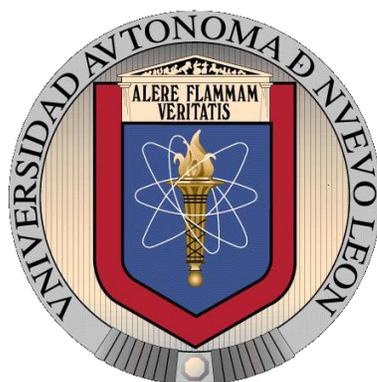


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE PARES DE TRABAJO PARA SU
APLICACIÓN EN SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN SOLAR
POR ADSORCIÓN: ESTUDIO DE EQUILIBRIO
E IMPACTO AMBIENTAL**

POR

CINTHIA BERENICE GARCÍA REYES

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAestrÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN
EN PROCESOS SUSTENTABLES**

FEBRERO, 2018

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE PARES DE TRABAJO PARA SU
APLICACIÓN EN SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN SOLAR
POR ADSORCIÓN: ESTUDIO DE EQUILIBRIO
E IMPACTO AMBIENTAL

Aprobación de la Tesis:

Dra. Nancy Elizabeth Domínguez Guzmán (asesora)

Dr. Felipe de Jesús Cerino Cardova (co-asesor)

Dr. Pasiano Rivas García

Dr. Victor Manuel Ovando Medina (UASLP)

Dra. Ma. Araceli Hernández Ramírez
(subdirectora de Estudios de Posgrado)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la oportunidad de iniciar y terminar esta etapa académica, por los frutos humanos y espirituales que a través de ella me ha brindado.

Agradezco a mi familia y amigos por estar al pendiente y seguir de cerca mis avances, también a mi familia espiritual que ha apoyado este proyecto desde sus inicios.

Agradezco a mi asesora la Dra. Nancy Dávila por su tiempo, paciencia, consejos, comprensión y apoyo para poder concluir esta tesis con éxito.

Agradezco a mi co-asesor Dr. Felipe Cerino y a mi comité tutorial Dra. Margarita Loredó, Dr. Pasiano Rivas, Dr. Victor Ovando por su tiempo y comentarios siempre constructivos hacia este proyecto de tesis.

Agradezco a mis compañeros de curso, Luz y Ramiro, por compartir sus talentos y capacidades, entusiasmo y compañerismo desinteresado a lo largo de este proceso para llegar a cumplir esta meta C° se pudo!

Agradezco a todos los doctores del posgrado en procesos sustentables por su disposición a transmitir sus conocimientos e impulsarme a adquirir más. En especial a la Dra. Diana Bustos y al equipo del LIQ-1.

Agradezco a mis compañeros del Laboratorio de Ingeniería Química I, por su respaldo, atenciones y ejecución de pruebas que han sido parte de esta tesis, en especial a Mari Paz de la Cruz y Santiago González.

Agradezco al Dr. Jos   Rodr  guez Mirasol de la Universidad de M  daga y al grupo TERMA por su c  dida acogida y transferencia de conocimientos para la elaboraci  n de parte de esta tesis.

Agradezco a los doctores Ismael   gueda y Jos   Antonio Delgado de la Universidad Complutense de Madrid por recibirme y prestar sus instalaciones para parte de la parte experimental de esta tesis.

Agradezco al CONACyT por el apoyo econ  mico brindado, a la Universidad Aut  noma de Nuevo Le  n por recibirme de nueva cuenta, a la Facultad de Ciencias Qu  micas por abrirme sus puertas.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	4
1.1.1. Refrigeración solar	4
1.1.2. Refrigeración solar por adsorción	6
1.1.2.1. Adsorción física	6
1.1.2.2. Pares de trabajo	6
1.1.2.3. Modificación superficial del adsorbente por impregnación	10
1.1.2.4. Modelación matemática de la adsorción en el equilibrio	12
1.1.2.5. Análisis termodinámico.....	15
1.1.3. Análisis de Ciclo de Vida.....	19
1.1.4. Residuos agroindustriales	20
1.2. Justificación	21
1.3. Hipótesis	21
1.4. Objetivo general.....	21
1.5. Objetivos específicos	22
2. METODOLOGÍA	23
2.1. Preparación de la materia prima	23
2.2. Impregnación del rastrojo de sorgo con sales higroscópicas.....	23
2.3. Caracterización fisicoquímica	26
2.4. Determinación de capacidad de adsorción	27
2.5. Isotermas al equilibrio	28
2.6. Coeficiente de eficiencia	30
2.7. Análisis de Ciclo de Vida.....	31
2.7.1. Alcance y objetivo	31
3. RESULTADOS	33
3.1. Caracterización de la materia prima.....	33
3.1.1. Análisis elemental CHNS	33

3.1.2. Espectroscopía infrarroja	33
3.1.3. Análisis termogravimétrico	34
3.1.4. Propiedades superficiales	35
3.2. Impregnación del rastrojo de sorgo con sales higroscópicas	38
3.2.1. Espectroscopía infrarroja	40
3.2.2. Estudios superficiales de morfología.....	40
3.2.3. Prueba de azúcares reductores totales.....	45
3.2.4. Análisis termogravimétrico	46
3.3. Determinación de capacidad de adsorción	47
3.4. Isotermas al equilibrio	50
3.5. Coeficiente de eficiencia	53
3.6. Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	54
3.6.1. Inventario	54
3.6.2. Evaluación del impacto e interpretación.....	56
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO.....	71
6. APÉNDICES	72
A. Procedimiento para el uso del equipo PVVC (presión variable- volumen constante) para medir la adsorción de un sólido en fase gas.....	72
i. Calibración del equipo.....	72
ii. Indicaciones generales	75
iii. Purga de equipo con nitrógeno	76
iv. Baños de temperatura y aislamiento.....	77
v. Prueba de hermeticidad y generación de vacío	77
vi. Pruebas de capacidad de adsorción.....	79
vii. Bitácora de registro	81
B. Impregnación del rastrojo de sorgo con sales higroscópicas. Detalles ...	81

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1. Características generales de los pares de trabajo utilizados en sistemas de refrigeración solar por adsorción.....	8
Tabla 2. Coeficiente de desempeño (COP) y capacidad de adsorción de diferentes pares de trabajo reportados en la literatura.....	10
Tabla 3. Diseño central compuesto para la capacidad de adsorción.....	24
Tabla 4. Modificaciones realizadas al rastrojo de sorgo con sales higroscópicas. Nomenclatura.....	24
Tabla 5. Condiciones de operación para capacidad de adsorción.....	28
Tabla 8. Composición del rastrojo de sorgo.....	33
Tabla 9. Comparación del círculo del área superficial en varios materiales lignocelulósicos.....	36
Tabla 10. Propiedades superficiales del rastrojo de sorgo.	38
Tabla 11. Concentración de elementos en % obtenidos por el método de FRX 38	
Tabla 12. Resultados por absorción atómica de la concentración de calcio y litio en las soluciones utilizadas en el proceso de algunas modificaciones.	39
Tabla 13. Contenido de azúcares reductores totales en las soluciones salinas posterior a la impregnación del material.	45
Tabla 14. Análisis de condiciones posterior al vacío.....	48
Tabla 15. Análisis de condiciones en la cámara dosificadora previo al contacto con el adsorbente.	48
Tabla 16. ANOVA para la superficie de respuesta del modelo lineal.....	49
Tabla 17. Características del lecho utilizado para la obtención de las isotermas de adsorción por termogravimetría.	50
Tabla 18. Parámetros de los modelos de isotermas de adsorción de metanol. 51	
Tabla 19. Parámetros de los modelos de isotermas de adsorción de agua.....	53
Tabla 20. Cálculo del COP y parámetros utilizados para cada par de trabajo..	53
Tabla 21. Inventario para la operación de un refrigerador solar por adsorción con la sal Ca-1-2.....	55
Tabla 22. Inventario para la operación de un refrigerador solar por adsorción con carbón activado granular (CAG) [57].	56

Tabla 23. Comparación de las categorías de impacto por el método Midpoint para carbón activado granular y Ca-1-2. Se muestra el porcentaje del impacto respecto al CAG.	58
Tabla 24. Puntaje βnico por el método Endpoint para los materiales CAG y Ca-1-2.....	60
Tabla 25 Comparación de las categorías de impacto por el método Midpoint para Ca-1-2 y Ca-1-2 R. Se muestra el porcentaje respecto al Ca-1-2.....	61
Tabla 28. Datos de calibración de zonas v ^o a hβmeda.	73
Tabla 29. Datos de la calibración v ^o a gas.	74
Tabla 30. Lista de pruebas requeridas por el diseño de experimentos para el metanol.....	81
Tabla 31. Bitácora de las modificaciones del rastrojo de sorgo.	82

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Distribución de estratos de población en México, según su ventaja relativa, clasificación por municipios [3].	2
Figura 2. Componentes principales de un sistema de refrigeración solar por adsorción [4].	5
Figura 3. Diagrama p-T-x de un ciclo básico con un adsorbente sólido-gas.	16
Figura 4. Fases del método de análisis de ciclo de vida. ISO 14040:2006.	19
Figura 5. Diagrama de equipo PVVC (presión variable, volumen constante) utilizado.	28
Figura 6. Diagrama del equipo utilizado para las isotermas por termogravimetría, se realizaron las pruebas en la configuración B con el metanol y agua [45].	29
Figura 7. Fronteras del sistema para el ACV propuesto.	32
Figura 8. IR del rastrojo sin modificar (R SMP).	34
Figura 9. Análisis termogravimétrico del rastrojo de sorgo molido en atmósfera de nitrógeno.	35
Figura 10. Isotherma de nitrógeno del rastrojo de sorgo molido.	37
Figura 11. Gráfica del volumen de poro acumulado por diámetro del rastrojo de sorgo.	37
Figura 12. Espectroscopía de infrarrojo realizado a varios materiales modificados, se muestra en negro el rastrojo de sorgo sin modificar.	40
Figura 13. Micrografías del material Ca-2-1. En la figura (a) se muestra un corte longitudinal y en la (b) un corte transversal.	41
Figura 14. Micrografías del material Ca-2-3. En la figura (a) se muestra un corte longitudinal y en la (b) un corte transversal.	41
Figura 15. Micrografías del material Li-2-1. En la figura (a) se muestra un corte longitudinal y en la (b) un corte transversal.	42
Figura 16. Micrografías del material Li-2-3. En la figura (a) se muestra un corte longitudinal y en la (b) un corte transversal.	42
Figura 17. En (a) se ve la micrografía del material Ca-2-1. En las figuras (b, c y d) se muestran las imágenes obtenidas por EDS donde se observa la distribución elemental, en (b) carbono, en (c) cloro y en (d) calcio.	43

Figura 18. En (a) se ve la micrografía del material Ca-2-3. En las figuras (b, c y d) se muestran las imágenes obtenidas por EDS donde se observa la distribución elemental, en (b) carbono, en (c) cloro y en (d) calcio.	44
Figura 19. En (a) se ve la micrografía del material Li-2-3. En las figuras (b, c y d) se muestran las imágenes obtenidas por EDS donde se observa la distribución elemental, en (b) carbono, en (c) calcio y en (d) bromo.....	44
Figura 20. Análisis termogravimétrico del rastrojo de sorgo modificado en atmósfera de nitrógeno.	46
Figura 21. Isotermas de adsorción de metanol en los adsorbentes estudiados a temperatura ambiente. Se ajustaron 2 modelos: Dubinin-Astakhov y Langmuir.	51
Figura 22. Isotermas de adsorción de agua en los adsorbentes estudiados a temperatura ambiente. Se ajustaron 2 modelos: Dubinin-Astakhov y Langmuir.	52
Figura 23. Contribución porcentual de cada etapa durante la modificación y uso de la modificación Ca-1-2 a partir del rastrojo de sorgo.....	57
Figura 24. Red de la categoría de cambio climático para el uso del adsorbente Ca-1-2.....	58
Figura 25. Comparativa por el método Endpoint del uso de los materiales CAG y Ca-1-2.....	59
Figura 26. Comparativa de los resultados Endpoint para el CAG, y 3 escenarios del Ca-1-2.....	62
Figura 27. Diagrama de equipo PVVC utilizado.....	72
Figura 28. División de zonas para la calibración física del equipo.....	73
Figura 29. Correlación de los dos métodos de calibración del equipo.....	75

RESUMEN

Cinthia Berenice García Reyes

Febrero 2018

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias Químicas

Título del estudio: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE PARES DE TRABAJO PARA SU APLICACIÓN EN SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN SOLAR POR ADSORCIÓN: ESTUDIO DE EQUILIBRIO E IMPACTO AMBIENTAL

Número de páginas: 93

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Procesos Sustentables

 rea de estudio: Ingeniería, revalorización de residuos.

Propósito y Método de Estudio: Se propone estudiar el desempeño de materiales provenientes del rastrojo de sorgo como adsorbentes para aplicaciones en refrigeración solar por adsorción, evaluando su capacidad de adsorción y el impacto ambiental con el fin de validar la sustentabilidad de su uso potencial. Con el fin de aumentar la capacidad de adsorción de vapor de agua y metanol, el rastrojo de sorgo fue impregnado con sales higroscópicas de cloruro de calcio o bromuro de litio. Para los materiales con mayor capacidad se obtuvo la capacidad de adsorción a distintas concentraciones por método gravimétrico, se utilizó el modelo matemático de Dubinin-Astakhov. El coeficiente de eficiencia disponible (COP) de cada par de trabajo (adsorbente-adsorbato) se calcul a partir de sus propiedades termodinámicas y de adsorción. El análisis de ciclo de vida (ACV) consideró el traslado y modificación del rastrojo a escala industrial, así como su etapa operativa. Los resultados del ACV se compararon con un equipo operado con carbón activado granular (CAG) como adsorbente.

Contribuciones y Conclusiones: Los dos materiales con mayor capacidad de adsorción fueron el modificado con CaCl_2 (Ca-1-2) y el tratado con LiBr (Li-2-2), ambos al 12.5% (w/w) por 24 y 48 h, respectivamente. La capacidad de adsorción máxima de metanol aumentó de 0.166 g/g a 0.726 y 0.745 g/g, para el Li-2-2 y Ca-1-2, respectivamente. La capacidad máxima de adsorción de vapor de agua aumentó de 0.328 g/g a 0.352 y 0.987 g/g para el Li-2-2 y Ca-1-2. El COP para los pares de trabajo propuestos fueron de 0.684 y 0.830, con metanol y agua, siendo similares a los de CAG. El puntaje global de impacto ambiental obtenido para el par de trabajo Ca-1-2/metanol fue sólo del 20% del puntaje global para el par de trabajo CAG/metanol.

La eficiencia energética del material Ca-1-2 es comparable con la del CAG para su aplicación en sistemas de refrigeración solar por adsorción, además presenta un menor impacto ambiental, por lo cual se propone como solución atractiva para un sistema de refrigeración solar por adsorción.

Dra. Nancy Elizabeth Dávila Guzmán (asesora)

1. INTRODUCCIÓN

La refrigeración de alimentos y medicinas es de suma importancia para su conservación ya que algunos medicamentos necesitan de condiciones de temperatura especiales ($<10^{\circ}\text{C}$), así como algunos alimentos perecederos para consumo humano [1]. Solamente en los servicios de refrigeración (de habitaciones, alimentos y medicinas) se estima que se consume un 17% de la energía eléctrica total generada en el mundo [2]. La generación de este recurso es a partir de combustibles fósiles en un 83%, por esta razón el uso de los sistemas de refrigeración representa un gran aporte al calentamiento global.

Conjuntamente, en México existe información sobre la distribución de estratos de población según su ventaja relativa, la cual es calculada mediante indicadores como disponibilidad de agua entubada, disponibilidad eléctrica, drenaje, materiales de construcción, refrigerador, transportación, empleo, etc. [3]. De acuerdo con datos reportados por el INEGI, el 22.7 % de la población mexicana se encuentra en una ventaja relativa media/baja (Figura 1), lo que expone que existen comunidades con acceso limitado o nulo al servicio de energía eléctrica, por lo cual es indispensable desarrollar tecnologías donde el aprovechamiento de otros recursos accesibles permita mejorar los servicios disponibles en estas comunidades.

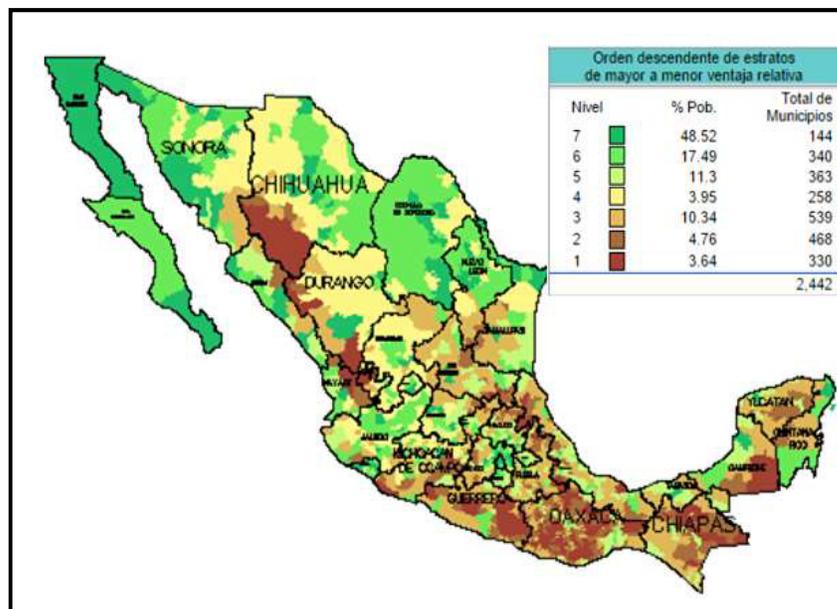


Figura 1. Distribución de estratos de población en México, según su ventaja relativa, clasificación por municipios [3].

Los sistemas de refrigeración solar se han desarrollado como una alternativa para proveer enfriamiento aprovechando energías térmicas provenientes de la irradiación solar, de esta manera este recurso renovable puede ser utilizado para la refrigeración de alimentos y medicinas en zonas que no tienen distribución de energía eléctrica, y hasta regular picos de consumo energético en temporadas de altas temperaturas.

Los sistemas de refrigeración solar se clasifican en 2 tipos, sistemas de refrigeración solar por absorción (sistema líquido-vapor) y sistemas de refrigeración solar por adsorción (sistema sólido-vapor). Los primeros tienen como ventaja su alta eficiencia, sin embargo, requieren de energía eléctrica para su funcionamiento, y los pares de trabajo más utilizados son térmicos (e.g. amoníaco). Los sistemas de refrigeración solar por adsorción son más sencillos de operar, no tienen partes móviles, no requieren energía eléctrica para su

funcionamiento y su impacto ambiental es menor, ya que hacen uso de sustancias menos tóxicas como refrigerantes (e.g. metanol, etanol, agua); sin embargo, la eficiencia es baja en comparación a un sistema de refrigeración por compresión [4]. La comunidad científica reconoce el potencial de los sistemas de refrigeración solar por adsorción como alternativa sustentable para cubrir las necesidades humanas de refrigeración [5-7].

Las aplicaciones que se han explorado para la tecnología de refrigeración solar por adsorción son: sistemas de generación de agua helada para aire acondicionado en edificios y oficinas, generación de hielo, refrigeración de alimentos y medicinas. De estas aplicaciones la más apremiante es la relacionada con el enfriamiento de alimentos y medicinas, debido a las necesidades actuales de las poblaciones con menor ventaja relativa en México.

México es un país privilegiado en cuanto a la disponibilidad de energía solar, la irradiación media anual es de 6 kWh/m² por día en el territorio nacional, siendo 2.4 veces mayor a la irradiación solar en Alemania (2.5 kWh/m² por día), que es líder mundial en el aprovechamiento de esta energía [8,9].

Por otra parte, otro recurso disponible en México es el rastrojo de la cosecha de cereales, donde el sorgo es el segundo cultivo de importancia, con una producción de 5.1 toneladas anuales de semillas, lo cual representa un aproximado de 6 toneladas de rastrojo generado. Los rastrojos tienen usos principales en los sistemas mixtos agrícolas y alimentación pecuaria, estos usos dependen de las prácticas vigentes de los agricultores y de la disponibilidad por región con el fin de evitar la transportación [10,11]. De acuerdo con reportes realizados por los Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA),

el consumo de sorgo para el año 2016/17 será de 7.2 millones de toneladas, de las cuales 6.8 millones provienen de producción nacional [12]. Lo anterior sugiere una alta disponibilidad de residuos agroindustriales proveniente de la producción de semillas como el sorgo así como la oportunidad de una revaloración a través de su uso en procesos sustentables.

Los residuos lignocelulósicos, formados por celulosa, hemicelulosa y lignina, tienen grupos funcionales disponibles como el hidroxilo, que participan en los procesos de adsorción al formar de puentes de hidrógeno con moléculas polares, como el agua o metanol [13,14].

Por lo anterior, el propósito del presente proyecto es el estudiar el desempeño de materiales provenientes de los rastrojos de sorgo como adsorbentes para aplicaciones en refrigeración solar por adsorción, evaluando su capacidad de adsorción y el impacto ambiental con el fin de validar la sustentabilidad de su uso potencial.

1.1. Antecedentes

1.1.1. Refrigeración solar

El sistema de refrigeración solar por adsorción es un circuito cerrado, que contiene las siguientes partes: un colector solar que contiene un material adsorbente, un condensador, un contenedor, una válvula de aislamiento, un evaporador dentro del espacio a enfriar, y el adsorbato o refrigerante que hace de portador de la energía (Figura 2).

El ciclo de refrigeración solar por adsorción comienza con el adsorbente saturado con el adsorbato en frío (Figura 2), y la válvula hacia el evaporador

cerrada, la luz solar incidente promueve el incremento de la temperatura y presión de esta sección hasta alcanzar la presión de condensación del adsorbato, a partir de ese momento el calor incidente promueve que el adsorbato sea liberado del adsorbente, el cual pasa al condensador.

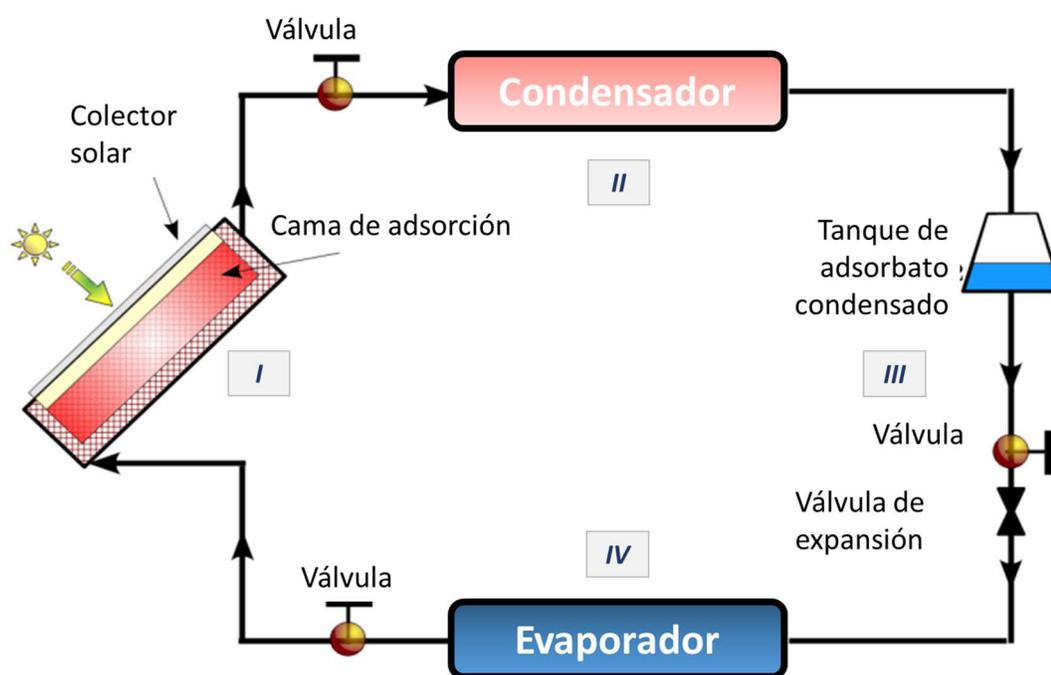


Figura 2. Componentes principales de un sistema de refrigeración solar por adsorción [4].

En el condensador **II** se libera el calor de condensación y el líquido resultante es colectado previo al evaporador, esta fase termina cuando el adsorbente libera la mayor cantidad de adsorbato. A continuación, se abre la válvula hacia el evaporador **IV** permitiendo que el líquido sufra una disminución repentina de la presión hasta la presión de vaporización, lo cual produce el efecto de enfriamiento requerido en la etapa final, en donde el adsorbato llega a la temperatura de evaporación **IV** y el adsorbato fluye hacia la cama del adsorbente para saturarlo nuevamente [4].

En los sistemas de refrigeración solar por adsorción el comportamiento del par de trabajo adsorbente-adsorbato se vuelve clave para el rendimiento del sistema [5], donde el parámetro de comparación es el coeficiente de eficiencia (COP, por sus siglas en inglés) que se define como la relación del efecto de enfriamiento y la energía ingresada al sistema [15].

1.1.2. Refrigeración solar por adsorción

1.1.2.1. Adsorción física

Cuando se habla de adsorción para refrigeración normalmente se está hablando de gases cuyas moléculas polares pueden ser adsorbidas por fuerzas de baja intensidad. La adsorción física tiene como mecanismo las fuerzas de Van der Waals, es un efecto superficial no selectivo en el tipo de moléculas y que puede formar multicapas. Este fenómeno se puede tratar como un proceso de condensación dentro del adsorbente, por lo que el calor de adsorción es similar al calor de condensación del refrigerante.

El proceso de adsorción/desorción depende de los coeficientes de transferencia de masa y calor del adsorbente. Normalmente la energía de desorción es superior al de adsorción debido a que la primera es la suma de la energía de adsorción y el calor de adsorción, lo cual se refleja en el fenómeno de histéresis presentes entre ambas etapas.

1.1.2.2. Pares de trabajo

Las características principales que deben tener los adsorbentes para refrigeración solar por adsorción son una alta capacidad de adsorber el vapor de interés, alta capacidad para liberar adsorbato ante la presencia de energía

térmica, bajo calor específico, buena conductividad térmica, no tóxico, no corrosivo, durabilidad en el tiempo, disponibilidad y bajo costo.

Algunos adsorbentes cuyo mecanismo de adsorción es principalmente físico (atracciones electroestáticas) son mencionado a continuación:

¿ Carbón activado: su capacidad de adsorción es determinada por los grupos funcionales presentes en la superficie, así como el área superficial.

¿ Fibras de carbón activado: presenta mejor capacidad de adsorción que un carbón activado, tiene la desventaja de tener conductividad térmica anisotrópica, es decir en cierta dirección de las fibras.

¿ Gel de sílice: la capacidad de adsorción se ve influenciada por los grupos hidroxilo en la estructura para la formación de puentes de hidrógeno con moléculas polares.

Los materiales compuestos tienen como meta principal incrementar la capacidad de adsorción en los procesos de adsorción sólido-gas. Estos materiales compuestos se han sintetizado a partir de combinaciones de adsorbentes carbón activado/gel de sílice o con sales higroscópicas [16,17]

Por otra parte, las características ideales del adsorbato son: alto calor latente de vaporización, bajo volumen específico en fase líquida, alta conductividad térmica, baja viscosidad, térmica y químicamente estable, no tóxico, no corrosivo, no inflamable y baja presión de saturación [18].

Como adsorbatos se utilizan generalmente agua, etanol y metanol, siendo la aplicación el aspecto determinante para la selección del material. Mientras que el etanol y metanol tienen presiones de saturación similares, el calor latente de

vaporización del metanol supera en 30% al etanol, se utilizan estos alcoholes en conjunto principalmente con el carbón activado. El agua puede ser considerada como un excelente adsorbato para estos sistemas, pero no puede llegar a temperaturas debajo de 0°C, y tiene una presión de saturación muy baja que debe conservarse dentro del equipo, es usual encontrar pares de trabajo gel de sílice-agua o zeolitas-agua.

Un par de trabajo óptimo para un sistema de refrigeración solar por adsorción tiene las características de alta eficiencia, costo reducido, con los mínimos impactos para el ambiente y alto grado de seguridad en la operación. Los pares de trabajo que se presentan comúnmente en los sistemas de refrigeración solar por adsorción son carbón activado-metanol, zeolita-agua, gel de sílice-agua, carbón activado-etanol [4].

En la Tabla 1 se presentan los principales pares de trabajo reportados en la literatura, según su adsorbente y adsorbato, el tipo de fuente de energía para su funcionamiento y algunas de sus características.

Tabla 1. Características generales de los pares de trabajo utilizados en sistemas de refrigeración solar por adsorción.

Par de trabajo	Tipo de fuente	Temperatura máxima de desorción (°C)	Calor de adsorción (kJ /kg)	Calor latente de adsorbato (kJ /kg)
Carbón activado-metanol	Bajo calor	120	1800-2000	1000-1200
Gel de sílice-agua	Bajo calor	50-120	2500	2400-2600
Zeolita-agua	Alto calor	70-250	3200-4200	2400-2600

El par de trabajo carbón activado-metanol presenta un mecanismo de llenado y condensación de adsorbato dentro de los poros del adsorbente, lo cual sucede en los microporos de 0.15 a 0.50 cm³/g. Su bajo valor de calor de adsorción es beneficioso para el COP. Este sistema tiene la desventaja de trabajar a presiones inferiores a la atmosférica.

Por otro lado, el gel de sílice-agua presenta un mecanismo de puentes de hidrógeno entre el grupo sílice del alcohol con las moléculas de agua. Sus desventajas son su baja capacidad de adsorción y la temperatura mínima del sistema por arriba de 0°C.

En la Tabla 2 se muestra una comparación de varios pares de trabajos, donde se puede observar que el par de trabajo con etanol y metanol presentan las mejores eficiencias en comparación de los otros pares de trabajo, a excepción del material compuesto de gel de sílice, carbón activado y sal higroscópica.

El-Sharkavy y colaboradores [19] estudiaron el par de trabajo fibra de carbón activado - etanol, realizando mediciones del área superficial y porosidad, así como las isothermas de adsorción y las temperaturas en 3 zonas de la cama del adsorbente. Los resultados obtenidos mostraron una relación entre la capacidad de adsorción con el área superficial, a mayor área superficial mayor capacidad de adsorción; además de la disminución de la capacidad de adsorción con el incremento de la temperatura de la cama adsorbente. De esta manera, se destaca la importancia de la uniformidad de la temperatura en la cama del adsorbente, que se relaciona directamente con su capacidad de conductividad térmica, así como la caracterización del área superficial y su relación con la capacidad de adsorción.

Tabla 2. Coeficiente de desempeño (COP) y capacidad de adsorción de diferentes pares de trabajo reportados en la literatura.

Par de trabajo	Capacidad de adsorción (g/g)	COP	Referencia
Carbón activado - etanol	0.201	0.127	[5]
Carbón activado - etanol	0.483	0.760	[20]
CA residuo de aceituna - metanol	N.R.	0.200	[21]
Carbón activado - metanol	0.257	0.210	[5]
Carbón activado - metanol	0.280	0.430	[22]
Carbón activado - metanol	0.295	0.660	[23]
Carbón activado - metanol	0.490	N.R.	[24]
Carbón activado - metanol	0.655	0.600	[25]
Carbón activado - agua	0.400	N.R.	[26]
Composito CA, gel de sílice, sal - agua	0.247	0.710	[27]
Gel de sílice - agua	0.100	0.450	[22]
Gel de sílice - agua	0.187	N.R.	[5]
Gel de sílice - agua	0.341	N.R.	[28]
Gel de sílice - agua	N.R.	0.260	[29]

*N.R.: No reportado, CA: carbón activado, COP: coeficiente de eficiencia.

1.1.2.3. Modificación superficial del adsorbente por impregnación

Tso y Chao [27] realizaron una modificación a carbón activado impregnándolo con silicato de sodio y posteriormente con cloruro de calcio al fin de mejorar su capacidad de adsorción de vapor de agua; el cloruro de calcio se caracteriza por tener una alta capacidad de adsorción de agua por sí solo, al ser una sal higroscópica. Mediante esta modificación se obtuvo un incremento de la capacidad de adsorción de 0.20 g/g (AC sin modificar) a 0.56 g/g (AC impregnado por 48h con silicato de sodio y 72 h con cloruro de calcio). Asimismo, se caracterizó el adsorbente modificado mediante espectroscopia de rayos X (XPS),

se determinó el área superficial y la distribución de poros, por estas técnicas confirmaron la impregnación de gel de sílice y sal en los poros del material adsorbente.

Gordeeva y colaboradores [16] estudiaron la capacidad de adsorción de metanol en gel de sílice mediante la modificación con más de 30 sales, tales como LiCl, LiBr, CaCl₂, CuCl₂, NiBr₂, entre otras. Las capacidades de adsorción más altas fueron obtenidas mediante las siguientes modificaciones: LiCl/SiO₂ (0.81 g/g), LiBr/SiO₂ (0.73 g/g), NiBr₂/SiO₂ (0.48 g/g), sobresaliendo el potencial de la modificación con cloruro de litio.

Se ha estudiado la mejora de la adsorción de agua en varios tipos de materiales, Zheng y colaboradores [30] realizaron una revisión bibliográfica donde presentan los materiales para un sistema de enfriamiento por materiales desecantes. El material desecante ideal es el que tiene una gran capacidad de adsorción a altas presiones relativas y además requiere una baja temperatura de regeneración. En esta revisión se encuentran materiales donde se comprueba que con un tamaño de poros mayor se permite una modificación exitosa por impregnación de sales, ya que esto permite la distribución de la sal de manera homogénea, sin bloqueo de los poros, comparado cuando se tiene un tamaño de poro más pequeño [31]. Además, se menciona que las modificaciones de materiales rocosos requieren una mayor temperatura de regeneración, cerca de los 150°C, lo que los sitúa en desventaja contra otros materiales citados.

Se eligieron las sales cloruro de calcio y bromuro de litio por sus características higroscópicas, las cuales fueron utilizadas para incrementar la capacidad de adsorción de metanol en gel de sílice mesoporoso [16].

1.1.2.4. Modelación matemática de la adsorción en el equilibrio

La capacidad de adsorción en el equilibrio en un sistema sólido-vapor puede ser descrita a partir de modelos matemáticos. De manera general, los modelos matemáticos pueden clasificarse de acuerdo a tres enfoques:

1. Modelos basados en la naturaleza de la superficie del adsorbente y su interacción con el adsorbato, los más ampliamente utilizados en la literatura son el modelo de Langmuir y el modelo de Freundlich.
2. Modelos con enfoque termodinámico, como los basados en la teoría de adsorción potencial de Polanyi y la adsorción en microporos por Dubinin.
3. Modelos basados en el proceso de condensación del vapor en los poros considerándolos como capilares como en la ecuación de Kelvin.

Para los modelos al equilibrio de la adsorción sólido-vapor se utilizan generalmente 2 variables independientes: la temperatura y la presión. Pueden ser isotérmicos, en cuyo caso los datos experimentales son obtenidos con poca masa de adsorbente para asegurar la condición isotérmica. Los modelos isobáricos son más utilizados para diseño de refrigeradores solares para facilitar el ciclo de adsorbato adsorbido y liberado en el ciclo. Los modelos isostérmicos se utilizan para calcular el calor de adsorción y ayudan en la selección del par de trabajo [15].

En el presente trabajo, se estudiaron dos enfoques para estimar la capacidad de adsorción en el equilibrio, un modelo basado en la naturaleza química del adsorbente y adsorbato, y un modelo basado en la termodinámica del proceso de adsorción, representados por el modelo de Langmuir y Dubinin, respectivamente. Los experimentos se realizarán a condiciones isotérmicas para

conocer la capacidad de adsorción de los materiales propuestos en la cama de adsorción donde la presión no es constante. A continuación, se describen los fundamentos de cada modelo.

El modelo de Dubinin se basa en la teoría de adsorción potencial de Polanyi, la cual describe una superficie con sitios de adsorción disponibles y que adsorbe en múltiples capas, por lo que el modelo varía en base a los componentes y la estructura porosa del adsorbente. Esta teoría establece que el gas adsorbido es compactado debido a la fuerza adsorptiva que existe entre la superficie del adsorbente y su entorno, y hay zonas con potencial de adsorción cero al estar alejadas de los sitios de adsorción. El gradiente de cargas superficiales varía entre la superficie y la superficie de potencial adsorción cero. De esta manera Polanyi expresó el potencial en un ambiente isotérmico de manera análoga a un trabajo de compresión del gas, con la siguiente ecuación:

$$\ln \left(\frac{p}{p_s} \right) = - \frac{W}{RT} \quad (1)$$

Donde W es el potencial de adsorción, p_s es la presión de saturación a la temperatura del adsorbente, p es la presión al equilibrio que corresponde a la temperatura de saturación del refrigerante en el evaporador/condensador, T es la temperatura del adsorbente y R la constante de los gases ideales.

Dubinin descubrió que para un mismo adsorbente se tenían curvas similares con distintos adsorbatos, por lo que en una misma fase el potencial dependería de un coeficiente de afinidad del adsorbato-adsorbente:

$$\ln \left(\frac{p}{p_s} \right) = - \frac{W}{RT} \beta \quad (2)$$

Donde β es un coeficiente de afinidad que depende solo del adsorbato.

De aqu^o surge la teor^a de Dubinin-Radushkevich sobre la relaci^on de la capacidad de adsorci^on con el potencial de adsorci^on de la siguiente manera:

$$V = V_m \exp\left(-k \left| \ln \frac{V_m}{V} \right| \right) \quad (1)$$

Donde V_m es la m^oxima capacidad de adsorci^on, k es un coeficiente determinado por la estructura del adsorbente y V incluye la relaci^on adsorbente-adsorbato.

Las ecuaciones 1 y 3 son v^olidas para materiales microporosos, una generalizaci^on para cualquier adsorbente con poros de di^ometro uniforme es la ecuaci^on Dubinin-Astakhov o D-A:

$$V = V_m \exp\left(-k \left| \ln \frac{V_m}{V} \right|^n \right) \quad (2)$$

Donde n puede ser decimales o enteros, E es el poder espec^ofico de adsorci^on determinado por las energ^oas caracter^osticas del sistema. Esta ecuaci^on est^o limitada a adsorbentes con una superficie suave y con polarizaci^on d^obil, lo cual se ha comprobado por otros estudios.

Cualesquiera de estas ecuaciones se pueden corregir introduciendo el concepto de fugacidad en lugar de presi^on, el cual determina la correcci^on para las ecuaciones de gases no ideales. De igual manera se puede corregir estas ecuaciones para materiales con una distribuci^on de poros no homog^onea mediante sumatorias o integrales para considerar el tipo de distribuci^on presente, en el caso de requerir un ajuste m^os fino.

En cuanto al modelo de Langmuir, supone que la superficie del s^olido presenta un numero finito de sitios id^onticos, no hay interacciones entre las especies adsorbidas, indicando que la cantidad adsorbida no tiene influencia sobre la

velocidad de adsorción y que una monocapa es formada cuando la superficie del sólido alcanza la saturación [32]. La isoterma de Langmuir puede ser representada por:

$$q = \frac{q_m p}{1 + bp} \quad (5)$$

Donde, q es la cantidad de adsorbato retenido por una unidad de masa de adsorbente en g/g, p es la presión del sistema en kPa, q_m está relacionada con la máxima capacidad de adsorción por una monocapa completa en g/g y la constante b representa la afinidad entre el adsorbente y el adsorbato en 1/kPa, se estima por una ecuación tipo Arrhenius donde A es un factor pre exponencial y H es la entalpía de adsorción para el adsorbato [33].

$$q = \frac{q_m A e^{-H/p}}{1 + b A e^{-H/p}} \quad (6)$$

Esta ecuación puede ser linealizada de la siguiente forma para obtener de manera gráfica los parámetros A y H

$$\frac{q}{q_m - q} = \frac{A b}{1 + A b} e^{-H/p} \quad (7)$$

1.1.2.5. Análisis termodinámico

El proceso de refrigeración solar se explica en el diagrama p-T-x, involucra dos procesos isobáricos y dos procesos isotérmicos. Cuando las presiones de evaporación y condensación son conocidas se puede determinar un ciclo termodinámico ideal a distintas temperaturas de adsorción y desorción, determinando la cantidad de enfriamiento.

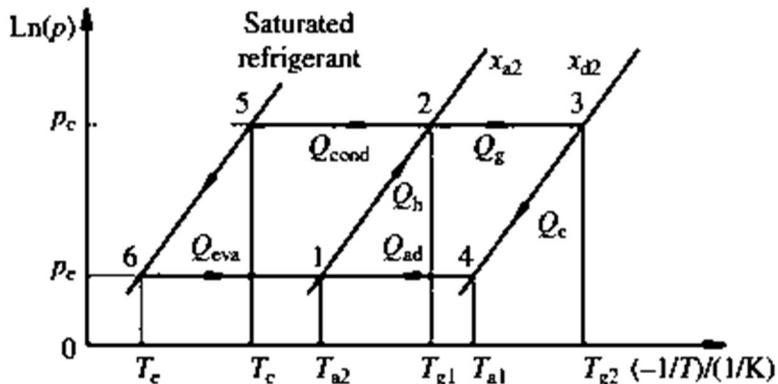


Figura 3. Diagrama p-T-x de un ciclo b8sico con un adsorbente sÆido-gas.

En la Figura 3 se representan 7 tipos de calor generados durante el ciclo de refrigeraci3n, los cuales son los siguientes:

¿ Q_h Calor sensible en la cama de adsorci3n (1-2): este engloba los calores sensibles del adsorbente, adsorbato y del material de la cama.

$$Q_h = m_a c_{pa} (T_{a2} - T_c) + m_{ad} c_{pa} (T_{a2} - T_c) + m_{ca} c_{pca} (T_{a2} - T_c) \quad (\times)$$

¿ Q_g Calor de desorci3n (2-3): comprende los calores sensibles del adsorbente, adsorbato, del material de la cama y el calor de desorci3n.

$$Q_g = m_a c_{pa} (T_{g1} - T_{a2}) + m_{ad} c_{pa} (T_{g1} - T_{a2}) + m_{ca} c_{pca} (T_{g1} - T_{a2}) + m_{ad} \lambda_{ad} (T_{g1} - T_{a2}) \quad (\times)$$

¿ Q_c Calor sensible durante el enfriado del adsorbente (3-4): este engloba los calores sensibles del adsorbente, adsorbato y del material de la cama.

$$Q_c = m_a c_{pa} (T_{a1} - T_{g1}) + m_{ad} c_{pa} (T_{a1} - T_{g1}) + m_{ca} c_{pca} (T_{a1} - T_{g1}) \quad (\square)$$

¿ Q_{ad} Calor transmitido a los alrededores (4-1): comprende los calores sensibles del adsorbente, adsorbato, del material de la cama, el calor de

adsorci6n y el calor sensible del fluido de trabajo hasta la temperatura de inicio de ciclo.

$$Q_{cond} = \int_{T_2}^{T_1} \left[C_a(T) + C_{Lc}(T) + C_m(T) + C_{pc}(T) \right] \left[M_a + M_a x_2 + M_{madb} x_2 \right] dT + M_a h_a + M_a h_d + L \quad (2-5)$$

¿ Q_{cond} Calor liberado en el proceso de condensaci6n (2-5): comprende el calor latente de vaporizaci6n y el calor sensible fluido liberado.

$$Q_{eva} = \int_{T_1}^{T_2} \left[C_a(T) + C_{Lc}(T) + C_m(T) + C_{pc}(T) \right] \left[M_a + M_a x_1 + M_{madb} x_1 \right] dT + M_a h_a + M_a h_d + L \quad (2-6)$$

¿ Q_{eva} Calor sensible liberado al ambiente (5-6) por el cambio de temperatura en el adsorbato l6quido.

$$Q_{eref} = M_a (T_1 - T_2) \quad (6-1)$$

¿ Q_{eref} Poder de enfriamiento de la evaporaci6n del refrigerante (6-1)

$$Q_{eref} = M_a (T_1 - T_2) \quad (6-1)$$

Donde: C_a(T) es el calor espec6fico del adsorbente, C_{Lc}(T) el del adsorbato l6quido, C_m(T) el del material de la cama adsorbedora, C_{pc}(T) es del adsorbato a una presi6n constante; M_a, M_a y M_{madb} son las masas respectivas, x_{a2}, x_{d2} son la cantidad adsorbida a la temperatura determinada, x la adsorci6n en el adsorbente, h_a y h_d el calor de adsorci6n y desorci6n y L calor latente de vaporizaci6n del adsorbato.

En cuanto al calor de adsorci6n se puede calcular a partir de la segunda ley de la termodin6mica, ya que la entrop6a disminuye durante el proceso de adsorci6n (disminuye el grado de libertad de las mol6culas).

$$Q_{lib} = Q_{cond} + Q_{surf} \quad (1.13)$$

El calor liberado se da en dos procesos: condensación del vapor (valores de tabla termodinámicas para el adsorbato) y por el efecto de la energía superficial, este último es difícil de medir por lo que se realizan los cálculos a partir de la isoterma de adsorción.

El coeficiente de eficiencia (COP, por sus siglas en inglés) relaciona las propiedades termodinámicas anteriormente mencionadas de la siguiente manera:

$$COP = \frac{Q_{lib}}{Q_{in}} \quad (1.14)$$

Utilizando el modelo Dubinin-Astakhov (D-A) se logra obtener una ecuación para el calor de desorción: $Q_{des} = A \frac{RT}{\ln p}$, donde A es un coeficiente de la ecuación Clausius-Clapeyron.

La potencia de enfriamiento específico por kilogramo de adsorbente SCP- (W/kg) se expresa como:

$$SCP = \frac{Q_{des}}{t} \quad (1.15)$$

Reduciendo el tiempo se aumenta el SCP, se puede hacer por dos vías mejorar la transferencia de masa en el adsorbente a baja presión y la de mejorar la transferencia de calor en la cama. El primero se encara mejorando el adsorbente y el segundo con el diseño del adsorbedor.

1.1.3. Análisis de Ciclo de Vida

La herramienta de análisis de ciclo de vida se encuentra estandarizada en las normas ISO 14040:2006 y ISO 14044:2006. En las cuales está establecido que el propósito del estudio del ciclo de vida debe exponer claramente la aplicación planteada, las razones de llevar a cabo el mismo y a quién va dirigida esta información. En las mismas encontramos las 4 fases para la implementación del análisis de ciclo de vida: definición del objetivo y del alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación. Todas estas fases se interrelacionan y se requiere su iteración con el fin de profundizar en los resultados, identificar los mayores impactos, comparar soluciones y proponer recomendaciones (Figura 4) [34].

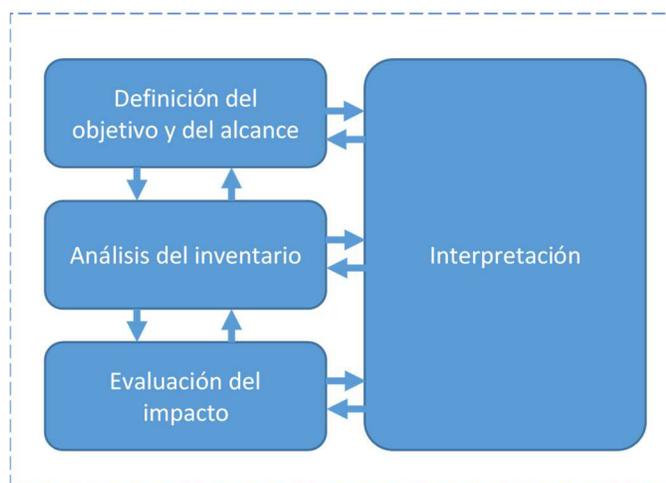


Figura 4. Fases del método de análisis de ciclo de vida. ISO 14040:2006.

Se han encontrado pocos estudios donde hacen uso de la herramienta del análisis de ciclo de vida para aplicaciones de refrigeración solar.

Gebreslassie y colaboradores [34] estudiaron la optimización económica y ambiental de un sistema de refrigeración solar por absorción, combinando de

esta manera factores como la fracción de energía proveniente del sol, la fabricación del equipo, su operación y mantenimiento, y posterior reciclaje, el costo energético, impuestos por emisiones de CO₂, costo de equipamiento inicial, etc. Su estudio concluye que cuando con impuestos por emisiones ambientales se incentivaría el uso de alternativas con energías sustentables, en este caso con un impuesto de 85 B/tCO₂ la fracción de energía solar óptima es de 0.75 y se evitan un 65% del impacto al calentamiento global comparado al escenario sin el uso de esta energía renovable.

De igual manera otros investigadores analizan la sustentabilidad del sistema de refrigeración según la fuente de energía, configuración o tipos de sistemas [35-37], pero no se han enfocado en el estudio de la sustentabilidad del par de trabajo.

1.1.4. Residuos agroindustriales

La celulosa, hemicelulosa y lignina son estructuras poliméricas que presentan grupos hidroxilos en la superficie que pueden formar puentes de hidrógeno con moléculas polares, este comportamiento ya se ha estudiado en detalle para la adsorción de agua en madera, y además se ha estudiado para aplicaciones como separación de corrientes de agua y etanol con almidón [14,38].

Los materiales lignocelulósicos están compuestos de celulosa, hemicelulosa y lignina, para el sorgo se ha reportado anteriormente que tiene una composición de 45 % celulosa, 14% hemicelulosa y 13% lignina [39]

1.2. Justificación

Actualmente no se ha reportado la aplicación de materiales lignocelulósicos en sistemas de refrigeración solar por adsorción, sin embargo, su potencial uso para esta aplicación es factible conociendo el mecanismo de adsorción del vapor de agua y metanol como adsorbatos.

En México, los rastrojos de cereales como el sorgo no son revalorizados por lo que constituyen un residuo agroindustrial que pueden ser parcialmente aprovechados para su potencial aplicación en sistemas de refrigeración solar por adsorción. Adicionalmente, un recurso natural de gran abundancia en el territorio nacional es la irradiación solar, la cual supera en más del 100% a países líderes en tecnologías que aprovechan esa energía. Estos recursos naturales de México pueden ser aprovechados para generar bienestar social, a través de su aplicación en sistemas de bajo costo y de bajo impacto ambiental.

1.3. Hipótesis

El rastrojo de sorgo químicamente modificado adsorbe vapor de agua o metanol para su uso potencial en sistemas de refrigeración solar por adsorción con un desempeño ambiental y energético superior al del carbón activado granular.

1.4. Objetivo general

Evaluar diversos pares de trabajo para su aplicación en un sistema de refrigeración solar por adsorción, conformado por un residuo agroindustrial como base del material adsorbente y como adsorbato: vapor de agua o metanol.

1.5. Objetivos específicos

- ¿ Caracterizar fisicoquómicamente el rastrojo de sorgo.
- ¿ Evaluar el efecto de la inclusión de sales higroscópicas en la superficie del rastrojo de sorgo sobre la capacidad de adsorción de vapor de agua y metanol.
- ¿ Determinar la capacidad de adsorción de cada par de trabajo de manera experimental.
- ¿ Determinar el desempeño energético y ambiental del par de trabajo con mayor capacidad de adsorción.
- ¿ Comparar el desempeño energético y ambiental del par de trabajo desarrollado con el carbón activado granular.

2. METODOLOGÍA

2.1. Preparación de la materia prima

El rastrojo de sorgo utilizado proviene de una cosecha en el municipio de Zuazua, Nuevo León a partir de las semillas Sorghum bicolor X Sorghum sudanense de Semillas San Francisco. Como preparación de la materia prima se retiraron las hojas de los tallos, se lavaron los tallos con agua potable por dos ocasiones para retirar la tierra y fueron secados al sol por 3 horas. Posteriormente se redujo el tamaño de los tallos a 1 centímetro de longitud y fue almacenado en bolsas herméticas para su posterior uso. Se identifica a lo largo de este trabajo como RSMP, rastrojo de sorgo materia prima.

2.2. Impregnación del rastrojo de sorgo con sales higroscópicas

Se realizó un diseño de experimentos central compuesto para evaluar el efecto del tipo de sal higroscópica, concentración y tiempo de impregnación, en la variable de respuesta que fue seleccionada como la capacidad de adsorción (Tabla 3).

Por otro lado, la concentración máxima de la sal se determinó a partir de pruebas preliminares, así como de la solubilidad a temperatura ambiente (20°C) reportada en literatura, siendo 74.5 g/100 mL para el cloruro de calcio y 160 g/100 mL para el bromuro de litio [40,41]. Los niveles para el tiempo de impregnación fueron seleccionados de acuerdo a la propuesta realizada por Tso y Chao [27].

Tabla 3. Diseño central compuesto para la capacidad de adsorción.

Variable independiente	Factor codificado	Niveles codificados		
		-1	0	1
		Niveles reales		
Concentración de la sal (% peso)	A	5	12.5	20
Tiempo de impregnación (h)	B	24	48	72
Tipo de sal	C	Cloruro de calcio	-	Bromuro de litio

La nomenclatura de las muestras se realizó iniciando con el símbolo del metal de la sal utilizada (Li o Ca), seguido por el nivel del factor de tiempo de impregnación (1 = 24 h, 2 = 48 h, 3 = 72 h) y finalmente por el nivel del factor de la concentración de la solución de sal utilizada en porcentaje en peso (1 = 5%, 2 = 12.5, 3 = 20%). Así por ejemplo Ca-1-3 es el rastrojo de sorgo modificado con la sal cloruro de calcio por 24 horas en una solución al 20% peso (Tabla 4).

Tabla 4. Modificaciones realizadas al rastrojo de sorgo con sales higroscópicas. Nomenclatura.

	Cloruro de calcio			Bromuro de litio		
Tiempo de impregnación horas "						
Concentración de solución % peso †	24	48	72	24	48	72
5	Ca-1-1	Ca-2-1	Ca-3-1	Li-1-1	Li-2-1	Li-3-1
12.5	Ca-1-2	Ca-2-2	Ca-3-2	Li-1-2	Li-2-2	Li-3-2
20	Ca-1-3	Ca-2-3	Ca-3-3	Li-1-3	Li-2-3	Li-3-3

El procedimiento general para la modificación del rastrojo de sorgo con sales higroscópicas consistió en colocar en un matraz Erlenmeyer agua desmineralizada y la cantidad de sal de acuerdo con la concentración correspondiente en el diseño de experimentos. Posteriormente, se realizó la dilución de la sal a temperatura ambiente y se tomó una muestra de 1 mL. Los tallos del rastrojo de sorgo se pesaron en una balanza analítica para posteriormente ser introducidos en la solución. En seguida, fueron colocados en un agitador mecánico orbital a temperatura ambiente, a 150 rpm por el tiempo de impregnación establecido en el diseño de experimentos.

Una vez concluido el tiempo de impregnación, se realizó una separación física de los rastrojos mediante filtración, para posteriormente realizar un lavado del rastrojo con agua desmineralizada correspondiente a un tercio del volumen de la solución (Tabla 27, Apéndice B). En cada etapa de filtración, se tomó una muestra de 2 mL del filtrado para su posterior análisis de concentración de litio o calcio, según fuera el caso.

El rastrojo de sorgo modificado y lavado se dispuso en bandejas de aluminio para su secado en un horno eléctrico a 105°C por 3 horas (tiempo determinado de peso constante). Posteriormente, se almacenó el material en bolsas herméticas individuales dentro de un desecador con gel de sílice.

El listado de las pruebas requeridas por el diseño de experimentos y la bitácora de las modificaciones se encuentran en el apéndice B.

2.3. Caracterización físico-química

El análisis elemental para conocer la composición del material se obtuvo en un equipo Leco CHNS-932. Las muestras fueron preparadas en un molino de café hasta no tener a la vista tallos del RSMP.

La caracterización de los grupos funcionales se realizó por espectroscopía de infrarrojo (FTIR) en un equipo SpectrumOne marca Perkin Elmer. Fue necesario pulverizar las muestras en un molino vibratorio Rock Lab Benchmill 50.

Para conocer la estabilidad térmica del rastrojo de sorgo se ejecutó un análisis termogravimétrico en atmósfera de nitrógeno desde la temperatura ambiente hasta 700°C, en un instrumento Q 500 marca TA Instruments. Previo al análisis termogravimétrico, fue necesario procesar las muestras en un molino vibratorio (Rock Lab Benchmill 50) hasta obtener un polvo.

Las propiedades superficiales del material se evaluaron en un equipo Autosorb-1 marca Quantachrome, por adsorción-desorción de nitrógeno a -196°C y dióxido de carbono a 0°C. Las muestras fueron preparadas en un molino de café y se realizó una desgasificación de al menos 8 horas a 150°C.

La morfología de la superficie de los rastrojos de sorgo modificados y la distribución elemental superficial fue obtenida mediante un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo modelo Nova NanoSEM 200, marca FEI, donde se utilizó la técnica de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva. No se requirió de una preparación especial de la muestra.

La detección de los elementos químicos superficiales se realizó por espectroscopía de fluorescencia de rayos x en un equipo marca PANalytical

modelo A \times 30s. Para su análisis por las muestras fueron molidas en un molino de café y compactadas en una prensa hidráulica en pastillas de 1 cm de diámetro.

La concentración de calcio o litio en las soluciones de sales utilizadas se midió con absorción atómica en un equipo Thermo Scientific. Con el fin de determinar el contenido de la sal antes y después de la impregnación.

Con el fin de verificar si se lleva a cabo una hidratación del material durante la impregnación con las sales higroscópicas, se realizaron pruebas de azúcares reductores totales a la solución de impregnación posterior al tiempo de la modificación, se utilizó la técnica DNS [42,43], como estándar se utilizó una solución de dextrosa a 0.1 %.

2.4. Determinación de capacidad de adsorción

Para la determinación de la capacidad de adsorción se utilizó un sistema presión variable - volumen constante que se encuentra dentro del Laboratorio de Ingeniería Química 1 (Figura 5), cuyo procedimiento se detalla en el apéndice A. El listado de pruebas se realizó con el software Design Expert 7.0.0 Trial versión, de acuerdo con el diseño central compuesto ya mencionado (Tabla 3).

La capacidad de adsorción se determinó con metanol como adsorbato, en una muestra de 4 gramos, en un tiempo de 2 horas controlando las condiciones de inicio de esta dentro de los rangos establecidos en la

Tabla 5. En este equipo no fue posible realizar las pruebas con vapor de agua debido a problemas de condensación debido a la diferencia de temperatura del sistema y del ambiente ($\sim 35^{\circ}\text{C}$).

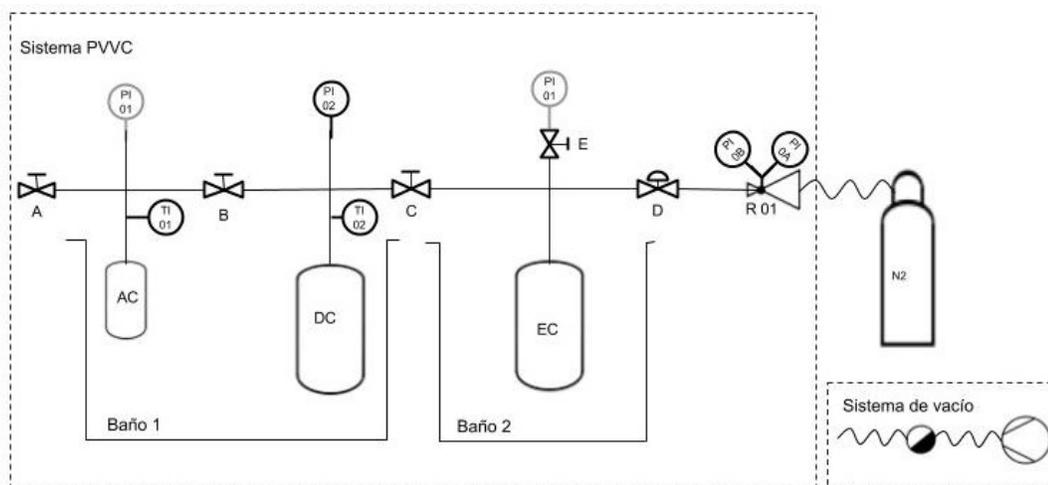


Figura 5. Diagrama de equipo PVVC (presión variable, volumen constante) utilizado.

Tabla 5. Condiciones de operación para capacidad de adsorción.

Característica o localización	Valor / rango
Adsorbato	Metanol
Adsorbente. Peso inicial	4 g
Adsorbato. Volumen inicial	150 ml
Baño 1	32-36°C
Baño 2	30°C
Presión PI 01 (prueba de hermeticidad)	-80 a -90 kPa
Presión PI 02 (prueba de hermeticidad)	-90 a -94 kPa
Presión PI 02 (prueba de adsorción, inicial)	-80 kPa ± 1

2.5. Isotermas al equilibrio

Se utilizó un lecho empacado con el adsorbente dentro de una columna de aluminio para la obtención de las isotermas de adsorción por termogravimetría, con el metanol o vapor de agua como adsorbatos. El lecho se encuentra aislado térmicamente y cuenta con una medición de peso y temperatura de manera continua. La corriente de aire saturada con el adsorbato se hace circular de abajo

hacia arriba, la cual se satura mediante un burbujeador que est® dentro de una c®mara a una temperatura constante. Esta corriente se diluye con una corriente de aire seco mediante un control de flujo m®sico. Se muestra el diagrama utilizado en la Figura 6 [44]. El lecho cuenta con una cinta t®rmica que permite variar la temperatura del mediante un potenci®metro. La desorci®n fue realizada a una sola temperatura con flujo de aire seco.

Al empacar la columna se registra el peso y las dimensiones del lecho empacado. Durante cada prueba el peso de la columna se registra de manera continua, de esta manera se tiene una curva peso vs. tiempo, en la misma se puede apreciar el peso de saturaci®n para cada punto de la isoterma.

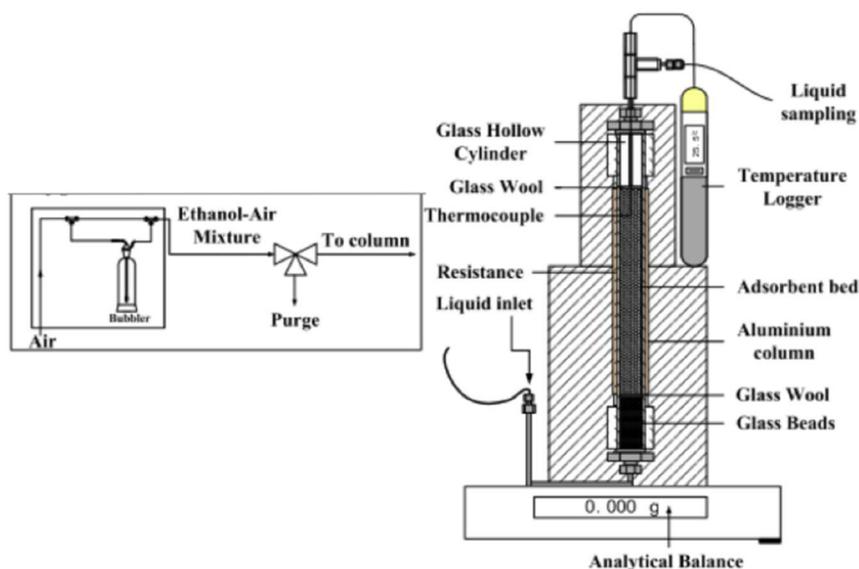


Figura 6. Diagrama del equipo utilizado para las isotermas por termogravimetr®a, se realizaron las pruebas en la configuraci®n B con el metanol y agua [44].

2.6. Coeficiente de eficiencia

Se define el coeficiente de eficiencia disponible (COP, por sus siglas en inglés) a la relación entre el calor extraído y el calor de desorción del adsorbato. El calor extraído se puede calcular por $\frac{m_a \Delta h_{fg}}{m_s}$ donde Δh_{fg} es la entalpía del adsorbato de cambio de líquido a gas y m_s la masa del adsorbato, este efecto ocurre en el evaporador [21].

El calor de desorción se relaciona al calor latente del adsorbato Δh_{fg} y al calor sensible del adsorbente y del adsorbato $\frac{m_a \Delta h_{fg}}{m_s} + m_s c_p \Delta T$, donde Δh_{fg} es la entalpía del adsorbato cambio de sólido a gas, m_s masa de adsorbente, c_p poder calorífico del adsorbente, Δh_{fg} calor específico del adsorbato y ΔT cambio de temperatura entre el adsorbato condensado y evaporado.

$$\text{COP} = \frac{m_a \Delta h_{fg}}{m_s \Delta h_{fg} + m_s c_p \Delta T} \quad (18)$$

Los valores de entalpía y el calor específico del adsorbato fueron obtenidos de la literatura [21], la masa de adsorbente fue de 1 kg, la masa del adsorbato fue determinada a partir de la isoterma de adsorción correspondiente al par de trabajo estudiado a temperatura ambiente y a la presión de saturación a 8°C (6.6 kPa metanol y 1.1 kPa para vapor de agua) que es la condición operativa deseada del adsorbato, el cambio de temperatura generado se estima de 8 K. El poder calorífico del adsorbente se obtuvo de manera experimental por bomba calorimétrica, sino el del CAG se tomó de la literatura [21].

2.7. Análisis de Ciclo de Vida

Con el fin de respaldar el uso de estos pares de trabajo como alternativa ambientalmente eficiente a los ya reportados en la literatura, se utilizó la herramienta del análisis de ciclo de vida, la cual permite comparar los impactos ambientales potenciales entre varios sistemas de manera equitativa.

2.7.1. Alcance y objetivo

Se midieron los potenciales impactos ambientales de la operación de un sistema de refrigeración solar por adsorción desde la perspectiva del análisis de ciclo de vida con el fin de comparar el perfil ambiental de los pares de trabajo propuestos en este trabajo contra la solución más comúnmente utilizada, que es el uso del carbón activado granular (CAG) como adsorbente [19,22,45,46].

El fin del análisis es dar un valor agregado al material agroindustrial propuesto e impulsar el interés científico en este tipo de soluciones, por lo que se busca atraer primero a científicos mexicanos en la labor de investigación y desarrollo de alternativas de refrigeración en zonas de menos ventaja relativa en México, así como a escala mundial a científicos que cuentan con el subproducto del cultivo de cereales, similares al rastrojo de sorgo.

El estudio de ciclo de vida realizado para los materiales adsorbentes estudiados incluye desde el transporte de la materia prima a un centro de modificación, en este caso las instalaciones de la Universidad Autónoma de Nuevo León en San Nicolás de los Garza, su lavado, corte, modificación y secado. Este análisis considera un escalamiento a nivel industrial de lo realizado en el laboratorio.

Debido a que los impactos potenciales de la fabricación y disposición del equipo de refrigeración, y de la disposición de los residuos, son independientes del tipo de adsorbato que se emplee, no fueron considerados dentro del alcance de este estudio. Las fronteras del sistema ya mencionadas se muestran en la Figura 7.

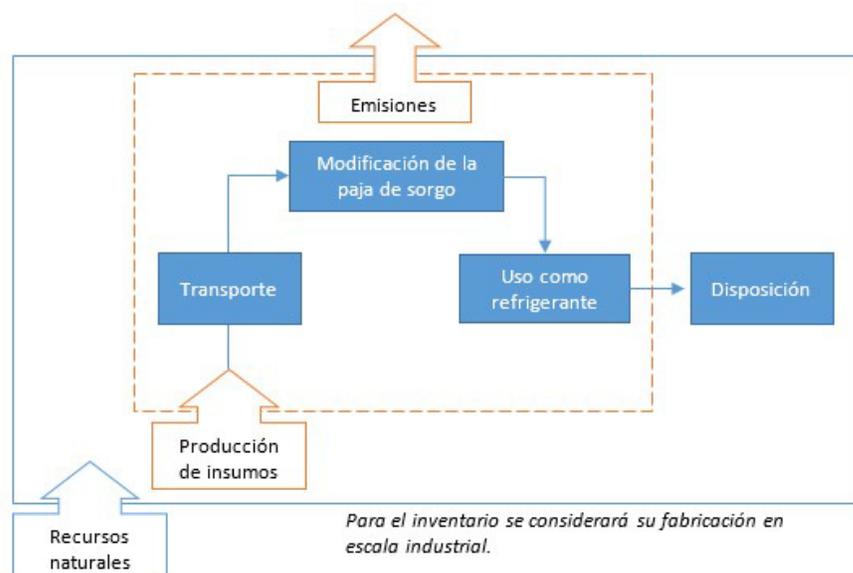


Figura 7. Fronteras del sistema para el ACV propuesto.

Se utilizaron las bases de datos provenientes de Ecoinvent versión 3.0, para la industria mexicana para cuantificar los impactos de insumos y emisiones, a menos de que se especifique lo contrario. La unidad funcional seleccionada es la operación de un sistema de refrigeración solar por adsorción con un kilogramo de adsorbente.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización de la materia prima

Con el fin de comprender la estructura y composición del rastrojo de sorgo utilizado, así como verificar su relación con los resultados obtenidos se realizaron las siguientes pruebas de caracterización.

3.1.1. Análisis elemental CHNS

El análisis elemental del rastrojo de sorgo mostró un contenido de carbono de 43.2 %, hidrógeno 5.7% y por diferencia 50.8% de oxígeno (Tabla 6). Estos valores se pueden comparar a lo reportado para otros materiales lignocelulósicos. Rosas y colaboradores [47] trabajaron con cáscamo como precursor de carbón activado el cual presentó un contenido de carbono de 49.7%, hidrógeno 5.4 % y nitrógeno 0.4%. Dávila y colaboradores [48] trataron el residuo de café con un contenido de carbono de 48.1%, hidrógeno 10.8 %, nitrógeno 2.2%.

Tabla 6. Composición del rastrojo de sorgo.

ID	Muestra	Peso (mg)	% C	% H	% N	% S
1	RSMP	2.13	43.20	5.70	0.25	0.05

3.1.2. Espectroscopía infrarroja

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR por sus siglas en inglés) se realizó en muestras molidas del rastrojo de sorgo. El objetivo de este

estudio es el de identificar los grupos funcionales en la superficie del material y que pueden tener participación en el proceso de adsorción de metanol y agua.

En la Figura 8 se muestra el espectro obtenido, donde es posible identificar claramente las bandas correspondientes al grupo hidroxilo presente a 3325 cm^{-1} y las de estiramiento el grupo carboxilo en las bandas 1634 y 1606 cm^{-1} . Adicionalmente, se encontraron bandas del estiramiento del enlace carbono hidrogeno de los grupos alifáticos en 2920 y 2857 cm^{-1} . Estas bandas ya han sido reportadas para muestras lignocelulósicas [49-51].

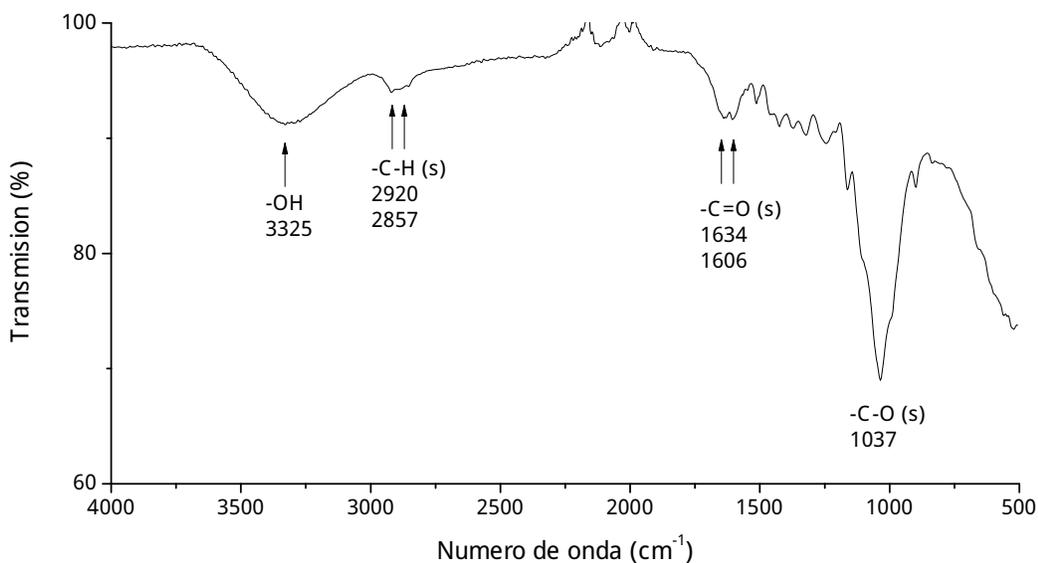


Figura 8. IR del rastrojo sin modificar (RSMP).

3.1.3. Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico del rastrojo de sorgo se realizó desde temperatura ambiente hasta 700°C en atmósfera de nitrógeno, se utilizó una rampa de calentamiento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (Figura 9).

Los resultados en atmósfera de nitrógeno muestran una pérdida de humedad que concluye a los 110°C de alrededor de 10% del peso inicial. Posteriormente se muestra dos pérdidas de peso importantes a partir de los 200°C teniendo los picos aproximadamente a los 300 y 340°C, los cuales corresponderían con la degradación de la estructura de lignina y hemicelulosa tal como se reportan en la literatura [39]. En los sistemas de refrigeración solar por adsorción, la temperatura máxima de operación es aproximadamente 120°C, por lo que el rastrojo de sorgo sin modificar mostraría estabilidad térmica a temperaturas menores a 200 °C de acuerdo con el análisis termogravimétrico realizado.

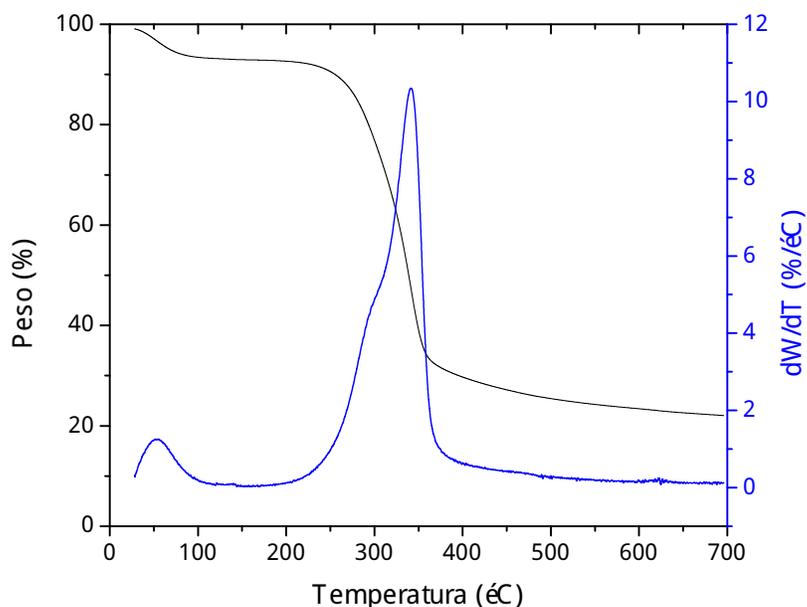


Figura 9. Análisis termogravimétrico del rastrojo de sorgo molido en atmósfera de nitrógeno.

3.1.4. Propiedades superficiales

Para conocer las propiedades superficiales del RSMP se realizaron isotermas de adsorción de nitrógeno y dióxido de carbono. A partir de estas, se calculó el área superficial aparente por el método propuesto por Brunauer-E Emmett-Teller

(BET), el volumen de poros total y el de mesoporos. La isoterma de dióxido de carbono sirve para conocer la estructura microporosa, el diámetro de poro es estimado mediante el método Dubinin-Radushkevish.

Para el rastrojo de sorgo encontramos un área superficial de $1.2 \text{ m}^2/\text{g}$, lo cual es consistente con lo reportado en la literatura para otros tipos de residuos lignocelulósicos (Tabla 7).

Tabla 7. Comparación del cálculo del área superficial en varios materiales lignocelulósicos.

Material	Área superficial - BET (m^2/g)	Tamaño de poro promedio (nm)	Referencia
Residuos de café	0.36	N.R.	[48]
Rastrojo de maíz	0.70	N.R.	[52]
Bagazo de azúcar	1.00	N.R.	[53]
Fibra de yute	1.04	N.R.	[54]
Rastrojo de sorgo	1.20	23.1	Este estudio

La isoterma de nitrógeno (Figura 10) es del tipo II, de acuerdo con la clasificación de la IUPAC, lo que denota una estructura macroporosa o no porosa. En la gráfica de distribución de poros (Figura 11) se comprueba la condición macroporosa, ya que los diámetros superiores a 500 \AA representan la mayor parte del volumen total de poros. Este tamaño de poros permitiría la adsorción de nuestras moléculas de interés, ya que los diámetros del metanol y del agua son 4.4 \AA y 3.2 \AA , respectivamente; así mismo la presencia de poros amplios favorece la impregnación de sales en la superficie [55].

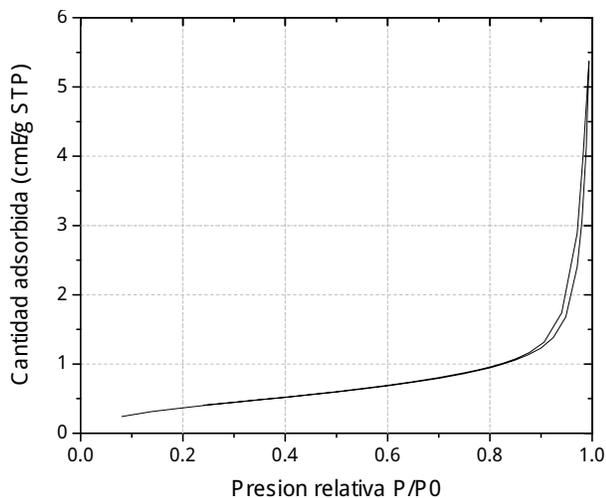


Figura 10. Isoterma de nitrógeno del rastrojo de sorgo molido.

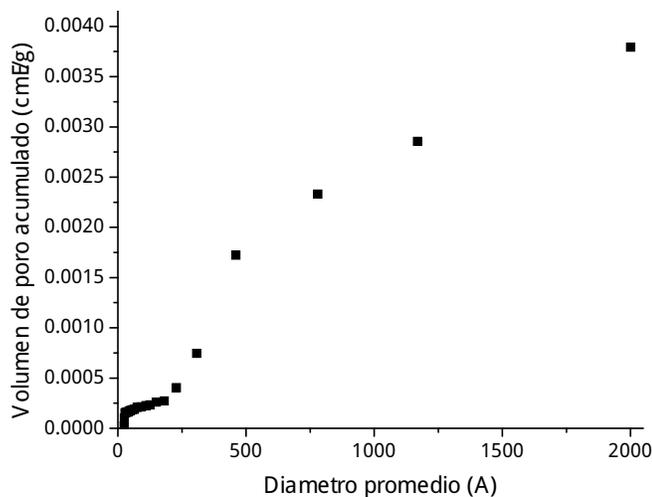


Figura 11. Gráfica del volumen de poro acumulado por diámetro del rastrojo de sorgo

Los resultados completos obtenidos de los análisis mencionados se encuentran en la Tabla 8. La simbología utilizada es la siguiente: A_{BET} (m^2/g) área superficial aparente obtenida por el método BET; $V_{0.995}$ (cm^3/g) volumen total de poros; V_{meso} (cm^3/g) volumen de mesoporos; A_t (m^2/g); V_t (cm^3/g); V_{DR} (cm^3/g) volumen de microporos obtenido por el método DR; A_{DR} (m^2/g) área aparente de microporos estrechos. En general se observan valores muy bajos de volumen de poros, siendo en su totalidad mesoporos.

Tabla 8. Propiedades superficiales del rastrojo de sorgo.

	N ₂					CO ₂	
	A _{BET} (m ² /g)	V _{0.995} (cm ³ /g)	V _{meso} (cm ³ /g)	A _t (m ² /g)	V _t (cm ³ /g)	V _{DR} (cm ³ /g)	A _{DR} (m ² /g)
RSMP	1.2	0.005	0.005	1.0	0.000	0.006	15.61

3.2. Impregnación del rastrojo de sorgo con sales higroscópicas

Se realizaron las modificaciones según la metodología descrita en la sección 2.2. La inclusión de las sales higroscópicas en la superficie del rastrojo de sorgo fue evidenciada mediante pruebas de fluorescencia de rayos x (FRX). En la Tabla 9 se muestra la concentración elemental para la materia prima y las modificaciones, observándose un aumento del contenido de calcio y cloro para la modificación Ca-1-2, y un aumento en Br para la modificación Li-2-2, el litio no se puede detectar por esta técnica. Estos resultados confirman la impregnación de las sales en la superficie del rastrojo de sorgo.

Tabla 9. Concentración de elementos en % obtenidos por el método de FRX

	O	C	H	Si	K	Cl	Ca	Br	Mg
RSMP	53.8	37.4	3.1	2.5	1.06	0.76	0.65	0.01	0.42
Ca-1-2	46.7	31.9	2.7	1.1	0.15	10.52	6.47	0.01	0.14
LI-2-2	46.8	32.0	2.7	3.3	0.07	0.06	0.25	14.53	0.27

Se analizó el contenido de sal en la solución antes y después de la impregnación con el fin de cuantificar la cantidad de sal restante en la misma y su posible reutilización. Dicho análisis se realizó por medio de absorción atómica

cuantificando la presencia del metal correspondiente, ya sea calcio o litio. Los resultados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados por absorción atómica de la concentración de calcio y litio en las soluciones utilizadas en el proceso de algunas modificaciones.

Modificación	Tipo de solución	Concentración del metal (mg/L)
Ca-1-2	Preparada / inicial	37857
	Final de impregnación	38781 (+2%)
	Agua del primer lavado	1250
	Agua del segundo lavado	100
Li-2-2	Preparada / inicial	9275
	Final de impregnación	8975 (-3%)
	Agua del primer lavado	1400
	Agua del segundo lavado	83

Se nota que para el caso del calcio no hay una disminución del contenido del metal, sino un aumento del mismo, esta lectura errónea puede ser debido a la concentración de la solución en el proceso de impregnación (pérdida de agua por evaporación). En cuanto al litio si se observa una disminución del metal de 3%.

En todo caso estas mediciones muestran un alto contenido de sales en la solución final. Estos resultados no son útiles para cuantificar el % de eficiencia del proceso de impregnación debido al error detectado causado por la evaporación del agua.

3.2.1. Espectroscopía infrarroja

Se caracterizaron los materiales modificados por espectroscopía de infrarrojo y los resultados fueron comparados con el espectro realizado al RSMP (Figura 12). En los mismos se encontró que las sales higroscópicas no modificaron los tipos de grupos funcionales disponibles. Esto quiere decir que la sal higroscópica que se impregna en los poros permite disponibilidad de los grupos funcionales del material y que la sal no se integra a la estructura de partida. Adicionalmente, se presenta un incremento en las bandas de los grupos hidroxilo 3325 cm^{-1} lo que indica la presencia de agua adsorbida en el material.

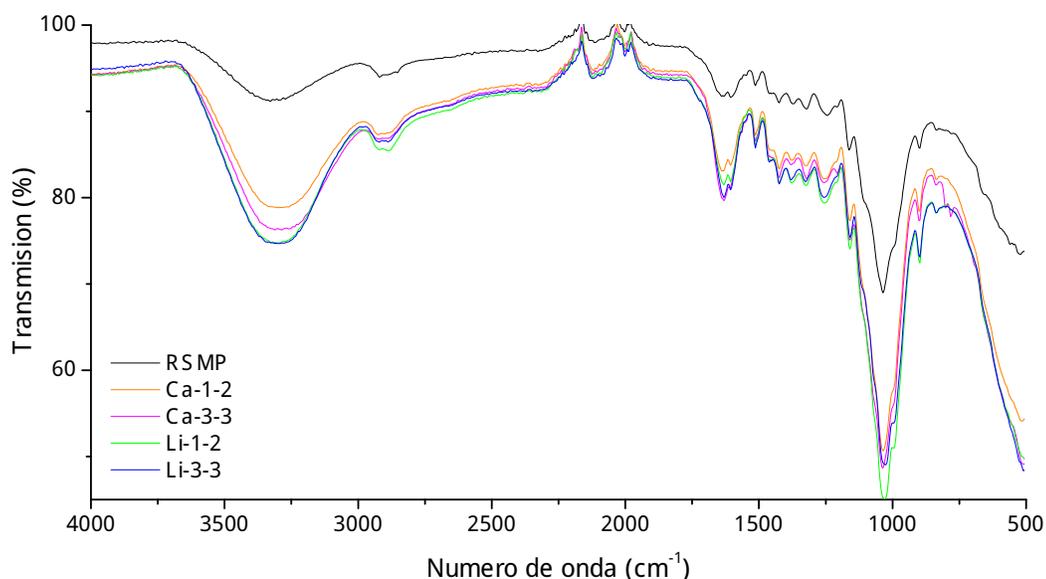


Figura 12. Espectroscopía de infrarrojo realizado a varios materiales modificados, se muestra en negro el rastrojo de sorgo sin modificar.

3.2.2. Estudios superficiales de morfología.

Se tomaron imágenes por microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) para verificar la distribución de las sales higroscópicas en la

superficie del material mediante la técnica de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDS).

La morfología del rastrojo de sorgo se observa del tipo fibroso en los cortes longitudinales para las 4 modificaciones. En los cortes transversales se observa la heterogeneidad de los tamaños de los poros, entre el centro y la pared exterior (Figuras 12, 13, 14 y 15).

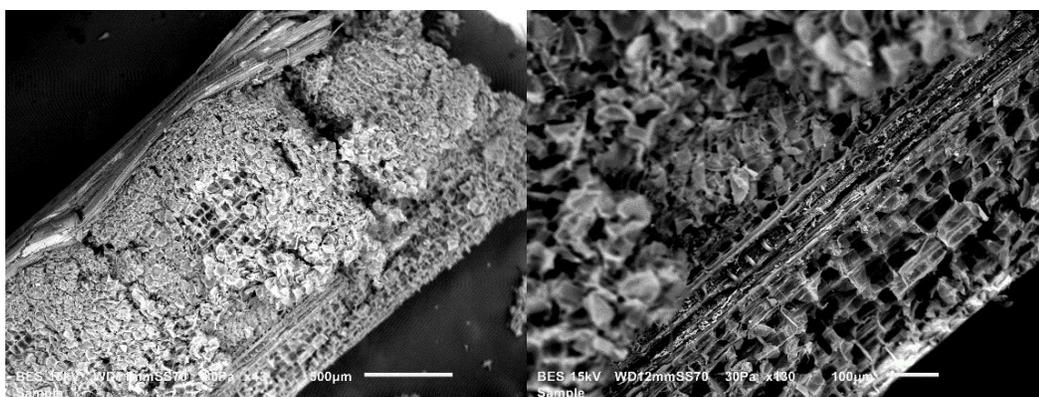


Figura 13. Micrografías del material Ca-2-1. En la figura (a) se muestra un corte longitudinal y en la (b) un corte transversal.

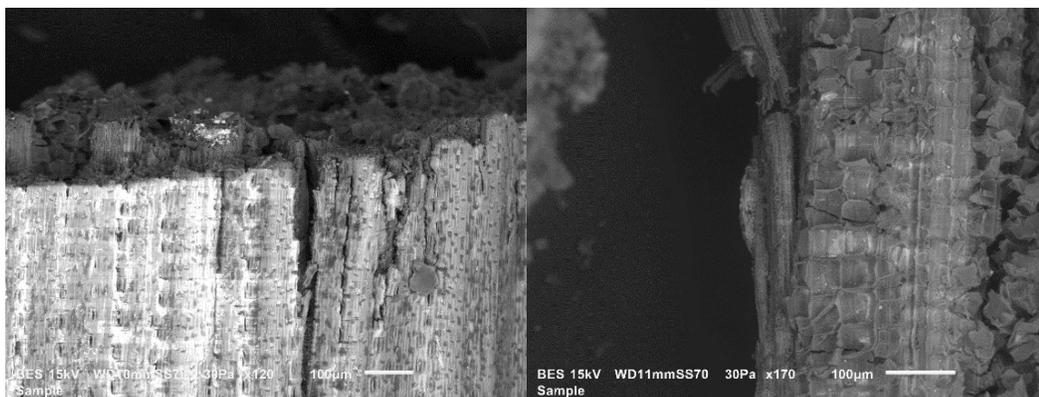


Figura 14. Micrografías del material Ca-2-3. En la figura (a) se muestra un corte longitudinal y en la (b) un corte transversal.

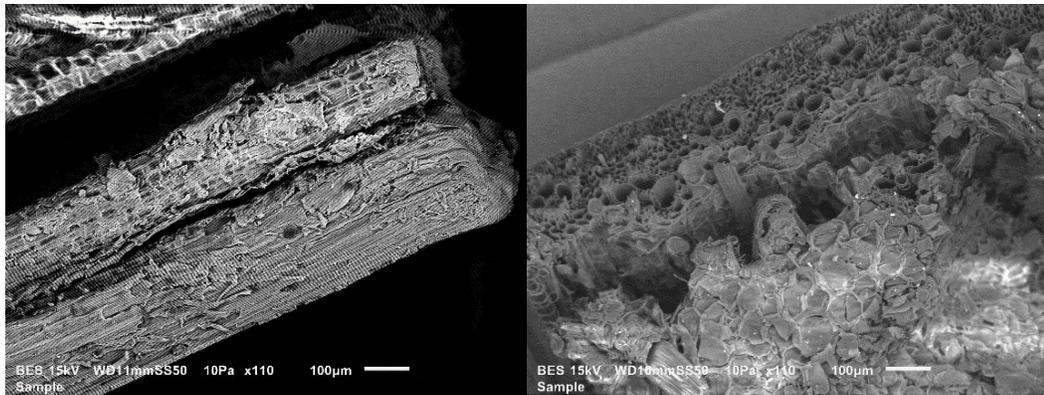


Figura 15. Micrografías del material Li-2-1. En la figura (a) se muestra un corte longitudinal y en la (b) un corte transversal.

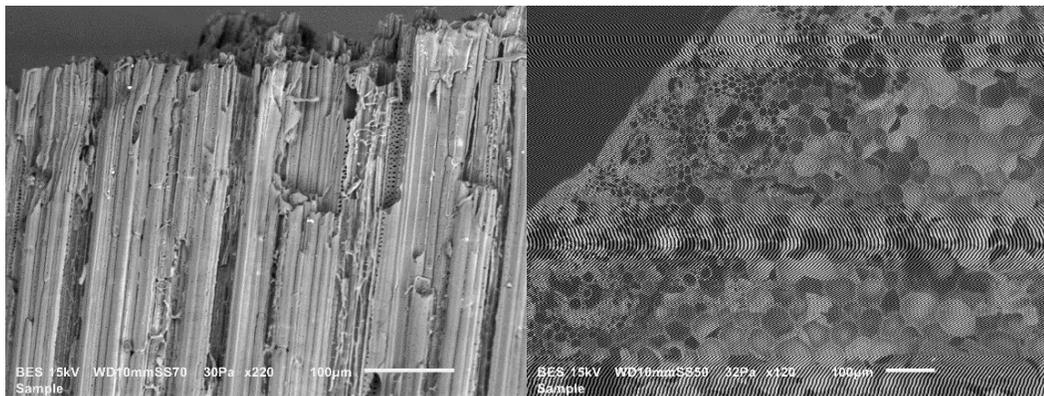


Figura 16. Micrografías del material Li-2-3. En la figura (a) se muestra un corte longitudinal y en la (b) un corte transversal.

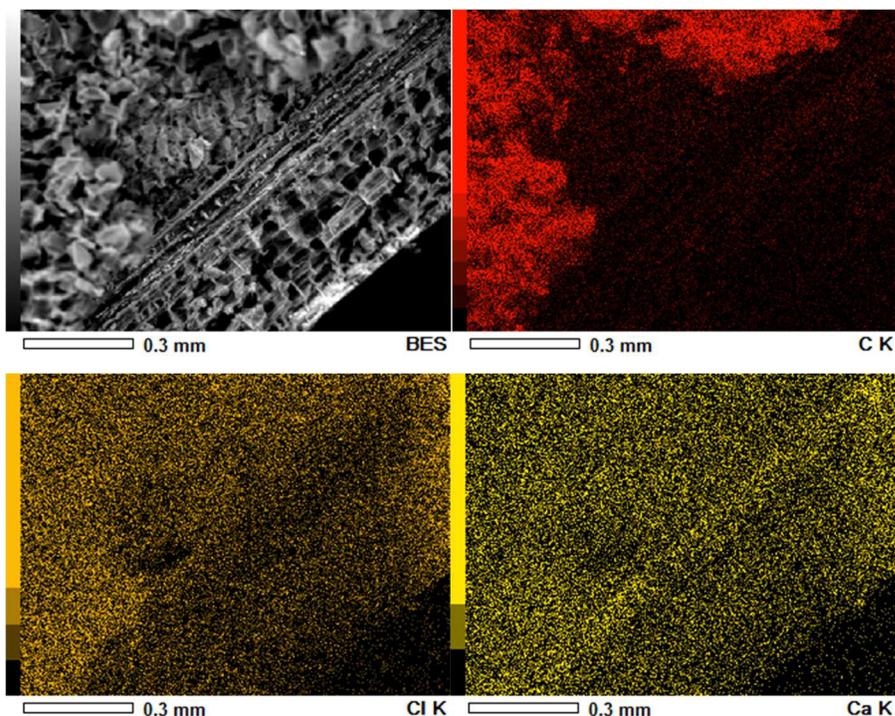


Figura 17. En (a) se ve la micrografía del material Ca-2-1. En (b, c y d) se muestran las imágenes obtenidas por EDS para C, Cl, Ca, respectivamente.

En cuanto a la distribución de sales, se puede observar en las Figuras 16, 17 y 18, las imágenes obtenidas por la técnica de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva, en las cuales la presencia de determinado elemento se representa por puntos de un color sobresaliente, el cual está señalado en la parte inferior derecha de cada micrografía. En las Figuras 16 y 17 se aprecia la distribución homogénea de la sal de cloruro de calcio, evidenciada en la presencia de cloro y calcio, que es similar a la presencia de carbono en la zona estudiada. En tanto, la Figura 18 se muestra la distribución homogénea del bromo que demuestra la presencia del bromuro de litio, el litio no se puede detectar con esta técnica.

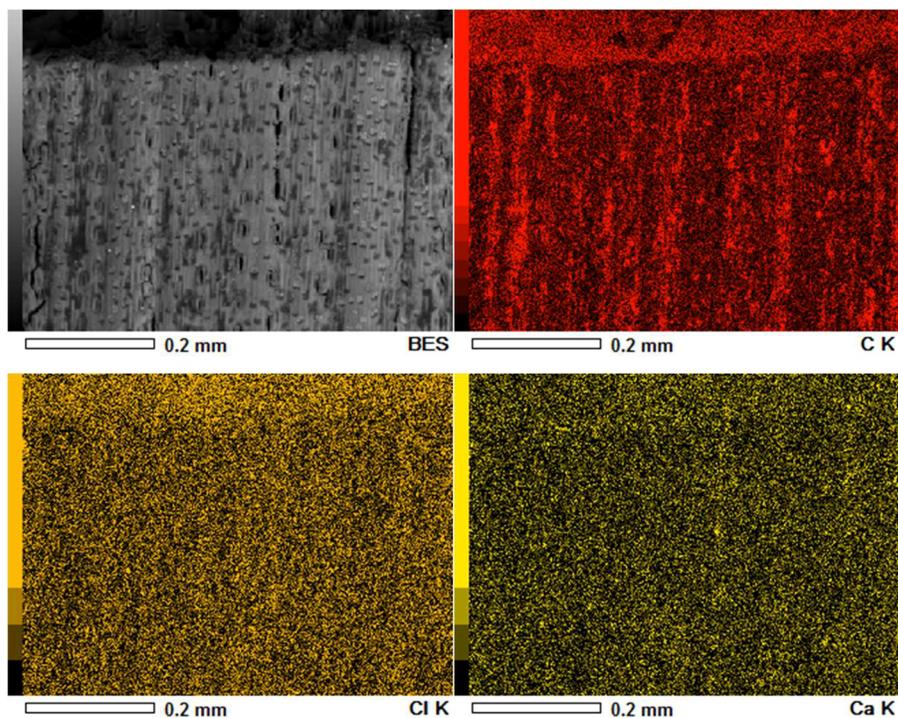


Figura 18. En (a) se ve la micrografía del material Ca-2-3. En (b, c y d) se muestran las imágenes obtenidas por EDS para C, Cl, Ca, respectivamente.

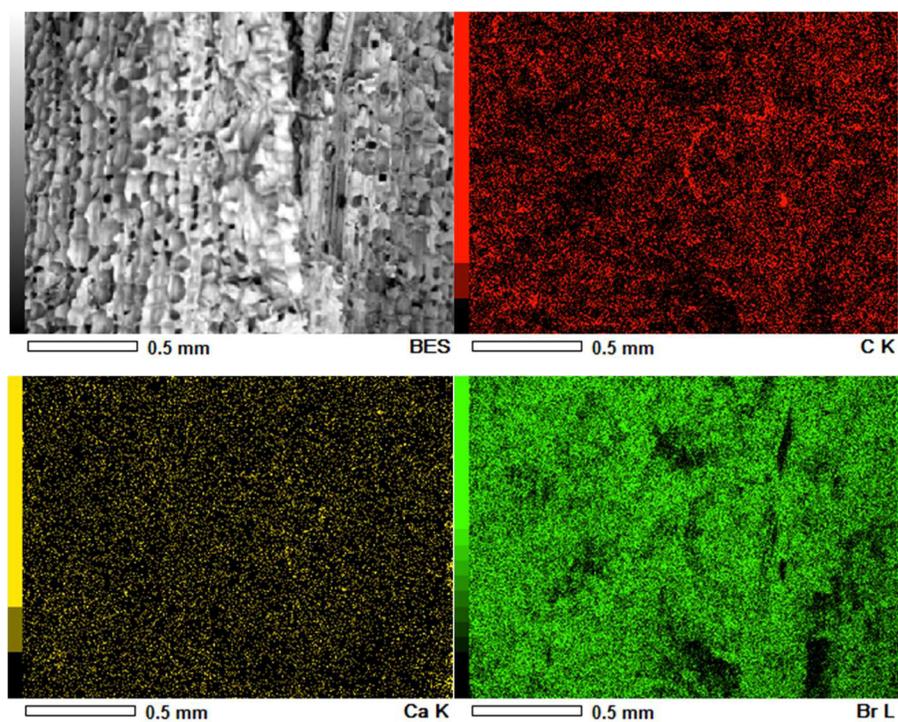


Figura 19. En (a) se ve la micrografía del material Li-2-3. En (b, c y d) se muestran las imágenes obtenidas por EDS para C, Ca, Br, respectivamente.

3.2.3. Prueba de azúcares reductores totales

En la Tabla 11 se observa el porcentaje de hidratos para los adsorbentes modificados a los niveles más bajos y más altos del diseño de experimentos. En todos los casos la solución de impregnación muestra un bajo contenido de azúcares, con un máximo de 0.156 g/L que representa un 0.27% peso de hidratos del rastrojo de sorgo. Este valor de hidratos es muy bajo comparado con los procesos químicos y enzimáticos de hidratos para materiales lignocelulósicos, que pueden obtener valores del 5 al 37% y del 11 al 58%, dependiendo de la composición de la biomasa [42].

Por lo anterior se puede decir que no existe un efecto de hidratos en las muestras debido al proceso de impregnación utilizado.

El porcentaje de hidratos para el material Ca-3-3 no fue obtenido debido a la presencia de un precipitado que evita la medición de la absorbancia por medio del espectrofotómetro de rayos UV.

Tabla 11. Contenido de azúcares reductores totales en las soluciones salinas posterior a la impregnación del material.

	Azúcares reductores totales (g/L)	Desviación estándar	Hidratos % peso
Ca-1-1	0.111	0.009	0.20
Ca-1-2	0.108	0.010	0.19
Ca-3-3	-	-	ND
Li-1-1	0.104	0.010	0.19
Li-2-2	0.149	0.008	0.27
Li-3-3	0.156	0.008	0.28

3.2.4. Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico se realizó desde temperatura ambiente hasta 700°C en atmósfera de nitrógeno, se utilizó una rampa de calentamiento de 10°C/min.

Los resultados en atmósfera de nitrógeno muestran una pérdida de humedad que concluye a mayor temperatura para las modificaciones que el RSMP. En los sistemas de refrigeración solar por adsorción, la temperatura máxima de operación es aproximadamente 120°C, por lo que el rastro de sorgo modificado mostraría estabilidad térmica a temperaturas menores a 200 °C de acuerdo con el análisis termogravimétrico realizado.

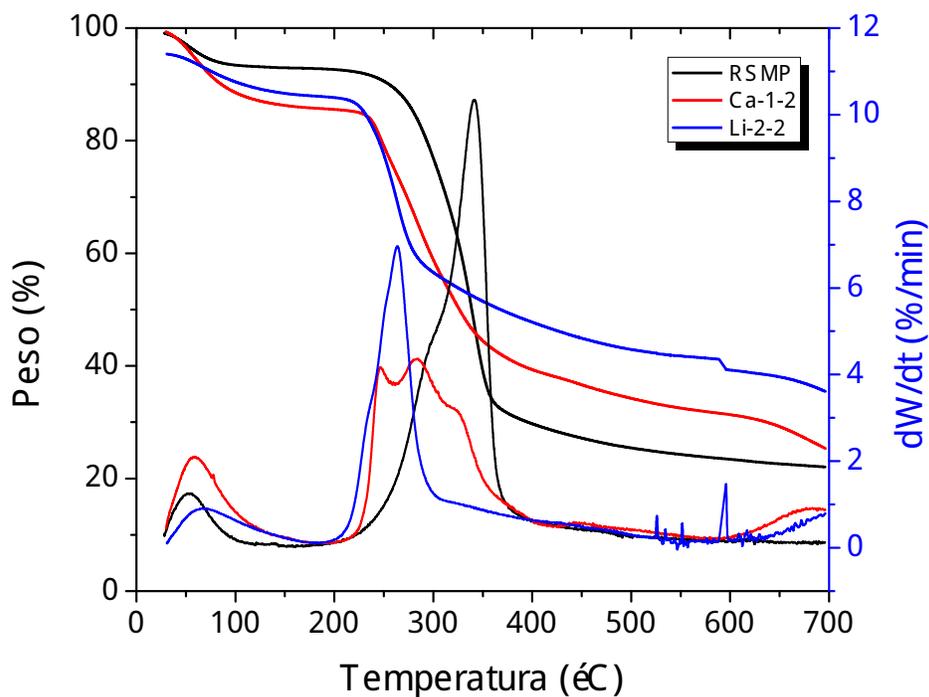


Figura 20. Análisis termogravimétrico del rastrojo de sorgo modificado en atmósfera de nitrógeno.

3.3. Determinación de capacidad de adsorción

La capacidad de adsorción de metanol fue estimada siguiendo el diseño de experimentos, utilizando 4 g de adsorbente y un tiempo de contacto 2 horas. La lista de pruebas requeridas y el orden establecido por el software es el que se muestra en la Tabla 26, en el apéndice B.

La presión relativa se define como la presión del sistema con respecto a la presión de saturación del vapor a la temperatura del sistema, la presión de saturación se calcula mediante la ecuación de Antoine.

La validación de la presión relativa es relevante para detectar la posibilidad de condensación del vapor en caso de encontrarse por encima de 1, lo que invalida la prueba, así como para confirmar la repetibilidad de las condiciones de prueba. Respecto a esto último cabe mencionar que se obtuvieron variaciones al no ser un control automático, para esto se obtuvieron valores promedio con su desviación estándar de los dos momentos de preparación de la prueba.

Posterior a la preparación del sistema (vacío del sistema), se registraron los valores de las temperaturas de las cámaras de adsorción y dosificación, y de los baños, también las presiones en la cámara de dosificación y de evaporación. En la Tabla 12 se muestran los valores promedio y sus desviaciones estándar.

Así mismo se registraron las condiciones previas al inicio del contacto con el adsorbente, que se muestran en la

Tabla 13.

Tabla 12. Análisis de condiciones posterior al vacío.

Localización	U.M.	Promedio	Desviación estándar
Presión cámara dosificadora	kPa	-94.0	2.2
Temperatura cámara dosificadora	°C	23.5	1.1
Presión cámara evaporadora	kPa	-77.1	4.5
Temperatura bajo cámara dosificadora	°C	36.7	2.4
Temperatura bajo cámara evaporadora	°C	35.1	4.1
Presión relativa cámara evaporadora	-	0.888	0.120

Tabla 13. Análisis de condiciones en la cámara dosificadora previo al contacto con el adsorbente.

Localización	U.M.	Promedio	Desviación estándar
Presión cámara dosificadora	kPa	-80.9	2.3
Temperatura cámara dosificadora	°C	23.7	1.1
Temperatura bajo cámara dosificadora	°C	36.8	2.8
Presión relativa cámara dosificadora	-	21.3	2.3
Masa de metanol ingresada	mol	0.7	0.1

Con los valores registrados de presión y temperaturas al ingresar el vapor a la cámara dosificadora, y los valores finales de presión y temperatura al finalizar el tiempo de prueba, se procedió a calcular las masas iniciales y finales por medio de la ecuación de gases ideales. La capacidad adsorción fue estimada como la diferencia entre la masa inicial y la masa final para cada adsorbente.

Se analizaron los datos mediante el software Design Expert ÷ v.7.0.0, para determinar los factores que afectan significativamente a la variable de respuesta.

Se seleccionó un modelo lineal para realizar el análisis de varianza ya que no se presenta curvatura. Los resultados obtenidos indicaron que tanto la concentración de la sal como el tipo de sal tienen influencia positiva en la capacidad de adsorción, mientras que el tiempo de impregnación no tiene influencia significativa en la respuesta del diseño (Tabla 14).

A partir de los resultados de capacidad de adsorción se seleccionaron dos materiales para continuar el estudio detallado de la isoterma de adsorción, el análisis de ciclo de vida y el coeficiente de eficiencia. Los materiales seleccionados fueron Ca-1-2 y Li-2-2, los cuales presentan la más alta capacidad de adsorción de metanol (19 mg/g y 21 mg/g, respectivamente).

Tabla 14. ANOVA para la superficie de respuesta del modelo lineal.

Factor	Suma de cuadrados	df	Cuadrado promedio	Valor de F	Prob > F	
Modelo	0.4105	3	0.1368	4.1872	0.012	Significativo
A - Concentración	0.1892	1	0.1892	5.7891	0.021	Significativo
B - Tiempo	0.0022	1	0.0022	0.0682	0.795	No significativo
C - Tipo de sal	0.2191	1	0.2191	6.7042	0.014	Significativo
Residuales	1.2418	38	0.0327			
Falta de ajuste	0.4297	14	0.0307	0.9070	0.563	No significativo
Error puro	0.8121	24	0.0338			
Cor Total	1.6523	41				

3.4. Isotermas al equilibrio

Las isotermas para los materiales seleccionados según su capacidad de adsorción fueron obtenidas por el procedimiento descrito en la sección 2.5. En la Tabla 15 se condensa las características de los lechos de adsorción utilizados para cada adsorbente. Esta prueba se realizó para ambos adsorbatos, metanol y agua en el rastrojo de sorgo sin modificar (RSMP), las modificaciones con sales higroscópicas Ca-1-2 y Li-2-2, y carbón activado granular marca Jalmek (CAG).

En la Figura 21 se muestra los puntos experimentales para la adsorción de metanol de cada adsorbente, fueron realizados a temperatura ambiente (RSMP: 26°C, Ca-1-2: 25°C, Li-2-2: 34°C, CAG: 26°C). Se hizo el ajuste matemático de los parámetros con los modelos de Dubinin-Astakhov (D-A) y Langmuir, las curvas se muestran en la misma figura. En la Tabla 16 se presentan los parámetros de ajuste considerados para cada material. El modelo de D-A es el que mejor se ajusta a los datos experimentales, de acuerdo con los valores de SEC (suma del error al cuadrado).

Tabla 15. Características del lecho utilizado para la obtención de las isotermas de adsorción por termogravimetría.

Longitud del lecho	10	cm
Diámetro del lecho	1	cm
Peso del adsorbente		
RSMP	0.998	g
Ca-1-2	0.750	g
Li-2-2	0.932	g
CAG	2.213	g

Tabla 16. Parámetros de los modelos de isothermas de adsorción de metanol.

Mat.	Dubinin-Astakhov				Langmuir			
	q_s g/g	E_{ads} (J/mol)	n	SEC	q_{sat} (g/g)	b_0 (1/kPa)	$-VH$ (kJ/mol)	SEC
RSMP	0.166	5044	2.51	0.32	0.257	1.33E-04	17500	0.81
Ca-1-2	0.745	4430	2.17	9.60	1.118	2.68E-04	15500	18.63
Li-2-2	0.726	2450	0.90	2.51	9.308	3.40E-05	11400	3.34
CAG	0.494	4889	1.21	0.34	0.466	7.01E-07	32460	2.97

En las isothermas de adsorción para los materiales modificados no fue posible observar un plateau cerca de la presión de saturación del metanol a estas temperaturas, debido a la condensación en los poros del material que continúa sucediendo a altas presiones relativas [7,19].

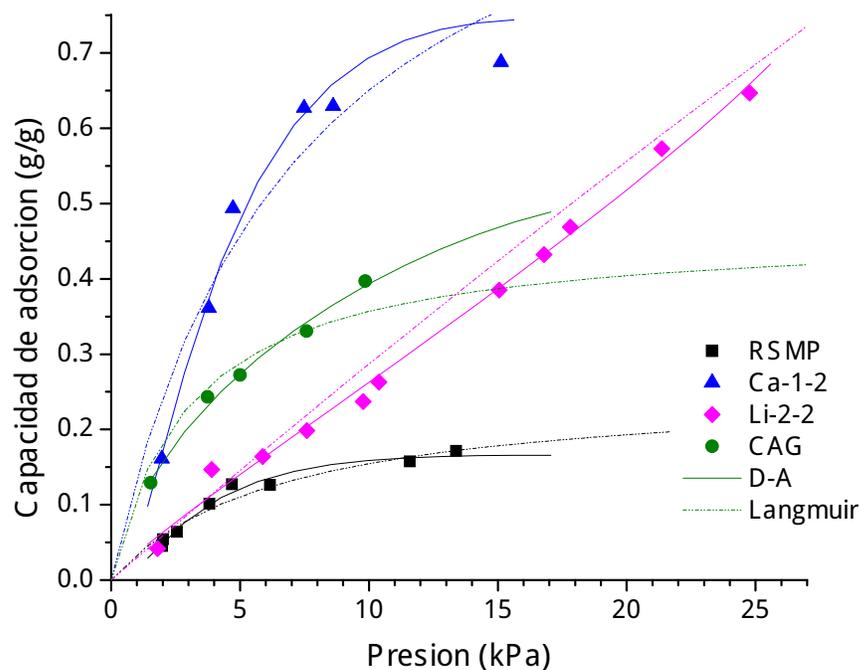


Figura 21. Isothermas de adsorción de metanol en los adsorbentes estudiados a temperatura ambiente. Se ajustaron 2 modelos: Dubinin-Astakhov y Langmuir.

En la Figura 22 se muestra los puntos experimentales para la adsorción de agua en los distintos adsorbentes, las cuales fueron realizadas a temperatura ambiente (RSMP: 27°C, Ca-1-2: 26°C, Li-2-2: 29°C, CAG: 27°C). De igual manera se hizo el ajuste con los modelos de isothermas de D-A y Langmuir, que se muestran en la misma figura y en la Tabla 17 se presentan los parámetros de ajuste considerados para cada material. De manera similar a la adsorción de metanol, el modelo de D-A mostró los menores valores de SEC en la adsorción de agua para todos los materiales estudiados.

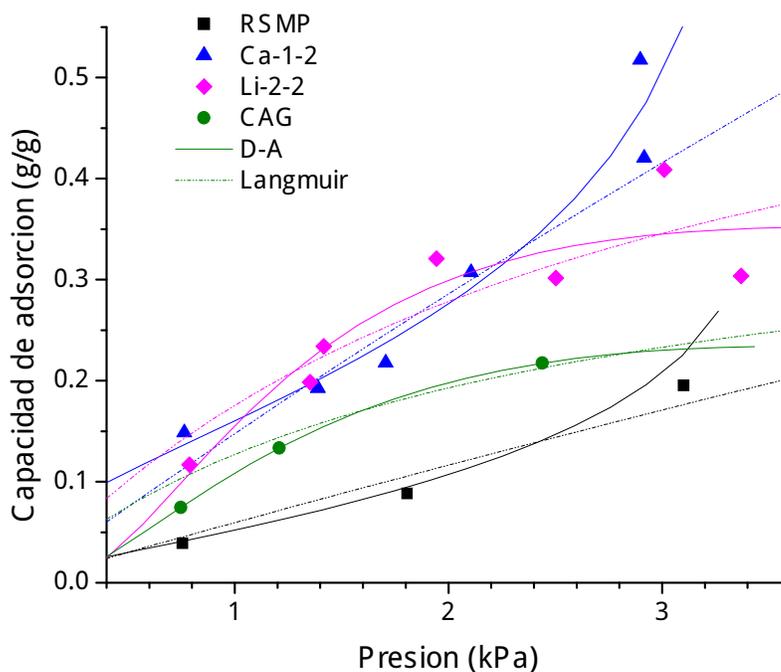


Figura 22. Isothermas de adsorción de agua en los adsorbentes estudiados a temperatura ambiente. Se ajustaron 2 modelos: Dubinin-Astakhov y Langmuir.

Se observa un cambio de concavo a convexo en las curvas Ca-1-2 y RSMP para el modelo D-A ($n < 1$), esto puede deberse a la mayor participación de los macroporos en la adsorción y que no logran saturarse aún a altas presiones relativas, como lo explica Wang y colaboradores [15].

Tabla 17. Parámetros de los modelos de isothermas de adsorción de agua.

Mat.	Dubinin-Astakhov				Langmuir			
	q_s g/g	E_{ads} (J/mol)	n	SEC	q_{sat} (g/g)	b_0 (1/kPa)	$-VH$ (kJ/mol)	SEC
RSMP	0.328	1055	0.58	0.00	2.700	2.03E-05	17500	0.69
Ca-1-2	0.987	717	0.42	6.16	4.538	6.61E-05	15500	2.39
Li-2-2	0.352	3788	2.32	8.32	0.669	3.81E-03	11400	11.41
CAG	0.234	3623	1.93	0.00	0.400	1.00E-06	32460	0.82

3.5. Coeficiente de eficiencia

En la Tabla 18 se muestran los valores utilizados para el cálculo del COP de los pares de trabajo propuestos con el metanol como adsorbato.

Para el COP se encontró que los pares de trabajo relacionados con el agua como adsorbato tienen mayores valores, esto debido a la mayor capacidad calorífica del mismo, que es capaz de compensar la menor capacidad de adsorción que presentan los adsorbentes respecto a este adsorbato.

Tabla 18. Cálculo del COP y parámetros utilizados para cada par de trabajo.

	Unidad	Metanol			Agua		
		CAG	Ca-1-2	Li-2-2	CAG	Ca-1-2	Li-2-2
Entalpia	kg	0.32	0.58	0.19	0.12	0.17	0.19
Entalpia	kJ /Kg éC	22.545			4.186		
Entalpia	kJ /kg	32.46	15.5	11.4	32.46	15.5	11.4
Temperatura	K	8			8		
Entalpia	kJ /kg	1400			2591		
Entalpia	kJ /kg	1100			2257		
COP	-	0.654	0.684	0.670	0.780	0.830	0.841

El poder calorífico del adsorbente tiene una relación inversa con respecto al COP, es decir que entre menor poder calorífico tenga el material beneficiará al coeficiente de eficiencia, ya que el sistema requiere menor calor para aumentar la temperatura del adsorbente a la de evaporación del adsorbato.

El par de trabajo Li-2-2/agua es el que tiene un mejor valor teórico de COP, esto es debido a las mejores propiedades caloríficas del agua y a la relativamente alta capacidad de adsorción en este material respecto al CAG y Ca-1-2.

3.6. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

De los pares de trabajo propuestos en este trabajo se eligieron los modificados con cloruro de calcio debido a que los coeficientes de eficiencia calculados son muy similares entre sí, y éstos presentaron mayor capacidad de adsorción a bajas presiones para ambos adsorbatos.

3.6.1. Inventario

En la Tabla 19 y 20 se presentan los inventarios para los sistemas operados con el adsorbente Ca-1-2 y carbón activado granular (CAG), respectivamente. En ambos casos se considera la operación con metanol como adsorbato.

Para el transporte del sorgo se incluye un requerimiento de 1.5 kg de rastrojo para obtener 1 kg del rastrojo modificado, una distancia de 290 km desde Tamaulipas hasta San Nicolás de los Garza, Nuevo León, utilizando un vehículo de carga pesada con capacidad de hasta 22 toneladas.

El rastrojo de sorgo es considerado como un residuo, por lo que su factor de asignación es cero con respecto al cultivo del sorgo semilla, es decir que los impactos ambientales no se consideran para el rastrojo ya que el producto de

interés es la semilla de sorgo. Esto se deriva de entrevistas telefónicas con representantes comerciales de sectores agrícolas donde se confirmó que no se comercializa el rastrojo de sorgo (INIFAP Laguna y Tresagro Comercialización, comunicación personal, 2 octubre 2017).

Para el corte se considera una picadora para ensilaje eléctrica marca Penagos, modelo PE-800, cuenta con un motor de 8.75 HP y un rendimiento promedio de corte de 4,000 kg/h. Se utiliza un tanque cilíndrico vertical con un agitador de turbina de 3 aspas para mantener la suspensión durante la etapa de impregnación con la sal, requiriendo un motor de 8.4 HP durante 24 horas. Para el secado se realizó un balance de masa, el cual resultó de magnitud comparable con el consumo energético de un horno industrial de secado marca Aingetherm.

Para el ACV del uso del CAG se tomó el inventario de la literatura sobre su fabricación [56] y se consideró la operación del sistema de refrigeración solar por adsorción.

Tabla 19. Inventario para la operación de un refrigerador solar por adsorción con la sal Ca-1-2.

Proceso	Cantidad	U.M.
Transporte		
De Tamaulipas a la UANL	0.435	tkm
Lavado inicial del rastrojo		
Rastrojo de sorgo	0	kg
Agua potable	14.3	kg
Disminución de tamaño		
Electricidad de la cortadora (media tensión)	0.0016	kWh
Impregnación con la sal		
Electricidad para mezclado (media tensión)	0.588	kWh

Agua desionizada	9	kg
Cloruro de calcio anhidro	1.28	kg
Lavados con agua desionizada		
Agua desionizada	25	kg
Secado del rastrojo modificado		
Electricidad para el horno (media tensión)	0.35	kWh
Operación del sistema		
Metanol	0.45	kg

Tabla 20. Inventario para la operación de un refrigerador solar por adsorpci n con carbón activado granular (CAG) [56].

Proceso	Cantidad	U.M.
Transporte		
De la planta a la UANL	0.435	tkm
Producción del carbón activado		
Carbón mineral	1	kg
Combustión de carbón	60.8	MJ
Combustión de gas natural	13.2	MJ
Agua desionizada	12	kg
Electricidad utilizada (media tensión)	1.6	kWh
Operación del sistema		
Metanol	0.3	kg

3.6.2. Evaluación del impacto e interpretación

La evaluación del impacto se realizó con el software SimaPro 8 utilizando los métodos ReCiPe Midpoint (H) y el ReCiPe Endpoint (H) se tomaron los datos disponibles de Ecoinvent para los insumos descritos anteriormente.

En la Figura 23 se presentan las 18 categorías de impacto para el sistema de refrigeración operado con el adsorbente Ca-1-2 por cada etapa del proceso, obtenidos por el método de Midpoint. Se muestra que la etapa que contribuye

más en 17 de las 18 categorías es la de impregnación. La alta contribución de esta etapa se debe a la obtención del cloruro de calcio por el método Solvay, el cual tiene una alta demanda calorífica, como se aprecia en la red para el cambio climático del proceso (Figura 24).

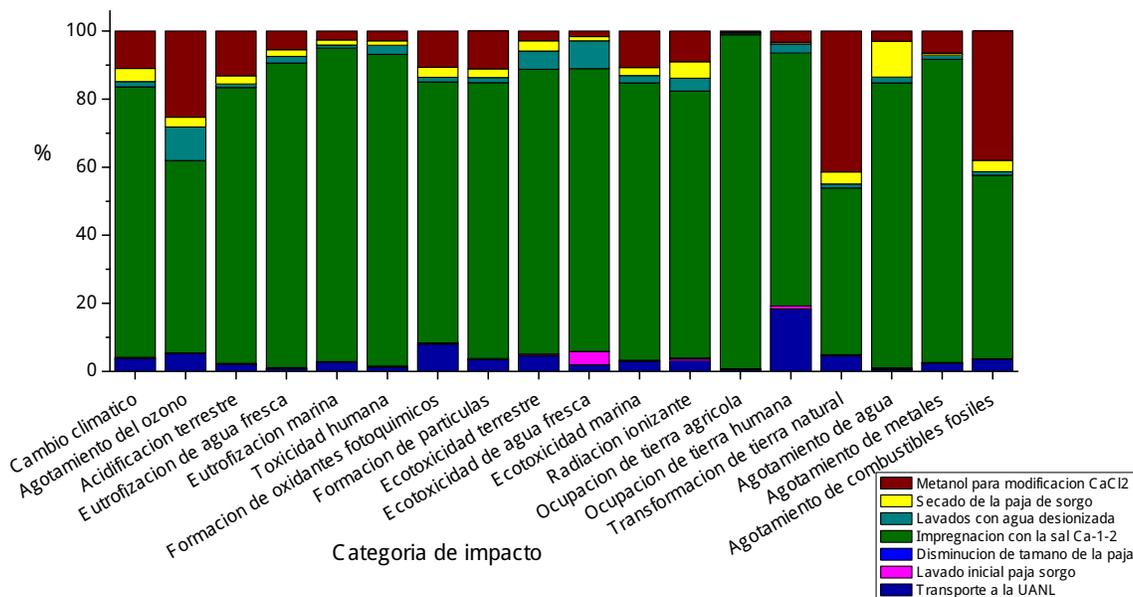


Figura 23. Contribución porcentual de cada etapa durante la modificación y uso de la modificación Ca-1-2 a partir del rastrojo de sorgo.

En la Figura 24 se muestra la red de la categoría de cambio climático para el escenario base del uso del adsorbente Ca-1-2, en el cual solo se visualizan a los contribuidores en más de un 10% en esta categoría.

En cuanto a la comparación de los impactos ambientales entre el material Ca-1-2 y el carbón activado granular (CAG), se muestra en la Tabla 21 las diferencias numéricas entre ambos materiales. Solo en 4 de las 18 categorías se encuentra que el uso del adsorbente Ca-1-2 es de mayor impacto, estos son: ecotoxicidad de agua fresca, ocupación de tierra agrícola, agotamiento de agua y agotamiento de metales. Más adelante se discutirán sus causas.

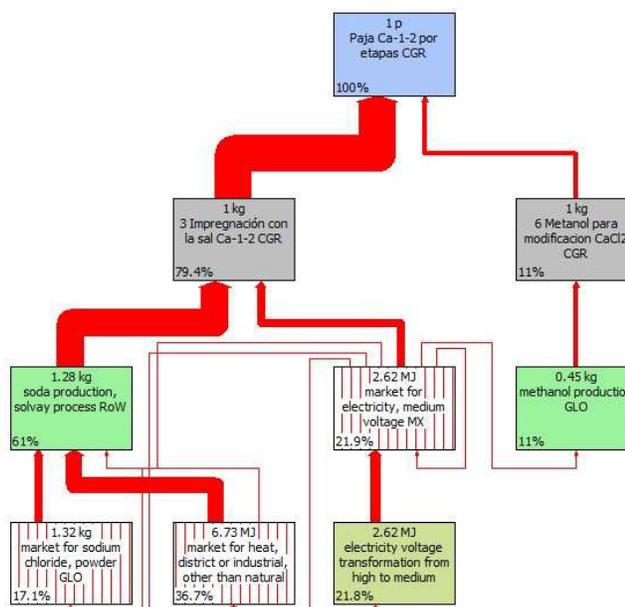


Figura 24. Red de la categoría de cambio climático para el uso del adsorbente Ca-1-2.

Tabla 21. Comparación de las categorías de impacto por el método Midpoint para carbón activado granular y Ca-1-2. Se muestra el porcentaje del impacto respecto al CAG.

Categoría de impacto	Unidad	CAG	Ca-1-2	
Cambio climático	kg CO ₂ eq	1.49E+01	2.21E+00	15%
Agotamiento del ozono	kg CFC ₁₁ eq	7.05E-07	1.11E-07	16%
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	7.44E-02	1.99E-02	27%
Eutrofización de agua fresca	kg P eq	5.32E-03	7.81E-04	15%
Eutrofización marina	kg N eq	1.90E-03	9.03E-04	47%
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	6.92E-01	2.28E-01	33%
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	7.70E-02	8.60E-03	11%
Formación de partículas	kg PM10 eq	3.09E-02	5.58E-03	18%
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	3.65E-04	1.58E-04	43%
Ecotoxicidad de agua fresca	kg 1,4-DB eq	2.61E-04	7.05E-04	270%
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	3.77E-03	3.66E-03	97%
Radiación ionizante	kBq U ²³⁵ eq	4.45E-01	2.02E-01	45%
Ocupación de tierra agrícola	m ² a	1.46E-01	2.06E-01	141%

Ocupación de tierra humana	m ² a	1.39E-01	2.60E-02	19%
Transformación de tierra natural	m ²	1.36E-03	5.46E-04	40%
Agotamiento de agua	m ³	8.83E+00	9.50E+00	108%
Agotamiento de metales	kg Fe eq	1.29E-01	1.68E-01	130%
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil eq	3.78E+00	8.32E-01	22%

Se ejecutó un análisis Endpoint que proporciona una indicación general del impacto que tiene cada uno de estos materiales a los ecosistemas, a la salud humana y al agotamiento de recursos. Los resultados siguen siendo favorecedores para el material Ca-1-2 (Figura 25). En la Tabla 22 se muestra el puntaje βnico calculado, donde el puntaje para el Ca-1-2 es solamente el 20% del puntaje para el CAG. Los puntos

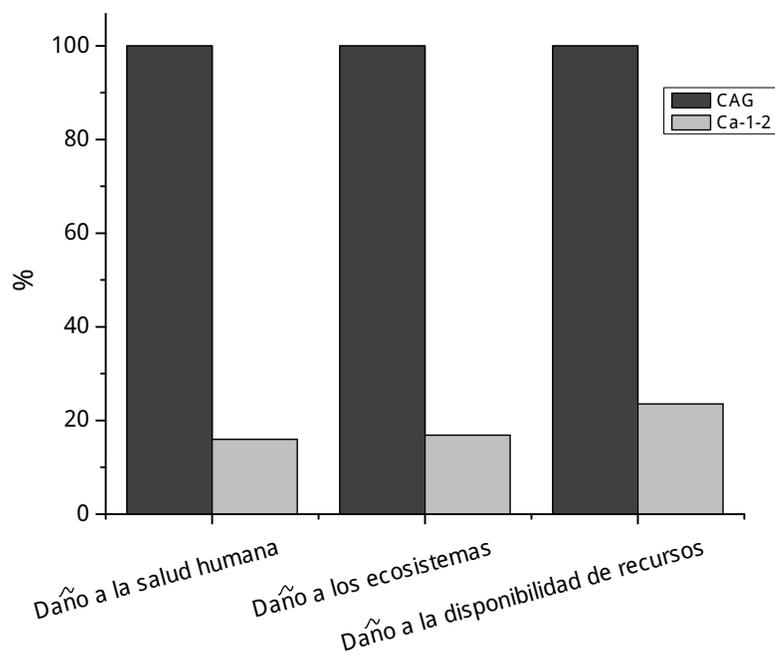


Figura 25. Comparativa por el método Endpoint del uso de los materiales CAG y Ca-1-2.

Tabla 22. Puntaje βnico por el método Endpoint para los materiales CAG y Ca-1-2.

Categoría de daño	Unidad	CAG	Ca-1-2	
Daño a la salud humana	Pt	0.653	0.105	16%
Daño a los ecosistemas	Pt	0.055	0.009	17%
Daño a la disponibilidad de recursos	Pt	0.777	0.183	24%
Total	Pt	1.484	0.297	20%

A continuación, se dan a conocer las principales contribuciones en cada una de las categorías de impacto donde el material Ca-1-2 fue mayor al del CAG. Primeramente, en el caso de ecotoxicidad de agua fresca la mayor contribución es la etapa de impregnación debido a la fabricación del cloruro de calcio (80%), el resto lo contribuye la demanda de electricidad y la producción del metanol. Respecto a la ocupación de tierra agrícola está relacionado de igual manera con la obtención del cloruro de calcio en un 97%. El indicador de agotamiento de agua es en un 78% debido al uso de la energía eléctrica en las etapas de impregnación y del secado, ya que en México se utiliza principalmente la generación hidroeléctrica en ríos. El agotamiento de metales para el adsorbente es causado por la construcción de la infraestructura de la producción de la sal higroscópica.

Debido a lo anterior, se ve necesario plantear un escenario donde se disminuya el uso de la sal, ya que, aunque el impacto del adsorbente Ca-1-2 es inferior al de CAG, se ha visto en la Tabla 10 que el contenido de sal en la solución posterior al proceso de impregnación es muy alto y por ende se puede proponer su reutilización; para esto se plantea un escenario donde se repone sólo el 10% de la solución con sal de nuevas fuentes, este porcentaje fue determinado como

punto de ejemplificaci3n de este escenario, se requiere m3s estudios para determinar el porcentaje 3ptimo a sustituir. A este escenario lo llamamos Ca-1-2 R, por la reutilizaci3n de la soluci3n.

Los resultados del an3lisis Midpoint se muestran en la Tabla 23. En la misma se ve una disminuci3n del impacto ambiental en todas las categor3as, resaltando que se reduce en gran parte el potencial de agotamiento de agua, combustibles f3siles, transformaci3n de tierra natural y agotamiento del ozono.

Tabla 23 Comparaci3n de las categor3as de impacto por el m3todo Midpoint para Ca-1-2 y Ca-1-2 R. Se muestra el porcentaje respecto al Ca-1-2.

Categor3a de impacto	Unidad	Ca-1-2	Ca-1-2 R	
Cambio clim3tico	kg CO ₂ eq	2.21E+00	9.82E-01	45%
Agotamiento del ozono	kg CFC ₁₁ eq	1.11E-07	6.81E-08	61%
Acidificaci3n terrestre	kg SO ₂ eq	1.99E-02	7.41E-03	37%
Eutrofizaci3n de agua fresca	kg P eq	7.81E-04	2.17E-04	28%
Eutrofizaci3n marina	kg N eq	9.03E-04	2.12E-04	23%
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	2.28E-01	5.28E-02	23%
Formaci3n de oxidantes fotoqu3micos	kg NMVOC	8.60E-03	3.75E-03	44%
Formaci3n de part3culas	kg PM10 eq	5.58E-03	2.10E-03	38%
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	1.58E-04	5.90E-05	37%
Ecotoxicidad de agua fresca	kg 1,4-DB eq	7.05E-04	2.14E-04	30%
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	3.66E-03	1.34E-03	37%
Radiaci3n ionizante	kBq U ²³⁵ eq	2.02E-01	1.00E-01	50%
Ocupaci3n de tierra agr3cola	m ² a	2.06E-01	2.55E-02	12%
Ocupaci3n de tierra humana	m ² a	2.60E-02	9.25E-03	36%
Transformaci3n de tierra natural	m ²	5.46E-04	3.88E-04	71%
Agotamiento de agua	m ³	9.50E+00	6.55E+00	69%
Agotamiento de metales	kg Fe eq	1.68E-01	3.74E-02	22%
Agotamiento de combustibles f3siles	kg oil eq	8.32E-01	5.45E-01	66%

En cuanto al análisis Endpoint se muestra en la Figura 26 la comparativa de puntuación única obtenidos para cada escenario. Donde se aprecia que el impacto ambiental disminuye en un 45% respecto al material Ca-1-2 y un 89% respecto al uso del CAG. Se incluye un escenario del uso de agua potable en lugar de agua desionizada, el cual presenta una disminución de 2% del total del impacto cuantificado respecto al escenario Ca-1-2 R.

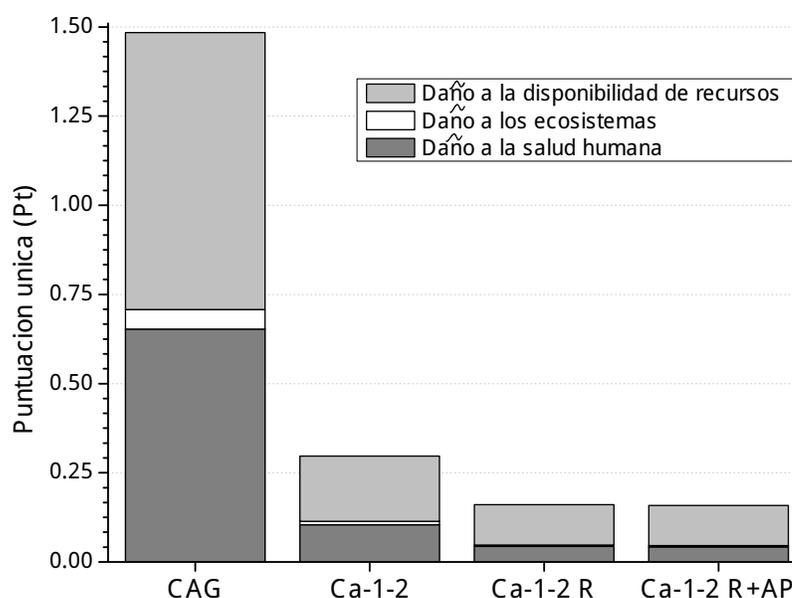


Figura 26. Comparativa de los resultados Endpoint para el CAG, y 3 escenarios del Ca-1-2.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta tesis se modificó el rastrojo de sorgo, un residuo lignocelulósico, por vía de impregnación en solución de sales higroscópicas con el fin de aumentar su capacidad de adsorción de agua y metanol, y se evaluó su coeficiente de eficiencia potencial de manera teórica.

La modificación con sales de cloruro de calcio y bromuro de litio se comprobó por las técnicas de FRX donde se observa tanto la presencia de la sal por un aumento en el contenido de Ca o de Br, y por SEM-EDS donde se visualiza la distribución homogénea de la misma en la superficie del material.

Mediante el diseño de experimentos se confirmó que los factores significativos en la capacidad de adsorción de metanol son la concentración de sal (5, 12.5 o 20%) en la solución y el tipo de sal (cloruro de calcio o bromuro de litio), mientras que el tiempo de impregnación no fue significativo para las variaciones de capacidad de adsorción observadas.

Las isothermas al equilibrio para los pares de trabajo Ca-1-2-metanol, Ca-1-2-agua, Li-2-2-metanol, Li-2-2-agua, se lograron modelar matemáticamente con la ecuación de Dubinin-Astakhov, con una suma de errores al cuadrado (SEC) de 9.6, 6.16, 2.51 y 8.32, respectivamente.

Los COP calculados del carbón activado granular como el de los materiales Ca-1-2 y Li-2-2, fueron similares entre sí, para cada uno de los adsorbatos, presentando solamente una variación del 7% para el agua y 4% para el metanol.

Logrando así el objetivo de obtener COP similares para las modificaciones con respecto a los del carbón activado granular.

Por otra parte, el impacto ambiental calculado por la metodología de análisis de ciclo de vida, ReCiPe 2008 demostró que la modificación Ca-1-2 tiene menor impacto ambiental que el CAG en un 80% en la puntuación final. También se planteó un escenario de reutilización de solución con sales, debido al alto contenido de las mismas al finalizar el proceso de impregnación, lo que disminuyó en un 46% la puntuación final con respecto al escenario base de Ca-1-2.

Los materiales lignocelulósicos modificados con sales higroscópicas presentan buenas propiedades, en cuanto a capacidad de adsorción y coeficiente de eficiencia potencial, comparado con el carbón activado granular para su aplicación en sistemas de refrigeración solar por adsorción.

Por el alto contenido de sales al final del proceso de impregnación se puede analizar la posibilidad de trabajar con menores concentraciones durante el proceso, así como analizar la eficiencia del escenario de reutilización de solución con sales para la impregnación del rastrojo de sorgo.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Z. Tamainot-Telto, S.J. Metcalf, R.E. Critoph, Y. Zhong, R. Thorpe, Carbon-ammonia pairs for adsorption refrigeration applications: ice making, air conditioning and heat pumping, *Int. J. Refrig.* 32 (2009) 1212-1229. doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.01.008.
- [2] I. International Institute of Refrigeration, The Role of Refrigeration in the Global Economy, *Inf. Note Refrig. Technol.* 1. 29 (2015). http://www.iifir.org/userfiles/file/publications/notes/NoteTech_29_EN.pdf.
- [3] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Regiones Socioeconómicas de México, 2004. http://sc.inegi.gob.mx/niveles/datosnbi/reg_soc_mexico.pdf.
- [4] M.S. Fernandes, G.J.V.N. Brites, J.J. Costa, A.R. Gaspar, V.A.F. Costa, Review and future trends of solar adsorption refrigeration systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39 (2014) 102-123. doi:10.1016/j.rser.2014.07.081.
- [5] A. Allouhi, T. Kousksou, A. Jamil, T. El Rhafiki, Y. Mourad, Y. Zeraouli, Optimal working pairs for solar adsorption cooling applications, *Energy.* 79 (2015) 235-247. doi:10.1016/j.energy.2014.11.010.
- [6] H.Z. Hassan, A.A. Mohamad, Y. Alyousef, H.A. Al-Ansary, A review on the equations of state for the working pairs used in adsorption cooling systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 45 (2015) 600-609. doi:10.1016/j.rser.2015.02.008.
- [7] V. Brancato, A. Frazzica, A. Sapienza, L. Gordeeva, A. Freni, Ethanol adsorption onto carbonaceous and composite adsorbents for adsorptive cooling system, *Energy.* 84 (2015) 177-185. doi:10.1016/j.energy.2015.02.077.
- [8] SolarGIS, SolarGIS © 2016 GeoModel Solar, (2016). <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI> (consultado el 5 de abril de 2016).
- [9] R. Harrington, RANKE D: The top 10 solar energy countries in the world - Business Insider, *Bus. Insid.* (2016). <http://www.businessinsider.com/best-solar-power-countries-2016-3> (consultado el 23 de octubre de 2017).
- [10] A. Vázquez-Izquierdo, F. Guevara-Hernández, H. Castro-Gómez, J. Ovando-Cruz, J.

- Hellin, J.A. Espinosa-García, et al., Rastrojos: Manejo, uso y mercado en el centro y sur de México., 2013.
- [11] S. Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario rural forestal y pesquero, Panorama del Sorgo El sorgo representa el grano forrajero con mayor ingrediente en la formulación de alimentos balanceados en el sector pecuario . La superficie millones de hectáreas en los últimos diez años , con 8 millones de toneladas , principalmente, (2014).
- [12] D. de investigación y evaluación económica y Sectorial, Panorama Agroalimentario. Sorgo 2016, (2016) 0-34.
- [13] P.J. Westgate, M.R. Ladisch, Sorption of organics and water on starch, *Ind. Eng. Chem. Res.* 32 (1993) 1676-1680. doi:10.1021/ie00020a020.
- [14] X. Guo, Y. Qing, Y. Wu, Q. Wu, Molecular association of adsorbed water with lignocellulosic materials examined by micro-FTIR spectroscopy., *Int. J. Biol. Macromol.* 83 (2016) 117-25. doi:10.1016/j.ijbiomac.2015.11.047.
- [15] R. Wang, L. Wang, J. Wu, *Adsorption Refrigeration Technology*, John Wiley & Sons, Ltd, 2014. doi:10.1002/14356007.b03.
- [16] L.G. Gordeeva, A. Freni, G. Restuccia, Y.I. Aristov, Influence of characteristics of methanol sorbents `salts in mesoporous silica_ on the performance of adsorptive air conditioning cycle, *Ind. Eng. Chem. Res.* 46 (2007) 2747-2752. doi:10.1021/ie060666n.
- [17] Y.I. Aristov, New family of solid sorbents for adsorptive cooling: Material scientist approach, *J. Eng. Thermophys.* 16 (2007) 63-72. doi:10.1134/S1810232807020026.
- [18] A.A. Askalany, M. Salem, I.M. Ismail, A.H.H. Ali, M.G. Morsy, A review on adsorption cooling systems with adsorbent carbon, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 493-500. doi:10.1016/j.rser.2011.08.013.
- [19] I.I. El-Sharkawy, K. Kuwahara, B.B. Saha, S. Koyama, K.C. Ng, Experimental investigation of activated carbon fibers/ethanol pairs for adsorption cooling system application, *Appl. Therm. Eng.* 26 (2006) 859-865. doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.10.010.
- [20] I.I. El-Sharkawy, B.B. Saha, S. Koyama, J. He, K.C. Ng, C. Yap, Experimental investigation on activated carbon-ethanol pair for solar powered adsorption cooling applications, *Int. J. Refrig.* 31 (2008) 1407-1413. doi:10.1016/j.ijrefrig.2008.03.012.

- [21] N.H. Abu-Hamdeh, K.A. Alnefaie, K.H. Almitani, Design and performance characteristics of solar adsorption refrigeration system using parabolic trough collector: Experimental and statistical optimization technique, *Energy Convers. Manag.* 74 (2013) 162–170. doi:10.1016/j.enconman.2013.04.043.
- [22] K. Habib, B.B. Saha, S. Koyama, Study of various adsorbent-refrigerant pairs for the application of solar driven adsorption cooling in tropical climates, *Appl. Therm. Eng.* 72 (2014) 266–274. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.05.102.
- [23] H.Z. Hassan, A.A. Mohamad, Thermodynamic analysis and theoretical study of a continuous operation solar-powered adsorption refrigeration system, *Energy*. 61 (2013) 167–178. doi:10.1016/j.energy.2013.09.004.
- [24] J.W. Wu, L. Chen, E.J. Hu, Performance estimation of adsorption cooling cycle with sorption hysteresis, *Appl. Therm. Eng.* 105 (2016) 159–162. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.05.154.
- [25] I.I. El-Sharkawy, M. Hassan, B.B. Saha, S. Koyama, M.M. Nasr, Study on adsorption of methanol onto carbon based adsorbents, *Int. J. Refrig.* 32 (2009) 1579–1586. doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.06.011.
- [26] D.D. Do, H.D. Do, A model for water adsorption in activated carbon, *Carbon N. Y.* 38 (2000) 767–773. doi:10.1016/S0008-6223(99)00159-1.
- [27] C.Y. Tso, C.Y.H. Chao, Activated carbon, silica-gel and calcium chloride composite adsorbents for energy efficient solar adsorption cooling and dehumidification systems, *Int. J. Refrig.* 35 (2012) 1626–1638. doi:10.1016/j.ijrefrig.2012.05.007.
- [28] B. Mette, H. Kerskes, H. Dræck, H. Møller-S teinhagen, Experimental and numerical investigations on the water vapor adsorption isotherms and kinetics of binderless zeolite 13X, *Int. J. Heat Mass Transf.* 71 (2014) 555–561. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.12.061.
- [29] L.Q. Zhu, Z.W. Gong, B.X. Ou, C.L. Wu, Performance Analysis of Four Types of Adsorbent Beds in a Double-Adsorber Adsorption Refrigerator, *Procedia Eng.* 121 (2015) 129–137. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.1039.
- [30] X. Zheng, T.S. Ge, R.Z. Wang, Recent progress on desiccant materials for solid desiccant cooling systems, *Energy*. 74 (2014) 280–294. doi:10.1016/j.energy.2014.07.027.
- [31] X. Bu, L. Wang, Y. Huang, Effect of pore size on the performance of composite adsorbent, *Adsorption*. 19 (2013) 929–935. doi:10.1007/s10450-013-9513-8.

- [32] I. Langmuir, The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum, *J. Am. Chem. Soc.* 40 (1918) 1361-1403. doi:10.1021/ja02242a004.
- [33] J. a. Delgado, V.I. Agueda, M. a. Uguina, J.L. Sotelo, A. Garc^oa, A. Garc^oa-Sanz, Air Regeneration of a Silicalite Column Loaded with E thanol: Modelling and Energy Estimation, *Adsorpt. Sci. Technol.* 30 (2012) 601-620. doi:10.1260/0263-6174.30.7.601.
- [34] B.H. Gebreslassie, G. Guillⁿ-Gos[@]bez, L. Jimⁿez, D. Boer, Solar assisted absorption cooling cycles for reduction of global warming: A multi-objective optimization approach, *Sol. Energy.* 86 (2012) 2083-2094. doi:10.1016/j.solener.2012.04.010.
- [35] C. Lamnatou, D. Chemisana, R. Mateus, M.G. Almeida, S.M. Silva, Review and perspectives on Life Cycle Analysis of solar technologies with emphasis on building-integrated solar thermal systems, *Renew. Energy.* 75 (2015) 833-846. doi:10.1016/j.renene.2014.09.057.
- [36] A. Cascini, M. Gamberi, C. Mora, M. Rosano, M. Bortolini, Comparative Carbon Footprint Assessment of commercial walk-in refrigeration systems under different use configurations, *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 3998-4011. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.075.
- [37] J. Shi, T. Li, H. Zhang, S. Peng, Z. Liu, Q. Jiang, Energy consummation and environmental emissions assessment of a refrigeration compressor based on life cycle assessment methodology, *Int. J. Life Cycle Assess.* 20 (2015) 947-956. doi:10.1007/s11367-015-0896-5.
- [38] G. Vareli, P.G. Demertzis, K. Akrida-Demertzi, Water and ethanol adsorption on starchy substrates as biomass separation systems, *Dev. Food Sci.* 37 (1995) 1187-1199. doi:10.1016/S0167-4501(06)80229-3.
- [39] B. Bakeer, I. Taha, H. El-Mously, S.A. Shehata, On the characterisation of structure and properties of sorghum stalks, *Ain Shams Eng. J.* 4 (2013) 265-271. doi:10.1016/j.asej.2012.08.001.
- [40] Calcium chloride anhydrous, BioReagent, suitable for insect cell culture, suitable for plant cell culture, $\geq 96.0\%$ | Sigma-Aldrich, (s/f). <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/c5670?lang=es®ion=MX> (consultado el 23 de octubre de 2017).
- [41] Lithium bromide, ReagentPlus[÷], $\geq 99\%$ | LiBr | Sigma-Aldrich, (s/f). <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigald/213225?lang=es®ion=M>

X (consultado el 23 de octubre de 2017).

- [42] C.B. Mendieta, Evaluación de pretratamientos térmicos de biomasa lignocelulósica de agave salmiana para la liberación de azúcares fermentables, 2014.
- [43] G.L. Miller, Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar, *Anal. Chem.* 31 (1959) 426-428. doi:10.1021/ac60147a030.
- [44] J.A. Delgado, V.I. Egueda, M.A. Uguina, J.L. Sotelo, A. García-Sanz, A. García, Separation of ethanol-water liquid mixtures by adsorption on BPL activated carbon with air regeneration, *Sep. Purif. Technol.* 149 (2015) 370-380. doi:10.1016/j.seppur.2015.06.011.
- [45] M. Li, H.B. Huang, R.Z. Wang, L.L. Wang, W.D. Cai, W.M. Yang, Experimental study on adsorbent of activated carbon with refrigerant of methanol and ethanol for solar ice maker, *Renew. Energy.* 29 (2004) 2235-2244. doi:10.1016/j.renene.2004.04.006.
- [46] R. Kannan, C. Selvagesan, M. Vignesh, B.R. Babu, M. Fuentes, M. Vivar, et al., Solar still with vapor adsorption basin: Performance analysis, *Renew. Energy.* 62 (2014) 258-264. doi:10.1016/j.renene.2013.07.018.
- [47] J.M. Rosas, J.M. Rosas, J. Bedia, Preparation of Hemp-Derived Activated Carbon Monoliths. Adsorption of Water Vapor, (2008). doi:10.1021/ie070924w.
- [48] N.E. Dávila-Guzmán, F. De Jesús Cerino-Cordova, E. Soto-Regalado, J.R. Rangel-Mendez, P.E. Díaz-Flores, M.T. Garza-Gonzalez, et al., Copper Biosorption by Spent Coffee Ground: Equilibrium, Kinetics, and Mechanism, *Clean - Soil, Air, Water.* 41 (2013) 557-564. doi:10.1002/clen.201200109.
- [49] M.N. Haque, G.M. Morrison, G. Perrusquía, M. Gutiérrez, A.F. Aguilera, I. Cano-Aguilera, et al., Characteristics of arsenic adsorption to sorghum biomass, *J. Hazard. Mater.* 145 (2007) 30-35. doi:10.1016/j.jhazmat.2006.10.080.
- [50] M. Salman, M. Athar, U. Farooq, S. Nazir, H. Nazir, Insight to rapid removal of Pb(II), Cd(II), and Cu(II) from aqueous solution using an agro-based adsorbent *Sorghum bicolor* L. biomass, *Desalin. Water Treat.* 51 (2013) 4390-4401. doi:10.1080/19443994.2012.749186.
- [51] K.K. Pandey, A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy, *J. Appl. Polym. Sci.* 71 (1999) 1969-1975. doi:10.1002/(sici)1097-4628(19990321)71:12<1969::aid-app6>3.3.co;2-4.
- [52] C. Li, G. Cheng, V. Balan, M.S. Kent, M. Ong, S.P.S. Chundawat, et al., Influence

- of physico-chemical changes on enzymatic digestibility of ionic liquid and AFEX pretreated corn stover, *Bioresour. Technol.* 102 (2011) 6928–6936. doi:10.1016/j.biortech.2011.04.005.
- [53] W.-H. Chen, Y.-J. Tu, H.-K. Sheen, Disruption of sugarcane bagasse lignocellulosic structure by means of dilute sulfuric acid pretreatment with microwave-assisted heating, *Appl. Energy*. 88 (2011) 2726–2734. doi:10.1016/j.apenergy.2011.02.027.
- [54] D.-W. Gao, Q. Hu, H. Pan, J. Jiang, P. Wang, High-capacity adsorption of aniline using surface modification of lignocellulose-biomass jute fibers, *Bioresour. Technol.* 193 (2015) 507–512. doi:10.1016/j.biortech.2015.06.138.
- [55] X. Li, H. Li, S. Huo, Z. Li, Dynamics and isotherms of water vapor sorption on mesoporous silica gels modified by different salts, *Kinet. Catal.* 51 (2010) 754–761. doi:10.1134/S0023158410050186.
- [56] X. Gabarrell, M. Font, T. Vicent, G. Caminal, M. Sarrà, P. Blázquez, A comparative life cycle assessment of two treatment technologies for the Grey Lanaset G textile dye: biodegradation by *Trametes versicolor* and granular activated carbon adsorption, *Int. J. Life Cycle Assess.* 17 (2012) 613–624. doi:10.1007/s11367-012-0385-z.
- [57] J. Arnoldsoon, Adsorption Chillers - uptake of ethanol on type RD silica gel, (2000) 1–2.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Cinthia Berenice García Reyes

Candidata para el grado de

Maestría en Ciencias con Orientación en Procesos Sustentables

Tesis: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE PARES DE TRABAJO PARA SU APLICACIÓN EN SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN SOLAR POR ADSORCIÓN: ESTUDIO DE EQUILIBRIO E IMPACTO AMBIENTAL.

Campo de estudio: Revalorización de residuos y gestión ambiental.

Biografía: Nació el 17 de diciembre de 1985 en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, sus padres son Martha Elva Reyes Rubalcava, Manuel Cristóbal García Muñoz, sus hermanos Juan Manuel, Cristóbal Enrique y Eduardo Daniel García Reyes, Evelin García Rojas.

Educación: egresada de la Universidad Autónoma de Nuevo León, de Ingeniero Mecánico Administrado en agosto 2008 con Mención Honorífica de Excelencia y un año de estudios (2005-2006) en la École nationale supérieure d'arts et métiers (ENSAM) en Burdeos, Francia.

Experiencia profesional: Ingeniero de proyectos de inversión en Ternium México (agosto 2008- enero 2016) participando en proyectos interdisciplinarios de laminación en frío, llegando a coordinar inversiones de 25 MUSD.

6. APÉNDICES

A. Procedimiento para el uso del equipo PVVC (presión variable-volumen constante) para medir la adsorción de un sólido en fase gas.

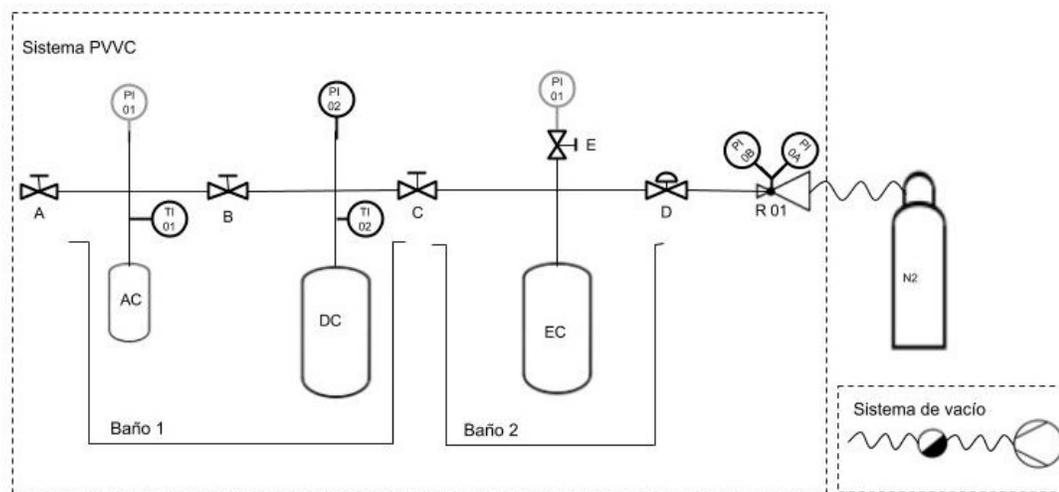


Figura 27. Diagrama de equipo PVVC utilizado.

i. Calibración del equipo

Para conocer los volúmenes del equipo, es decir, calibrar el equipo, se dividió en 3 zonas de medición, mostradas en la Figura 28. Se realizó por la vía líquida y posteriormente por la vía gas, de acuerdo al procedimiento [57].

La vía líquida consiste en introducir un volumen conocido de agua en cada uno de los tanques, lo cual se repitió 3 veces y se tomó en cuenta el promedio. Por otra parte, el volumen en las tuberías se estimó de manera dimensional, ya que debido al diámetro pequeño no era posible controlar la cantidad de agua que ingresaba a la tubería. En la

Tabla 24 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las zonas por esta v^oa.

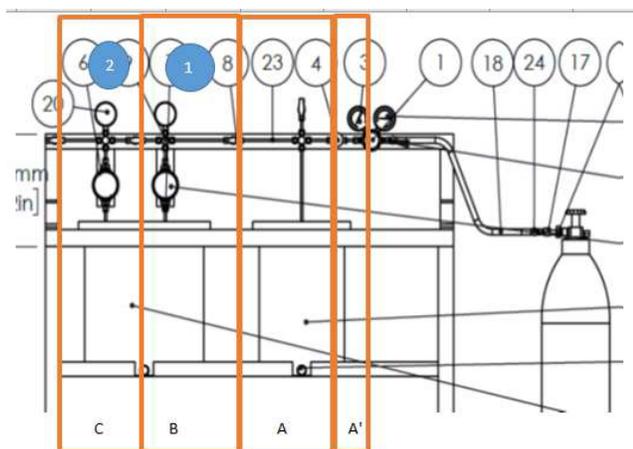


Figura 28. División de zonas para la calibración física del equipo.

Tabla 24. Datos de calibración de zonas v^oa h^omeda.

Zona	Tanque (ml)		Longitud (cm)	Diámetro interno (cm)	Volumen calculado (ml)	Volumen total (ml)
C	296.0	295.3	20.7	0.38	2.42	311.29
	295.0		14.8	0.38	1.73	
	294.9		15.0	0.48	2.74	
			11.1	1.02	9.09	
B	998.0	996.7	26.5	0.38	3.10	1013.33
	994.7		14.5	0.38	1.70	
	997.4		15.0	0.48	2.74	
			11.1	1.02	9.09	
A	1020.0	1018.2	36.5	0.38	4.27	1029.16
	1017.0		34.0	0.38	3.98	
	1017.5		15.0	0.48	2.74	
A'		NA	13.0	0.38	1.52	2.44
			5.0	0.48	0.91	

La calibración de un gas consiste en introducir un gas al sistema, en nuestro caso nitrógeno, medir la temperatura y presión y calcular el volumen con la ecuación de gases ideales. Para iniciar esta iteración se considera como correcto el volumen obtenido por la primera medición de la zona A. Se realizó 3 veces (Tabla 25).

Tabla 25. Datos de la calibración de un gas.

Punto de medición/ Zona de medición	UM	Valores iniciales	Zona A	Zona B	Zona C
Primer ensayo					
Regulador	kPa	-	36	-	-
Manómetro 1	kPa	-96	-	-31	-39
Termómetro 1	°C	21.0	-	21.0	21.0
Manómetro 2	kPa	-90	-	-	-36
Termómetro 2	°C	21.5	-	-	21.5
Volumen calculado	mL			970.75	253.46
Segundo ensayo					
Regulador	kPa	-	68	-	-
Manómetro 1	kPa	-96	-	-16	-25
Termómetro 1	°C	21.0	-	21.0	21.0
Manómetro 2	kPa	-90	-	-	-22
Termómetro 2	°C	21.5	-	-	21.5
Volumen calculado	mL			1005.27	237.46
Tercer ensayo					
Regulador	kPa	-	100	-	-
Manómetro 1	kPa	-96	-	2	-12
Termómetro 1	°C	21.0	-	21.0	21.0
Manómetro 2	kPa	-90	-	-	-8
Termómetro 2	°C	22.0	-	-	22.0
Volumen calculado	mL			970.22	310.70
Promedio	mL		1029.16	982.08	267.21

Una vez realizada la calibración por ambas vías se calculó el coeficiente de correlación de ambos métodos, obteniendo 0.9969, de esta manera se validaron los volúmenes a utilizar para los círculos de masa adsorbida durante el uso del equipo.

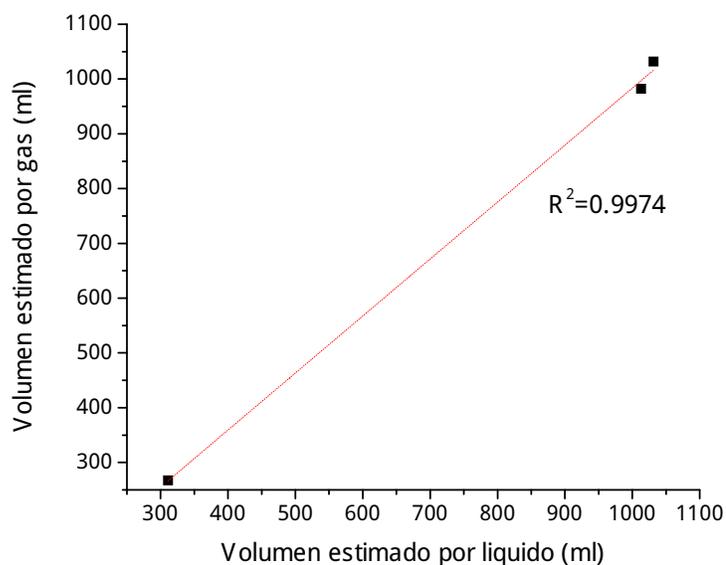


Figura 29. Correlación de los dos métodos de calibración del equipo.

ii. Indicaciones generales

Para armar, montar y desmontar mangueras, tanques e instrumentos se cuenta con dos llaves inglesas. Para asegurar el sello en la conexión no se debe de utilizar fuerza excesiva, ya que eso daña la rosca, con un apriete de 3 de vuelta después de llegar al tope es suficiente.

En esta prueba las mediciones son la clave para los círculos y resultados, por lo que se cuenta con un lente amplificador para leer los valores en las carátulas de manómetros y termómetros en el equipo. Los valores se deben de leer de frente a la carátula.

El adsorbente a utilizar debe haber sido previamente deshumidificado en un horno a 105°C durante 3 horas y almacenado en un recipiente hermético. Posterior a la prueba se debe de identificar correctamente y almacenar de manera separada al que no ha sido utilizado.

iii. Purga de equipo con nitrógeno

La purga de nitrógeno se debe realizar cada vez que se cambia de adsorbato en el sistema, o cada 2 pruebas con el mismo adsorbato.

1. Para realizar la purga del equipo, es importante que el sistema no contenga ningún material (sin líquido en EC ni muestra en AC). Para esto se puede desmontar EC durante la purga si se va a trabajar con el mismo adsorbato en la siguiente corrida.

2. Con la válvula D cerrada, se regula la presión del nitrógeno a aproximadamente 30 kPa en `PI0B_`

3. Se abre la válvula D. Se tendrán que tener abiertas las válvulas A, B y C.

4. Se deja el sistema purgando por 10 minutos. En caso de que se haya desmontado EC se tiene que bloquear la salida del nitrógeno por la apertura para asegurar que el nitrógeno limpia todo el sistema.

5. Una vez terminado el proceso se cierran las válvulas A, B, C y finalmente la válvula D.

6. Se instalan EC y AC con los materiales a utilizar para la prueba. La identificación del material, así como la cantidad de cada uno se debe de registrar en la bitácora.

iv. Baños de temperatura y aislamiento

Se tienen dos baños de temperatura, el baño 2 que corresponde a la cámara de evaporación (EC) tendrá que estar a la temperatura de evaporación requerida para el adsorbato.

Siempre el baño 1 tiene que estar mínimo 5°C por arriba del baño 2 para evitar condensación.

Los baños de agua se calientan mediante una resistencia eléctrica, la parte metálica debe estar completamente sumergida en el agua para evitar daños en la misma. Eventualmente se tendrá que mezclar el agua con un mezclador motorizado vertical para asegurar una temperatura homogénea. En un termómetro de mercurio se monitorea este proceso.

Las tuberías tienen que estar aisladas totalmente para evitar condensación por lo que se deberá verificar su estado cuando se inicia el calentamiento y corregir donde sea necesario.

Durante la prueba se debe registrar y controlar la temperatura del baño 1, en caso de que se baje más de la condición de operación (ver sección 6) se debe volver a calentar el agua con la resistencia y mezclar.

El aislamiento en los baños es para evitar una pérdida de calor muy pronunciada y en caso de hacer uso de altas temperaturas evitar quemaduras en las personas. Por lo que su estado debe ser verificado periódicamente.

v. Prueba de hermeticidad y generación de vacío

La prueba de hermeticidad se debe realizar al inicio de cada prueba de adsorción, o después de montar o desmontar un contenedor o instrumento. Ya

deben de estar los materiales en sus respectivos contenedores y la purga terminada (si se realizó)

a. Prueba de hermeticidad A

1. Con las válvulas C y D cerradas y EC montado se conecta la manguera del sistema de vacío en la válvula E. Se enciende la bomba de vacío y se abre la válvula E.

2. Ya encendida la bomba se debe verificar la ausencia de filtraciones en el filtro de la bomba o en la conexión de la misma (en caso de filtraciones se escucharía un soplido en esa zona).

3. Se deje encendida la bomba durante 15 minutos. Posteriormente se cierra la válvula E y después se apaga la bomba. El orden es muy importante para mantener la condición de vacío necesaria en el sistema.

4. Se desconecta la manguera de E y se coloca el manómetro PI01. Ya que est  conectado se abre y cierra la válvula E para ver la presión del sistema, se registra en la bitácora. Se debe validar que la presión est  dentro de los parámetros de operación. Y se vuelve a tomar 20 minutos después, si no hay variaciones se toma como exitosa la prueba de hermeticidad.

5. Si hubo variaciones se deberá de verificar las conexiones de EC, el cierre de válvulas y repetir la prueba.

b. Prueba de hermeticidad B y/o generación de vacío

1. Con las válvulas A, B y C cerradas y DC y AC montados se conecta la manguera del sistema de vacío en la válvula A. Se enciende la bomba de vacío y se abre la válvula A y B.

2. Ya encendida la bomba se debe verificar la ausencia de filtraciones en el filtro de la bomba o en la conexión de la misma (en caso de filtraciones se escucharía un soplido en esa zona).

3. Se deje encendida la bomba durante 15 minutos. Posteriormente se cierra la válvula A, y después se apaga la bomba. El orden es muy importante para mantener la condición de vacío necesaria en el sistema.

4. En el manómetro PI 02 se ve la presión del sistema, se registra en la bitácora. Y se vuelve a tomar 20 minutos después, si no hay variaciones se toma como exitosa la prueba de hermeticidad.

5. Si hubo variaciones se deberá verificar las conexiones de AC, DC, el cierre de válvulas y repetir la prueba.

vi. Pruebas de capacidad de adsorción

Ya con la prueba de hermeticidad A validada, los bazaros 1 y 2 a la temperatura indicada, deben de transcurrir al menos 2 horas para el equilibrio del adsorbato en fase gas dentro de EC; al inicio de este tiempo se debe de validar la condición de operación señalada para esta fase según el adsorbato con el que se trabaja.

Si no se purga el sistema y solamente se realiza la prueba de hermeticidad B, se debe validar que los bazaros 1 y 2 hayan estado a la temperatura indicada por al menos 2 horas antes de la prueba.

1. Se valida que estén cerradas las válvulas: A, B, C, D, y el manómetro colocado en E (solo se abre al momento de tomar la medición).

2. Se registran los valores de temperaturas y presiones en la bitácora, se identifican como las condiciones iniciales, y se valida que estén dentro de las condiciones de operación establecidas.

3. Se abre y cierra rápidamente la válvula C, y se lee la presión en el manómetro PI02, se repite esta operación hasta que el valor de PI02 esté dentro de la condición de operación buscada, y se registra de nueva cuenta los valores de temperatura y presión en la bitácora al final de este proceso. Se espera 15 minutos y se vuelve a registrar los valores; se verifica el valor en PI02, si cambiara fuera de los parámetros de operación se deberá de realizar la operación de generación de vacío y repetir la prueba.

4. Se abre la válvula B y se registran los valores de presión y temperatura, así como la hora.

5. Se deberá registrar cada 20 minutos durante 2 horas los valores de los instrumentos de presión, temperatura y del bazo 1 en la bitácora, y se deberá de controlar la temperatura de bazo en caso de que se encuentre por debajo del valor de operación. Se debe de cuidar de no exceder la temperatura más allá de los valores de operación ya que es contraproducente para el proceso.

6. Ya terminada la prueba se desmonta AC y se saca el adsorbente para pesarlo en la balanza analítica, y se registra el peso final.

7. Los registros de los datos de la prueba se pasan a un Excel y se procede a obtener la capacidad de adsorción con la ley de los gases ideales.

vii. Bit@cora de registro

El formato que se debe propone para llevar el registro es el siguiente:

Nombre de quien realiza la prueba:				Fecha:			
ID Adsorbente:				Adsorbato:			
Peso inicial (g)				Volumen (ml)			
Peso final (g)							
RealizÆ purga:	SI NO	Prueba Hermeticidad A		OK Se repitiÆ No aplica	Prueba Hermeticidad B		OK Se repitiÆ
Hora	PI (kPa) 02	T 2 (ÆC)	T 1 (ÆC)	Paso/V@lvula activada	PI (kPa) 01	T baç o 1 (ÆC)	T baç o 2 (ÆC)

B. ImpregnaciÆn del rastrojo de sorgo con sales higroscÆpicas. Detalles

Tabla 26. Lista de pruebas requeridas por el diseç o de experimentos para el metanol.

Prueba	Material	13	Li-3-1	28	Ca-1-1
1	Ca-2-3 (C-4)	14	Li-2-2	29	Li-3-2
2	Ca-2-1 (C-1/C-2)	15	Ca-2-2	30	Ca-2-2
3	Li-2-1 (C-5/C-6)	16	Li-2-2	31	Ca-2-1
4	Li-1-3	17	Ca-1-2	32	Ca-2-2
5	Ca-3-2	18	Li-3-3	33	Ca-3-3
6	Li-3-3	19	Li-1-3	34	Ca-3-3
7	Li-1-1	20	Ca-3-1	35	Li-1-2
8	Li-1-2	21	Ca-1-3	36	Li-2-2
9	Ca-3-2	22	Ca-1-2	37	Ca-2-2
10	Li-2-3	23	Li-1-1	38	Ca-2-3
11	Ca-1-3	24	Ca-1-1	39	Li-2-3
12	Li-2-2	25	Ca-2-2	40	Li-2-1
		26	Li-3-1	41	Li-2-2
		27	Li-3-2	42	Ca-3-1

Tabla 27. Bitócora de las modificaciones del rastrojo de sorgo.

ID	Sal	Tiempo de impregnación (horas)	Concentración de solución (% peso)	Masa RSMP (g)	Masa sal (g)	Volumen solución (L)	Volumen 1er lavado (L)	Volumen 2do lavado (L)
C-0	-	48	0%	4.141	0.000	0.075	0	0
Ca-2-1 / C-1	CaCl ₂	48	5%	4.128	3.958	0.075	0.025	0.025
Ca-2-1 / C-2	CaCl ₂	48	5%	4.165	3.954	0.075	0.025	0.025
Ca-2-3 / C-3	CaCl ₂	48	20%	4.136	18.760	0.075	0.025	0.025
Ca-2-3 / C-4	CaCl ₂	48	20%	4.110	18.747	0.075	0.025	0.025
Ca-1-1	CaCl ₂	24	5.0%	12.058	11.676	0.216	0.075	0.075
Ca-1-2	CaCl ₂	24	12.5%	12.012	30.049	0.216	0.075	0.075
Ca-1-3	CaCl ₂	24	20.0%	12.048	54.815	0.216	0.075	0.075
Ca-2-1	CaCl ₂	48	5.0%	4.001	3.831	0.072	0.025	0.025
Ca-2-2	CaCl ₂	48	12.5%	23.849	61.461	0.432	0.150	0.150
Ca-2-3	CaCl ₂	48	20.0%	4.003	18.009	0.072	0.025	0.025
Ca-3-1	CaCl ₂	72	5.0%	12.010	11.887	0.216	0.100	0.075
Ca-3-2	CaCl ₂	72	12.5%	12.010	30.455	0.216	0.100	0.075
Ca-3-3	CaCl ₂	72	20.0%	12.002	53.999	0.216	0.100	0.075
Li-2-1/ C-5	LiBr	48	5%	4.127	3.939	0.075	0.025	0.025
Li-2-1/ C-6	LiBr	48	5%	4.129	3.987	0.075	0.025	0.025
Li-2-3/ C-7	LiBr	48	20%	4.123	18.761	0.075	0.025	0.025
Li-2-3/ C-8	LiBr	48	20%	4.128	18.767	0.075	0.025	0.025
Li-1-1	LiBr	24	5.0%	12.027	11.365	0.216	0.075	0.075
Li-1-2	LiBr	24	12.5%	12.052	30.657	0.216	0.075	0.075
Li-1-3	LiBr	24	20.0%	12.007	54.824	0.216	0.075	0.075
Li-2-1	LiBr	48	5.0%	4.010	3.766	0.072	0.025	0.025
Li-2-2	LiBr	48	12.5%	23.972	61.859	0.432	0.150	0.150
Li-2-3	LiBr	48	20.0%	4.028	18.373	0.072	0.025	0.025
Li-3-1	LiBr	72	5.0%	12.004	11.285	0.216	0.100	0.075
Li-3-2	LiBr	72	12.5%	12.010	30.474	0.216	0.100	0.075
Li-3-3	LiBr	72	20.0%	11.995	53.957	0.216	0.100	0.075