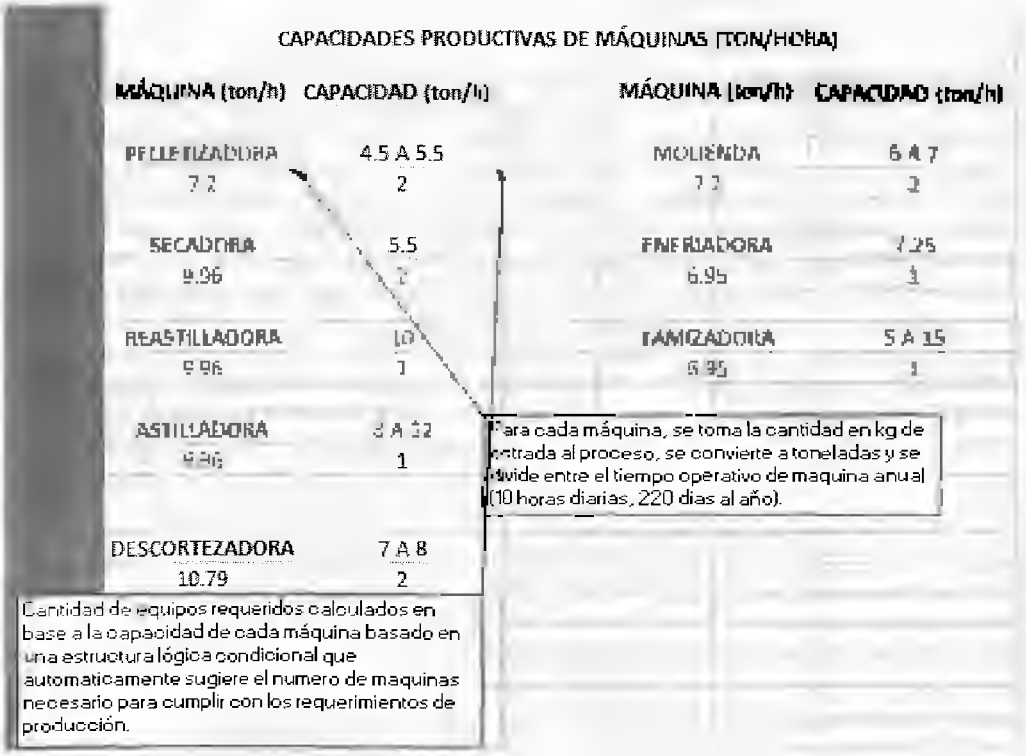
2.6. Simulación Emisión de Transporte Marítimo secuestro en escenario ideal.

Huella de carbono generada por transporte marítimo

cantidad a cargar (ton)	15000	Variable de entrada del usuario	CO2 generado por transporte (kg/ ton transportada)	Factor unitario de emisión obtenido a partir del programa de simulación de National Technical University of Athens en su Ship Emissions Study	CO2 generado anual (ton)	Factor de Emisión por toneladas transportadas anuales
capacidad de carga por container (ton)	39	Cantidad a cargar entre capacidad por container	339.98		5250.65112	
cantidad de containers	385		Toneladas transportadas por viaje			
cantidad de viajes por transporte marítimo anual	12	Cantidad de containers entre entre cantidad de viajes marítimos	1287	Capacidad de carga del container por cantidad de containers por viaje		
cantidad de containers a enviar por viaje	33					

Ilustración 15 Captura de pantalla de la simulación escenario ideal para Emisión de Transporte Marítimo. Fuente: Propia

3.2. Simulación Capacidades productivas de máquinas en escenario optimista.



CAPACIDADES PRODUCTIVAS DE MÁQUINAS (TON/HORA)

MÁQUINA (ton/h)	CAPACIDAD (ton/h)	MÁQUINA (ton/h)	CAPACIDAD (ton/h)
PELLETIZADORA 7.2	4.5 A 5.5 2	MOLIENDA 7.2	6 A 7 2
SECADORA 9.96	5.5 2	ENFRIADORA 6.95	7.25 1
REASTILLADORA 9.96	10 1	TAMIZADORA 6.95	5 A 15 1
ASTILLADORA 9.96	8 A 12 1		
DESCORTEZADORA 10.79	7 A 8 2		

Para cada máquina, se toma la cantidad en kg de entrada al proceso, se convierte a toneladas y se divide entre el tiempo operativo de maquina anual (10 horas diarias, 220 dias al año).

Cantidad de equipos requeridos calculados en base a la capacidad de cada máquina basado en una estructura lógica condicional que automaticamente sugiere el numero de maquinas necesario para cumplir con los requerimientos de producción.

Ilustración 18 Captura de pantalla de la simulación escenario optimista para las capacidad productivas de máquinas. Fuente: Propia.

Se puede observar un incremento en el requerimiento de maquinarías en el área de pelletización, secado, descortezadora y molienda.

3.3 Simulación Emisión de Motosierras en escenario optimista.

Marca	Modelo	Desplazamiento (cc)	Potencia (hp)	capacidad de combustible (L)
Stihl	361	59	4.6	0.6
	362	59	4.6	0.6
Husqvarna	357XP	56.5	4.4	0.68
	346XPG	50.1	3.7	0.5
	550XP	50.1	3.75	0.52

1 operario con motosierra

cantidad de arboles a cortar(anual)	tiempo de operación por arbol (hora)	horas laborables (hora)	dias laborables(hora)	[redacted]
9717	0.333333333	7	220	

Cantidad de arboles generados para el valor de entrada (producto terminado)

Tiempo extraido de paper "Analysis of the duration of basic logging operation performed using a chainsaw

Cantidad de arboles a cortar por tiempo de corte entre tiempo operacional anual contemplado.

Normativa EPA para motores de motosierras

Tipo de Motor	HC	CO	NO_x	PM	BSFC
	(g/hp h)	(g/hp h)	(g/hp-h)	(g/hp h)	(lb/hp h)
Clase III (<20 cc)	26.87	141.69	1.49	7.7	0.822
Clase IV (≥20 cc y < 50 cc)	26.87	141.69	1.49	7.7	0.822
Clase V (≥50 cc)	47.98	283.37	0.91	7.7	0.608

cantidad de motosierras	Clase (III, IV y V)	[redacted]
20		

Toneladas de CO2 anuales generadas por la multiplicación de la ecuación 9 alimentada de los valores de la tabla 17 por la cantidad de motosierras necesarias.

Operación lógica basada en la tabla 17 que permite extraer los valores necesarios para el cálculo de CO2 generado dependiendo de desplazamiento de la motosierra (cc)

Ilustración 19 Captura de pantalla de la simulación escenario optimista para Emisión de Motosierras Fuente Propia

3.4 Simulación Emisión de Remolcador en escenario optimista.

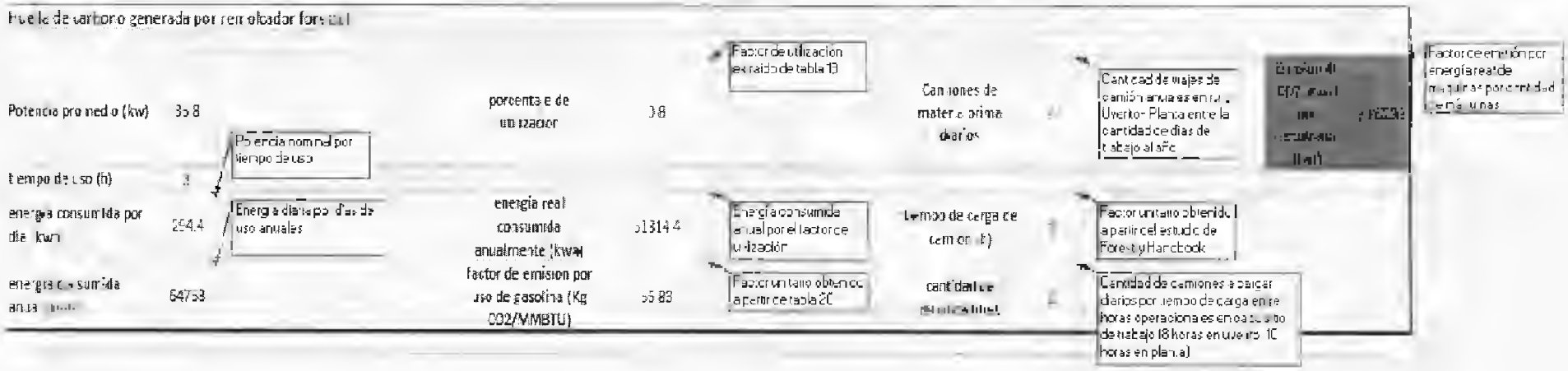
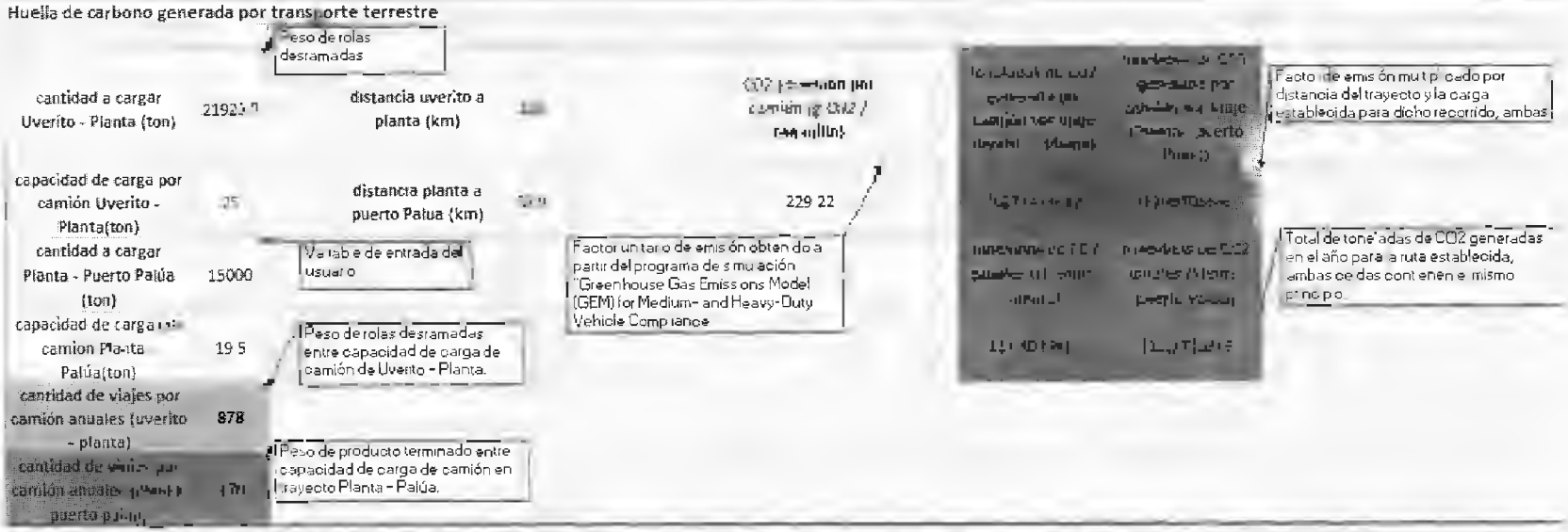


Ilustración 20 Captura de pantalla de la simulación para Emisión de Remolcador Fuente Propia

3 5 Simulación Emisión de Transporte Terrestre en escenario optimista.



Ilustracion 21 Captura de pantalla de la simulación escenario optimista para Emisión de Transporte Terrestre Fuente Propia

3 6 Simulación Emisión de Transporte Marítimo en escenario optimista

Huella de carbono generada por transporte marítimo

cantidad a cargar (ton)	15000	Variable de entrada del usuario	CO2 generado por transporte (kg/ ton transportada)	Factor unitario de emisión obtenido a partir del programa de simulación de National Teohn oa University of Athens en su Ship Emissions Study	CO2 generado anual (ton)
capacidad de carga por container (ton)	38	Cantidad a cargar entre capacidad por container	339.98		5254.65147
cantidad de containers	385		Toneladas transportadas por viaje		
cantidad de viajes por transporte marítimo anual	12	Cantidad de containers entre entre cantidad de viajes marítimos	1287	Capacidad de carga del container por cantidad de containers por viaje	
cantidad de containers a enviar por viaje	33				

Factor de Emisión por toneladas transportadas anuales

Ilustracion 22 Captura de pantalla de la simulación escenario optimista para Emisión de Transporte Marítimo Fuente Propia

3.7. Totalización de Emisiones y Balance de Carbono en escenario optimista.

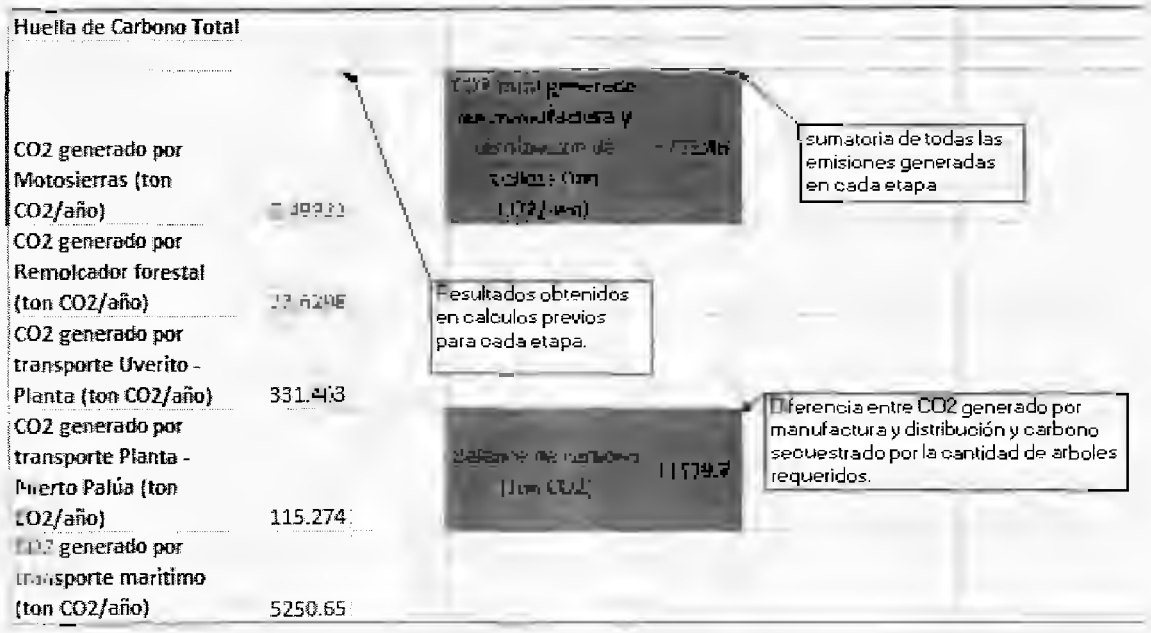


Ilustración 23 Captura de pantalla de la simulación escenario optimista para Totalización de Emisiones y Balance de Carbono. Fuente: Propia

4. *Comparación gráfica entre modelos.*

A continuación se presenta un gráfico comparando las cantidades de emisión y secuestro de cada escenario.

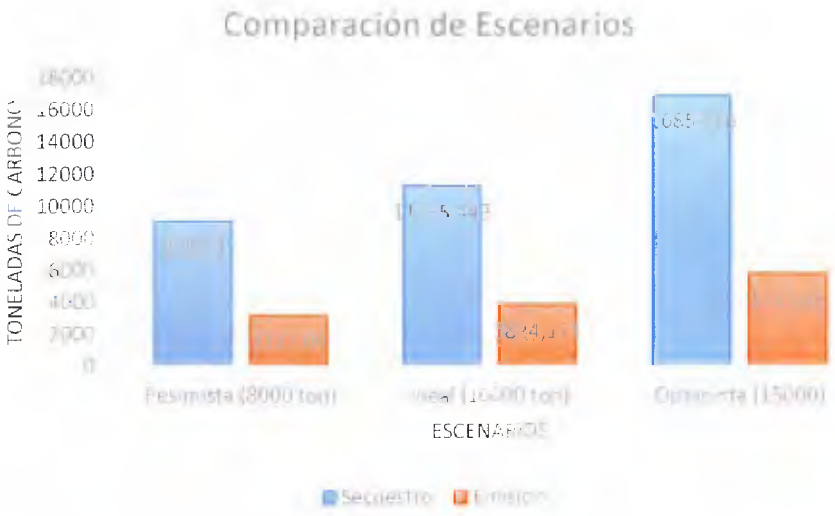


Gráfico 1 Comparación de Escenarios. Fuente: Propia

Se puede observar un crecimiento sobre el secuestro y la emisión para cada escenario, la brecha entre ambos favorece al secuestro y se hace más grande a medida que incrementa la cantidad a producir.

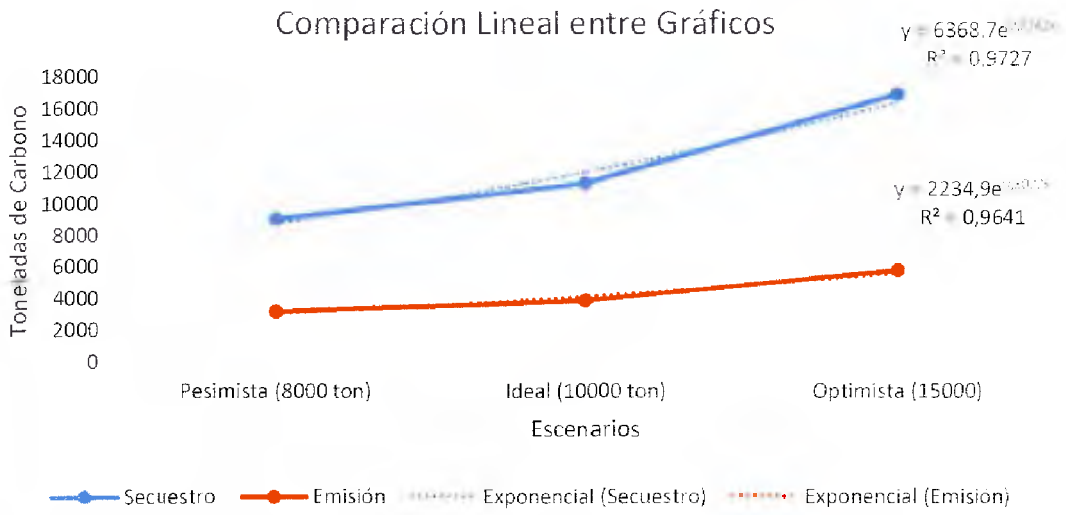


Gráfico 2 Comparación y líneas de tendencia para carbono secuestrado y emisión del proceso en 3 escenarios. Fuente Propia

Se puede observar mediante el gráfico 2, que para la evaluación de tres escenarios de cantidad requerida, para las condiciones de nuestro estudio, tanto la curva de emisión como la de secuestro siguen una tendencia exponencial con el valor de correlación más alto de otras tendencias posibles. Ahora, con solo 3 escenarios, la tendencia puede llegar a ser un poco limitada, por ende se proponen incrementos de 500 toneladas desde 8000 hasta 15000 para suavizar la línea y obtener ecuaciones de tendencia más precisas. Se tiene entonces el siguiente gráfico.

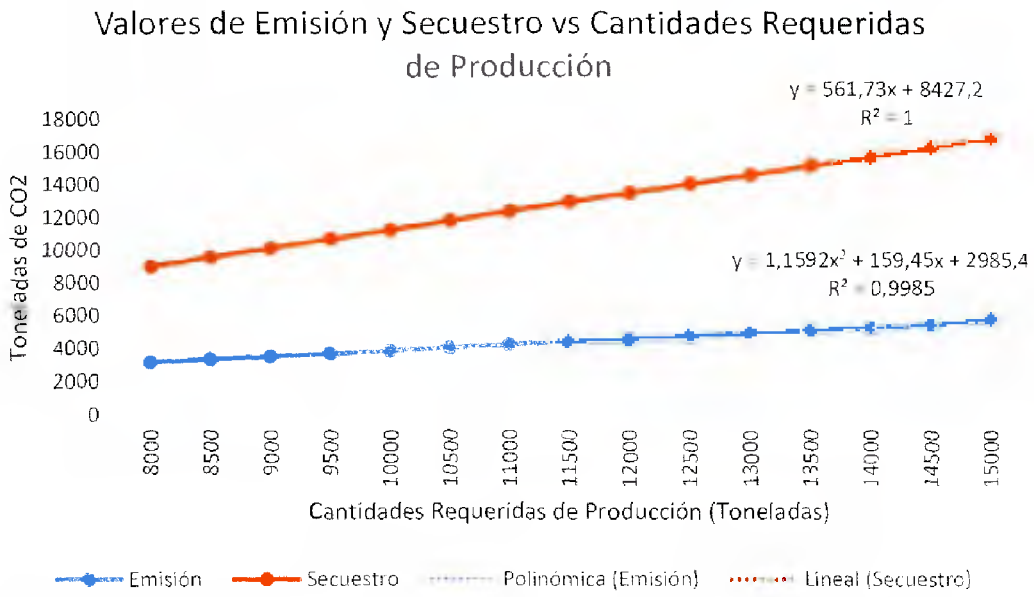


Gráfico 3 Toneladas de CO2 vs Cantidades Requeridas de Producción en distintos escenarios. Fuente: Propia

Se puede observar en gráfico 3 que el comportamiento de secuestro sigue una tendencia lineal con un factor de correlación igual a 1, y la curva de emisión sigue una tendencia polinómica con el factor de correlación más cercano a 1, esto se verifica mediante el incremento de iteraciones en la simulación. Entonces las ecuaciones presentadas en el gráfico, considerando que han sido desarrolladas dentro del alcance de nuestro estudio permiten determinar dada la cantidad de producción deseada, el secuestro y emisión de carbono para el proceso de manufactura y transporte de pellets.

Igualmente, mediante iteraciones realizadas en el modelo, se determinó que el mínimo de toneladas de producto final requeridas para que el proceso sea ecológicamente sustentable (Balance de carbono positivo), es de 168.269,0299 kg de pellets, para un peso mínimamente menor en gramos, el simulador arroja un balance de carbono negativo. A continuación las capturas de pantalla que evidencian dicha afirmación.

CÁLCULO DE MATERIA PRIMA ENTRANTE EN TODO EL SISTEMA (ING. INVERSA)	
	M.C.%
PESO DESEADO PRODUCTO FINAL(KG)	0.08
[illegible]	
PESO ANTES DEL TAMIZADO (KG)	0.08
171634.4104	
PESO ANTES DE PELLETIZACIÓN (KG)	0.11
176783.4427	
PESO ANTES DE SECADO (KG)	0.5
245728.9854	
PESO ANTES DE DESCORTEZADO (KG)	0.5
266411.5631	
PESO ANTES DE DESRAMADO (KG)	
[illegible]	
CANTIDAD DE ÁRBOLES PARA CUMPLIR PRODUCCIÓN (UNIDADES)	
109	
SECUESTRO GENERADO POR CANTIDAD DE ÁRBOLES REQUERIDOS (TON CO2)	
189.0496	

CO2 total generado por manufactura y distribución de pellets (ton CO2/año)	189.112
Balance de carbono (Ton CO2)	-0.067564

Figura 6 Contraste de límite inferior para cantidad mínima de producción para balance de carbono positivo. Fuente Propia.

CÁLCULO DE MATERIA PRIMA ENTRANTE EN TODO EL SISTEMA (ING. INVERSA)	
	M.C.%
PESO DESEADO PRODUCTO FINAL(KG)	0.08
168269.0299	
PESO ANTES DEL TAMIZADO (KG)	0.08
171634.4105	
PESO ANTES DE PELLETIZACIÓN (KG)	0.11
176783.4428	
PESO ANTES DE SECADO (KG)	0.5
245728.9855	
PESO ANTES DE DESCORTEZADO (KG)	0.5
266411.5682	
PESO ANTES DE DESRAMADO (KG)	
[illegible]	
CANTIDAD DE ÁRBOLES PARA CUMPLIR PRODUCCIÓN (UNIDADES)	
110	
SECUESTRO GENERADO POR CANTIDAD DE ÁRBOLES REQUERIDOS (TON CO2)	
190.784	

CO2 total generado por manufactura y distribución de pellets (ton CO2/año)	189.112
Balance de carbono (Ton CO2)	1.672034

Figura 7 Contraste de límite superior para cantidad mínima de producción para balance de carbono positivo. Fuente Propia.

5. Validación del Modelo

A pesar de que no existen antecedentes para el estudio sobre valores de emisión y secuestro en Venezuela, la bibliografía consultada para el desarrollo de ecuaciones, y los programas referenciados para el cálculo de factores de emisión cuentan con fuentes oficiales de publicación.

Se recuerda que los valores utilizados en el modelo para el cálculo del secuestro son generados a partir de ecuaciones de pino caribe en una locación de condiciones climáticas aproximadas a la nuestra (Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda, 2011). Y los valores de emisión son generados a su vez de factores de emisión unitarios obtenidos a partir de fuentes oficiales como la Enviromental Protection Agency y La Universidad Técnica de Atenas.

Los valores de tiempo de operación por máquina fueron generados a partir de estudios de ingeniería civil, mecánica e industrial que indican en detalle los procedimientos elaborados para la obtención de dichos valores. De manera similar mediante consultas con el Ing. Electricista Rafael Naranjo se confirma el hecho de abastecimiento eléctrico total por la fuente hidroeléctrica de Guri.

La fuente de las ecuaciones para el cálculo del pino húmedo (Gholz, 1978), por falta de estudios en la especie de pino caribe fue aproximada a una especie familiar de pino poderosa, familiaridad confirmada por E. Meier, 2014, en su portal digital de The Wood Data Base.

Todos estos factores hacen que el modelo generado posea un alto nivel de veracidad, dado a que ninguna de las ecuaciones fueron alteradas durante el desarrollo de este estudio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, se exponen las conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.

CONCLUSIONES

- Se comprobó mediante el estudio de factores de emisión de carbono y factores unitarios de secuestro encontrados, que el proceso de manufactura y cadena logística para el consumo de pellets de un potencial cliente en Europa, es ecológicamente rentable.

- Al plantear el balance de carbono final, se obtiene una brecha ampliamente positiva, esto se debe al largo período dedicado al secuestro de carbono (15 años) contrastado con el breve tiempo de emisión de las actividades de tala, recolección y transporte (1 año), a esto se añade que las emisiones generadas por equipos alimentados eléctricamente poseen un valor de emisión de carbono igual a cero, dado a que el origen de su alimentación proviene de una fuente hidroeléctrica.

- El criterio de selección de la ubicación de la planta y su alimentación eléctrica provista únicamente por una fuente hidroeléctrica libre de emisiones de CO_2 es vital en la reducción de la huella de carbono en el proceso de manufactura, e igualmente referida en el balance del carbono con amplio margen positivo.

- Al escoger fuentes locales de alimentación de materia prima y puertos de exportación cercanos a la planta fabricadora, se disminuyen las distancias de transporte de mercancía, reduciendo de gran manera las emisiones generadas por este proceso.

- Las hectáreas solicitadas por el proceso para mantener una producción anual de 10.000 toneladas pueden ser fácilmente satisfechas por la reserva actual de Uverito que cuenta con casi 400.000 hectáreas dedicadas al pino caribe.

- La ubicación de la planta en Uverito siendo abastecida por el bosque cercano prueban ser desde el punto de vista ecológico, un gran lugar para establecer una planta encargada de la manufactura de pellets.

- La emisión por el transporte marítimo prueba ser la de mayor magnitud en la sumatoria de emisiones generadas en el proceso, sin embargo, es la única ruta de navíos exportadores existente para clientes en Europa, por ende este factor no puede ser mitigado.

- Las condiciones climáticas de siembra y cosecha del pino caribe y de otras especies madereras afectan directamente al secuestro de carbono generado por las mismas.

- La potencia promedio nominal de un equipo reportada por el fabricante no ofrece una estimación precisa para el cálculo de la energía otorgada por dicha máquina. Para el uso práctico, se deben considerar porcentajes de utilización sobre la potencia nominal, y así calcular de manera más aproximada un comportamiento energético real del equipo, y su vez, la emisión generada por el mismo.

- En el balance de carbono para cada escenario es positivo a favor del secuestro y se hace más grande a medida que incrementa la cantidad a producir.

- Mediante un incremento de iteraciones se determina que el comportamiento del secuestro respecto a la cantidad requerida de producción sigue una tendencia lineal, mientras que el comportamiento de la emisión respecto a la cantidad requerida de producción es polinómica.

- El mínimo de toneladas de producto final requeridas para que el proceso sea ecológicamente sustentable (Balance de carbono positivo), es de 168.269,0299 kg de pellets.

RECOMENDACIONES

- Se deben realizar mayor cantidad de estudios respecto al peso húmedo de la especie pino caribe en condiciones climáticas similares a las de la reserva de Uverito, ya que no se cuenta con bibliografía suficiente referente a la especie en cuestión en este ámbito y se recurrió a aproximar a la especie familiar de Pino Ponderosa.

- Aumento de la frecuencia de publicación y actualización de las cifras reales que maneja la reserva de Uverito para obtener cálculos más exactos.

- Se propone considerar los ciclos de siembra y recolección en base a los periodos de crecimiento y secuestro de 15 años del pino caribe, y planificación de las hectáreas del bosque dedicadas a la generación de pellets acorde a estos principios para mantener el balance de carbono positivo o neutral.

- Complementar al estudio las demás investigaciones sobre la generación de pellets de madera en la Universidad Católica Andrés Bello, así como a la investigación disponible en el departamento de productos de madera y papel en la Universidad de Carolina del Norte.

- Proponer una investigación sobre una planta generadora de electricidad al sistema venezolano alimentada de biocombustible y verificar el cambio en la huella de carbono al considerar menores distancias de transporte e incluyendo equipos para generación de carga a partir de la quema de pellets.

- Verificar cuanto pueden cambiar los escenarios contemplados si los equipos alimentados por energía eléctrica generan un valor de emisión, e igualmente incluir equipos para la quema de pellets para la generación de energía y agregar la emisión de estos al modelo.

- Complementar el presente estudio con un análisis de carbono generado por procesos de preparación de suelos y siembra de árboles en la reserva de Uverito.

ANEXOS

2. Main parameter of dump truck left hand drive.

Descriptions & Specifications
HOWO 6x4 Tipper ZZ3257M3447W (H7/290/K34/6x4W) LHD
Engine: CNHTC brand WD615.87, 290hp, Euro II emission; 6 cylinder inline, turbo charger inter cooled, 2 valves, postposition supercharger
Transmission: 10 speeds (HW15710);
Steering: ZF8098 hydraulic steering with power assistance
Front axle: HF9 drum, rated loading 9T
Rear axle:HC16 double reduction driving axle
Cab: HW75 length cab, with air conditioner, with 1 sleeper; safe-belt with2 locks
Rim/Tyres: 11.00-20 Bias tyre
Brake: without ABS system
Carriage Internal Dimensions: 5200x2300x1200mm;
Wheelbase(front/rear),2022/1850mm
Steel thickness of Carriage: Floor: 8mm, Side: 6mm
Max speed: 75 km/h
Hydraulic Lift of Carriage:T model (middle lift)
English panel: Color: howo red
Whole truck dimensions: 7815mmx2496mmx3170mm=62.00M3;
Dead weight:12380kgs, Gross vehicle weight 25000kgs
Fuel type: diesel
Fuel Tank: 400L;

Anexo 1 Camión tipo Volquete con Ficha Técnica. Fuente: http://shanglong.en.alibaba.com/product/1803904410-214215099/SINOTRUK_ZZ3257M3447A_Truck_Howo_6x4_Dump_Truck_Left_Hand_Drive.html (octubre de 2014)

TAIDA brand zl16 wheel loader specification

brand	TAIDA
model	zl16
rated load	1500kg
rated bucket capacity	0.65cbm
total weight	3300kg
engine model	XINCHAI A498BP1 (CUMMINS B3.3)
rated power	36.8kw (45kw)
max dumping height	3285mm
max dumping reach	880mm
overall dimension(LxWxH)	4850x1700x2600 mm
rated voltage	24v
rated working pressure	16mpa
high speed	21.5km/h
low speed	8.5km/h
tire model	14-17.5
drive axle	hub reduction axle

Anexo 2 Remolcador Forestal Taiwa con Ficha Técnica. Fuente: http://www.alibaba.com/product-detail/timber-grapple-log-clamp-wheel-loader (octubre de 2014)

Condition:	New	Place of Origin:	Shandong China (Mainland)	Brand Name:	Titan
Model Number:	JTH0.5-2	Type:	Manual Pallet Truck	Power Souce:	handle
Rated Loading Capacity:	500-2000kgs	Max. Lifting Height:	1600mm	Min. Lifting Height:	<90mm
Fork Length:	800-1120mm	Fork Width:	500-750mm	Overall Dimensions:	1550-1635X600-770X1960-2010...
Weight:	200-320kgs				

Anexo 3 Cargadores Hidráulicos con Ficha Técnica. Fuente: http://www.alibaba.com/product-detail/manual-hydraulic-loaders-forklifts_349319395.html?s=p (octubre de 2014)

ECL Europe Caribbean Line — South Caribbean Service

		WESTBOUND								EASTBOUND	
Vessel	Voy. #	Antwerp	Ipswich	Dublin	Georgetown	Paramaribo	Point Lisas	La Guaira	Maracaibo / Puerto Cabello	Paramaribo	Rotterdam
[illegible]	[illegible]	[illegible]	17/Aug		8/Sep	10/Sep	11/Sep				
[illegible]	[illegible]	[illegible]	4/Sep	12/Sep	25/Sep	8-Oct	10/Sep	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	5/Oct	[illegible]		22/Oct	24/Oct	28/Oct	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	29/Oct	11/Dec		15/Nov	17/Nov	21/Nov		21/Nov	4/Dec	13/Dec
[illegible]	[illegible]	3/Dec	[illegible]		18/Dec	20/Dec	24/Dec		[illegible]	6/Jan	21/Jan

Delivery address: Antwerp
ABES Terminal
Quay 361 -rolling Q 347
Antwerp, BE

Delivery address: Ipswich
A.B.P.
Cliff Quay, Shed 3 (Carib Term)
Ipswich, Suffolk, UK.

Delivery address: Georgetown
Demerara Shipping
8-12 Water & Shumaker Str
Georgetown, Guyana

Delivery address: Paramaribo
Integra Marine
Nieuwe Haven Complex
Parmaribo, Suriname

Delivery address: Point Lisas
United Shipping Agencies Ltd.
C/o Plipdeco, Orinoco Drive
Point Lisas, Trinidad

Anexo 4 Itinerarios de navíos en rutas al sur del caribe. Fuente: www.vertraco.nl (octubre de 2014)

Marca	Modelo	Desplazamiento (cc)	Potencia (hp)	capacidad de combustible (L)
Stihl	362	50	4.4	0.6
	362	50	4.4	0.6
Husqvarna	353XP	56.5	4.4	0.68
	545XPG	50.1	3.7	0.5
	554XP	50.1	3.75	0.52

1 operario con motosierra

cantidad de árboles a cortar(anual)	tiempo de operación por arbol (hora)	horas laborables (hora)	días laborables(hora)	cantidad de motosierras requeridas
6478	0.333333333	8	220	[illegible]

Normativa EPA para motores de motosierras

Tipo de Motor	HC	CO	NO_x	PM	BSFC
	(g/hp-h)	(g/hp-h)	(g/hp-h)	(g/hp-h)	(lb/hp-h)
Clase III (<20 cc)	26.87	141.69	1.49	7.7	0.822
Clase IV (≥20 cc y < 50 cc)	26.87	141.69	1.49	7.7	0.822
Clase V (≥50 cc)	47.98	283.37	0.91	7.7	0.808

Calculo de emisiones generadas por motosierra utilizada

cantidad de motosierras	Clase (III, IV o V)	CO_2 generado (ton/año)
2.0	V	[illegible]

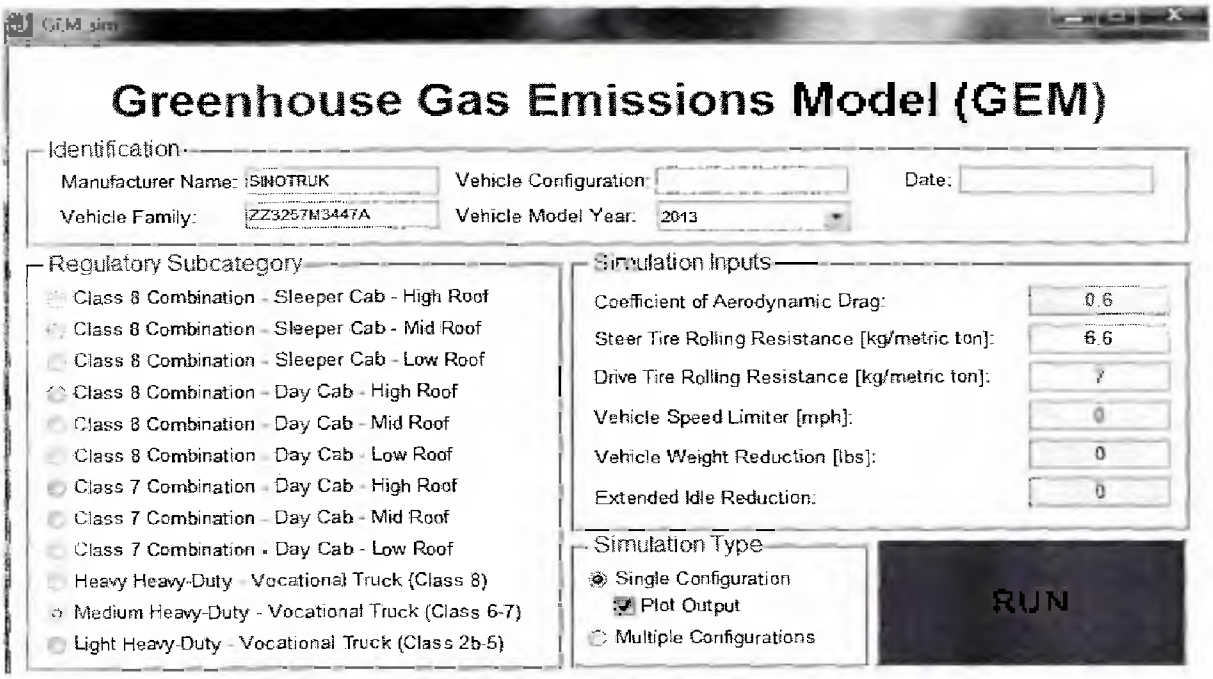
Anexo 5. Calculadora en Excel para determinar emisiones de CO2 en toneladas anuales por la utilización de motosierras en un periodo de tiempo determinado. La calculadora contempla las normas EPA fase II. Fuente: Propia

CALCULADORA PARA CALCULO DE MATERIA PRIMA ENTRANTE EN TODO EL SISTEMA (ING. INVERSA)

CALCULOS SON POR ARBOL

PERDIDA POR TAMIZADO (% EN PESO)	DBH (cm)	PESO DESEADO PRODUCTO FINAL(KG)	M.C.%
2%	80	10000000	0.08
PERDIDA POR PELLETIZACION (POR M.C.%)		PESO ANTES DEL TAMIZADO (KG)	0.08
3%		10200000	
PERDIDA POR SECADO (POR M.C.%)		PESO ANTES DE PELLETIZACION	0.11
39%		10506000	
	PORCENTAJES		
PERDIDA POR DESCORTEZADORA (kg)		PESO ANTES DE SECADO	0.5
262.69457	8.42%	16812000	
PERDIDA POR DESRAME (kg) INCLUYE HOJAS, RAMAS VIVAS Y RAMAS MUERTAS		PESO ANTES DE DESCORTEZADO	0.5
863.84679	27.68%	15932177.51	
PESO DEL TRONCO		PESO ANTES DE DESRAMADO	
1994.1973	63.90%	20215087.05	
PESO TOTAL DEL ARBOL (KG)		CANTIDAD DE ARBOLES PARA CUMPLIR PRODUCCION (UNIDADES)	
3120.7086	100.00%	6478	

Anexo 6. Calculadora en Excel para determinar el peso del árbol y sus componentes utilizando las ecuaciones de Gholz et al. (1979) para pino ponderosa. Los cálculos continúan con la ingeniería inversa del proceso para obtener la cantidad de árboles necesarios para obtener la cantidad de pellets deseados. Fuente: propia



Anexo7. Software perteneciente a la Enviorемental Protection Agency en base a Matlab. Permite el cálculo de emisión de CO2 para el camión en cuestión. Fuente: www.epa.gov(septiembre de 2014)

Manufacturer Name	SINOTRUK						
Model Year	2013						
Vehicle Family Name	ZZ3257M3447A				Passed through from input matrix		
Regulatory Subcategory	Medium Heavy-Duty - Vocational Truck (Class 6-7)				GEM Inputs (from input matrix)		
Date/Time of Run	01-Oct-2014/07:16:28pm				GEM Outputs		
Input File Name	N/A				User Input following GEM run		
		Aerodynamics					
Configuration	Brand/Model Name	Bin	CdA (Test)	Cd (Bin)			
1	N/A	N/A	N/A	0.6			
Steer Tires	Drive Tires						
CRR	CRR	Idle Reduction	Weight Reduction	VSL			
6.6	7	0	0	0			
Results		FEL		Subfamily			
g CO2/ton-mile	gal/1000 ton-mile	g CO2/ton-mile	gal/1000 ton-mile	Subfamily Name	Subfamily FEL		Subfamily Volume
229.2231201	22.51700591	229	22.5				

Anexo 8. Resultados emitidos por el programa presentado en el anexo 7 para el camión en cuestión. Fuente: www.epa.gov (Septiembre de 2014)

Anexo9. Ruta Puerto Palúa – Antwerp. Calculado con la herramienta electrónica Google Maps Distance Calculator Fuente:http://www.daftlogic.com/projects-google-maps-distance-calculator.htm (Septiembre de 2014)

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
LABORATORY FOR MARITIME TRANSPORT

Ship Emissions Calculator

VESSEL DETAILS

SELECT SHIP TYPE: Enter your own details — SELECT SHIP SIZE: — Medium Speed Engine

ROUTE: Paranaiba-Antwerp — TRIP DISTANCE: 4184 nm — 7766 km

PAYLOAD (tonnes): 2891 — DWT (tonnes):

OPERATIONAL DETAILS

STATE	TIME (days)	SPEED (knots)	FUEL OIL S %	FUEL OIL Consumption (tonnes/day)	DIESEL OIL S %	DIESEL OIL Consumption (tonnes/day)
SEA LADEN	12.73	13.70	3.5	6.00	0.50	11.90
SEA BALLAST	12.73	13.70	3.5	0.50	0.50	11.90
PORT (loading,discharging)	4		3.5	0.00	0.50	1.80

EMISSIONS

	CO2	SO2	NOx
ROUNDTRIP EMISSIONS KG PER tonne TRANSPORTED	339.98	1.07	6.11
ROUNDTRIP EMISSIONS GRAMS PER LADEN tonne-MILE	81.26	0.26	1.46
ROUNDTRIP EMISSIONS GRAMS PER LADEN tonne-KM	43.78	0.14	0.79

SHOW/HIDE DETAILED RESULTS — CALCULATE — HELP — ABOUT

Anexo 10. Cálculos generados a partir de Software creado por la National Technical University of Athens. Se presentan las emisiones por parte de un transporte que cumple con las características del Beautrader y Beautriumph, distancia a recorrer, carga autorizada, velocidad crucero y cantidad de sulfuro en su combustible. Fuente: http://www.martrans.org/emis/ (Septiembre de 2014)

DETAILED RESULTS

TOTAL BALLAST-LADEN DISTANCE		nm	8,368.00			
LADEN tonne-MILES		tonne*nm	12,095,944.00			
TIME IN PORT		days	4.00			
TRIP DURATION	SEA-LADEN	days	12.73	**EMISSIONS**		
TRIP DURATION	SEA-BALLAST	days	12.73	**CO2**	**SO2**	**NOx**
TOTAL RTRIP DURATION		days	29.45	tonnes	tonnes	tonnes
CONSUMPTION FO	SEA LADEN	tonnes	0.00	0.00	0.00	0.00
CONSUMPTION DO		tonnes	151.43	480.03	1.51	8.63
CONSUMPTION FO	SEA BALLAST	tonnes	0.00	0.00	0.00	0.00
CONSUMPTION DO		tonnes	151.43	480.03	1.51	8.63
CONSUMPTION FO	PORT	tonnes	0.00	0.00	0.00	0.00
CONSUMPTION DO		tonnes	7.20	22.82	0.07	0.41
TOTAL FUEL CONSUMPTION	SEA	tonnes	302.86	960.05	3.03	17.26
TOTAL FUEL CONSUMPTION	PORT	tonnes	7.20	22.82	0.07	0.41
TOTAL FUEL CONSUMPTION	PER RTRIP	tonnes	310.06	982.88	3.10	17.67

Anexo 11. Información detallada generada por el programa creado por la National Technical University of Athens para el cálculo de emisiones de barcos. Se especifican los días de transporte, tiempo en el puerto, consumo de combustible y sus respectivas emisiones. Fuente: http://www.martrans.org/emis/ (Septiembre de 2014).

Model Type	Heavy Heavy-Duty	Medium Heavy-Duty	Light Heavy-Duty
Regulatory Subcategory	Vocational Truck (Class 8)	Vocational Truck (Class 6-7)	Vocational Truck (Class 2b-5)
Fuel Map	15L - 455 HP	7L - 270 HP	7L - 200 HP
Gearbox	10-speed Manual	6-speed Manual	6-speed Manual
Gearbox Ratio	14.8, 10.95, 8.09, 5.97, 4.46, 3.32, 2.45, 1.81, 1.35, 1	9.01, 5.27, 3.22, 2.04, 1.36, 1	9.01, 5.27, 3.22, 2.04, 1.36, 1
Gearbox Efficiency	0.96, 0.96, 0.96, 0.96, 0.98, 0.98, 0.98, 0.98, 0.98, 0.98	0.92, 0.92, 0.93, 0.95, 0.95, 0.95	0.92, 0.92, 0.93, 0.95, 0.95, 0.95
Engine Inertia (kg-m^2)	4.17	2.79	2.79
Transmission Inertia (kg-m^2)	5	0.5	0.5
All Axle Inertia (kg-m^2)	200	60	60
Loaded Tire Radius (m)	0.489	0.389	0.378
Payload (lbs)	15,000	11,200	5,700
Total weight (lbs)	42,000	25,150	16,000
Total weight (kg)	19,051	11,408	7,257
Frontal Area (m^2)	9.8	9.0	9.0
Coefficient of Aerodynamic Drag	0.7	0.6	0.6
Axle Base	3	2	2
Electrical Accessory Power (W)	350	300	300
Mechanical Accessory Power (W)	1,000	1,000	1,000
Final Drive Ratio	2.64	3.36	2.85
Tire CRR (kg/ton)	= 0.5 × Drive CRR + 0.5 × Steer CRR		
Trailer Tire CRR (kg/metric ton)	Not applicable	Not applicable	Not applicable
Steer Tire CRR (kg/metric ton)	OEM Input	OEM Input	OEM Input
Drive Tire CRR (kg/metric ton)	OEM Input	OEM Input	OEM Input

Anexo 12. Tabla.3 del documento "Greenhouse Gas Emissions Model (GEM) User Guide" en donde se comprenden las especificaciones del camión en cuestión y el motivo de la selección de la opción "Medium Heavy-Duty" en el software. Fuente: www.epa.gov (septiembre de 2014)

Specification:		
	Axle number	2 - 4
	Axle Brand	Fuwa/BPW/Optional
	Suspension	Common mechanical Or Air suspension
	King Pin	JOST 2" or 3.5" traction pin
	Dimensions (LxWxH)	12400-18000×2500-3200×1500-1550mm
	Support legs	28T
	Wheel Rim	8.5-20, 9.0-20, 9.0-22.5 steel wheel rim
	Wheelbase	7180/6680/6260+1310+1310mm
	Steel Spring	10 pieces
	Twist lock	12 sets of ISO twist lock for 1*20ft,2*20ft,1*40ft container
	Landing Gear	Manual operating, Heavy duty landing gear (JOST Brand Optional)
	Floor	3-5 Diamond steel plate
	Accessories	1 Set standard tool box
	Light	Tail lamp with turn signal, brake light & reflector, side lamp etc.
	Painting	1 coat of anticorrosive prime, twice coats of final paint
Tire:	Tire spe.	12R22.5 Vacuum tire/11.00R20
	Number of Tire	8 or 12 or 16 pieces
	Spare Tire Carriers	2 pieces
Frame:		
	Main beam	The height of the beam is 500-550mm;Upper plate 14-18mm Down plate is 16-20mm,Middle plate is 8-12mm

Anexo 13 Especificaciones técnicas de tara para ruta Uverito-Planta. Fuente: http://www.alibaba.com/product-detail/20ft-and-40ft-New-3-axle_60033296377.html (Octubre 2014)

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Arnáez, Benavides, & Toro. (2011). *Situación actual de las Plantaciones de Pino Caribe al Sur del Estado Monagas.* Maturín.

Barel, C. (2009). *Development and promotion of a transparent European Pelllet Market Creation of a European real time Pellet Atlas.* París: ADEME.

Birdsey, R. (1992). *Carbon Storage and Accumulation in the United States Forest Ecosystems, General Technical Report W0-59.* Radnor, PA: United States Department of Agriculture Forest Service.

Chartis Inc. (2009). *Biofuels Glossary of Terms.* Chartis Inc.

Clark, A., Saucier, J., & Mcnab, H. (1986). *Total tree weight, stem weight, and volume tables for hardwood species in the southeast.* Georgia: Georgia Forestry Comission.

CVG Proforca. (01 de Septiembre de 2014). *CVG.* Obtenido de http://www.cvg.gob.ve/espanol/cvgproforca.html

De Santis, D., & Ochoa , B. (2014). *Diseño Conceptual de un Sistema de Distribucion para la Manufactura y Comercialización de Pellas a base de Biomasa Forestal en Venezuela.* Caracas.

Delgado, B., & Díaz, O. (2014). *Diseño de la Ingeniería Básica de una Planta Productora de Pellets Elaborados a Partir de Biomasa Forestal.*

Department of Forestry and Environmental Science University of Sri Jayewardenepura Nugegoda. (2011). *Estimation of Above Ground Tree Biomass and Carbon of Pinus caribaea (Morelet).* Sri Lanka: Journal of Tropical Forestry and Environment .

DeWald, S., Josiah, S., & Erdkamp, B. (2005). *Heating with wood: Producing, Harvesting and Processing Firewood.* Nebraska: University of Nebraska.

Enviroment Protection Agency. (2007). *Exhaust Emission Factors for Nonroad Engine Modeling.*

Enviroment Protection Agency. (2010). *Forest Carbon Storage.* EPA studies.

Galezia, T. (s.f.). *Analysis of the duration of basic logging operation performed usinf a chainsaw.*

Gholz. (1978). *Equations for Predicting Tree Biomass (in Kilograms) of Pacific Northwest Species.*

Langdon, D. (2014). *Spon'n Civil Engineering and Highway Works Price.*

McConnell, E., & Irby, N. (2013). *Forest Products Terminology.* Ohio: The Ohio State University.

Meier, E. (22 de 09 de 2014). *The Wood Database.* Obtenido de http://www.wood-database.com/lumber-identification/softwoods/caribbean-pine/

Myers, N., & Goreu, T. (1991). *Tropical Forests and the Green House Effect: A Managment Response.* Discovery Bay: University of West Indies.

National Highway traffic safety Administration . (2009). *Tire Fuel Efficiency Consumer Information Program Development: Phase 2 - Effects of Tire Rolling Resistance Levels on Traction, Treadwear and Vehicle Fuel Economy* . Springfield: NHTSA.

Pirraglia, A., Velarde, G., & Saloni, D. (2013). *Wood as a Material, Density and Moisture Content.* Raleigh: North Carolina State University.

Saloni, D., & Guillermo, V. (2013). *Research Experience in Energy, Enviorement and Engineering.* Raleigh: North Carolina State University.

U.S Climate Registry Organization. (2014). *U.S Defaulti Factors for Calculating CO2 Emissions form Fossil Fuel and Biomass Combustion.*

U.S Department of Agriculture. (2007). *The encyclopedia of Wood.* Skyhorse Publishing.

Virginia Tech Forestry. (10 de julio de 2014). *Virginia Tech Forestry.* Obtenido de Harvesting Systems, Machinary and Equipment: http://web1.cnre.vt.edu/harvestingsystems/MachineryandEquipment.htm

Washington State University. (2012). *Densified Biomass Industry in Washington State: Opportunities and Challenge.* Washington: Washington State University Extension Energy Program.

Wiley, J. (1984). *Forestry Handbook.* United States: Karl F. Wenger.