

Evaluación preliminar de un sistema en columna con biocarbón para captura de dióxido de carbono

Diego Fernando García Rico

Trabajo de grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Walter Pardavé Livia

MSc. en Ingeniería - Ingeniería ambiental

Codirector

Pedro Luis Delvasto Angarita

PhD. Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia De Materiales

Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

A mis padres, Luis Carlos Garcia Espinosa y Yolanda Rico Díaz por toda la educación, confianza, amor, esfuerzo y apoyo incondicional que durante toda la vida han depositado en mí, este gran logro es por y para ellos, así como todos los que vendrán.

A mis Hermanos, Carlos Mauricio, Daniel Leonardo y Yoly Fernanda, quienes a su manera me han sabido mostrar su cariño y respeto, les agradezco su buena compañía. Espero siempre ser un apoyo para ellos.

A mi sobrina, Annie Sofia Garcia Chaparro, “mi verraquito”, desde que nació se convirtió en fuente de mi inspiración para diversas actividades que he realizado. Y a mis abuelas y demás familiares por sus buenos deseos y consejos llenos de sabiduría.

A el año 2016 por darme la oportunidad de ingresar a ingeniería metalúrgica y permitirme coincidir con dos personas maravillosas, quienes serán grandes amigos para toda la vida, Sebastián (el perriqui) y Aleja (la famosa pelicortica), juntos formamos nuestro grupo “no es al azar”. Año en el que también conocí a la Tania, con quien he compartido muy buenos momentos, especialmente en los últimos semestres.

A mis amigos de carrera, Silvia, Pao, Julieth, Gabi, Julián (nos alegraba los días con sus ocurrencias) y especialmente al Bayron, quienes han sido muy buenas personas y estuvieron dispuestos a brindarme su ayuda y compañía, siempre estaré agradecido por conocerlos.

Al niño de Aratoca, que soñaba con ser ingeniero Uis y lo está haciendo realidad.

“Por los sueños se suspira, por las metas se trabaja”- Humberto Ramos

### **Agradecimientos**

A mi amada y respetada Universidad industrial de Santander por hacer parte de mi formación como profesional y hacerme miembro de esta importante institución.

A los docentes Walter Pardavé Livia y Pedro Luis Delvasto Angarita por su confianza y apoyo en este proyecto de investigación, con el fin de obtener resultados que puedan aportar en la lucha por la captura de dióxido de carbono.

A los docentes de la escuela de ingeniería metalúrgica por poner todo su conocimiento al servicio de los estudiantes y contribuir al crecimiento de nuestra escuela.

A los técnicos de la escuela de ingeniería metalúrgica por su disposición y entrega en los laboratorios, permitiendo que el estudiantado tenga una mejor experiencia en sus prácticas.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos .....	13
1.1 Objetivo General .....	13
1.2 Objetivos específicos .....	13
2. Fundamentación teórica .....	14
2.1 Biocarbón .....	14
2.2 Material adsorbente .....	14
2.3 Naturaleza química del adsorbato ( <b>CO<sub>2</sub></b> ) .....	15
2.4 Descarbonización y captura de <b>CO<sub>2</sub></b> .....	15
2.4.1 Proceso de captura con carbonatación .....	15
2.4.2 Otras técnicas de separación de <b>CO<sub>2</sub></b> .....	16
2.5 Acuerdo de París .....	16
2.6 Antecedentes de captura de <b>CO<sub>2</sub></b> con biocarbón. ....	17
2.7 Economía circular .....	18
3. Diseño y Metodología .....	18
4. Resultados y Análisis .....	21
4.1 Análisis Físicoquímico del biocarbón .....	21
4.2 Densidad aparente del pellet .....	23
4.3 Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS) .....	24
4.4 Microscopia con Estereomicroscopio .....	25

4.5 Diseño de la columna de vidrio .....	26
4.6 Diseño del sistema de calcinación y captura de <b>CO<sub>2</sub></b> .....	27
4.7 Calcinación del carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> ).....	29
4.8 Composición de pellets formados.....	30
4.9 Adsorción de <b>CO<sub>2</sub></b> .....	32
5. Conclusiones.....	37
6. Recomendaciones .....	38
Referencias Bibliográficas .....	40
Apéndices.....	42

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Análisis fisicoquímico del biocarbón .....	22
Tabla 2. Densidad aparente del pellet .....	23
Tabla 3. Análisis elemental del Biocarbón .....	25
Tabla 4. Dimensiones de la columna de vidrio .....	27
Tabla 5. Especificación de las piezas del diseño general del experimento.....	29
Tabla 6. Datos de calcinación del carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> ) .....	29
Tabla 7. Composición y parámetros de pellets formados .....	31
Tabla 8. Datos de adsorción de CO <sub>2</sub> con pellets tipo 1 .....	34
Tabla 9. Datos de adsorción de CO <sub>2</sub> con pellets tipo 2 .....	35

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema de un ciclo de captura de CO <sub>2</sub> por carbonatación. ....	16
Figura 2. Proceso experimental en forma de diagrama.....	20
Figura 3. Diseño experimental etapa 1 .....	20
Figura 4. Diseño experimental etapa 2 .....	21
Figura 5. Imagen SEM del biocarbón a 100 µm y espectro de rayos X .....	24
Figura 6. Imagen de pellets iniciales y finales con un Estereomicroscopio a 100 µm .....	25
Figura 7. Columna Vacía y con pellets .....	26
Figura 8. Diseño general del experimento realizado .....	28
Figura 9. Vista oblicua y frontal .....	28
Figura 10. Piedra caliza calcinada .....	30
Figura 11. Pellets formados en la peletizadora .....	32
Figura 12. Concentración de CO <sub>2</sub> [ppm] en función del tiempo [min] con pellets tipo 1 .....	35
Figura 13. Concentración de CO <sub>2</sub> [ppm] en función del tiempo [min] con pellets tipo 2 .....	36
Figura 14. Medidor de CO <sub>2</sub> .....	36

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Definiciones, fórmulas y procedimientos matemáticos utilizados para el análisis físicoquímico del biocarbón.....	42
Apéndice B. Fotografía del picnómetro.....	46
Apéndice C. Fotografías de la columna de vidrio.....	47
Apéndice D. Fotografías del diseño experimental.....	48
Apéndice E. Espectros de piedra caliza sin calcinar y luego de la calcinación por FTIR. ....	50
Apéndice F. Cálculos matemáticos.....	52

## Glosario

**Adsorción:** Es un fenómeno físico, en donde un compuesto en fase líquida o gaseosa entra en contacto con un sólido adsorbente y se adhiere a la superficie del mismo, mediante una fuerza física (fuerza de dispersión de London), este proceso no implica intercambio de electrones, lo que lo hace reversible.

**Calcinación:** Es el proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, (temperatura de descomposición), para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química.

**Carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>):** Es un mineral que está presente en la naturaleza de muy diversas formas. Se encuentra como parte de distintos minerales y rocas, pero también como parte periférica de distintos organismos vivos.

**Economía circular:** Es un modelo de producción sostenible, en donde las materias primas se mantienen en ciclos productivos de manera que puedan aprovecharse al máximo, generando así menos residuos.

**Pellets:** Se utiliza para describir una variedad de aglomerados definidos geométricamente, especialmente esféricos, producidos sistemáticamente, obtenidos a partir de diversos materiales.

**Pirólisis:** Es una degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno, por lo que dichas sustancias se descomponen mediante calor, sin que se produzcan las reacciones de combustión.

## Resumen

**Título:** Evaluación Preliminar de un sistema en columna con biocarbón para captura de dióxido de carbono\*.

**Autor:** Diego Fernando Garcia Rico \*\*

**Palabras Clave:** Adsorción, biocarbón, economía circular, pellets, carbonato de calcio, pirólisis.

**Descripción:**

El mayor impulsor del calentamiento global es el CO<sub>2</sub> y está ligado fundamentalmente a la quema de combustibles fósiles y la industria del cemento con calcinación de piedra caliza, la cual se encuentra en constante crecimiento. Por ende, a mayor concentración de CO<sub>2</sub>, más calor se queda atrapado dentro de la atmósfera terrestre. En este proyecto se realiza el diseño y la evaluación de un sistema en columna para captura de dióxido de carbono. En el cual, se usa biocarbón (carbón vegetal de eucalipto) en forma de pellets como material adsorbente y CO<sub>2</sub> como adsorbato. La producción de CO<sub>2</sub> se hace mediante calcinación de carbonato de calcio CaCO<sub>3</sub> dentro de un reactor de acero galvanizado y tuberías de cobre, este reactor se diseña con el fin de contrarrestar las pérdidas de gas en el horno tipo mufla.

Las pruebas de adsorción de CO<sub>2</sub> mostraron que en los pellets con la composición tipo 1 se logra una adsorción de CO<sub>2</sub> de 14.4575 g CO<sub>2</sub>/kg de pellets y la adsorción de CO<sub>2</sub> en los pellets tipo 2 es de 13.767 g CO<sub>2</sub>/kg de pellets.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Ingeniería Metalúrgica. Director: Walter Pardavé Livia. MSc. Codirector: Pedro Luis Delvasto Angarita. PhD

### Abstract

**Title:** Preliminary evaluation of a biochar column system for carbon dioxide sequestration\*.

**Author:** Diego Fernando Garcia Rico\*\*

**Key Words:** Adsorption, biochar, circular economy, pellets, calcium carbonate, pyrolysis.

**Description:**

The biggest driver of global warming is CO<sub>2</sub>, and it is primarily linked to the burning of fossil fuels and the ever-growing limestone calcination cement industry. Therefore, the higher the concentration of CO<sub>2</sub>, the more heat is trapped within the earth's atmosphere. In this project, the design and evaluation of a column system for carbon dioxide capture is carried out. In this system, biochar (eucalyptus charcoal) in pellet form is used as adsorbent material and CO<sub>2</sub> as adsorbate. CO<sub>2</sub> production is done by calcination of calcium carbonate CaCO<sub>3</sub> inside a galvanized steel reactor and copper pipes, this reactor is designed to counteract gas losses in the muffle type furnace.

CO<sub>2</sub> adsorption tests showed that CO<sub>2</sub> adsorption of 14.4575 g CO<sub>2</sub> /kg pellets is achieved in pellets with type 1 composition and CO<sub>2</sub> adsorption in type 2 pellets is 13.767 g CO<sub>2</sub> /kg pellets.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Ingeniería Metalúrgica. Director: Walter Pardavé Livia. MSc. Codirector: Pedro Luis Delvasto Angarita. PhD

## Introducción

Nos encontramos en un momento decisivo para afrontar con éxito el mayor desafío de nuestro tiempo: el cambio climático. Cada día, en diferentes partes de la geografía mundial, el planeta nos envía mensajes acerca de las enormes transformaciones que está sufriendo, desde sus cambiantes pautas meteorológicas que amenazan la producción de alimentos, hasta el aumento del nivel del mar que incrementa el riesgo de inundaciones catastróficas.

Los gases de efecto invernadero (GEI) principalmente el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y el metano (CH<sub>4</sub>), se producen de manera natural y son esenciales para la supervivencia de los seres humanos y de millones de otros seres vivos, ya que, al impedir que parte del calor del sol se propague hacia el espacio, hacen la Tierra habitable. Debido a la acción del hombre, como la deforestación, agricultura a gran escala, a sus sistemas de producción y de consumo de energía a partir de la revolución industrial, la concentración de esos gases en la atmósfera está creciendo de forma constante. El mayor impulsor del calentamiento global es el CO<sub>2</sub> y está ligado fundamentalmente a la quema de combustibles fósiles y la industria del cemento con calcinación de piedra caliza, la cual se encuentra en constante crecimiento. Por ende, a mayor concentración de CO<sub>2</sub>, más calor se queda atrapado dentro de la atmósfera terrestre. Es esencial abordar el cambio climático como parte de la agenda de desarrollo sostenible, para ello se hace necesario la implementación de nuevas tecnologías basadas en energías renovables, tales como energías geotérmicas, solares, eólicas, entre otras, así como la fabricación de nuevos materiales que tengan la capacidad de adsorber dióxido de carbono. Todo esto con el fin de minimizar las emisiones de CO<sub>2</sub>, cumplir con las necesidades energéticas y servicios que cada año es mayor

debido al crecimiento de la población mundial, garantizando el desarrollo económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar de la sociedad. Los efectos del cambio climático nos afectan a todos, si no se toman medidas drásticas desde ya, será mucho más difícil y costoso adaptarse a sus efectos en el futuro. Bajo la anterior premisa, se establece y es desarrollado la evaluación preliminar de un sistema en columna con biocarbón para captura de dióxido de carbono.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar un sistema en columna con biocarbón para captura del dióxido de carbono generado por calcinación de piedra caliza.

### **1.2 Objetivos específicos**

Caracterizar fisicoquímicamente una muestra de biocarbón como material adsorbente.

Diseñar y construir a escala de laboratorio un sistema en columna con biocarbón para la adsorción del dióxido de carbono generado por calcinación de piedra caliza.

Medir con un dispositivo electrónico la capacidad de captura de CO<sub>2</sub> del sistema en columna.

## **2. Fundamentación teórica**

### **2.1 Biocarbón**

El biocarbón es el producto de la descomposición térmica de materiales orgánicos (biomasa) con escaso o limitado suministro de oxígeno (pirólisis), a temperaturas relativamente bajas (inferiores a los 700 °C). Algunos autores consideran que la composición química de los biocarbones es muy similar al carbón producido para combustible y que lo único que los distingue es el objetivo para el cual fueron preparados (Schahczenski, 2010).

Con respecto a las características físicas-químicas, el biocarbón es un sólido carbonoso, de color negro, con una superficie intrincada y desordenada, cuyas características estructurales varían por el tipo y tiempo de la pirólisis. Posee una alta porosidad con micro, meso y macroporos, cuyos tamaños van de <2 nm, 2-50 nm y >50 nm, respectivamente. Los microporos generados en el proceso de pirólisis, al aumentar la temperatura aumenta la microporosidad, generando más área de carga reactiva. Los microporos están asociados a la adsorción de compuestos líquidos, sólidos y de gases. El biocarbón presenta generalmente baja densidad aparente y alta área superficial.

### **2.2 Material adsorbente**

Dentro de las características fundamentales que distinguen a un buen adsorbente están su alta porosidad, su gran superficie de contacto y que presente sitios específicos de adsorción. La mayoría de los adsorbentes que se han utilizado en el control de la contaminación tienen estructura

porosa, lo que aumenta el área superficial y, en consecuencia, la velocidad de adsorción. Un buen adsorbente será aquel que presente área superficial suficientemente grande y que requiera menor tiempo para alcanzar el equilibrio de adsorción, por lo que generalmente se prefieren para la eliminación de contaminantes adsorbentes con gran área superficial y alta velocidad de adsorción.

### **2.3 Naturaleza química del adsorbato (CO<sub>2</sub>)**

Los factores que favorecen o afectan la adsorción del adsorbato son: su tamaño (volumen, masa o peso molecular), los grupos funcionales presentes en su estructura química, la solubilidad, la relación hidrofobicidad / hidrofiliidad, la afinidad relativa entre la solución y el adsorbente, su reactividad y, en el caso de los contaminantes orgánicos, la constante de disociación también afecta a la adsorción.

### **2.4 Descarbonización y captura de CO<sub>2</sub>**

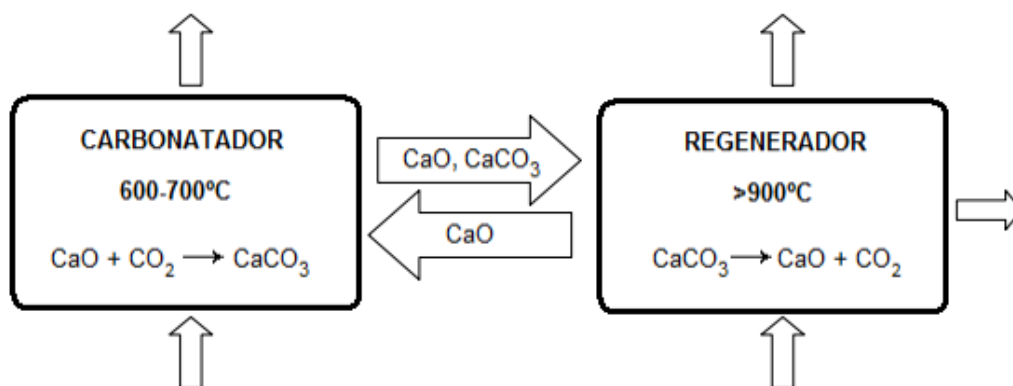
#### ***2.4.1 Proceso de captura con carbonatación***

El proceso de captura de CO<sub>2</sub> mediante carbonatación comienza con la calcinación de caliza para producir óxido de calcio y CO<sub>2</sub>. A continuación, se lleva el óxido de calcio que reacciona con el CO<sub>2</sub> presente en los gases de combustión para formar de nuevo CaCO<sub>3</sub>. Este ciclo se repite indefinidamente, pudiendo concentrar el CO<sub>2</sub> en la corriente proveniente del proceso de calcinación y almacenarse posteriormente (Figura 1). La calcinación es una reacción endotérmica,

que necesita de altas temperaturas (en torno a los 900°C) para que pueda producirse, mientras que la carbonatación es exotérmica, que se lleva a cabo de 600-700°C para favorecer la cinética.

### Figura 1.

*Esquema de un ciclo de captura de CO<sub>2</sub> por carbonatación.*



#### 2.4.2 Otras técnicas de separación de CO<sub>2</sub>

Además de los ciclos de carbonatación – calcinación, existen diversas técnicas que pueden ser utilizadas en procesos de captura de CO<sub>2</sub>, ya sea en post-combustión, pre-combustión u oxicomcombustión. Las técnicas más importantes son: Absorción química con aminas o amoníaco, procesos de absorción física y procesos de adsorción física.

### 2.5 Acuerdo de París

El Acuerdo de París es un tratado internacional sobre el cambio climático jurídicamente vinculante. Fue adoptado por 196 Partes en la COP21 en 4 París, el 12 de diciembre de 2015 y

entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. Su objetivo es limitar el calentamiento mundial a muy por debajo de 2,0 preferiblemente a 1,5 grados centígrados, en comparación con los niveles preindustriales. Para alcanzar este objetivo de temperatura a largo plazo, los países se proponen lograr un planeta con clima neutro para mediados de siglo. El Acuerdo de París es un hito en el proceso multilateral del cambio climático porque, por primera vez, un acuerdo vinculante hace que todos los países se unan en una causa común para emprender esfuerzos ambiciosos para combatir el cambio climático y adaptarse a sus efectos (Naciones Unidas, 2015). El tratado funciona en un ciclo de cinco años de medidas climáticas cada vez más ambiciosas llevadas a cabo por los países. En 2020, los países presentaron sus planes de acción climática conocidos como contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés). Allí los países comunican las medidas que tomarán para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero con el fin de alcanzar los objetivos del Acuerdo de París. Asimismo, los países comunican en dichas contribuciones las acciones que tomarán para crear resiliencia y adaptarse a los efectos del aumento de las temperaturas (Naciones Unidas, 2015).

## **2.6 Antecedentes de captura de CO<sub>2</sub> con biocarbón.**

La mayoría de los trabajos desarrollados sobre biocarbón (biochar) en el mundo presentan los beneficios del uso de este dentro de una visión de manejo agronómico enfocado a la productividad de los agrosistemas. El biocarbón se propone como mejorador de las propiedades físicas (porosidad, infiltración de agua, estructura, entre otros), también como material de encalado ya que muchos biocarbones tienen valores de pH altos. Tiene potencial en la captura de carbono

en el suelo, sobre todo de suelos degradados que han perdido la materia orgánica que es básica en la fertilidad física del suelo.

## **2.7 Economía circular**

Una economía circular es reconstituyente y regenerativa por diseño, y se propone mantener siempre los productos, componentes y materiales en sus niveles de uso más altos. El concepto distingue entre ciclos biológicos y ciclos técnicos. Tal como fue previsto por sus creadores, una economía circular es un ciclo de desarrollo continuo positivo que preserva y aumenta el capital natural, optimiza los rendimientos de los recursos y minimiza los riesgos del sistema, gestionando stocks finitos y flujos renovables. Funciona de manera efectiva a cualquier escala.

## **3. Diseño y Metodología**

El biocarbón fue caracterizado por medio de análisis próximo, donde se incluye: porcentaje de humedad según la norma ASTM D3173-11, porcentaje de cenizas expuesto en la norma ASTM D3174-12, porcentaje de material volátil dado por la norma ASTM D3175-11 y poder calorífico según la norma ASTM D3286—85. Además, se realizó análisis elemental CHN. La morfología del biocarbón (materia prima), se determinó mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM-EDS) y un estereomicroscopio Olympus SZ61.

La parte experimental del proyecto se llevó a cabo principalmente en dos etapas, las cuales son:

### **1. Preparación de la materia prima**

Inicialmente, el biocarbón, piedra caliza y cemento se obtuvieron por medio de un proveedor local. Luego el biocarbón como materia prima fue sometida a procesos de conminución (trituración y molienda), después se transformó en pellets con cemento como aglutinante en un disco peletizador.

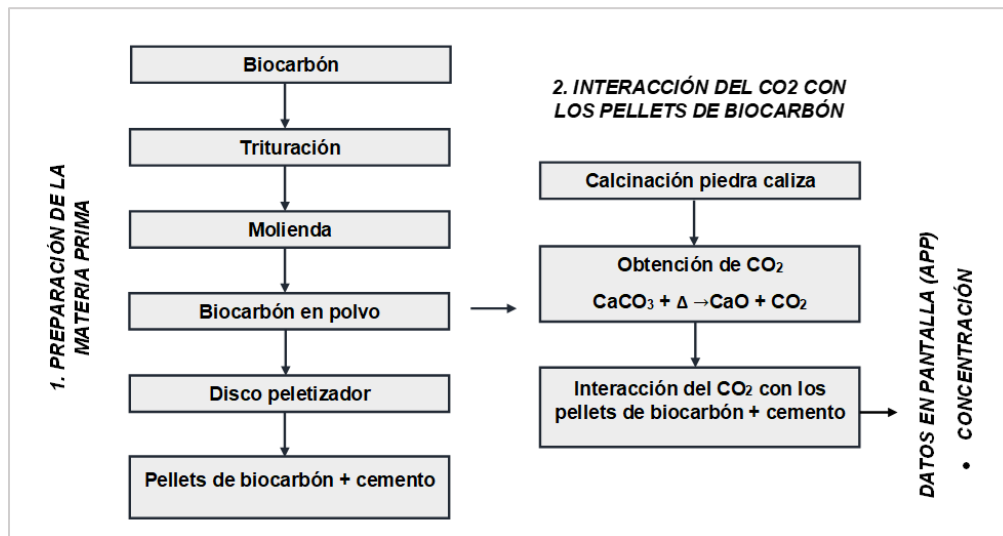
### **2. Interacción del CO<sub>2</sub> con los pellets de biocarbón**

En esta segunda etapa, los pellets de biocarbón anteriormente formados se depositan en el sistema columna y se ponen en contacto con el dióxido de carbono proveniente de la calcinación de la piedra caliza en el horno tipo mufla. Con el fin de mejorar la eficiencia del proceso de calcinación, se diseñó y empleó un reactor de acero galvanizado, el cual, se pone dentro del horno tipo mufla y reduce pérdidas de CO<sub>2</sub>. El diseño presenta dos tuberías de cobre, una de ellas se encuentra en la parte superior del horno y conecta al reactor de acero con un soplador de aire (nebulizador). La otra tubería conecta al reactor con la columna de vidrio que contiene los pellets de biocarbón. Además, se cuenta con un sistema que permite enfriamiento de gases con la ayuda del nebulizador y con toallas humedecidas puestas sobre las tuberías, otorgando mayor seguridad del experimento.

En la Figura 2 se tiene el proceso experimental en forma de diagrama y las Figuras 3 y 4 representan el diseño experimental del trabajo realizado.

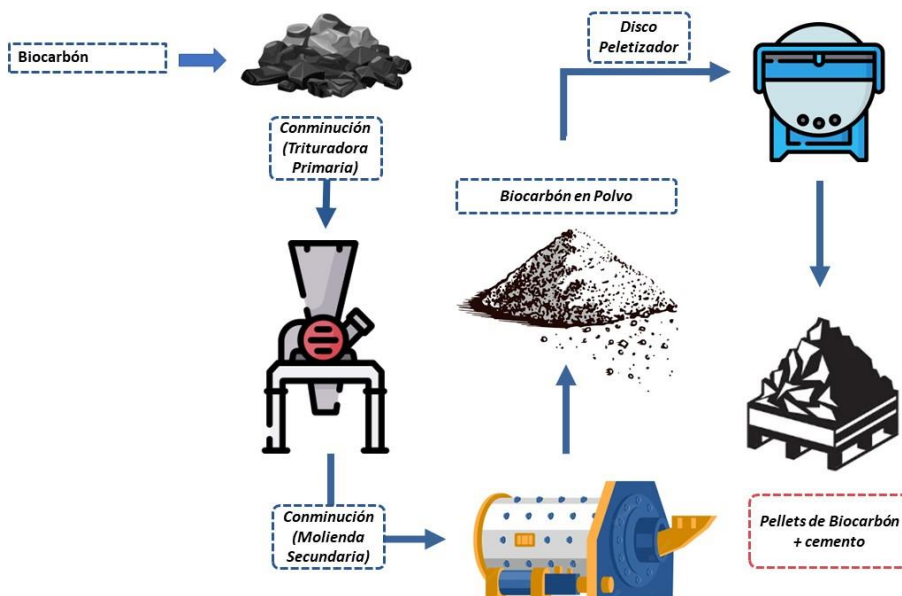
**Figura 2.**

*Proceso experimental en forma de diagrama*

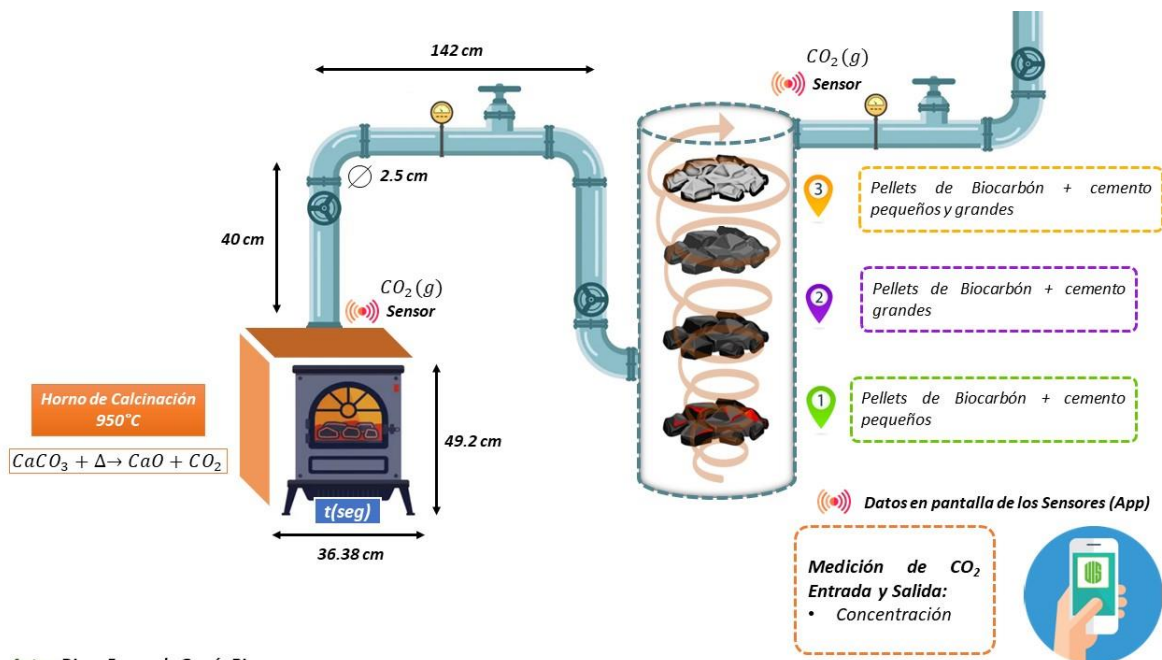


**Figura 3.**

*Diseño experimental etapa 1*



Autor: Diego Fernando García Rico

**Figura 4.***Diseño experimental etapa 2*

## 4. Resultados y Análisis

Nota general. \* Durante todo el análisis se habla de carbonato de calcio y piedra caliza, los cuales hacen referencia al mismo compuesto.

### 4.1 Análisis Físicoquímico del biocarbón

En la tabla 1 está expuesta la caracterización físicoquímica realizada al biocarbón por medio de análisis próximo y análisis CHN, se puede evidenciar que el carbón vegetal de eucalipto

presenta alto porcentaje de carbono fijo (87.56%), siendo este de gran importancia en la captura de dióxido de carbono debido a su capacidad recalcitrante, se puede notar también que el biocarbón contiene bajos porcentajes de humedad, cenizas y azufre, esto se debe principalmente al proceso de pirolisis realizado, garantizando así, elevada área superficial y mayor porosidad, con ello se tiene mayor capacidad de adsorción. Por ende, se puede decir que es un carbón de buena calidad y no libera altos contaminantes al medio ambiente. El poder calorífico es considerablemente alto (13457.167 Btu/Lb) y es un parámetro a tener en cuenta si el carbón se utiliza como combustible. Finalmente, el contenido de hidrogeno y nitrógeno en ambos tipos de análisis elemental es bajo, y es consecuencia también de la alta temperatura ( $\approx 450$  °C) de pirolisis.

**Tabla 1.***Análisis fisicoquímico del biocarbón*

<b>Parámetro</b>	<b>Biocarbón</b>
<b>Análisis próximo[%p]</b>	
Volátiles	4.14
Humedad	5.58
Cenizas	2.72
Azufre	1.17
Poder calorífico (Btu/Lb)	13457.167
<b>CHN [%p]</b>	
C total	86.17
H total	0.77
N total	0.47
C fijo	87.56
<b>CHN base seca [%p]</b>	
C base seca	91.27
H base seca	0.82
N base seca	0.50

*Nota.* \* En el apéndice A se encuentran las definiciones, fórmulas y procedimientos matemáticos utilizados para el análisis fisicoquímico del biocarbón

## 4.2 Densidad aparente del pellet

La tabla 2 presenta la densidad aparente (promedio) determinada para un pellet de biocarbón, se realizaron tres pruebas para su determinación, dando resultados muy similares entre sí, por tanto, se evidencia homogeneidad de los datos en los procedimientos utilizados. El método realizado fue el del picnómetro y la masa utilizada fue de dos (2) gramos (aproximadamente dos pellets). Por la siguiente ecuación (1) se determinó el volumen real [ml] y posteriormente se calculó la densidad aparente con la ecuación (2):

$$V = X - Y \quad (1)$$

Donde:

X: Peso picnómetro con agua + masa del pellet [g]

Y: Picnómetro + mezcla de agua y pellet [g]

Densidad aparente:  $\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$

**Tabla 2.**

*Densidad aparente del pellet*

Prueba	Masa del pellet [g]	Peso picnómetro con agua + masa del pellet [g]	Picnómetro + mezcla de agua y pellet [g]	Volumen real [ml]	Densidad [g/ml]
1	2	51.4088	49.3814	2.0274	0.9865
2	2	52.0123	49.991	2.0213	0.9895
3	2	51.7509	49.7299	2.0211	0.9896
Promedio					0.9885

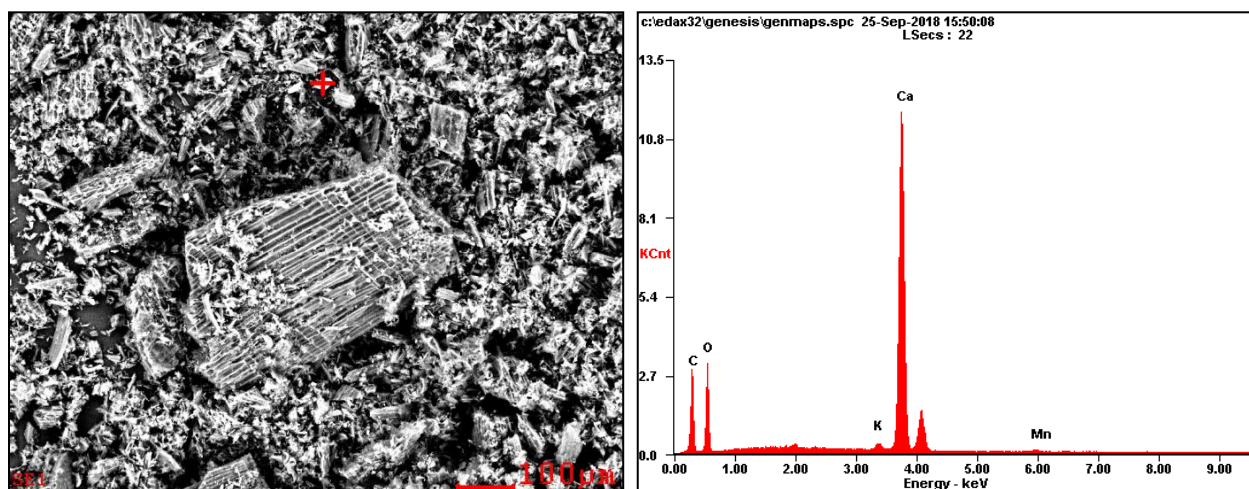
*Nota.* \* En el apéndice B se encuentran fotos del picnómetro utilizado para las pruebas

### 4.3 Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS)

En la Figura 5 se expone la imagen del biocarbón y su espectro de rayos X, obtenidos por microscopia electrónica de barrido (SEM). Con esta información podemos notar la forma y textura de la superficie del biocarbón. Para el área señalada (+) en la imagen, se realizó espectroscopia de rayos X (EDS), dando un espectro cuyos resultados se encuentran en la tabla 3. En el espectro se puede evidenciar pequeñas cantidades de potasio (0.61 % p) y manganeso (0.46 % p), también se tiene la presencia de calcio (36.61 % p) y alto porcentaje de oxígeno (42.33 % p), esto se encuentra asociado a la formación de óxido de calcio (CaO), el cual se encuentra como inclusión dentro de la savia que es transportada por los tejidos del árbol de eucalipto. Este óxido anteriormente nombrado, tiene propiedades que le permite capturar CO<sub>2</sub>.

#### Figura 5.

*Imagen SEM del biocarbón a 100 μm y espectro de rayos X*



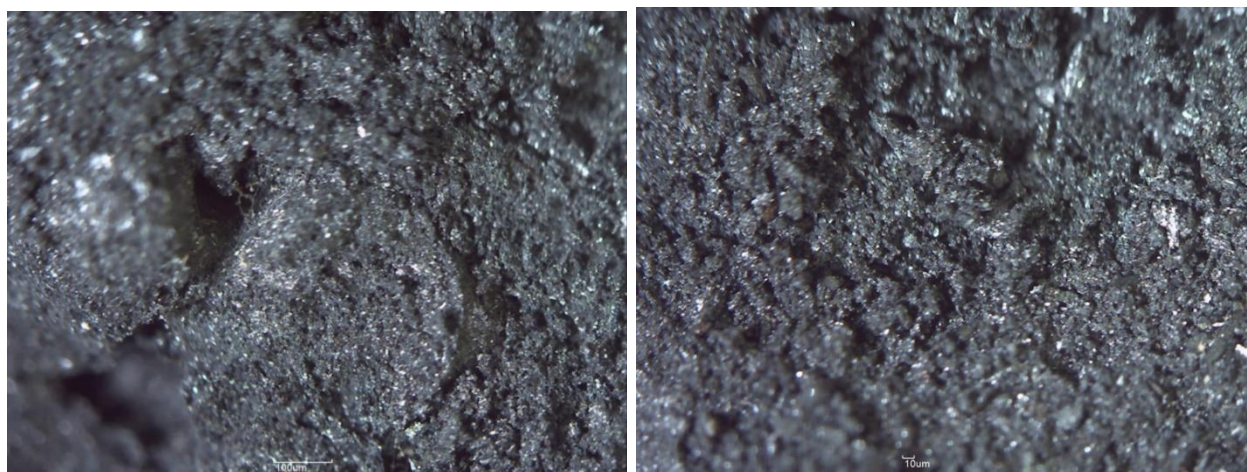
*Nota.* \* Los resultados fueron tomados por el método SEM-EDS en el *Laboratorio de microscopia de la Universidad Industrial de Santander*

**Tabla 3.***Análisis elemental del Biocarbón*

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	19.99	31.71
<i>OK</i>	42.33	50.42
<i>KK</i>	00.61	00.30
<i>CaK</i>	36.61	17.41
<i>MnK</i>	00.46	00.16
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

#### 4.4 Microscopia con Estereomicroscopio

Para tener más información acerca de la superficie de los pellets, se tomaron imágenes con un estereomicroscopio Olympus SZ61, cuando fueron fabricados y después de realizar el experimento, se aprecian espacios vacíos (porosidad) para su uso como adsorbente.

**Figura 6.***Imagen de pellets iniciales y finales con un Estereomicroscopio a 100 μm*

*Nota.* \* Imágenes tomadas con un estereomicroscopio Olympus SZ61

#### 4.5 Diseño de la columna de vidrio

Se diseñó una columna cuyas dimensiones, capacidad y materiales nos pudieran servir para realizar el experimento. Se trata de una columna de vidrio de ocho (8) cm de diámetro y catorce (14) cm, además, posee dos orificios de 2.6 cm, los cuales cumplen la función de entrada y salida de CO<sub>2</sub>, esta pieza está hecha de borosilicato (pyrex) y resiste una temperatura de 300 °C. También, tiene una tapa (color azul) con cuatro (4) cm de diámetro y tres (3) cm de altura, la cual es fabricada con polietileno, que resiste una temperatura de 130 °C. En la Figura 7 se tiene la columna vacía y la columna con los pellets que se utilizaron para adsorber CO<sub>2</sub>, este lecho de pellets abarca todo el diámetro de la columna y alcanza una altura de diez (10) cm.

Finalmente, la tabla 4 resume las dimensiones, volumen y materiales de la columna para la evaluación del biocarbón.

#### Figura 7.

*Columna Vacía y con pellets*



*Nota.* \* El diseño fue realizado por el autor en el Software Solidworks y las fotografías reales de la columna se encuentran en el apéndice C.

**Tabla 4.***Dimensiones de la columna de vidrio*

<b>Pieza</b>	<b>Diámetro [cm]</b>	<b>Altura [cm]</b>	<b>Volumen [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Material</b>
Columna	8	14	703.72	Vidrio Pyrex
Tapa	4	3	-----	polietileno

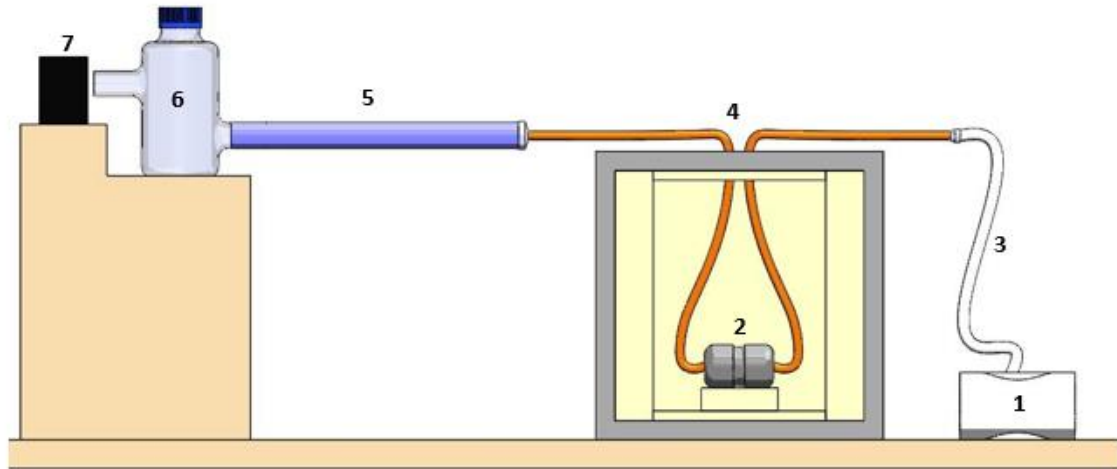
#### 4.6 Diseño del sistema de calcinación y captura de CO<sub>2</sub>

Las figuras 8 y 9 nos presentan el diseño general del experimento llevado a cabo, y como se mencionó en la metodología, se planteó un diseño que pudiera reducir las pérdidas de CO<sub>2</sub> que se produce de la calcinación de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>). Las perdidas en el horno son por distintas razones (desgaste de los refractarios, orificios sin conexión para extraer gases, etc). La tabla 5 contiene las partes del diseño y la fotografía real del experimento se encuentra en el apéndice D.

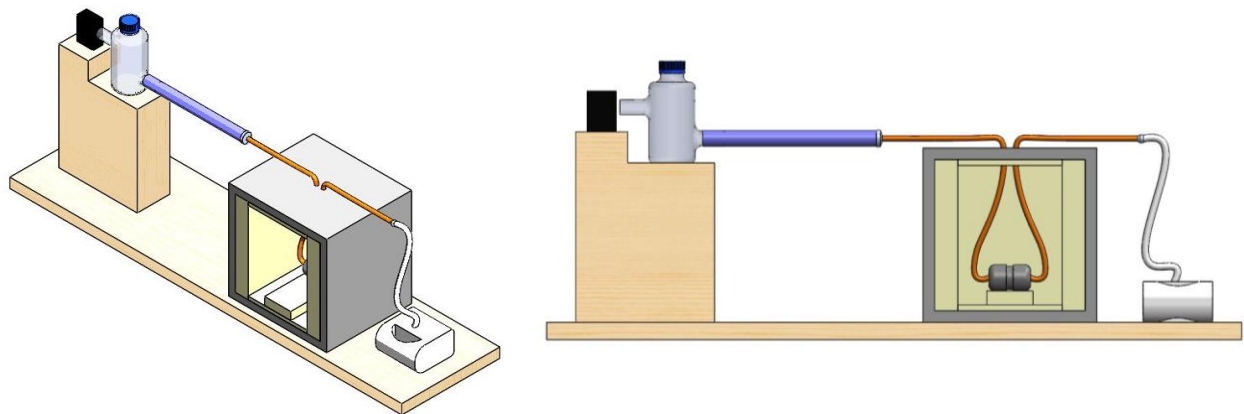
El diseño consta inicialmente con un reactor de acero galvanizado (de 4.5 cm de diámetro y 7.2 cm de longitud), el cual se dispone dentro del horno tipo mufla. Este reactor está conectado a dos tuberías de cobre (con longitud de 48.5 cm y 1 cm de diámetro), una tubería se conectó por medio de una manguera (de 1.1 cm de diámetro y 30 cm de longitud) al nebulizador, encargado de generar aire y aportar al enfriamiento del sistema, la otra tubería se unió a una manguera siliconada (soporta 180 °C), la cual tiene una longitud de treinta (30) cm y un diámetro de 2.7 cm), estos empalmes se hacen por medio de reducciones, nipples, tuercas y teflón, asegurando una buena conexión; luego, esta manguera se conectó por la parte inferior de la columna cargada de pellets y finalmente, en la salida de la columna se adaptó el dispositivo medidor de la concentración de CO<sub>2</sub>.

**Figura 8.**

*Diseño general del experimento realizado*

**Figura 9.**

*Vista oblicua y frontal*



*Nota.* \* Diseños realizados por el autor en el Software Solidworks.

**Tabla 5.***Especificación de las piezas del diseño general del experimento*

Piezas
1. nebulizador
2. Reactor
3. Manguera
4. Tuberías
5. Manguera siliconada
6. Columna
7. Dispositivo medidor de CO <sub>2</sub>

#### 4.7 Calcinación del carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>)

Con el fin de calcular experimentalmente la cantidad de CO<sub>2</sub> que podría ser obtenido a partir de la calcinación de la piedra caliza, se realizaron tres pruebas con diferentes pesos, como se observa en la tabla 6. Estas pruebas obtuvieron un promedio de CO<sub>2</sub> de 21.05 %. La temperatura del proceso fue de 950 °C, a la cual los carbonatos se disocian y el tiempo fue de noventa (90) minutos. La reacción endotérmica, ecuación tres (3) indica la descomposición térmica del carbonato de calcio CaCO<sub>3</sub> y la formación de cal viva (CaO) y dióxido de carbono CO<sub>2</sub>.

**Tabla 6.***Datos de calcinación del carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>)*

Pruebas	CaCO <sub>3</sub> inicial [g]	CaO producido [g]	CO <sub>2</sub> Producido [g]	CaO [%]	CO <sub>2</sub> [%]	Temperatura [°C]	ΔG° [cal/mol]	Tiempo [min]
1	177.4735	141.0431	36.4304	79.47	20.53	950	6675	90
2	131.3826	104.883	36.4304	79.83	20.17			
3	100.3681	77.8365	22.5321	77.55	22.45			

*Nota.* \* En el apéndice E se encuentra el espectro de la piedra caliza sin calcinar y luego de la calcinación, obtenido por la técnica de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

**Figura 10.**

*Piedra caliza calcinada*



#### **4.8 Composición de pellets formados**

Los pellets fueron formados en la peletizadora del laboratorio de beneficio de minerales de la escuela de ingeniería metalúrgica, se elaboraron dos tipos de pellets, variando la cantidad de biocarbón, cemento y agua. Inicialmente, se partió de polvo de biocarbón con un tamaño de (250  $\mu\text{m}$ ) producto de la conminución (trituración y molienda), este polvo y los otros componentes se depositaron en la peletizadora y se empezaron a formar aglomerados con una velocidad de siete (7) RPM, este valor fue determinado experimentalmente, ya que, con velocidades menores no se tenía buena adhesión y a velocidades mayores se presentaron fuertes colisiones entre las partes y no permitía la aglomeración. La cantidad de agua para los pellets tipo 1 fue de 15.3 ml y la cantidad para los pellets tipo 2 fue de 10.12 ml. Este líquido mejora las propiedades elásticas del pellet formado debido a su alta tensión superficial. El cemento se usó como aglomerante, siendo un

material orgánico que brinda al aglomerado resistencia y estabilidad. Para los pellets tipo 1 se utilizó 96.9 g y para los tipo 2 fue de 70.84 g.

El ángulo de la peletizadora fue de 39 ° y el diámetro promedio de los pellets fabricados fue de 14.7 mm, en la tabla 7 se encuentra la información anteriormente descrita.

**Tabla 7.**

*Composición y parámetros de pellets formados*

Tipo	Composición pellets [%]	Peso [g]	Tamaño de partícula [μm]	Velocidad de la peletizadora [RPM]	Ángulo de la peletizadora [°]	Diámetro promedio [mm]
1	Biocarbón	78	250	7	39	14.7
	Cemento	19				
	Agua	3				
2	Biocarbón	84	250	7	39	14.7
	Cemento	14				
	Agua	2				

**Figura 11.**

*Pellets formados en la peletizadora*



#### **4.9 Adsorción de CO<sub>2</sub>**

Uno de los factores que tiene mayor prelación en este proyecto, es la preservación del medio ambiente y en consecuencia evitar que aumenten los efectos generados por el cambio climático causado en gran medida por los gases de efecto invernadero. De esta manera, se evaluó a partir de los pellets fabricados y los diseños establecidos la capacidad de captura de CO<sub>2</sub> proveniente de la calcinación de la piedra caliza, con un equipo de medición de niveles de CO<sub>2</sub> y el respaldo de cálculos matemáticos. Cabe mencionar, que en la adsorción entre sólido (pellets) y gas (CO<sub>2</sub>), las moléculas del gas se mantienen unidas a la superficie del sólido por medio de fuerzas

de Van der Waals (interacciones dipolares, dispersión y/o inducción), este hecho define las características de esta clase de adsorción.

Se realizó una prueba para cada tipo de pellets, en la prueba uno (1), cuyos datos se encuentran en la tabla 8, se inició con una masa de carbonato de calcio de (60.0481 g) y al final del experimento se pesó el residuo obtenido, correspondiente a óxido de calcio o cal viva (CaO), obteniéndose (44.7676 g) y según la ecuación (3) el peso restante es dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) con un peso de (15.2805 g). la concentración de CO<sub>2</sub> medida por el monitor se registró en trece (13) tiempos durante los noventa (90) minutos del experimento, registrando en total (12.1873 g CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de aire). La masa inicial de los pellets dentro de la columna de vidrio fue de (200.6702 g) y su peso final fue de (203.5617 g), notándose un aumento de (2.8915 g) y es consecuencia del CO<sub>2</sub> adsorbido por los pellets (18.92 %). Por tanto, y según cálculos matemáticos (apéndice F) se determinó la cantidad de CO<sub>2</sub> adsorbido por los pellets tipo 1 (14.4575 g CO<sub>2</sub>/kg de pellets). A este método de cantidad adsorbida se le conoce como “método de flujo”, donde se hace circular un gas y luego se determina la diferencia entre lo que entra y lo que sale.

Para la prueba dos (2), cuyos resultados se encuentran en la tabla nueve (9), se realizaron los mismos procedimientos anteriormente mencionados, obteniéndose una adsorción del (18.14 %) del CO<sub>2</sub> que circuló por la columna. Finalmente, los pellets tipo 2 logran una adsorción de (13,767 g CO<sub>2</sub>/kg de pellets).

Las Figuras 12 y 13 representan el comportamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> [ppm] en función del tiempo [min], ambas gráficas presentan una isoterma de adsorción similar, creciente hasta un punto (saturación) y luego decreciente. Esta conducta es debida principalmente a dos factores, uno se debe a que el CO<sub>2</sub> llena los espacios vacíos o libres del material adsorbente y luego la curva decrece porque el CO<sub>2</sub> no tiene una superficie porosa a la cual adherirse. El otro factor se

da por la disminución de CO<sub>2</sub> producido en la calcinación y se presenta según estas graficas alrededor del minuto (65).

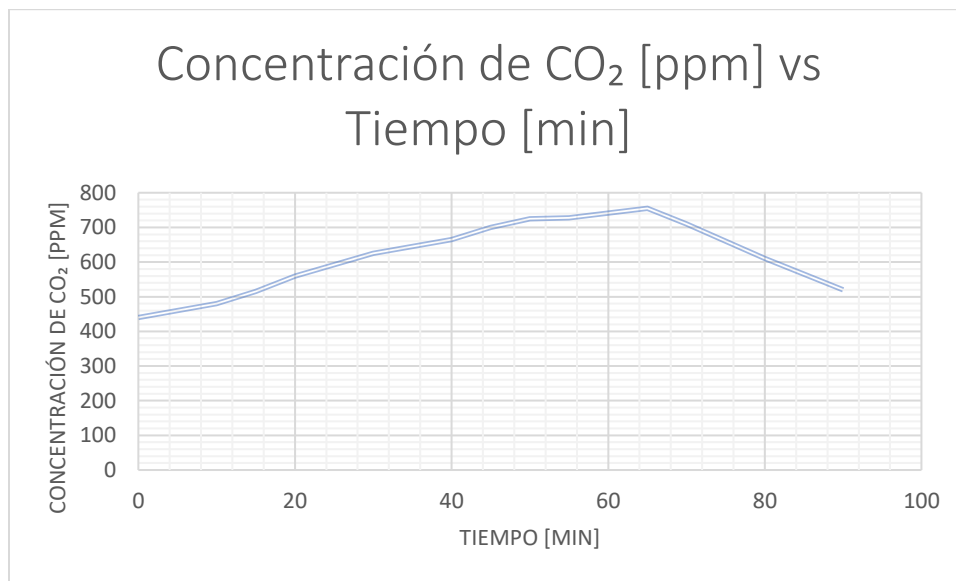
**Tabla 8.**

*Datos de adsorción de CO<sub>2</sub> con pellets tipo 1*

Prueba	Concentración de CO <sub>2</sub> [ppm]	Tiempo [min]	Concentración de CO <sub>2</sub> [g]/m <sup>3</sup> de aire	CaCO <sub>3</sub> inicial [g]	CaO final [g]	CO <sub>2</sub> producido[g]	Masa inicial de pellets [g]	Masa final pellets cargados [g]
1	440	0	0.6675	60.0481	44.7676	15.2805	200.6702	203.5617
	480	10	0.7282					
	515	15	0.7813					
	560	20	0.8496					
	625	30	0.9482					
	665	40	1.0089					
	700	45	1.062					
	725	50	1.1					
	728	55	1.1045					
	755	65	1.1455					
	710	70	1.0772					
	610	80	0.9255					
	520	90	0.7889					
	Total							

**Figura 12.**

*Concentración de CO<sub>2</sub> [ppm] en función del tiempo [min] con pellets tipo 1*



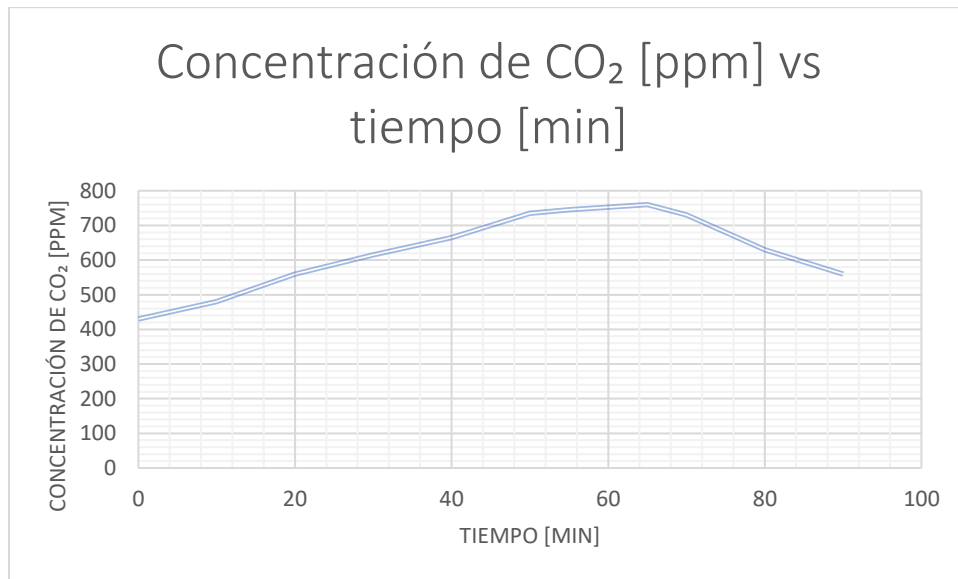
**Tabla 9.**

*Datos de adsorción de CO<sub>2</sub> con pellets tipo 2*

Prueba	Concentración de CO <sub>2</sub> [ppm]	Tiempo [min]	Concentración de CO <sub>2</sub> [g/m <sup>3</sup> de aire	CaCO <sub>3</sub> inicial [g]	CaO final [g]	CO <sub>2</sub> producido[g]	Masa inicial de pellets [g]	Masa final pellets cargados [g]
2	430	0	0.6524	61.7856	46.6127	15.1729	200.01	202.7634
	480	10	0.7282					
	520	15	0.7889					
	560	20	0.8496					
	615	30	0.9331					
	665	40	1.0089					
	700	45	1.062					
	735	50	1.151					
	745	55	1.1303					
	760	65	1.1531					
	730	70	1.1075					
	630	80	0.9558					
	560	90	0.7889					
		Total						

**Figura 13.**

*Concentración de CO<sub>2</sub> [ppm] en función del tiempo [min] con pellets tipo 2*

**Figura 14.**

*Medidor de CO<sub>2</sub>*



## 5. Conclusiones

Se caracterizó el biocarbón como material adsorbente de CO<sub>2</sub>, el cual tiene principalmente alto contenido de carbono fijo (87.56 %p), bajos porcentajes de hidrógeno y nitrógeno, (0.77 %p) y (0.47 %p) respectivamente, mediante la espectroscopia de rayos X (EDS) se obtuvo más que todo calcio (36.61 %p) y oxígeno (42.33 %p), dados estos altos porcentajes se asocia a la formación de óxido de calcio (CaO), el cual se encuentra normalmente como inclusión dentro de la savia del árbol de eucalipto. Finalmente, mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y con un estereomicroscopio Olympus SZ61 a una escala de 100  $\mu m$  se evaluó la superficie del biocarbón y de los pellets elaborados, notándose la forma, textura y porosidad del material adsorbente.

Se diseñó a escala de laboratorio un sistema de atrapamiento de CO<sub>2</sub> (generado por calcinación de piedra caliza), el cual consta de un recipiente de vidrio pyrex con abertura de 2.6 cm para el ingreso de CO<sub>2</sub> por la parte inferior y abertura de 2.6 cm para la salida de CO<sub>2</sub> por la parte superior, con menor concentración [ppm]. Dicho recipiente o columna tiene una altura de catorce (14) cm, un diámetro de ocho (8) cm y una capacidad de 703.72 cm<sup>3</sup>. Para el montaje general del experimento se adicionó un reactor de acero galvanizado unido a dos tuberías de cobre, el cual se introdujo dentro del horno tipo mufla, estas tuberías se conectan a un soplador de aire y a la columna de vidrio, esto se agregó con el fin de tener mayor rendimiento, practicidad y eficiencia del sistema de producción y captura de CO<sub>2</sub>. Además, se utilizó un equipo de medición de CO<sub>2</sub> y otras piezas como mangueras, niples, tuercas, teflón, entre otras, para garantizar buena conexión entre las partes del esquema diseñado.

La concentración [ppm] de CO<sub>2</sub> fue medida antes y después del sistema en columna con los pellets a base de biocarbón, estas concentraciones fueron tomadas por un monitor de calidad de aire con altas detecciones de CO<sub>2</sub>. El cual indica junto a procedimientos matemáticos, que es posible lograr captura del 18.92 % de CO<sub>2</sub> con pellets tipo 1, es decir, la capacidad de adsorción fue de 14.4575 g CO<sub>2</sub>/kg de pellets; para los pellets tipo 2 se obtuvo un atrapamiento de 18.14 % de CO<sub>2</sub> y su adsorción fue de 13.767 g CO<sub>2</sub>/kg pellets. La evaluación de estas adsorciones se realizó en el tiempo de diseño de calcinación (90 min).

Según los datos obtenidos durante las pruebas de adsorción de CO<sub>2</sub>, se evidenció que los pellets de composición tipo 1 adsorbieron más CO<sub>2</sub> (0.6905 g) en comparación a los tipo 2, aunque no es una cantidad significativa, se puede concluir que, con los pellets con mayor contenido de biocarbón se obtiene mayor atrapamiento de CO<sub>2</sub>.

## **6. Recomendaciones**

Se recomienda realizar pruebas del sistema columna de biocarbón con otras emisiones, tales como: exógenos de combustión, gases de otros procesos industriales, entre otros, para evaluar la eficiencia de captura de los pellets de biocarbón.

Realizar un equipo piloto en una empresa de fabricación de cal viva para realizar escalamiento de las pruebas llevadas a cabo a nivel de laboratorio.

Llevar a cabo pruebas para obtención de materiales de construcción a partir de los pellets cargados con CO<sub>2</sub>.

Evaluar otros tipos de aglomerantes y mirar que nuevas propiedades le pueden ofrecer al pellet.

### Referencias Bibliográficas

- Arndt González, D. T. J. (2022). *Estrategia de la industria cementera para adaptación a exigencias tributarias de carbono neutralidad* (Doctoral dissertation, Universidad del Desarrollo. Facultad de Ingeniería).
- Bejarano Moreno, L. M., & Aguilar Díaz, P. A. (2017). Evaluación del biochar e hidrochar como medios para captura de carbono en el suelo.
- Cerdá, E., & Khalilova, A. (2016). Economía circular. *Economía industrial*, 401(3), 11-20.
- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2014). Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en pellets y briquetas. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(25), 52-63.
- Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367-382.
- Etayo Rillo, F., & Romeo Giménez, L. M. (2011). Simulación del proceso de carbonatación– calcinación para captura de CO<sub>2</sub>. Estrategias de mejora del proceso.
- Fomina, M. and G. Gadd M. (2014) “Biosorption: current perspectives on concept, definition and application”. *Bioresour. Technol.*, vol. 160, pp. 3-14
- Hameed, B. H. and El-Khaiary, M. I. (2008) “Malachite green adsorption by rattan sawdust: Isotherm, kinetic and mechanism modelling” *J Hazard Mater.*, vol. 159, n.º 2-3, pp. 574-579,

- Li, S., Yuan, X., Deng, S., Zhao, L., & Lee, K. B. (2021). A review on biomass-derived CO<sub>2</sub> adsorption capture: Adsorbent, adsorber, adsorption, and advice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 152*, 111708.
- Morales, H., Torres, C., & Muñoz, C. M. (2008). Tecnologías de captura y secuestro de CO<sub>2</sub>. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Ortiz, J. E. D. (2005). Propuesta metodológica para determinar el potencial de humedad de un material granular a partir de la humedad relativa. *Ingeniería y Competitividad, 7*(1), 73-79
- Parte, I., & Parte, I. I. (2013). Tema 7. Superficies sólidas: adsorción y catálisis heterogénea. *Academia. Edu.*
- Plaza, M. G. (2009). *Desarrollo y modificación superficial de adsorbentes para la captura de CO<sub>2</sub> postcombustión* (Doctoral dissertation, Universidad de Oviedo).

## Apéndices

### Apéndice A. Definiciones, fórmulas y procedimientos matemáticos utilizados para el análisis fisicoquímico del biocarbón

#### Análisis Próximo

Las propiedades que permiten clasificar los carbones según su rango se determinan a través de un análisis próximo, que corresponde a un conjunto de ensayos que determinan el porcentaje de humedad, cenizas, materia volátil, poder calorífico y contenido de azufre. Estas propiedades se definen a continuación.

- **Humedad**

Se define como la cantidad de agua contenida dentro y sobre la superficie del carbón. En este se presenta tres tipos diferentes de humedad: Humedad Inherente o de Equilibrio, la cual constituye la calidad del manto de carbón y está presente en su estado natural de depósito. Humedad Superficial o Libre se sitúa sobre la superficie del carbón, y finalmente, Humedad Residual, aquella que queda en la muestra de carbón después que se ha determinado las pérdidas de humedad por secado al aire. La determinación del porcentaje de humedad está representada por la ecuación (A).

$$\% \text{ Humedad} = \left[ \frac{A-B}{A} \right] \cdot 100 \text{ (A)}$$

Donde, A = Gramos de la muestra usada, B = Gramos de la muestra después de calentar.

- **Cenizas**

El contenido de ceniza del carbón generado durante su combustión es el residuo no combustible constituido principalmente por óxidos de metal, que permanece después de la quema del carbón y representa la masa de materia mineral seguido de la eliminación del carbono, oxígeno, azufre y agua durante la combustión. La determinación del porcentaje de ceniza está representada por la ecuación (B).

$$\% \text{ Cenizas: } \left[ \frac{A-B}{C} \right] \cdot 100 \text{ (B)}$$

Donde, A= Peso de la cápsula, la tapa y residuo de las cenizas. B= Peso de la capsula y la tapa vacía. C=Peso de la muestra de análisis utilizada

- **Material Volátil**

La materia volátil en el carbón hace referencia a los componentes del carbón (exceptuando la humedad), que son liberados a altas temperaturas en ausencia de aire. La materia volátil obtenida durante la pirolisis del carbón consiste principalmente de gases combustibles como hidrogeno, monóxido de carbono, metano entre otros hidrocarburos, alquitrán y gases no combustibles como dióxido de carbono. Por su parte, el agua que pueda evaporarse por calentamiento ligeramente por encima de la temperatura de ebullición del agua no se tiene en cuenta como materia volátil, mientras que el agua formada como parte del proceso de descomposición térmica, si es incluido.

$$\% \text{ Material Volátil: } \left[ \frac{B-C}{B-A} \right] \cdot 100 \text{ (C)}$$

Donde, A= Masa del crisol y tapa. B= masa del crisol, tapa y contenido antes del calentamiento. C= Masa del crisol, tapa y contenido después del calentamiento.

- **Poder calorífico**

El poder calorífico se define como la cantidad de energía por unidad de masa que puede generar un combustible al producirse una reacción de oxidación. Durante la combustión de un

carbón, elementos como carbono e hidrógeno se fusionan con el oxígeno, produciendo agua, dióxido de carbono y calor. Cuanto más elevado sea el poder calorífico de un combustible, mayor será la cantidad de energía que será capaz de producir. La determinación del poder calorífico está dada por la ecuación (D).

$$Q = \frac{\Delta T * C - e_1 - e_2 - e_3}{m} \text{ (D)}$$

Donde,  $\Delta T = (T_{\text{ignición}} - T_{\text{ambiente}})$

$e_1$  = Calor de combustión del algodón

$e_2$  = Calor de combustión del Ni-Cr

$e_3$  = Calor de formación del ácido sulfúrico.

- **Contenido de azufre**

El azufre se presenta en tres formas: azufre de sulfatos, azufre pirítico y azufre orgánico, clasificándose los dos primeros como azufre inorgánico. Este azufre inorgánico generalmente ocurre en la forma de minerales sulfurosos, pequeñas cantidades de minerales sulfatados y azufre elemental. La determinación del contenido de azufre está dada por la ecuación (E).

$$\% \text{ Azufre: } \left[ \frac{(A-B) * 13.738}{C} \right] \text{ (E)}$$

Donde, A= Gramos de BaSO<sub>4</sub> precipitado. B= Gramos de BaSO<sub>4</sub> corregidos.

C= Gramos de la muestra usada.

### **Análisis elemental CHN**

El análisis elemental CHNSO, también conocido como análisis elemental orgánico o microanálisis elemental, determina las cantidades de carbono (C), hidrógeno (H) y nitrógeno (N) presentes en una muestra. Es una técnica fiable y rentable usada para evaluar la pureza y la composición química de los compuestos y puede usarse en una amplia gama de tipos de muestras diferentes, incluidas sustancias sólidas, líquidas, volátiles y viscosas. Conocer la composición de

los elementos orgánicos también ayuda a los analistas a determinar la estructura de la sustancia de muestra. La caracterización química de los compuestos orgánicos se usa tanto en la investigación como en el control de calidad. Los procedimientos de este análisis están regidos por la norma ASTM D 3176-89.

**Apéndice B. Fotografía del picnómetro**



**Apéndice C. Fotografías de la columna de vidrio**



**Apéndice D. Fotografías del diseño experimental**





**Apéndice E. Espectros de piedra caliza sin calcinar y luego de la calcinación por FTIR.**

Sample ID:Piedra Caliza Original sin calcinar

Sample Scans:8

Background Scans:8

Resolution:4

System Status:Good

File Location:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\Piedra Caliza Original sin calcinar\_2022-05-04T15-17-57.a2r

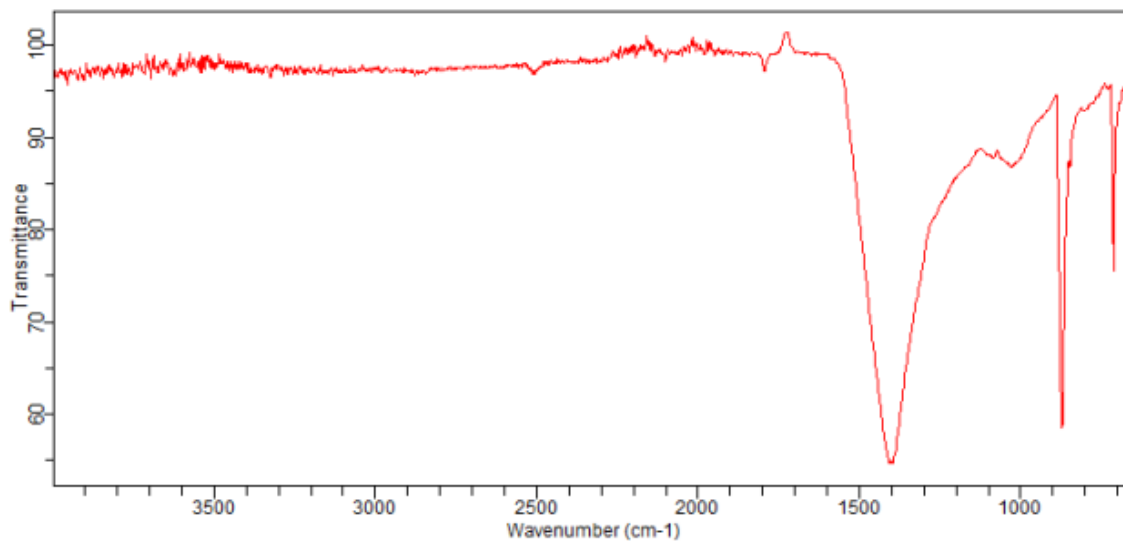
Method Name:Toma General de Espectros

User:FTIR

Date/Time:05/04/2022 3:17:57 PM

Range:4000 - 650

Apodization:Happ-Genzel



*Nota.* \* Espectro piedra caliza sin calcinar.



Sample ID:Piedra Caliza Calcinada 950

Sample Scans:8

Background Scans:8

Resolution:4

System Status:Good

File Location:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\Piedra Caliza Calcinada 950\_2022-05-04T15-12-44.a2r

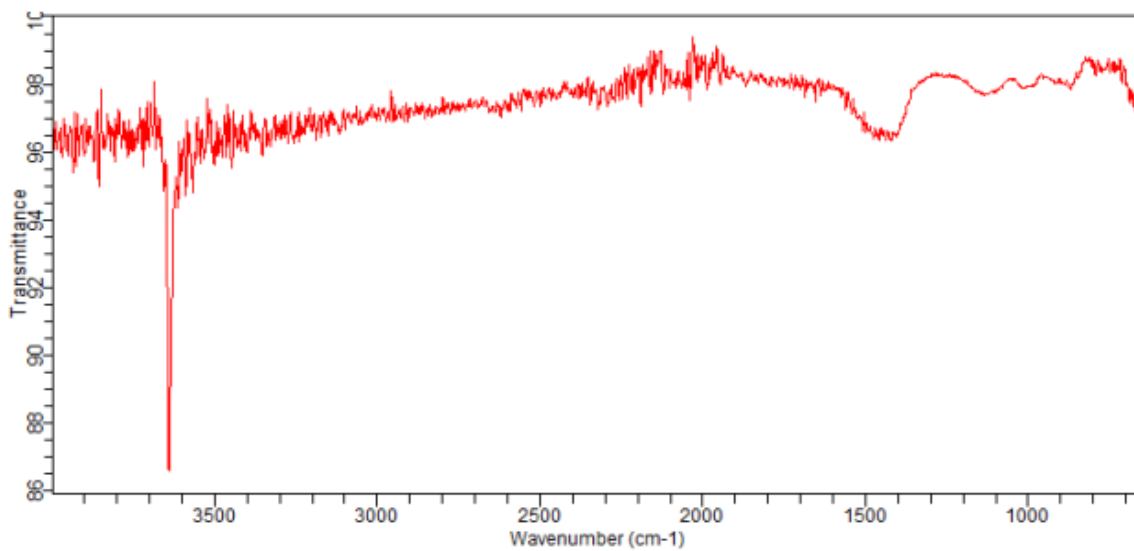
Method Name:Toma General de Espectros

User:FTIR

Date/Time:05/04/2022 3:12:44 PM

Range:4000 - 650

Apodization:Happ-Genzel



*Nota.* \* Espectro piedra caliza calcinada.

**Apéndice F. Cálculos matemáticos**

A)

15.2805 g de CO<sub>2</sub> → 100 %2,8915 g de CO<sub>2</sub> → X = 18.92 % CO<sub>2</sub>

B)

2.89 15 g de CO<sub>2</sub> → 200 g de pelletsX g de CO<sub>2</sub> → 1000 g de pellets = 1 kgX = 14.4575 g de CO<sub>2</sub>/kg de pellets.