

**EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE CARBONES TÉRMICOS Y COQUIZABLES EN
PROCESOS DE COMBUSTIÓN**

CÉSAR FABIÁN ALARCÓN CHISINO



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE METALURGIA
TUNJA-BOYACÁ
2017**

**EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE CARBONES TÉRMICOS Y COQUIZABLES EN
PROCESOS DE COMBUSTIÓN**

CÉSAR FABIÁN ALARCÓN CHISINO

**Proyecto de grado para optar por el título de: Ingeniero
Metalúrgico**

**Director
ING. LUIS FERNANDO LOZANO GÓMEZ**



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE METALURGIA
TUNJA-BOYACÁ
2017**

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Tunja, Noviembre de 2017

DEDICATORIA

A mi familia y seres queridos...

Mi mamá, mi tía Leo quienes con su apoyo y dedicación nunca me han dejado solo.

A mi papá quien desde el cielo me envía sus bendiciones y su buena energía, no se imagina cuanta falta me ha hecho.

A mis hermanos Genny, Juan y Sonia quienes contribuyeron firmemente a en la culminación y cumplimiento de este reto. Infinitas gracias por nunca dejar de confiar mí.

A mis sobrinos Santi y Juan miguel "los cornelios", Kika...los quiero mucho.

Especialmente dedico este logro a mis hijos Cesar Felipe, Camilo Esteban. Y a mi compañera de vida Camilita, gracias por estar ahí siempre. Son mi motivación más grande para vivir el día a día. Los amo amores!

AGRADECIMIENTOS

Al grupo de carbones y carboquímica de la UPTC, por su colaboración durante el desarrollo del proyecto, especialmente al ingeniero pan.

A mi director Ing. Luis Fernando Lozano por su apoyo, enseñanzas y paciencia durante el desarrollo del proyecto

Al ingeniero Marco Antonio Ardila y su hijo Van Hallem, por su apoyo y disposición.

A todos mis amigos y compañeros de carrera y vida, mauro pipasito trab-eme ruritz papitas peguizamon gracias por compartir esta grata experiencia de formación personal y profesional.

A todos los que de una u otra forma hicieron parte de este proceso, muchas gracias!!!

La autoridad científica de la facultad de ingeniería, reside en ella misma, por lo tanto no responde de los conceptos expresados en este proyecto de grado.

Se autoriza la reproducción indicando el origen.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	15
Objetivos	16
Justificación	17
2 MARCO REFERENCIAL	18
2.1 MARCO TEÓRICO.....	18
2.1.1 carbón mineral.....	18
2.1.1.1 Clasificación del carbón.....	18
2.1.2 Proceso de muestreo de carbones	19
2.1.2.1 Tipos de Muestreo.	20
2.1.3 Caracterización del carbón.	21
2.1.3.1 Análisis próximo.....	21
2.1.3.2 Poder calorífico.....	22
2.1.4 Combustión.....	22
2.1.4.1 Tipos de combustión.....	22
2.1.4.2 Aire Teórico	24
2.1.4.3 Leyes fundamentales de la combustión	24
2.1.4.4 Concepto de mol.....	25
2.1.4.5 Temperatura de ignición.....	25
2.1.5. Análisis de gases	25
2.1.5.1 Métodos electroquímicos	26
2.1.5.2 Métodos Espectrofotómetros	26

2.1.5.3 Métodos Cromatográficos.....	26
2.1.4.1 Aparato de Orsat.....	26
2.1.2 Estado del arte	29
3. DISEÑO EXPERIMENTAL	30
3.1 PROCEDIMIENTO.....	30
3.1.1 Muestreo en minas y preparación de las muestras.....	30
3.1.2 Preparación de la muestra para análisis.....	31
3.1.3 Preparación de las mezclas.....	32
3.1.4 Caracterización de los carbones y las mezclas.....	32
3.1.4.1 Análisis próximo.....	32
3.1.4.2 Poder calorífico	35
3.1.5 Proceso de combustión y análisis de gases.	36
3.1.5.1 Combustión de las mezclas	36
3.1.5.2 Análisis de gases de chimenea.....	37
3.1.5.3 Descripción del equipo.....	37
3.1.5.4 preparaciones de las soluciones.....	38
3.1.5.5 Calibración o patronamiento del Orsat.....	39
3.1.5.6 Cálculos fundamentales en el análisis Orsat.....	40
3.1.5.7 procedimiento de laboratorio para utilizar el Orsat.....	40
3.1.5.8 Mantenimiento del aparato de Orsat.	41
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	45
4.1 MUESTREO Y CARACTERIZACION.....	45

4.1.1 Muestreo en las minas	45
4.1.2 Caracterización de los carbones y las mezclas	45
4.1.3 Análisis de la caracterización del carbón	46
4.1.4 Análisis de la caracterización de las mezclas	47
4.2 COMBUSTIÓN Y ANÁLISIS DE GASES ..	47
4.2.1 Calibración del aparato de Orsat	47
4.2.2 Prueba de estanqueidad	47
4.2.3 Calibración de las soluciones.....	48
4.2.4 Análisis de la combustión de la mezcla 1.....	49
4.2.5 Análisis de combustión de la mezcla 2	51
4.2.6 Analisis de combustión de la mezcla 3	54
CONCLUSIONES	58
RECOMENDACIONES	59
ANEXOS	60
BIBLIOGRAFIA	66

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Clasificación de los carbones según ASTM	19
Tabla 2. Diseño de mezclas de carbones.....	32
Tabla 3. Parámetros establecidos para el proceso de combustión	37
Tabla 4. Proceso de muestreo de carbones térmicos y coquizables en pila en los municipios de Paipa y Samacá (Boyacá).....	45
Tabla 5. Caracterización mediante análisis próximos y poder calorífico de carbones térmicos y coquizables de Paipa y Samacá (Boyacá)	45
Tabla 6. Caracterización de las mezclas de carbon térmico con carbon coquizable alto en volátiles	46
Tabla 7. Resultados de la prueba de estanqueidad hecha al aparato de Orsat ...	48
Tabla 8. Lecturas tomadas en la calibración del aparato de Orsat	48
Tabla 9. Resultados de los análisis de gases de chimenea realizados con el aparato de Orsat a una muestra de gas en la combustión de la mezcla 1.....	50
Tabla 10. Resultados de los análisis de gases de chimenea realizados con el aparato de Orsat a una muestra de gas en la combustión de la mezcla 2.	52
Tabla 11. Resultados de los análisis de gases de chimenea realizados con el aparato de Orsat a una muestra de gas en la combustión de la mezcla 3.	55
Tabla 12. Resultados más relevantes de la combustión de las mezclas de carbon térmico y carbon coquizable alto en volátiles.	57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Aparato de Orsat	27
Figura 2. Diagrama de flujo del desarrollo general del proyecto	30
Figura 3. Esquema de la pila muestreada y de los incrementos.....	31
Figura 4. Procedimiento para la preparación de muestra para análisis	31
Figura 5. Ensayos contemplados en la Norma ASTM D3172, sobre análisis próximo	32
Figura 6. Procedimiento de la norma ASTM D3173.....	33
Figura 7. Procedimiento de la norma ASTM D3174	34
Figura 8. Procedimiento de la norma ASTM D 3175.....	35
Figura 9. Calorímetro LECO AC600, del instituto regional minero energético IRME, UPTC Sogamoso	35
Figura 10. Montaje del proceso de combustión en cámara de lecho fijo, con análisis de gases con el aparato de Orsat.....	36
Figura 11. a. Bureta de 100ml con camisa de agua. b. llave de tres vías c. recipiente de absorción.	37
Figura 12. Botella niveladora del Orsat conectada a la bureta con un tubo de goma.	38
Figura 13. Reactivos absorbentes listos para la medición con sus respectivos reactivos a nivel de las marcas.....	40
Figura 14. Válvulas que comunican la entrada al aparato de Orsat	41
Figura 15. Toma de la muestra para análisis en el aparato de Orsat	42
Figura 16 . Frasco de absorción de monóxido de carbono	43
Figura 17. aparato de Orsat con solución de ácido nítrico al 10 % utilizada para limpiar sus componentes.	44

Figura 18. Relación de tiempo y temperatura del proceso de combustión de la muestra y la contramuestra	49
Figura 19. Proporciones de CO ₂ , O ₂ Y CO de los gases de chimenea producto de las pruebas de combustión de la mezcla 1. Muestra y contra muestra (subrayado)	51
Figura 20. Relación de tiempo y temperatura del proceso de combustión de la muestra y la contramuestra	52
Figura 21. Proporciones de CO ₂ , O ₂ Y CO de los gases de chimenea producto de las pruebas de combustión de la mezcla 2. Muestra y contra muestra (subrayado).	53
Figura 22. Relación de tiempo y temperatura del proceso de combustión de la muestra y la contramuestra	54
Figura 23. Proporciones de CO ₂ , O ₂ Y CO de los gases de chimenea producto de las pruebas de combustión de la mezcla 3. Muestra y contra muestra (subrayado).	56

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Datos de la construcción de las graficas temperatura vs tiempo de las combustiones de las mezclas	61
Anexo B. Resultados de las pruebas de poder calorífico.....	63

RESUMEN

Este trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar mezclas de carbon térmico y carbon coquizable alto en volátiles que posteriormente van a ser empleados en procesos de combustión para la generación de energía. Se utiliza aire con un 30% en exceso como comburente, siendo controlado con un flujometro el cual lo suministra a un caudal constante de $2 \text{ ft}^3/\text{min}$, a un reactor de lecho fijo. El propósito del estudio es el de promover alternativas de mezcla de carbones que garanticen el adecuado uso de las reservas de carbón mineral en el país. Las pruebas de combustión se realizaron con muestras de carbon térmico del municipio de Paipa y carbón coquizable alto en volátiles del municipio de Samacá, Boyacá. La caracterización de los carbones y las mezclas se realizó mediante análisis próximos, azufre y poder calorífico, los cuales permiten establecer los parámetros iniciales del proceso de combustión. Durante el proceso de combustión de cada una de las mezclas se lleva control de tiempo, temperatura, muestreo y análisis de gases de chimenea mediante el analizador Orsat el cual nos da la composición de CO_2 , O_2 y CO y permite establecer el estado de la combustión. Se establece que la mezcla 60/40 de carbón térmico/carbón coquizable es la que presenta los mejores parámetros de combustión (7.2% de CO_2 , 0,4 % CO , Temperatura máxima $650 \text{ }^\circ\text{C}$, menor tiempo de combustión 20 minutos/10 gramos de mezcla, % cenizas = 6.1)

Palabras claves: Combustión, mezclas, carbones térmicos, carbones coquizables, gases de chimenea, análisis Orsat.

INTRODUCCIÓN

El sector energético a nivel mundial depende en gran parte del uso de recursos no renovables como combustibles, uno de los más usados es el carbón. En el caso de Colombia se considera que el carbón, es una de las principales fuentes de energía en el presente como en un futuro, debido a las grandes reservas de carbón térmico y en menor proporción de carbón coquizable en diferentes regiones del país.

El Departamento de Boyacá, se ha caracterizado por tener importantes yacimientos de carbón coquizable en municipios como Siachoque y Samacá y carbón térmico en municipios de Paipa, Topaga, Socha, Tasco entre otros. Teniendo como referencia que estos carbones tienen aplicaciones diferentes, el coquizable para producir coque metalúrgico y el térmico es usado principalmente en procesos de combustión en calderas para la generación de energía.

Por el amplio uso que tienen los carbones térmicos sus reservas en el tiempo han ido disminuyendo, obligando al sector eléctrico a buscar alternativas que garanticen la estabilidad en la generación de energía a partir del carbón. Además se encuentran yacimientos de carbones coquizables con alto porcentaje de materia volátil que impiden su uso directo para producir coque, debido a que presentan baja estabilidad.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal, estudiar la viabilidad de mezclar carbón coquizable alto en volátiles del municipio de Samacá, Boyacá con carbón térmicos del municipio de Paipa Boyacá, para ser usados en procesos de combustión, en una cámara de leche fijo a nivel laboratorio, evaluando temperatura, tiempo de combustión, productos de combustión y poder calorífico. Estos valores se confrontan con la combustión de solo carbones térmicos. De esta manera se busca combustibles alternativos que en condiciones de mezcla con los carbones térmicos lleguen a ser un tener un buen comportamiento en los procesos de combustión en calderas para la generación de energía.

Inicialmente se caracterizan los carbones térmicos y los carbones coquizables por análisis próximo (humedad, ceniza, materia volátil, carbono fijo) azufre poder calorífico. Luego se diseñan y caracterizan las mezclas por análisis próximo y poder calorífico, para someterlas al proceso de combustión completa en una cámara de lecho fijo a nivel de laboratorio. Se evalúa la composición de los productos de la combustión por medio de la técnica de análisis Orsat. Finalmente se determina las mejores condiciones de mezclado de carbones térmicos con carbones coquizables, para su empleo como combustibles en la generación de energía.

El desarrollo del proyecto se dividió en tres fases: en la primera se realiza el muestreo del carbón térmico en la mina “El Porvenir” ubicada en la Vereda El Volcán del municipio de Paipa Boyacá y el muestreo del carbón coquizable en la mina “La Banda” ubicada en la Vereda Salamanca del municipio de Samacá Boyacá. Se llevan las muestras al laboratorio y se les realiza su respectiva preparación y caracterización fisicoquímica para su posterior uso.

En la segunda fase se diseñan 3 mezclas en proporciones de 60% carbón térmico 40 % carbón coquizable, 70% carbón térmico 30 % carbón coquizable, y, 80% carbón térmico 20 % carbón coquizable. Siendo caracterizadas mediante análisis próximo, azufre y poder calorífico.

En la tercera fase las mezclas se someten al proceso de combustión, en una cámara de lecho fijo, determinando temperatura de combustión, tiempo de la reacción y gases de chimenea mediante la técnica de Orsat.

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar mezclas de carbón coquizable con carbón térmico de la región de Boyacá, frente al proceso de combustión completa en una cámara de lecho fijo a nivel laboratorio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los carbones térmicos y coquizables a emplear, por análisis próximo y poder calorífico.
- Diseñar y evaluar mezclas de carbones coquizables y térmicos que garanticen condiciones adecuadas de combustión.
- Evaluar el proceso de combustión de las mezclas de carbones coquizables y térmicos en una cámara de lecho fijo a nivel de laboratorio.
- Determinar la composición de los productos de la combustión por medio de la técnica de análisis Orsat.
- Analizar con base en los resultados obtenidos las condiciones adecuadas de mezclado de carbones coquizables con térmicos para su empleo como combustibles para la generación de calor en procesos de combustión completa.

JUSTIFICACION

El mercado del carbón coquizable hoy en día tiende a disminuir debido al bajo consumo, y por la tendencia mundial de buscar alternativas de sustitución energética especialmente en la fabricación de acero en alto horno. El Departamento de Boyacá, se ha caracterizado por tener importantes yacimientos de carbón coquizable y térmico. Teniendo como referencia que estos carbones tienen aplicaciones diferentes, el coquizable para producir coque metalúrgico y el térmico es usado principalmente en procesos de combustión en calderas para la generación de energía eléctrica. El mercado de estos carbones es diferente y por consiguiente se ven enfrentadas sus industrias a realidades económicas distintas. Estudios de investigación a nivel internacional muestran la viabilidad de usar carbones de menores características frente a proceso de combustión, como lo son los carbones coquizables al mezclarse con carbones térmicos, como una estrategia para garantizar la sostenibilidad de la explotación minera y enfrentar los momentos difíciles propiciando otros usos a los convencionales.

Se hace necesario evaluar la adición de carbones coquizables a carbones térmicos que van a ser sometidos a procesos de combustión directa, buscando mantener las características y condiciones que este proceso exige. Por ello el presente estudio busca determinar cuál es la mezcla adecuada entre un carbón térmico con un carbón coquizable de la región de Boyacá, al someterlo a combustión completa en una cámara de lecho fijo a nivel laboratorio, evaluando los productos de combustión (cenizas y gases de chimenea).

De esta forma la pregunta de investigación que el presente estudio pretende abordar corresponde a:

¿Qué proporción de carbón coquizable puede ser adicionado a un carbón térmico de la Región de Boyacá que garantice condiciones adecuadas para en un proceso de combustión, evaluando sus propiedades elementales, poder calorífico y sus productos de combustión?

2. MARCO REFERENCIAL

En el presente capítulo, se expondrán todos los conceptos y definiciones necesarias para el entendimiento del proyecto. Así mismo, se incluye un breve estado del arte de procesos de combustión similares al realizado.

2.1 MARCO TEÓRICO

A continuación, se presenta una descripción de los principales conceptos teóricos necesarios para abordar el contenido y desarrollo de este proyecto.

2.1.1 Carbón mineral. El carbón es el combustible fósil más abundante en el mundo, fuente principal de energía en el presente y futuro cercano, y juega un rol especial en el desarrollo económico e industrial de los países¹. Como roca sedimentaria, el carbón varía notablemente en sus propiedades fisicoquímicas en función de su madurez y el entorno geológico en donde se originó. Se encuentra compuesto principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno y se formó a partir de biomasa que se acumuló en depósitos de lodos y otros sedimentos sufriendo una primera transformación debido a la acción de bacterias aerobias y anaerobias; los movimientos de la corteza terrestre enterraron estos depósitos a grandes profundidades para que por acción de altas presiones y temperaturas durante largos periodos de tiempo continuara la transformación fisicoquímica de la biomasa inicial formando las vetas de carbón, proceso que se denomina comúnmente carbonificación o metamorfismo del carbón ².

2.1.1.1 Clasificación del carbón³. Los carbones según su aplicación se clasifican en:

- **Carbones térmicos.** La propiedad más importante en estos carbones es el poder calorífico. Se usan en combustión directa para la producción de vapor en la generación de energía eléctrica, entre sus más importantes aplicaciones.

¹ Höök, M. and K. Aleklett, Historical trends in American coal production and a possible future outlook. *International Journal of Coal Geology*, 2009. 78(3): p. 201-216.

² Speight, J.G., *The chemistry and technology of coal*. 270 Madison Avenue, New York. Marcel Dekker, Inc. , 1994.

³ ARDILA BARRAGAN, Marco. *Cartilla carbones y coques*. [en línea]. Disponible: <https://steelgood.files.wordpress.com/2013/05/cartilla-carbones-y-coques.pdf>.

- **Carbones coquizables** Las propiedades más importantes en estos carbones son: el contenido de materias volátiles, la dilatometría y la plastometría. Se emplean en la producción de coque, ya sea de forma unitaria o en mezclas.

La norma ASTM D 388⁴ propone una clasificación de acuerdo con el rango para carbones, el cual está definido como el grado de metamorfismo, o alteración progresiva del mineral, desde el lignito hasta la antracita. En la Tabla 1 se presenta la clasificación del carbón por rango de acuerdo con su contenido de Carbono fijo, materia volátil, poder calorífico y algunas características aglomerantes que pueden presentar.

Tabla 1. Clasificación de los carbones según su rango, ASTM D 388-05

CLASE	GRUPO	CARBONO FIJO %		MATERIA VOLÁTIL %		PODER CALORIFICO Cal / g.		CARÁCTER AGLOMERANTE
		≥	<	≥	<	≥	<	
I. ANTRACITA	1. Meta – Antracita	98	--	--	2	--	--	AGLOMERANTE
	2. Antracita	92	98	2	8			
	3. Semi – Antracita	86	92	8	14			
II. BITUMINOSO	1. Bituminoso Bajo Volátil	78	86	14	22			COMUNMENTE AGLOMERANTE
	2. Bituminoso Medio Volátil	69	78	22	31			
	3. Bituminoso Alto Volátil A		69	31		7780	7780	
	4. Bituminoso Alto Volátil B					7220	7220	
	5. Bituminoso Alto Volátil					6380	6380	
III. SUB-BITUMINOSO						5830	6380	NO AGLOMERANTE
						5830	5830	
						5280	5280	
IV. LIGNITO						4610	4610	NO AGLOMERANTE
						3500	3500	

Fuente: norma ASTM D 388-05

2.1.2 Proceso de muestreo de carbones. El objetivo de un muestreo de carbones, es obtener una muestra representativa de una unidad de muestreo, de tal manera que la distribución y proporción de sus variables físicas, químicas y petrográficas sean equivalentes a esa unidad de muestreo.⁵

⁴ ASTM – AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS., Standard Classification of Coals by Rank. ASTM D 388-05., USA, 2005.

⁵ BAEZ R, Ignacio. Manual de carbones y coquización. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC. Sogamoso. 2004., pp. 74-94

Un muestreo adecuado permite evaluar o conocer entre otros los siguientes resultados:

- Caracterizar física, química, petrográfica y tecnológicamente los carbones.
- Conocer la variabilidad de los diferentes parámetros de calidad analizados.
- Planificar las etapas de desarrollo y producción de proyectos mineros.
- Definir usos industriales y tecnológicos del carbón.
- Realizar contratos de compraventa
- Identificar problemas de tipo ambiental durante la producción, manejo, procesos de beneficio y utilización del carbón.

2.1.2.1 Tipos de Muestreo. Los tipos de muestreo de los carbones se pueden clasificar de acuerdo con las siguientes etapas:

- ✓ **Durante la fase de exploración y desarrollo**
 - Muestreo de columna
 - Muestreo de canal
 - Muestreo de perforación
- ✓ **Durante la operación minera**
 - Muestreo en bandas transportadoras
 - Muestreo en Volquetas, vagones y camiones
 - Muestreo en pilas y barcos
- ✓ **Para propósitos especiales (Muestras para objetivos específicos)**
 - De uso industrial
 - Para uso científico
 - Para caracterización petrográfica
 - Para caracterización palinológica
 - Para caracterización química
 - Para caracterización física
 - Para propósitos educativo

Para el muestreo en pilas, que corresponde al proceso desarrollado en este trabajo debe se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- ✓ En todos los casos, cada incremento tomando representa solo una pequeña zona correspondiente al área y profundidad donde se toma.
- ✓ Si se apilan carbones en áreas separadas, deberá tomarse una muestra bruta de cada área.
- ✓ Colectar los incrementos en puntos uniformemente espaciados sobre la superficie de carbon expuesto.

- ✓ Si la pila es muy grande se recomienda diseñar un plan de muestreo sobre un plano.
- ✓ El dispositivo de muestreo debe ser adecuado para alcanzar la base de la pila en cualquier sitio.
- ✓ Generalmente, la capa superficial presenta calidad diferente debido a la exposición al aire, segregación, menor contenido de humedad.
- ✓ Para llegar al fondo de las pilas, es necesario abrir con palas, de tal manera que las paredes formadas tengan un ángulo menor que el ángulo natural de reposo; en estos casos se deben tomar incrementos desde el fondo del hueco hasta el tope.

2.1.3 Caracterización del carbón. Algunos de los ensayos que se practican para caracterizar los carbones para combustión son:

2.1.3.1 Análisis próximo. El análisis inmediato da una medida de las cantidades relativas de los componentes orgánicos volátiles y no volátiles como también de la humedad y los minerales no combustibles. Comprende el porcentaje en peso de la humedad, la materia combustible volátil, el carbono fijo y las cenizas⁶

- **Humedad** El papel del agua y su medida cuantitativa en el carbón es complejo ya que está presente en más de una forma. La humedad se determina para establecer la pérdida de masa de un carbón o coque cuando se calienta bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo, atmósfera, cantidad de masa y especificaciones técnicas.
- **Materias volátiles** Las materias volátiles son desprendimientos gaseosos de la materia orgánica e inorgánica durante el calentamiento exigido por la norma. A medida que el carbon se calienta, se desprenden productos gaseosos y líquidos. Existe un desprendimiento bajo a temperaturas bajas, pero aumenta a partir de los 550 °C aproximadamente. Las materias volátiles disminuyen a medida que aumenta el grado de carbonificación de los carbones (rango). La cantidad de materias volátiles depende de la rata de calentamiento a la cual es sometido, del medio ambiente y del tamaño de las partículas. Generalmente un calentamiento rápido aumenta el porcentaje de materias volátiles. Por estos motivos el análisis de materias volátiles esta normalizado. La calidad de las materias volátiles en poder calorífico refleja la cantidad de materia vegetal convertida a hidrocarburos.
- **Cenizas** Las cenizas de un carbón son el producto de la combustión, cuando el carbón es quemado en condiciones rígidamente controladas de

⁶ BAEZ R, Ignacio. Manual de carbones y coquización. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC. Sogamoso. 2004., pp. 106-108.

temperatura, tiempo y atmosfera, es decir, un residuo de la calcinación a 750 °C de minerales y sales existentes en el carbon. La cantidad de cenizas de un carbon es una medida para la cantidad de minerales que contiene, pero el porcentaje de cenizas en un carbon no es igual al porcentaje de minerales del mismo.

- **Carbono fijo** E carbono fijo es la parte que no es volátil y que quema en estado sólido. Se encuentra en el residuo de coque que queda en el crisol luego de determinadas la materia volátil. Si a este residuo se le restan las cenizas se obtiene el carbono fijo, por lo que generalmente el porcentaje de carbono fijo no se obtiene pesando el residuo sino por diferencia, una vez conocidas la humedad, las cenizas y la materia volátil. El carbono fijo se incrementa con el rango.

2.1.3.2 Poder calorífico. Se llama poder calorífico de un cuerpo a su calor de combustión referido a la unidad de masa. La energía específica: es la cantidad de calor generada por una combustión completa de una masa especifica de carbon en presencia de oxigeno. La energía específica (valor calórico) es la energía liberada por un carbon en combustión debido a la reacción exotérmica de los compuestos de hidrocarburos con el carbon.⁷

2.1.4 Combustión. La combustión es el proceso químico en el cual un oxidante reacciona rápidamente con un combustible para liberar la energía almacenada como energía Térmica, generalmente en formas de gases a altas temperaturas. Además, durante el proceso de combustión también se liberan pequeñas cantidades de energía electromagnética (luz), energía eléctrica (liberaciones de iones y electrones) y energía mecánica (ruido). El comburente universal es el oxígeno, por lo que en la práctica se utiliza el aire como comburente, ya que está compuesto, prácticamente, por 21% Oxígeno (O₂) y 79% Nitrógeno (N₂); únicamente en casos especiales se utilizan atmósferas enriquecidas en oxígeno e incluso oxígeno puro (por ejemplo en soldadura). La energía de activación es el elemento desencadenante de la reacción de combustión⁸.

2.1.4.1 Tipos de combustión. Con el objeto de analizar este tipo de reacción es necesario distinguir entre tres distintos tipos de combustión, la denominada combustión perfecta o estequiométrica, la incompleta y la completa.⁹

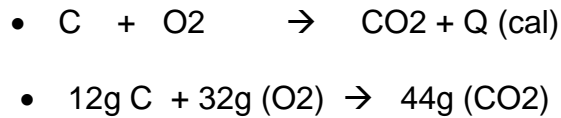
⁷ BAEZ R, Ignacio. Manual de carbones y coquización. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC. Sogamoso. 2004., pp. 113-114.

⁸ SARRIA LOPEZ, Bienvenido."Universidad de Cienfuegos" Carlos Rafael Rodríguez, Facultad de Ingeniería Mecánica. Cienfuegos,2004., pp. 3.

⁹ Jiménez, S., combustión del carbón, Laboratorio de investigación en tecnologías de la combustión, LITEC, Perú., pp. 5-6

- **Combustión Estequiométrica.**

Es la que se produce, teóricamente, de acuerdo a cantidades estequiométricas de combustible y comburente. Este tipo de reacción sólo se puede lograr en un laboratorio y no se da en la práctica industrial. Un ejemplo de reacción perfecta sería el siguiente:

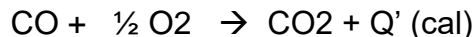


Es decir que reaccionen completamente 12g de carbono con 32g de oxígeno para dar 44 g de dióxido de carbono y desprender calor. Como se ve, en este caso, han reaccionado un átomo-gramo de carbono con una molécula de oxígeno para dar una molécula-gramo de dióxido de carbono, ello implicaría que hasta el último átomo de carbono ha reaccionado con la última molécula de oxígeno para dar una molécula de dióxido de carbono, lo cual es imposible en las reacciones de combustión industrial.

- **Combustión incompleta.** Se llama así a la reacción en la cual no se quema todo el carbono del combustible dando dióxido de carbono, sino que reacciona para dar monóxido de carbono y en algunos casos queda C libre incandescente. Esta última situación se puede visualizar en la llama de color amarillo de un mechero Bunsen cuando el gas se quema con poco aire. Un ejemplo de combustión incompleta, se da en la reacción siguiente:



También esta reacción es exotérmica, pero la cantidad de calor desprendido es menor que en el caso de la combustión perfecta. El monóxido de carbono resultante podría entrar nuevamente en combustión y desprender más calor, según la siguiente reacción:



- **Combustión completa** La combustión completa es aquella en la cual todo el carbono del combustible reacciona con el oxígeno del comburente para dar dióxido de carbono. La reacción es similar a la de la combustión perfecta, con la diferencia que, para que ocurra, es necesario agregar una mayor cantidad de oxígeno (con el comburente) que la requerida de acuerdo al cálculo estequiométrico. Dicha cantidad en exceso (cuando se utiliza aire como comburente), se denomina “exceso de aire”.

Para que la combustión sea buena se requieren las siguientes condiciones:

- ✓ Temperatura suficientemente alta para que los constituyentes entren en ignición.
- ✓ Proporción adecuada aire/comburente.
- ✓ Grado de mezcla adecuada para que el aire y el combustible e tengan un buen contacto superficial.
- ✓ Tiempo necesario para el desarrollo de una combustión completa

2.1.4.2 Aire Teórico. Aire teórico es la mínima cantidad de aire capaz de suministrar el oxígeno suficiente para lograr la combustión completa de todos los componentes del combustible susceptibles de ser oxidados. En una combustión con el aire teórico no se obtiene oxígeno en los productos. Sin embargo en la realidad, debido a los problemas técnicos que implica conseguir una mezcla de aire-combustible homogénea, suele usarse más aire del teórico, para así tratar de acercarse lo más posible a una combustión completa. La relación entre el aire real y el aire teórico es conocida como el porcentaje de aire teórico y la diferencia entre el aire real y el aire teórico como exceso o déficit de aire, según sea el caso¹⁰.

2.1.4.3 Leyes fundamentales de la combustión. Las leyes fundamentales, sobre las que se basan todos los cálculos de combustión, son las siete que se exponen a continuación¹¹.

- **Ley de la conservación de la materia** La materia ni se crea ni se destruye. Como consecuencia, en un proceso de combustión debe establecerse una igualdad entre el peso total de sustancias entrantes y de sustancias salientes o productos. Si se combinan A kg de una sustancia con B kg de otra, siempre aparecerán (A + B) de productos finales.
- **Ley de los gases ideales** El volumen de un gas es directamente proporcional a su temperatura absoluta e inversamente proporcional a su presión absoluta. La constante de proporcionalidad es la misma para cualquier gas perfecto y se denomina por la letra R, esta ley puede expresarse de la forma:

$$PV = nRT$$

Siendo:

V = volumen del gas en m³/mol
 T = temperatura absoluta en °K

¹⁰ Jiménez, S. Combustión del carbón, Laboratorio de investigación en tecnologías de la combustión, LITEC, Perú., pp. 7.

¹¹ MARQUEZ, Manuel. Combustión y quemadores. 1 ed.: Marcombo, 2005. 208p

P= presión absoluta en Pa

R= constante universal de los gases, 8,314 J/mol °K

Esta ecuación establece que un mol de cualquier gas perfecto en iguales condiciones de presión y temperatura, ocupa siempre el mismo volumen. Los experimentos demuestran que la mayoría de los gases se aproximan bastante a esta ley.

- **Ley de Avogadro.** Volúmenes iguales de gases diferentes, a la misma presión y temperatura, contienen los mismos números de moléculas. Como un mol de cualquier gas en las mismas condiciones de presión y temperatura ocupa el mismo volumen, resulta que en un mol de cualquier gas hay el mismo número de moléculas.
- **Ley de Amagat.** El volumen total ocupado por una mezcla de gases es igual a la suma de los volúmenes que ocuparían cada uno de los componentes cuando se encontrasen a igual presión y temperatura que la mezcla. Esta ley es similar a la de Dalton, aunque, considerando los efectos aditivos de los volúmenes en lugar de las presiones. Si tres gases A, B Y C están a la presión P y a la temperatura T, ocupan los volúmenes V_A , V_B y V_C , cuando se mezclan, manteniendo las mismas presión y temperatura, el volumen que ocupara será $V_A + V_B + V_C$.

2.1.4.4 Concepto de mol. El número de kilogramos de una sustancia agua a su peso molecular, se llama molécula- kilogramo o mol. Por ejemplo el carbono tiene un peso molecular de, por lo tanto el mol de carbono pesa 12 kg. En el caso de gases, el volumen ocupado por un mol en condiciones normales se llama volumen molar y es una constante igual a 22.4 m³ a 0^a C y 1 atm presión.

2.1.4.5 Temperatura de ignición. La temperatura de ignición es la temperatura más baja, a la cual se genera calor por la combustión, de manera más intensa que el calor que se pierde al medio circundante y la combustión se convierte en auto-propagada (auto-propagación de la combustión). La mezcla combustible-aire no quemará libre y continuamente para valores de temperaturas inferiores a la temperatura de ignición, a menos que se suministre calor para que pueda ocurrir la reacción química entre el combustible y el aire¹².

2.1.5. Análisis de gases. A continuación se describen algunos de los métodos de análisis de concentraciones de gases comúnmente empleados.

¹² SARRIA LOPEZ, Bienvenido."Universidad de Cienfuegos" Carlos Rafael Rodríguez, Facultad de Ingeniería Mecánica. Cienfuegos,2004., pp. 5

2.1.5.1 Métodos electroquímicos Se basan en la determinación de propiedades electroquímicas, y su relación lineal con la concentración de una sustancia presente en la disolución. Por ejemplo, la medición en una celda química manteniendo un estado estable o equilibrio y su relación con la concentración de una especie involucrada en el intercambio de iones, utilizando la ecuación de Nerst, es la base de la potenciometría. Otras técnicas de medición basadas en las propiedades en las propiedades electroquímicas son: la voltametría, y electrogravimetría.¹³

2.1.5.2 Métodos Espectrofotómetros. Forman parte de los métodos ópticos de análisis, y se fundamentan en la espectrofotometría como técnica de medición de la radiación que llega a un detector debido al fenómeno de absorción de luz por parte de una sustancia absorbente. Estas mediciones se realizan en los espectros comprendidos entre 220 y 800 nm (visible y ultravioleta). Estos fenómenos se rigen por las leyes de absorción, en las cuales se relaciona la cantidad de absorbente en una solución y el grado de absorción de luz de dicha solución. La ley de Lambert- Beer constituye la base de los análisis cuantitativos de espectrofotometría. En dicha ley se relacionan el grado de absorbancia de una solución con la concentración y la longitud del paso del haz de luz a través de la solución. Siendo la relación entre la absorbancia y la concentración del absorbente, directamente proporcionales. Es importante mencionar, que la aplicación de esta ley está restringida para el rango de concentraciones bajas o soluciones diluidas (menores a 0,02M)¹⁴ .

2.1.5.3 Métodos Cromatográficos. La cromatografía es una técnica de separación físico-química en la cual, los compuestos que se van a separar se distribuyen en dos fases: una estacionaria, de gran desarrollo superficial, y otra móvil que pasa a través de la fase estacionaria. Cuando una mezcla de distintos componentes entra al sistema, se produce una distribución de magnitud diferente, para cada componente entre las fases. Esto conlleva a la separación de los compuestos al desplazarse a una velocidad específica dentro del sistema¹⁵

2.1.5.4 Aparato de Orsat. ¹⁶ El primer equipo con principios y características similares fue diseñado por Regnault y Reiset quienes lo presentaron a la j. ch. soc de Londres en 1853; la modificación que realizó Fisher valió a Orsat para

¹³ GENNARO, A., "Remington Farmacia". Panamericana, Buenos Aires, pp, 748-749(2003).

¹⁴ SILVA, M. y GRACIA, M.J., "técnico especialista en laboratorio de atención primaria", mad, España, pp. 347-352 (2006).

¹⁵ MENENDEZ, F.; "higiene industrial. Manual para la formación del especialista", Lex Nova, Valladolid, pp. 146-150 (2008).

¹⁶ URIETA, F., "Diseño y construcción de un sistema Orsat modificado para el análisis de biogás . Trabajo de fin de carrera Ingeniería Química, Leganés, "universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2010., pp. 37-56.

perfeccionar el aparato en 1875, pero hay que aclarar que el dispositivo ha sufrido continuas modificaciones a lo largo de las décadas hasta la actualidad, que mejoran los resultados acercándose mucho a la realidad.

Se trata de un dispositivo, a priori sencillo, que permite realizar un análisis volumétrico de gases en base seca (es decir, no tiene en cuenta el vapor de agua presente en los gases de combustión), habitualmente de los productos de la combustión.

- **Principio del analizador de gases.** Se trata de un análisis volumétrico restringido a la medición de volúmenes de gases. Un volumen medido de una mezcla de gases, a presión y temperatura conocidas, se somete a la acción de reactivos químicos selectivos absorbentes (para separar en procesos sucesivos los distintos constituyentes, cuyas cantidades se determinan al ser eliminados de la mezcla, por la disminución de volumen).

Figura 1. Aparato de Orsat

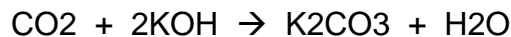


Fuente: autor

En general el Orsat más común (figura 1) proporciona el porcentaje en dióxido de carbono (absorbido por hidróxido de potasio, KOH), oxígeno (absorbido por ácido

pirogálico o solución alcalina de pirogalol, $C_6H_6O_3$) y monóxido de carbono (absorbido por una solución ácida de cloruro cuproso, $CuCl$) realizándose el análisis de los gases en este orden. El resto del contenido de gases (hidrocarburos, argón, etc.) se incluirá dentro del porcentaje de nitrógeno (N_2) determinándose indiferenciadamente por balance volumétrico; se debe tener cuidado, si el gas que se está analizando contiene dióxido de azufre (SO_2), hidrocarburos u otros gases diferentes a CO , CO_2 , O_2 y N_2 en grandes proporciones tales que puedan afectar a los resultados, el aparato Orsat tradicional no es capaz de determinarlos, y aunque el error ya sería considerable, se adicionarían al valor de % N_2 .

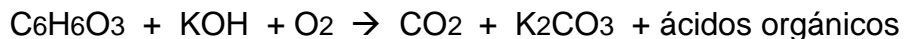
Dióxido de carbono (CO_2) Se mide poniendo en contacto una muestra de un volumen conocido, por lo general 100 ml, con una solución de hidróxido de potasio (KOH). El dióxido de carbono reacciona con el hidróxido formando carbonato de potasio, como se muestra en la siguiente ecuación:



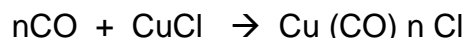
En la reacción, el dióxido de carbono desaparece de la fase gaseosa, y el carbonato de potasio formado se queda en la fase líquida; además, la pérdida de volumen del gas es igual al contenido de dióxido de carbono.

Se usa el hidróxido de potasio en lugar del hidróxido de sodio ($NaOH$) para absorber el dióxido de carbono debido a la mayor solubilidad del carbonato de potasio. Si se usa el hidróxido de sodio, el carbonato de sodio tiende a precipitar. Una pequeña cantidad suele flotar y obstruye los conductos capilares.

Oxígeno (O_2) Se mide generalmente por el uso de pirogalol alcalino ($C_6H_6O_3$). Bajo condiciones alcalinas, el pirogalol (1,2,3-trihidroxibenceno) es oxidado por el oxígeno. Los productos finales de las reacciones, tales como dióxido de carbono y ácidos orgánicos, se mantienen como sales de potasio en la solución absorbente. Si todo el dióxido de carbono ha sido eliminado de la muestra antes de ponerlo en contacto con el pirogalol alcalino, cualquier disminución en el volumen de la muestra será debido a la eliminación de oxígeno.



Monóxido de carbono (CO) se absorbe mediante una disolución acuosa de cloruro cuproso por formación cuantitativa de complejos carbonilo-cobre.



En la reacción, el monóxido de carbono desaparece de la fase gaseosa por reacción con el $Cu(I)$ de la disolución, y el complejo de coordinación formado permanece en la fase líquida; siendo, la pérdida de volumen del gas igual al contenido de monóxido de carbono.

2.2 ESTADO DEL ARTE

En 2015 los investigadores M. Mutthukrishnan S. S Krishnamoorthy y N.anantharaman. del centro de investigación del Carbon, Bharat Heavy Electricals Limited, Tamil Nadu, India. Presentan la caracterización de mezclas de carbón para una utilización efectiva en centrales térmicas, la caracterización de las mezclas está basada en técnicas analíticas convencionales como lo son análisis próximos y la determinación del poder calorífico según las normas ASTM. Además indica la relación del carbono fijo y la materia volátil comúnmente llamada relación de combustible que indica las características de combustión del carbon, cuanto menor es esta relación, mejor es la eficiencia de la combustión. El contenido de cenizas en el carbon influye en el tamaño de la caldera, así como en el rendimiento.¹⁷

En 2006 la investigadora M. Ssiddhartha Bhatt, de la división de conservación y desarrollo de la energía, sir CV Raman Road, Bangalore, india. muestra el efecto de la entrada de aire en la zona de combustión , el suministro de aire debe ser el aire teórico (estequiométrico) mas una cantidad optima de exceso de aire para la combustión de carbon pulverizado se utiliza un exceso de mínimo 20%. Si el exceso de aire no es el suficiente en la combustión del carbon puede provocar una producción excesiva de CO, aumentando el riesgo de explosión. La medición del exceso de aire se hace mediante la detección de O₂ o CO₂, uno de los métodos utilizados es el de los analizadores químicos con cambio de volumen como lo es el muestreador Orsat.¹⁸

En el artículo publicado por la facultad de ingeniería de la universidad Rafael Landívar, Termodinámica de equipos industriales: eficiencia de una caldera. Con ayuda del aparato de ORSAT se evalúa la cantidad de calor liberado y se establece la calidad de los gases de combustión, para obtener la eficiencia de operación de una caldera. El estudio se realizó en la caldera Cleaver Brooks CB-100-15 del Laboratorio de Operaciones Unitarias del TEC Landívar. ¹⁹

¹⁷ MUTTHUKRISHNAN, M. KRISHNAMOORTHY S. y N.ANANTHARAMAN. Characterization of coal blends for effective utilization in thermal power plants: Coal Research Centre, Bharat Heavy Electricals Limited, 2015. Tiruchirappalli, Tamil Nadu, India

¹⁸ SSIDDHARTHA M. Effect of air ingress on the energy performance of coal fired thermal power plants: Central Power Research Institute, Energy Conservation and Development Division, P.O. Box, Sir CV Raman Road, Bangalore, India

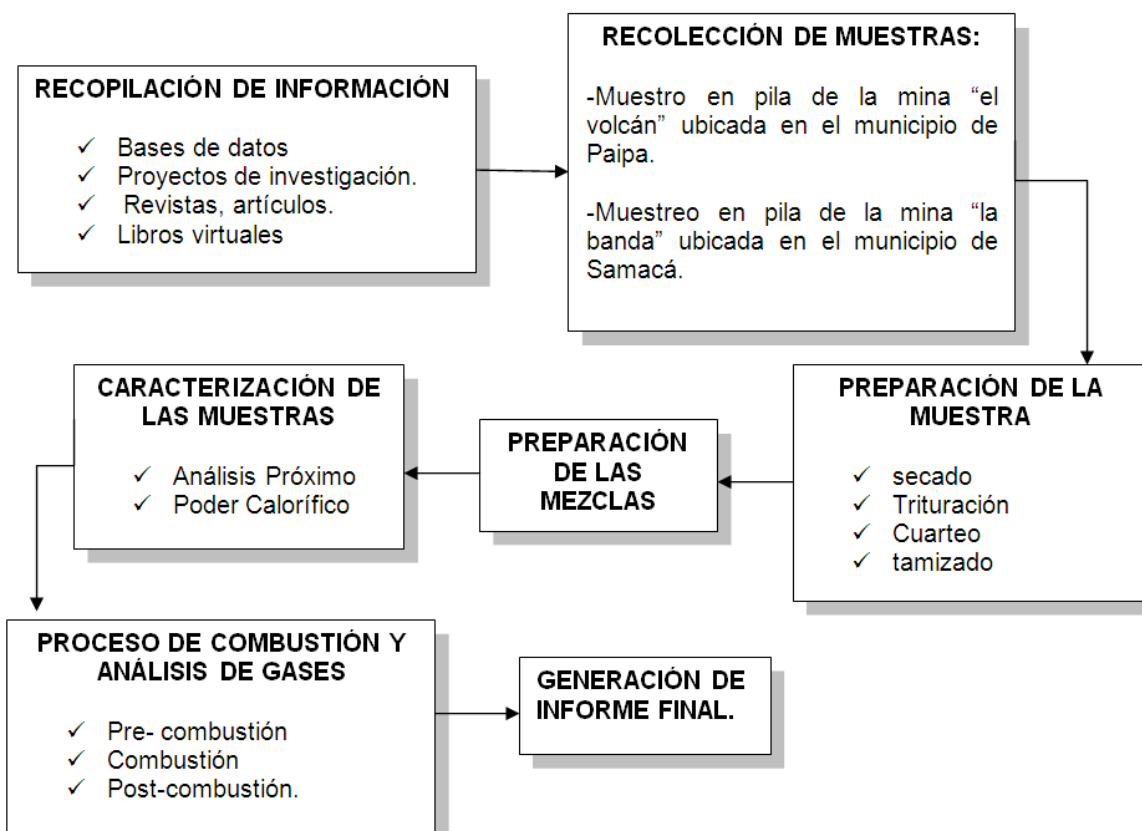
¹⁹ SALAZAR F, termodinámica de equipos industriales: eficiencia energética de una caldera”, universidad Rafael Landívar, Guatemala.2009

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1 PROCEDIMIENTO

El diseño metodológico utilizado para el desarrollo del proyecto se resume en la figura 2. Donde se muestran cada una de las etapas desarrolladas durante el desarrollo de la investigación.

Figura 2. Diagrama de flujo del desarrollo general del proyecto



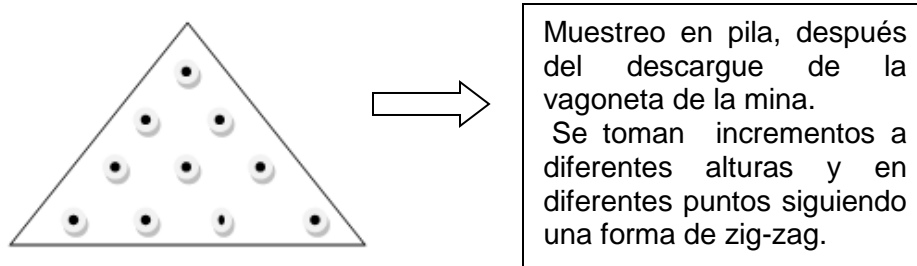
Fuente: Autor

3.1.1 Muestreo en minas y preparación de las muestras. Las muestras de carbón térmico se toman de la mina "el porvenir" ubicada en la vereda el volcán ubicado en el municipio de Paipa Boyacá, las muestras de carbón coquizable se toman de la mina "La Banda" ubicada en la vereda salamanca del municipio de Samacá Boyacá.

Se realiza muestreo en pila en las dos minas según la norma ASTN D-2234. La figura 3 muestra los incrementos tomados de acuerdo con el tamaño de la pila.

Obteniendo una muestra final representativa de carbón térmico y de carbón coquizable respectivamente. Las muestras son almacenadas, selladas y rotuladas en bolsas plásticas para luego ser trasladadas al laboratorio de Carbones de la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UPTC.

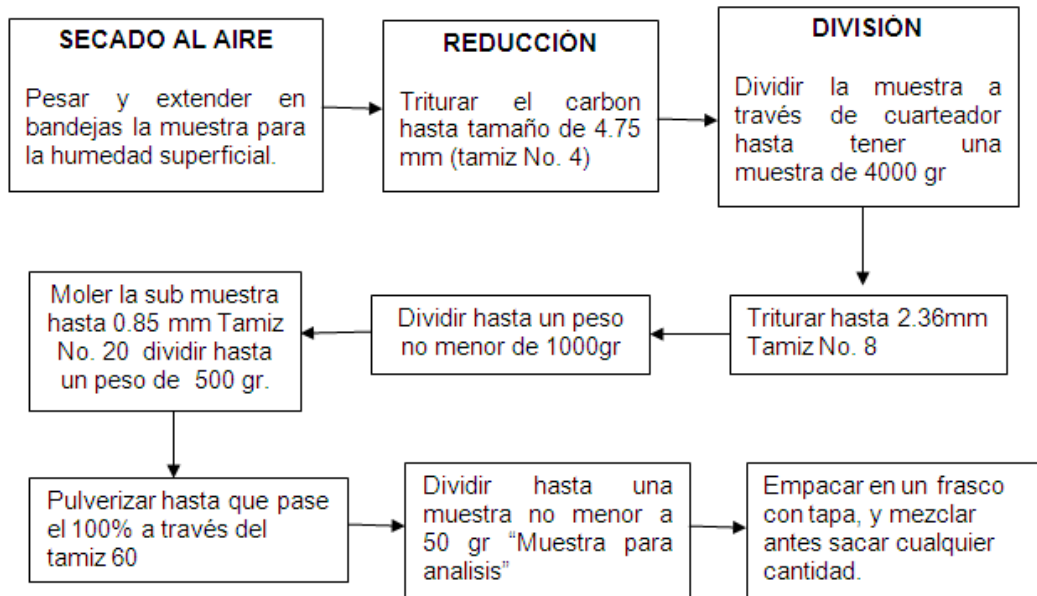
Figura 3. Esquema de la pila muestreada y de los incrementos



Fuente: Autor

3.1.2 Preparación de la muestra para análisis. Las muestras de carbón coquizable y de carbón térmico se prepararon bajo la norma ASTM D 2013 la figura 4 muestra el procedimiento a realizar, incluye secado trituración molienda y cuarteo. Para obtener una muestra de trabajo y una muestra testigo.

Figura 4. Procedimiento para la preparación de muestra para análisis.



Fuente: autor

3.1.3 Preparación de las mezclas. Los modelos de mezcla de carbón propuestos, buscan principalmente conseguir el mejor rendimiento en los procesos de combustión haciendo uso eficiente de los carbones disponibles, las mezclas propuestas en la tabla 2, presentan en mayor proporción carbón térmico, siendo el carbón coquizable el aditivo en menor proporción

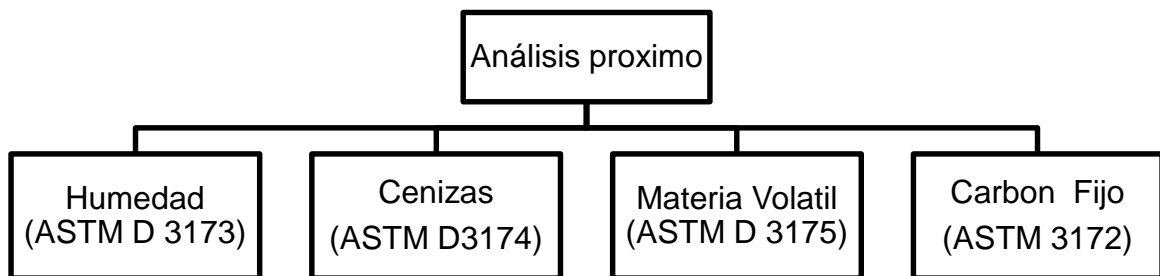
Tabla 2. Diseño de mezclas de carbones

	Carbón Térmico		Carbón Coquizable		Total de mezcla preparada
	%	gramos	%	gramos	
mezcla 1	60	1500	40	1000	2500
mezcla 2	70	1750	30	750	2500
mezcla 3	80	2000	20	500	2500

Fuente: Autor

3.1.4 Caracterización de los carbones y las mezclas. Para caracterizar los carbones se analizan aspectos importantes que nos permite evaluar la calidad de los 2 tipos de carbones que se van a utilizar en esta investigación. Se les realiza análisis inmediato o análisis próximo ASTM D 3172 (figura 5) azufre y poder calorífico.

Figura 5. Ensayos contemplados en la Norma ASTM D3172, sobre análisis próximo.



Fuente: Autor

3.1.4.1 Análisis próximo. Para realizar este análisis se toman las muestras previamente preparadas a un tamaño de grano de 250 micrómetros, malla número 60. Y se procede a realizar cada uno de los procedimientos. Se utiliza aproximadamente 1 gramo de muestra por cada ensayo realizado, es decir 2 gramos con su duplicado.

- **Humedad Superficial** Después de haber obtenido la muestra representativa,

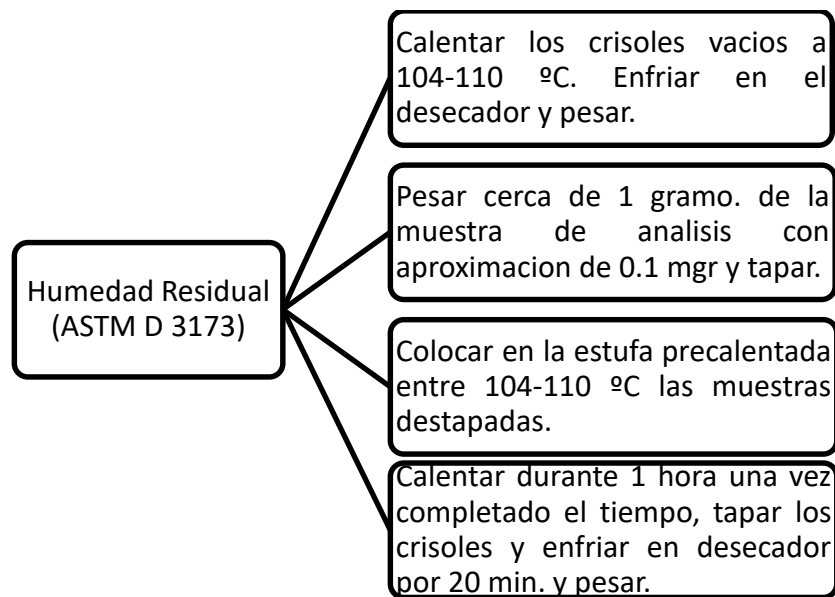
se lleva al laboratorio se pesa, y se deja expuesta a temperatura ambiente por 24 horas, pasado este tiempo se pesa nuevamente.

- **Humedad Residual** Es la cantidad de agua que absorbe el carbón, la cual se determina por la pérdida de peso que sufre una muestra calentada durante una hora a una temperatura entre 104 y 110 °C. (Figura 6.) Se calcula mediante la expresión:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Pérdida de peso}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{peso de la muestra} - \text{peso de la muestra seca}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

Figura 6. Procedimiento de la norma ASTM D3173

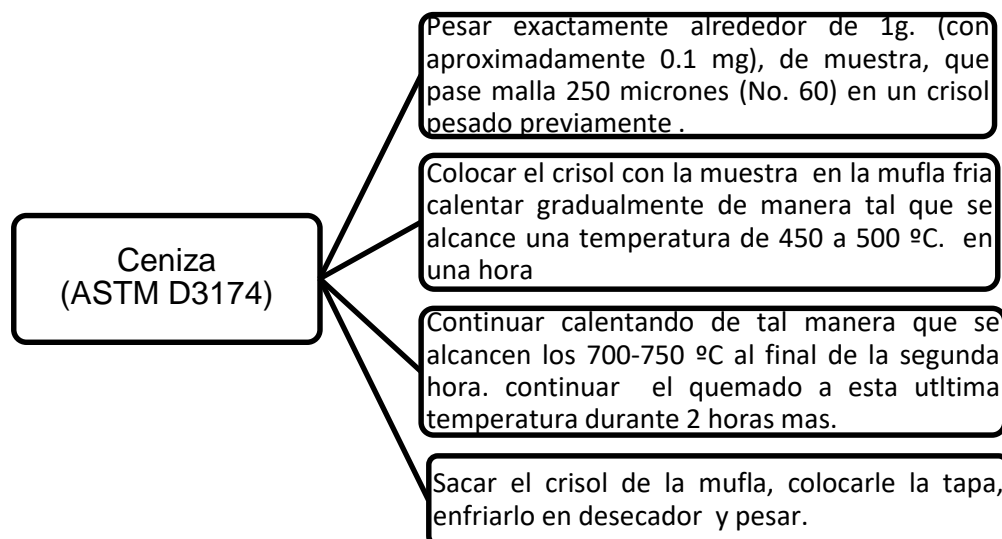


Fuente: Autor

- **Cenizas** Está compuesta de material mineral no combustible, se determina sometiendo a combustión completa una muestra con aire a 725°C. (Figura 7.). La operación de combustión termina cuando el residuo no cambia de peso con una calcinación adicional. El porcentaje será:

$$\% \text{ cenizas} = \frac{\text{Peso del residuo}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

Figura 7. Procedimiento de la norma ASTM D3174



Fuente: Autor

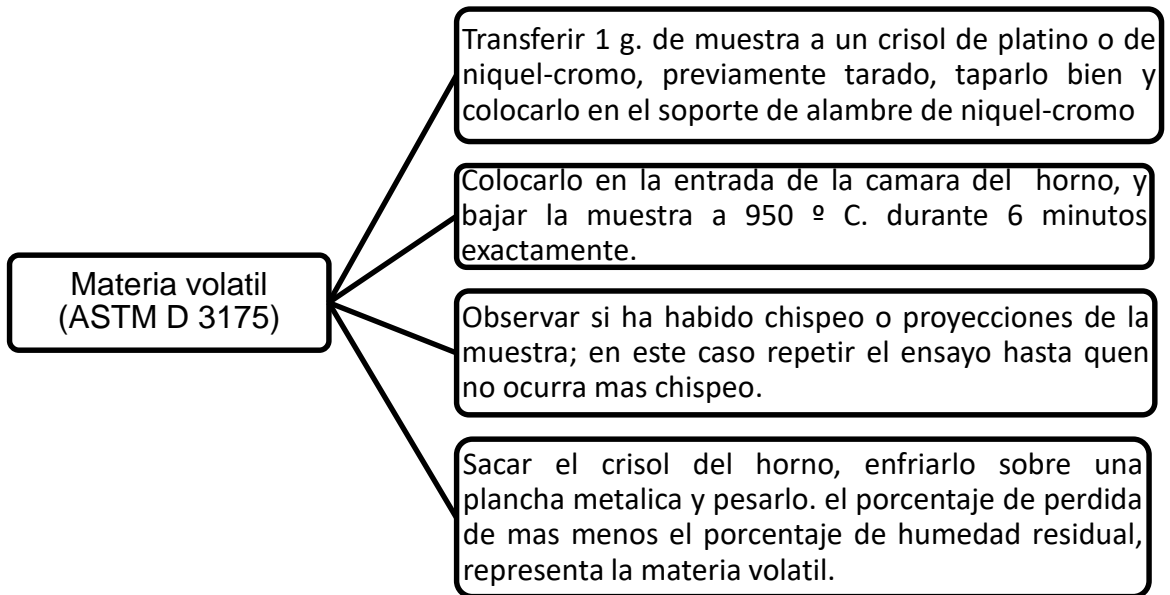
- **Materia volátil** Se trata de compuestos orgánicos, que contienen esencialmente todo el oxígeno, hidrógeno (excluyendo aquel de la humedad), azufre, nitrógeno y carbono. Su cuantificación es la pérdida de peso que presenta la muestra seca, calentada durante 7 minutos a una temperatura de 950 °C (figura 8).

$$\% \text{ Materia Volátil} = \frac{\text{peso de la muestra seca} - \text{peso final}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

- **Carbono fijo** Su porcentaje se evalúa por la diferencia de cien y los porcentajes calculados anteriormente.

$$\% \text{ Carbono Fijo} = 100 - (\% \text{ humedad} + \% \text{ Materia Volátil} + \% \text{ cenizas})$$

Figura 8. Procedimiento de la norma ASTM D 3175



Fuente: Autor

3.1.4.2 Poder calorífico El poder calorífico de las muestras estudiadas se realizó según la norma ASTM D5865-07. Equipo utilizado LECO AC600 (Figura 9)

Figura 9. Calorímetro LECO AC600, del instituto regional minero energético IRME, UPTC Sogamoso.



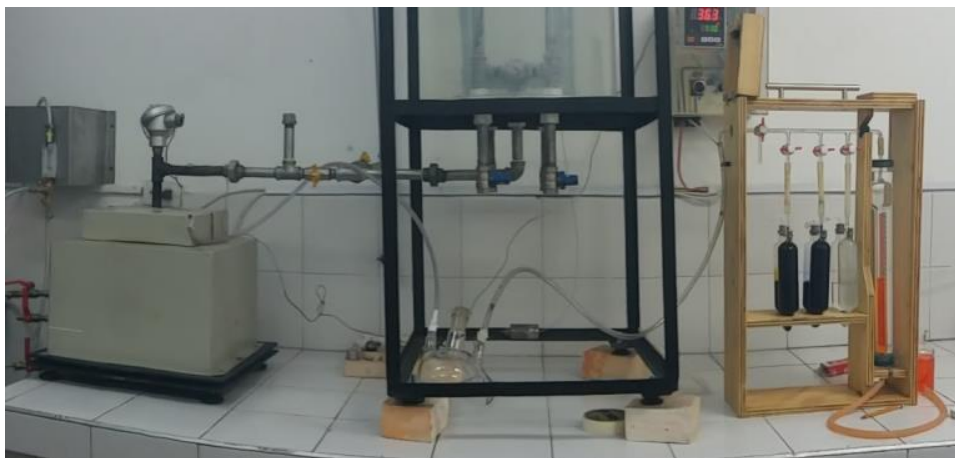
Fuente: Autor

3.1.5 Proceso de combustión y análisis de gases. Para realizar el proceso de combustión y análisis de gases se deben preparar

Antes de realizar el proceso de combustión se debe preparar todo el montaje con el cual se desarrolla el proceso de combustión de las mezclas de carbones térmicos con carbones coquizables con alto contenido en materia volátil. Se inicia con la puesta a punto del lugar donde se va a realizar el procedimiento. Se utiliza un reactor de lecho fijo el cual se puede ver en la figura 10. Este cuenta con entrada de aire el cual va a ser generado por un compresor, el flujo es controlado con un flujómetro a una velocidad de $2\text{ft}^3/\text{min}$.

3.1.5.1 Combustión de las mezclas. El proceso de combustión de las mezclas empieza teniendo como referencia los parámetros establecidos en la tabla 3. Se hace control de tiempo, temperatura y composición de gases de chimenea. El muestreo se realiza después del suministro de comburente en tres temperaturas distintas cada 8 minutos aproximadamente. Se realiza de la misma manera con la contramuestra de cada mezcla.

Figura 10. Montaje del proceso de combustión en cámara de lecho fijo, con análisis de gases con el aparato de Orsat.



Fuente: Autor

Se hacen pruebas preliminares con el fin de encontrar la temperatura de ignición de las mezclas de carbón haciendo inyección de aire a partir de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ para encontrar la temperatura óptima de encendido. En esta prueba también se busca tener un control del flujo de aire, tiempo, temperatura y muestreo de los gases. Después de realizar el proceso de combustión se deja enfriar el reactor hasta temperatura ambiente, el residuo que queda en el crisol se pesa para hallar la composición de cenizas producidas.

Tabla 3. Parámetros establecidos para el proceso de combustión de las mezclas

Muestra(g) 10.00 g	Temperatura de Ignición 300 °C	Muestra de Gas 100ml
Granulometría de la muestra 1.7 mm	Volumen de aire 2 Ft ³ /min	Constante universal de los gases ideales 8,314472 J/mol·K

Fuente: autor

3.1.5.2 Análisis de gases de chimenea. Para analizar los gases de combustión se utiliza el aparato de Orsat el cual permite determinar los porcentajes de CO₂, CO y O₂ que contienen dichos gases.

3.1.5.3 Descripción del equipo El aparato de Orsat cuenta con una bureta con camisa de agua (Figura 11a.) que tiene un volumen de 100 ml a efectos de dar resultados en porcentaje, conectada en la parte superior por una llave de tres vías (figura 11b), que la conecta a su vez con tres recipientes dobles los cuales contienen sustancias apropiadas para absorber los tres gases objeto de la medición. Cada uno de los tres recipientes consiste en dos tubos anchos unidos por un tubo pequeño en forma de U (figura 11c), todos con una válvula que permite el paso y la salida del gas que es objeto de análisis.

Figura 11. a. Bureta de 100ml con camisa de agua. b. llave de tres vías c. recipiente de absorción.



Fuente: Autor

La parte inferior de la bureta está cerrada por un cierre hidráulico (figura 12) formado por un tubo flexible unido a un vaso que contiene agua ligeramente acidulada (para evitar absorber CO_2 de los gases de combustión). La bureta se encuentra rodeada de una camisa refrigerante por la que circula agua de refrigeración. Con el objetivo de enfriar los gases a analizar y condensar el vapor de agua de los mismos que se incorpora al agua acidulada. La determinación se hace con gases secos (libres de vapor de agua). Los recipientes contienen soluciones absorbentes el primero contiene una solución de hidróxido de potasio, que absorbe el CO_2 ; el segundo solución de pirogalato potásico, que absorbe el oxígeno y la tercera solución de cloruro cuproso amoniacal, que absorbe el CO .

Figura 12. Botella niveladora del Orsat conectada a la bureta con un tubo de goma.



Fuente: autor

3.1.5.4 Preparaciones de las soluciones. Las soluciones a preparar son de tipo absorbente y estas van perdiendo su capacidad de absorción de acuerdo con el número de pruebas. Los reactivos utilizados deben ser manipulados de manera correcta y con mucha precaución para evitar accidentes o contaminación del ambiente. Se preparan 150 ml de cada una de las soluciones que corresponden al tamaño de los recipientes de absorción.

- **Solución de hidróxido de potasio al 35% (para la absorción de CO_2).** Se pesan 61,76g de KOH al 85%, y se trasvasa a un vaso de precipitado se añade H_2O destilada hasta un volumen aproximadamente la mitad del volumen final (150 ml) se agita con un agitador de vidrio hasta que la totalidad del sólido se haya disuelto luego se completa con H_2O destilada hasta el volumen requerido. Se pone el tapón y se agita para homogenizar la solución.

- **Solución de pirogalato potásico (para la absorción de oxígeno)** Se pesan 18g de ácido pirogálico, se trasvasa a un vaso de precipitado, se añade solución de KOH al 35% hasta un volumen aproximadamente la mitad del volumen final (150ml), se agita con un agitador de vidrio hasta que la totalidad del sólido se

haya disuelto luego se completa con solución de KOH al 35% hasta el volumen requerido. Se agita para homogenizar la solución.

- **Solución de cloruro cuproso amoniacal (para la absorción del CO).** Se pesan 33 g de cloruro de amonio (NH_4Cl) y 27 g de cloruro cuproso (CuCl) en 75 ml de agua, y añadimos agua amoniacal (por encima de 25% P/V), hasta completar 150 ml aproximadamente, agitar hasta que el precipitado blanco desaparezca.

- **Botella niveladora** Se disuelven 5 ml de ácido clorhídrico concentrado y 2 gotas de naranja de metilo por cada 100 ml de agua.

3.1.5.5 Calibración o patronamiento del Orsat

- **Prueba de estanqueidad.** Antes de utilizar el aparato Orsat, se debe tener en cuenta que un posible error en el análisis es aquel debido a las fugas en las líneas de transferencia, es necesario el uso de válvulas de vidrio esmerilado aunque estos son difíciles de mantener herméticos. Para minimizar las fugas en los grifos deben cubrirse con una ligera capa de grasa especial para generar vacío y apretar fuertemente. El Orsat se puede probar admitiendo y midiendo cierta cantidad de aire, por ejemplo de 40 a 90 ml se eleva la botella niveladora sometiendo el aire a presión y se le mantiene durante 5 minutos o más. Se vuelve a medir la cantidad de aire en la bureta comparándola con la medición original, si ha habido una disminución significa que hay una fuga y habrá que investigar sus orígenes

- **Calibración de las soluciones absorbentes** Para la calibración de las soluciones absorbentes se toma como referencia un cilindro de gas de composición CO_2/CO en proporciones 40/60 respectivamente y para el caso del oxígeno se toma como referencia un cilindro de oxígeno industrial composición 99.99%. Básicamente hay 2 parámetros que permanecen constantes: el volumen de la muestra y la constante universal de los gases.

Datos a medir:

- ✓ Temperatura ambiente y Presión atmosférica
- ✓ Lectura de volumen (ml) una vez absorbido el CO_2
- ✓ Lectura de volumen (ml) una vez absorbido el O_2
- ✓ Lectura de volumen (ml) una vez absorbido el CO

Por tanto se realiza una serie de mediciones para comprobar la exactitud y precisión del Aparato de Orsat, confrontándolas con las composiciones conocidas.

3.1.5.6 Cálculos fundamentales en el análisis Orsat. Los componentes son removidos por absorción directa en el siguiente orden: dióxido de carbono, oxígeno y monóxido de carbono. Lo que resta en la muestra es nitrógeno e hidrocarburos saturados, por lo tanto el cálculo del porcentaje absorbido se determina en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ componente} = \frac{\text{Decremento en el volumen}}{\text{Muestra de volumen}} * 100$$

3.1.5.7 Procedimientos de laboratorio para utilizar el Orsat. Los pasos a seguir en el manejo del Orsat son los siguientes

- Llevar el nivel de los reactivos en las distintas pipetas hasta las marcas grabadas en los cuellos como se muestra en la Figura 13. Lo cual se hace abriendo la llave de cada pipeta con la botella niveladora por encima del nivel del reactivo, bajándola luego lentamente con mucho tacto hasta que el reactivo alcance el nivel que señala la marca puesta en el cuello del recipiente.

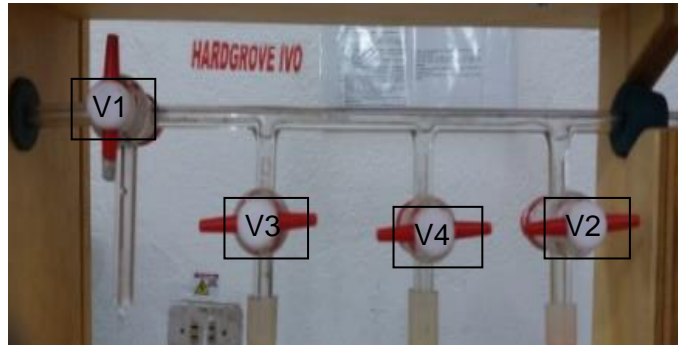
Figura 13. Soluciones absorbentes listas para la medición con sus respectivos reactivos a nivel de las marcas.



Fuente autor

- Purgar la manguera de recoger la muestra, el múltiple y la bureta medidora con el gas objeto de análisis. Para ello se conecta la manguera al foco emisor del gas en este caso a la bolsa tedlar. Se abre la válvula 1 (figura 14). Se succiona el gas bajando la botella niveladora, y se expulsa nuevamente subiendo la botella niveladora. Esta operación se repite 5 veces.

Figura 14. Válvulas que comunican la entrada al aparato de Orsat



Fuente: Autor

- Tomar la muestra definitiva (algo más de 100ml) abriendo la válvula 1 y bajando la botella niveladora igualando los niveles de líquido en la bureta y la botella y verificar que la lectura sea cero (0) (figura 15). Cerrar la válvula. En este momento se tienen 100 ml de gases a temperatura ambiente y presión atmosférica, lo cual permite leer directamente porcentajes.
- Absorber los componentes de la muestra en este orden: CO_2 , O_2 y CO . Para ello, elevar la botella niveladora para ejercer una ligera presión sobre la muestra, abrir la válvula correspondiente (v2, v3, v4) para comunicar los gases con el reactivo, subir la botella para forzar los gases a entrar en el recipiente del reactivo, regresar la muestra a la bureta bajando la botella, llevar el reactivo al nivel de referencia y cerrar la válvula de acceso.
- Igualar los niveles del líquido en la bureta y la botella y tomar la lectura. Repetir el procedimiento anterior con cada reactivo hasta que no se detecte cambio de volumen. Esto indica que se absorbió todo el gas, ya sea CO_2 , O_2 o CO .

3.1.5.8 Mantenimiento del aparato de Orsat. El mantenimiento de Orsat se basa principalmente en la limpieza de sus componentes, el más frecuente es el frasco de absorción de monóxido de carbono (figura 16) el cual a medida que pasa el tiempo van apareciendo precipitados de cobre y algunos precipitados blancos por lo que es necesario cambiar la solución y limpiar muy bien el frasco ya que estas partículas se puede adherir al vidrio y es causal de errores en la medición de gases. Es necesario revisar la estanqueidad del equipo cada vez que se vaya a utilizar.

Figura 15. Toma de la muestra para análisis en el aparato de Orsat



Fuente: Autor

La limpieza se realiza haciendo pasar por todos los componentes del equipo una solución de ácido nítrico al 10%, dejando reposar, durante 1 hora aproximadamente. Se desocupa el equipo y se filtra la solución de ácido nítrico, para luego volverla a pasar y se deja reposar como se muestra en la figura 17 hasta que la suciedad disminuya.

Figura 16. Frasco de absorción de monóxido de carbono



Fuente: Autor

Figura 17. Aparato de Orsat con solución de ácido nítrico al 10 % utilizada para limpiar sus componentes.



Fuente: Autor

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 MUESTREO Y CARACTERIZACION

4.1.1 Muestreo en las minas. De acuerdo al plan diseñado para la toma de incrementos y teniendo en cuenta el tamaño de la pila se obtiene una muestra final representativa de 50 kg de carbón térmico, y 25 kg de carbón coquizable como lo indica la tabla 4. A partir de estas muestras se preparan las mezclas y se les realiza la respectiva caracterización.

Tabla 4. Proceso de muestreo de carbones térmicos y coquizables en pila en los municipios de Paipa y Samacá (Boyacá)

MUESTREO				
Mina	PILA	No. De incrementos	Peso promedio de cada incremento	Peso total (kg)
El porvenir (Paipa)	Carbón térmico	50	1 kg	51.2
La Banda (Samacá)	Carbón coquizable	30	0.9 kg	25.6

Fuente: autor

4.1.2 Caracterización de los carbones y las mezclas los resultados de la caracterización se muestran en la tabla 5 para los carbones y la tabla 6 para las mezclas.

Tabla 5. Caracterización mediante análisis próximos y poder calorífico de carbones térmicos y coquizables de Paipa y Samacá (Boyacá)

Carbón térmico de la región de Paipa, Boyacá.						
	Humedad (%)	Cenizas (%)	Materia volátil (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico (cal/gramo)	% Azufre
Muestra 1	4.0688	4.4147	38.7222	52.7943	5691	1.92
Muestra 2	4.0879	4.4538	38.5735	52.8848	5643	1.89
Carbón coquizable de la región de Samacá, Boyacá.						
Muestra 1	0.8997	6.3029	36.7078	60.4896	7555	1.05
Muestra 2	0.8188	6.2285	36.6437	60.6090	7528	1.02

Fuente: Autor

Tabla 6. Caracterización de las mezclas de carbon térmico con carbon coquizable alto en volátiles

Caracterización de las mezclas						
	Humedad (%)	Cenizas (%)	Materia volátil (%)	Carbono Fijo (%)	Poder Calorífico (cal/gramo)	Azufre (%)
mezcla 1	3.0313	5.1637	35.9164	55.91	6635	1.58
	3.0603	5.1700	35.8016	55.97	6648	1.53
mezcla 2	3.2947	4.9812	36.6178	55.11	6251	1.67
	3.3172	4.9863	36.4947	55.21	6223	1.62
mezcla 3	3.5549	4.7924	37.3194	54.34	6144	1.76
	3.5742	4.8087	37.1877	54.45	6166	1.70

Fuente: Autor

4.1.3 Análisis de la caracterización del carbón. Los carbones de la región de Paipa muestran el contenido de humedad más alto, siendo estos valores característicos de los carbones térmicos²⁰. Mientras que el carbón de la región de Samacá muestra una humedad relativamente baja, teniendo en cuenta que los carbones destinados a la producción de coque metalúrgico puede presentar un contenido máximo del 10%.

En el caso de las cenizas se observa que se encuentran en rangos aceptables y relativamente equilibrados, encontrándose estos dentro del rango máximo que es 10% de cenizas, el exceso de este parámetro influye significativamente en el rendimiento en los carbones térmicos y en la calidad del coque en los carbones coquizables²¹.

En cuanto a la materia volátil la muestra de la región de Paipa presenta un contenido alto de materia volátil. Característico de los carbones térmicos²² esta propiedad es ampliamente aprovechada en plantas termoeléctricas. En el caso de los carbones coquizables el contenido de materia volátil es alto, en la industria de la coquización carbones con altos contenidos de materia volátil producen coques de baja estabilidad caracterizándose por tener zonas plásticas nulas o muy

²⁰ INGEOMINAS and MINERCOL, El carbon colombiano. Recursos, reservas y calidad. 2004

²¹ Choudhury, S.B., et al., Solvent-refined coal from high-ash non-coking coals and washery middlings for use in metallurgical coke making Part 1. Production, testing and characterisation. Fuel Processing Technology, 1996. 47(3): p. 203-213.

²² Castellanos, J.S., J, Obtencion a nivel de planta piloto de coque metalurgico, a partir de mezclas de carbones coquizables y no coquizables. Facultad de Ingenieria. Departamento de Ingeieria Quimica. Universidad Nacional de Colombia, 1999.

cortas²³.

El poder calorífico de las muestras analizadas expresado en cal/g. Indica que la muestra de carbon del municipio de paipa tiene el valor más bajo. Característico de los carbones térmicos. La muestra del municipio de Samacá presenta un poder calorífico más elevado, debido a su mayor contenido de carbono fijo. Según los resultados obtenidos se puede definir el grado al que corresponden los carbones según la norma ASTM D 388-05. El carbón de paipa lo clasifica como un carbon sub-bituminoso no aglomerante y el carbón de Samacá lo clasifica como un carbón bituminoso alto volátil B.

4.1.4 Análisis de la caracterización de las mezclas. Los resultados de analisis próximo de las mezclas presentan valores muy similares a los de un carbon térmico. La humedad es baja. El porcentaje de cenizas es aceptable por lo cual no se verá afectado de manera significativa el rendimiento del carbon. El contenido de materia volátil es alto favorable para el proceso de combustión. Y el contenido de carbono fijo se encuentra entre los rangos de los carbones térmicos de mejores características. Al clasificar las mezclas según la norma ASTM D 388-05. y los resultados de poder calorífico las podemos clasificar en el grupo de carbones bituminosos con altos volátil y de carácter aglomerante.

4.2 COMBUSTIÓN Y ANÁLISIS DE GASES

4.2.1 Calibración del aparato de Orsat. Antes de utilizar el Orsat se debe verificar que éste funcione perfectamente para ello se realiza primero una prueba de estanqueidad y luego se realiza la calibración de las soluciones absorbentes.

4.2.2 Prueba de estanqueidad. La prueba de estanqueidad al equipo, se realiza con el fin de comprobar la hermeticidad del sistema que compone el aparato de Orsat los resultados se muestran en la tabla 7.

En la prueba numero 1 se toma como referencia 40 ml de muestra de aire y se deja en reposo, a medida que van pasando los minutos este volumen va disminuyendo continuamente. Siendo necesario lubricar de nuevo todo el sistema de válvulas y conexiones y de esta manera evitar escapes en las líneas de transferencia.

²³ Duffy, J.J., M.R. Mahoney, and K.M. Steel, Influence of coal thermoplastic properties on coking pressure generation: Part 2 - A study of binary coal blends and specific additives. Fuel, 2010. 89(7): p. 1600-1615.

Se realiza una segunda prueba luego haber lubricado con una ligera capa de grasa las conexiones del sistema se toman los mismos 40 ml de una muestra de aire y se deja reposar, esta vez pasan los minutos y el volumen permanece constante. Ahí se confirma la estanqueidad y hermeticidad del sistema Orsat.

Tabla 7. Resultados de la prueba de estanqueidad hecha al aparato de Orsat.

PRUEBA NUMERO 1					
Tiempo (min)	1	2	3	4	5
Muestra (ml)	40	38	32	28	22
PRUEBA NUMERO 2					
Tiempo (min)	1	2	3	4	5
Muestra (ml)	40	40	40	40	40

Fuente: autor

4.2.3 Calibración de las soluciones absorbentes en la tabla 8 se muestra los resultados de las lecturas tomadas con el Orsat a dos muestras de gas de composición conocida.

Tabla 8. Lecturas tomadas en la calibración del aparato de Orsat

Gas patrón	Composición Requerida (%)	LECTURAS DEL ORSAT (%) CALIBRACIÓN 1									
		CO ₂	40	34	38.8	39	3.4	39.8	39.8	39.8	-----
CO	60	45.6	53.4	65	73.2	81.6	85.2	90.8	93	96	98.8
O ₂	99.99	26.8	63	80	90	95	98	98.8	98.8	98.8	-----
Gas patrón	Composición Requerida (%)	LECTURAS DEL ORSAT (%) CALIBRACIÓN 2									
		CO ₂	40	32	34.8	36	38.2	39.6	39.6	39.6	-----
CO	60	45.6	53.4	59	67.2	72.6	78.2	86.8	90	98.6	98.6
O ₂	99.99	26.8	63	80	90	95	98	98.8	98.8	98.8	-----

Fuente: autor

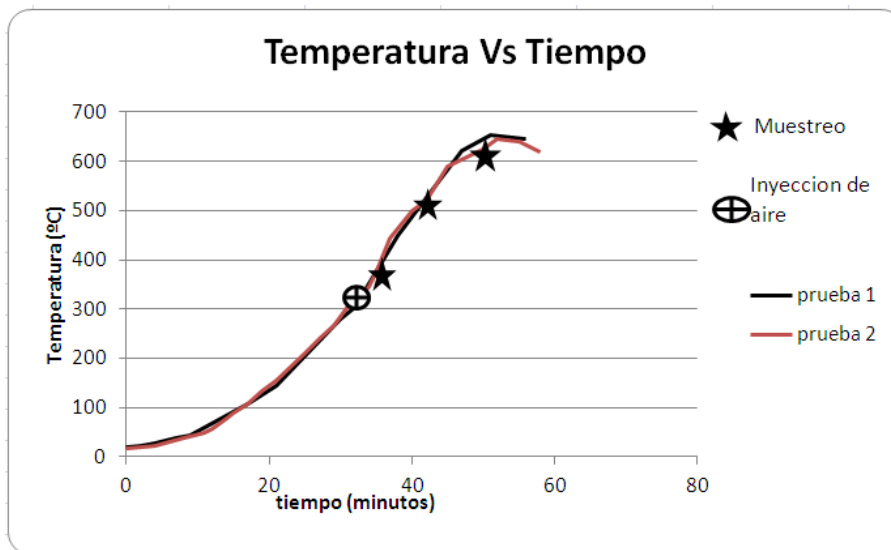
Error. Los errores correspondientes a cada pipeta de absorción son los siguientes:

- ✓ Medida de CO₂: 39.7 % error de medida: ± 0.75
- ✓ Medida de O₂: 98.7 % error de medida: ± 1.3
- ✓ Medida de CO: 41,97% error de medida: ± 1.66

Realizada la calibración del Orsat se observa que los errores porcentuales en las pruebas son relativamente pequeños por tanto los resultados que se obtengan en cuanto a la composición de gases de chimenea CO₂, O₂ y Co estarán con una precisión bastante aceptable

4.2.4 análisis de combustión de la mezcla 1 en la figura 18 se muestra la relación entre tiempo y temperatura de combustión, así como las temperaturas a las que se realizaron los tres muestreos de los gases de chimenea para esta mezcla. Los datos para realizar la grafica se adjuntan el ANEXO A.

Figura 18. Relación de tiempo y temperatura del proceso de combustión de la muestra y la contramuestra de la mezcla 1.



Fuente: Autor

El comportamiento de esta mezcla frente al tiempo y la temperatura fue constante durante 35 minutos donde alcanzo una temperatura de 300°C, temperatura a la cual se inicia la ignición, aumentando su temperatura de forma progresiva hasta alcanzar un máximo de 650°C. 20 minutos después de la inyección del comburente. Los muestreos para el análisis de gases se toman en un intervalo de ±20 °C., los resultados de las variaciones de CO₂, O₂ y CO tomados a diferentes temperaturas se muestran en la tabla 9. y se grafican en la figura 19.

Tabla 9. Resultados de los análisis de gases de chimenea realizados con el aparato de Orsat a una muestra de gas en la combustión de la mezcla 1.

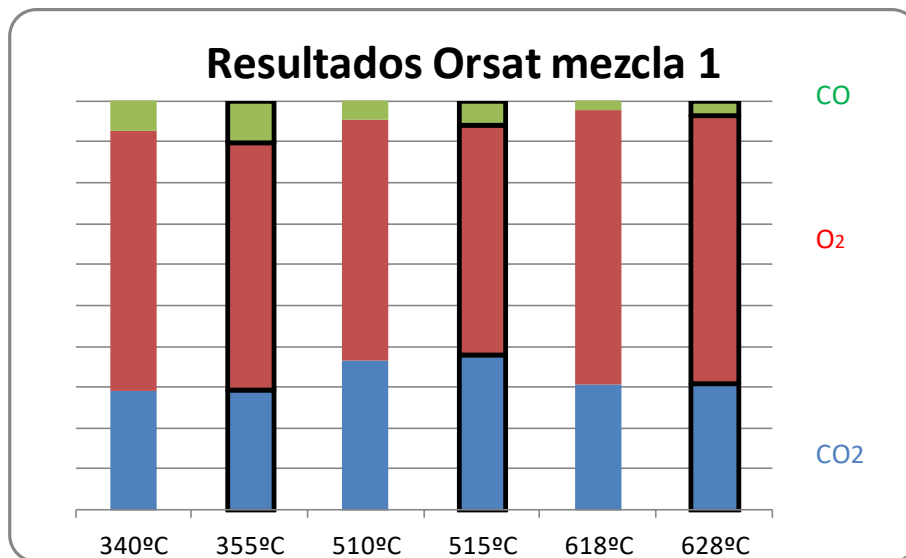
T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) PRUEBA 1 (MUESTRA 1)										TOTAL (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
340												
CO2	4.6	5.8	6.3	7.0	7.0	7.0	-----	-----	-----			7
O2	9.2	10.6	11.6	13.2	14.0	14.6	14.6	14.6	-----			7.6
CO	14.2	14.6	15.2	15.6	16.0	16.2	16.2	16.2	-----			1.6
T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) (MUESTRA 2)										TOTAL (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
510												
CO2	3.8	5.2	6.4	7.0	7.4	7.4	7.4	-----	-----	-----		7.4
O2	8.2	9.6	10.8	11.4	12.2	13.0	13.8	14.4	14.4	14.4		7
CO	14.4	14.6	14.8	15.2	15.2	15.4	15.4	15.4	-----	-----		1.0
T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) (MUESTRA 3)										TOTAL (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
618												
CO2	3.2	4.0	4.6	5.2	6.2	6.6	6.8	6.8	6.8	-----		6.8
O2	10.2	12.6	13.8	14.2	14.8	16.6	16.8	16.8	16.8	-----		10.4
CO	16.8	17.0	17.2	17.2	17.4	17.4	17.4	-----	-----	-----		0.6
T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) (CONTRA MUESTRA 1)										TOTAL (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
355												
CO2	4.2	5.4	5.2	6.2	6.8	7.2	7.2	7.2				7.2
O2	8.6	9.8	10.2	11.2	12.4	13.8	14.4	14.6	14.6	14.6		7.4
CO	14.6	14.8	15.4	15.8	16.0	16.2	16.2	16.2	16.2	-----		1.6
T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) (CONTRA MUESTRA 2)										TOTAL (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
515												
CO2	3.6	4.0	5.2	6.0	6.6	7.0	7.4	7.6	7.6	7.6		7.6
O2	7.8	9.2	10.4	11.6	12.2	13.4	14.2	14.6	-----	-----		7
CO	14.6	14.8	15.2	15.2	15.4	15.6	15.6	15.6	15.6	-----		1
T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) (CONTRA MUESTRA 3)										TOTAL (%)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
628												
CO2	3.2	3.8	4.2	4.8	5.4	5.8	6.2	6.2	6.2	6.2		6.2
O2	8.2	10.0	11.2	12.4	13.6	14.4	14.8	15.2	15.2	15.2		9
CO	15.2	15.2	15.4	15.6	15.6	15.6	15.6	-----	-----	-----		0.4

Fuente: autor

La composición de los gases de chimenea de la muestra y contramuestra de la mezcla 1 medidos con el aparato de Orsat presenta en el primer muestreo un contenido de 7 ml y 7.7 ml de CO₂ respectivamente, el contenido de O₂ medido fue de 7.6% y 7.4% y el contenido de CO en la muestra para ambos casos fue de 1.6%. Se observa el inicio de la combustión por la presencia monóxido y dióxido de carbono, además aparece oxígeno lo que confirma que este se está inyectando en exceso. En la segunda muestra de gas se observa un aumento en el contenido de dióxido de carbono dejando ver que la combustión se encuentra en buena forma, a su vez hay una disminución tanto en el contenido de oxígeno como en el

contenido monóxido de carbono. El tercer muestreo se realiza un poco antes de que alcance su temperatura máxima y se observa una pequeña disminución en el dióxido de carbono indicando que la transformación del carbono ya está a punto de terminar, confirmándolo con la disminución del monóxido de carbono, y a su vez el aumento en el porcentaje de oxígeno

Figura 19. Proporciones de CO₂, O₂ Y CO de los gases de chimenea producto de las pruebas de combustión de la mezcla 1. Muestra y contra muestra (subrayado).

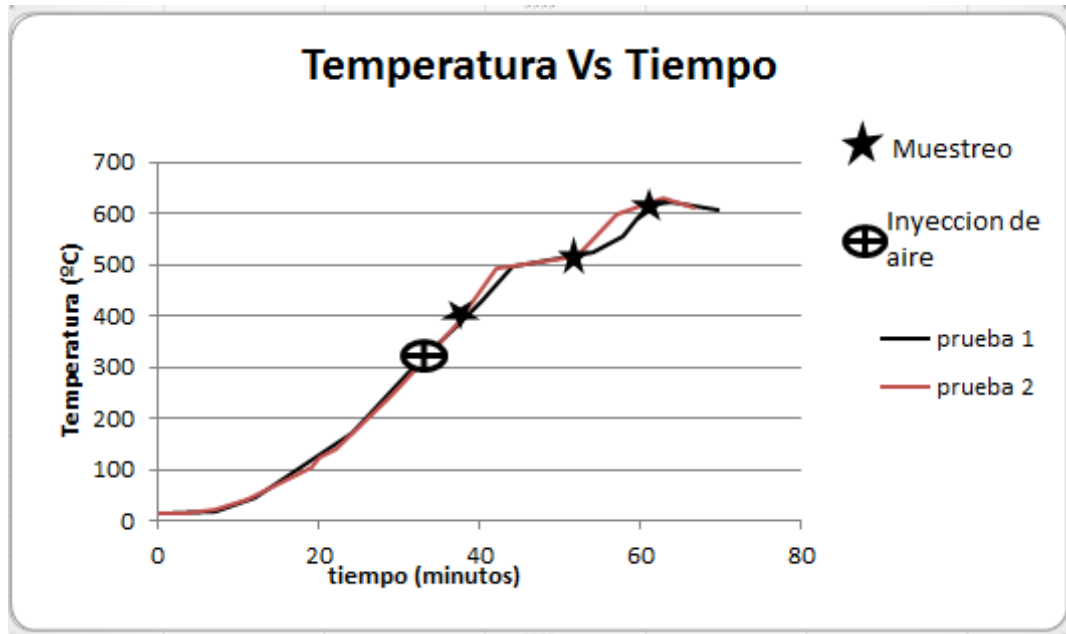


Fuente: Autor

4.2.5 analisis de combustión de la mezcla 2. En la figura 20 se muestra la relación entre tiempo y temperatura de combustión, así como las temperaturas a las que se realizaron los tres muestreos de los gases de chimenea para esta mezcla. Los datos para realizar la grafica se adjuntan el anexo A

El comportamiento de esta mezcla frente al tiempo y la temperatura fue constante durante 35 minutos donde alcanzo una temperatura de 300°C, temperatura a la cual se inicia la ignición, aumentando su temperatura de forma progresiva hasta alcanzar un máximo de 630°C. 30 minutos después de la inyección del comburente. Los muestreos para el análisis de gases se toman en un intervalo de ±20 °C. los resultados de las variaciones de CO₂, O₂ y CO tomados a diferentes temperaturas se muestran en la tabla 10. y se grafican en la figura 21.

Figura 20. Relación de tiempo y temperatura del proceso de combustión de la muestra y la contramuestra



Fuente: Autor

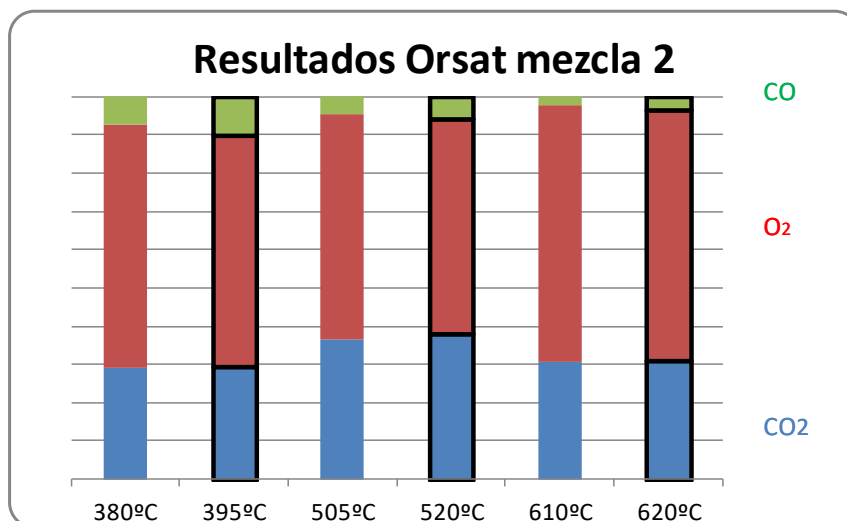
Tabla 10. Resultados de los análisis de gases de chimenea realizados con el aparato de Orsat a una muestra de gas en la combustión de la mezcla 2.

T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) (MUESTRA 1)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL (%)
380	3.2	4.4	5.2	5.8	6.0	6.0	6.0	-----	----	-----	6.0
CO ₂	8.2	9.6	12.2	13.4	14.2	15.0	15.8	16.0	16.0	16.0	10.2
O ₂	15.8	16.2	16.6	17.2	17.6	18.0	18.2	18.2	18.2	-----	2.2
CO	LECTURAS DEL ORSAT (%) (MUESTRA 2)										
T(°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL (%)
505	4.0	5.0	5.6	6.0	6.4	6.8	6.8	6.8	----	----	6.8
CO ₂	8.2	9.6	10.4	11.6	12.4	14.2	15.6	16.4	16.6	16.6	9.4
O ₂	16.8	17.2	17.6	17.8	18.0	18.2	18.4	18.4	18.4	-----	1.8
CO	LECTURAS DEL ORSAT (%) (MUESTRA 3)										
T(°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL (%)
610	3.4	4.2	5.0	5.4	5.6	6.2	6.2	6.2	6.2	----	6.2
CO ₂	7.8	8.6	9.4	10.8	12.2	14.8	15.2	16.4	17.2	17.4	10.8
O ₂	17.4	17.6	17.8	18.0	18.2	18.2	18.2	18.2	----	----	0.8
CO											

Tabla 10 (continuación)											
T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) (CONTRA MUESTRA 1)										
395	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL (%)
CO ₂	3.2	4.4	5.2	5.6	6.0	6.0	6.0				6
O ₂	7.8	9.2	10.0	11.8	13.6	14.4	14.8	14.8	14.8		8.8
CO	15.2	15.8	15.8	16.0	16.2	16.4	16.4	16.4	16.4		1.6
T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) (CONTRA MUESTRA 2)										
520	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL (%)
CO ₂	3.2	4.6	5.2	5.8	6.2	6.4	6.4	6.4			6.4
O ₂	8.8	9.6	10.4	11.8	13.2	14.6	15.0	15.2	15.2	15.2	8.8
CO	15.6	15.8	16.0	16.2	16.2	16.2	16.2				1
T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) (CONTRA MUESTRA 3)										
620	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL (%)
CO ₂	4.2	4.8	5.2	5.4	5.8	6.0	6.2	6.2	6.2	-----	6.2
O ₂	8.4	9.6	10.2	11.4	12.2	13.6	14.2	15.2	15.4	15.4	9.2
CO	15.4	15.4	15.6	15.6	15.8	15.8	15.8	15.8	-----	-----	0.4

Fuente: Autor

Figura 21. Proporciones de CO₂, O₂ Y CO de los gases de chimenea producto de las pruebas de combustión de la mezcla 2. Muestra y contra muestra (subrayado).



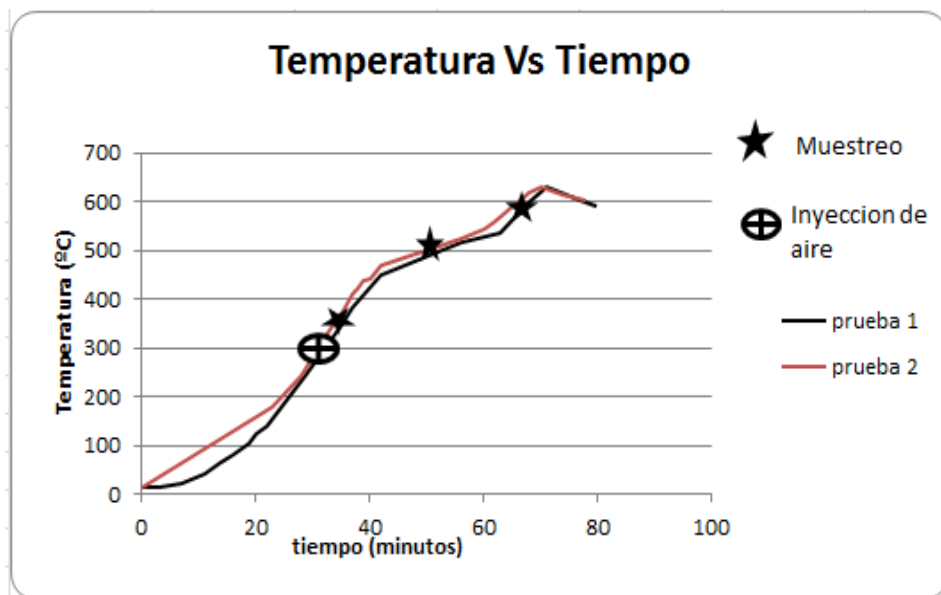
Fuente: Autor

La composición de los gases de chimenea de la muestra y contramuestra de la mezcla 2 medidos con el aparato de Orsat presenta la primera etapa un contenido de 6 ml de CO₂, el contenido de O₂ medido fue de 10.2% y 8.8%

respectivamente, el contenido de CO en la muestra fue de 2.2 ml y 1.6 ml se observa el progreso de la combustión con contenidos aceptables de dióxido y monóxido de carbono, y la presencia de oxígeno debido a la inyección de aire en exceso. En la segunda muestra de gas se observa un aumento en el contenido de dióxido de carbono confirmando que la combustión está en marcha, a su vez se observa una disminución en el contenido de oxígeno y monóxido de carbono. El tercer muestreo se realiza un poco antes de que alcance su temperatura máxima y se observa una disminución en el dióxido de carbono y a su vez un aumento en el porcentaje de oxígeno. Esto nos indica que la combustión está a punto de terminar y se confirma con la disminución de la presencia de monóxido de carbono.

4.2.6 Proceso de combustión de la mezcla 3. En la figura 22 se muestra la relación entre tiempo y temperatura de combustión, así como las temperaturas a las que se realizaron los tres muestreos de los gases de chimenea para esta mezcla. Los datos para realizar la grafica se adjuntan el ANEXO A

Figura 22. Relación de tiempo y temperatura del proceso de combustión de la muestra y la contramuestra



Fuente: Autor

El comportamiento de esta mezcla frente al tiempo y la temperatura fue constante durante 35 minutos donde alcanzo una temperatura de 300°C, temperatura a la cual se inicia la ignición, aumentando su temperatura de forma progresiva hasta alcanzar un máximo de 625°C. 43 minutos después de la inyección del

comburente. Los muestreos para el análisis de gases se toman en un intervalo de ± 20 °C. los resultados de las variaciones de CO₂, O₂ y CO tomados a diferentes temperaturas se muestran en la tabla 11. y se grafican en la figura 23.

Tabla 11. Resultados de los análisis de gases de chimenea realizados con el aparato de Orsat a una muestra de gas en la combustión de la mezcla 3.

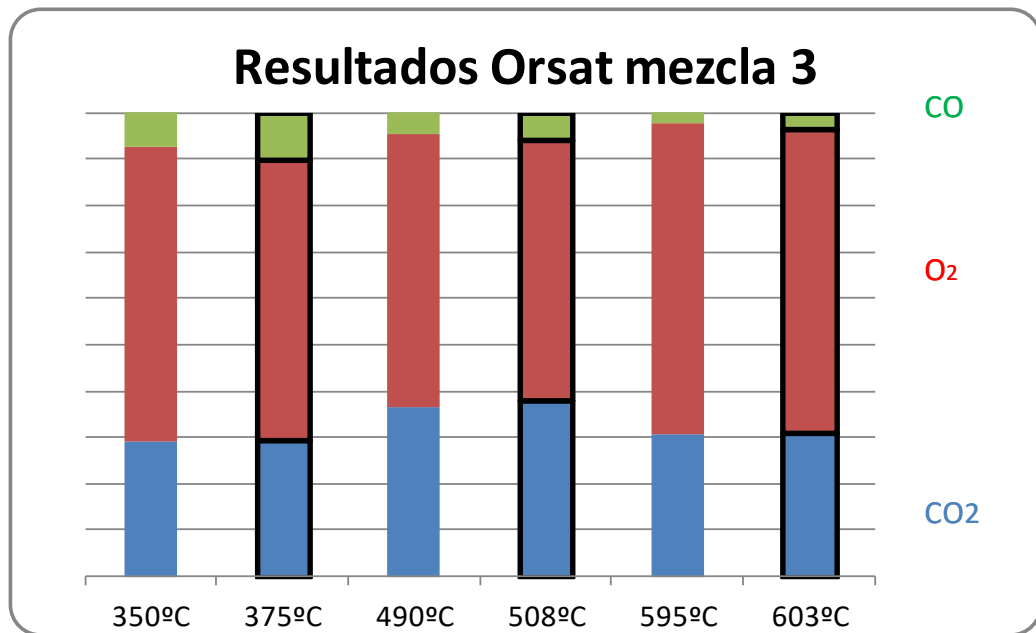
T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) (MUESTRA 1)										
350	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL (%)
CO ₂	2.2	3.2	3.8	4.2	4.6	4.8	4.8	4.8	-----	-----	4.8
O ₂	8.2	9.6	1.8	13.6	14.8	15.2	15.2	15.2	-----	-----	10.4
CO	15.4	15.8	16.0	16.0	16.2	16.2	16.4	16.4	16.4	-----	1.2
T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) (MUESTRA 2)										
490	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL (%)
CO ₂	2.6	3.2	4.0	4.8	5.6	6.2	6.4	6.4	6.4		6.4
O ₂	7.6	8.8	11.4	12.8	13.6	14.8	15.6	16.4	16.8	16.8	10.4
CO	16.8	17.0	17.0	17.2	17.4	17.6	17.6	17.6	17.6		0.8
T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) (MUESTRA 3)										
595	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL (%)
CO ₂	2.4	3.2	4.6	5.0	5.2	5.2	5.2	-----	-----	-----	5.2
O ₂	8.8	10.2	11.6	13.2	14.8	15.6	16.2	16.6	16.6	16.6	11.4
CO	16.6	16.8	16.8	17.0	17.0	17.0	-----	-----	-----	-----	0.4
T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) (CONTRA MUESTRA 1)										
375	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL (%)
CO ₂	3.8	4.2	4.6	5.0	5.2	5.2	5.2	-----	-----	-----	5.2
O ₂	8.2	10.6	13.8	14.4	15.8	15.8	15.8	-----	-----	-----	10.6
CO	16.2	16.6	17.0	17.2	17.4	17.6	17.6	17.6	17.6	-----	1.8
T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) (CONTRA MUESTRA 2)										
508	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL (%)
CO ₂	3.8	4.4	5.0	5.4	5.6	6.0	6.2	6.6	6.6	6.6	6.6
O ₂	8.2	9.4	10.8	12.4	14.2	15.0	15.8	16.4	16.4	16.4	9.8
CO	16.4	16.6	17.0	17.2	17.4	17.4	17.4	17.4	-----	-----	1
T(°C)	LECTURAS DEL ORSAT (%) (CONTRA MUESTRA 3)										
603	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL (%)
CO ₂	3.2	4.2	4.6	4.8	5.4	5.8	5.8	5.8	-----	-----	5.4
O ₂	8.6	9.2	11.2	13.8	15.6	16.8	17.2	17.2	17.2	-----	11.4
CO	17.2	17.4	17.4	17.6	17.8	17.8	17.8	-----	-----	-----	0.6

Fuente: Autor

La composición de los gases de chimenea de la muestra y contramuestra de la mezcla 3 medidos con el aparato de Orsat presenta la primera etapa un contenido de 5.2% de CO₂, el contenido de O₂ medido fue de 10.4% y 10.6% respectivamente, mientras que el contenido de CO fue de 1.2% y 1.8 respectivamente. La segunda muestra de gas se observa un aumento en el

contenido de dióxido de carbono confirmando el progreso del proceso de combustión a su vez hay una disminución en el contenido de oxígeno y de monóxido de carbono. El tercer muestreo se realiza un poco antes de que alcance su temperatura máxima y se observa una disminución en el dióxido carbono, con aumento del oxígeno, prediciendo casi el final de la transformación del carbono equivalente. Disminuyendo a su vez la presencia de monóxido de carbono.

Figura 23. Proporciones de CO₂, O₂ Y CO de los gases de chimenea producto de las pruebas de combustión de la mezcla 3. Muestra y contra muestra (subrayado).



Fuente: Autor

Los resultados más relevantes se muestran a en la tabla 12, y con base en estos resultados se identifica cual mezcla tiene el mejor comportamiento frente a los procesos de combustión.

Tabla 12. Resultados más relevantes de la combustión de las mezclas de carbon térmico y carbon coquizable alto en volátiles.

Muestra	% CO2	% O2	% CO	% N2	Tmax (°C)	Tiempo (min)	Cenizas (%)
Mezcla 1 Muestra	7	7.6	1.6	83.8	650	55	6.1
	7.4	7	1.0	15.4			
	6.8	10.4	0.6	82.2			
Mezcla 1 Contra muestra	7.2	7.4	1.6	83.8	645	53	6.3
	7.6	7	1	84.4			
	6.2	9	0.4	84.4			
Mezcla 2 Muestra	6.6	10.2	2.2	81	628	65	5.7
	6.8	9.4	1.8	82			
	6.2	10.8	0.8	82.2			
Mezcla 2 Contra muestra	6	8.8	1.6	83.52	630	67	5.6
	6.4	8.8	1	66.8			
	6.2	9.2	0.4	84.2			
Mezcla 3 Muestra	4.8	10.4	1.2	83.6	625	72	5.45
	6.4	10.4	0.8	82.4			
	6.2	11.4	0.4	82			
Mezcla 3 Contra muestra	5.2	10.6	1.8	82.4	622	74	5.5
	6.6	9.8	1	71.8			
	6.4	11.4	0.6	81.6			

Fuente: autor

5. CONCLUSIONES

- Se caracterizó mediante análisis próximo azufre y poder calorífico el carbón térmico de la vereda el volcán municipio de Paipa y los carbones coquizables altos en volátiles de la vereda Salamanca del municipio de Samacá. Encontrándose que se ajustan a los parámetros que la norma ASTM D388 define para este tipo de carbones.
- Se diseñaron y caracterizaron tres mezclas de carbones térmicos y coquizables en proporciones 60:40, 70:30, y 80:20 respondiendo a características de carbones térmicos por los valores alcanzados en análisis próximo y poder calorífico.
- Se evaluó en el proceso de combustión de las mezclas de carbón con 30 % de aire en exceso, la temperatura máxima, el tiempo de combustión y la composición de los gases de chimenea. Encontrando que la mezcla 1 con proporciones 60/40 de carbón térmico/carbón coquizable alto en volátiles tienen el mejor comportamiento frente a los parámetros de combustión (7.2% de CO₂, 0,4 %CO, Temperatura máxima 650 °C, menor tiempo de combustión 20 minutos/10 gramos de mezcla, % cenizas = 6.1).
- Se implementó y determinó la medición de gases de combustión mediante el uso del Orsat para CO₂, O₂ y CO, estableciendo de acuerdo a los ensayos realizados una guía para la manipulación de este analizador de gases.
- Los resultados obtenidos muestran que los carbones coquizables altos en volátiles al mezclarlos con carbones térmicos y ser sometidos al proceso de combustión, tienen un comportamiento aceptable y pueden ser utilizados como alternativa en la generación de energía.

RECOMENDACIONES

A partir del desarrollo del presente proyecto de investigación se realizan las siguientes recomendaciones:

Dar continuidad a esta investigación bajo parámetros establecidos en procesos de combustión, cambiando variables que hacen la diferencia como lo son tamaño de grano, aire en exceso, etc. Para de esta manera tener variedad de opciones de mezclas eficientes y rentables en la generación de energía en el país.




Realizar el proceso de combustión a mayor escala con la mezcla 1 con el fin de confirmar la viabilidad de poder usar esta mezcla a nivel industrial.

ANEXOS

ANEXO A Datos de la construcción de las graficas temperatura vs tiempo de las combustiones de las mezclas.

Tiempo Mezcla 1	Temperature	Tiempo mezcla 2	Temperatura	Tiempo mezcla 3	Temperatura
0	19	0	15	0	15
2	23	3	16	3	16
4	28	7	23	7	23
7	37	11	40	11	40
9	44	12	48	12	48
17	106	13	56	13	56
21	145	14	64	14	64
30	279	16	79	16	79
32	302	17	88	17	88
38	450	19	106	19	106
47	622	20	124	20	124
51	652	22	139	22	139
56	645	29	247	29	247
0	19	35	348	35	348
2	23	37	383	37	383
4	28	42	450	42	492
7	37	56	515	56	515
9	44	63	538	63	538
17	106	68	601	68	601
21	145	71	630	71	630
30	279	77	605	77	564
32	302	80	592	80	504
38	450				
47	622				
51	652				
56	645				

ANEXO B Resultados poder calorífico

	MACRO PROCESÓ: ADMINISTRATIVOS PROCESO: GESTIÓN DE LABORATORIOS PROCEDIMIENTO: EMISIÓN DE RESULTADOS INFORME DE EMISIÓN DE RESULTADOS SERVICIOS DE EXTENSIÓN		 
	Código: A-GL-P01-F03	Versión: 04	
INSTITUTO DE RECURSOS MINERO ENERGÉTICOS FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO LABORATORIO DE CARBONES			

CONSECUTIVO: C-20170828-034: Muestra 1

DATOS DEL CLIENTE		
NOMBRE O RAZÓN SOCIAL:	CÉSAR FABIÁN ALARCÓN	EMPRESA: -----
CÉDULA O NIT:	1.049.626.187	DIRECCIÓN: U.P.T.C. – Facultad de Ingeniería Metalúrgica
TELÉFONO, FAX:	313 883 2814	EMAIL: cesarf.alarcón@gmail.com
PROYECTO O LICENCIA :	PROYECTO DE GRADO: EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE CARBÓN TÉRMICO Y COQUIZABLE EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN	

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Fecha de Emisión de Resultados 29/08/2017

MUESTRA CARBÓN TÉRMICO	MINA:	VEREDA:	MUNICIPIO: PAIPA (BOYACÁ)				
MATERIAL TRAÍDO AL LABORATORIO: CARBÓN TÉRMICO, Tamizado en Malla N° 60		TÍTULO MINERO	MANTO:				
COORDENADAS	Profundidad :	E:	N:	Z:			
CÓDIGO MUESTRA	HUMEDAD RESIDUAL	CENIZAS	MATERIA VOLÁTIL	CARBONO FIJO	PODER CALORÍFICO	AZUFRE	FSI
C-20170828-034: Muestra 1	---	---	---	---	5.691 cal./gramo	---	---

ANÁLISIS REALIZADOS: PODER CALORÍFICO

- ✓ Resultados entregados en base al procedimiento de las normas ASTM D 5865 – 07, Equipo utilizado: Calorímetro LECO AC600.

Los resultados del análisis tienen validez con referencia única y exclusiva sobre la muestra que fue traída al Laboratorio.

OBSERVACIONES: _____





ALBERTO ÁNGEL BOTERO
 Químico
 Universidad Nacional de Colombia
 Matricula profesional: PQ-0398
 Consejo profesional de Químico de Colombia
 UPTC - Profesional Universitario


LUIS ÁNGEL LARA GONZÁLEZ
 Director IRME

Recibido por (firma): _____ Nombre: _____
 Cargo: _____ Fecha: _____ Hora: _____

Elaboró: Martha Botero

Calle 4 Sur No. 15-134, Tels: 7723537/18 – 7705450 – 7707721, Exts: 2634 – 2635, Email: irme@uptc.edu.co

	MACRO PROCESÓ: ADMINISTRATIVOS PROCESO: GESTIÓN DE LABORATORIOS PROCEDIMIENTO: EMISIÓN DE RESULTADOS INFORME DE EMISIÓN DE RESULTADOS SERVICIOS DE EXTENSIÓN		 
	Código: A-GL-P01-F03	Versión: 04	
INSTITUTO DE RECURSOS MINERO ENERGÉTICOS FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO LABORATORIO DE CARBONES			

CONSECUTIVO: C-20170828-035: Muestra 2

DATOS DEL CLIENTE		
NOMBRE O RAZÓN SOCIAL:	CÉSAR FABIÁN ALARCÓN	EMPRESA:
CÉDULA O NIT:	1.049.626.187	DIRECCIÓN: U.P.T.C. – Facultad de Ingeniería Metalúrgica
TELÉFONO, FAX:	313 883 2814	EMAIL: cesarf.alarcón@gmail.com
PROYECTO O LICENCIA :	PROYECTO DE GRADO: EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE CARBÓN TÉRMICO Y COQUIZABLE EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN	

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Fecha de Emisión de Resultados 29/08/2017

MUESTRA	CARBÓN COQUIZABLE	MINA:	VEREDA:	MUNICIPIO: SAMACÁ (BOYACÁ)			
MATERIAL TRAÍDO AL LABORATORIO:		TÍTULO MINERO		MANTO:			
CARBÓN COQUIZABLE, Tamizado en Malla N° 60							
COORDENADAS		Profundidad :	E:	N: Z:			
CÓDIGO MUESTRA	HUMEDAD RESIDUAL	CENIZAS	MATERIA VOLÁTIL	CARBONO FIJO	PODER CALORÍFICO	AZUFRE	FSI
C-20170828-035: Muestra 2	---	---	---	---	7.555 cal/Jgramo	---	---

ANÁLISIS REALIZADOS: PODER CALORÍFICO

- ✓ Resultados entregados en base al procedimiento de las normas ASTM D 5865 – 07, Equipo utilizado: Calorímetro LECO AC600.

Los resultados del análisis tienen validez con referencia única y exclusiva sobre la muestra que fue traída al Laboratorio.

OBSERVACIONES: _____


ALBERTO ÁNGEL BOTERO
 Químico



Universidad Nacional de Colombia
 Matriculación profesional: PQ-0398
 Consejo profesional de Químico de Colombia
 UPTC - Profesional Universitario


LUIS ÁNGEL LARA GONZALEZ
 Director IRME

Recibido por (firma): _____ Nombre: _____
 Cargo: _____ Fecha: _____ Hora: _____

Elaboró: Martha Rodríguez

Calle 4 Sur No. 15- 134, Tels: 7723537/18 – 7705450 – 7707721, Exts: 2634 – 2635, Email: irme@uptc.edu.co

	MACRO PROCESÓ: ADMINISTRATIVOS PROCESO: GESTIÓN DE LABORATORIOS PROCEDIMIENTO: EMISIÓN DE RESULTADOS INFORME DE EMISIÓN DE RESULTADOS SERVICIOS DE EXTENSIÓN		
	Código: A-GL-P01-F03	Versión: 04	
INSTITUTO DE RECURSOS MINERO ENERGÉTICOS FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO LABORATORIO DE CARBONES			

CONSECUTIVO: C-20170828-036: Muestra 3

DATOS DEL CLIENTE		
NOMBRE O RAZÓN SOCIAL:	CÉSAR FABIÁN ALARCÓN	EMPRESA: -----
CÉDULA O NIT:	1.049.626.187	DIRECCIÓN: U.P.T.C. – Facultad de Ingeniería Metalúrgica
TELÉFONO, FAX:	313 883 2814	EMAIL: cesarf.alarcón@gmail.com
PROYECTO O LICENCIA :	PROYECTO DE GRADO: EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE CARBÓN TÉRMICO Y COQUIZABLE EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN	

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Fecha de Emisión de Resultados 29/08/2017

MUESTRA 3: MEZCLA 1 CARBÓN TÉRMICO 80%) y COQUIZABLE (20%)	MINA:	VEREDA:	MUNICIPIOS: PAIPA- SAMACÁ (BOYACÁ)
MATERIAL TRAÍDO AL LABORATORIO: MEZCLA DE CARBÓN (Muestra 1 80% y Muestra 2 20%), Tamizado en Malla N° 60		TÍTULO MINERO	MANTO:
COORDENADAS	Profundidad :	E:	N: Z:

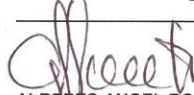
CÓDIGO MUESTRA	HUMEDAD RESIDUAL	CENIZAS	MATERIA VOLÁTIL	CARBONO FIJO	PODER CALORÍFICO	AZUFRE	FSI
C-20170828-036: Muestra 3	---	---	---	---	6.144 cal./gramo	---	---

ANÁLISIS REALIZADOS: PODER CALORÍFICO

- ✓ Resultados entregados en base al procedimiento de las normas ASTM D 5865 – 07, Equipo utilizado: Calorímetro LECO AC600.

Los resultados del análisis tienen validez con referencia única y exclusiva sobre la muestra que fue traída al Laboratorio.

OBSERVACIONES: _____



ALBERTO ANGEL BOTERO
 Químico
 Universidad Nacional de Colombia
 Matricula profesional: PQ-0398
 Consejo profesional de Químico de Colombia
 UPTC - Profesional Universitario





LUIS ANGEL LARA GONZÁLEZ
 Director IRME

Recibido por (firma): _____ Nombre: _____
 Cargo: _____ Fecha: _____ Hora: _____

Edicari: Martha Bohneros

Calle 4 Sur No. 15- 134, Tels: 7723537/18 – 7705450 – 7707721, Exts: 2634 – 2635, Email: irme@uptc.edu.co

	MACRO PROCESO: ADMINISTRATIVOS PROCESO: GESTIÓN DE LABORATORIOS PROCEDIMIENTO: EMISIÓN DE RESULTADOS INFORME DE EMISIÓN DE RESULTADOS SERVICIOS DE EXTENSIÓN		
	Código: A-GL-P01-F03	Versión: 04	
INSTITUTO DE RECURSOS MINERO ENERGÉTICOS FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO LABORATORIO DE CARBONES			

CONSECUTIVO: C-20170828-037: Muestra 4

DATOS DEL CLIENTE		
NOMBRE O RAZÓN SOCIAL:	CÉSAR FABIÁN ALARCÓN	EMPRESA:
CÉDULA O NIT:	1.049.626.187	DIRECCIÓN: U.P.T.C. – Facultad de Ingeniería Metalúrgica
TELÉFONO, FAX:	313 883 2814	EMAIL: cesarf.alarcón@gmail.com
PROYECTO O LICENCIA :	PROYECTO DE GRADO: EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE CARBÓN TÉRMICO Y COQUIZABLE EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN	

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Fecha de Emisión de Resultados 29/08/2017

MUESTRA 4: MEZCLA 2 CARBÓN TÉRMICO 70% y COQUIZABLE (30%)	MINA:	VEREDA:	MUNICIPIOS: PAIPA- SAMACÁ (BOYACÁ)	
MATERIAL TRAÍDO AL LABORATORIO: MEZCLA DE CARBÓN (Muestra 1: 70% y Muestra 2: 30%), Tamizado en Malla N° 60	TÍTULO MINERO	MANTO:		
COORDENADAS	Profundidad :	E:	N:	Z:

CÓDIGO MUESTRA	HUMEDAD RESIDUAL	CENIZAS	MATERIA VOLÁTIL	CARBONO FIJO	PODER CALORÍFICO	AZUFRE	FSI
C-20170828-037: Muestra 4	---	---	---	---	6.251 cal./gramo	---	---

ANÁLISIS REALIZADOS: PODER CALORÍFICO

- ✓ Resultados entregados en base al procedimiento de las normas ASTM D 5865 – 07, Equipo utilizado: Calorímetro LECO AC600.

Los resultados del análisis tienen validez con referencia única y exclusiva sobre la muestra que fue traída al Laboratorio.

OBSERVACIONES: _____





ALBERTO ANGEL BOTERO
 Químico
 Universidad Nacional de Colombia
 Matricula profesional: PQ-0398
 Consejo profesional de Químico de Colombia
 UPTC - Profesional Universitario


LUIS ANGEL LARA GONZÁLEZ
 Director IRME

Recibido por (firma): _____ Nombre: _____
 Cargo: _____ Fecha: _____ Hora: _____

Elaboró: Martha Bohórquez

Calle 4 Sur No. 15- 134, Tels: 7723537/18 – 7705450 – 7707721, Exts: 2634 – 2635, Email: irme@uptc.edu.co

	MACRO PROCESÓ: ADMINISTRATIVOS PROCESO: GESTIÓN DE LABORATORIOS PROCEDIMIENTO: EMISIÓN DE RESULTADOS INFORME DE EMISIÓN DE RESULTADOS SERVICIOS DE EXTENSIÓN		 
	Código: A-GL-P01-F03	Versión: 04	
INSTITUTO DE RECURSOS MINERO ENERGÉTICOS FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO LABORATORIO DE CARBONES			

CONSECUTIVO: C-20170828-038: Muestra 5

DATOS DEL CLIENTE		
NOMBRE O RAZÓN SOCIAL:	CÉSAR FABIÁN ALARCÓN	EMPRESA: -----
CÉDULA O NIT:	1.049.626.187	DIRECCIÓN: U.P.T.C. – Facultad de Ingeniería Metalúrgica
TELÉFONO, FAX:	313 883 2814	EMAIL: cesarf.alarcón@gmail.com
PROYECTO O LICENCIA :	PROYECTO DE GRADO: EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE CARBÓN TÉRMICO Y COQUIZABLE EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN	

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Fecha de Emisión de Resultados 29/08/2017

MUESTRA 5: MEZCLA 3 DE CARBÓN TÉRMICO 60% y COQUIZABLE (40%)	MINA:	VEREDA:	MUNICIPIOS: PAIPA- SAMACÁ (BOYACÁ)	
MATERIAL TRAIDO AL LABORATORIO: MEZCLA DE CARBÓN (Muestra 1: 60% y Muestra 2: 40%), Tamizado en Malla N° 60	TÍTULO MINERO		MANTO:	
COORDENADAS	Profundidad :	E:	N:	Z:

CÓDIGO MUESTRA	HUMEDAD RESIDUAL	CENIZAS	MATERIA VOLÁTIL	CARBONO FIJO	PODER CALORÍFICO	AZUFRE	FSI
C-20170828-038: Muestra 5	---	---	---	---	6.635 cal./gramo	---	---

ANÁLISIS REALIZADOS: PODER CALORÍFICO

- ✓ Resultados entregados en base al procedimiento de las normas ASTM D 5865 – 07, Equipo utilizado: Calorímetro LECO AC600.

Los resultados del análisis tienen validez con referencia única y exclusiva sobre la muestra que fue traída al Laboratorio.

OBSERVACIONES: _____


ALBERTO ÁNGEL BOTERO
 Químico

Universidad Nacional de Colombia
 Matricula profesional: PQ-0398
 Consejo profesional de Químico de Colombia
 UPTC - Profesional Universitario


LUIS ÁNGEL LARA GONZÁLEZ
 Director IRME

Recibido por (firma): _____ Nombre: _____
 Cargo: _____ Fecha: _____ Hora: _____

Elaboró: Martha Botóquez

Calle 4 Sur No. 15- 134, Tels: 7723537/18 – 7705450 – 7707721, Exts: 2634 – 2635, Email: irme@uptc.edu.co

BIBLIOGRAFIA

- ASTM – AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS., Standard Classification of Coals by Rank. ASTM D 388-05., USA, 2005.
- ARDILA BARRAGAN, Marco. Cartilla carbones y coques.[en línea]. Disponible: <https://steelgood.files.wordpress.com/2013/05/cartilla-carbones-y-coques.pdf>.
- BAEZ R, Ignacio. Manual de carbones y coquización. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC. Sogamoso. 2004., pp. 74-94
- CASTELLANOS, J.S., Obtención a nivel de planta piloto de coque metalúrgico, a partir de mezclas de carbones coquizables y no coquizables. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia, 1999.
- CHOUDHURY, S.B., et al., Solvent-refined coal from high-ash non-coking coals and washery middlings for use in metallurgical coke making Part 1. Production, testing and characterisation. Fuel Processing Technology, 1996. 47(3): p. 203-213.
- DUFFY, J.J., Mahoney, M.R., Steel, Influence of coal thermoplastic properties on coking pressure generation: Part 2 - A study of binary coal blends and specific additives. Fuel, 2010. 89(7): p. 1600-1615.
- GENNARO, A., “Remington Farmacia”. Panamericana, Buenos Aires,pp, 748-749(2003).
- Höök, M. and K. Aleklett, Historical trends in American coal production and a possible future outlook. International Journal of Coal Geology, 2009. 78(3): p. 201-216.
- INGEOMINAS and MINERCOL, El carbon colombiano. Recursos, reservas y calidad. 2004
- JIMÉNEZ, S., Combustión del carbón, Laboratorio de investigación en tecnologías de la combustión, LITEC, Perú.
- MARQUEZ, Manuel. Combustión y quemadores.1 ed.:Marcombo, 2005. 208p.
- MENENDEZ, F.; “Higiene industrial. Manual para la formación del

especialista”, Lex Nova, Valladolid, pp. 146-150 (2008).

- MUTTHUKRISHNAN, M. KRISHNAMOORTHY S. y N.ANANTHARAMAN. Characterization of coal blends for effective utilization in thermal power plants: Coal Research Centre, Bharat Heavy Electricals Limited.,2015. Tiruchirappalli, Tamil Nadu, India
- SARRIA LOPEZ, Bienvenido.”Universidad de Cienfuegos” Carlos Rafael Rodríguez, Faculta de Ingeniería Mecánica. Cienfuegos,2004., pp. 3-17
- SILVA,M. y GRACIA,M.J. “Técnico especialista en laboratorio de atención primaria”, mad, España, pp. 347-352 (2006).
- SPEIGHT, J.G. The chemistry and technology of coal. 270 Madison Avenue, New York. Marcel Dekker, Inc., 1994.
- URIETA, F. “Diseño y construcción de un sistema Orsat modificado para el análisis de biogás Trabajo de fin de carrera Ingeniería Química, Leganés, “universidad Carlos III de Madrid, Leganés,2010., pp. 37-56.