

**OBTENCIÓN DE ESFEROIDES DE MATERIALES CARBONOSOS
MEZCLADOS CON ACEITE VEGETAL EN DISCO PELETIZADOR, PARA
SER UTILIZADO EN UN PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ORO
(PROCESO CGA)**

RICHAR EDUARDO QUINTERO CARVAJALINO

ÁLVARO MARIO CADENA GÓMEZ

**GRUPO DE INVESTIGACIONES EN MINERALES, BIOHIDROMETALURGIA
Y AMBIENTE – GIMBA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

**OBTENCIÓN DE ESFEROIDES DE MATERIALES CARBONOSOS
MEZCLADOS CON ACEITE VEGETAL EN DISCO PELETIZADOR, PARA
SER UTILIZADO EN UN PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ORO
(PROCESO CGA)**

RICHAR EDUARDO QUINTERO CARVAJALINO

ÁLVARO MARIO CADENA GÓMEZ

**Trabajo de grado (modalidad proyecto de investigación) para optar al
título de
Ingeniero Químico**

Director

PhD. ELCY MARÍA CÓRDOBA TUTA

Codirector

PhD. PEDRO LUIS DELVASTO ANGARITA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

A Dios, fundamento de mi vida, dueño de mi corazón

A mis padres Consuelo Gómez y Álvaro Cadena, por el amor, esfuerzo y apoyo que me han brindado, en todos los momentos de mi vida.

A mi abuela Gilma Barros, por todos sus consejos que me han ayudado a crecer como persona.

A todos mis hermanos y familiares por haberme brindado de su apoyo cuando los necesité en algún momento de esta etapa de formación.

A Katerine Quiroz, por su amor incondicional, apoyo, consejos y perseverancia durante este ciclo de vida.

A todos mis amigos, que los llevo en mi corazón y compartimos esta misma alegría.

Álvaro Mario Cadena Gómez

Al padre supremo Dios y todo su ministerio divino por guiarme y ser esa la energía que da fuerza a mi corazón.

A los seres de luz que me inculcan los mejores valores que se pueden aprender para la vida y no obstante son los constructores de cada paso que recorro, ustedes Gabriel A. Quintero P. y Yomaira N. Carvajalino R. ¡De qué manera los amo!.

Porque los grandes triunfos como este los conseguimos de la mano mis hermanos Gabriel. A Quintero C. y Robinson G. Quintero C. Infinitas gracias por enseñarme el verdadero amor de la hermandad y nunca dejarme solo en esta meta que cumplimos, porque esto no hace parte de mí, esto es parte de nosotros.

Al mejor regalo que la vida me pudo obsequiar, mi admiración a ti mi compañera ideal, Yesica V. Solano P. ¡Qué fácil me haces todo!, gracias por creer en mí y compartirme esta etapa de tu vida.

A mi amigo y compañero de tesis Álvaro M. Cadena G. ¡Gran equipo mi hermano!.

A mis familiares y amigos que de una manera u otra contribuyeron a que aquel sueño hoy sea una realidad.

Richar Eduardo Quintero Carvajalino

AGRADECIMIENTOS

Los autores hoy comparten sus agradecimientos:

Al creador, quien siempre se ha manifestado con nosotros en su infinita bondad, amor y sabiduría para lograr discernir el mejor camino para nuestras vidas y podernos encontrar hoy consiguiendo tan anhelado logro.

A la Universidad Industrial de Santander, por abrirnos sus puertas y brindarnos una formación de calidad.

A la profesora Elcy María Córdoba Tuta por haber creído en nosotros, quien nos brindó su dirección, colaboración, respaldo y hacernos partícipes en el desarrollo de este proyecto.

Al profesor Pedro Luis Delvasto Angarita, por todo el apoyo, dirección y confianza brindados en el desarrollo de esta investigación.

A los técnicos del laboratorio de pirometalurgia de la escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de los materiales, por su asesoría en todas las fases de las pruebas. En especial al técnico Ambrosio Carrillo.

A la vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad (VIE) de la Universidad Industrial de Santander, por la financiación del presente trabajo de grado a través del proyecto de investigación titulado “Implementación del proceso CGA como una alternativa a los métodos tradicionales de amalgamación y cianuración para la recuperación de oro de minerales colombianos”, código 1884.

Al grupo de colegas Ocañan people por todas las experiencias vividas juntos y todo el conocimiento compartido durante estos últimos años.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA.....	22
1.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS.....	23
1.1.1 Caracterización del material carbonoso.....	23
1.1.2 Caracterización del aceite.....	24
1.1.3 Muestra de mineral aurífero.....	25
1.2 FORMACIÓN DE AGLOMERADOS	25
1.3.1 Redondez de los aglomerados.....	24
1.3.2 Pérdida de tamaño de los aglomerados.	28
1.3.3 Resistencia a la caída de los aglomerados.....	25
1.4 APLICACIÓN DEL PROCESO CGA CON LOS AGLOMERADOS DE CARBÓN VEGETAL SELECCIONADO Y CARBÓN MINERAL.....	28
2. RESULTADOS, PRESENTACIÓN, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	31
2.1 ANÁLISIS CARACTERÍSTICO DE LOS MATERIALES CARBONOSOS.....	31
2.1.1 Análisis próximo y último de los carbones.	31
2.2 ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DEL ACEITE.....	32
2.3 ANÁLISIS DE LA FORMACIÓN DE LOS AGLOMERADOS.....	33
2.3.1 Condiciones de aglomeración para los tipos de materiales carbonosos..	34

2.3.2 Resultados de las pruebas de resistencia a la caída de los aglomerados. Se analizan los valores reportados en la Tabla 7	35
2.3.3 Resultados de las pruebas de pérdida de tamaño de los aglomerados...	36
2.3.4 Resultados de las pruebas de redondez de los aglomerados... ..	38
2.3.5 Resultados de las pruebas de supervivencia de los aglomerados	39
2.4 APLICACIÓN DEL PROCESO CGA CON LOS AGLOMERADOS.....	42
3. CONCLUSIONES	44
4. RECOMENDACIONES	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	46
ANEXOS	50

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Análisis realizados a los diferentes aglomerados para ser	22
Tabla 2. Resultados por FRX de la mina Reina de oro.....	25
Tabla 3. Análisis próximo y último de los materiales carbonosos	31
Tabla 4. Propiedades del aceite vegetal refinado de soya.....	33
Tabla 5. Selección del diámetro entre 0,5-1,5 cm de los pellets en seis lotes diferentes, para ser utilizados en el proceso de contactación.....	34
Tabla 6. Resultados obtenidos para los diferentes materiales carbonosos	35
Tabla 7. Tamaño y resistencia a la caída de los aglomerados utilizando aceite refinado de soya para cada material carbonoso	35

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Diagrama metodológico de la investigación.....	23
Figura 2. Diagrama general para la recuperación de oro mediante la presente investigación	30
Figura 3. Representación de la gráfica pérdida de tamaño del aglomerado de Carbón vegetal mantequillo a diferentes R.P.M.....	36
Figura 4. Representación gráfica de la pérdida de tamaño del aglomerado de Carbón mineral Cerrito a diferentes R.P.M.....	37
Figura 5. Representación gráfica de la pérdida de tamaño del aglomerado de carbón vegetal gurapo a diferentes R.P.M.....	37
Figura 6. Representación gráfica de la pérdida de tamaño del aglomerado de carbón vegetal copillo a diferentes R.P.M.....	37
Figura 7. Variación de la redondez para cada tipo de material carbonoso a diferentes R.P.M	38
Figura 8. Supervivencia del aglomerado con carbón vegetal mantequillo a diferentes R.P.M	40
Figura 9. Supervivencia del aglomerado con carbón mineral a diferentes R.P.M	40
Figura 10. Supervivencia del aglomerado con carbón vegetal gurapo a diferentes R.P.M.....	41
Figura 11. Supervivencia del aglomerado con carbón vegetal copillo a diferentes R.P.M.....	41
Figura 12. Comparación de los índices metalúrgicos para los diferentes aglomerados en la fase de recuperación de oro utilizando el proceso CGA.....	43

LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO A. Representación básica de la aglomeración de oro con carbón, proceso CGA	50
ANEXO B. Imagen de los árboles de Copillo, Gurapo y Mantequillo	51
ANEXO C. Carbonización de las maderas de Copillo, Gurapo y Mantequillo...	51
ANEXO D. Imagen del disco peletizador y los aglomerados formados	53
ANEXO E. Ejemplo de la aplicación del analizador de imagen Digimizer® para pellets seleccionados de Mantequillo (M), Gurapo (G) y Copillo (C).....	53
ANEXO F. Espectro FTIR carbón mantequillo	54
ANEXO G. Espectros FTIR de aceite vegetal de soya (a) y aglomerado de carbón mantequillo (b)	54
ANEXO H. Espectro FTIR carbón Gurapo	55
ANEXO I. Espectro FTIR carbón Copillo	56
ANEXO J. Estimación del espectro FTIR para los diferentes tipos de carbón ..	56
ANEXO K. Pérdida de tamaño de los diferentes aglomerados de materiales carbonosos	57
ANEXO L. Variación de la redondez de los aglomerados a diferentes R.P.M a medida que transcurre el tiempo.....	58
ANEXO M. Supervivencia de los diferentes tipos de aglomerados de diferentes materiales carbonosos.....	59
ANEXO N. Fuerza aplicada al 90% deformación para 20 pellets de carbón vegetal mantequillo	61
ANEXO O. Ejemplo de la representación gráfica de los aglomerados Mantequillo (M) y carbón Mineral (Mi) estudiados por Digimizer®.....	62
ANEXO P. Aglomerado cargado con el metal precioso	63
ANEXO Q. Procedimiento matemático para análisis próximo y último de los carbones	46

ANEXO R. Balance de masa para conocer la cantidad de aceite presente en los aglomerados de carbón mineral y carbón vegetal mantequilla	49
ANEXO S. Representación gráfica de 2 los 20 ensayos propuestos para conocer la fuerza necesaria para deformar el 90% del tamaño de cada aglomerado	50
ANEXO T. Cálculos de las pruebas mecánicas hechas a los aglomerados	51
ANEXO U. Método para conocer el $d_{80\%}$ de los pellets formados por el método de ROSIN RAMMLER Y BONNETT	52

RESUMEN

TÍTULO: OBTENCIÓN DE ESFEROIDES DE MATERIALES CARBONOSOS MEZCLADOS CON ACEITE VEGETAL EN DISCO PELETIZADOR, PARA SER UTILIZADO EN UN PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ORO (PROCESO CGA) *

AUTORES: RICHAR EDUARDO QUINTERO CARVAJALINO- ALVARO MARIO CADENA GÓMEZ**

PALABRAS CLAVE: AGLOMERADO, CONTACTACIÓN, PROCESO CGA, MATERIAL CARBONOSO, CIANURO, MERCURIO.

DESCRIPCIÓN: Esta investigación busca minorar el uso indiscriminado de sustancias tóxicas como lo son el cianuro y el mercurio, en la actualidad se trabaja en la búsqueda de nuevas alternativas y en el estudio de otras ya existentes que contribuyen a la recuperación de oro sin que la salud humana y diversos ecosistemas sean afectados, además permitan un desarrollo sostenible. El proyecto tiene como finalidad formar aglomerados de carbón vegetal con el propósito de reemplazar el carbón mineral para así mitigar el impacto ambiental de la técnica que se emplea, se aglomera con aceite vegetal de soya y posteriormente se someten a un proceso de recuperación de oro CGA (por sus siglas en inglés: Coal Gold Agglomeration).

Para la caracterización de materias primas son utilizados análisis próximo y último para los materiales carbonosos, para la formación de aglomerados se implementa un disco peletizador con el fin de disminuir la huella hídrica, posteriormente se evalúa el pellet óptimo en resistencia, tamaño y diámetro de los tres tipos de carbón vegetal utilizados (mantequilla, gurapo y copillo), por último se implementa el proceso CGA en el cual se aplica una etapa de contactación en donde se obtienen los aglomerados cargados con oro. El proyecto se evaluó a escala laboratorio y se alcanzan resultados esperados correspondientes a 72,49% y 56,37% de carbón vegetal y mineral respectivamente.

Finalmente se llega a concluir la viabilidad del proyecto y se plantean algunas recomendaciones con el propósito de seguir cosechando resultados para la implementación a escala industrial.

*Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

Director: PhD. Elcy María Córdoba Tuta, Codirector: PhD Pedro Delvasto Angarita.

ABSTRACT

TITLE: OBTAINING SPHERIDES OF CARBON MATERIALS MIXED WITH VEGETABLE OIL IN PELLETIZER DISC, TO BE USED IN A GOLD RECOVERY PROCESS (CGA PROCESS) *

AUTHORS: RICHAR EDUARDO QUINTERO CARVAJALINO- ALVARO MARIO CADENA GÓMEZ**

KEY WORDS: AGGLOMERATED, CONTACT, PROCESS CGA, CARBON MATERIAL, CYANIDE, MERCURY.

DESCRIPTION: This research seeks to reduce the indiscriminate use of toxic substances such as cyanide and mercury, currently working on the search for new alternatives and the study of other existing ones that contribute to the recovery of gold without human health and diverse ecosystems are affected, in addition they allow a sustainable development. The project aims to form agglomerates of charcoal with the purpose of replacing the mineral coal in order to mitigate the environmental impact of the technique used, agglomerate with soybean vegetable oil and then undergo a CGA gold recovery process. (Coal Gold Agglomeration).

For the characterization of raw materials are used next and last analysis for carbonaceous materials, for the formation of agglomerates a pelletizer disk is implemented in order to reduce the water footprint, later the best pellet is selected in terms of strength, size and diameter Finally, the CGA process is implemented in which a contact stage is applied where the agglomerates loaded with gold are obtained. The project was evaluated on a laboratory scale and results were obtained corresponding to 72.49% and 56.37% recovery with charcoal and mineral coal respectively.

Finally, the viability of the project is concluded and some recommendations are made with the purpose of continuing to harvest results for the implementation on an industrial scale.

*Undergraduate Project

** Physical and Chemical Engineering`s Faculty. School of Chemical Engineering. Director: PhD. Elcy María Córdoba Tuta, Codirector: PhD Pedro Delvasto Angarita.

INTRODUCCIÓN

Toda actividad realizada por el ser humano genera una consecuencia o impacto en el entorno que lo rodea, sin embargo, muchas de estas actividades tienen un fin económico que, además, son muy significativas para muchas comunidades en cuanto a supervivencia y sostenibilidad. Un ejemplo claro de ello es la minería de oro. En la actualidad, los procesos convencionales aplicados en esta labor, tanto artesanal y a pequeña escala, son considerados la principal causa de contaminación en todo el mundo y representa una grave amenaza para la salud humana, específicamente por el tratamiento metalúrgico que se hace dentro de estas actividades, las cuales emiten una serie de sustancias residuales que no son tratadas preliminarmente [1].

La cianuración y la amalgamación hacen parte de esas actividades principales que se realizan cuando se extraen metales preciosos a partir de sus minerales, estos dos métodos mencionados provocan un peligro eminente ya que al ser aplicados generan una remanente con un alto contenido de cianuro y mercurio, incluso, superando las normas de vertimiento permitidas. De estos dos métodos contaminantes de extracción de oro se ha considerado que la amalgamación con mercurio genera una mayor contaminación. El mercurio se caracteriza por ser una sustancia difícil de degradar debido a que puede acumularse durante un largo periodo de tiempo en aguas, plantas y peces. El mercurio es el único metal que se presenta en estado líquido a temperatura normal, al entrar en contacto con un ambiente acuático, cambia a metilmercurio (CH_3Hg^+ ó MeHg), un potente neurotóxico que se acumula por medio de la cadena trófica, generalmente en los peces de los cuales muchas personas se alimentan [2].

Los efectos perjudiciales del MeHg se han conocido desde finales de los años 50 del siglo pasado debido a lo ocurrido en la bahía de Minamata (Japón), en donde se produjo una intoxicación masiva debido al consumo de pescado contaminado, una empresa química utilizaba mercurio como catalizador para la producción industrial de acetaldehído, luego de múltiples operaciones el

mercurio era vertido directamente en el agua de la bahía, lo que ocasionaba muchos afectados e incluso la muerte de muchos de ellos. Otro hecho similar se dio en Iraq en 1911 cuando se importó una considerable cantidad de semillas de cebada y trigo que fueron previamente tratadas con un fungicida a base de MeHg, fueron distribuidas y sembradas en la primavera de 1912, el grano obtenido fue molido y la harina se usó para hacer pan, al final el resultado fueron 500 personas fallecidas y 6500 hospitalizadas. En los dos incidentes anteriores los adultos no fueron afectados gravemente en comparación a los niños, por lo que sus madres habían sido las principales consumidoras del alimento contaminado. Los fetos y los bebés son muy susceptibles a los efectos del metilmercurio, la principal consecuencia de esta sustancia es el daño al sistema nervioso central (el cerebro y la medula espinal), la gravedad del daño aumenta a medida que se consume más cantidad del tóxico. La intoxicación con mercurio causa efectos similares a los causados por la parálisis cerebral. De hecho, se ha considerado al metilmercurio como la causa de una forma de parálisis cerebral [3].

Con el propósito de mitigar este problema, en la actualidad se trabaja en la búsqueda de nuevas alternativas y en el estudio de otras ya existentes que contribuyan a la recuperación de oro sin que la salud humana y diversos ecosistemas sean afectados y que, además, permitan un desarrollo sostenible. Una de estas alternativas ya existentes es la de aglomeración de oro con carbón, proceso CGA (por sus siglas en inglés: Coal Gold Agglomeration), ya que en su proceso se minimiza el uso de sustancias tóxicas lo cual hace que sea ambientalmente interesante. Esta técnica fue desarrollada mediante una investigación realizada por la British Oil y la compañía de minerales BP [2].

El proceso CGA, se beneficia de las propiedades fisicoquímicas de superficies, gracias a esto las partículas de oro, con características hidrofóbicas y oleofílica, son recuperadas [4]. Esto se basa fundamentalmente en la formación de un puente líquido entre el aglomerado de carbón vegetal y las partículas de oro, el mismo que se forma debido a la adsorción de las moléculas no polares del aceite (agente aglomerante) con los colectores [24]. Estos últimos son compuestos orgánicos que se absorben selectivamente sobre la superficie de las partículas,

haciendo que estas se vuelvan hidrofóbicas. El mecanismo de unión colector mineral depende del tipo de colector y de la naturaleza y carga de la superficie del mineral [23].

Han sido probados diferentes materiales carbonosos para originar aglomerados carbón-aceite a escala laboratorio tales como: grafito sintético, carbón mineral de diferentes procedencias, negro de humo, coque y carbón vegetal [11]. Los mismos han sido aglomerados con diversas sustancias aceitosas, entre ellas: aceite diésel, queroseno, aceite vegetal de soya y maíz [1, 2, 4, 11].

Los aglomerados formados de carbón-aceite se colocan en contacto con la pulpa de mineral aurífero, mediante agitación y en un medio acuoso para ayudar a que las partículas de oro se adhieran a la superficie de los aglomerados. Una vez cargados los aglomerados, son reciclados para aumentar la carga de oro, posteriormente separados de la pulpa, quemados y se funden las cenizas resultantes para finalmente obtener el botón de oro [4]. La metodología general y simplificada de este proceso se representa en el Anexo A.

Durante la aplicación del proceso en sus primeros estudios, se utilizaban derivados del petróleo, como lo es el aceite Diesel, y carbón mineral para formar los aglomerados de carbón-aceite. Esto no resulta tan viable en materia ambiental, debido a que las aguas residuales provenientes de un proceso con tales características quedarían contaminadas con derivados del petróleo. Estudios recientes [1, 2, 4, 11] han experimentado a nivel de laboratorio alternativas para implementar la técnica utilizando como agente aglomerante el aceite vegetal, con el fin de disminuir el uso de derivados fósiles, obteniéndose buenos resultados en la recuperación del oro.

Otros estudios [11], han probado sustituir el carbón mineral por el carbón vegetal siguiendo con la propuesta de utilizar aceite vegetal, buscando que el desarrollo de la técnica sea cada vez más amigable con el medio ambiente. No obstante, las pruebas de aglomeración hidrodinámica del carbón vegetal utilizando aceite vegetal no fueron favorables, en vista de que no resultó posible obtener esferoides carbonosos aplicables para el proceso CGA [11]. Cabe resaltar que, dichos ensayos fueron realizados siguiendo el procedimiento hidrodinámico

convencional que se realiza para aglomerar en el proceso CGA, el cual consiste en formar los aglomerados en un recipiente mediante la agitación mecánica de una emulsión agua-aceite mezclada con el material carbonoso particulado.

A pesar de que el proceso CGA ofrece una alternativa viable al uso del cianuro y del mercurio en la minería del oro, su principal desventaja orbita en que el requerimiento de agua para la formación de los aglomerados es muy elevado, lo cual limita viabilizar el proceso a nivel industrial (gran escala), en vista que la huella hídrica del proceso se vería incrementada.

Debido a lo anterior, en el presente trabajo se estudiará una alternativa a la aglomeración hidrodinámica del carbón vegetal con aceite vegetal, para su aplicación al proceso CGA. Para esto, se propone el uso de un disco peletizador, en donde se obtienen los aglomerados mediante la adición de aceite vegetal únicamente, es decir, el agua se omite en la etapa de aglomeración, contribuyendo así a que el uso del preciado líquido sea el mínimo posible, lo cual impactaría positivamente en la huella ecológica de este proceso.

El interés por utilizar carbón vegetal es debido a que este proviene de la madera de árboles naturales, los cuales se consideran un recurso renovable [5]. Al llevar la técnica a escala industrial se puede establecer el estudio de una superficie forestal en donde se pueda desarrollar una reforestación o tala controlada para que sirva como ayuda al problema de contaminación atmosférica causada por el carbón mineral y así mismo garantizar un proceso sostenible.

El carbón mineral es el segundo recurso natural no renovable, después del petróleo, utilizado en diferentes procesos tecnológicos e industriales, y de alguna manera hace parte del sustento económico y capacidad de desarrollo de una nación. Cuando se extrae y se procesa según sean los requerimientos, se generan una serie de consecuencias en nuestro ecosistema, por ejemplo, unas de ellas son la pérdida de suelos, contaminación de corrientes de agua, contaminación atmosférica y muchas veces un grave deterioro de las carreteras por donde son transportadas estas producciones, siendo críticos, los niveles de contaminación atmosférica y de afluentes por residuos y emanaciones [5].

En comparación, el carbón vegetal es un material altamente poroso y quebradizo obtenido a partir de la quema de maderas que han cumplido su ciclo de vida y se encuentran disponibles en forma de leña, las propiedades de este tipo de carbón están determinadas por la condición del proceso de carbonización y el tipo de madera utilizada. La característica más básica del carbón de leña es su tamaño de partícula, esto tiene gran influencia en sus propiedades de adsorción. Por lo tanto, la capacidad del carbón para retener partículas se atribuye ampliamente a su porosidad [6].

En relación con lo anteriormente descrito, el objetivo general del proyecto es la obtención de esferoides (aglomerados) de materiales carbonosos mezclados con aceite vegetal en disco peletizador, para ser utilizado en un proceso de recuperación de oro. Los materiales carbonosos que se utilizarán son: el carbón vegetal como materia prima principal, debido a la necesidad de utilizarlo como se justificó en el planteamiento de la problemática ambiental, y el carbón mineral, el cual ya ha sido implementado en el proceso CGA y ha demostrado resultados atractivos con respecto a la recuperación de oro. Por esta razón, el carbón mineral servirá como una forma de comparación, en cuanto al porcentaje de recuperación de oro, frente al comportamiento que exhiba el carbón vegetal. Ambos materiales carbonosos probados bajo las mismas condiciones de operación.

Con la finalidad de cumplir con este objetivo general se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar la materia prima, materiales carbonosos y el aceite empleado con el propósito de establecer sus propiedades fisicoquímicas.
- Determinar las condiciones de operación del disco peletizador para obtener los aglomerados consistentes en forma y tamaño.
- Aplicar el proceso CGA con los aglomerados obtenidos utilizando un mineral aurífero con el fin de evaluar la capacidad de estos para recuperar el oro.

1. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

La investigación que se describe a continuación tiene como finalidad aglomerar carbón vegetal y carbón mineral con aceite refinado de soya en un disco peletizador y evaluar sus propiedades para ser comparados entre sí. Posteriormente se selecciona el mejor aglomerado de carbón vegetal y junto con el aglomerado de carbón mineral se someten a un proceso de obtención de oro, para así conocer el porcentaje de recuperación de cada uno de ellos y luego ser comparados los resultados con investigaciones que han desarrollado otro método y han utilizado solo carbón mineral [11].

El estudio cuenta con una verificación de resultados obtenidos mediante diferentes series de ensayos experimentales, variando tipos de carbón vegetal (mantequillo, copillo y gurapo) y carbón mineral, tiempo de formación del aglomerado carbón-aceite y revoluciones del disco peletizador, analizando los pellets obtenidos en cuanto a la resistencia a la caída, resistencia hidrodinámica, pérdida de tamaño y prueba de resistencia mecánica. Las fórmulas utilizadas para estos cálculos se muestran en el Anexo S.

A continuación, se presentan los análisis que se le hacen a los diferentes tipos de pellets luego de ser sacados del disco peletizador, estos se especifican en la Tabla 1.

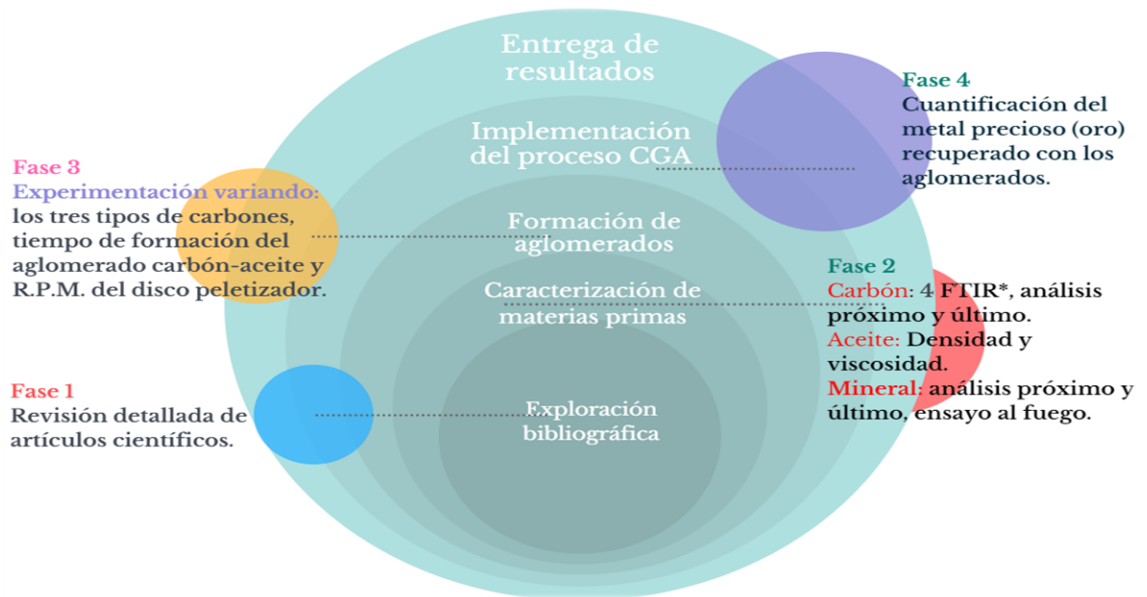
Tabla 1. Análisis realizados a los diferentes aglomerados para ser seleccionados y posteriormente aplicados a la recuperación de oro

Origen del Carbón usado en el Aglomerado	Estudio hecho al aglomerado
Carbón vegetal copillo (<i>Heliocarpus Sp.</i>)	Esfericidad y resistencia a la caída
Carbón vegetal mantequillo (<i>Humirastrum Colombianum</i>)	Esfericidad, resistencia a la caída y resistencia a la compresión.
Carbón vegetal gurapo (<i>Ocotea Sp.</i>)	Esfericidad y resistencia a la caída
Carbón mineral del Cerrito, Santander (usado como comparación)	Esfericidad y resistencia a la caída

Fuente: Autores

Planteados los tipos de carbón y conociendo el estudio que se le hace a cada uno de ellos se inicia a desarrollar la metodología para este proyecto como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Diagrama metodológico de la investigación



Fuente. Autores

*Los 4 FTIR corresponden a los tres tipos de carbón vegetal y al aglomerado de carbon mantequillo. Encontrados en los Anexos F y G.

1.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

1.1.1 Caracterización del material carbonoso. Los diferentes tipos de carbón vegetal obtenidos de las maderas de los árboles de mantequillo, gurapo y copillo, fueron producidos por los autores en el municipio de Convención, Norte de Santander (en el Anexo B se reportan las imágenes correspondientes a cada tipo de árbol). Estos se obtienen de manera artesanal, quemando la madera a la intemperie, siempre empleando árboles caducos o que se encuentran en proceso de secado natural. Una vez obtenida la leña seca, se procede hacer una combustión la cual tiene como finalidad formar los carbones y cuando ya están creados, se apaga el fuego para que estos no se desintegren y formen cenizas.

El apagado se logra vertiendo agua por encima, hasta apagar la llama en su totalidad y se separan los carbones. A continuación, se inicia el fuego nuevamente para carbonizar otro lote de madera con la cantidad que se cree necesaria (en el Anexo C se observa la carbonización de los tres tipos de madera). El carbón mineral usado en este estudio con fines comparativos provino del municipio El Cerrito, Santander. Obtenidos los materiales carbonosos, se sometieron a procesos de trituración, molienda y tamizado, con el propósito de lograr el 100% del material pasante malla 50 Tyler (177 micras) para obtener los mejores resultados en las pruebas de aglomeración, de acuerdo con lo descrito por otros autores [11, 18]. Con este tamaño deseado se aplicaron las normas americanas ASTM D3173 método de prueba estándar para determinar la humedad de muestras de carbón, ASTM D3174 para la cantidad de cenizas luego de la calcinación, ASTM D3175 para materia volátil y ASTM D3302 para determinar el carbono fijo presente [11]. El poder calorífico se determinó mediante la norma americana ASTM D5865 y el contenido de azufre mediante la ASTM D3177 [13,14]. El análisis último de los carbones regido por la norma ASTM D5373-02 se lleva a cabo en el analizador Sundry SDCHN 435 [12,13].

1.1.2 Caracterización del aceite. Se utilizó como líquido aglomerante el aceite comercial refinado de soya, debido a que este presenta los mejores resultados en las pruebas de aglomeración descrito en trabajos anteriores [11,18], el cual es adquirido en una cadena de supermercado local donde su destino es el consumo humano.

Es de vital importancia conocer las características de este aceite con el fin de establecer el comportamiento fisicoquímico que podría presentar al entrar en contacto directo con el carbón [16], puesto que de acuerdo a sus propiedades tendrá una mejor cohesión para la formación de los pellets, conociéndose mediante la medición de viscosidad, densidad y algunos grupos funcionales [11]. La viscosidad se precisa mediante el Viscosímetro Brookfield modelo RV-III+RHEOMETER, la densidad se determinó con un densímetro y los grupos funcionales se hallaron usando la técnica de espectroscopia infrarroja por medio del equipo CARY 630 Agilent Technologies.

1.1.3 Muestra de mineral aurífero. Se utilizó mineral aurífero proveniente de Vetas de Santander, de la mina Reina de oro. La caracterización de este mineral aurífero se realiza en un trabajo previo [15] por medio de las técnicas de difracción (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX) y microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS), seguido se determina por medio de la técnica de ensayo al fuego el tenor de metales preciosos, por medio de la norma ASTM E400; aplicando éste método para obtener la ley de oro y plata para el mineral estudiado, el cual corresponde a $46,5 \pm 0,5$ g/ton de Au y $305 \pm 1,5$ g/ton de Ag.

La composición elemental obtenida por FRX del mineral se presenta con más especificación en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados por FRX de la mina Reina de oro.

Elemento	Fe	S	Si	Al	K	As	Mg	Ti	P
% Mineral	20,63	18,99	7,24	2,33	0,86	0,25	0,20	0,20	0,19
Elemento	Zn	Ca	Pb	Mn	Cu	Ce	Zr	Cr	La
% Mineral	0,11	0,11	0,08	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02
Elemento	Ni	Sb	Mo	Au	Y	Ag	Co	Sr	Rb
% Mineral	0,02	0,02	0,01	81*	78*	76*	59*	40*	11*

Fuente: Autores

*Indican elementos minoritarios en mg/Kg

1.2 FORMACIÓN DE AGLOMERADOS

Para la realización y posterior marcha de esta investigación basada en la producción de aglomerados de carbón vegetal-aceite, se tienen en cuenta aspectos como lo son el tipo de carbón, tiempo de formación del aglomerado, las revoluciones del disco peletizador y el tamaño del aglomerado. Posteriormente se analiza que cumplan con la consistencia en forma y resistencia a la caída. Para lograr este propósito, se sigue una serie de lineamientos bajo los cuales se logran seleccionar rangos para encontrar las condiciones adecuadas, manteniendo el resto de parámetros fijos. Para esto se tiene como primera

medida la preparación del carbón tanto vegetal como mineral de la siguiente manera:

- Secado en muflas a 130°C por un tiempo de 45 minutos.
- Disminución de tamaño en molino de bolas por 20 minutos.
- Tamizado en malla 50 Tyler y colocado en el Ro-Tap para mantener la granulometría homogénea.

Para la selección del tipo de pasante se hicieron experimentos, inicialmente, con malla 20 y se evaluó paulatinamente subiendo la malla, hasta lograr corroborar la aglomeración con el pasante que marca las mejores condiciones propuestas por la literatura, malla 50. El acondicionamiento de las revoluciones del disco peletizador se hizo en base a que el movimiento de cascada sea el más rápido posible, pero al mismo tiempo que no logre sacar la carga de este, iniciándose con 10 R.P.M. y lográndose estandarizar hasta un valor de 18,32 R.P.M, en el cual el movimiento de cascada es favorable y la carga no emerge del disco (se puede observar la imagen del disco cargado y los aglomerados formados el Anexo D). El ángulo del equipo está dado por la literatura [15], en donde se establece valores oscilantes en 45°, valor que favorece el efecto de cascada dentro del disco. El tiempo de aglomeración se determina por medio de la experimentación hasta lograr estandarizar la máxima esfericidad, tamaño y forma. Estos parámetros geométricos se determinaron utilizando un software analizador de imágenes, disponible en internet (demo), denominado Digimizer®. Un ejemplo de la aplicación de esta herramienta para analizar mediante imagen los aglomerados seleccionados de los diferentes carbones vegetales se observa en el Anexo E. Las mejores condiciones de aglomeración obtenidas son descritas a continuación:

- Temperatura aproximadamente 26°C.
- Granulometría del carbón utilizado pasante malla 50 Tyler.
- Velocidad del disco peletizador 18,32 r.p.m.
- Angulo del disco peletizador 45°.
- Relación en peso aceite/material carbonoso 0,55.
- Tiempo de aglomeración 25 minutos.

Seguido de esto se emplean las condiciones encontradas para llevar a cabo la primera etapa del proceso correspondiente a la aglomeración. El disco peletizador AGMD DG631171 con capacidad de 1750 R.P.M y un diámetro de 0,37m, se fijó a un ángulo de 45° y 18,32 revoluciones. Inmediatamente, se descargaron sobre él 100 gr de carbón, se gradúa aceite vegetal de soya en un envase dispersador para adicionarlos sobre la carga mientras el disco gira, por medio de una dispersión en gotas tan finas como sea posible (aspersor), por un determinado tiempo (entre 25 y 50 minutos, dependiendo del tipo de material carbonoso) hasta lograr la homogenización del aglomerado. Posteriormente, los aglomerados se clasifican en un rango de diámetro entre 0,5 y 1,5 cm [10] y puestos a secar por un periodo de veinticuatro (24) horas.

1.3 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS AGLOMERADOS FORMADOS

Una vez producidos los aglomerados de los tres tipos de carbón vegetal y mineral, además de evaluar cuántos están en el rango de diámetro dado por la literatura, se procede a calcular el diámetro promedio por el cual el 80% ($d_{80\%}$) de los pellets de la carga están disponibles para el proceso establecido, cumpliendo con el rango de diámetro establecido por la literatura 0,5-1,5 cm. En el Anexo T se detalla este proceso, el cual es indispensable para hacer los diferentes tipos de pruebas como son: resistencia a la caída, pérdida de tamaño del aglomerado, redondez y supervivencia del aglomerado.

1.3.1 Redondez de los aglomerados. Este estudio es para lograr discernir y posteriormente escoger el mejor tipo de carbón vegetal y compararlo con el carbón mineral en el proceso de recuperación de oro. Se pretende saber cómo varía la redondez del aglomerado desde un tiempo inicial cero hasta un tiempo final de sesenta minutos, al ser sometidos en agitación mecánica. Este indicador nos muestra como a medida que aumenta las R.P.M el aglomerado pierde su forma, determinado por la herramienta Digimizer®, en el cual por medio de una fotografía tomada cada quince minutos por un tiempo total de una hora de la producción total o lote, dando como resultado la mayor redondez para el carbón

mantequillo, un ejemplo de esto se representa en el Anexo Ñ. El procedimiento matemático se puede ver en el Anexo S.

1.3.2 Pérdida de tamaño de los aglomerados. En este ensayo preliminar se logra conocer el comportamiento y el desgaste de los pellets, mediante agitación mecánica en una jarra de 13 cm de diámetro, simulando la etapa de contactación utilizando arena como material particulado para formar la pulpa en agua, esto con el fin de tener un criterio al momento de seleccionar el tipo de material carbonoso, como lo es la pérdida de tamaño del aglomerado a medida que cambia el tiempo de contactación.

1.3.3. Resistencia a la caída de los aglomerados. Luego de tener los pellets seleccionados correspondientes a lo recomendado por la literatura estos se someten a un proceso de aireación a la intemperie durante un día debido a que los pellets toman resistencia y puede evaluarse en una prueba de caída libre a 48 cm de altura, con esto se logra determinar la fractura que estos pueden sufrir al ser utilizados en el proceso de contactación con el mineral aurífero.

1.4 APLICACIÓN DEL PROCESO CGA CON LOS AGLOMERADOS DE CARBÓN VEGETAL SELECCIONADO Y CARBÓN MINERAL

Los aglomerados obtenidos de carbón vegetal (mantequillo) y de carbón mineral (Cerrito) son mezclados con la pulpa de mineral aurífero por separado, teniendo en cuenta los parámetros de estudio obtenidos por E.M Córdoba [16], los cuales son:

- Recipiente plástico con paredes lisas de 20 cm de diámetro.
- Altura hélice: 10 mm.
- Volumen de agua: 250 ml.
- Relación en peso aglomerados/mineral: 1
- Tiempo de acondicionamiento: 5 min.
- Tiempo de contactación: 45 min.
- Cantidad de colector: 100 μ L.
- Temperatura: 24 °C.

- Velocidad de agitación: 600 rpm.

Para el proceso de contactación cabe resaltar que las condiciones son a 600 revoluciones, pero para esta investigación se decide evaluar 650 R.P.M con el fin de conocer la repercusión de esta en la etapa final del proceso. El mineral se redujo a un pasante del 100% correspondiente a malla 200 Tyler.

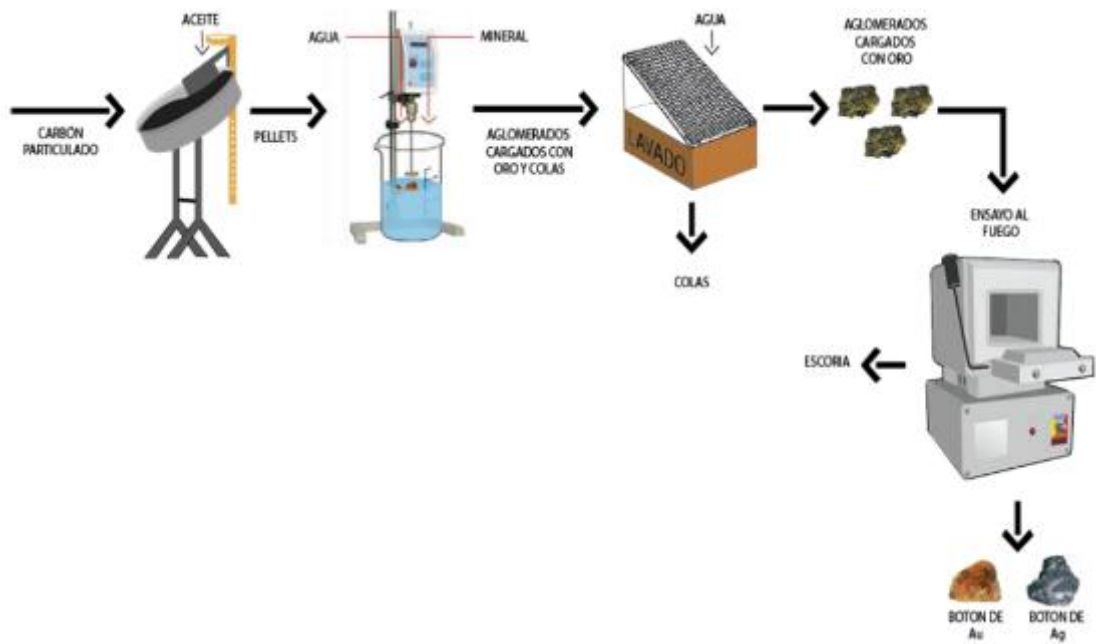
En la etapa de contactación se utiliza colector AEROFLOAT 208 PROMOTER para inducir la hidrofobicidad en el metal deseado [21]. Para esta parte del proceso se trabajó bajo las siguientes condiciones:

- Recipiente plástico con paredes lisas de 27 cm de diámetro.
- Relación en peso aglomerados/mineral: 1
- Relación en peso aceite/material carbonoso 0,55
- Altura hélice: 10 mm.
- Volumen de agua: 250 ml.
- Cantidad de colector: 100 μ L.
- Volumen de agua: 250 ml.
- Velocidad de agitación: 650 R.P.M

Antes de realizar el proceso de contactación, se realizó un acondicionamiento de la pulpa por un tiempo de cinco minutos, para esto solo se agrega el mineral y el colector en el volumen de agua agitándose a los R.P.M indicados. Pasados estos cinco minutos, se agrega los aglomerados a la pulpa del mineral para empezar la contactación entre estos y se prosigue con la misma agitación hasta que transcurran 45 minutos. Finalizado este tiempo los aglomerados son sacados y se suspenden en un tamiz malla 80 Tyler, se dejan reposar y se enjuagan para separar las colas de estos. Una vez separados los aglomerados se pesan para corroborar que a los pellets no se halla pegado más del 20% del mineral, lo anterior para garantizar que solo se halla captado el oro y no restos de sólidos presentes en la pulpa, si no es así se debe seguir lavando hasta lograr esta condición. Finalmente, los aglomerados y sus respectivas colas son secados a una temperatura aproximada de 100 °C para luego ser analizados mediante el ensayo al fuego.

Se representa el diagrama general para la recuperación de oro de la investigación en la Figura 2.

Figura 2. Diagrama general para la recuperación de oro mediante la presente investigación



Fuente. Autores

2. RESULTADOS, PRESENTACIÓN, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

2.1 ANÁLISIS CARACTERÍSTICO DE LOS MATERIALES CARBONOSOS

2.1.1 Análisis próximo y último de los carbones. Por medio de los análisis presentados a continuación, se logra desde un punto de vista fisicoquímico esclarecer cual es el tipo de carbón idóneo para la posterior investigación y puesta en marcha de este proyecto. Los resultados de los análisis se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Análisis próximo y último de los materiales carbonosos

Parámetros*	Carbón vegetal de copillo (<i>Heliocarpus Sp.</i>)	Carbón vegetal de mantequillo (<i>Humiriastrum Colombianum</i>)	Carbón vegetal de gurapo (<i>Ocotea Sp.</i>)	Carbón mineral (<i>Cerrito, Santander</i>)
Humedad [%]	8,84	6,61	10,63	5,04
Cenizas [%]	4,13	2,83	3,59	9,16
Materia volátil [%]	21,53	40,07	39,95	12,11
Carbono fijo [%]	65,48	72,8	45,81	79,16
Carbono total [%]	68,44	81,17	60,59	78,07
Hidrogeno [%]	3,15	2,19	4,12	2,80
Nitrógeno [%]	1,02	0,19	0,35	1,13
Azufre [%]	0,22	0,19	0,21	0,39
Poder calorífico [BTU/lb]	11109,65	11271,17	11087,34	11130,127

Fuente: Autores

*Valores determinados por el procedimiento matemático descrito en el Anexo P.

Para favorecer el proceso de aglomeración se observa en la parte experimental que el carbón vegetal a mayor porcentaje de humedad es mucho más difícil de aglomerar debido a que forma una masa pastosa, siendo privilegiado así el carbón mantequillo, puesto que éste presenta el menor índice de humedad. Adicionalmente el contenido de cenizas presente muestra que debe existir un porcentaje bajo para que beneficie el proceso, en cuanto a la reactividad de los carbones, en términos generales, a mayor proporción de carbono fijo mejora el

rango de clasificación (la calidad) del combustible; también es posible afirmar que a mayor relación C/H aumenta el carbono fijo, y por lo tanto mejora el rango de clasificación como comburente [20]. Investigaciones realizadas junto con la presente muestran que para carbones minerales el porcentaje de materia volátil tiene muy poca influencia en el proceso [11].

En la Tabla 3, se observa que los porcentajes obtenidos de hidrogeno y nitrógeno fueron muy bajos y no muestran una diferencia considerable para perturbar o intervenir en el proceso, la presencia de azufre no afecta la recuperación de oro debido al hecho de que el oro es más hidrofóbico que éste.

Con base en lo expuesto, el tipo de carbón vegetal que cumple con las mejores condiciones de aglomeración es la mantequilla, el análisis FTIR de dicho carbón se presenta en la Anexo F.

Se observa que en el pico 2324 es característico del enlace (O=C=O) presente para la unión del dióxido de carbono, una peculiaridad de todos los carbones vegetales. En el pico 2091 se presentan enlaces débiles (C≡C, C≡N y C=C=C) los cuales se marcan por su mayor poder de vibración, estando presente este solo en el carbón mantequilla y teniendo repercusiones del valor más alto presentado en carbono fijo, ayudando al fortalecimiento entre los enlaces del aceite y favorece el aglomerado [6,19]. Para la punta 1559 se observa la descomposición de la lignina por la reducción de los enlaces C = C, bandas vibratorias de anillos aromáticos siendo esta parte de la pared celular de muchas células vegetales a las cuales da dureza y resistencia, siendo una particularidad del carbón mantequilla [20].

2.2 ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DEL ACEITE

Consiste en determinar la viscosidad, densidad y algunos grupos funcionales presentes con el propósito de determinar su uso en el proceso de emulsificación, dado que este fue el que presento los mejores resultados en tesis propuestas anteriormente [11]. El aceite refinado de soya presenta en gran cantidad ácidos grasos, una propiedad a tener en cuenta de estos es la viscosidad que depende de lo largo de las cadenas de átomos de carbono de la molécula [18], en los

cuales favorece la aglomeración y la atracción con las partículas de oro. La cantidad de aceite requerida para la formación de los aglomerados de carbón vegetal mantequillo y carbón mineral se detalla en el Anexo Q. Las propiedades descritas anteriormente se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades del aceite vegetal refinado de soya

<i>Propiedad*</i>	<i>Aceite vegetal de soya</i>
<i>Densidad [g/ml]</i>	0,915 ± 0,001
<i>Viscosidad [cP]</i>	48 ± 0,1

Fuente: Autores

*Mediciones tomados a 26°

Para la literatura, los aceites vegetales tienen mayor poder aglomerante debido a que estos se encuentran presentes los ácidos grasos libres, son estos los que confieren las características al aceite. La investigación realizada para Colciencias por el grupo de la U.I.S, por Pedraza y colaboradores, reporta que uno de los mejores aceites aglomerantes es el aceite refinado de soya [18].

Para esto se analiza el espectro FTIR, con la finalidad de saber si éste reporta lo mencionado anteriormente como se advierte en la Anexo G. En el pico 2922 y 2853 se manifiesta la vibración de estiramiento simétrica y asimétrica del grupo CH₂ alifático. Para el pico 1742, se presenta el enlace C=O de los grupos ésteres en la molécula de fosfolípidos, éster de los triglicéridos y el alto contenido en ácidos grasos saturados [11].

2.3 ANÁLISIS DE LA FORMACIÓN DE LOS AGLOMERADOS

Teniendo en cuenta las condiciones de operación descritas en la metodología y conociendo los diferentes tipos de ensayos, se descartan los pellets que no cumplen en forma, tamaño y resistencia a la caída. Para conocer las características del aglomerado de carbón vegetal seleccionado se analiza su respectivo espectro FTIR en el Anexo G(a), y para sus respectivas comparaciones se muestran los espectros FTIR de los otros carbones vegetales en los Anexos F, G(b), H e I. La tabla de comparación se muestra en el Anexo J.

Tabla 5. Selección del diámetro entre 0,5-1,5 cm de los pellets en seis lotes diferentes, para ser utilizados en el proceso de contactación

Lote	Mantequillo		Mineral		Gurapo		Copillo	
	PL*	PS**	PL*	PS**	PL*	PS**	PL*	PS**
1	175	173	163	157	153	147	141	127
2	173	172	161	156	152	145	138	122
3	173	171	160	154	150	142	138	120
4	172	172	158	155	150	139	137	118
5	169	167	157	152	148	137	136	116
6	168	167	156	153	147	136	135	114

* Pellets presentes en cada lote.

**Pellets seleccionados que cumplen con el diámetro establecido por la literatura de 0,5cm-1,5cm en cada lote.

Los resultados expuestos en la Tabla 5, ponen en manifiesto que la menor pérdida (aglomerados que no cumplen con las condiciones) de los pellets es la del carbón mantequillo, reportando pérdidas en promedio de 1,14%, lo cual significa que prácticamente toda la carga de los 100g se convierte en aglomerados utilizados para el proceso de contactación, teniendo pérdidas en promedio los de carbón gurapo y copillo de 5,34% y 13,04% respectivamente. Para el carbón mineral la pérdida es de 3,14%, la segunda más baja lo cual hace que este último sea comparable con el carbón vegetal mantequillo en el proceso de recuperación de oro.

2.3.1 Condiciones de aglomeración para los tipos de materiales carbonosos. Se presentan las condiciones de aglomeración y el porcentaje de aglomerados que no se encuentran en el rango de diámetro, Tabla 6.

Tabla 6. Resultados obtenidos para los diferentes materiales carbonosos

Tipo de carbón	Tiempo de aglomeración (min)	Cantidad de aceite requerido (ml)	% aglomerados fuera de rango de diámetro
Carbón vegetal mantequillo	25	58,36	1,2
Carbón mineral cerrito	30	47,59	3,2
Carbón vegetal gurapo	35	60	13,04
Carbón vegetal copillo	50	70	5,34

Fuente: Autores

Los resultados mostrados en la Tabla 6 manifiestan que las mejores condiciones las presentan el carbón vegetal de mantequillo y carbón mineral cerrito; por lo contrario, el carbón vegetal de gurapo y copillo presentan los tiempos más altos de aglomeración que no son favorables al proceso.

2.3.2 Resultados de las pruebas de resistencia a la caída de los aglomerados. Se analizan los valores reportados en la Tabla 7.

Tabla 7. Tamaño y resistencia a la caída de los aglomerados utilizando aceite refinado de soya para cada material carbonoso

Tipo de carbón	Tamaño del aglomerado (cm)	N° de caídas*
Mantequillo	0,5	Más de 100
Mantequillo	0,9	Más de 100
Mantequillo	1,5	Más de 100
Mineral	1,3	89
Mineral	0,9	93
Mineral	0,6	95
Gurapo	0,6	78
Gurapo	0,99	66
Gurapo	1,3	71
Copillo	0,5	62
Copillo	0,8	54
Copillo	1,4	58

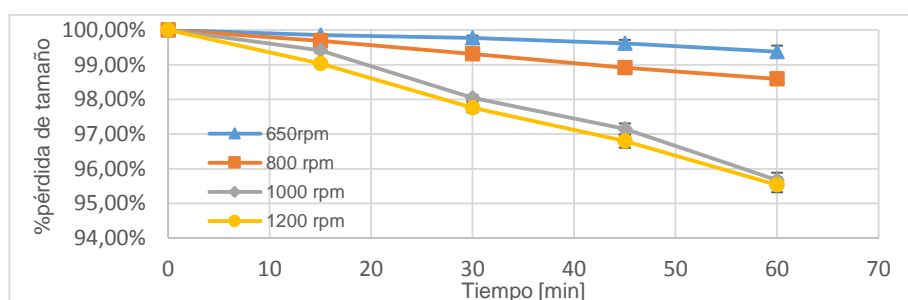
*Resistencia a la caída desde una altura de 48 cm, donde la mejor resistencia es aquella que soporte más 100 caídas

El resultado final de los pellets indica que el carbón vegetal de mantequillo tardó menor tiempo en aglomerar, se podría considerar que esto es debido a que el aceite vegetal se adsorbe más rápido sobre las partículas de carbón. Es así como el volumen de aceite utilizado para la obtención de esferoides de carbón mantequillo es de 58,36 ml por cada 100g de carbón, reportándose como la menor cantidad de aceite, siendo el mejor postulado para la etapa de contactación.

2.3.3 Resultados de las pruebas de pérdida de tamaño de los aglomerados.

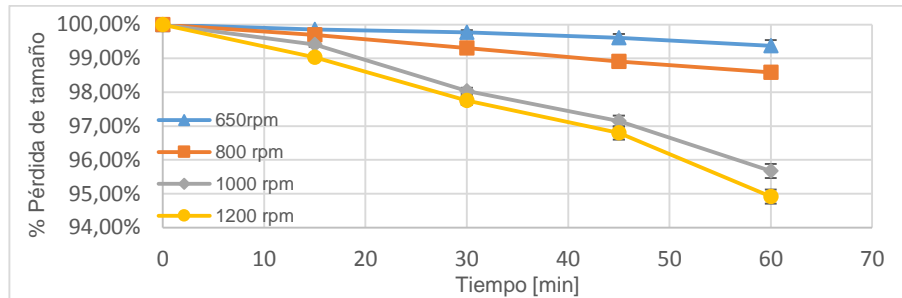
Como se observa en las Figuras 3,4,5 y 6, valores obtenidos del promedio de tres ensayos realizados para cada tipo de carbón y a las R.P.M indicadas como se observa en el Anexo K. El procedimiento matemático utilizado se detalla en el Anexo S.

Figura 3. Representación de la gráfica pérdida de tamaño del aglomerado de Carbón vegetal mantequillo a diferentes R.P.M



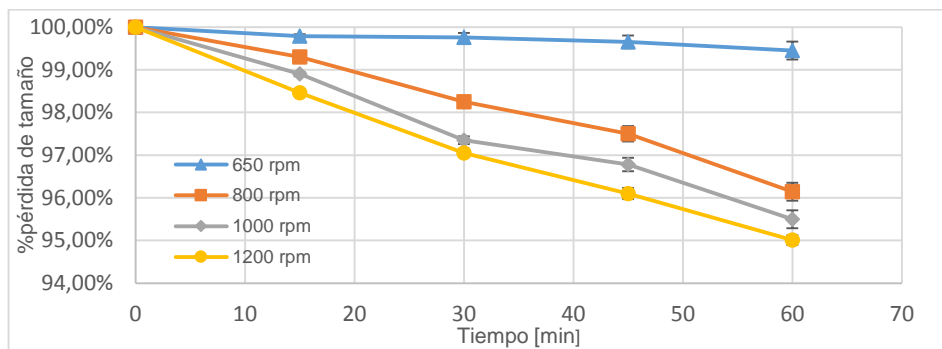
Fuente: Autores

Figura 4. Representación gráfica de la pérdida de tamaño del aglomerado de Carbón mineral Cerrito a diferentes R.P.M



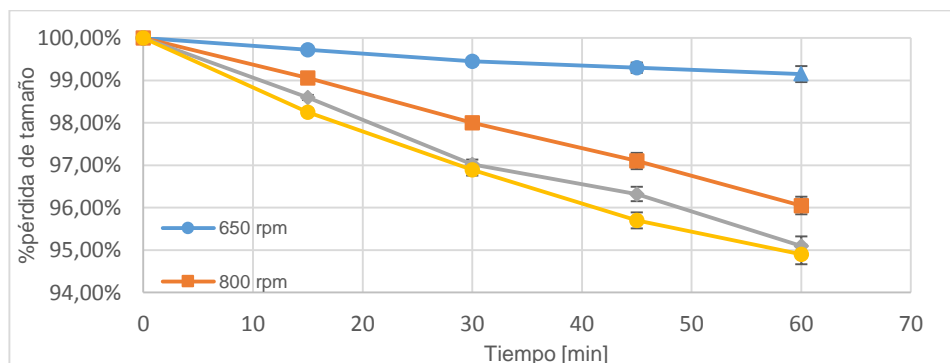
Fuente: Autores

Figura 5. Representación gráfica de la pérdida de tamaño del aglomerado de carbón vegetal gurapo a diferentes R.P.M



Fuente: Autores

Figura 6. Representación gráfica de la pérdida de tamaño del aglomerado de carbón vegetal copillo a diferentes R.P.M



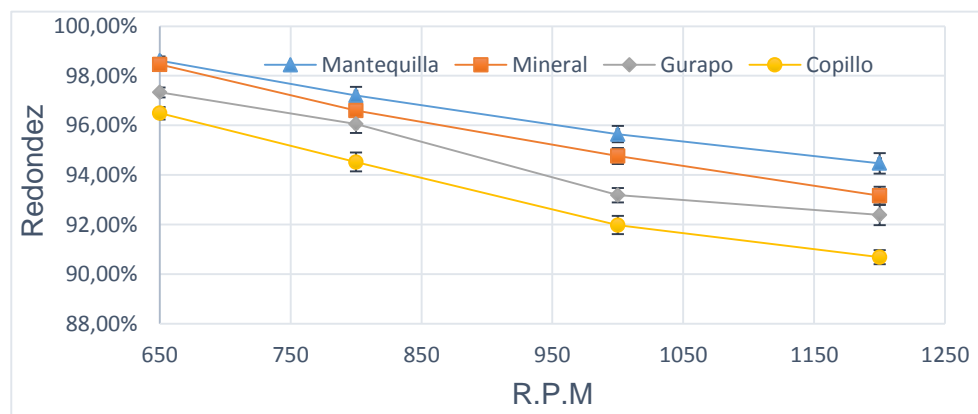
Fuente: Autores

Aunque los resultados de este ensayo para los diferentes tipos de carbón no son tan aislados, se puede confirmar que la menor pérdida de tamaño está dada por los aglomerados de carbón mantequillo, cuyo menor dato se reporta a las 650 revoluciones. El carbón mineral posee un comportamiento de desgaste similar al carbón vegetal mantequillo lo cual se hace inminente la comparación entre estos dos en la contactación, el carbón gurapo y copillo reportan una pérdida de tamaño entre el 10 y 15% en la revolución que favorece el proceso de contactación. Se observa que a 1000 y 1200 R.P.M, los aglomerados tienden a comportarse de manera similar, en estas revoluciones empiezan a perder tamaño y llegan a un punto de destrucción antes de superar los 60 minutos.

2.3.4. Resultados de las pruebas de redondez de los aglomerados. Los pellets que pierden su esfericidad son vulnerables a sufrir grietas y llegar a un punto en el cual se destruya y no favorezca el proceso de recuperación del metal precioso (oro). El carbón vegetal mantequillo presentó los mejores resultados de esta prueba. El estudio más detallado de como varia la redondez de los diferentes materiales carbonosos a diferentes R.P.M se observan en la Anexo L.

Se lleva a cabo una comparación entre los cuatro tipos de aglomerados para conocer así cual es el que posee el mejor comportamiento basado en las tablas del anexo anterior. Esto se reporta en la Figura 7.

Figura 7. Variación de la redondez para cada tipo de material carbonoso a diferentes R.P.M

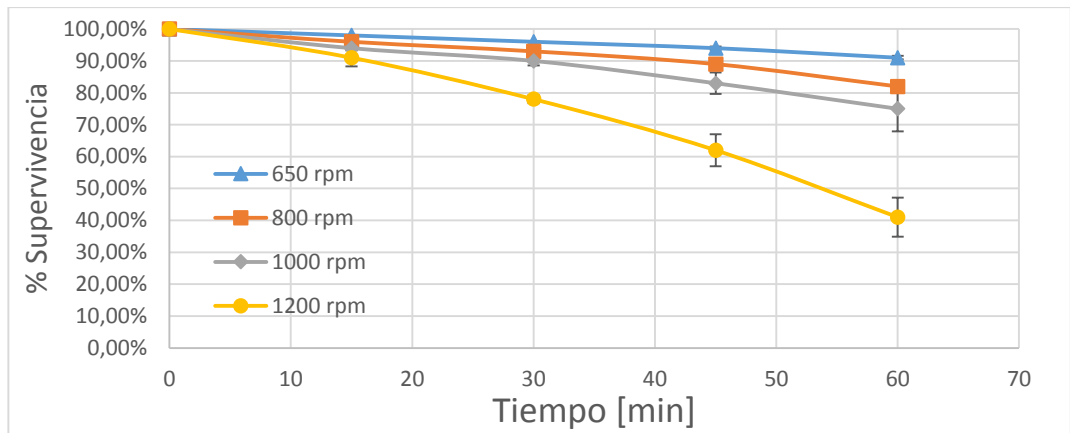


La redondez es afectada en mayor medida al gurapo y copillo, tomando valores de 2,67 y 3,51% de disminución respectivamente en la revolución objetivo (650 R.P.M) para llevar acabo la recuperación de oro, siendo estos los que se destruyen con mayor facilidad, el carbón mantequillo es el que presenta la menor perdida de redondez con un valor reportado de 1,39% comparado con 1,54% de pérdida del carbón mineral para la revolución que cumple con menor desgaste a la deformación del aglomerado.

Al estudiar la gráfica se reporta que el aglomerado de carbón mantequillo y carbón mineral tienen la menor pérdida de la redondez a diferentes revoluciones, siendo este otro factor que corrobora la utilización de estos dos carbones para la etapa de contactación del proceso CGA y se descarta una vez más los aglomerados de carbón gurapo y copillo debido a que pierden su redondez y se empiezan a destruir desde las 650 hasta 1200 R.P.M.

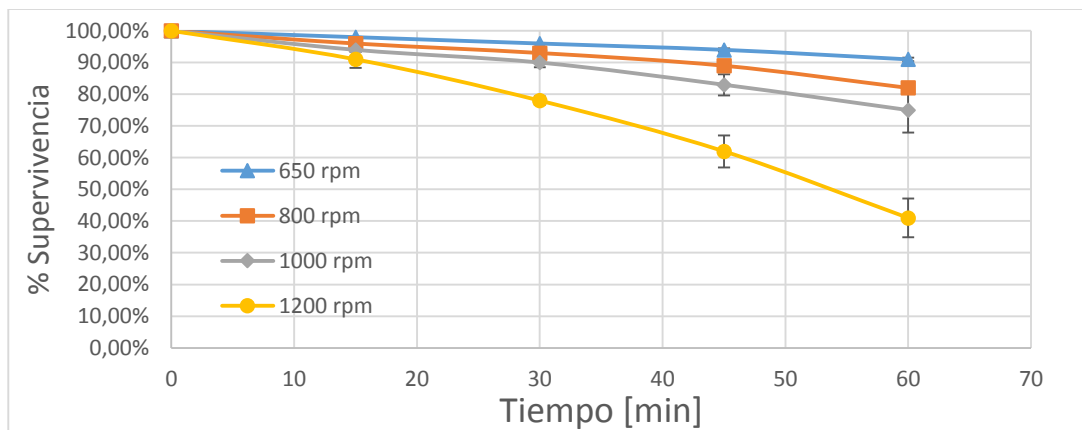
2.3.5 Resultados de las pruebas de supervivencia de los aglomerados. El desgaste de los aglomerados trae consigo la pérdida de estos para el proceso, en el presente estudio de supervivencia se planea saber la cantidad de aglomerados destruidos a diferentes R.P.M. para conocer de esta manera las condiciones a las cuales son favorables para llevar a cabo el proceso de contactación y poder discernir el mejor tipo de material carbonoso. La supervivencia en función del tiempo a diferentes R.P.M de los diferentes tipos de aglomerados se muestran en la Figura 8, 9 10 y 11. Los valores son los correspondientes al promedio de tres ensayos realizados para cada R.P.M, los datos de cada figura se pueden observar en el Anexo M y el procedimiento matemático realizado para determinar estos datos se detalla en el Anexo S.

Figura 8. Supervivencia del aglomerado con carbón vegetal mantequillo a diferentes R.P.M



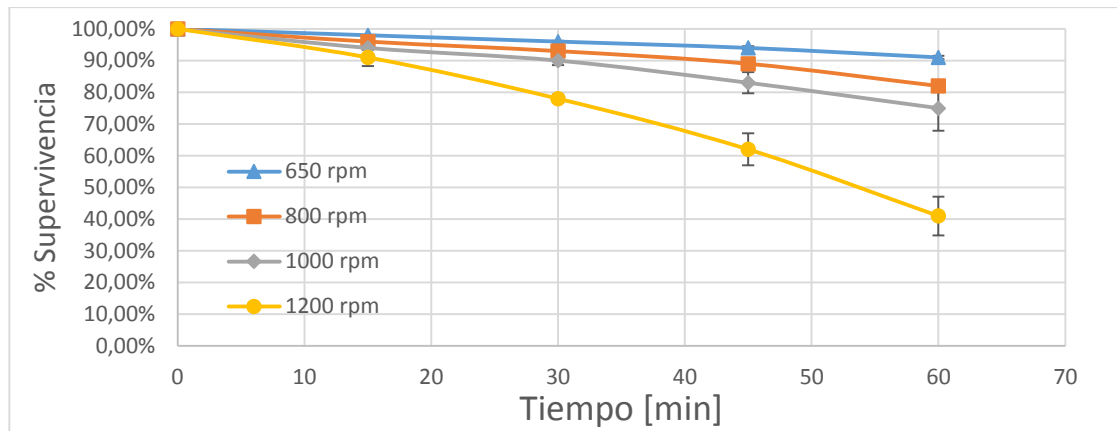
Fuente: Autores

Figura 9. Supervivencia del aglomerado con carbón mineral a diferentes R.P.M



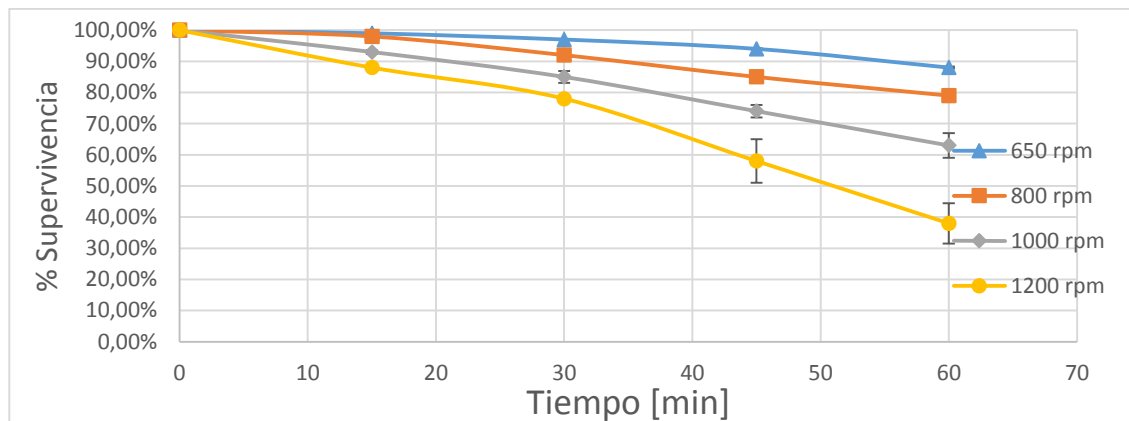
Fuente: Autores

Figura 10. Supervivencia del aglomerado con carbón vegetal gurapo a diferentes R.P.M



Fuente: Autores

Figura 11. Supervivencia del aglomerado con carbón vegetal copillo a diferentes R.P.M



Fuente: Autores

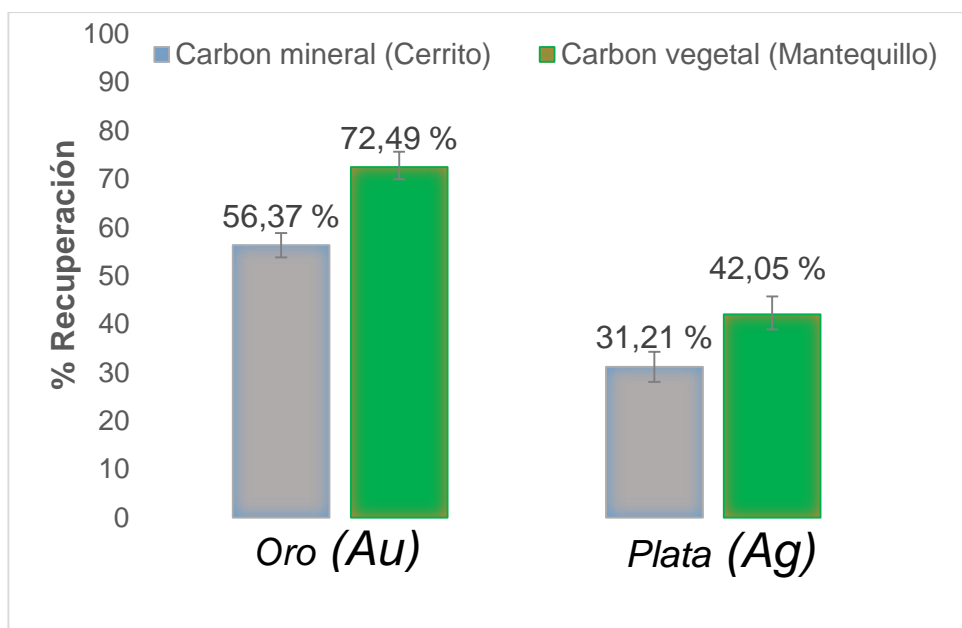
Una vez seleccionado el tipo de material carbonos vegetal (mantequillo), este escogido porque presenta el menor tiempo de aglomeración, menor cantidad de aceite para aglomerar y es el que tiene el porcentaje más bajo de los pellets que no cumplen con el diámetro establecido por la literatura entre 0,5 y 1,5 cm, además el que posee la menor pérdida de tamaño y del cual tienen mayor supervivencia, se somete a una comparación con el carbón mineral.

Para conocer un poco más acerca del material carbonoso destacado (aglomerados de carbón mantequillo), se procede a realizar pruebas de resistencia mecánica de compresión siguiendo las normas E382-12, la cual está basada en la determinación de la resistencia al aplastamiento de los pellets de mineral de hierro y la norma D5230 – 14 donde se determina la dureza de los pellets individuales de carbono. Estas normas se acoplan para reportar resultados de diámetro y fuerza de los pellets estudiados, siendo estas llevadas a cabo en el equipo Tinius Olsen H25KS en el cual se toman 20 pellets y se someten a una fuerza aplicada. Se extrae el valor de la fuerza aplicada cuando el aglomerado se ha deformado el 90% de su tamaño inicial y se reporta la fuerza requerida como se observa en el Anexo R.

2.4 APLICACIÓN DEL PROCESO CGA CON LOS AGLOMERADOS

Una vez seleccionados los aglomerados de carbón vegetal mantequillo y los aglomerados de carbón mineral el cerrito, son utilizados en la aplicación del proceso CGA y se reporta respectivamente el porcentaje de recuperación del metal precioso de interés. Los datos son representados en la Figura 12.

Figura 12. Comparación de los índices metalúrgicos para los diferentes aglomerados en la fase de recuperación de oro utilizando el proceso CGA



Fuente: Autores

De la etapa de recuperación se obtiene (en el Anexo O se puede apreciar la imagen del pellet cargado) que los mayores resultados los presenta el carbón vegetal (Mantequillo), el cual es el más resistente y esférico en comparación con el carbón mineral, con un valor de recuperación en los aglomerados del 72,49% de oro(Au) y 42,05% de plata (Ag); los reportados por el carbón mineral son del 56,37% de oro(Au) y 31,21% de plata (Ag). El motivo de esto puede estar estrechamente ligado a la baja cantidad de aceite utilizada para aglomerar el carbón mineral y la alta porosidad del carbón mantequillo dado su tamaño de partícula, tiene una gran influencia en sus propiedades de adsorción [9].

Los resultados arrojados por investigadores anteriores [11], indican que los aglomerados formados con carbón mineral y aceite refinado de soya mediante aglomeración hidrodinámica tienen resultados de recuperación de aproximadamente 61%, siendo similar al expuesto en esta investigación (56,37%), donde ellos utilizan un proceso en el cual se requiere agua para la etapa de aglomeración, mientras en esta tesis se aglomeró solo con aceite.

3. CONCLUSIONES

Se evaluaron los esferoides obtenidos de materiales carbonosos, después de estandarizar las condiciones óptimas del disco peletizador para la aglomeración, estimándose las mejores propiedades de resistencia a la caída, esfericidad, pérdida de tamaño y diámetro de los aglomerados de los carbones vegetales (mantequillo, gurapo y copillo) y del carbón mineral (cerrito), seleccionando el carbón vegetal obtenido de madera de mantequillo (*Humiriastrum colombianum*) como el más destacado para la aglomeración con aceite refinado de soya, debido a que aglomera con la menor cantidad de aceite, en el menor tiempo y es resistente en la etapa de contactación comparado con los tres materiales carbonosos. Además, exhibe el menor contenido de cenizas y el mayor porcentaje de carbono fijo, siendo estos necesarios para la aglomeración y para favorecer el proceso.

Se compararon los aglomerados de carbón vegetal (mantequillo) y el carbón mineral (cerrito) los cuales presentaron los mejores resultados en la aglomeración y posteriormente se someten a la etapa de contactación donde se obtiene resultados de recuperación de oro del 72,65% y 56,50% respectivamente. Obteniéndose así un porcentaje de recuperación del carbón vegetal mantequillo de 22,25% mayor respecto al carbón mineral el cerrito.

4. RECOMENDACIONES

- Se recomienda probar diámetros menores de aglomerados de carbón vegetal para estudiar su afectación en el porcentaje de recuperación de oro.
- Estudiar las propiedades físicas y químicas del carbón mantequillo (*Humiriastrum Colombianum*) para posteriormente compararlos con los de carbón mineral.
- Evaluar diferentes granulometrías del carbón vegetal para la formación del aglomerado y reportar el comportamiento en el Proceso CGA.
- Desarrollar estudios posteriores en los cuales se logre determinar la resistencia de los aglomerados para cargarlos, transportarlos y descargarlos a una escala de construcción grande, industria. Se sugiere el ensayo de desgaste en tambor rotatorio.
- Se sugiere evaluar la eficiencia y rentabilidad del proceso en próximas investigaciones.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] NIÑO, Yuri y PEÑA, Linda. Estudio de las principales variables de formación de aglomerados de carbón y aceite para la recuperación de oro por el proceso CGA a partir de un mineral aurífero colombiano. Bucaramanga, 2015. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander.

[2] CÓRDOBA, E. M. Recuperación de oro particulado con aglomerados carbón-aceite: una tecnología limpia en la extracción de oro. Bucaramanga, 1998. Tesis doctoral. Universidad Industrial de Santander.

[3] GONZÁLEZ, Montserrat, y BODAS, Andrés. Efectos sobre la salud del metilmercurio en niños y adultos; estudios nacionales e internacionales. En: Nutrición hospitalaria. Noviembre 2014. vol. 30, no. 5.

[4] OLARTE, Yesid. y PEÑALOZA, Lizeth. Implementación de técnicas alternativas a la tostación de los aglomerados carbón-aceite para la recuperación de oro mediante el proceso CGA. Bucaramanga, 2015. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander.

[5] BELTRAN, Cinda; ESTRADA, Napoleón y RACHOR, Frank. Recuperación de oro por flotación de aglomerados carbon vegetal - diesel oil. La Paz, 2001. Tesis de pregrado. Universidad Técnica de Oruro.

[6] HINOJOSA F, et al. Aplicación del proceso cga a minerales auríferos oxidados: establecimiento de los parámetros metalúrgicos de interés. Bucaramanga, 2017. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander.

[7] ATEHORTÚA, Alba; GAVIRIA, Ana. y PEREZ, Juan. Recuperación de oro libre mediante su aglomeración con un agregado carbón-aceite. Medellín, 2006. Tesis de pregrado. Universidad nacional de Colombia.

[8] ACOSTA, Diana. Impactos ambientales de la minería de carbón y su relación con los problemas de salud de la población del municipio de Samacá (Boyacá), según reportes ASIS 2005-2011. Bogotá, 2016. Trabajo de grado de especialización (Especialista en Educación y Gestión ambiental). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de ciencias y educación.

[9] ADIPOH, Oliver & ADOPO, Gerard. Charcoal deashing by an oil Agglomeration process: effect of various operating parameters. En: The Chemical Engineering Journal. Enero, 1995. vol 57, no. 22, p. 9-15.

[10] SASTRY, Kal. Pelletization of fine coals. Final report. University of California, California, 1989.

[11] SIERRA, Joel y RUIZ, Víctor. Evaluación del efecto de las características de varios materiales carbonosos y del aceite de soya crudo, refinado y de sus ácidos grasos en la formación de aglomerados carbón-aceite para la recuperación de oro. Bucaramanga, 2017. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander.

[12] MOORE, Wayne. & BEGLINGER, Edward. A Method of Charcoal Analysis. En: Forest Products Laboratory Journal. Junio, 1991, vol. 1, p. 17-19.

[13] VALDEZ, C. y UNTIVEROS, G. Extracción y caracterización del aceite de las larvas del tenebrio molitor. En: Rev Soc Quím Perú. Marzo, 2010, vol. 76, p. 410-414.

[14] RILEY, J. Routine Coal and Coke Analysis: Collection, Interpretation, and Use of Analytical Data. Baltimore: ASTM International, 2007, p. 3-71. ISBN: 978-1-62870-238-5.

[15] SEN, S., et al. The Effects of Various Flotation Parameters on Gold. En: Separation Science and Technology. 2013, vol. 48, p.1585-1590.

[16] CHÁVEZ, Marvin y DOMINE, Marcelo. Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. Tesis de pregrado. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2013.

[17] BARRERA, Rolando, PÉREZ, Juan y SALAZAR, Carlos. Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas. En: Revista ION. Noviembre, 2014, vol. 27, no. 2, p. 43-54.

[18] BELTRAN O, Cinda., ESTRADA, Napoleón J. y RACHOR, Frank E. Recuperación de oro por flotacion de aglomerados carbon vegetal - diesel oil. La Paz, 2001. Tesis de pregrado. Universidad Técnica de Oruro.

[19] BUSTAMANTE, Moisés, et al. Estudio de hidrofobicidad del oro nativo. En: Dyna, octubre, 2012. vol. 79, no. 175, p. 48-5

BIBLIOGRAFÍA

ASTM D-388. Standard Classification of coals by rang. 1998, p 1-6.

ASTM E 400-0,2. Standard test método for analysis of ores, minerals, and rocks by the fire assay preconcentration optional emission spectroscopy, 2002, p. 1-8

BUSTAMANTE, M. y GAVIRIA, A. Notas de clase asignaturas concentración de minerales. Bogotá, 2007. Trabajo de grado (Ingeniería metalúrgica). Universidad Nacional de Colombia. Escuela de Ingeniería Metalúrgica.

DAVRIEUXI, Fabrice, et al. Discrimination of native wood charcoal by infrared spectroscopy. En: Laboratório de Produtos Florestais Journal. Abril, 2010, vol.33, no.5, p. 320-396.

FAN, C.W, MARKUSZEWSKI, R. Effect of multivalent cations on oil Agglomeration of coal and pyrite. Coal preparation. The Chemical Engineering Journal, February 1992. Vol 51, no 22, p. 167-175.

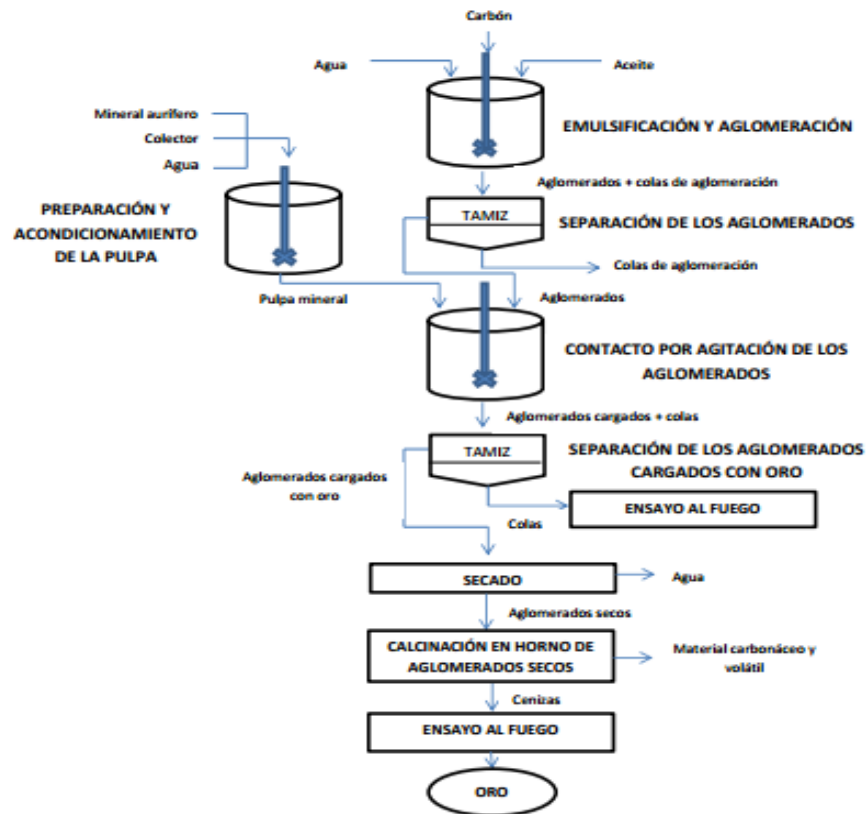
GOCHIN, R & MONHEMIUS, A. The adhesión of gold to oil-carbon agglomerates. En: International Journal of Mineral Processing, January 2004. Vol.74, no. 15, p.327-336.

HOUSE, C. & TOWNSEND, Veal. The coal gold Agglomeration (CGA) process, international mining. Separation Science and Technology. 1998, vol. 38, p.85-90.

OLARTE, B. y PEÑALOZA, L. Implementación de técnicas alternativas a la tostación de los aglomerados carbón-aceite para la recuperación de oro mediante el proceso CGA, Bucaramanga, 2015.

ANEXOS

ANEXO A. Representación básica de la aglomeración de oro con carbón, proceso CGA



Fuente: CORDOBA TUTA. Elcy María. Recuperación de oro particulado con aglomerados carbón-aceite-una tecnología limpia en la extracción del oro. [2]

ANEXO B. Imagen de los árboles de Copillo, Gurapo y Mantequillo

(a)



Copillo
(*Heliocarpus Sp.*)

(b)



Gurapo
(*Ocotea Sp.*)

(c)



Mantequillo
(*Humiriastrum Colombianum*)

ANEXO C. Carbonización de las maderas de Copillo, Gurapo y Mantequillo

Copillo
(*Heliocarpus Sp.*)



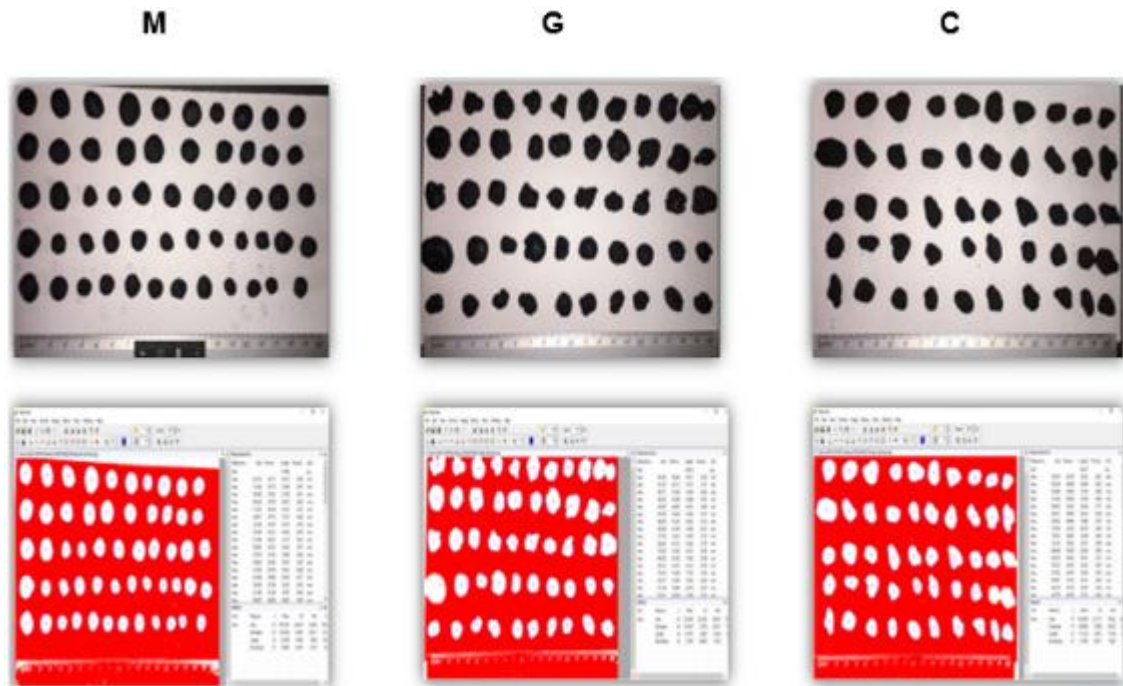
**ANEXO C. Carbonización de las maderas de Copillo, Gurapo y Mantequillo
(Continuación)**



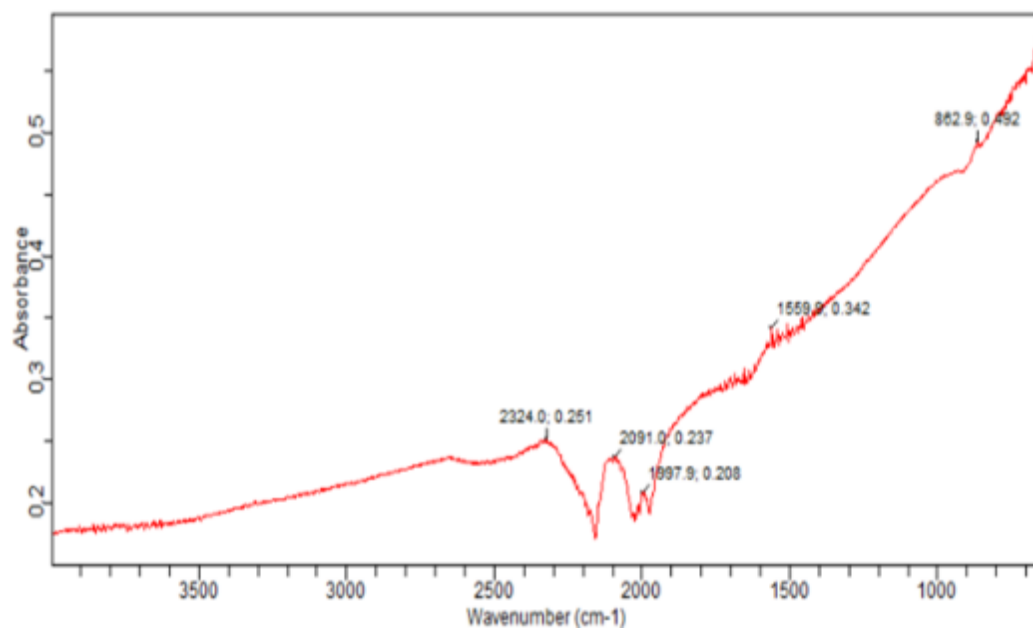
ANEXO D. Imagen del disco peletizador y los aglomerados formados



ANEXO E. Ejemplo de la aplicación del analizador de imagen Digimizer® para pellets seleccionados de Mantequillo (M), Gurapo (G) y Copillo (C)

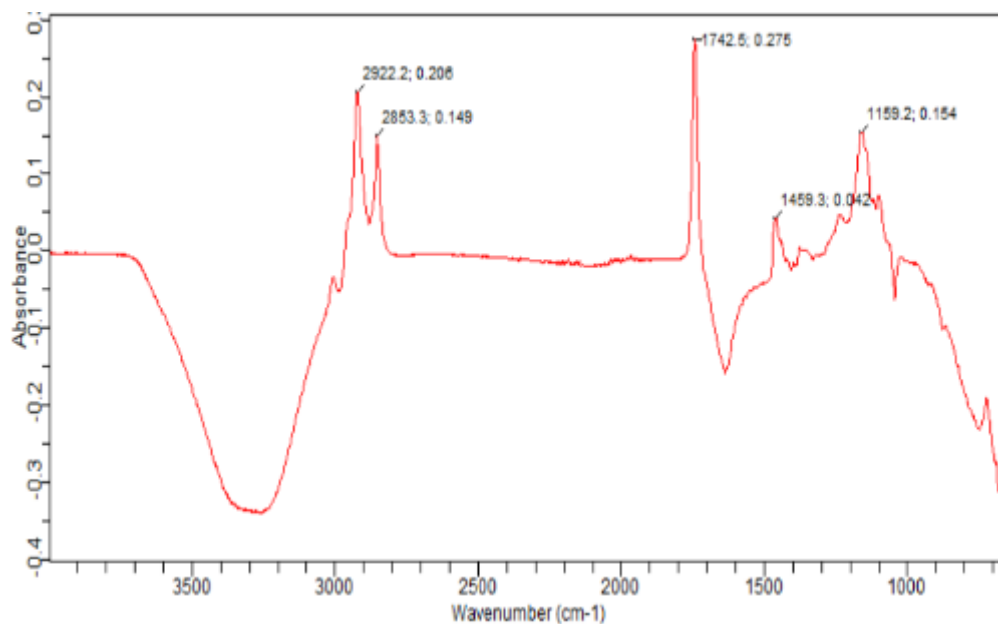


ANEXO F. Espectro FTIR carbón mantequillo

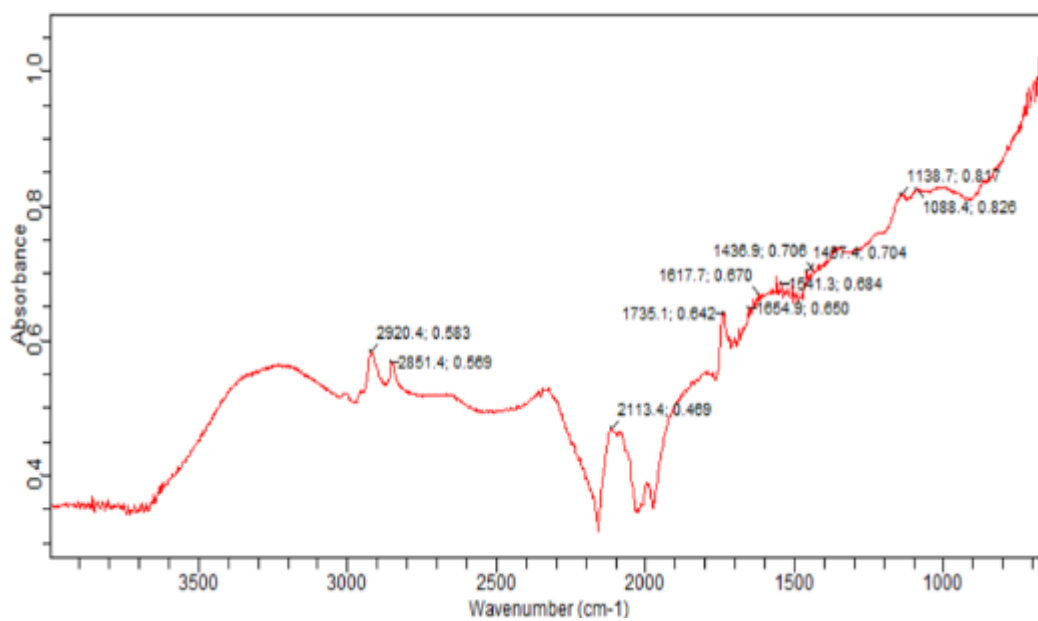


ANEXO G. Espectros FTIR de aceite vegetal de soya (a) y aglomerado de carbón mantequillo (b)

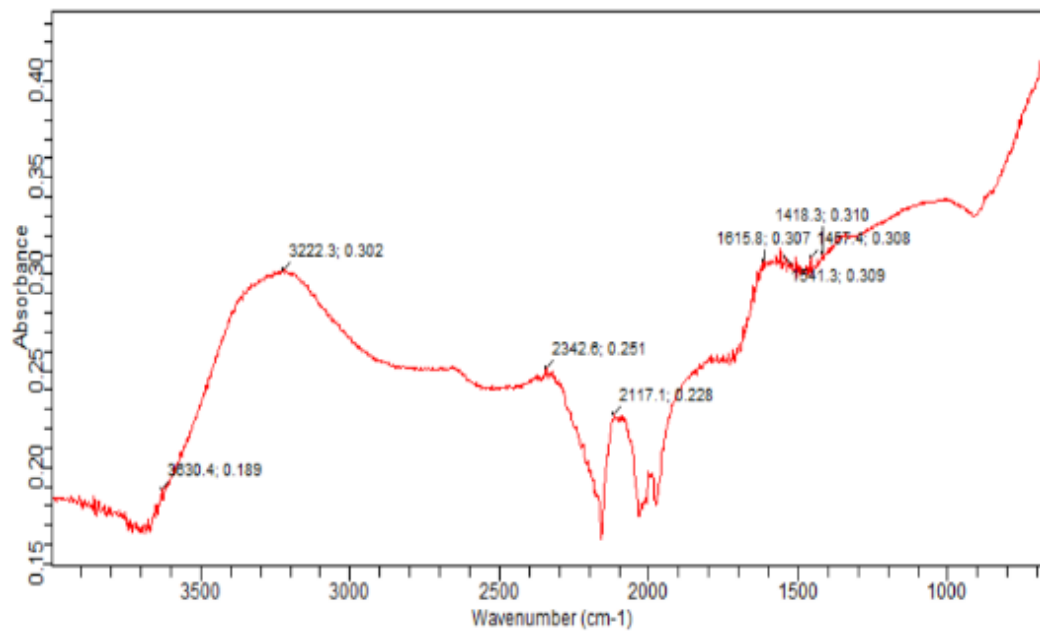
(a)



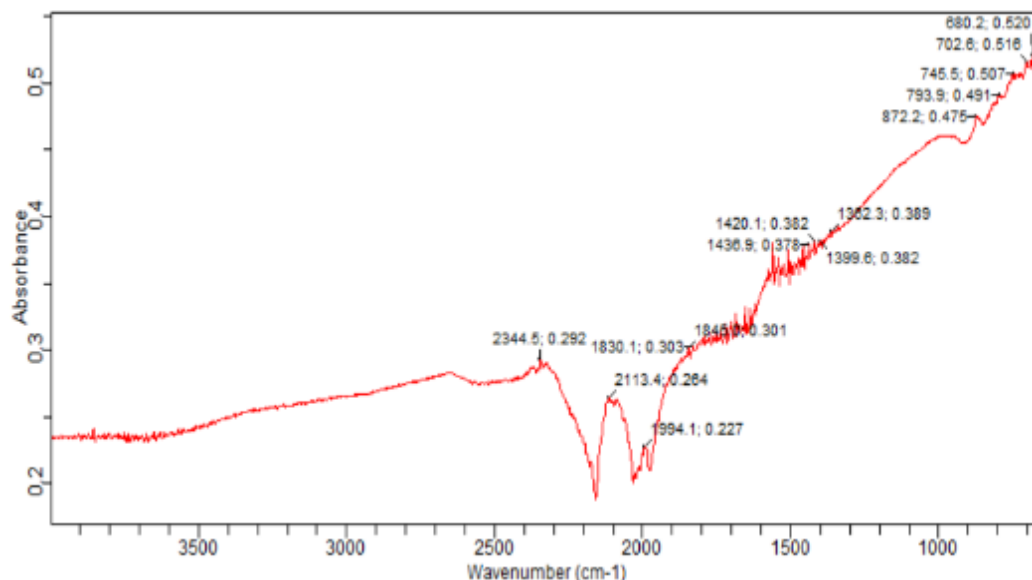
(b)



ANEXO H. Espectro FTIR carbón Gurapo



ANEXO I. Espectro FTIR carbón Copillo



ANEXO J. Estimación del espectro FTIR para los diferentes tipos de carbón

Número de onda (cm ⁻¹)	Detalle	Aparece en*
3630	Presencia de grupos hidroxilo(-OH), de alcoholes (≡ C - O - H) o fenoles (C ₆ H ₅ - OH).	G
3222	Estiramiento de hidrógenos.	G
2350-2320	Se muestra el enlace (O=C=O) de CO ₂ presente en el aire	C,G
2260-2000	Se presentan enlaces débiles. (C≡C, C≡N, C=C=C.)	Todos
1800-1600	Región de estiramiento de los dobles Enlaces.	Todos
1735	Los enlaces no conjugados C = O asignados a las hemicelulosas; muy fuertes	M
1707-1580	Representan enlaces C = O de los grupos carboxílicos (- COOH) y las vibraciones de estiramiento de los enlaces C - C conjugados de los anillos aromáticos, respectivamente.	G,M
1680-1500	Varios enlaces C=C con una intensidad variable y C=N enlaces fuertes.	G,M
1654, 1655	Isómeros CIS. C=C.	M
1650-1390	Región de deformación y flexión de otros enlaces.	Todos

1600, 1513, 1457	Descomposición de la lignina por la reducción de C = C bandas vibratorias de anillos aromáticos.	G,M
1465-1377	Región de otras deformaciones de enlaces y flexión.	Todos
872	Vibración del enlace C - H en compuestos aromáticos.	C
872,820, 757	Formación de una red aromática, a partir de la deformación angular fuera del plano de los grupos CH del anillo.	C

*Copillo (C), Gurapo (G), Mantequilla (M)

ANEXO K. Pérdida de tamaño de los diferentes aglomerados de materiales carbonosos

• Carbón mantequilla

650 R.P.M		
Tiempo	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	100,00%	0,00%
30	100,00%	0,00%
45	100,00%	0,39%
60	99,00%	0,40%

800 R.P.M		
Tiempo (min)	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	99,78%	0,38%
30	99,33%	0,66%
45	97,53%	0,40%
60	94,40%	0,31%

1000 R.P.M		
Tiempo (min)	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	99,00%	0,68%
30	98,00%	1,18%
45	91,00%	2,70%
60	81,00%	7,35%

1200 R.P.M		
Tiempo	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	94,00%	0,94%
30	82,00%	2,25%
45	65,00%	4,28%
60	40,00%	5,73%

• Carbón mineral

650 RPM		
Tiempo (min)	Perdida de Tamaño*	Desviación estandar
0	100.00%	0.00%
15	99.79%	0.04%
30	99.76%	0.10%
45	99.65%	0.15%
60	99.45%	0.21%

800 RPM		
Tiempo (min)	Perdida de Tamaño*	Desviación estandar
0	100.00%	0.00%
15	99.30%	0.05%
30	98.25%	0.11%
45	97.50%	0.18%
60	96.14%	0.21%

1000 RPM		
Tiempo (min)	Perdida de Tamaño	Desviación estandar
0	100.00%	0.00%
15	98.90%	0.05%
30	97.35%	0.09%
45	96.78%	0.16%
60	95.50%	0.21%

1200 RPM		
Tiempo (min)	Perdida de Tamaño	Desviación estandar
0	100.00%	0.00%
15	98.46%	0.05%
30	97.05%	0.10%
45	96.10%	0.13%
60	95.01%	0.11%

- **Carbón gurapo**

650 R.P.M		
Tiempo	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	99,00%	0,00%
30	99,00%	0,00%
45	98,00%	0,48%
60	97,00%	0,51%

800 R.P.M		
Tiempo (min)	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	100,00%	0,40%
30	99,00%	0,58%
45	96,00%	0,62%
60	91,00%	0,43%

1000 R.P.M		
Tiempo (min)	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	98,00%	0,72%
30	97,00%	1,13%
45	90,00%	3,30%
60	78,00%	6,30%

1200 R.P.M		
Tiempo	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	92,00%	1,00%
30	84,00%	2,30%
45	63,00%	4,34%
60	38,00%	4,89%

- **Carbón copillo**

650 RPM		
Tiempo (min)	Perdida de Tamaño*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	99,72%	0,04%
30	99,45%	0,07%
45	99,30%	0,12%
60	99,15%	0,19%

800 RPM		
Tiempo (min)	Perdida de Tamaño*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	99,06%	0,05%
30	98,00%	0,12%
45	97,10%	0,19%
60	96,05%	0,21%

1000 RPM		
Tiempo (min)	Perdida de Tamaño*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	98,60%	0,06%
30	97,02%	0,11%
45	96,32%	0,17%
60	95,10%	0,22%

1200 RPM		
Tiempo (min)	Perdida de Tamaño*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	98,25%	0,08%
30	96,89%	0,13%
45	95,70%	0,19%
60	94,90%	0,23%

ANEXO L. Variación de la redondez de los aglomerados a diferentes R.P.M a medida que transcurre el tiempo

- **Carbón mantequilla**

R.P.M	Redondez inicial promedio (0 min)	Redondez final promedio (60 min)	Disminución de redondez*
650	0,864	0,852	98,61%
800	0,857	0,833	97,19%
100	0,850	0,815	95,88%
1200	0,868	0,820	94,47%

▪ **Carbón mineral**

R.P.M	Redondez inicial promedio (0 min)	Redondez final promedio (60 min)	Disminución de redondez*
650	0,843	0,830	98,46%
800	0,852	0,833	97,77%
100	0,840	0,796	94,76%
1200	0,848	0,790	93,16%

▪ **Carbón gurapo**

R.P.M	Redondez inicial promedio (0 min)	Redondez final promedio (60 min)	Disminución de redondez*
650	0,825	0,803	97,33%
800	0,812	0,785	96,67%
100	0,807	0,752	93,18%
1200	0,802	0,741	92,39%

▪ **Carbón copillo**

R.P.M	Redondez inicial promedio (0 min)	Redondez final promedio (60 min)	Disminución de redondez*
650	0,798	0,770	96,49%
800	0,785	0,742	94,52%
100	0,773	0,711	91,98%
1200	0,762	0,691	90,68%

*Valores correspondientes al promedio de 120 aglomerados para cada tipo de material carbonoso

ANEXO M. Supervivencia de los diferentes tipos de aglomerados de diferentes materiales carbonosos

• **Carbón mantequilla**

650 R.P.M		
Tiempo	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	100,00%	0,00%
30	100,00%	0,00%
45	100,00%	0,39%
60	99,00%	0,40%

800 R.P.M		
Tiempo (min)	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	99,00%	0,00%
30	99,00%	0,38%
45	97,00%	0,66%
60	94,00%	0,31%

1000 R.P.M		
Tiempo (min)	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	99,00%	0,68%
30	98,00%	1,18%
45	91,00%	2,30%
60	81,00%	7,35%

1200 R.P.M		
Tiempo	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	94,00%	0,94%
30	82,00%	2,25%
45	65,00%	4,28%
60	40,00%	5,73%

- **Carbón mineral**

650 R.P.M		
Tiempo	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	99,00%	0,00%
30	99,00%	0,00%
45	98,00%	0,48%
60	97,00%	0,51%

800 R.P.M		
Tiempo (min)	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	100,00%	0,40%
30	99,00%	0,58%
45	96,00%	0,62%
60	91,00%	0,43%

1000 R.P.M		
Tiempo (min)	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	98,00%	0,72%
30	97,00%	1,13%
45	90,00%	3,30%
60	78,00%	6,30%

1200 R.P.M		
Tiempo	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	92,00%	1,00%
30	84,00%	2,30%
45	63,00%	4,30%
60	38,00%	4,89%

- **Carbón gurapo**

650 R.P.M		
Tiempo	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	98,00%	0,10%
30	96,00%	0,23%
45	94,00%	0,51%
60	91,00%	0,55%

800 R.P.M		
Tiempo (min)	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	96,00%	0,42%
30	93,00%	0,59%
45	89,00%	0,66%
60	82,00%	0,58%

1000 R.P.M		
Tiempo (min)	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	94,00%	0,69%
30	90,00%	1,46%
45	83,00%	3,33%
60	75,00%	7,10%

1200 R.P.M		
Tiempo	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	91,00%	2,72%
30	78,00%	1,27%
45	62,00%	5,05%
60	41,00%	6,10%

- **Carbon copillo**

650 R.P.M		
Tiempo	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	99,00%	0,00%
30	97,00%	0,12%
45	94,00%	0,21%
60	88,00%	0,33%

800 R.P.M		
Tiempo (min)	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	98,00%	0,35%
30	92,00%	0,43%
45	85,00%	0,66%
60	79,00%	0,89%

1000 R.P.M		
Tiempo (min)	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	93,00%	0,61%
30	85,00%	1,87%
45	74,00%	2,00%
60	63,00%	4,00%

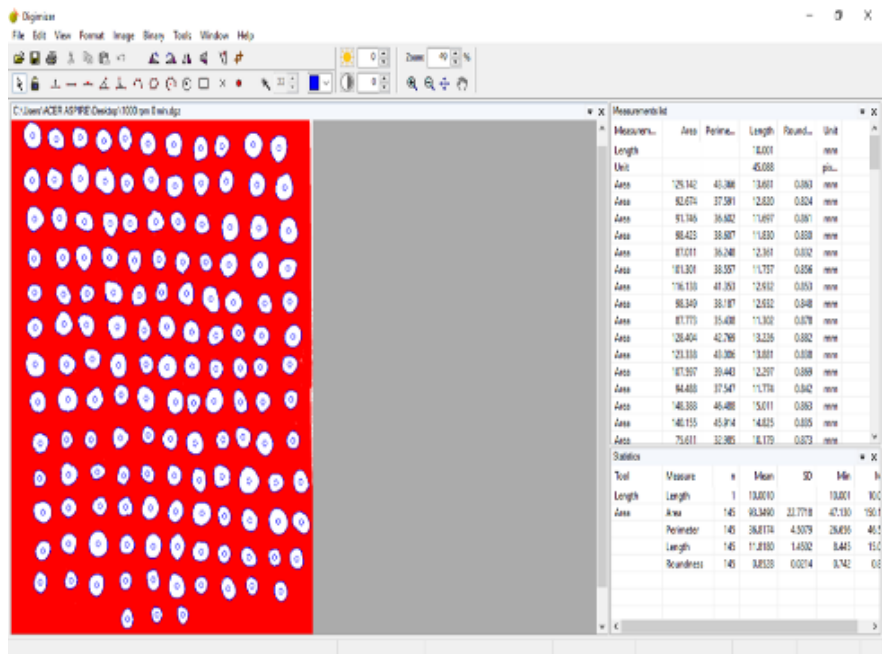
1200 R.P.M		
Tiempo	Supervivencia*	Desviación estandar
0	100,00%	0,00%
15	88,00%	2,81%
30	78,00%	1,37%
45	58,00%	7,00%
60	38,00%	6,50%

ANEXO N. Fuerza aplicada al 90% deformación para 20 pellets de carbón vegetal mantequilla

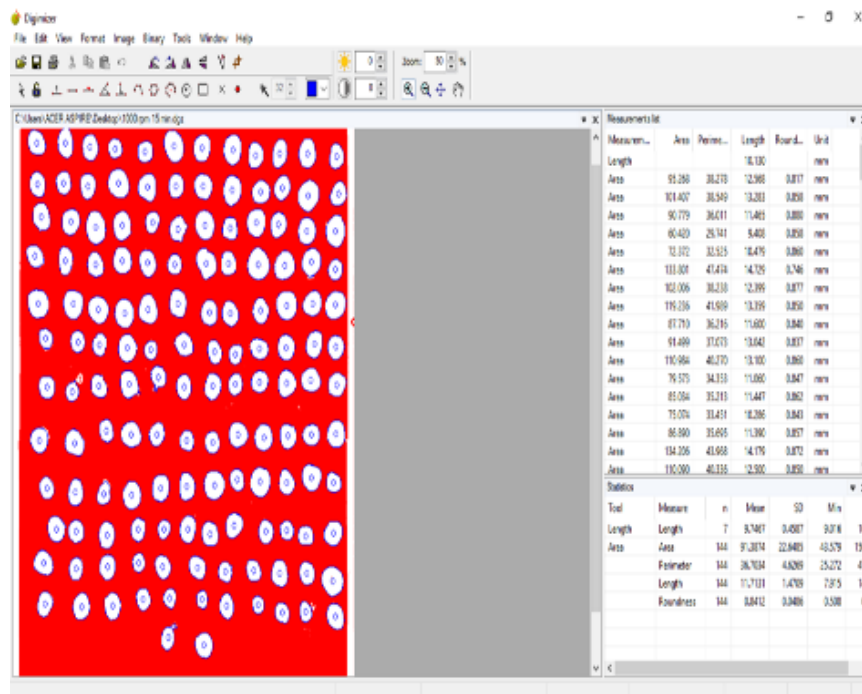
Número de pellets de prueba	Diámetro de los pellets promedio de prueba [mm]	Fuerza aplicada [N]*
1	9,89	2157,5
2	9,84	3120
3	10,26	1498
4	9,22	1572
5	9,25	1046,25
6	9,02	2680
7	10,35	1962,5
8	9,31	1392
9	8,44	752,5
10	10,15	1632
11	10,58	2748
12	9,77	2100
13	11,86	1912
14	9,48	1409
15	10,11	1164
16	9,08	2952
17	9,61	1264
18	8,79	1432,5
19	10,92	1860
20	9,34	1282,5

ANEXO O. Ejemplo de la representación gráfica de los aglomerados Mantequillo (M) y carbón Mineral (Mi) estudiados por Digimizer®

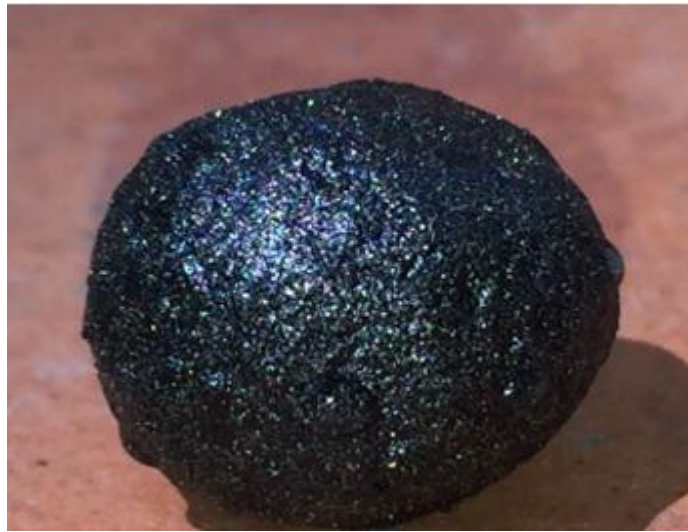
(M)



(Mi)



ANEXO P. Aglomerado cargado con el metal precioso



ANEXO Q. Procedimiento matemático para análisis próximo y último de los carbones

- Porcentaje de humedad.

1 gramo de muestra de carbón a una temperatura de 105 °C durante 1 hora,
Utilizando la siguiente relación:

$$\% H = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} * 100$$

Donde: $m_1 =$ peso del crisol vacío con tapa (g)

$m_2 =$ peso del crisol y carbon antes del secado (g)

$m_3 =$ peso del crisol y carbon después del secado (g)

- Porcentaje de cenizas

1 gramo de muestra de carbón a una temperatura de 850 °C durante 1 hora,
Utilizando la siguiente relación:

$$\% C = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100$$

Donde: $m_1 =$ peso del crisol vacío con tapa (g)

$m_2 =$ peso del crisol y carbon antes del secado (g)

$m_3 =$ peso del crisol y carbon después del secado (g)

- Materia volátil

ANEXO Q. Procedimiento matemático para análisis próximo y último de los carbones. (Continuación)

1 gramo de muestra de carbón a una temperatura de 910 °C durante 1 hora, Utilizando la siguiente relación:

$$\% MV = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} * 100 - \% H$$

Donde: $m_1 =$ peso del crisol vacío con tapa (g)

$m_2 =$ peso del crisol y carbon antes del secado (g)

$m_3 =$ peso del crisol y carbon después del secado (g)

- Carbono fijo

Utilizando la siguiente relación:

$$CF = 100\% - (\% H + \% C + \% MV)$$

- Poder calorífico

1 gramo de muestra de carbón utilizando la siguiente relación:

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

Donde:

$Q =$ Poder calorífico, BTU/lb

$\Delta T =$ Incremento de temperatura, $T_f - T_i$

$C =$ Capacidad térmica del calorímetro BTU/lb * g/°C

$m =$ Peso de la muestra

ANEXO Q. Procedimiento matemático para análisis próximo y último de los carbones. (Continuación)

$$e_1 = \text{Calor de combustión del algodón} \\ = 7524 * \text{peso del algodón usado [g]}, (\text{BTU/lb}) * g$$

$$e_2 = \text{Calor de combustión del alambre fusible Ni - Cr} \\ = 0.41 * \text{alambre quemado [mm]}, (\text{BTU/lb}) * g$$

$$e_3 = \text{Calor de formación del ácido sulfúrico} \\ = 10 * \text{ml de NaCO}_3 (0.394 N) \text{ usados}, (\text{BTU/lb}) * g$$

- Porcentaje de azufre

1 gramo de muestra de carbón utilizando la siguiente relación:

$$\% \text{ Azufre} = \frac{(A - B) * 13.738}{M}$$

Donde:

$$A = \text{BaSO}_4 \text{ pesado en la determinación}$$

$$\Delta T = \text{BaSO}_4 \text{ pesado en el blanco : } 0,000624 \text{ g}$$

$$C = \text{Peso de la muestra}$$

ANEXO R. Balance de masa para conocer la cantidad de aceite presente en los aglomerados de carbón mineral y carbón vegetal mantequilla

- Aglomerados carbón mantequilla

$$\text{masa inicial} = 100 \text{ g}$$

$$\text{masa final} = 153,4 \text{ g}$$

$$\text{masa del aceite total} = 153,4 \text{ g} - 100 \text{ g} = 53,4 \text{ g}$$

$$\rho (\text{aciete}) = 0,915 \text{ g/ml}$$

$$\rho = \frac{m}{v}; \quad \rho = \text{masa}, \quad m = \text{masa}, \quad v = \text{volumen}$$

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{53,4 \text{ g}}{0,915 \text{ g/ml}} = 58,36 \text{ ml de aceite}$$

- Aglomerados carbón mineral

$$\text{masa inicial} = 100 \text{ g}$$

$$\text{masa final} = 143,59 \text{ g}$$

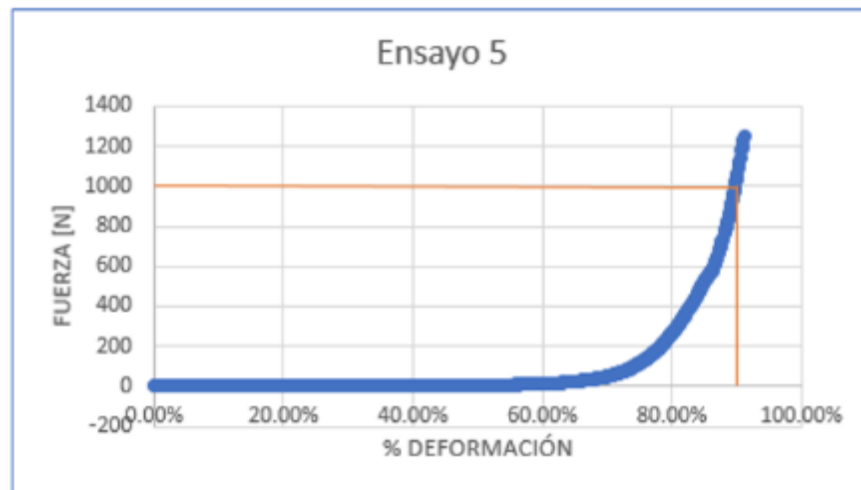
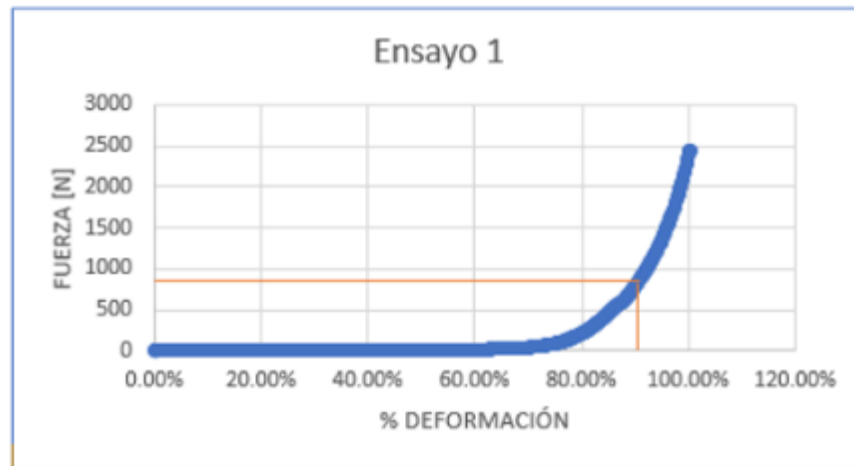
$$\text{masa del aceite total} = 143,59 \text{ g} - 100 \text{ g} = 43,59 \text{ g}$$

$$\rho (\text{aciete}) = 0,915 \text{ g/ml}$$

$$\rho = \frac{m}{v}; \quad \rho = \text{masa}, \quad m = \text{masa}, \quad v = \text{volumen}$$

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{43,59 \text{ g}}{0,915 \text{ g/ml}} = 47,59 \text{ ml de aceite.}$$

ANEXO S. Representación gráfica de 2 los 20 ensayos propuestos para conocer la fuerza necesaria para deformar el 90% del tamaño de cada aglomerado



ANEXO T. Cálculos de las pruebas mecánicas hechas a los aglomerados

*Cálculo del porcentaje de pérdida de tamaño:

$$\% \text{ Pérd. tamaño} = \frac{d_{80\%} \text{ final}}{d_{80\%} \text{ inicial}} * 100$$

*Cálculo del porcentaje de disminución de la redondez para cada material carbonoso:

$$\% \text{ Dism. redondez} = \left(1 - \frac{\text{Redondez inicial} - \text{Redondez final}}{\text{Redondez inicial}} \right) * 100$$

*Cálculo del porcentaje de supervivencia:

$$\% \text{ Supervivencia} = \left(\frac{N^{\circ} \text{ de pellets iniciales} - N^{\circ} \text{ de pellets destruidos}}{N^{\circ} \text{ de pellets iniciales}} \right) * 100$$

ANEXO U. Método para conocer el $d_{80\%}$ de los pellets formados por el método de ROSIN RAMMLER Y BONNETT

PASOS A SEGUIR:

- Se toman los pellets totales que salen del disco peletizador.
- Por medio de la herramienta Digimizer® se exportan los datos de área y se calcula el radio promedio con la formula $d = \left(\frac{A}{\pi}\right)^{1/2}$.
- Seguido de esto se calcula el diámetro con la formula $d = 2 * r$.
- Luego se calcula la masa de cada aglomerado mediante $m = \rho * \frac{4}{3} * \pi * r^3$; se ordena la masa en orden decreciente y se calcula la masa total (M_T) presente en todos los aglomerados.
- Se coloca un límite de rango (L_R) para poder estudiar los valores por separado, preferiblemente equidistantes.
- Se hace la suma de la masa presente en cada rango ($\sum m_R$).
- Luego se calcula la fracción retenida en el rango mediante $F_R = \frac{\sum m_R}{M_T}$.
- Se calcula la fracción retenida acumulada mediante $F_A = F_R (i+1) + F_A(i)$.
- Se calcula del logaritmo natural del límite de rango $Ln(L_R)$.
- Se calcula el logaritmo natural de la fracción pasante acumulada $Ln(-Ln(1 - f))$.
- Se grafica $Ln(-Ln(1 - f))$ vs $Ln(L_R)$ y se determina la ecuación de la recta mediante regresión lineal.
- De la ecuación de Rosin Rammler y Bonnett se calcula el diámetro x por donde el 80% de los pellets totales es atravesado ($d_{80\%}$), de la siguiente manera:

$$Ln(-Ln(1 - f)) = mLn(x) - mLn(k); f = 0.8, x: [mm]$$

$$L(x) = \frac{Ln(-Ln(1 - 0.8)) + mLn(k)}{m}$$

$$x = e^{\left(\frac{0,47588+mLn(k)}{m}\right)} ; \text{ donde } m \text{ y } k \text{ son constantes de la recta de ajuste}$$