VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Evaluación de la cinética en la producción de ácido cítrico a partir de una mezcla de residuos de granada, piña y mango en el municipio de Guanajuato.

Evaluation of the kinetics in the production of citric acid from a mixture of pomegranate, pineapple and mango waste in the municipality of Guanajuato.

Luz Elena Romero Flores[1], Mariana Estefanía López Manzano[1], Uriel Alejandro Delgado Ramírez[1], Mario Enrique Sandoval Vergara[2], Guillermo Manuel González Guerra[3,4], Fernando Israel Gómez Castro[4]

[1]Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México.
[2]Departamento de Biología, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México.
[3]SECIHTI, México.
[4]Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México.
le.romeroflores@ugto.mx, me.lopezmanzano@ugto.mx, ua.delgadoramirez@ugto.mx

Resumen

Actualmente, el manejo ineficiente de residuos agroalimentarios constituye un desafío crítico para la sostenibilidad ambiental en el estado de Guanajuato. En este estudio se evaluó la viabilidad de utilizar una mezcla de residuos (granada, piña y mango) en diferentes proporciones como sustrato para la producción de ácido cítrico mediante la fermentación con *Aspergillus niger*. Se analizó el efecto de distintas proporciones de biomasa en la producción de ácido cítrico. El producto obtenido se caracterizó mediante espectroscopía UV-Vis, titulación ácido-base y refractometría. Se obtuvo una concentración de hasta 2.826 g/L de ácido cítrico, lo que indica que los residuos de granada, piña y mango pueden aprovecharse como materia prima para su obtención mediante fermentación. Los resultados demuestran el potencial de estos subproductos para integrarse en esquemas de economía circular, optimizando las rutas de aprovechamiento de azúcares residuales en compuestos de alto valor agregado.

Palabras clave: *Aspergillus niger,* ácido cítrico, azúcares.

1.Introducción

La generación de residuos agroalimentarios constituye un problema ambiental debido al volumen de desechos generados y a la limitada reutilización que reciben actualmente. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en 2022 la cantidad promedio diaria de residuos sólidos urbanos recolectados en México fue de 108 146 toneladas por medio del sistema de recolección casa por casa [1]. Una gran parte de estos residuos se desecha sin recibir un aprovechamiento que permita su reincorporación a nuevos procesos productivos. Sin embargo, los residuos agroalimentarios aportan una fuente de azúcares fermentables que pueden emplearse como sustrato para la producción de ácido cítrico usando fermentación, constituyendo una alternativa para su aprovechamiento.

Según el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), México produjo 10 822 toneladas de granada en 2023. De esta cifra, Guanajuato contribuyó con 1 253 toneladas, ocupando el tercer lugar a nivel nacional. Este cultivo se desarrolla principalmente en Apaseo el Alto, aunque también se produce en los municipios de Apaseo el Grande, Acámbaro, Abasolo y Huanímaro [2]. Debido a que la cáscara generalmente no se consume, la granada constituye una fuente importante de residuos agroalimentarios con posibilidad para su aprovechamiento. Asimismo, Guanajuato produce anualmente alrededor de 120 toneladas de mango criollo en una superficie aproximada de 10 hectáreas [3].

Por otra parte, la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural reportó que México produjo 1 209 000 toneladas de piña en 2020 [4]. Aunque en Guanajuato la producción de piña no es representativa, a nivel nacional se generan grandes volúmenes de este fruto, lo que da lugar a una importante cantidad de residuos agroalimentarios que pueden aprovecharse como materia prima en procesos biotecnológicos.

La economía circular promueve el aprovechamiento de los residuos agroalimentarios a través de su transformación en materia prima para nuevos procesos productivos. Este enfoque permite aprovechar los residuos, reducir su disposición final y disminuir el impacto ambiental. En este contexto, los residuos de granada, mango y piña representan una fuente de azúcares fermentables que pueden emplearse como sustrato para la producción de ácido cítrico empleando fermentación con *Aspergillus niger*. La reutilización de estos residuos favorece la obtención de compuestos de valor agregado, contribuyendo al desarrollo de procesos más sostenibles y al fortalecimiento de la economía circular.

El ácido cítrico ($C_6H_8O_7$) es un ácido orgánico tricarboxílico con un peso molecular de 192.124 g/mol. Se presenta como un sólido cristalino blanco e inodoro y posee una amplia aplicación en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética, donde se utiliza como acidulante, conservador, regulador de pH y agente quelante. Su importancia industrial radica en que contribuye a mejorar la calidad, estabilidad e inocuidad de diversos productos [5].

Aspergillus niger es un hongo filamentoso ampliamente distribuido en el medio ambiente y reconocido por su capacidad para degradar materia orgánica. Se caracteriza por presentar hifas ramificadas y conidióforos que producen conidios de color negro, de donde proviene su nombre *niger* [6]. Este hongo se utiliza ampliamente en la industria para la producción de enzimas, como amilasas y pectinasas, además de ser uno de los principales microorganismos empleados en la producción de ácido cítrico con fermentación. Su capacidad para aprovechar diferentes fuentes de carbono y su alto rendimiento lo convierten en un microorganismo de gran importancia en procesos biotecnológicos.

Las cáscaras de granada, piña y mango contienen azúcares y pectina, por lo que pueden utilizarse como sustrato para la fermentación. Durante este proceso, *Aspergillus niger* produce enzimas como las pectinasas, que degradan la pectina y favorecen la liberación de azúcares, los cuales son aprovechados por el hongo para la producción de ácido cítrico.

Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar la cinética de producción de ácido cítrico gracias a la fermentación con *Aspergillus niger* utilizando una mezcla de residuos agroalimentarios de granada, piña y mango generados en el municipio de Guanajuato, con el propósito de analizar su aprovechamiento como sustrato alternativo para la producción de compuestos de valor agregado.

2. Materiales y métodos

2.1 Materia prima

Fueron recolectadas muestras de residuos de granada, piña y mango con los comerciantes del Mercado Hidalgo ubicado en Guanajuato Capital.

2.2 Secado y pesado

La cáscara de la fruta se deshidrató utilizando un deshidratador SAGAON Tech V2. Posteriormente, para cada síntesis se empleó un total de 24 g de muestra deshidratada.

2.3 Síntesis

Propuesta de diseño de experimentos para las diferentes proporciones de residuos

Para la etapa de síntesis se diseñaron diferentes formulaciones utilizando residuos de granada, piña y mango. Las proporciones utilizadas en cada tratamiento se presentan en la Tabla 1 y 2.

Tabla 1. *Composición de las síntesis evaluadas en proporción 1:1:1 mediante fermentación sólida y liquida.*

Síntesis	Granada	Piña	Mango
S1	1	1	1
S2	1	1	1
L1	1	1	1

Tabla 2. *Composición de las síntesis sólidas a diferentes proporciones.*

Síntesis	Granada	Piña	Mango
S3	2	1	1
S4	1	2	1
S5	1	1	2

2.4 Hidrólisis y Neutralización

En la Figura 1 se muestra la metodología utilizada para esta etapa, en donde se realizó la hidrólisis de cada una de las muestras mediante la adición de 100 mL de H_2SO_4 al 0.5% (v/v). Posteriormente, las mezclas se calentaron a 60 °C durante 1 h. Finalizada la hidrólisis, la fracción sólida se recuperó por filtración y se neutralizó ajustando el pH a aproximadamente 5 mediante la adición de NaOH 0.1 M.

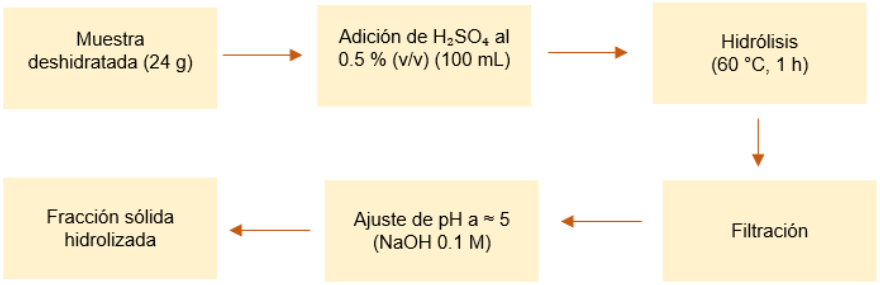


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología para la hidrólisis ácida y neutralización de la materia prima.

2.5 Fermentación

La etapa fermentativa se llevó a cabo mediante el cultivo del hongo *Aspergillus niger*. La siembra, propagación y cuantificación del inóculo se realizaron de acuerdo con la metodología mencionada en la Figura 2. Una vez determinada la concentración del microorganismo, las muestras fueron sometidas a un proceso de fermentación a una temperatura controlada durante un periodo de cuatro y seis días. Durante el periodo de

fermentación, el medio de cultivo se expuso a una atmósfera de nitrógeno con el propósito de minimizar procesos de oxidación y preservar la estabilidad de los compuestos de interés. Posteriormente, se efectuó la separación de las fases mediante centrifugación utilizando una centrífuga electrónica, operando a 2500 rpm durante 20 min, con el fin de recuperar la fracción líquida y separar el material sólido residual, como se muestra en la Figura 3. Durante esta etapa se monitorearon valores de pH, % de humedad y temperatura del medio ambiente con la finalidad de corroborar las condiciones en las que el hongo es viable.

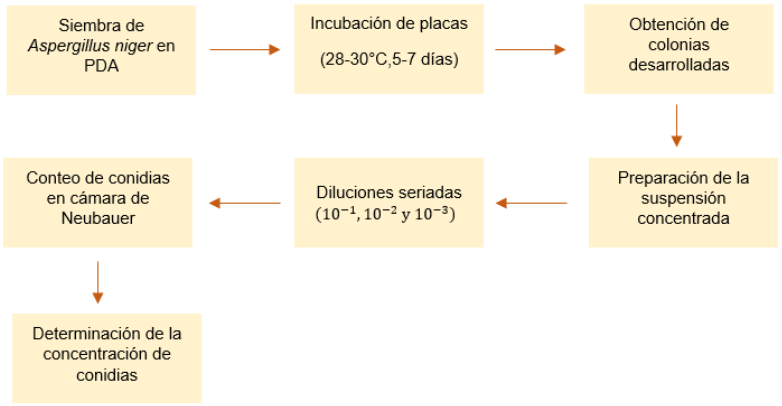


Figura 2. Diagrama de la metodología para la siembra de Aspergillus niger.

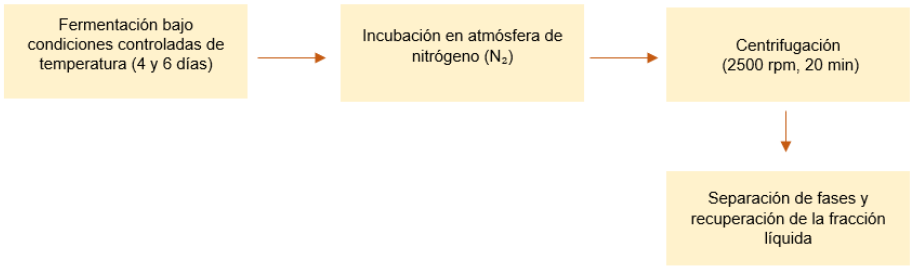


Figura 3. Diagrama de la metodología para el proceso de fermentación y recuperación de la fracción líquida.

2.6 Purificación

Una vez finalizada la fermentación, las aguas madres obtenidas después de la centrifugación fueron sometidas a un proceso de purificación. En primer lugar, el pH se ajustó a un intervalo de 6.5–7.5 mediante la adición de $Ca(OH)_2$ al 5 %, manteniendo agitación constante durante 30 min para favorecer la formación de citrato cálcico. Posteriormente, la mezcla se centrifugó a 2500 rpm durante 20 min para recuperar el precipitado obtenido. Después, el citrato cálcico se trató con H_2SO_4 al 10 % hasta alcanzar un pH cercano a 2, lo que permitió obtener el ácido cítrico en solución y precipitar el sulfato de calcio. Finalmente, la solución se separó del precipitado y se mantuvo en un baño de hielo a −4 °C durante 24 h para completar el proceso de purificación, en la Figura 4 se presenta un resumen de la metodología descrita anteriormente.

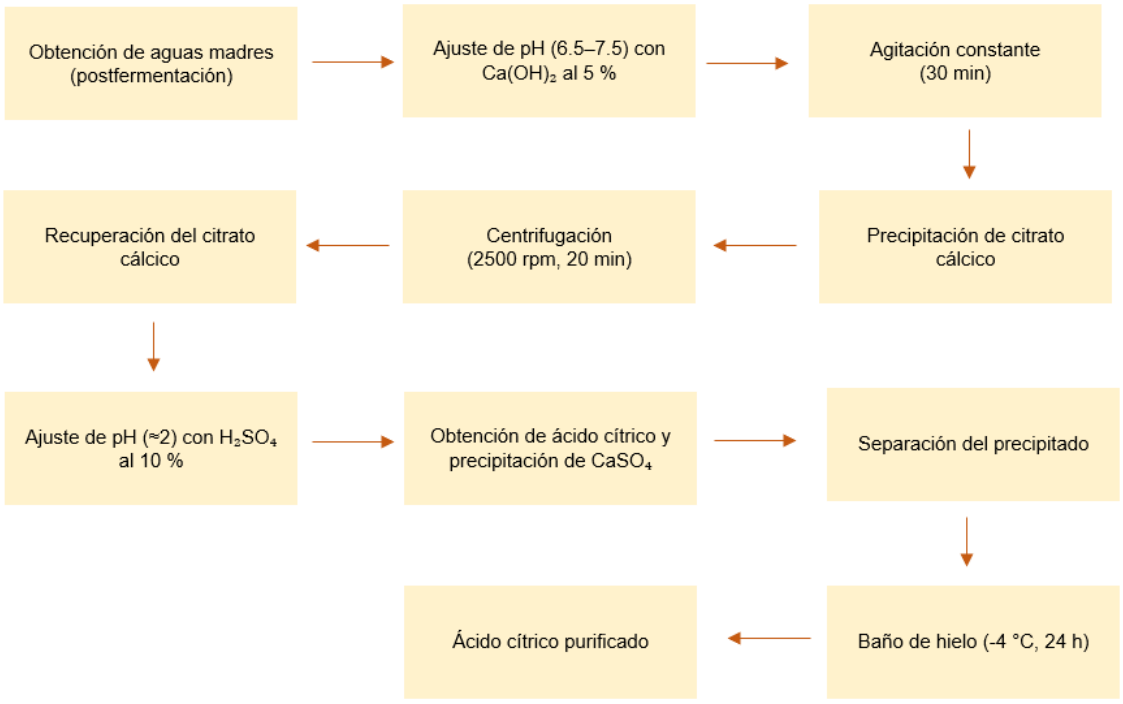


Figura 4. Diagrama de la metodología para la purificación del ácido cítrico obtenido mediante fermentación de residuos de granada, piña y mango

2.7 Caracterización de la muestra

2.7.1 °Brix

Como primera parte de la caracterización de la muestra, se determinaron los grados Brix (°Bx), ya que este parámetro permite estimar el porcentaje de azucares solubles presentes. Dicha medición se llevó a cabo utilizando un refractómetro.

2.7.2 UV-Visible

La concentración de ácido cítrico se determinó por espectroscopia UV-Vis a una longitud de onda de 420 nm. Para ello, las muestras obtenidas durante la fermentación se diluyeron mezclando 500µL de la solución madre de ácido cítrico con 500 µL de agua desionizada. Posteriormente, se agregaron 650 µL de piridina y 2850 µL de anhídrido acético para llevar a cabo la reacción colorimétrica. La mezcla se dejó reposar durante 20 min hasta que alcanzó la temperatura ambiente y, finalmente, se realizaron las lecturas de absorbancia correspondientes.

2.7.3 Cuantificación

Se realizó espectrofotometría UV-Visible para cuantificar la concentración de la muestra a partir de su absorbancia. Previamente, se elaboró una curva de calibración utilizando soluciones patrón de concentración conocida, con el fin de establecer la relación entre absorbancia y concentración.

2.7.4 Titulación ácido-base para ácido cítrico

El pKa del ácido cítrico obtenido en las muestras S1, S2 y L1 se determinó mediante una titulación ácido-base utilizando NaOH 0.1 M como titulante, mientras que el pKa del ácido cítrico obtenido en las muestras S3, S4 y S5 se utilizaron diferentes concentraciones de NaOH como titulante. Para la muestra S3 se empleó NaOH 0.01 M, para la muestra S4 se utilizó NaOH 0.05 M y para la muestra S5 se empleó NaOH 0.1 M. En todos los casos, el punto de equivalencia se identificó mediante fenolftaleína como indicador y se corroboró con mediciones de pH realizadas después de cada adición del titulante.

Estadístico

3. Resultados y discusión

3.1. Cinética de consumo de sólidos solubles totales (SST) (°Brix)

En las Tablas 3 y 4 se presentan las condiciones registradas durante la fermentación, incluyendo temperatura, pH y % humedad, parámetros que influyen directamente en el metabolismo de *Aspergillus niger* y, por tanto, en el aprovechamiento de los azúcares presentes en las muestras, sugiriendo que los carbohidratos disponibles fueron utilizados como fuente de carbono y energía para la formación de biomasa y la síntesis de ácido cítrico, comportamiento que coincide con lo reportado en la literatura [7].

Tabla 3. *Registro diario de las condiciones ambientales de temperatura, humedad relativa y pH durante la fermentación de las muestras S1, S2 y L1 a lo largo de 4 días.*

Dia	0	1	2	3
Temperatura	24.7°C	22.8°C	24.2°C	23.8°C
Humedad	52%	56%	54%	51%
Muestra	S1			
pH	5	5	5	5
Muestra	S2			
pH	5	5	5	5
Muestra	L1			
pH	5	5	5	5

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Tabla 4. *Registro diario de las condiciones ambientales de temperatura, humedad relativa y pH durante la fermentación de las muestras S3, S4 y S5 a lo largo de 6 días.*

Día	0	1	2	3	4	5
Temperatura	25.1°C	24.1°C	23.9°C	23.5°C	23.0°C	22.8°C
Humedad	47%	48%	50%	59%	54%	49%
Muestra	S3					
pH	5	5	5	5	5	5
Muestra	S4					
pH	5	5	5	5	5	5
Muestra	S5					
pH	5	5	5	5	5	5

Por otro lado, la medición de los °Brix durante el periodo de fermentación permitió monitorear la dinámica de los sólidos SST y, por consiguiente, el aprovechamiento de los azúcares fermentables por *Aspergillus niger*. En la Figura 5 se presenta el monitoreo de las muestras S1, S2 y L1, las cuales exhibieron comportamientos diferentes a lo largo de los tres días de fermentación. La muestra L1 mostró una disminución de los °Brix durante el segundo día, seguida de una recuperación al final del proceso, mientras que S2 mantuvo los valores más bajos con una ligera tendencia al incremento, obteniendo valores menores en comparación con S1 Y L1, debido principalmente a una pérdida de sólido en la parte de filtración (sección 2.4), y S1 permaneció prácticamente constante. Estas variaciones sugieren un equilibrio entre el consumo de azúcares fermentables por el microorganismo y la liberación de sólidos solubles como resultado de la hidrólisis enzimática del sustrato [7]. Asimismo, las diferencias observadas entre las fermentaciones en estado sólido y líquido pueden atribuirse a los fenómenos de transferencia de masa, ya que en el medio líquido los nutrientes se encuentran disponibles de forma inmediata, favoreciendo una cinética de consumo diferente a la observada en el medio sólido. Este comportamiento ha sido descrito en fermentaciones con *Aspergillus niger*, donde la producción de enzimas hidrolíticas favorece la degradación de polisacáridos y la liberación de carbohidratos solubles [8].

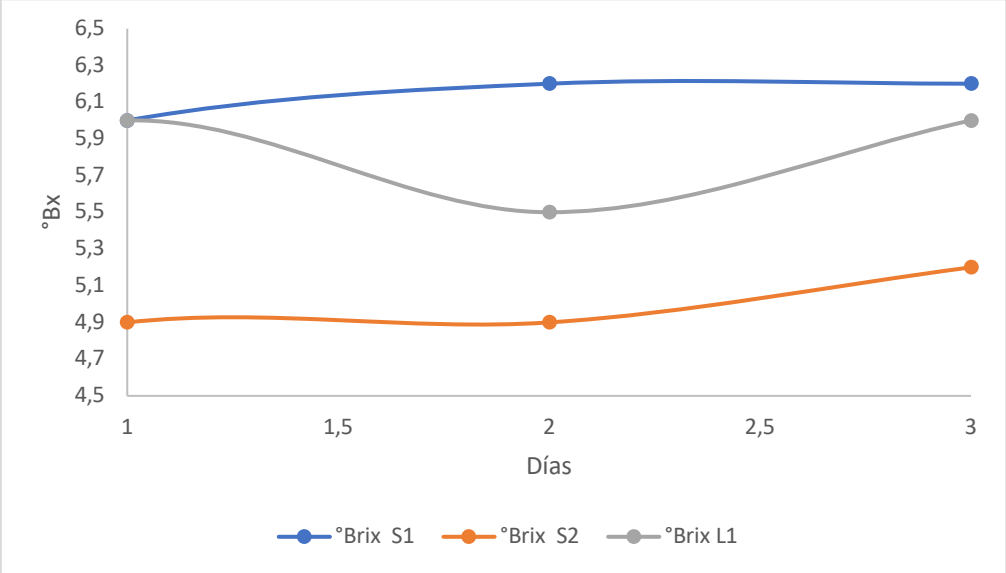


Figura 5. Evaluación de la cinética de fermentación mediante refractometría en las muestras S1, S2 y L1

En la Figura 6 se presentan los cambios en los grados Brix (°Brix) de las muestras S3, S4 y S5 durante cinco días de fermentación. La muestra S4, formulada con una mayor proporción de piña, presentó una disminución de los °Brix a partir del primer día de fermentación, lo que indica un mayor consumo de azúcares fermentables por parte de *Aspergillus niger*. Este comportamiento puede asociarse con el alto contenido de azúcares simples presentes en la piña, principalmente glucosa y fructosa, los cuales son fácilmente metabolizados por el microorganismo y favorecen la síntesis de ácido cítrico como metabolito secundario [7].

En contraste, la muestra S3, con una mayor proporción de granada, mostró una variación mínima en los °Brix a lo largo del proceso fermentativo. Este comportamiento podría estar relacionado con la presencia de compuestos fenólicos y taninos hidrolizables en este fruto, los cuales han sido reportados por presentar actividad antifúngica y podrían limitar parcialmente la actividad metabólica de *Aspergillus niger*, reduciendo la velocidad de consumo de los azúcares disponibles [9].

Por otro lado, la muestra S5, enriquecida con mango, presentó un incremento gradual en los °Brix durante la fermentación. Este aumento podría atribuirse a la acción de enzimas hidrolíticas producidas por *Aspergillus niger*, capaces de degradar polisacáridos y pectinas del fruto, generando azúcares y otros sólidos solubles a una velocidad superior a su consumo metabólico. Este fenómeno ha sido descrito en procesos fermentativos con *Aspergillus niger y Aspergillus ficcum*, donde la producción de enzimas extracelulares modifica la composición del medio y puede ocasionar variaciones en la concentración de sólidos solubles durante la fermentación [10].

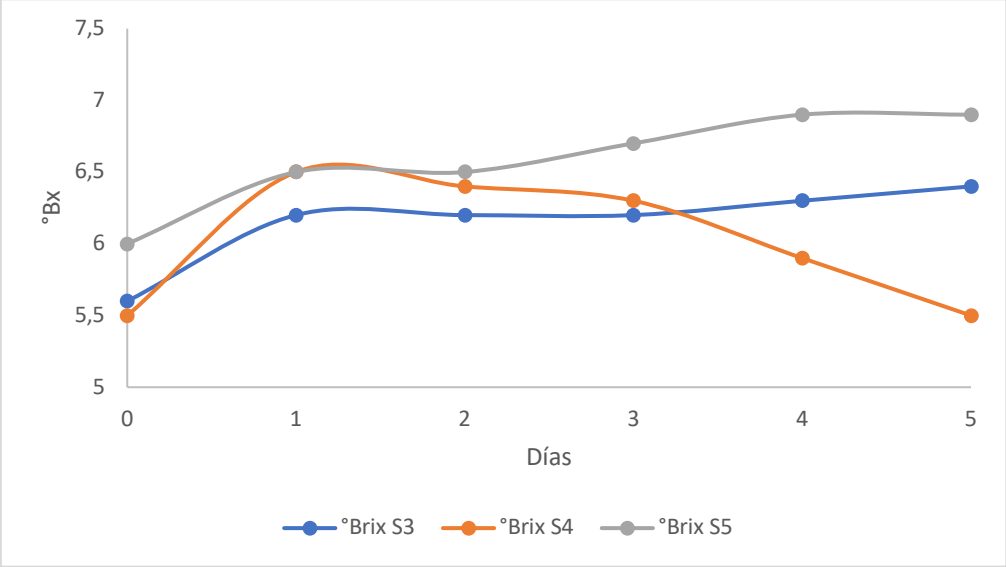


Figura 6. Evaluación de la cinética de fermentación mediante refractometría en las muestras S3, S4 y S5

A pesar de las variaciones observadas durante el monitoreo diario, la tendencia general de los °Brix muestra un consumo progresivo de los azúcares disponibles por parte del microorganismo, comportamiento asociado con la actividad metabólica de *Aspergillus niger* durante la fermentación y la conversión hacia ácido cítrico.

3.2 Cuantificación de ácido cítrico por medio de espectroscopia UV-Vis

La cuantificación de ácido cítrico se realizó con la linealidad de la curva de calibración, obteniendo un coeficiente de determinación con valor de 0.9955, lo que permitió a través la ecuación de la recta calcular las concentraciones de las muestras obtenidas a lo largo de la cinética de producción del ácido cítrico.

En la Figura 7 muestra la variación de la concentración de ácido cítrico durante la fermentación de las síntesis S1, S2 y L1. Se observó que la síntesis S1 presentó las concentraciones más altas durante el periodo de evaluación, alcanzando un valor de 1.98 g/L en el segundo tiempo de muestreo y disminuyendo ligeramente al finalizar el proceso. Por otra parte, L1 mostró concentraciones intermedias, con una disminución en la segunda medición y un incremento hacia el final de la fermentación. En contraste, la síntesis S2 presentó las concentraciones más bajas durante todo el proceso ya que se presentaron pérdidas como se mencionó en la sección 3.1, manteniendo un comportamiento relativamente estable después del segundo tiempo de evaluación. Las tres síntesis mostraron una tendencia similar en la producción de ácido cítrico, aunque con diferencias en la concentración alcanzada. Estas variaciones pueden estar relacionadas con las proporciones utilizadas, y la continua liberación de azucares mencionada anteriormente.

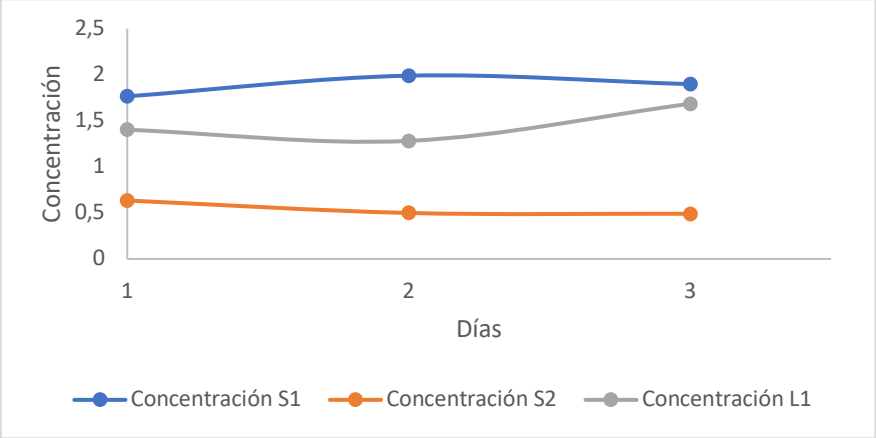


Figura 7. Variación de la concentración de ácido cítrico (g/L) durante la fermentación de las síntesis S1, S2 y L1 en función de los días de conversión.

Respecto a las síntesis con diferentes proporciones presentadas en la Figura 8, los resultados obtenidos mediante espectroscopia mostraron variaciones a lo largo del proceso de fermentación. Las curvas presentaron un aumento inicial, seguido de una disminución durante la etapa intermedia y un nuevo incremento hacia el final del proceso. La síntesis S4, la cual contenía una mayor proporción de piña, alcanzó el valor más alto, con una concentración de 2.82 g/L. Este resultado fue favorable y coincide con lo esperado, debido a que la piña aporta una mayor cantidad de azúcares disponibles que pueden ser aprovechados por *Aspergillus niger* como fuente de energía para su crecimiento y metabolismo. Por otra parte, la disminución observada en todas las muestras no indica que el proceso haya fallado, sino que puede estar relacionada con los cambios metabólicos que presenta el hongo durante las diferentes etapas de la fermentación [11].

Cabe mencionar, que, durante la etapa intermedia del proceso, *Aspergillus niger* puede utilizar parte del ácido cítrico producido como fuente de energía para mantener su desarrollo y la formación de biomasa y micelio. Sin embargo, conforme avanza la fermentación, los nutrientes disponibles disminuyen y la acidez del medio aumenta, generando condiciones de estrés para el microorganismo. Como respuesta a estas condiciones, el hongo disminuye su crecimiento y favorece la acumulación de ácido cítrico en el medio, lo que explica el incremento observado al final del proceso, principalmente en la muestra con mayor contenido de piña. Esta producción está relacionada con mecanismos celulares como el transporte de azúcares y fuentes de nitrógeno hacia el interior de la célula, así como la exportación de citrato hacia el exterior, procesos que permiten a *Aspergillus niger* producir y acumular altas concentraciones de ácido cítrico [8].

El comportamiento de acumulación final de ácido cítrico determinado mediante UV-Vis presentó una relación con los perfiles de °Brix obtenidos para S3, S4 y S5 en la Figura 6. En contraste, las tendencias más estables observadas en los valores de °Brix de S3 (granada) y S5 (mango) durante los primeros días del proceso pueden relacionarse con las concentraciones moderadas de ácido cítrico detectadas por espectroscopia UV-Vis en ese mismo periodo.

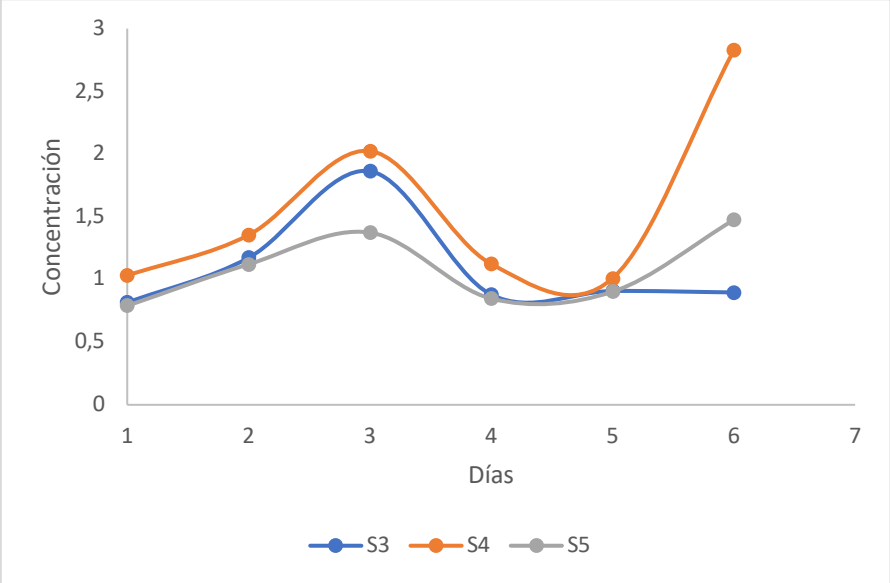


Figura 8. Variación de la concentración de ácido cítrico (g/L) durante la fermentación de las síntesis S3, S4 y S5 en función de los días de conversión.

3.3 Titulación ácido-base del ácido cítrico

En la Tabla 5 se muestran los valores de la titulación para las muestras de la primera serie (S1, S2 y L1) utilizando NaOH 0.01 M. La muestra S1 y la fracción líquida L1 consumieron un mayor volumen de titulante en comparación con S2, lo que coincide con los niveles de acidez observados previamente en la espectroscopía UV-Vis.

***Tabla 5**. Curva de titulación S1, S2 y L1*

Síntesis	Volumen de titulante en mL (NaOH 0.01M)	pH equivalencia
S1	4	8.414
S2	1.4	6.897
L1	6	10.594

Por otro lado, en la Tabla 6 se presentan los resultados correspondientes a las mezclas modificadas (S3, S4 y S5), donde se aprecia el comportamiento característico de un ácido triprótico. En las tres muestras se identifican tres puntos de equivalencia durante la adición de NaOH: el primero entre pH 4.20 y 4.80, el segundo entre 5.55 y 6.22, y el tercero entre 7.95 y 8.19. Estos tres saltos de pH corresponden a la desprotonación gradual de los tres grupos carboxilo de la molécula de ácido cítrico [12].

Al comparar los requerimientos de titulante, la muestra S4 (rica en piña) necesitó la concentración de NaOH más alta (0.05 M) para neutralizar la muestra. Esto confirma que la piña generó la mayor cantidad de ácido cítrico libre en la solución, alineándose con el pico de 2.8 g/L detectado en UV-Vis y el rápido consumo visto por medio de °Brix. En contraste, las muestras S3 (granada) y S5 (mango) requirieron concentraciones menores de base (0.001 M y 0.01 M), lo que indica una síntesis de acidez más moderada debido a la complejidad de sus fibras y compuestos fenólicos.

***Tabla 6**. Curva de titulación de S3, S4 y S5*

Síntesis	Concentración Titulante (NaOH)	Punto de equivalencia (pH)
S3	0.001M	1. 4.801 2. 5.556 3. 8.196
S4	0.05M	1. 4.526 2. 6.223 3. 8.15
S5	0.01M	1. 4.205 2. 6.128 3. 7.951

3.4 Cuantificación de cristales obtenidos tras el proceso de purificación

En la Tabla 7 se presentan los pesos de cristales obtenidos tras el proceso de purificación, se puede apreciar que para la muestra S4 se obtuvo la mayor producción de ácido cítrico, con un peso de 131 mg. Este resultado puede deberse a que una mayor proporción de cáscara de piña aportó más azúcares fermentables, los cuales fueron utilizados por *Aspergillus niger* durante la fermentación para la producción de ácido cítrico. La muestra S3 obtuvo un peso de cristales de108 mg, mientras que S1, S2 y S5 presentaron producciones de 42, 22 y 46 mg, respectivamente. Por otro lado, L1 fue la muestra con la menor producción de ácido cítrico, 10.8 mg. Una posible explicación de los resultados mencionados es que en esta síntesis se trabajó únicamente con la fracción líquida y, durante la separación de las muestras, parte del ácido cítrico pudo haber permanecido en la fracción sólida, por lo que no fue recuperado en el análisis. [13] Esto pudo influir en el bajo rendimiento obtenido. En general, los resultados indican que la proporción de los residuos utilizados influye en la producción de ácido cítrico, siendo la muestra S4 la que presentó el mejor desempeño bajo las condiciones evaluadas.

***Tabla 7**. Producto final (mg) obtenido de ácido cítrico en cada una de las síntesis*

Muestra	mg de ácido cítrico obtenido
S1	42 mg
S2	22 mg
L1	10.8 mg
S3	108 mg
S4	131 mg
S5	46 mg

Conclusiones

Se estableció un proceso eficiente para la obtención de ácido cítrico a partir de residuos agroalimentarios mediante fermentación con *Aspergillus niger*, seguido de una etapa de purificación basada en la precipitación con hidróxido de calcio y posterior tratamiento con ácido sulfúrico. Los resultados obtenidos demostraron que la composición de los residuos agroalimentarios utilizados influye de manera significativa tanto en el desarrollo de la fermentación como en el aprovechamiento de los azúcares disponibles para la síntesis de ácido cítrico. En particular, la formulación S4, caracterizada por un mayor contenido de piña, presentó el mayor consumo de azúcares durante la fermentación, lo que sugiere una mayor disponibilidad de sustratos fermentables y una mayor eficiencia metabólica de *Aspergillus niger*. En contraste, la formulación L1 registró la menor producción de ácido cítrico, demostrando que, tanto su composición como su estado físico, desempeñan un papel determinante en el rendimiento del proceso.

La concentración máxima de ácido cítrico obtenida fue superior a 2 g/L. Al comparar este resultado con los reportados en estudios previos [14], se observa que se encuentra dentro del rango esperado para la producción de ácido cítrico a partir de residuos agroalimentarios mediante fermentación con *Aspergillus niger*. La mayor producción se obtuvo en la formulación con una mayor proporción de piña, lo que sugiere que las características de este sustrato favorecen el desarrollo del proceso fermentativo y la biosíntesis del ácido cítrico. Finalmente, la identidad y la pureza del compuesto recuperado fueron corroboradas mediante técnicas espectroscópicas y titulaciones ácido-base, confirmando la obtención exitosa del ácido cítrico tras la etapa de purificación.

Los resultados obtenidos confirman el potencial de los residuos agroalimentarios como sustratos para la producción de ácido cítrico, lo que representa una estrategia de aprovechamiento de subproductos con valor agregado. Este enfoque favorece la disminución de residuos orgánicos y promueve prácticas orientadas hacia la sostenibilidad, ofreciendo una alternativa viable para impulsar modelos de economía circular y procesos productivos con un menor impacto ambiental al transformar materiales de desecho en compuestos de interés para diversas aplicaciones industriales.

Bibliografía

de Prensa, C. (s/f). *ESTADÍSTICAS A PROPÓSITO DEL DÍA MUNDIAL DEL MEDIO AMBIENTE*. Org.mx. Recuperado el 18 de julio de 2026, de https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2025/EAP_MedioAmb_25.pdf

Figueroa, M. H. (2024, agosto 29). *Guanajuato se convierte en el tercer productor de Granada en México*. Líder Empresarial. https://www.liderempresarial.com/guanajuato-se-convierte-en-el-tercer-productor-de-granada-en-mexico/

Carreón, G. (2025, febrero 9). *Este pueblo de Guanajuato tiene los mangos más dulces y casi nadie lo sabe*. La Silla Rota. https://lasillarota.com/guanajuato/local/2025/2/9/este-pueblo-de-guanajuato-tiene-los-mangos-mas-dulces-casi-nadie-lo-sabe-522358.html

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (s/f). *Crece 16.2% producción de piña en México durante 2020*. gob.mx. Recuperado el 18 de julio de 2026, de https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crece-16-2-produccion-de-pina-en-mexico-durante-2020?idiom=es

Connor, N. (2023, 18 septiembre). *Ácido cítrico | Fórmula, propiedades y aplicación*. Material Properties. https://material-properties.org/es/acido-citrico/

y7rik. (2020, enero 21). *Aspergillus niger: características, morfología y patologías*. Maestrovirtuale.com. https://maestrovirtuale.com/es/Caracter%C3%ADsticas--morfolog%C3%ADa-y-patolog%C3%ADas-del-Aspergillus-niger/

Behera, B. C. (2020). Citric acid from Aspergillus niger: a comprehensive overview. *Critical Reviews in Microbiology*, *46*(6), 727–749. https://doi.org/10.1080/1040841X.2020.1828815

Papagianni, M. (2007). Advances in citric acid fermentation by Aspergillus niger: biochemical aspects, membrane transport and modeling. *Biotechnology Advances*, *25*(3), 244–263. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.01.002

Kobylińska, Z., Bochno, A., Och, E., Kotula, M., Kielar, P., Galiniak, S., & Mołoń, M. (2026). Phytochemical diversity of Punica granatum L. and its multi-target biological functions. *Nutrients*, *18*(8), 1306. https://doi.org/10.3390/nu18081306

Costa, M., Torres, M., Magariños, H., & Reyes, A. (2010). Producción y purificación parcial de enzimas hidrolíticas de Aspergillus ficuum en fermentación sólida sobre residuos agroindustriales. *Revista colombiana de biotecnologia*, *XII*(2), 163–175. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77617808013

Wold, W. S. M., & Suzuki, I. (1976). The citric acid fermentation by Aspergillus niger: regulation by zinc of growth and acidogenesis. *Canadian Journal Of Microbiology*, *22*(8), 1083-1092. https://doi.org/10.1139/m76-159

Gutiérrez Alba, P.M., Heredia Paniagua, D., Alvarado Hinojosa, A.d.J., González Guerra, G.M. & Gómez Castro, F.I. (2025). Síntesis, caracterización y purificación de ácido cítrico a partir de residuos de granada y piña en el municipio de Guanajuato. *Jóvenes en la Ciencia*, 37, 1-10. https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/es/article/view/4754

Explicación sobre productos químicos. - Ácido cítrico: una guía completa. (2023b, julio 25). Laboratorium Discounter | Productos de Laboratorio Baratos. https://www.laboratoriumdiscounter.nl/es/blogs/uitleg-over-chemicalien/acido-citrico-una-guia-completa/

Santos Tanamachi, K., Alvarado Ahedo, N.C., Gárate Ruiz, J.R., Restrepo Elorza, M.d.P., González Guerra, G.M., Gómez Castro, F.I. & Hernández Castro, S. (2022). Revaloración de residuos de fruta y verdura para la producción de biocombustibles. *Jóvenes en la Ciencia*, 16. https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/es/article/view/3654