

IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO TEÓRICO PARA LA REMOCIÓN DE  
ÁCIDO LÁCTICO MEDIANTE ADSORBENTES SÓLIDOS.

YULY NATALIA CAJAMARCA GARCIA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ, D.C.  
2018

IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO TEÓRICO PARA LA REMOCIÓN DE  
ÁCIDO LÁCTICO MEDIANTE ADSORBENTES SÓLIDOS.

YULY NATALIA CAJAMARCA GARCIA

Proyecto integral de grado para optar el título de:  
INGENIERO QUÍMICO

Director

Yovanny Morales Hernández  
Ingeniero químico

Co-director

Jaime Eduardo Arturo Calvache  
MsC. Ingeniero químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ, D.C.  
2018

Nota De Aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá, D.C. Junio, 2018.

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano Facultad de Ingeniería

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director de Investigación

Ing. Armando Fernández Cárdenas

Director Programa ingeniería

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## **DEDICATORIA**

Primeramente, dedico este trabajo de grado a Dios por permitirme llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor, a mi madre Yenny, mi Padre John, mi hermana Paula, mis abuelos Jorge y Blanca quienes me acompañaron en este proceso, me brindaron su apoyo sincero y transparente. A mi familia, amigos, compañeros, colegas y profesores ya que sin sus conocimientos y apoyo este logro no hubiese podido ser real.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi familia, por su apoyo incondicional, en el proceso de realización de este proyecto y en el transcurso del pregrado, al Ingeniero Yovanny Morales por ser parte de mi formación profesional y académica, por su constante apoyo y por brindarme todo el conocimiento requerido para la realización de este proyecto, al Ingeniero Jaime Arturo por su contribución y constante apoyo en la ejecución del proyecto, a mi colega y amigo Luis Higuera por su colaboración transparente y sincera, al grupo GPS por brindarme conocimientos y enseñanzas, finalmente agradezco a la Universidad América por ser la casa mater de mi vida académica que próximamente será profesional.

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	17
<b>OBJETIVOS</b>	18
<b>1. GENERALIDADES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN</b>	19
<b>1.1 ÁCIDO LÁCTICO</b>	19
1.1.1 Métodos de obtención del ácido láctico.	20
1.1.1.1 Método químico	20
1.1.1.2 Método biotecnológico.	20
1.1.2 Métodos de separación del ácido láctico.	22
1.1.2.1 Precipitación.	22
1.1.2.3 Extracción con solventes.	23
1.1.2.4 Pervaporación.	23
1.1.2.5 Adsorción.	24
<b>1.2 ADSORCIÓN DE LÍQUIDOS</b>	24
<b>2. ADSORBENTES SÓLIDOS</b>	26
<b>2.2 CAPACIDAD</b>	26
<b>2.3 SELECTIVIDAD</b>	26
<b>2.4 ADSORBENTES SÓLIDOS EMPLEADOS EN ÁCIDOS CARBOXÍLICOS</b>	27
<b>3. ADSORCIÓN DE UN SOLO COMPONENTE</b>	29
<b>3.1 MODELOS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE UN SOLO COMPONENTE</b>	29
3.1.1 Isotherma de Langmuir.	29
3.1.2 Isotherma de Freundlich.	30
<b>3.2 ADSORCIÓN DE ÁCIDOS CARBOXÍLICOS EN SOLUCIÓN ACUOSA</b>	31
3.2.2 Modelo de Freundlich en ácidos carboxílicos.	36
<b>4. ADSORCIÓN DE UNA MEZCLA TERNARIA DE ÁCIDOS CARBOXÍLICOS</b>	42
<b>4.1 PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE ADSORCIÓN EN MEZCLA</b>	42
4.1.1 IAST: Ideal Adsorption Solution Theory.	42
4.1.1.1 Algoritmo de aplicación IAST.	43
4.1.2 Adsorción sistema ternari.	45
4.1.2.1 Adsorción del ácido láctico en mezcla ternaria ideal.	45
4.1.3 Selectividad.	49
<b>5. MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN-ESTADO DEL ARTE</b>	51
<b>5.1 ECUACIONES QUE GOBIERNAN LA FENOMENOLOGÍA DE LA ADSORCIÓN</b>	51
5.1.1 Ecuaciones de continuidad de especies.	

5.1.1.3 Equilibrio de adsorción.	54
5.1.2 Conservación de la energía.	55
5.1.3 Conservación de momentun.	56
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>58</b>
<b>7. RECOMENDACIONES</b>	<b>59</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>60</b>

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Enantiómeros del ácido láctico	19
<b>Figura 2.</b> Secuencia de producción de ácido láctico por síntesis química.	21
<b>Figura 3.</b> Reacciones estequiométricas involucradas en la biorreacción de producción de L(+) ácido láctico	21
<b>Figura 4.</b> Isotermas representativas del cambio de concentración para la adsorción de líquidos	25
<b>Figura 5.</b> Comportamiento de la isoterma de Langmuir	30
<b>Figura 6.</b> Representación esquemática de la interacción entre el ácido láctico y resina base débil	31
<b>Figura 7.</b> Algoritmo solución numérica de IAST para el sistema de adsorción ternario.	44
<b>Figura 8.</b> Volumen de control para un lecho fijo	51
<b>Figura 9.</b> Diagrama esquemático de la conservación másica de un volumen de control	52
<b>Figura 10.</b> Términos fuente de las ecuaciones de control.	57

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
<b>Gráfica 1.</b> Isotherma de adsorción de Langmuir del ácido láctico con diferentes adsorbentes.	34
<b>Gráfica 3.</b> Isotherma de adsorción de Langmuir del ácido fórmico con diferentes adsorbentes	35
<b>Gráfica 4.</b> Isotherma de adsorción de Langmuir del ácido acético con diferentes adsorbentes	36
<b>Gráfica 5.</b> Isotherma de adsorción de Freundlich del ácido láctico con diferentes adsorbentes.	37
<b>Gráfica 6.</b> Isotherma de adsorción de Freundlich del ácido fórmico con diferentes adsorbentes	39
<b>Gráfica 7.</b> Isotherma de adsorción de Freundlich del ácido acético con diferentes adsorbentes	40
<b>Gráfica 8.</b> Capacidad de las resinas para ácido láctico, ácido fórmico y ácido acético (concentración inicial = 37g de ácido láctico/L, 37g de ácido fórmico/L, 37g de ácido acético/L)	46
<b>Gráfica 9.</b> Capacidades de las resinas para soluciones lácticas acuosas comerciales y para solución multicomponente que contiene 37g de ácido láctico / L, 37g de ácido fórmico/L, 37g de ácido acético/L	46
<b>Gráfica 10.</b> Isotherma de adsorción para el ácido láctico en solución acuosa y mezcla ternaria en medio fermentativo con adsorbente sólido Amberlite XDA-7.	47
<b>Gráfica 11.</b> Isotherma de adsorción para el ácido láctico en solución acuosa y mezcla ternaria en medio fermentativo con adsorbente Carbón activado	48
<b>Gráfica 12.</b> Isotherma de adsorción para el ácido láctico en solución acuosa y mezcla ternaria en medio fermentativo con adsorbente Amberlite IRA 67.	48

## LISTA DE TABLAS

pág.

<b>Tabla 1.</b> Propiedades físico-químicas del ácido láctico	22
<b>Tabla 2.</b> Propiedades del adsorbente: Resina Amberlite XAD-7.	27
<b>Tabla 3.</b> Propiedades del adsorbente: Resina Amberlite IRA-67.	28
<b>Tabla 4.</b> Propiedades del adsorbente: Carbón Activo	28
<b>Tabla 5.</b> Constantes de Langmuir para diferentes adsorbentes -Ácido láctico	33
<b>Tabla 6.</b> Constantes de Langmuir para diferentes adsorbentes -Ácido fórmico	34
<b>Tabla 7.</b> Constantes de Langmuir para diferentes adsorbentes -Ácido acético	36
<b>Tabla 8.</b> Constantes de Freundlich para diferentes adsorbentes -Ácido láctico	37
<b>Tabla 9.</b> Constantes de Freundlich para diferentes adsorbentes -Ácido fórmico	38
<b>Tabla 10.</b> Constantes de Freundlich para diferentes adsorbentes -Ácido acético	39
<b>Tabla 11.</b> Selectividad de los adsorbentes en mezcla ternaria ideal.	49
<b>Tabla 12.</b> Selectividad de los adsorbentes en mezcla ternaria-medio fermentado	49
<b>Tabla 13.</b> Términos fuente del modelo de adsorción	56

## NOMENCLATURA

$C^{\circ}_{eq}$	Concentración del soluto en el equilibrio
$q$	Capacidad en el equilibrio
$q_m$	Capacidad máxima en el modelo de Langmuir (mg/g)
$K_L$	Coefficiente de equilibrio de la isoterma de Langmuir
$K_F$	Coefficiente de equilibrio de la isoterma de Freundlich
$n$	Constante de intensidad de adsorción
$A$	Área de superficie específica por unidad de masa del adsorbente ( $m^2/g$ )
$C_i$	Concentración del soluto $i$ en la fase móvil (mg/L)
$C^{\circ}_i$	Concentración de soluto en la fase móvil en el sistema de adsorción de un solo componente (mg/L)
$q_i$	Concentración del soluto $i$ en la fase estacionaria (mg/g)
$q^{\circ}_i$	Concentración de soluto en la fase estacionaria en el sistema de adsorción de un solo componente (mg/g)
$R$	Constante del gas ideal (J/mol K)
$T$	Temperatura (K)
$x_i$	Fracción adsorbida del componente $i$ en la fase estacionaria
$K_i$	Coefficiente de equilibrio de la isoterma de Langmuir del componente $i$
$\Pi^{\circ}_i$	Presión de expansión del soluto $i$
$\Psi$	Presión de dispersión modificada
$S_{ij}$	Selectividad del componente $i$ en $j$
$y_i$	Fracción molar del componente $i$ en la fase fluida
$A_t$	Área de sección transversal
$z$	Eje axial del lecho
$\varepsilon$	Fracción de lecho vacío
$\rho_p$	Densidad de partícula
$D_Z$	Coefficiente de dispersión axial
$C_F$	Concentración inicial del afluente
$H$	Altura del lecho.
$S_m$	Término fuente de balance de masa
$q^*$	Equilibrio de las cantidades adsorbidas
$k_L$	Constante de tiempo de adsorción (s <sup>-1</sup> )
$D_C$	Coefficiente de difusión intermicroporoso.
$r_c$	Radio del cristal adsorbente
$E_s$	Energía total del adsorbente
$E_f$	Energía total del líquido
$\rho_f$	Densidad del fluido
$\rho_s$	Densidad del sólido
$\vec{v}$	Vector de velocidad total del fluido
$p$	Presión estática del fluido
$k_{eff}$	Efectividad de conductividad térmica del medio

$\Delta H$	Calor de adsorción
$\bar{\epsilon}$	Tensor de estrés
$\vec{g}$	Vector de aceleración de la gravedad
$S_i$	Representa el término de fricción
$ \vec{v} $	Vector de velocidad
$v_i$	Componente de velocidad en la dirección $i$
$k$	Permeabilidad
$C_2$	Factor de resistencia inercia
$D_p$	Diámetro medio del lecho
$\epsilon_v$	Porosidad del lecho.

#### Subíndices

$i$	Componente $i$
$j$	Componente $j$

## GLOSARIO

**ÁCIDO LÁCTICO:** es un ácido orgánico carboxílico de gran importancia en varias industrias. En la industria farmacéutica es empleado como agente anti edad, en la industria química se utiliza como agente solubilizador o regulador de pH, en la industria alimentaria se maneja como conservante. Su aplicación más importante tiene cabida en la industria de plásticos debido a que es el precursor del ácido poli láctico, un biopolímero.

**ADSORBATO:** sustancia adsorbida en la superficie de un adsorbente: el adsorbato se adhiere sobre la superficie del adsorbente por un proceso de adsorción.

**ADSORBENTE:** es un sólido que tiene la capacidad de retener sobre su superficie un componente presente en corrientes líquidas o gaseosas. Se caracterizan por una alta superficie específica y por su inercia química frente al medio en el que se van a utilizar.

**ADSORCIÓN:** el fenómeno de adsorción es el proceso por el cual átomos o moléculas de una sustancia que se encuentra en determinada fase, son retenidas en la superficie de otra sustancia, que se encuentra en otra fase. Como resultado de este proceso, se forma una capa de líquido o gas en la superficie de una sustancia sólida o líquida.

**CAPACIDAD:** cantidad de adsorbato que puede retenerse en el adsorbente por unidad de masa o volumen. La capacidad de adsorción se relaciona directamente con la superficie específica del material y con su volumen de poros, así como con el tamaño de poro promedio del material.

**ISOTERMA DE ADSORCIÓN:** describe el equilibrio de la adsorción de un material en una superficie (de modo más general sobre una superficie límite) a temperatura constante. Representa la cantidad de material unido a la superficie (el sorbato) como una función del material presente en la fase gas o en la disolución.

**SELECTIVIDAD:** es el cociente entre la capacidad de adsorción de un componente y la correspondiente a otro en una mezcla dada. De esta forma, la selectividad representa la manera más simple de descripción de un equilibrio multicomponente.

## RESUMEN

En este trabajo se estudió el comportamiento de adsorción del ácido láctico cuando éste está en solución acuosa mediante el uso de los modelos de la isoterma de Langmuir y de Freundlich.

Se estudio el comportamiento de adsorción del ácido láctico cuando este está en mezcla ternaria con ácido fórmico y acético, mediante el modelo IAST (teoría de solución adsorbida ideal), ejecutado en el programa Matlab®

En este trabajo se seleccionó el adsorbente sólido bajo los criterios de selectividad y capacidad, usando datos suficientes de la literatura y la teoría ideal de la solución de adsorción IAST (Ideal Adsorption Solution Theory) y haciendo un acople Aspen Propierties®- Excel®-Matlab®, en donde se pudo establecer que el acople funciona correctamente para estudiar el comportamiento de adsorción de ácidos carboxílicos en adsorbentes sólidos, siendo el adsorbente Amberlite IRA-67 el adsorbente que posee un comportamiento favorable para la adsorción de ácido láctico.

**PALABRAS CLAVE:** Adsorción, Ácido Láctico, Capacidad, Selectividad, Remoción.

## INTRODUCCIÓN

En el grupo de investigación de la Universidad América BIOTECFUA, surge la necesidad de encontrar el método apropiado de separación del ácido láctico, ya que allí se llevó a cabo el proyecto investigativo correspondiente a la producción de ácido láctico por vía fermentativa usando como sustrato piña madura. El ácido láctico actualmente brinda muchas aplicaciones a nivel industrial como lo es en la industria química, alimenticia, cosmética, farmacéutica y petroquímica. Considerando todo su proceso de producción, en el área de separación y purificación existen varios métodos, los más comunes a nivel industrial son la precipitación y la extracción, sin embargo, presentan varios obstáculos técnico-económicos debido a la alta complejidad y a los costos que representan más del 40% del costo total de producción.

El grupo de investigación de separaciones no convencionales se ha interesado por abordar y dar solución a estos problemas, para ello se realizó como primera fase el análisis termodinámico de los componentes obtenidos en la fermentación de un sustrato complejo, de tal forma que se pudieran identificar los azeotrópos presentes en la mezcla y así generar esquemas tecnológicos que permitieran describir el comportamientos de estos componentes en una mezcla; posteriormente se incluyó el tema de separación y purificación mediante el estudio e investigación del método de pervaporación y electrodiálisis.

En el proyecto “Implementación de un modelo teórico para la remoción de ácido láctico mediante adsorbentes sólidos” se pretende realizar un modelo teórico junto con la selección del adsorbente adecuado que permita hacer un diseño conceptual de un equipo de adsorción, para así dar solución al proceso de remoción primaria de ácido láctico.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Implementar un modelo teórico para la remoción ácido láctico por medio de adsorbentes sólidos.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

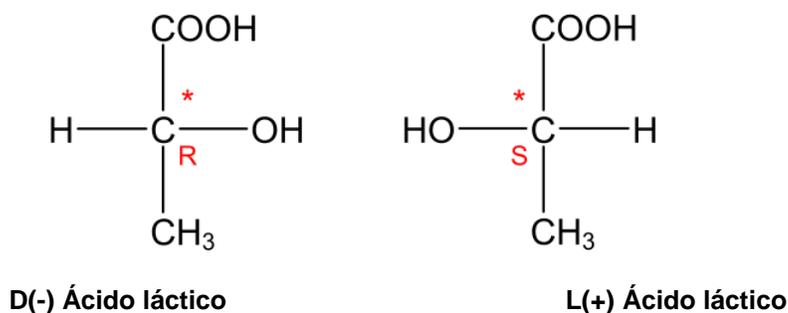
- Seleccionar el adsorbente sólido adecuado para remover el ácido láctico de una mezcla binaria ácido láctico-agua.
- Determinar los parámetros de las isothermas de adsorción de ácidos orgánicos en agua mediante un algoritmo desarrollado en Matlab 2012b®
- Determinar la selectividad de una mezcla ternaria de ácidos orgánicos en agua mediante un algoritmo desarrollado en Matlab 2012b® y Aspen One®

# 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

## 1.1 ÁCIDO LÁCTICO

El ácido láctico también conocido como ácido 2-hidroxi-propanoico o ácido  $\alpha$ -hidroxi-propanoico, es un ácido orgánico de fórmula molecular ( $C_3H_6O_3$ ) que posee tres carbonos: uno perteneciente a un grupo carboxílico, otro carbono terminal parte de un grupo metilo y un carbono central, unido a un grupo alcohol, el ácido láctico posee isomería óptica en la cual existen dos enantiómeros: L(+) o D(-) (figura 1).

**Figura 1.** Enantiómeros del ácido láctico



Fuente: Disponible en:

[https://es.wikipedia.org/wiki/Nomenclatura\\_DL#/media/File:Milchs%C3%A4ure\\_Enantiomere.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Nomenclatura_DL#/media/File:Milchs%C3%A4ure_Enantiomere.svg)

El ácido láctico se encuentra en muchos productos de origen natural, el ácido láctico puede producirse mediante síntesis química o fermentación de carbohidratos, fue descubierto en 1780 por el químico sueco Scheele<sup>1</sup>. El ácido láctico es ampliamente usado en la industria alimenticia, cosmética y farmacéutica, aunque es un producto que se puede encontrar de forma natural, el ácido láctico es usado actualmente en muchas aplicaciones innovadoras; hoy en día se han utilizado ampliamente polímeros a base de ácido láctico, una buena alternativa para sustituir el plástico convencional producido a partir de petróleo<sup>2</sup>. Según un nuevo informe de Global Industry Analysts, Inc para el 2017 se produjeron 367.3 miles de toneladas métricas

<sup>1</sup>DATTA, Rathin y HENRY, Michael. Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies — a review. En: Journal of chemical technology & biotechnology. Vol.; 81. No 7 (2006); p. 1119-1129.

<sup>2</sup> TONG, Wang Yu. FU, Xiang Yang. LEE, Sang Mok. YU, Jie. LIU, Jian Wen. WEI, Dong Zhi y KOO, Yoon Mo. Purification of L(+)-lactic acid from fermentation broth with paper sludge as a cellulosic feedstock using weak anion exchanger Amberlite IRA-92. En: Biochemical Engineering Journal. Vol.; 18. No 2 (2014); p. 89–96.

de ácido láctico<sup>3</sup>, en donde aproximadamente 40% del costo de producción radica en el proceso de separación y purificación<sup>4</sup>. Con el fin de reducir el costo, estudios sobre la separación de ácido láctico se han llevado a cabo utilizando diferentes técnicas

**1.1.1 Métodos de obtención del ácido láctico.** A lo largo de los años se han venido desarrollando diferentes métodos de obtención de ácido láctico, inicialmente la producción fue en su mayoría por síntesis química, sin embargo, en pro de mejorar el proceso y el medio ambiente se creo que el método biotecnológico que ha presentado mejores resultados y es amigable con el medio ambiente

**1.1.1.1 Método químico.** A escala industrial la producción se basa en la reacción del acetaldehído con ácido cianhídrico (HCN) para dar lactonitrilo, el cual puede ser hidrolizado a ácido láctico; otro tipo de reacción se basa en la reacción a alta presión de acetaldehído con monóxido de carbono y agua en presencia de ácido sulfúrico<sup>5</sup>, este método tiene varias desventajas debido a la complejidad en mantener las condiciones de operación, debido a esto el 90% de la producción mundial de ácido láctico se da por vía biotecnológica. En la figura 2 se ilustra este proceso.

**1.1.1.2 Método biotecnológico.** Es el proceso de producción que actualmente es el más implementado corresponde al uso de la biotecnología; este se basa en la fermentación de sustratos ricos en carbohidratos por bacterias u hongos, forma enantiómeros D(-) y L(+) ópticamente activos como se observa en la figura 3. La producción biotecnológica depende del tipo de microorganismo utilizado, la forma de operación, el pH, la temperatura, la fuente de carbono, la fuente de nitrógeno<sup>6</sup>. Algunos sustratos como el suero, la soja, la leche, el maíz, la papa y la madera se han investigado para la fermentación del ácido láctico. Sin embargo, hay pocos casos exitosos en la producción comercial a gran escala de ácido láctico. Las principales dificultades para esta situación son el alto costo de recuperación del producto y la naturaleza compleja del proceso biológico<sup>7</sup>. El ácido láctico obtenido o deseado cumple con ciertas características físicas y químicas que se pueden observar en la tabla 1.

---

<sup>3</sup> LI, Qian-Zhu. JIANG, Xing-Lin. FENG, Xin-Jun. WANG, Ji-Ming. SUN, Chao. ZHANG, Hai-Bo. XIAN, Mo y LIU, Hui-Zhou. Recovery Processes of Organic Acids from Fermentation Broths in the Biomass-Based Industry. En: Journal of Microbiology and Biotechnology. Vol.; 26. No. 1 (2016); p. 1–8.

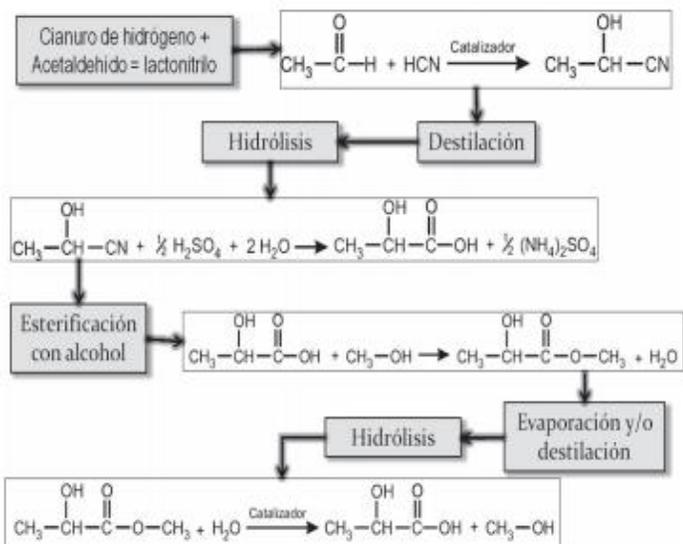
<sup>4</sup> KOMESU, ANDREA. WOLF MACIEL, MARIA. ROCHA DE OLIVEIRA. Purification of Lactic Acid Produced by Fermentation: Focus on Non-traditional Distillation Processes. En: Separation and Purification Reviews [online]. Vol.; 46, No. 3 (2017); p. 241–254.

<sup>5</sup> SERNA-COCK, L. y STOUVENEL, A. Rodríguez-de. Producción Biotecnológica De Ácido Láctico: Estado Del Arte Biotechnological Production of Lactic Acid. En: Ciencia y Tecnología Alimentaria Vol.; 5 N. 1 (2005), p. 54–65.

<sup>6</sup> *Ibíd.*, p.55.

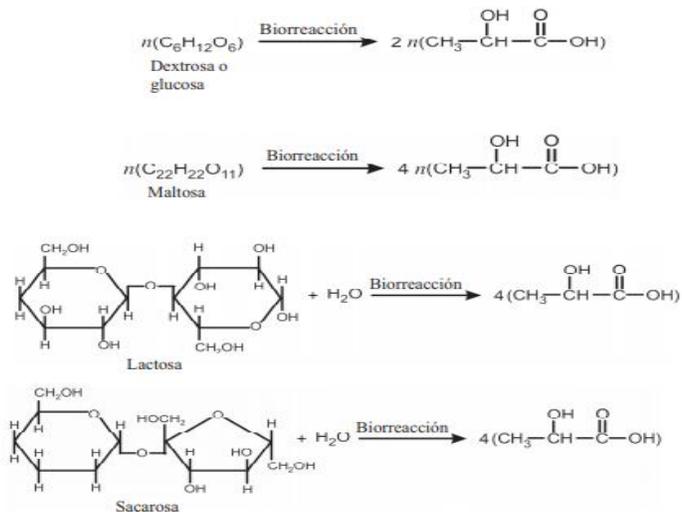
<sup>7</sup> TONG,Wang-Yu, et al. *Op. cit.*, p.90.

**Figura 2.** Secuencia de producción de ácido láctico por síntesis química.



Fuente: Bioproducción de ácido láctico a partir de residuos de cáscara de naranja: Procesos de separación y purificación. En: Tecnología, Ciencia y Educación del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos (IMIQ) (2008)

**Figura 3.** Reacciones estequiométricas involucradas en la biorreacción de producción de L(+) ácido láctico



Fuente: Bioproducción de ácido láctico a partir de residuos de cáscara de naranja: Procesos de separación y purificación. En: Tecnología, Ciencia y Educación del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos (IMIQ) (2008)

**1.1.2 Métodos de separación del ácido láctico.** Los métodos de separación del ácido láctico se han venido investigando profundamente debido a que en esta parte del proceso se generan los mayores costos de producción, actualmente se han presentado métodos como precipitación, extracción por solventes, electrodiálisis, y adsorción.

**1.1.2.1 Precipitación.** Es el método más eficiente y utilizado actualmente a nivel industrial para la recuperación de ácido láctico, se utiliza la precipitación de calcio en donde primero se filtra el caldo fermentado para obtener el licor madre y eliminar las impurezas, se agrega  $\text{Ca(OH)}_2$  O  $\text{CaCO}_3$  a este licor madre con constante agitación, en segundo lugar, la sal de calcio del ácido láctico se filtra de la fermentación, y se agrega ácido sulfúrico para finalmente liberar el ácido láctico de la sal de calcio<sup>8</sup>.

**Tabla 1.** Propiedades físico-químicas del ácido láctico

Formula	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$
Peso Molecular	90,08
Índice de refracción	1,4414
Punto de fusión	L(+) y D(-): 52,8 a 54°C
Punto de ebullición	125-140°C
Gravedad específica	1206
Calor de combustión	3616 cal/g
Viscosidad	40,33 mNsm <sup>-2</sup>
Densidad	1,249
Constante dieléctrica	22 <sup>ε</sup>

Fuente: SERNA-COCK,L. andSTOUVENEL,A. Rodríguez-de. Producción biotecnológica de ácido láctico: estado del arte. en: ciencia y tecnología alimentaria. Dec 1,.,vol. 5, no. 1, p. 54

El método de precipitación ha reportado porcentajes de recuperación del 92% de ácido láctico, las principales ventajas de este proceso son que es altamente selectiva, no tiene transición de fase, y tiene una alta pureza del producto; sin embargo cuando se obtiene una cantidad de ácido láctico se consume una cantidad casi igual de  $\text{Ca(OH)}_2$  O  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , y se forma sulfato de calcio poco valioso y muy contaminante esto quiere decir que para purificar ácido láctico se produce yeso que en su mayoría es inservible<sup>9</sup>.

<sup>8</sup> LI,Q. -Z, et al.Op. cit., p.2.

<sup>9</sup> LI, Hong, MUSTACCHI. Roberta, KNOWLES. Christopher J. SKIBAR, Wolfgang. SUNDERLAND, Garry. DALRYMPLE, Ian y JACKMAN, Simon A. An electrokinetic bioreactor: Using direct electric current for enhanced lactic acid fermentation and product recovery. En: Tetrahedron. Vol.; 60. No. 3 (2004); p. 655–661.

**1.1.2.2 Electrodiálisis.** La electrodiálisis es un proceso de electro-membrana en el que los iones se transportan a través de membranas de intercambio iónico de una solución a otra bajo la influencia de un potencial eléctrico<sup>10</sup>. La electrodiálisis es una técnica de separación electroquímica basada en dos principios: la aplicación de un campo eléctrico continuo y la transferencia de iones a través de membranas de intercambio iónico<sup>11</sup>. Existe además la electrodiálisis bipolar que involucra una membrana bipolar de intercambio iónico y catiónico con una generación eficiente de protones y de iones de hidroxilo para producir ácidos y bases. Este sistema permite separar, purificar, concentrar sales y convertirlas a ácidos y bases sin producir efluentes ni descargas al ambiente, con una alta eficiencia energética<sup>12</sup>.

Se han reportado eficiencias altas y recuperación del 90% de ácido láctico con este método sin embargo solo se reportan pruebas a nivel piloto y no se ha implementado a nivel industrial<sup>13</sup>.

**1.1.2.3 Extracción con solventes.** La extracción con solvente es una tecnología de separación altamente eficiente a la hora de purificar el ácido láctico. Consume poca energía, y es un proceso de recuperación tradicional. El método de extracción por solventes en la recuperación de ácido láctico utiliza componentes organofosforados, aminas terciarias o amonios cuaternarios; es más selectiva y favorece la eficiencia del proceso y la pureza del ácido láctico obtenido, sin embargo, el uso de esos solventes es altamente tóxico para los microorganismos, así mismo la obtención de dichos solventes está restringida legalmente.

**1.1.2.4 Pervaporación.** La pervaporación es un proceso de separación asistido, donde el soluto es transportado a través de membranas densas. Esta operación consiste en separar el componente de interés de una mezcla líquida; la transferencia de masa se basa en las interacciones sustancia-membrana, la naturaleza química de la membrana y el tipo de material de la membrana; estos factores son claves y determinantes para el desempeño que tenga la membrana en la operación de separación<sup>14</sup>.

---

<sup>10</sup> MURCIA, Neyfe. CIFUENTES, Jhoan. y MORALES, Yovanny. Modelamiento y diseño conceptual de la separación de lactato mediante electrodiálisis. Bogotá D.C, 2017 Fundación Universidad de América.

<sup>11</sup> MADZINGAIDZO, L. DANNER, H. y BRAUN, R. Process development and optimisation of lactic acid purification using electrodialysis. En: Journal of Biotechnology. Vol.; 96. No 3 (2002); p. 223–239.

<sup>12</sup> SERNA-COCK, L. Y STOUVENEL. Op. cit., p. 11.

<sup>13</sup> HĚOVÁ, Věra. MELZOCH, Karel. RYCHTERA, Mojmír y SEKAVOVÁ, Barbora. Electrodialysis as a useful technique for lactic acid separation from a model solution and a fermentation broth. En: Desalination. Vol. 162, No 1–3 (2004), p. 361–372.

<sup>14</sup> MORENO, Lina. TORRES, Daniel. y MORALES, Yovanny. Caracterización de un caldo fermentado y su separación por un proceso híbrido. Bogotá D.C. 2017. Fundación Universidad de América.

Se han reportado altos porcentajes de recuperación del ácido láctico, sin embargo, es un método que solo se ha llevado a cabo a escala piloto pues está en proceso investigativo.

**1.1.2.5 Adsorción.** La adsorción es un proceso en el cual moléculas, átomos o iones en un gas o líquido, difunden a la superficie de un sólido, allí se unen con dicha superficie sólida manteniéndose unidas por medio de fuerzas intermoleculares débiles. Los solutos adsorbidos se denominan adsorbatos, mientras que el material sólido es el adsorbente<sup>15</sup>. Para conseguir una gran área superficial de adsorción por unidad de volumen, se utilizan partículas sólidas porosas con poros interconectados de pequeño diámetro. En el caso de la adsorción, el proceso se define como fisisorción si el adsorbato está sujeto por fuerzas débiles de tipo Van Der Waals en la superficie, si se observa la formación de enlaces entre el adsorbato y el adsorbente, el proceso se conoce comúnmente como quimisorción. La cantidad de material que se adsorbe en la superficie a una temperatura particular depende de la cantidad de esa sustancia en la fase gaseosa o líquida que está en contacto con la superficie, y esta dependencia se representa mediante una isoterma de adsorción. La isoterma es útil para estudiar las interacciones entre el adsorbato y el adsorbente<sup>16</sup>. El método de adsorción en la recuperación de ácido láctico ha sido estudiado a nivel investigativo, dichos estudios han reportado buenos resultados que podrían indicar que este método es favorable para la recuperación de ácido láctico.

## 1.2 ADSORCIÓN DE LÍQUIDOS

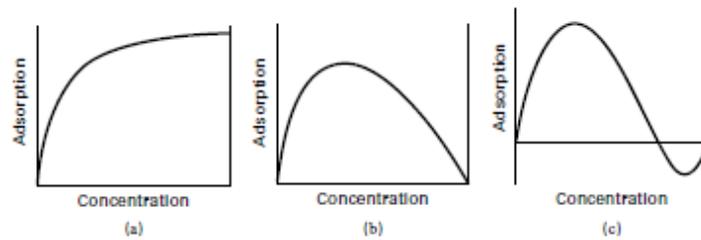
La adsorción de líquidos es difícil de medir o describir. Cuando el fluido es un gas, la cantidad de gas adsorbido en un espacio confinado se determina a partir de la disminución medida de la presión total. Para un líquido, no existe un procedimiento sencillo para determinar el grado de adsorción de un líquido puro. Si el líquido es una mezcla, es habitual designar un componente como el soluto (A) y el otro como el disolvente (B). Se asume entonces que el cambio en la concentración de la mezcla de líquido en contacto con un adsorbente sólido es debido por completo a la adsorción del soluto. El disolvente se supone que no es adsorbido. Cuando la mezcla líquida es diluida en el soluto, la isoterma de adsorción es similar a la forma obtenida para los gases puros (Figura 3). Durante amplios intervalos de concentración, se observan isotermas de otras formas (Figura 2)

---

<sup>15</sup>SEADER, J. D. HENLEY, Ernest. J. y ROPER, D. K. Separation Process Principles, Chemical and Biochemical Operations. New York: John Wiley & Sons, 2011

<sup>16</sup> VERA, Bolis. Aline Auroux (eds.). Calorimetry and Thermal Methods in Catalysis. 1. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer Series in Materials Science 154., 2013.

**Figura 4.** Isotermas representativas del cambio de concentración para la adsorción de líquidos



Fuente: SEADER, J. D. HENLEY, Ernest. J. y ROPER, D. K. Separation Process Principles, Chemical and Biochemical Operations. New York: John Wiley & Sons, 2011 p 579.

En este estudio se aborda el tema de adsorción en líquidos, específicamente adsorción de ácido láctico, debido a que puede ser una alternativa en el proceso de recuperación de ácido láctico; para ello es necesario realizar un estudio a profundidad en el tema, pues a pesar de que se han reportado trabajos investigativos de adsorción de ácido láctico, es indispensable realizar investigaciones en otros aspectos como lo es propiedades de la adsorción tal como selectividad y capacidad.

## 2. ADSORBENTES SÓLIDOS

A la hora de elegir el adsorbente se debe tener en cuenta los siguientes aspectos: la selectividad debe ser alta para permitir separaciones rigurosas, una alta capacidad permite minimizar la cantidad de adsorbente, las propiedades cinéticas y de transporte deben ser favorables para realizar una adsorción rápida, la estabilidad química y térmica preserva la cantidad de adsorbente y sus propiedades, la dureza y la resistencia mecánica son de importancia para evitar el aplastamiento y la erosión, el flujo de alimentación debe ser libre para facilitar el llenado y vaciado de recipientes, el adsorbente necesita tener una alta resistencia al ensuciamiento para asegurar una vida útil larga, no se deben presentar reacciones secundarias indeseables, la capacidad de regeneración deben ser altas y por ultimo su bajo costo; lo anterior asegurará que el adsorbente cumpla con los requerimientos adecuados para el sistema de adsorción<sup>17</sup>. Como ya se menciona Los atributos más importantes de un adsorbente para cualquier aplicación son: capacidad, selectividad, regenerabilidad, cinética, compatibilidad y costo, sin embargo, rara vez un único adsorbente será óptimo en todos estos aspectos. Con frecuencia será posible reducir la elección a una o dos clases de adsorbentes, pero eso aún deja una amplia gama de posibilidades. En este estudio se tuvieron en cuenta aspectos como capacidad, selectividad del adsorbente mediante el estudio de las respectivas isothermas de adsorción, así como con el uso del método predictivo de adsorción multicomponente IAST.

### 2.2 CAPACIDAD

La capacidad es la característica más importante del adsorbente, es la cantidad de adsorbato adsorbido por el adsorbente, por unidad de masa (o volumen), del adsorbente. Depende de la concentración de la fase de fluido, la temperatura y las condiciones de operación (especialmente la condición inicial del adsorbente)<sup>18</sup>, Por lo general, los datos de capacidad de adsorción se recopilan a una temperatura fija y varias concentraciones de adsorbato, y los datos se trazan como una isoterma tal y como se observa en las gráficas de las isothermas de adsorción del capítulo 3 y 4, con las cuales se puede evidenciar que adsorbente sólido tiene mejor capacidad.

### 2.3 SELECTIVIDAD

La selectividad está relacionada con la capacidad, la más simple es la relación entre la capacidad de un componente y la de otro a una concentración dada de fluido. Una situación ideal ocurre cuando el componente que no es de interés no está muy

---

<sup>17</sup> SEADER, J. D. HENLEY, Ernest. J. y ROPER, D. K. Op. cit., p 579 (2011)

<sup>18</sup> RENGE, V. KHEDKAR, S C. y PANDE, Shraddha V. Removal of Heavy Metals From Wastewater Using Low Cost Adsorbents: a Review. En Sci. Revs. Chem. Commun. Vol.; 2. No 4 (2012); p. 580–584.

adsorbido (por lo que puede pensarse como un "portador" inerte), lo que conduce a una selectividad muy grande<sup>19</sup>.

## 2.4 ADSORBENTES SÓLIDOS EMPLEADOS EN ÁCIDOS CARBOXÍLICOS

Los principales estudios acerca de los adsorbentes utilizados en la remoción de ácidos carboxílicos como el ácido láctico; se centran en materiales iónicos, materiales no iónicos, y materiales iónicos utilizados para remover carboxilatos<sup>20</sup>. Los materiales iónicos se dividen en débiles, funcionalizados con grupos aminas primarias, secundarias, terciarias; y fuertes funcionalizados con grupos aminas cuaternarias. En los materiales no iónicos principalmente se utiliza alúmina y hematita. Por último, los materiales iónicos para remover carboxilatos se basan en la captura del anión orgánico del carboxilato por medio de un intercambiador de iones fuertes. Estos adsorbentes sólidos son llamados resinas de intercambio iónico. En las tablas 2, 3 y 4 se muestran algunas propiedades de los adsorbentes sólidos que se van a evaluar, estos adsorbentes sólidos serán estudiados y analizados para la remoción del ácido láctico como único componente, y en una mezcla de varios ácidos.

**Tabla 2.** Propiedades del adsorbente: Resina Amberlite XAD-7.

<b>Adsorbente</b>	<b>Naturaleza química</b>	<b>Área superficial específica (m<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Volumen específico de poro (ml/g)</b>	<b>Referencia</b>
<b>Amberlite XAD-7</b>	Adsorbente polimérico básico	450	1,14	(Raganati et al., 2018)

Fuente: elaboración propia

<sup>19</sup> RENGE, V.C., KHEDKAR, S.V. y PANDE, S.H. Op. cit., p 580

<sup>20</sup> LÓPEZ GARZÓN, Camilo S. y STRAATHOF, Adrie J.J. Recovery of carboxylic acids produced by fermentation. En: *Biotechnology Advances*. Vol.; 32. No 5 (2014); p. 873–904.

**Tabla 3.** Propiedades del adsorbente: Resina Amberlite IRA-67.

<b>Adsorbente</b>	<b>Naturaleza química</b>	<b>Tamaño de partícula (um)</b>	<b>Matriz</b>	<b>Referencia</b>
<b>Amberlite IRA-67</b>	Resina poliacrítica de tipo gel débilmente básica con un grupo funcional amina terciaria.	600	Gel	(Arcanjo, Fernandes, & Silva, 2015)

Fuente: elaboración propia

**Tabla 4.** Propiedades del adsorbente: Carbón Activo

<b>Adsorbente</b>	<b>Tamaño de partícula (mesh)</b>	<b>Área superficial específica (m<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Volumen específico de poro (ml/g)</b>	<b>Referencia</b>
<b>Carbón activo</b>	14-35	820	0,56	(Liu, Liu, Liu, & Mao, 2012)

Fuente: elaboración propia

### 3. ADSORCION DE UN SOLO COMPONENTE

#### 3.1 MODELOS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE UN SOLO COMPONENTE

Existe un equilibrio dinámico para la distribución de solutos entre la superficie fluida y la superficie solida cuando se presenta adsorción. Esto se expresa en términos de concentración del adsorbato en el fluido y la carga de solutos en el adsorbente expresada como masa, moles o volumen de adsorbato por unidad de masa. En los equilibrios vapor-líquido y líquido-líquido, la teoría se aplica para estimar la distribución de fases en forma de las constantes  $K$ , que son las constantes de cada modelo de adsorción, sin embargo, no se ha desarrollado alguna teoría aceptable para estimar el equilibrio de adsorción fluido-sólido, por esto es necesario obtener datos de equilibrio para un soluto particular, o una mezcla de solutos y / o disolvente, y el material adsorbente sólido de interés. Los datos se toman en un rango de concentraciones de fluidos a temperatura constante, se realiza un gráfico de la carga de soluto adsorbente frente a la concentración de soluto o presión parcial en el fluido, denominada isoterma de adsorción. Esta isoterma de equilibrio establece un límite en la medida en que un soluto se adsorbe de una mezcla de fluidos específica en un adsorbente dado para un conjunto de condiciones

**3.1.1 Isoterma de Langmuir.** Es el modelo más simple para describir la adsorción de un solo componente fue originalmente desarrollada para representar la quimisorción, la isoterma de Langmuir intenta explicar el fenómeno como una adsorción monomolecular en donde existe equilibrio adsorción-desorción y gracias a este no hay formación de monocapas<sup>21</sup>. Esta isoterma describe la carga máxima (capacidad limite) del adsorbente que es cuando la monocapa está completa. La figura 3 muestra el comportamiento de la isoterma de Langmuir

La isoterma de Langmuir está representada bajo la ecuación 1, esta expresión puede deducirse a partir del equilibrio entre las posiciones ocupadas y las posiciones libres y moléculas en la fase fluida.

$$q = \frac{K_L qm C^{o}eq}{1 + K_L C^{o}eq} \quad Ec. 1$$

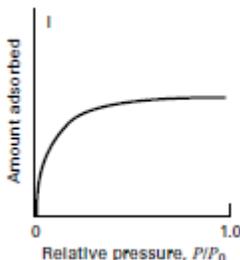
Donde  $K_L$  (mg/L) y  $qm$  (mg/g resina) denotan el coeficiente de equilibrio de la isoterma de Langmuir y la capacidad máxima de adsorción respectivamente.  $C^{o}eq$  (mg/L) es la concentración de ácido de la fase de solución en el equilibrio y  $q$  (mg/g resina) es la concentración de ácido de la fase sólida en el equilibrio. Los valores de  $K_L$  y  $qm$  están determinados por la siguiente ecuación:

---

<sup>21</sup> SEADER, J. D. HENLEY, Ernest. J. y ROPER, D. K. Op. cit., p 579

$$\frac{C^{\circ}eq}{q} = \frac{C}{qm} + \frac{1}{K_L qm} \quad \text{Ec. 2}$$

**Figura 5.** Comportamiento de la isoterma de Langmuir



Fuente: Seader, J. D., Henley, E. J., & Roper, D. K. (2011). Separation Process Principles, Chemical and Biochemical Operations. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. p 579.

**3.1.2 Isotherma de Freundlich.** En este modelo se asume la superficie del adsorbente energéticamente heterogénea, conformada por grupos de sitios de adsorción de energías características, también es posible considerar que en esta isoterma no existen interacciones entre las moléculas adsorbidas y por lo tanto solo se adsorbe una monocapa<sup>22</sup>. Esta descrita mediante la ecuación 3.

$$q = K_F C^{\circ}eq^{1/n} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde  $K_F$  (mg/L) y  $n$  denotan el coeficiente de equilibrio de la isoterma de Freundlich y la constante de intensidad de adsorción respectivamente.  $C^{\circ}eq$  (mg/L) es la concentración de ácido de la fase de solución en el equilibrio y  $q$  (mg/g resina) es la concentración de ácido de la fase sólida en el equilibrio. Los valores de  $K_F$  y  $n$  se pueden obtener luego de hacer la respectiva linealización como se observa en la ecuación 4.

$$\log(q) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \text{Log}(C^{\circ}eq) \quad \text{Ec. 4}$$

La isoterma de Freundlich es un desarrollo empírico en donde sus constantes son dependientes de la temperatura, el problema de esta isoterma es que no predice la carga máxima de la isoterma<sup>23</sup>. El exponente  $1/n$  es adimensional, tiene valor menos que uno, y se relaciona con la intensidad de la adsorción

<sup>22</sup> LAZO, José. Síntesis y caracterización de arcillas organofílicas y su aplicación como adsorbentes del fenol. En: Revista de la sociedad química del Perú. Vol.; 74. No 1 (2008); p. 3-19.

<sup>23</sup> FIGUEROA, Danilo. MORENO, Anderson y HORMAZA, Angelina. Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Vol.; 14. No. 26 (2015); p.105–120.

### 3.2 ADSORCIÓN DE ÁCIDOS CARBOXÍLICOS EN SOLUCIÓN ACUOSA

Los modelos de isoterma de adsorción, Langmuir y Freundlich son aplicados a datos experimentales encontrados en la literatura con los cuales se hace la correspondiente linealización y se obtienen los parámetros, de igual manera, con estos modelos es posible hacer un estudio del comportamiento de adsorción de dichos ácidos cuando están en solución acuosa. Los datos de los ácidos empleados corresponden al ácido láctico, ácido fórmico y ácido acético, dichos ácidos fueron seleccionados debido a reportes bibliográficos en donde se evidencia presencia de estos en mayor cantidad luego de una fermentación, donde el objetivo es producir ácido láctico, de igual manera estos ácidos fueron seleccionados gracias a los reportes experimentales reportados en la literatura, sin embargo no hay que dejar de lado que en la producción biotecnológica de ácido láctico también se producen compuestos tales como azúcares, y proteínas; es conveniente hacer posteriores estudios con estos compuestos. Se han realizado análisis similares a los aquí descritos<sup>24</sup> en los cuales se usa una metodología basada en describir las isoterma de Langmuir y Freundlich, a partir de datos experimentales.

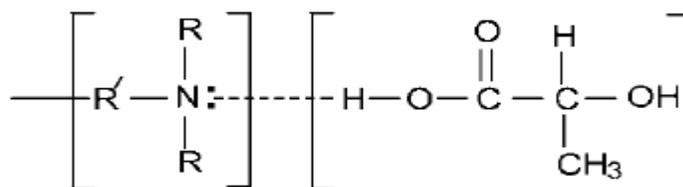
En la figura 6 se puede observar el mecanismo de interacción entre los adsorbentes sólidos o resinas y el ácido láctico donde el nitrógeno del grupo funcional amino terciario en la resina tiene una carga negativa parcial debido al par solitario de electrones. Este nitrógeno puede tener una interacción ácido-base de Lewis con hidroxilo parcialmente cargado positivamente, así como con hidrógeno ácido láctico. Si el ácido puede donar el protón al sitio base débil, el anión ácido y la base protonada pueden interactuar electrostáticamente<sup>25</sup>.

**Figura 6.** Representación esquemática de la interacción entre el ácido láctico y resina base débil

---

<sup>24</sup> BAYAZIT, Şahika Sena. INCI, Ismail y USLU, Hasan. Adsorption of lactic acid from model fermentation broth onto activated carbon and amberlite IRA-67. En: *Journal of Chemical and Engineering Data*. Vol.; 56. No. 5 (2011); p. 1751–1754.

<sup>25</sup> DETHE, M. J., MARATHE, K. V. y GAIKAR, V. G. Adsorption of lactic acid on weak base polymeric resins. En: *Separation Science and Technology*. Vol. 41.; No. 13 (2006); p. 2947–2971.



Fuente: DETHE, M. J., MARATHE, K. V. y GAIKAR, V. G. Adsorption of lactic acid on weak base polymeric resins. En: Separation Science and Technology. Vol. 41.; No. 13 (2006); p. 2947–2971.

Los datos experimentales encontrados en la bibliografía permiten modelar la isoterma de adsorción para así obtener los parámetros y poder hacer un estudio al comportamiento de adsorción, la isoterma de adsorción para el ácido láctico fue modelada con datos experimentales correspondientes a los adsorbentes sólidos: Amberlite IRA-67<sup>26</sup>, Carbón activado<sup>27</sup> y Amberlite XAD-7<sup>28</sup>, la isoterma de adsorción del ácido acético fue modelado con datos de la literatura igualmente modelados con Amberlite IRA-67<sup>29</sup>, Carbón activado<sup>30</sup> y Amberlite XAD-7<sup>31</sup>, y para finalizar la isoterma de adsorción del ácido fórmico fue modelada con datos de la literatura usando adsorbentes sólidos: Amberlite IRA-67<sup>32</sup>, Carbón activado<sup>33</sup> y Amberlite XAD-7<sup>34</sup>. Estos datos experimentales se encuentran a 25°C.

**3.2.1 Modelo de Langmuir en ácidos carboxílicos.** Gracias a los datos experimentales encontrados en la literatura fue posible modelar la isoterma de adsorción de Langmuir del ácido láctico, ácido acético, y ácido fórmico y así obtener los respectivos parámetros. En el anexo A se presenta el código de Matlab® con el

<sup>26</sup>BAYAZIT, Şahika Sena. INCI, Ismail y USLU, Hasan. Adsorption of lactic acid from model fermentation broth onto activated carbon and amberlite IRA-67. En: Journal of Chemical and Engineering Data. Vol.; 56. No. 5 (2011); p. 1751–1754.

<sup>27</sup>BAYAZIT, Şahika Sena. INCI, Ismail y USLU, Hasan. Op. cit., p.1752

<sup>28</sup>USLU, Hasan y MAJUMDER, Subhajit. Adsorption Studies of Lactic Acid by Polymeric Adsorbent Amberlite XAD-7: Equilibrium and Kinetics. En: Journal of Chemical and Engineering Data. Vol.; 62. No 4 (2017); p. 1501–1506.

<sup>29</sup>USLU, Hasan. INCI, Ismail y BAYAZIT, Şahika Sena. Adsorption equilibrium data for acetic acid and glycolic acid onto amberlite IRA-67. En: Journal of Chemical and Engineering Data. Vol.; 55. No 3 (2010); p. 1295–1299.

<sup>30</sup>GANGULY, S. K. y GOSWAMI, A. N. Surface diffusion kinetics in the adsorption of acetic acid on activated carbon. En: Separation Science and Technology. Vol.; 31. No 9 (1996); p. 1267–1278.

<sup>31</sup>GOTTUMUKKALA, Lalitha Devi. PARAMESWARAN, Binod. VALAPPIL, Sajna Kuttavan. PANDEY, Ashok. y SUKUMARAN, Rajeev Kumar. Growth and butanol production by Clostridium sporogenes BE01 in rice straw hydrolysate: Kinetics of inhibition by organic acids and the strategies for their removal. En: Biomass Conversion and Biorefinery. Vol.; 4. No 3 (2014); p. 277–283.

<sup>32</sup>USLU, Hasan. Adsorption equilibria of formic acid by weakly basic adsorbent Amberlite IRA-67: Equilibrium, kinetics, thermodynamic. En: Chemical Engineering Journal. Vol.; 155. No 1–2 (2009); p. 320–325.

<sup>33</sup>LIU, Baojian. LIU, Shiwang. LIU, Tiebing y MAO, Jianwei. A novel granular activated carbon adsorption method for separation of levulinic acid from formic acid. En: Advanced Materials Research. Vol.; 553. (2012); p. 1691–1695.

<sup>34</sup>GOTTUMUKKALA. op. cit, p.28

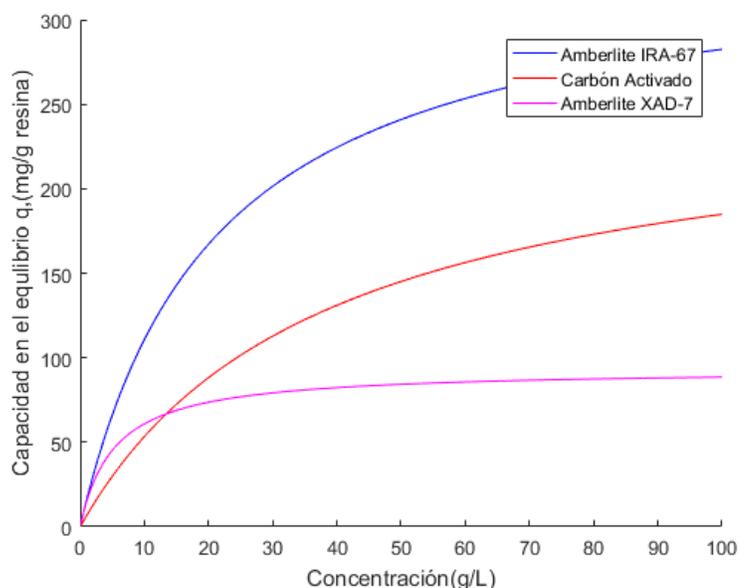
cual se realizó la respectiva linealización. En la tabla 5 se presentan los parámetros  $K_L$  y  $qm$  para el ácido láctico, al igual que los coeficientes de correlación de la regresión los cuales tienden a 1, esto quiere decir que los datos experimentales se ajustan correctamente a esta isoterma de adsorción. En la gráfica 1 se presentan las isotermas de adsorción del ácido láctico evaluada en los tres adsorbentes seleccionados en un rango de concentración en el equilibrio de 0 a 100 g/L de ácido láctico, como se puede observar en dicha gráfica se evidencia que el adsorbente sólido Amberlite IRA-67 posee un comportamiento favorable en comparación con los otros dos adsorbentes. La gráfica 1 muestra un comportamiento creciente de capacidad de adsorción a medida que aumenta la concentración de ácido láctico para los adsorbentes sólidos Amberlite IRA 67 y carbón activado, para la resina Amberlite IRA 67 se observa que existe una capacidad de adsorción mayor, esto puede ser explicado gracias a la alta afinidad que tienen los ácidos carboxílicos con las resinas de intercambio iónico y a las propiedades físicas de la resina, las cuales incluyen diámetro de poro, área superficial entre otras ; por otro lado se observa que para la resina Amberlite XAD-7, el comportamiento de adsorción es el menos favorable pues a medida que aumenta la concentración en el equilibrio, la capacidad de adsorción se mantiene constante, esto explica que dicha resina no se ajusta al proceso de adsorción de ácido láctico.

**Tabla 5.** Constantes de Langmuir para diferentes adsorbentes -Ácido láctico

<b>Ácido Láctico</b>			
<b>Resina</b>	<b>Amberlite XAD-7</b>	<b>Carbón activado</b>	<b>Amberlite IRA 67</b>
<b>Máxima capacidad de la resina (Q, mg/g)</b>	93,250	254,643	341,330
<b>Constante de equilibrio de la Isoterma de Langmuir (K, mg/L)</b>	0,188	0,0265	0,0480
<b>R</b>	0,993	0,978	0,980

Fuente: elaboración propia

**Gráfica 1.** Isotherma de adsorción de Langmuir del ácido láctico con diferentes adsorbentes.



Fuente: elaboración propia

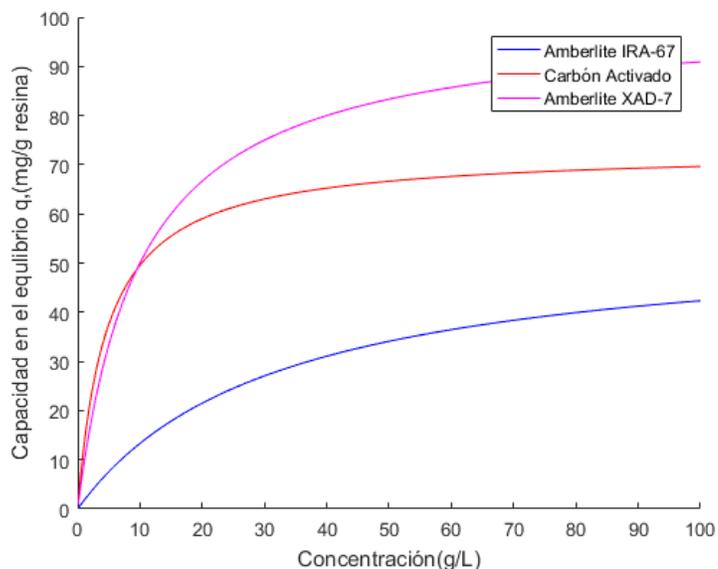
En la tabla 6 se presentan los parámetros de la isoterma de Langmuir para el ácido fórmico, en los cuales se puede evidenciar que al hacer la regresión con los datos del adsorbente sólido Amberlite XAD-7, el coeficiente de correlación es menor a 0.9 lo cual indica que dichos datos a pesar de ajustarse a esta isoterma, posee algunos datos dispersos. En la gráfica 2 se presentan las isotermas de adsorción del ácido fórmico evaluado en los tres adsorbentes sólidos, en la cual se puede observar que para un rango de concentración en el equilibrio de 0-100 g/L de ácido fórmico, el adsorbente que tiene mayor afinidad con es la Amberlite XAD-7, esto debido a sus propiedades físicas, y de interacción con las moléculas de ácido fórmico.

**Tabla 6.** Constantes de Langmuir para diferentes adsorbentes -Ácido fórmico

Ácido fórmico			
Resina	Amberlite XAD-7	Carbón activado	Amberlite IRA 67
Máxima capacidad de la resina (Q, mg/g)	100,000	72,929	55,866
Constante de equilibrio de la Isotherma de Langmuir (K, mg/L)	0,100	0,212	0,0313
R	0,830	0,966	0,996

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 2.** Isotherma de adsorción de Langmuir del ácido fórmico con diferentes adsorbentes



Fuente: elaboración propia

En la tabla 7 se pueden observar los parámetros de la isoterma de Langmuir para el ácido acético; los coeficientes de correlación de regresión tienden a 1, sin embargo, los datos con la resina Amberlite XAD-7 presentan un coeficiente de correlación menor a 0.9 lo cual quiere decir que algunos de los datos experimentales están dispersos. En la gráfica 3 se observan las diferentes isothermas de adsorción del ácido acético evaluadas con los tres adsorbentes seleccionados, en esta gráfica se puede evidenciar un comportamiento favorable de adsorción cuando el ácido acético está en contacto con el carbón activado, por otro lado, se puede observar que también se presenta un comportamiento favorable cuando el ácido está en contacto con la resina Amberlite XAD-7; este fenómeno se presenta gracias a la alta afinidad que tienen los adsorbentes sólidos con el ácidos gracias a sus características físicas representadas en las tablas 2,3 y 4 y de interacción molecular.

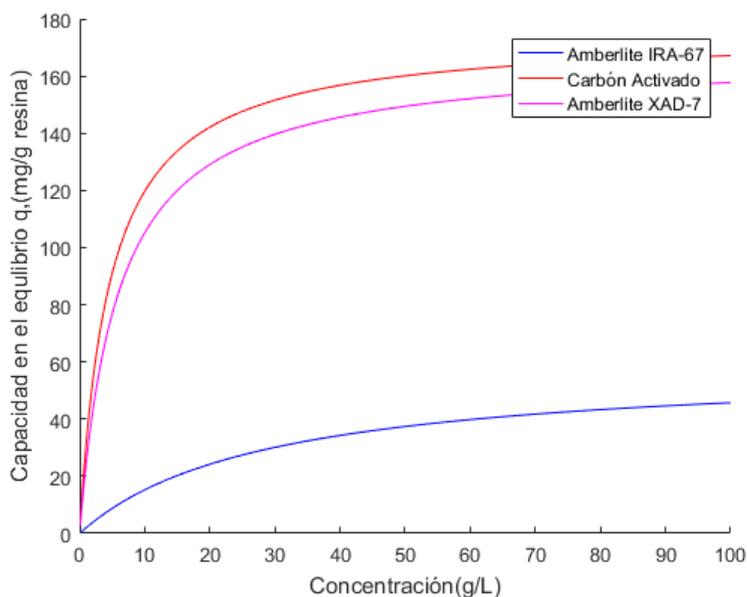
El estudio del modelo de la isoterma de adsorción de Langmuir en ácidos carboxílicos puede predecir el comportamiento favorable de adsorción cuando los ácidos se encuentran en solución acuosa, representando la ventaja de poder seleccionar el adsorbente adecuado, a condiciones establecidas.

**Tabla 7.** Constantes de Langmuir para diferentes adsorbentes -Ácido acético

Ácido acético			
Resina	Amberlite XAD-7	Carbón activado	Amberlite IRA 67
Máxima capacidad de la resina (Q, mg/g)	167,000	174,841	58,763
Constante de equilibrio de la Isoterma de Langmuir (K, mg/L)	0,170	0,217	0,0350
R	0,850	0,997	0,968

Fuente: elaboración propia

**Gráfica 3.** Isoterma de adsorción de Langmuir del ácido acético con diferentes adsorbentes



Fuente: elaboración propia

**3.2.2 Modelo de Freundlich en ácidos carboxílicos.** De igual manera que el modelo de Langmuir, el modelo de Freundlich toma los datos experimentales de la literatura para así poder hacer la respectiva linealización, y observar el comportamiento de adsorción para el ácido láctico, acético y fórmico con los diferentes adsorbentes sólidos preseleccionados.

En la tabla 8 se presentan los parámetros  $K_F$  y  $n$  para el ácido láctico, al igual que los coeficientes de correlación de la regresión, con estos datos se evidencia una buena correlación de los datos para los adsorbente sólidos Amberlite XAD-7 y carbón activado pues tienden a 1, sin embargo, para la Amberlite IRA-67, el

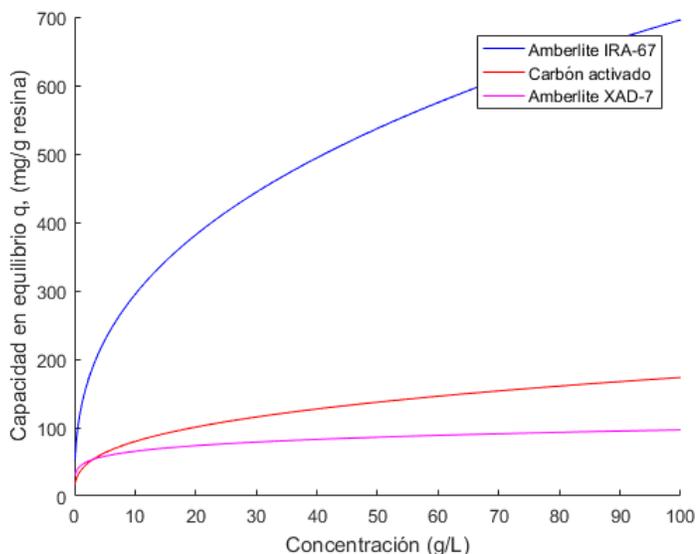
coeficiente de correlación es menor a 0,9 lo cual describe dispersión de los datos experimentales. En la gráfica 4 se presentan las isotermas de adsorción del ácido láctico evaluada en los tres adsorbentes seleccionados en un rango de concentración en el equilibrio de 0 a 100 g/L de ácido láctico, como se puede observar en dicha gráfica se evidencia que el adsorbente sólido Amberlite IRA-67 posee un comportamiento favorable en comparación con los otros dos adsorbentes, igual que en lo observado en la gráfica 1, esto quiere decir que a pesar de ser modelos diferentes la isoterma de Langmuir y Freundlich reportan resultados similares en cuanto al comportamiento de adsorción del ácido láctico.

**Tabla 8.** Constantes de Freundlich para diferentes adsorbentes -Ácido láctico

<b>Ácido láctico</b>			
<b>Resina</b>	<b>Amberlite XAD-7</b>	<b>Carbón activado</b>	<b>Amberlite IRA 67</b>
<b>Constante de intensidad de adsorción (n)</b>	5,90	2,97	2,68
<b>Constante de equilibrio de la Isoterma de Freundlich (Kf, mg/L)</b>	44,30	36,75	124,79
<b>R</b>	0,93	0,92	0,74

Fuente: elaboración propia

**Gráfica 4.** Isoterma de adsorción de Freundlich del ácido láctico con diferentes adsorbentes.



Fuente: elaboración propia

Luego de modelar los datos experimentales del ácido fórmico con la isoterma de Freundlich se pudo obtener las respectivas constantes. En la tabla 9 se presentan los datos de dichas constantes para el ácido fórmico, donde se puede observar que los datos se ajustaron correctamente para la resina Amberlite IRA-67 y para el carbón activado pues el coeficiente de correlación tiende a 1, sin embargo, para la resina Amberlite XAD-7 se evidencia dispersión en los datos. En la gráfica 5 se presentan las isotermas de adsorción en un rango de concentración en el equilibrio de 0-100g/L de ácido fórmico, en esta gráfica se puede observar un comportamiento similar a la isoterma de Langmuir (Gráfica 2) en donde se evidencia mayor afinidad del ácido fórmico con la resina Amberlite XAD-7

**Tabla 9.**Constantes de Freundlich para diferentes adsorbentes -Ácido fórmico

<b>Ácido fórmico</b>			
<b>Resina</b>	<b>Amberlite XAD-7</b>	<b>Carbón activado</b>	<b>Amberlite IRA 67</b>
<b>Constante de intensidad de adsorción (n)</b>	1,52	2,20	1,37
<b>Constante de equilibrio de la Isoterma de Freundlich (Kf, mg/L)</b>	10,70	16,28	2,39
<b>R</b>	0,70	0,97	0,99

Fuente: elaboración propia

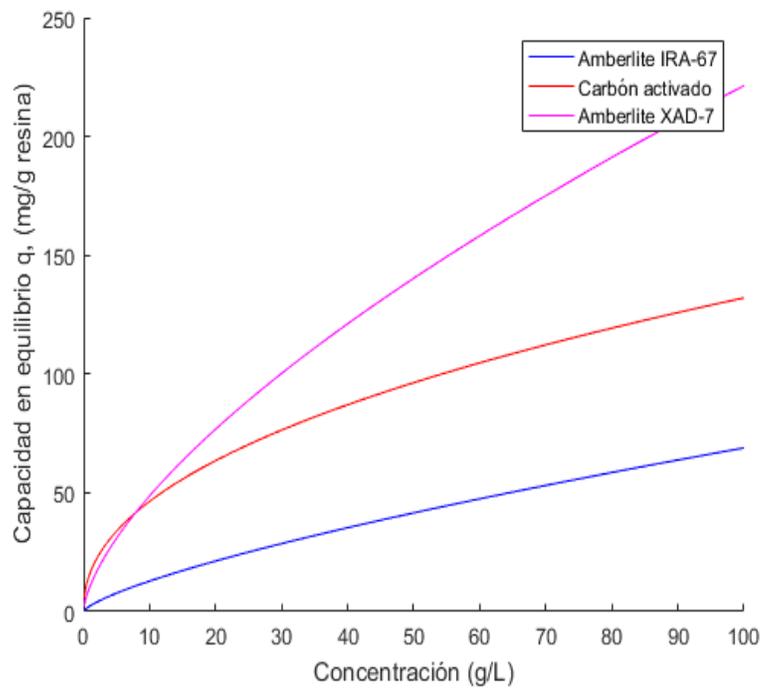
En la tabla 10 se observan las constantes de Freundlich para los datos experimentales de acético con los diferentes adsorbentes preseleccionados, los coeficientes de correlación representan una linealización correcta de los datos para el carbón activado y la resina Amberlite IRA-67 pues tienden a 1, sin embargo, se puede evidenciar cierta dispersión en los datos para la Amberlite XAD-7 pues el coeficiente de correlación es menor a 0,8. En la gráfica 6 se puede observar el comportamiento de adsorción del ácido acético en el cual se evidencia un comportamiento favorable con el adsorbente sólido carbón activado

**Tabla 10.** Constantes de Freundlich para diferentes adsorbentes -Ácido acético

Ácido acético			
Resina	Amberlite XAD-7	Carbón activado	Amberlite IRA 67
Constante de intensidad de adsorción (n)	1,48	3,68	1,23
Constante de equilibrio de la Isoterma de Freundlich (Kf, mg/L)	9,3	61,83	2,11
R	0,66	0,99	0,99

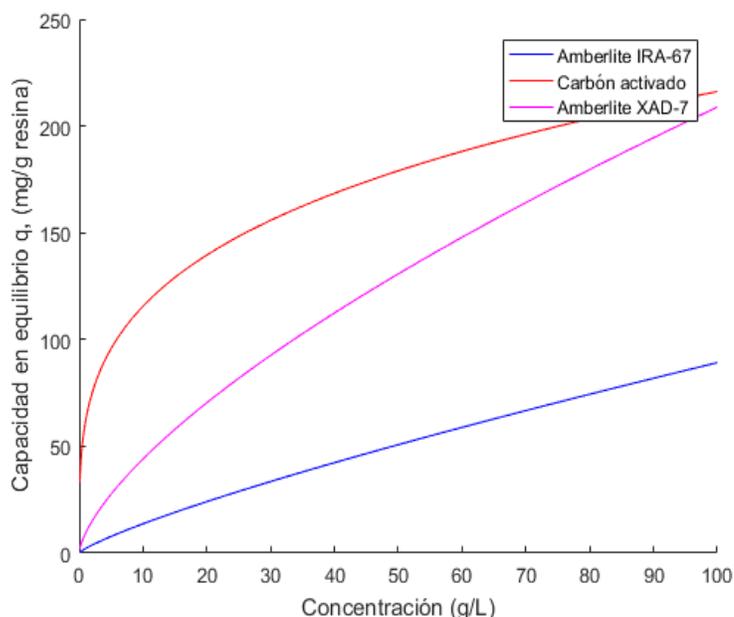
Fuente: elaboración propia

**Gráfica 5.** Isoterma de adsorción de Freundlich del ácido fórmico con diferentes adsorbentes



Fuente: elaboración propia

**Gráfica 6.** Isoterma de adsorción de Freundlich del ácido acético con diferentes adsorbentes



Fuente: elaboración propia

Los modelos de adsorción de Langmuir y Freundlich proporcionan información acerca del comportamiento de adsorción de un componente cuando está en solución acuosa, de igual manera estos modelos permiten hacer un estudio adsorbente-adsorbato mediante la obtención de la isoterma, pues con ellas se puede hacer una tenue comparación y así encontrar el adsorbente que tiene mejor afinidad con el adsorbato. En los estudios a ácidos carboxílicos se puede notar que estos modelos funcionan perfectamente pues los datos experimentales se ajustan a las ecuaciones, indicando así la afinidad del ácido con el adsorbente sólido; en cuanto a las constantes de los modelos, son de gran importancia a la hora de hacer predicciones de adsorción en mezclas.

Como ya se ha mencionado los parámetros de la isoterma de Langmuir y Freundlich permiten inferir cierto comportamiento en el proceso de adsorción, la isoterma de Langmuir da a conocer la capacidad máxima del adsorbente; en este caso es claro observar en las graficas 1, 2 y 3 que: la capacidad máxima de adsorción de la Amberlite IRA-67 se presenta cuando está en contacto con el ácido láctico, la capacidad máxima de adsorción de la Amberlite XAD-7 se presenta cuando está en contacto con el ácido fórmico y la capacidad máxima de adsorción del carbón activado se presenta cuando está en contacto con ácido acético; en las graficas 4,5,6 a pesar de no observarse una capacidad máxima de adsorción se logra ver un comportamiento que describe la capacidad de adsorción en función de la concentración en el equilibrio de cada ácido; este comportamiento describe la misma afinidad ácido-adsorbente sólido que se logra observar en las isotermas de

Langmuir, lo cual establece que los dos modelos de adsorción se ajustan a los datos experimentales.

## 4. ADSORCIÓN DE UNA MEZCLA TERNARIA DE ÁCIDOS CARBOXÍLICOS

### 4.1 PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE ADSORCIÓN EN MEZCLA

**4.1.1 IAST: Ideal Adsorption Solution Theory.** La teoría de solución adsorbida ideal (IAST), desarrollada por Myers y Prausnitz en 1965, es un marco termodinámico ampliamente utilizado para pronosticar fácilmente las isotermas de adsorción multicomponente a partir de las isotermas de adsorción de un solo componente a la misma temperatura. IAST se basa en la suposición de que las especies adsorbidas forman una mezcla ideal, que es una aproximación razonable en muchos sistemas<sup>35</sup>.

La principal idea en la cual se basa la teoría de solución adsorbida ideal es que la presión de expansión de cada componente sea constante a temperatura constante, La presión de expansión se define como la diferencia entre la tensión interfacial de la interfaz solvente-sólido puro y la de la interfaz solución-sólido a la misma temperatura, Para un sistema ternario:

$$\Pi^{\circ}_1 = \Pi^{\circ}_2 = \Pi^{\circ}_3 \quad \text{Ec. 5}$$

La presión de expansión modificada se define como se expresa en la ecuación 6 y es la misma para cada componente:

$$\Psi = \frac{\Pi^{\circ}_i A}{RT} = \int_0^{C^{\circ}_i} \frac{q^{\circ}_i}{C^{\circ}_i} dC^{\circ}_i \quad i = 1,2,3 \quad \text{Ec. 6}$$

Donde A es la superficie de área específica por unidad de masa del adsorbente, R es la constante del gas, T es la temperatura, *i* indica cada uno de los componentes,  $C^{\circ}_i$  y  $q^{\circ}_i$  son las concentraciones de soluto en la fase móvil y estacionaria, respectivamente, en el sistema de adsorción de un solo componente. Las ecuaciones 7, 8, 9 y 10 representan el equilibrio de adsorción de cada componente en el sistema ternario.

$$C_i = C^{\circ}_i x_i \quad i = 1,2,3 \quad \text{Ec. 7}$$

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1 \quad \text{Ec. 8}$$

---

<sup>35</sup> SIMON, Cory M. SMIT, Berend y HARANCZYK, Maciej. Py IAST: Ideal adsorbed solution theory (IAST) Python package. En: Computer Physics Communications. Vol.; 200. (2016); p. 364–380.

$$\frac{1}{q} = \frac{x_1}{q^{\circ}_1} + \frac{x_2}{q^{\circ}_2} + \frac{x_3}{q^{\circ}_3} \quad \text{Ec. 9}$$

$$q_i = qx_i \quad i = 1,2,3 \quad \text{Ec. 10}$$

Donde  $C_i$  y  $q_i$  son la concentración en la fase móvil y fase estacionaria en un sistema de adsorción ternario, respectivamente;  $x_i$  es la fracción adsorbida de cada componente en la fase estacionaria; y  $q$  es la concentración en la fase estacionaria.

**4.1.1.1 Algoritmo de aplicación IAST.** En la figura 4 se observa el algoritmo para solucionar el modelo de predicción IAST, el cual arroja la concentración en la fase móvil y la fase estacionaria en un sistema de adsorción ternario, el cual fue ejecutado en *Matlab*. Para aplicar la teoría de solución adsorbida ideal y predecir el equilibrio de adsorción ternario a partir de datos de isothermas de un solo componente, se obtiene un algoritmo explícito:

Para el modelo de adsorción de Langmuir:

$$\Psi = \int_0^{C^{\circ}_i} \frac{K_i}{1 + K_i C^{\circ}_i} dC^{\circ}_i = Q_i \ln(1 + K_i C^{\circ}_i) \quad i = 1,2,3 \quad \text{Ec. 11}$$

Por lo tanto, las concentraciones en su sistema de un solo componente en las fases líquida y sólida se pueden calcular mediante las ecuaciones (12) y (13), respectivamente.

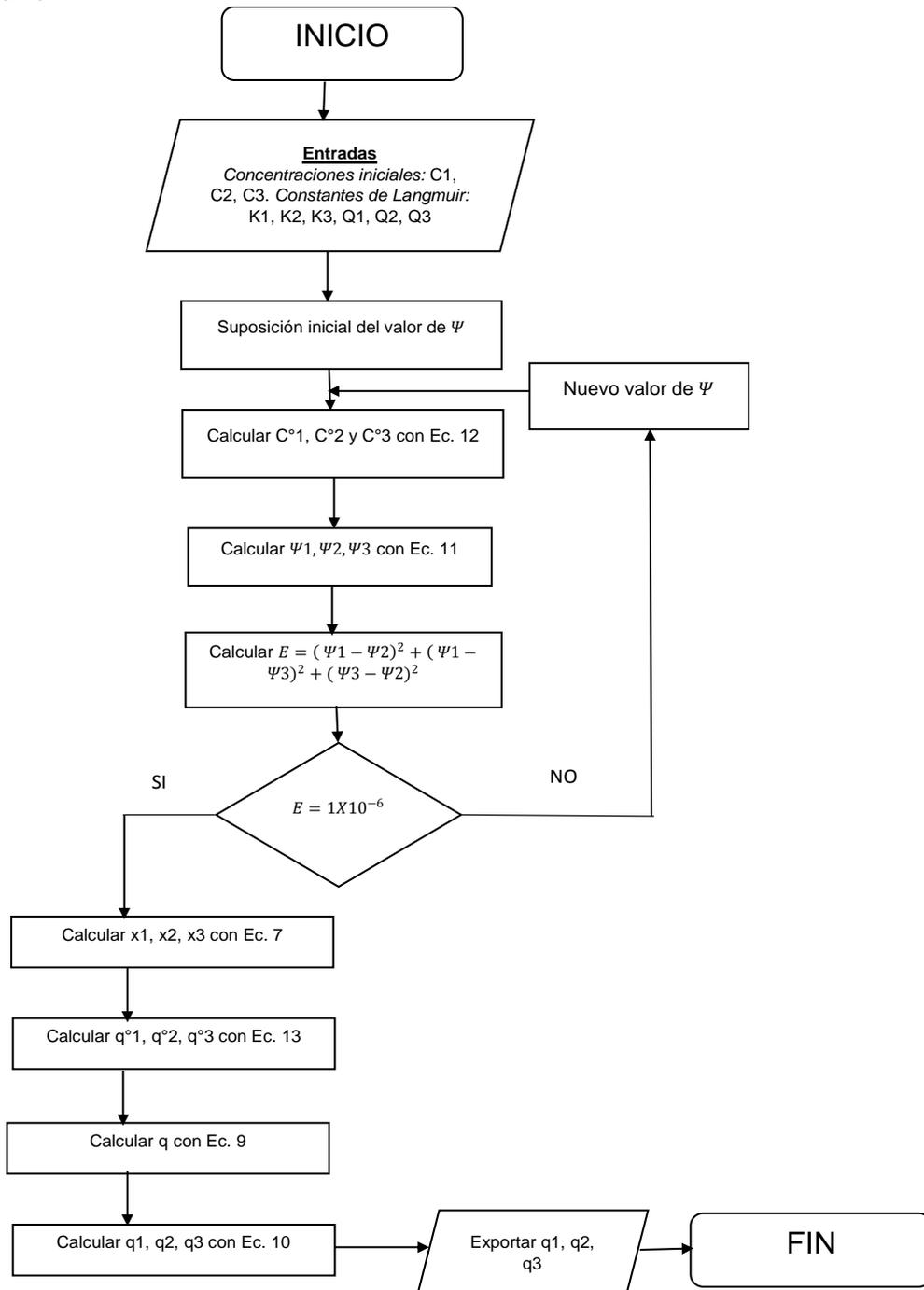
$$C^{\circ}_i = \frac{e^{\Psi/Q_i} - 1}{K_i} \quad i = 1,2,3 \quad \text{Ec. 12}$$

$$q^{\circ}_i = \frac{K_i C^{\circ}_i Q_i}{1 + K_i C^{\circ}_i} \quad i = 1,2,3 \quad \text{Ec. 13}$$

La presión de dispersión adimensional  $\Psi$  se puede resolver numéricamente mediante un método numérico adecuado tal como el método de Newton. Al encontrar la presión de dispersión y utilizando los parámetros de la isoterma de Langmuir para un solo componente ( $K_i$ ,  $Q_i$ ), se puede calcular la concentración de cada componente en la fase líquida ( $C^{\circ}_i$ ) y fase sólida ( $q^{\circ}_i$ ) con propiedades propias de la mezcla ternaria. Las fracciones adsorbidas de los componentes 1, 2 y 3 en la fase sólida  $x_i$  se pueden calcular a partir de la Ec.7 y la concentración total en la

fase sólida se puede calcular a partir de la Ec.8. Finalmente, las concentraciones adsorbidas de los componentes 1,2 y 3 en la fase sólida se pueden calcular mediante Ec 10.

**Figura 7.** Algoritmo solución numérica de IAST para el sistema de adsorción ternario.



Fuente: elaboración propia

**4.1.2 Adsorción sistema ternario.** El sistema multicomponente con el cual se evalúa la adsorción es Ácido Láctico (AL), Ácido Fórmico (AF), y Ácido Acético (AA), estos componentes son usualmente encontrados al momento de producir ácido láctico por medio fermentativo<sup>36</sup>; por ello es importante determinar el comportamiento y fenómeno de adsorción que presenta dicho ácido en esta mezcla. Para ello es indispensable encontrar las constantes de la isoterma de Langmuir para cada componente puro evaluado con cada uno de los adsorbentes preseleccionados, pues estos serán valores claves a la hora de ejecutar la teoría de solución adsorbida ideal (IAST). Las tablas 5,6 y 7 presenta las constantes de Langmuir  $K_i$  y  $Q_i$  para cada componente.

Al aplicar el algoritmo de solución de la teoría de la solución adsorbida (IAST), es posible evaluar el comportamiento del ácido láctico en la solución multicomponente, pues esta indica la capacidad de adsorción de cada compuesto a una concentración inicial dada.

**4.1.2.1 Adsorción del ácido láctico en mezcla ternaria ideal.** En la gráfica 7 se observa el comportamiento de adsorción para una concentración inicial de 37g de ácido láctico/L, 37g de ácido fórmico/L, 37g de ácido acético/L, dicha concentración es seleccionada con el fin de corroborar datos que ya se han reportado en previos estudios tomando dicha concentración, como concentración inicial<sup>37</sup>. En esta gráfica se puede analizar que existe una capacidad de adsorción sobresaliente para el ácido láctico con la resina Amberlite IRA 67 cuando este se encuentra en solución multicomponente, esto quiere decir que dicho adsorbente sólido prevalece la adsorción del ácido láctico respecto a los otros ácidos de la solución multicomponente. Esto puede explicarse sobre la base de las características fisicoquímicas de la resina: la mayor porosidad de Amberlite IRA 67 (una resina macroporosa con alta porosidad) permite un mejor acceso de la especie química a la superficie interna.

Por otro lado, es necesario evaluar el comportamiento de adsorción del ácido láctico en solución acuosa y en solución multicomponente cuando está a una concentración de 37g/L de cada ácido estudiado. Como se puede observar en la gráfica 8; las capacidades de adsorción del ácido láctico disminuyen considerablemente para la resina Amberlite XDA-7 y para el carbón activado cuando este está en mezcla ternaria; sin embargo para la resina Amberlite IRA 67, a pesar de observarse una disminución en la capacidad de adsorción cuando el ácido láctico está en mezcla,

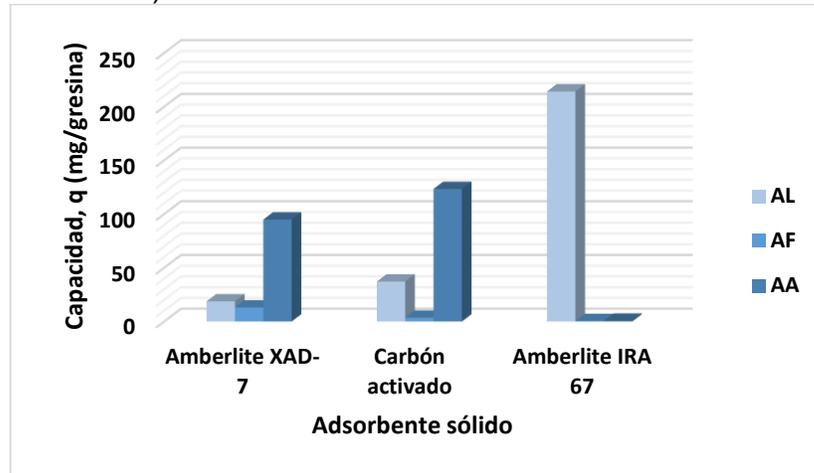
---

<sup>36</sup> TONG, Wang Yu. FU, Xiang Yang. LEE, Sang Mok. YU, Jie. LIU, Jian Wen. WEI, Dong Zhi y KOO, Yoon Mo. Purification of L(+)-lactic acid from fermentation broth with paper sludge as a cellulosic feedstock using weak anion exchanger Amberlite IRA-92. En: Biochemical Engineering Journal. Vol.; 18. No. 2 (2004); p. 89–96.

<sup>37</sup> MOLDES, A. B. ALONSO, J. L. y PARAJÓ, J. C. Recovery of lactic acid from simultaneous saccharification and fermentation media using anion exchange resins. En: Bioprocess and Biosystems Engineering. Vol.; 25, No. 6. (2003) p. 357–363.

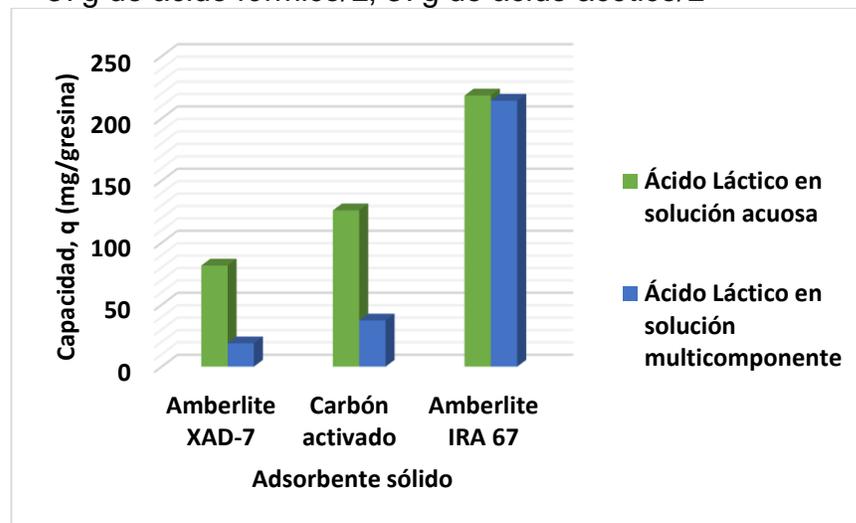
esta es mínima pues disminuye entre el 1% y el 2% lo cual indica que dicha resina tiene la facultad de ser más selectiva y tener más interacción con el ácido láctico, dando prevalencia para que en sus sitios activos se sitúen las moléculas de ácido láctico.

**Gráfica 7.** Capacidad de las resinas para ácido láctico, ácido fórmico y ácido acético (concentración inicial = 37g de ácido láctico/L, 37g de ácido fórmico/L, 37g de ácido acético/L)



Fuente: elaboración propia

**Gráfica 8.** Capacidades de las resinas para soluciones lácticas acuosas comerciales y para solución multicomponente que contiene 37g de ácido láctico / L, 37g de ácido fórmico/L, 37g de ácido acético/L

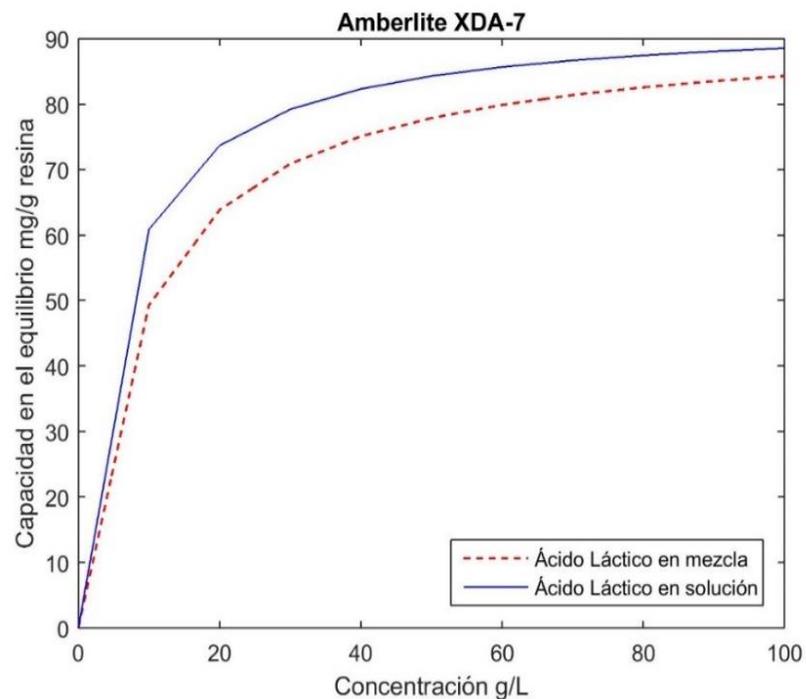


Fuente: elaboración propia

#### 4.1.2.2 Adsorción del ácido láctico en mezcla ternaria de medio fermentativo.

Es necesario realizar el estudio de la predicción de adsorción para una concentración inicial de 71.5g/L de ácido láctico, 1.1 g/L de ácido fórmico y 1.9 g/L de ácido acético, pues estas son las concentraciones que se acercan a la producción de ácido láctico por vía fermentativa<sup>38</sup>. Las gráficas 9-11 representan las isotermas de adsorción con los diferentes adsorbentes cuando el ácido láctico está en solución acuosa y cuando está en mezcla ternaria en medio fermentativo; observándose así la diferencia de los dos comportamientos, esta diferencia depende netamente de la concentración inicial, la estructura molecular de los adsorbentes y de las características del adsorbente

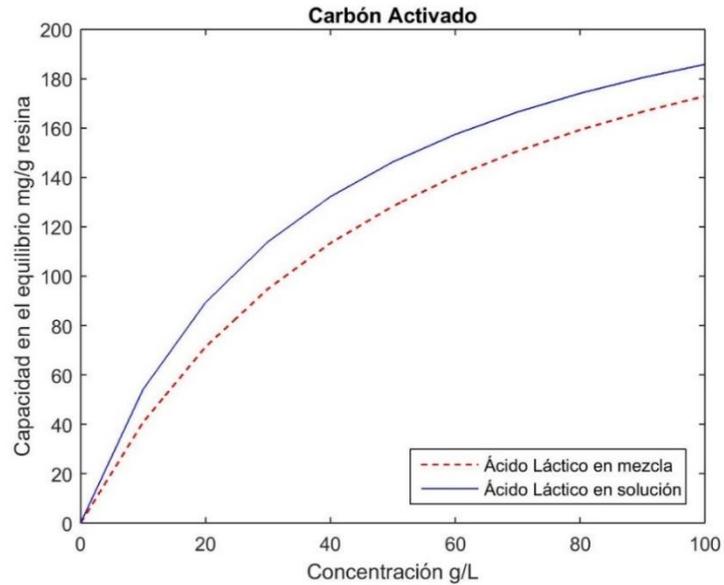
**Gráfica 9.** Isotherma de adsorción para el ácido láctico en solución acuosa y mezcla ternaria en medio fermentativo con adsorbente sólido Amberlite XDA-7.



Fuente: elaboración propia

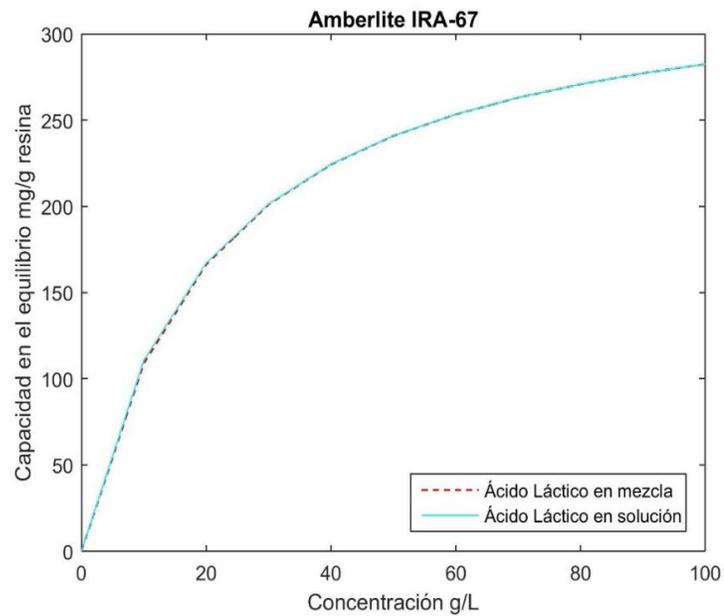
<sup>38</sup> TONG, Wang Yu, et al. Op. cit., p.2.

**Gráfica 10.** Isotherma de adsorción para el ácido láctico en solución acuosa y mezcla ternaria en medio fermentativo con adsorbente Carbón activado



Fuente: elaboración propia

**Gráfica 11.** Isotherma de adsorción para el ácido láctico en solución acuosa y mezcla ternaria en medio fermentativo con adsorbente Amberlite IRA 67.



Fuente: elaboración propia

En las anteriores gráficas se aprecia y confirma que es la resina Amberlite IRA-67 la que tiene prevalencia en la adsorción del ácido láctico, esto gracias a las características físicas de la resina, su porosidad, área superficial y afinidad por el ácido láctico. Estos resultados validan el modelo IAST-Langmuir, y la solución numérica ejecutada, siendo así el modelo IAST un modelo de predicción aceptado para este tipo de estudios.

**4.1.3 Selectividad.** La selectividad suele representar una de las características más importantes a la hora de escoger el adsorbente adecuado. La selectividad representa de manera simple la descripción de equilibrio en soluciones multicomponentes, la selectividad de un compuesto *i* respecto de otro *j*,  $S_{ij}$ , se define como el cociente de sus relaciones molares en la fase adsorbida y fluida

$$S_{ij} = \frac{x_i/x_j}{y_i/y_j} \quad \text{Ec. 14}$$

donde *x* es la fracción molar en la fase adsorbida e *y* es la fracción molar de la fase fluida.

**Tabla 11.** Selectividad de los adsorbentes en mezcla ternaria ideal.

<b>Mezcla ternaria ideal</b>			
<b>Adsorbente</b>	<b>Selectividad Láctico en Ácido Fórmico @ 37g/L de Ácido Láctico</b>	<b>Ácido</b>	<b>Selectividad en Ácido Acético @ 37g/L de Ácido Láctico</b>
<b>Amberlite IRA-67</b>	448,462		294,350
<b>Amberlite XDA-7</b>	1,439		0,198
<b>Carbón activado</b>	10,452		0,302

Fuente: elaboración propia

**Tabla 12.** Selectividad de los adsorbentes en mezcla ternaria-medio fermentativo.

<b>Mezcla ternaria de medio fermentativo</b>			
<b>Adsorbente</b>	<b>Selectividad Láctico en Ácido Fórmico @ 71.5g/L de Ácido Láctico</b>	<b>Ácido</b>	<b>Selectividad en Ácido Acético @ 71.5 g/L de Ácido Láctico</b>
<b>Amberlite IRA-67</b>	3988		2277
<b>Amberlite XDA-7</b>	1,539		0,295
<b>Carbón activado</b>	3,186		0,250

Fuente: elaboración propia

En la tabla 11 y 12 se presenta la selectividad obtenida con IAST-Langmuir en donde se observa que el adsorbente sólido Amberlite IRA-67 presenta la mayor selectividad en comparación con los otros dos adsorbentes sólidos, esto está asociado con la alta afinidad que tiene el ácido láctico con dicha resina, este resultado comprueba que la Amberlite IRA-67 tendrá predilección de adsorción por el ácido láctico en comparación con los otros ácidos presentes en el sistema; por otro lado, se aprecia que la selectividad es mayor cuando el ácido láctico se presenta en concentraciones altas, sin embargo, para hacer un estudio completo en todo el rango de concentraciones, es necesario encontrar la densidad de cada punto de concentraciones por lo cual es necesario un modelo termodinámico puesto que el volumen específico del sistema no será constante. Este estudio no entra en las delimitaciones del proyecto.

## 5. MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN-ESTADO DEL ARTE

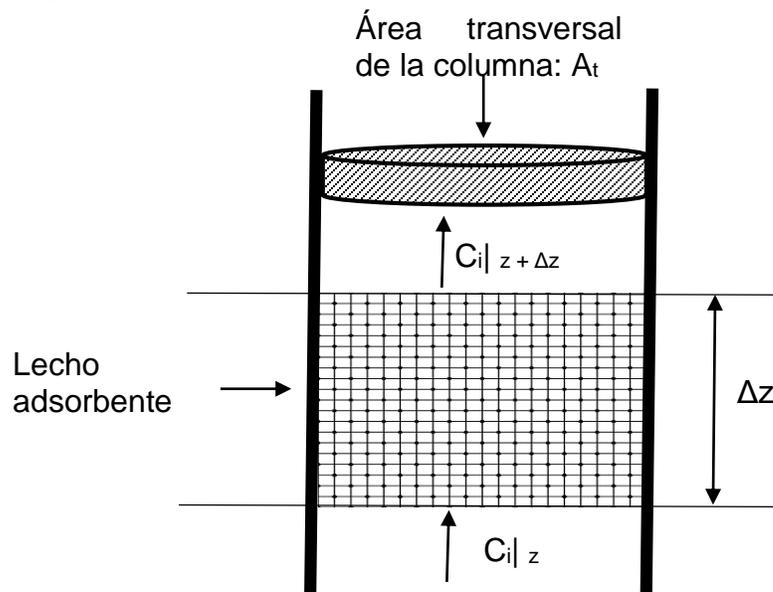
A la hora de realizar el modelamiento y simulación de la fenomenología de adsorción para el sistema ternario de ácido láctico es necesario hacer un estudio a las ecuaciones que gobiernan dicha fenomenología; cada una de estas ecuaciones contienen términos que describen el balance de masa, energía y momentum; para describir el balance de especie en las ecuaciones se utilizan términos fuente propios del proceso de adsorción, estos términos fuente están directamente relacionados con las isothermas de adsorción vistos en los anteriores capítulos, pues es necesario utilizar valores como capacidad de adsorción propios de las isothermas.

### 5.1 ECUACIONES QUE GOBIERNAN LA FENOMENOLOGÍA DE LA ADSORCIÓN

**5.1.1 Ecuaciones de continuidad de especies.** Es necesario tener en cuenta algunas de las ecuaciones que gobiernan el sistema como lo son las de especie.

**5.1.1.1 Transferencia de especies en fase líquida.** Para modelar la adsorción en columna liquido-sólido de lecho fijo es necesario incluir la transferencia de masa convectiva y la difusión molecular. Las moléculas o iones en la columna pueden moverse en ambas direcciones, axial y radial, sin embargo, para este estudio se considera que todas las secciones transversales son homogéneas y que el movimiento radial es nulo o despreciado. Se considera una sección de la columna cilíndrica de área transversal circular (figura 5)

**Figura 8.** Volumen de control para un lecho fijo



Fuente: elaboración propia

La ecuación 15 corresponde al balance de especie para una altura  $\Delta z$ , donde se tiene en cuenta el neto por convección, la acumulación en el lecho fijo, la transferencia del adsorbente y el neto por dispersión axial.

$$D_z A_t \Delta z \varepsilon \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} + \varepsilon u A_t C_i|_z = \varepsilon u A_t C_i|_{z+\Delta z} + \varepsilon u A_t \Delta z \frac{\partial C_i}{\partial t} + (1 + \varepsilon) A_t \Delta z \rho_p \frac{\partial q_i}{\partial t} \quad \text{Ec. 15}$$

donde  $A_t$  es el área transversal,  $C_i$  es la concentración en el componente  $i$ ,  $z$  es el eje axial del lecho,  $\varepsilon$  es la fracción de lecho vacío,  $\rho_p$  es la densidad de partícula,  $D_z$  es el coeficiente de dispersión axial y  $q_i$  corresponde a la carga promedio en la superficie de la partícula  $i$  de adsorbato por unidad másica de adsorbente.

Se adquiere una ecuación de conservación masiva macroscópica para representar la relación entre las variaciones correspondientes, la cual se rige bajo la siguiente ecuación conceptual

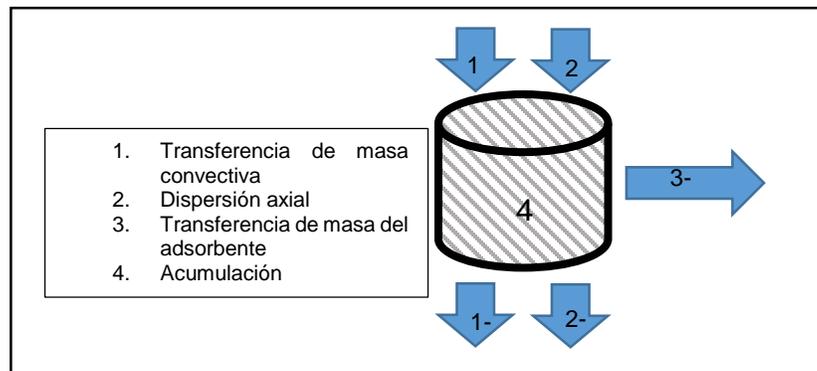
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Neto por} \\ \text{dispersión axial} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Neto por} \\ \text{convección} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Transferencia} \\ \text{del adsorbente} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Acumulado} \end{array} \right\} \quad \text{Ec. 16}$$

Igualando la ecuación 15 a 0, dividiendo la todos los términos entre  $\varepsilon A_t \Delta z$  y tomando el limite cuando  $\Delta z = 0$  se obtiene la ecuación 17 el balance de masa diferencial para un lecho fijo.

$$u \frac{\partial C_i}{\partial z} + \frac{\partial C_i}{\partial t} + \rho_p \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \frac{\partial q_i}{\partial t} - D_z \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} = 0 \quad \text{Ec. 17}$$

La figura 6 describe el volumen de control como se muestra en la ecuación 17.

**Figura 9.** Diagrama esquemático de la conservación másica de un volumen de control



Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta las siguientes suposiciones, el modelo para la transferencia de masa del sistema a estudiar se rige bajo la ecuación 18

- La operación del lecho fijo es isotérmica.
- Se desprecia la convección y dispersión en el espacio radial.
- Se considera solo la adsorción del ácido láctico
- Se toma en cuenta la dispersión axial.
- Se deprecia todas aquellas reacciones químicas, solo se presenta fisisorción

$$\frac{\partial C_{AL}}{\partial t} - D_L \frac{\partial^2 C_{AL}}{\partial z^2} + u \frac{\partial C_{AL}}{\partial z} + \rho_p \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \frac{\partial q_{AL}}{\partial t} = 0 \quad Ec. 18$$

Las condiciones iniciales y de frontera para la anterior ecuación son:

$$t=0 \rightarrow C(z,t)=0$$

$$t=0 \rightarrow q(z,t)=0$$

$$z=0 \rightarrow C(0,t=0)=0, C(0,t>0)= C_F$$

$$z=H \rightarrow \frac{\partial C}{\partial z} = 0$$

donde  $C_F$  es la concentración inicial del afluente, y H es la altura del lecho.

### Conservación másica

El término fuente del balance de transferencia de masa del fluido corresponde a la fenomenología que rige la transferencia de masa del adsorbente y se representa mediante la ecuación 19.

$$S_m = - \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \rho_p \frac{\partial q_{AL}}{\partial t} \quad Ec. 19$$

**5.1.1.2 Cinética de adsorción.** El modelo cinético de adsorción describe la cantidad de cambio en la masa del líquido absorbido en el tiempo debido a la transferencia de masa entre las partículas sólidas adsorbentes y el líquido externo, que es la velocidad de transferencia de masa de adsorción del líquido<sup>39</sup>, la cinética de adsorción se evalúa mediante el modelo de fuerza motriz lineal (LFD). El modelo de

---

<sup>39</sup> LI, Shuangjun, DENG. Shuai, ZHAO. Li, ZHAO. Ruikai, HE Junnan. y SUN, Taiwei. Numerical investigations and mathematical models of carbon capture by adsorption- A review. En: Energy Procedia. Elsevier. Vol.;120. (2017); p. 3244–3251.

fuerza motriz lineal (LDF) formula un coeficiente de transferencia de masa agrupada para representar la velocidad de difusión intrapellet, como se escribe en la ecuación 20

$$\frac{\partial q_{AL}}{\partial t} = k_L(q^* - q) \quad \text{Ec. 20}$$

El parámetro  $q$  presenta la cantidad real adsorbida dinámica, mientras que  $q^*$  es el equilibrio de las cantidades adsorbidas.  $k_L$  (s-1) es la constante de tiempo de adsorción o constante de transferencia de masa; se estima a partir de la resistencia microporosa del líquido que pasa a través de materiales porosos como<sup>40</sup>:

$$k_L = \frac{15D_c}{r_c^2} \quad \text{Ec. 21}$$

donde  $r_c$  es el radio del cristal adsorbente,  $D_c$  es el coeficiente de difusión intermicroporoso.

**5.1.1.3 Equilibrio de adsorción.** Para describir el fenómeno de transferencia de masa durante la separación por adsorción, la cantidad de líquido absorbido,  $q^*$ , que se usa para evaluar el rendimiento de adsorción de los adsorbentes, es un parámetro clave a hora de realizar la investigación numérica. El modelo de equilibrio de adsorción que emplea modelos matemáticos para expresar la cantidad de adsorción de equilibrio es reflejado principalmente en el efecto del ajuste de la isoterma de adsorción, para este estudio el modelo utilizado es el modelo de Langmuir que ya se ha descrito en el capítulo anterior y se rige bajo la ecuación 22.

$$q^* = \frac{KC^\circ Q}{1 + KC^\circ} \quad \text{Ec. 22}$$

Donde  $K$  es la constante de Langmuir,  $Q$  la carga máxima de la isoterma de Langmuir y  $C^\circ$  es la concentración en el equilibrio.

---

<sup>40</sup> QASEM, Naef A.A. BEN-MANSOUR, Rached y HABIB, Mohamed A. An efficient CO<sub>2</sub> adsorptive storage using MOF-5 and MOF-177. En: Applied Energy. Vol.; 210. (2018); p. 317–326.

**5.1.2 Conservación de la energía.** La ecuación del balance de energía es similar a usada clásicamente para describir los flujos en medios porosos. Incluye, sin embargo, un término fuente que considera la liberación de energía durante el proceso de adsorción. Esta ecuación supone que los medios sólidos y fluidos son homogéneos, y en particular que su energía y conductividad están modeladas por una ley mixta<sup>41</sup>. La ecuación de energía para la separación de AL muestra el equilibrio entre la energía almacenada en el lecho adsorbente y el cambio en la energía derivada del flujo convectivo, trabajo de presión, difusión térmica y advección, así como la energía liberada y consumida como consecuencia de la adsorción y desorción:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho_f E_f + (1 - \varepsilon)\rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho_f E_f + p)) = \nabla \cdot [k_{eff}\nabla T] + S_h \quad Ec.23$$

donde:

$$E_f = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad Ec.24$$

$$E_s = h \quad Ec.25$$

Siendo  $E_f$  la energía total del líquido,  $E_s$  la energía total del adsorbente,  $\varepsilon$  es la porosidad del lecho,  $\rho_f$  es la densidad del fluido,  $\rho_s$  es la densidad del sólido,  $\vec{v}$  el vector de velocidad total del fluido,  $p$  la presión estática del fluido y  $k_{eff}$  es la conductividad térmica del medio. El parámetro  $k_{eff}$  es calculado mediante la ecuación 26:

$$k_{eff} = \varepsilon k_L + (1 - \varepsilon)k_s \quad Ec.26$$

Donde  $k_L$  y  $k_s$  son las conductividades térmicas del líquido y el adsorbente respectivamente.

La ecuación de energía se usa con un término de fuente de energía que es exotérmico durante la adsorción:

Siendo  $S_m$  el término fuente de transferencia de masa (Ec. 19), y  $\Delta H$  el calor de adsorción que puede ser obtenido mediante la ecuación 28<sup>42</sup>

<sup>41</sup> BOTZUNG, M. CHAUDOURNE, S. GILLA, O. PERRET, Ch. LATROCHE, M. PERCHERON-GUEGAN A. y MARTY, Philippe. Simulation and experimental validation of a Hydrogen storage tank with Metal Hydrides. En: International Journal of Hydrogen Energy. Vol.; 33. No. 1 (2008); p. 98–104.

<sup>42</sup> YE, Feng. XIAO, Jinsheng. HU, Binxiang. BENARD, Pierre y CHAHINE, Richard. Implementation for Model of Adsorptive Hydrogen Storage Using UDF in Fluent. En: Physics Procedia [online]. Vol.; 24. (2012) p. 793–800.

$$S_h = -\Delta H S_m \quad \text{Ec. 27}$$

$$\Delta H = \alpha \sqrt{\ln\left(\frac{q_{max}}{q^*}\right)} \quad \text{Ec. 28}$$

donde  $\alpha$  es la constante  $3180(\text{J mol}^{-1})$ ,  $q_{max}$  es la carga máxima de adsorción y es equivalente al parámetro  $Q$  de la ecuación de Langmuir (Ec. 22) y  $q^*$  es la carga en el equilibrio y es obtenida gracias a la ecuación 22.

**5.1.3 Conservación de momentun.** Las ecuaciones de conservación de momento con la adición de un término fuente de impulso se han utilizado para modelar el flujo del líquido en un medio poroso como una ecuación de flujo de fluido estándar. La ecuación de transporte de momento dependiente del tiempo es similar a la utilizada para los medios porosos homogéneos clásicos<sup>43</sup>. Puede escribirse como:

$$\varepsilon \frac{\partial(\rho_f \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \vec{g} \rho_f + S_i \quad \text{Ec. 29}$$

Donde  $\rho_f$  es la densidad del fluido,  $p$  la presión estática,  $\vec{v}$  el vector de velocidad,  $\bar{\tau}$  es el tensor de estrés,  $\vec{g}$  es el vector de aceleración de la gravedad y  $S_i$  representa un término de fricción adicional debido al medio poroso. Este término fuente explica las interacciones entre el flujo del líquido y el medio sólido poroso y está compuesto de dos partes: un término de pérdida viscosa (Darcy) y un término de pérdida inercial debido a la fuerte variación geométrica de las líneas de flujo en la escala de poros<sup>44</sup>.

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{k} v_i + C_2 \frac{1}{2} |\vec{v}| v_i\right) \quad \text{Ec. 30}$$

donde  $\mu$  es la viscosidad del fluido,  $|\vec{v}|$  es el valor del vector de velocidad, y  $v_i$  es el componente de velocidad en la dirección  $i$ ,  $k$  es la permeabilidad y  $C_2$  es el factor de resistencia inercial:

donde  $D_p$  y  $\varepsilon_v$  son, respectivamente, el diámetro medio de partícula y la porosidad del lecho.

**Tabla 13.** Términos fuente del modelo de adsorción

Modelo	Término fuente	Ec.
--------	----------------	-----

<sup>43</sup> BOTZUNG, Maxime, et al. Op. cit., p 102

<sup>44</sup> QASEM, Naef A.A. BEN-MANSOUR, Rached y HABIB, Mohamed A. An efficient CO2 adsorptive storage using MOF-5 and MOF-177. En: Applied Energy. Vol.; 210. (2018); p. 317–326.

$$k = \frac{D_p^2}{150} \frac{\varepsilon_v^3}{(1 - \varepsilon_v)^2} \quad \text{Ec. 31}$$

$$C_2 = \frac{3.5(1 - \varepsilon_v)}{D_p \varepsilon_v^3} \quad \text{Ec. 32}$$

Conservación de masa	$S_m = -\frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \rho_p \frac{\partial q_{AL}}{\partial t}$	19
Conservación de energía	$S_h = -\Delta H S_m$	27
Conservación de momentum	$S_i = -\left(\frac{\mu}{k} v_i + C_2 \frac{1}{2}  \vec{v}  v_i\right)$	30

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en las ecuaciones 19 y 27 los términos fuente contienen directamente las isothermas de adsorción pues utilizan la capacidad de adsorción del ácido láctico, por eso se hace necesario hacer un estudio detallado de modelos, adsorbentes entre otras variables vistas en los capítulos 2, 3 y 4 respecto a las isothermas de adsorción.

**Figura 10.** Términos fuente de las ecuaciones de control.



Fuente: elaboración propia

## 6. CONCLUSIONES

- El modelo de la isoterma de Langmuir ajusta mejor los datos experimentales de capacidad y concentración en el equilibrio pues los valores de la correlación tienden a 1, los parámetros obtenidos de la isoterma de Langmuir fueron determinados por medio un algoritmo en Matlab, para los ácidos carboxílicos: ácido láctico, ácido fórmico y ácido acético
- El adsorbente sólido seleccionado para el ácido láctico en solución acuosa fue la Amberlite IRA 67, pues reporto datos altos de capacidad (341 mg ácido láctico/g resina), utilizando el modelo de la isoterma de Langmuir.
- El adsorbente sólido seleccionado para el sistema multicomponente fue la Amberlite IRA-67, puesto que la predicción en sistema ternario mostro que la capacidad de adsorción del ácido láctico es alta siendo 210 g de ácido láctico/g resina para una concentración inicial de 37g/L de ácido láctico.
- Se determino la selectividad del sistema ternario por medio de un algoritmo desarrollado en Matlab y Aspen One, en el cual se encontró que la selectividad del ácido láctico para la resina Amberlite (448,46 para una concentración inicial de 37g/L de ácido láctico) es mayor lo cual demuestra una predilección de adsorción del ácido láctico en comparación con los otros ácidos.
- Al momento de hacer un diseño conceptual del equipo es necesario hacer un estudio del modelamiento de la fenomenología de adsorción, el estudio al estado del arte permitió conocer los términos fuente de cada ecuación necesaria para desarrollar dicho modelamiento, estos términos son claves a la hora de utilizar un CFD.

## 7. RECOMENDACIONES

- Para poder hacer un estudio más completo se recomienda utilizar otros modelos de isoterma de adsorción como lo son el modelo BET, o Toth, para de esta forma poder realizar una comparación, y encontrar cual es mejor modelo que se ajusta a sistemas acuosos de ácido carboxílicos.
- Al momento de hacer la predicción en sistemas ternarios con el modelo IAST, se recomienda ejecutar el modelo con parámetros de otras isotermas como lo son Freundlich y BET, para así de esta manera encontrar cual predice mejor el comportamiento; es indispensable que para hacer dichos estudios se logre tener datos experimentales del comportamiento de este sistema (ácido láctico, fórmico y acético).
- Es importante aplicar otros modelos de predicción de adsorción de sistemas multicomponentes encontrados en la literatura para así poder encontrar el modelo adecuado a la hora de hacer estudios de adsorción en sistemas de ácidos carboxílicos.
- Implementar los balances y ecuaciones descritas en el estado del arte, que se refiere al modelamiento y simulación de la fenomenología de adsorción en sistemas ternarios de ácidos carboxílicos y lograr un diseño conceptual del equipo de adsorción.
- Comparar otros modelos de predicción con datos experimentales en este sistema ternario

## BIBLIOGRAFÍA

BAYAZIT, Şahika Sena. INCI, Ismail y USLU, Hasan. Adsorption of lactic acid from model fermentation broth onto activated carbon and amberlite IRA-67. En: Journal of Chemical and Engineering Data. Vol.; 56. No. 5 (2011); p. 1751–1754.

BOTZUNG, M. CHAUDOURNE, S. GILLA, O. PERRET, Ch. LATROCHE, M. PERCHERON-GUEGAN A. y MARTY, Philippe. Simulation and experimental validation of a Hydrogen storage tank with Metal Hydrides. En: International Journal of Hydrogen Energy. Vol.; 33. No 1 (2008); p. 98–104.

DATTA, Rathin y HENRY, Michael. Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies — a review. En: Journal of chemical technology & biotechnology. Vol.; 81. No 7(Jul); p. 1119-1129.

FIGUEROA, Danilo. MORENO, Anderson y HORMAZA, Angelina. Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Vol.; 14. No. 26 (2015); p.105–120.

GANGULY, S. K. y GOSWAMI, A. N. Surface diffusion kinetics in the adsorption of acetic acid on activated carbon. En: Separation Science and Technology. Vol.; 31. No 9 (1996); p. 1267–1278.

GOTTUMUKKALA, Lalitha Devi. PARAMESWARAN, Binod. VALAPPIL, Sajna Kuttavan. PANDEY, Ashok. y SUKUMARAN, Rajeev Kumar. Growth and butanol production by Clostridium sporogenes BE01 in rice straw hydrolysate: Kinetics of inhibition by organic acids and the strategies for their removal. En: Biomass Conversion and Biorefinery. Vol.; 4. No 3 (2014); p. 277–283.

HĚOVÁ, Věra. MELZOCH, Karel. RYCHTERA, Mojmír y SEKAVOVÁ, Barbora. Electrodialysis as a useful technique for lactic acid separation from a model solution and a fermentation broth. En: Desalination. Vol. 162, No 1–3 (2004), p. 361–372.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: El Instituto, 2008, p. 1-42

\_\_\_\_\_. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: El Instituto, 2008, p.1-38

\_\_\_\_\_. Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 4490. Bogotá: El Instituto, 1998, p.1-27

KOMESU, ANDREA. WOLF MACIEL, MARIA. ROCHA DE OLIVEIRA. Purification of Lactic Acid Produced by Fermentation: Focus on Non-traditional Distillation Processes. En: Separation and Purification Reviews [online]. Vol.; 46, No. 3 (2017); p. 241–254.

LAZO, José. Síntesis y caracterización de arcillas organofílicas y su aplicación como adsorbentes del fenol. En: Revista de la sociedad química del Perú. Vol.; 74. No 1 (2008); p. 3-19.

LI, Hong, MUSTACCHI. Roberta, KNOWLES. Christopher J. SKIBAR, Wolfgang. SUNDERLAND, Garry. DALRYMPLE, Ian y JACKMAN, Simon A. An electrokinetic bioreactor: Using direct electric current for enhanced lactic acid fermentation and product recovery. En: Tetrahedron. Vol.; 60. No. 3 (2004); p. 655–661.

LI, Qian-Zhu. JIANG, Xing-Lin. FENG, Xin-Jun. WANG, Ji-Ming. SUN, Chao. ZHANG, Hai-Bo. XIAN, Mo y LIU, Hui-Zhou. Recovery Processes of Organic Acids from Fermentation Broths in the Biomass-Based Industry. En: Journal of Microbiology and Biotechnology. Vol.; 26. No. 1 (2016); p. 1–8.

LI, Shuangjun, DENG. Shuai, ZHAO. Li, ZHAO. Ruikai, HE Junnan. y SUN, Taiwei. Numerical investigations and mathematical models of carbon capture by adsorption-A review. En: Energy Procedia. Elsevier. Vol.; 120. (2017); p. 3244–3251.

LIU, Baojian. LIU, Shiwang. LIU, Tiebing y MAO, Jianwei. A novel granular activated carbon adsorption method for separation of levulinic acid from formic acid. En: Advanced Materials Research. Vol.; 553. (2012); p. 1691–1695.

LÓPEZ GARZÓN, Camilo S. y STRAATHOF, Adrie J.J. Recovery of carboxylic acids produced by fermentation. En: Biotechnology Advances. Vol.; 32. No 5 (2014); p. 873–904.

MADZINGAIDZO, L. DANNER, H. y BRAUN, R. Process development and optimisation of lactic acid purification using electrodialysis. En: Journal of Biotechnology. Vol.; 96. No 3 (2002); p. 223–239.

MORENO, Lina. TORRES, Daniel. y MORALES, Yovanny. Caracterización de un caldo fermentado y su separación por un proceso híbrido. Bogotá D.C. 2017. Fundación Universidad de América.

MURCIA, Neyfe. CIFUENTES, Jhoan. y MORALES, Yovanny. Modelamiento y diseño conceptual de la separación de lactato mediante electrodiálisis. Bogotá D.C, 2017 Fundación Universidad de América.

QASEM, Naef A.A. BEN-MANSOUR, Rached y HABIB, Mohamed A. An efficient CO<sub>2</sub>adsorptive storage using MOF-5 and MOF-177. En: Applied Energy. Vol.; 210. (2018); p. 317–326.

RENGE, V. KHEDKAR, S C. y PANDE, Shraddha V. Removal of Heavy Metals From Wastewater Using Low Cost Adsorbents: a Review. En Sci. Revs. Chem. Commun. Vol.; 2. No 4 (2012); p. 580–584.

SEADER, J. D. HENLEY, Ernest. J. y ROPER, D. K. Separation Process Principles, Chemical and Biochemical Operations. New York: John Wiley & Sons, 2011

SERNA-COCK, L. y STOUVENEL, A. Rodríguez-de. Producción Biotecnológica De Ácido Láctico: Estado Del Arte Biotechnological Production of Lactic Acid. En: Ciencia y Tecnologia Alimentaria Vol.; 5 N. 1 (2005), p. 54–65.

SIMON, Cory M. SMIT, Berend y HARANCZYK, Maciej. Py IAST: Ideal adsorbed solution theory (IAST) Python package. En: Computer Physics Communications. Vol.; 200. (2016); p. 364–380.

TONG, Wang Yu. FU, Xiang Yang. LEE, Sang Mok. YU, Jie. LIU, Jian Wen. WEI, Dong Zhi y KOO, Yoon Mo. Purification of L(+)-lactic acid from fermentation broth with paper sludge as a cellulosic feedstock using weak anion exchanger Amberlite IRA-92. En: Biochemical Engineering Journal. Vol.; 18. No 2 (2014); p. 89–96

USLU, Hasan y MAJUMDER, Subhajit. Adsorption Studies of Lactic Acid by Polymeric Adsorbent Amberlite XAD-7: Equilibrium and Kinetics. En: Journal of Chemical and Engineering Data. Vol.; 62. No 4 (2017); p. 1501–1506.

USLU, Hasan. Adsorption equilibria of formic acid by weakly basic adsorbent Amberlite IRA-67: Equilibrium, kinetics, thermodynamic. En: Chemical Engineering Journal. Vol.; 155. No 1–2 (2009); p. 320–325.

USLU, Hasan. INCI, Ismail y BAYAZIT, Şahika Sena. Adsorption equilibrium data for acetic acid and glycolic acid onto amberlite IRA-67. En: Journal of Chemical and Engineering Data. Vol.; 55. No 3 (2010); p. 1295–1299.

VERA, Bolis. Aline Auroux (eds.). Calorimetry and Thermal Methods in Catalysis. 1. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer Series in Materials Science 154., 2013.

