



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

***“CARACTERIZACIÓN E HIDRÓLISIS DE RESIDUOS
AGRÍCOLAS COMO SUSTRATO PARA LA
PRODUCCIÓN DE ETANOL”***

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

MARÍA GUADALUPE PINTAU LOEZA.

Asesor: MC. Jaime Saucedo Luna.



Morelia, Mich.

Marzo 2006

ÍNDICE

	Página
GLOSARIO	iv
INDICE DE FIGURAS	V
INDICE DE TABLAS	Vi
RESUMEN	Vii
CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2.- ANTECEDENTES, JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS E HIPÓTESIS	7
2.1 ANTECEDENTES	7
2.1.1 BIOMASA	8
2.1.2 FOTOSÍNTESIS	12
2.1.3 ENERGIA SOLAR ABSORBIDA	14
2.1.4 CARBOHIDRATOS	15
2.1.5 PROCESOS DE SEPARACIÓN	19
2.1.6 CROMATOGRAFÍA LÍQUIDA DE ALTA RESOLUCIÓN	21
2.2 JUSTIFICACIÓN	23
2.3 OBJETIVOS	25
2.4 HIPÓTESIS	25
CAPÍTULO 3.- METODOLOGÍA	26
3.1 MATERIA PRIMA	26
3.2 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD	26
3.3 HIDRÓLISIS ÁCIDA CUANTITATIVA	27
3.4 DETERMINACIÓN DE LIGNINA	29
3.5 DETERMINACIÓN DE CELULOSA Y HEMICELULOSAS	30
3.6 HIDRÓLISIS DE RASTROJO DE MAÍZ, TRIGO Y SORGO	31
3.7 ANÁLISIS DE LOS HIDROLIZADOS	32
CAPÍTULO 4.- RESULTADOS Y ANÁLISIS	33
4.1 MAÍZ	33
4.2 SORGO	42
4.3 TRIGO	51
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	61
REFERENCIAS	62

GLOSARIO

ARABINOSA. Molécula carbohidrogenada de cinco carbonos

BIOCOMBUSTIBLE. Combustible sólido, líquido o gaseoso obtenido a partir de la biomasa

BIOMASA. Abreviatura de masa biológica, cantidad de materia viva producida en un área determinada de la superficie terrestre, o por organismos de un tipo específico.

BROTRYOCOCCUS BRAUNII. Alga unicelular microscópica, que en relación a su peso produce directamente importantes cantidades de petróleo.

CELULOSA. Es una fibra vegetal que conforma las paredes celulares de los árboles y otras plantas y que representa el 50% de su constitución física. La estructura química de la celulosa está formada por uniones de moléculas de glucosa adheridas entre sí por la lignina, sustancia ésta que refuerza las células, confiriéndoles consistencia y rigidez.

EROSIÓN EDÁFICA. Es la degradación del suelo debido al abandono de la tierra o los incendios. Refiérase a la ausencia de microorganismos y plantas que habitan en el suelo.

GLUCOSA. Molécula carbohidrogenada que en cadenas ordenadas forma celulosa y en asociación amorfa almidón. Ésta ($C_6H_{12}O_6$) es una hexosa (monosacárido de seis átomos de carbono) y además es un aldehído (contiene un grupo -CHO)

HEMICELULOSAS. Son polímeros de cadena más corta o ramificada de sacáridos con cinco átomos de carbono (pentosas).

LIGNINA. Es un grupo de compuestos químicos usados en las paredes celulares de las plantas para crear madera. La molécula de lignina es una molécula, con un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). El acoplamiento aleatorizado de estos radicales da origen a una estructura tridimensional, polímero amorfo, característico de la lignina

POLÍMEROS. Es la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas.

XILOSA. Molécula carbohidrogenada de cinco carbonos.

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1	Esquema de la formación de biomasa	9
Fig. 2.2	Esquema de la fotosíntesis.	13
Fig. 2.3	Estructura química de la celulosa	16
Fig. 2.4	Fotografía de celulosa	17
Fig. 2.5	Estructura química de la lignina	18
Fig. 2.6	Fotografía de material lignocelulósico	18
Fig. 2.7	Cromatograma modelo	22
Fig. 2.8	Reservas de Petróleo en México	24
Fig. 3.1	Diagrama de flujo del proceso de la hidrólisis ácida cuantitativa	28
Fig. 3.2	Diagrama de flujo de la hidrólisis del rastrojo de maíz, trigo y sorgo	30
Fig. 3.3	Cromatograma modelo	32
Fig. 4.1	Cromatograma de la hidrólisis de maíz	34
Fig. 4.2	Rendimiento en la hidrólisis de maíz	38
Fig. 4.3	Obtención de glucosa en la hidrólisis de maíz	40
Fig. 4.4	Obtención de xilosa y arabinosa en la hidrólisis de maíz	41
Fig. 4.5	Cromatograma de la hidrólisis de sorgo	43
Fig. 4.6	Rendimiento en la hidrólisis de sorgo	47
Fig. 4.7	Obtención de glucosa en la hidrólisis de sorgo	49
Fig. 4.8	Obtención de xilosa en la hidrólisis de sorgo	50
Fig. 4.9	Cromatograma de la hidrólisis de trigo	52
Fig. 4.10	Rendimiento en la hidrólisis de trigo	56
Fig. 4.11	Obtención de glucosa en la hidrólisis de trigo	58
Fig. 4.12	Obtención de xilosa en la hidrólisis de trigo	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Producción Nacional y Estatal de maíz, trigo y sorgo	4
Tabla 1.2	Desechos agrícolas de maíz, trigo y sorgo a nivel Nacional y Estatal	5
Tabla 2.3	Reservas mundiales de petróleo	23
Tabla 4.1	Contenido de azúcares iniciales en el maíz	33
Tabla 4.2	Caracterización del maíz	35
Tabla 4.3	Obtención de glucosa (g/l) en la hidrólisis de maíz	36
Tabla 4.4	Obtención de xilosa y arabinosa (g/l) en la hidrólisis de maíz	36
Tabla 4.5	Rendimiento del material hidrolizado	37
Tabla 4.6	Contenido de azúcares iniciales en el sorgo	42
Tabla 4.7	Caracterización del sorgo	44
Tabla 4.8	Obtención de glucosa (g/l) en la hidrólisis de sorgo	45
Tabla 4.9	Obtención de xilosa y arabinosa (g/l) en la hidrólisis de sorgo	45
Tabla 4.10	Rendimiento del material hidrolizado	46
Tabla 4.11	Contenido de azúcares iniciales en el trigo	51
Tabla 4.12	Caracterización del trigo	53
Tabla 4.13	Obtención de glucosa (g/l) en la hidrólisis de trigo	54
Tabla 4.14	Obtención de xilosa y arabinosa (g/l) en la hidrólisis de trigo	54
Tabla 4.15	Rendimiento del material hidrolizado	55

RESUMEN.

Caracterización e Hidrólisis de Residuos Agrícolas Industriales como Sustrato para la Producción de Etanol.

Por

María Guadalupe Pintau Loeza.

Dirigida por: M.C. Jaime Saucedo Luna.

El presente trabajo se enfoca en la obtención de disoluciones de azúcares, los cuales en un paso posterior, se fermentarán para la producción de etanol que pudiera utilizarse como combustible en motores de combustión interna, o bien, en diversos procesos químicos.

Para obtener los azúcares se tomaron tres variables: temperatura, tiempo de reacción y concentración del catalizador que para este caso fue ácido sulfúrico.

La materia prima utilizada fue rastrojo comprado en forrajeras el cual estaba constituido por hojas, tallos e incluso mazorcas. La preparación de la muestra consistió en la molienda del material y posteriormente se tamizó.

Se realizó la caracterización del material para conocer la cantidad de lignina, celulosa y hemicelulosa presente en cada uno de los materiales, el análisis de estos se llevó a cabo por cromatografía líquida de alta resolución.

Las muestras fueron hidrolizadas con ácido sulfúrico como catalizador con 2, 4 y 6% de concentración de ácido en volumen, temperaturas de 80, 100 y 121 °C, así como, tiempos de 0, 20, 40, 60, 180 y 300 minutos, para establecer las condiciones en las cuales hay mayor producción de azúcares fermentables.

La determinación y cuantificación de los azúcares producto de la hidrólisis se realizó igualmente por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN.

Los problemas de contaminación del ambiente aéreo en el hábitat del hombre se inician cuando éste comienza a manejar el fuego para su beneficio. Antes, sólo sufrió la contaminación natural durante episodios de erupciones volcánicas o de incendios espontáneos en su ambiente próximo. Posteriormente a partir del siglo XIX a raíz de la Revolución Industrial, los problemas de contaminación se hacen más severos y se inicia la preocupación por el saneamiento ambiental. Fue precisamente para fines del mismo siglo cuando se elaboraron las primeras gasolinas.

En la segunda década del siglo XX, e impulsados por las necesidades de movilización de tropas y pertrechos en la Primera Guerra Mundial, se requirió un cambio cualitativo al ser muy apreciada la relación potencia/peso de los motores de combustión interna. Sin embargo, las gasolinas sólo podían mejorar su calidad octánica si se partía de petróleos crudos con mayor proporción de aromáticos.

La Segunda Guerra Mundial volvió a impulsar el avance tecnológico de las gasolinas, ya que los motores de aviación requerían un número de octano no inferior a 100. Esto provocó un mayor desarrollo de las técnicas de refinación del petróleo, que posibilitara obtener grandes volúmenes de gasolinas de alto octanaje. Así se crearon las plantas de proceso de craqueo catalítico, reformado, alquilación y desulfuración, siempre con el agregado de fluido etílico.

En 1973, la guerra árabe-israelí y la nacionalización de las reservas petroleras árabes, sumadas a la revolución iraní de 1979, evidenciaron la cantidad limitada de petróleo crudo disponible. Ello determinó una tendencia, no sólo en el diseño de motores y vehículos, sino también como un importante cambio en la filosofía: "Los recursos naturales

deben utilizarse racionalmente y sin derroche". Debido a lo anterior se produjeron eventos importantes en el mercado del petróleo en el mundo, que se manifestaron en los años posteriores en un encarecimiento notable de esta fuente de energía no renovable, resurgieron las preocupaciones sobre el suministro y precio futuro de la energía. Resultado de esto, los países consumidores, enfrentados a los altos costos del petróleo y a una dependencia casi total de este energético, tuvieron que modificar costumbres y buscar opciones para reducir su dependencia de fuentes no renovables.

Entre las opciones para reducir la dependencia del petróleo como principal energético, se reconsideró el mejor aprovechamiento de la energía solar y sus diversas manifestaciones secundarias tales como la energía eólica, hidráulica y las diversas formas de biomasa.

Como un ejemplo de esto en la década de los 70's Brasil y Estados Unidos comenzaron a utilizar el alcohol como combustible.

Brasil lideró la producción de etanol del mundo, destilando 4 mil millones de galones (15 mil millones de litros). Los Estados Unidos están avanzando rápidamente también, produciendo 3.5 mil millones de galones durante el año pasado, generados casi exclusivamente a partir de maíz. Las provincias chinas ricas en la producción de trigo y maíz produjeron casi mil millones de galones de etanol, y la India generó 500 millones de galones producidos a partir de caña de azúcar. Francia, el aventajado en la Unión Europea en la tentativa de fomento del uso del etanol, produjo cerca de 200 millones de galones de las remolachas y del trigo. En global, el mundo produjo bastante etanol para desplazar escasamente un 2% el consumo total de la gasolina¹.

La energía es una parte fundamental de cualquier actividad productiva; su ausencia socava la posibilidad de un desarrollo sustentable. Asimismo, la generación, transporte, uso y consumo de ésta tienen un fuerte impacto sobre el medio ambiente y la calidad de vida de la población.

El sector energético de México representa entre el 4 y el 7% del PIB, genera alrededor del 40% de los ingresos del sector público y produce aproximadamente el 8% de las exportaciones. La energía eléctrica generada en México por plantas hidroeléctricas aportan ya el 25.4% de la capacidad del Sistema Eléctrico Nacional y 15.1% de la generación eléctrica total. Sin embargo, existe aún, un importante potencial para la generación de energía a partir de otras fuentes renovables, tales como la biomasa².

Las investigaciones sobre la energía han hecho adelantos enormes durante las tres últimas décadas, mejorando el uso eficiente de los combustibles tradicionales, desarrollando y utilizando las tecnologías de la próxima generación que finalmente podrían transformar el sector energético.

Se estima que unos 2 mil millones de personas en el mundo dependen de energía renovable para su vida cotidiana: madera, residuos agrícolas y excremento animal². Si bien, el uso de las gasolinas e incluso de los derivados del petróleo, dan a nuestra vida cotidiana mas comodidad y simplicidad, sin embargo hay que reconocer que con el uso desmedido de estos combustibles fósiles hemos contaminado el planeta al extremo tal de su destrucción.

Alrededor del 70% de las fuentes de los compuestos orgánicos volátiles (COV) es natural, siendo la mayor parte alcanos naturales. El resto es producido por el hombre, correspondiendo las mayores proporciones a productos aromáticos y alcanos antropogénicos.

El tratamiento apropiado de las emisiones de COV es crucial para comprender las reacciones químicas en la atmósfera. Por ejemplo, los COV contribuyen a la formación de ozono fotoquímico en escala regional y urbana. Ellos también juegan un rol en la depositación ácida, ya que contribuyen a la generación de los radicales responsables de la conversión de los óxidos de azúfre en ácido sulfúrico. Similar situación se da con respecto a los óxidos de nitrógeno y el ácido nítrico, así como en la formación de peróxidos que influyen en las formaciones ácidas de las nubes.

Algunos COV llegan incluso a fases de transformación en aerosoles, con su consiguiente disminución de visibilidad. Los COV más frecuentes son el metano, etano, propano, acetileno, alcanos, bencenos y solventes, entre otros.

El hombre es responsable de las emisiones de COV cuando produce, refina o distribuye masivamente el petróleo y el gas natural. También genera emisiones cuando utiliza carbón o leña, solventes, transportes y quema basura.

Debido a lo anterior es necesario en primera instancia hacer conciencia de los daños ocasionados al medio ambiente y sustituir los combustibles contaminantes utilizados en la actualidad por biocombustibles.

Sin duda, la única fuente renovable con un potencial para cubrir el consumo anual mundial de energía (aproximadamente de 3.59×10^{21} joules)³ es la biomasa o en otras palabras los materiales lignocelulósicos. Prácticamente existen tres fuentes diferentes para el abastecimiento de los materiales celulósicos: residuos industriales y municipales, residuos agrícolas y plantaciones con este fin específico.

Para este trabajo en específico se utilizaron residuos agrícolas de maíz, trigo y sorgo. Nuestro país tiene una producción anual de maíz(21,685,833 Ton), trigo(2,321,224 Ton) y sorgo(7,004,354 Ton)⁴.

En la tabla 1.1 se presenta la producción nacional y estatal de maíz trigo y sorgo así como la superficie cosechada, de acuerdo con datos proporcionados por el INEGI⁴.

Tabla 1.1 Producción Nacional y Estatal de maíz, trigo y sorgo

Cultivo	Producción Nacional, Ton	Superficie cosechada a nivel Nacional, Ha	Producción Estado de Michoacán, Ton	Superficie cosechada Estado de Michoacán, Ha
Maíz	21,685,833	8,403,640	1,267,500.8	436,511.5
Trigo	2,321,224	518,322	202,117.5	38,665.6
Sorgo	7,004,354	1,832,544	569,776.6	114,079.7

Los residuos orgánicos generados de estos cultivos ascienden a: maíz (11,000 Kg/Ha); sorgo (10,000 Kg/Ha) y trigo (8,000 Kg/Ha)⁵. De acuerdo con los datos presentados en la tabla anterior es posible aproximar la cantidad de desechos producidos a nivel nacional y estatal que se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Desechos agrícolas de maíz, trigo y sorgo a nivel Nacional y Estatal.

Cultivo	Desechos producidos a Nivel Nacional, Ton	Desechos producidos Estado de Michoacán, Ton
Maíz	92, 440, 040	4, 801, 626.5
Trigo	4, 146, 576	309, 324.8
Sorgo	18, 325, 440	1, 140, 797

Algunos de estos residuos agrícolas o también llamados esquilmos agrícolas son utilizados para alimentar al ganado, sin embargo, parte de estos es incinerada, ocasionando problemas medioambientales como lo son:

- Propicia la erosión edáfica, debido que al quedar desnuda la superficie del suelo como consecuencia de la quema de esquilmos, el paso del agua o del aire por su superficie, provoca desplazamiento de partículas y ocasiona que el material sea acarreado, desarrollándose así el proceso de erosión hídrica o eólica.
- Al eliminar prácticamente toda la materia orgánica de la superficie del suelo, se cancela la posibilidad de reincorporarla al mismo, y de mantener y/o mejorar sus propiedades productivas.
- Al eliminar la materia orgánica del suelo, se desencadenan reacciones físicas, químicas y biológicas, que inciden en el deterioro de sus condiciones productivas.
- Disminuye la actividad y población microbiana de los suelos, por el incremento de temperatura, lo que contribuye al deterioro de su calidad productiva.

- Contribuye al deterioro de la calidad del aire, debido a que en el proceso de combustión de los residuos agrícolas, son arrojados a la atmósfera una gran cantidad de partículas sólidas y gases nocivos a la salud.
- La quema de esquilmos es una fuente importante de sustancias contaminantes del aire (bióxido de carbono, monóxido de carbono, bióxido de nitrógeno y partículas).
- Las sustancias producidas por la quema de esquilmos representan una amenaza al ambiente y a la salud, principalmente en las poblaciones próximas a las zonas de quemas.
- La inhalación y exposición a largo plazo a la materia particulada, produce daños pulmonares causantes de enfermedades respiratorias, principalmente en los niños y ancianos.
- Los contaminantes generados, además de su toxicidad directa sobre los individuos, provocan alteraciones en la atmósfera, el clima y el ecosistema (como son el efecto invernadero, la disminución de la capa de ozono y la lluvia ácida).
- Propicia incendios en áreas forestales y recreativas aledañas a zonas de cultivo.

El contenido de material celulósico presente en los desechos agrícolas, es considerable, lo que permite que por medio de reacciones de hidrólisis se puedan obtener disoluciones de azúcares, principalmente de glucosa y xilosa⁶. Estas disoluciones de azúcares pueden utilizarse para la elaboración de medios de cultivo para el crecimiento de microorganismos a través de los cuales se produzca etanol, aditivos alimentarios o bien una gran cantidad de productos utilizables a nivel industrial.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES, JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS E HIPÓTEIS.

2.1 ANTECEDENTES.

Desde que se iniciaron las crisis energéticas en los años 70's se han investigado alternativas para la obtención de combustibles líquidos, siendo una de las más promisorias la conversión de biomasa a etanol. La utilización de etanol presenta varias ventajas como son:

- Genera independencia de los recursos fósiles
- Es renovable
- No contribuye a elevar la contaminación con CO₂, y
- Puede generar un nuevo mercado para los agricultores.

Para aprovechar las ventajas antes mencionadas se requiere el desarrollo de tecnología para la producción del etanol como combustible a partir de materiales lignocelulósicos y en particular los desechos agrícolas de maíz, trigo y sorgo. Estos materiales tienen un costo muy bajo, por tanto, la producción de etanol a partir de estos materiales resulta ser atractiva económica y ecológicamente.

El proceso global de conversión de estos materiales hacia combustibles líquidos comprende básicamente tres etapas: La hidrólisis del material lignocelulósico hacia azúcares, la fermentación de estos azúcares hacia el combustible líquido y finalmente la purificación del combustible líquido obtenido. Como primer paso tocaremos el tema de la biomasa, posteriormente cada uno de los temas relacionados a ésta y finalmente lo relacionado con la tecnología requerida para el desarrollo del etanol.

2.1.1 BIOMASA.

Por biomasa se entiende el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma. Se produce a partir del uso que las plantas hacen de la luz del sol para su crecimiento en un proceso conocido como fotosíntesis, en el cual se combinan el bióxido de carbono del aire y el agua del suelo para producir oxígeno y energía. Esta última es almacenada en las plantas en forma de carbohidratos.

La biomasa es la energía solar convertida por la vegetación en materia orgánica; esa energía la podemos recuperar por combustión directa o transformando la materia orgánica en otros combustibles.

La energía de la biomasa proviene en última instancia del sol. Mediante la fotosíntesis el reino vegetal absorbe y almacena una parte de la energía solar que llega a la tierra; las células vegetales utilizan la radiación solar para formar sustancias orgánicas a partir de sustancias simples y del CO_2 presente en el aire. El reino animal incorpora, transforma y modifica dicha energía. En este proceso de transformación de la materia orgánica se generan subproductos que no tienen valor para la cadena nutritiva o no sirven para la fabricación de productos de mercado, pero que pueden utilizarse como combustible en diferentes aprovechamientos energéticos.

En la actualidad, los cultivos destinados a la producción de biomasa con fines energéticos pueden agruparse en tres tipos fundamentales en función del destino final de la biomasa⁷:

- **Cultivos oleaginosos** para la producción de aceite transformable en biodiesel (conjunto de ésteres metílicos o etílicos de los ácidos grasos de los aceites vegetales) para sustitución del gasóleo de automoción.

- **Cultivos alcoholígenos** para la producción de etanol utilizable en sustitución total o parcial de las gasolinas de automoción o para la producción de aditivos antidetonantes exentos de plomo como el Etil-Terbutil-Eter (ETBE).
- **Cultivos lignocelulósicos** para la producción de biocombustibles sólidos utilizables con fines térmicos, principalmente para la producción de electricidad (agroelectricidad).

En la figura 2.1 se esquematizan algunas de las materias primas que con ayuda de la energía solar y de la fotosíntesis forman la biomasa.

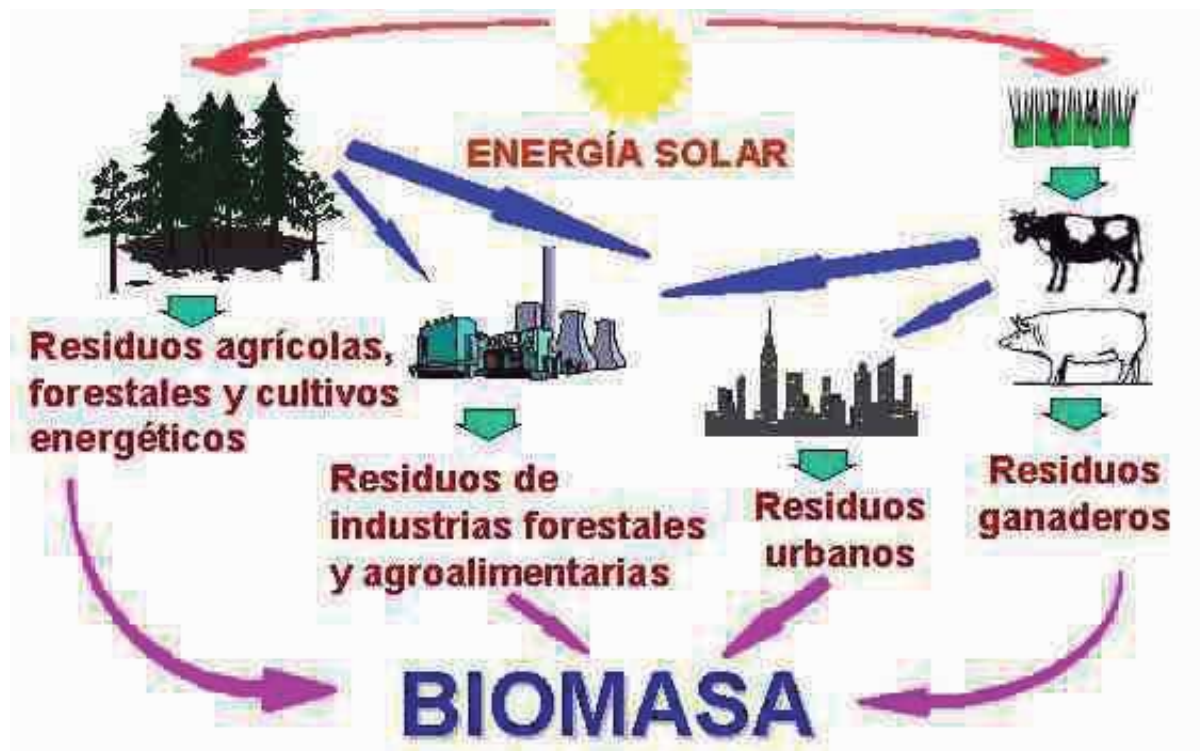


Figura 2.1 Esquema de la formación de biomasa.

Los usos de la biomasa en aplicaciones energéticas son principalmente la producción de gas, energía calórica (térmica) y energía eléctrica. También se puede usar la biomasa para preparar combustibles líquidos, como el metanol o el etanol, que luego se usan en los motores.

En muchas ocasiones, la biomasa se elimina por ser molesta para la instalación que la produce o porque entorpece las labores agrarias o ganaderas que la generan. Cuando esto ocurre, se está desperdiciando una fuente de energía importante, basta recordar que, por término medio, un kilogramo de biomasa permite obtener 3.500 kcal y que un litro de gasolina tiene aproximadamente 10.000 kcal, por cada tres kilogramos que desperdiciamos de biomasa, se desaprovecha el equivalente a un litro de gasolina⁸.

Habitualmente, el contenido energético de la biomasa se mide en función del poder calorífico del recurso, aunque para algunos de ellos, como es el caso de la biomasa residual húmeda o de los biocarburantes, se determina en función del poder calorífico del producto energético obtenido en su tratamiento.

MÉTODOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA

Las algas pueden secarse y utilizarse como biomasa. También puede obtenerse un tipo de alga rica en aceite que atrapa el CO₂, se prensa y se obtiene biodiesel, de igual forma es posible obtener bioetanol.

Alimentadas con una gran cantidad de emisiones cargadas de CO₂, de las chimeneas de las centrales eléctricas, las algas crecen rápidamente. Los desechos van a la atmósfera, solo que las emisiones de CO₂ se reducen en un 40% (mucho más que lo que exige el tratado de Kyoto) y con un añadido extra un 86% menos de óxido nitroso.

Después de absorber el CO₂ como una esponja, las algas se recolectan cada día. A partir de esa cosecha se obtiene, tras prensar las algas, un combustible vegetal: biodiesel para automóviles.

Es importante seleccionar algas con una alta densidad en aceite aproximadamente del 50% de su peso, ya que este tipo de alga además crece muy rápido, puede producir 15.000 galones (56,775 litros) de biodiesel por acre (1 acre = 4,046 m²). En un terreno de dimensiones similares, empleando semillas de soja (el mejor productor de biodiesel junto al maíz) solo se podrían obtener 60 galones (227 litros)⁹.

Berzin⁹, calcula que una sola central eléctrica de 1.000 megavatios de potencia que emplease su sistema podría producir más de 40 millones de galones (151 millones de litros) de biodiesel, y 50 millones de galones (189 millones de litros) de etanol al año. Eso requeriría una “granja” de 2,000 acres (8 millones de m²) de tuberías llenas de algas.

Aparte del caso excepcional del alga *Brothyococcus braunii*, la utilización práctica de las diferentes formas de biomasa requiere técnicas de conversión.

Métodos termoquímicos: Estos métodos se basan en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa. Están bien adaptados al caso de la biomasa seca, en particular, a los de la paja y de la madera. Dos métodos se describen a continuación:

- **La combustión:** Es la oxidación completa de la biomasa por el oxígeno del aire, libera simplemente agua y gas carbónico, puede servir para la calefacción doméstica y para la producción de calor industrial.
- **La pirólisis:** Es la combustión incompleta de la biomasa en ausencia de oxígeno, a unos 500 °C, se utiliza desde hace mucho tiempo para producir carbón vegetal. Aparte de este, la pirólisis lleva a la liberación de un gas pobre, mezcla de monóxido y dióxido de carbono, de hidrógeno y de hidrocarburos ligeros. Este gas de débil poder calorífico, puede utilizarse para accionar motores diesel, para producir electricidad o para mover vehículos.

Métodos biológicos:

- **La fermentación alcohólica** es una técnica empleada desde la antigüedad con los azúcares, puede utilizarse también con la celulosa y el almidón a condición de realizar una hidrólisis previa (en medio ácido) de estas dos sustancias. Ciertos países (Brasil, E.U.A.) tienen importantes proyectos de producción de etanol a partir de biomasa con un objetivo energético (propulsión de vehículos; cuando el alcohol es puro o mezclado con gasolina, el carburante recibe el nombre de gasohol).
- **La fermentación metánica** es la digestión anaerobia de la biomasa por bacterias. Es idónea para la transformación de la biomasa húmeda (más del 75 % de humedad relativa). En los fermentadores o digestores, la celulosa es esencialmente la sustancia que se degrada en un gas, que contiene alrededor de 60 % de metano y 40 % de gas carbónico.

2.1.2 FOTOSÍNTESIS.

La fotosíntesis es uno de los procesos metabólicos de los que se valen las células para obtener energía, para que el proceso se lleve a cabo es necesaria la energía solar, pero además es necesario que el organismo tenga la capacidad de absorber esa energía luminosa y transformarla en energía química que es la clorofila, en este proceso se transforma el dióxido de carbono y el agua en sustancias hidrocarbonadas con desprendimiento de oxígeno.

Una vez descrito el proceso de la fotosíntesis, es posible definir claramente algunos de los elementos más importantes que hacen posible dicho proceso, así como también los productos obtenidos de él: energía luminosa o solar, la clorofila, dióxido de carbono y agua,

para producir: sustancias hidrocarbonadas y desprendimiento de oxígeno. En la figura 2.2 se muestra el esquemáticamente el proceso de la fotosíntesis con los elementos antes mencionados.

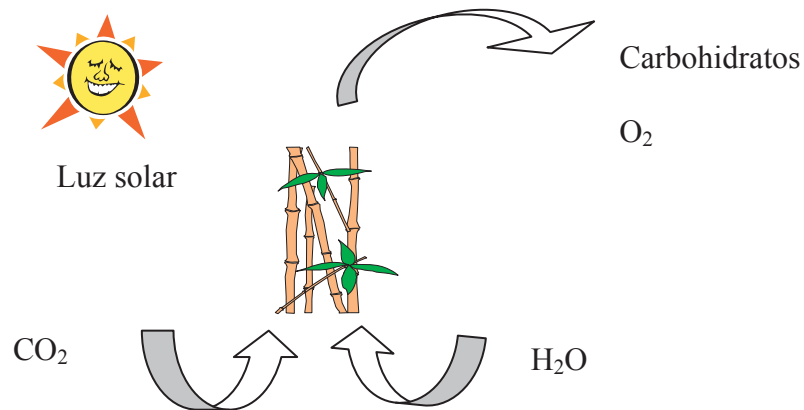
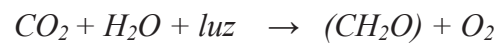


Figura 2.2 Esquema de la fotosíntesis.

Químicamente la fotosíntesis se define como:



Donde: $(CH_2O)_n$ son los hidratos de carbono o azúcares.

2.1.3 ENERGÍA SOLAR ABSORBIDA.

Casi toda la energía de que disponemos proviene del sol. Él es la causa de los vientos, de la evaporación de las aguas superficiales, de la formación de nubes, de las lluvias y, por consiguiente, de los saltos de agua. Su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de los vegetales y de los animales que con el paso de los siglos han originado combustibles fósiles como el carbón o el petróleo. La radiación solar tiene otra importancia capital: otras formas de energía renovable, como el viento, las olas o la biomasa no son más que manifestaciones indirectas de ésta.

Se ha calculado que de cada millón de fotones que se producen en el Sol y que llegan a la superficie de la Tierra, sólo unos 90 son utilizados por todas las plantas verdes para sintetizar materia orgánica; de éstos, 50 son capturados por los vegetales terrestres y los 40 restantes por los marinos¹⁰.

La radiación solar interceptada por la Tierra constituye la principal fuente de energía renovable a nuestro alcance. La cantidad de energía solar captada por la Tierra anualmente es aproximadamente de $5,4 \times 10^{24}$ J.

La radiación solar es una forma de energía de baja concentración, ya que fuera de la atmósfera la intensidad de radiación solar que recibe la Tierra oscila entre los 1.300 y los 1.400 W/m² aproximadamente¹¹. Las pérdidas a la atmósfera por reflexión, absorción y dispersión reducen este valor alrededor de un 30%, con una intensidad de radiación por parte de la Tierra de alrededor de los 1.000 W/m².

El mundo vegetal, es el responsable del sostenimiento de la vida en la Tierra gracias a su capacidad de captar la energía solar y almacenarla, en forma de energía química, en los enlaces de las moléculas orgánicas que forman su biomasa. Esta biomasa primaria producida por los vegetales es consumida por los seres heterótrofos que utilizan las

moléculas orgánicas de aquellos para la obtención de energía mediante la respiración y como elementos plásticos para la formación de sus tejidos y compuestos de reserva.

Cada año se estima que las plantas superiores y el resto de los seres fotosintéticos producen una cantidad total de biomasa equivalente a unas 170 Gigatoneladas (Gt) de materia seca, con un contenido energético estimado en 2.85×10^{21} J, lo que supera con creces las necesidades energéticas y alimenticias mundiales¹².

2.1.4 CARBOHIDRATOS.

Los carbohidratos son los compuestos orgánicos más abundantes de la biosfera y a su vez los más diversos. Normalmente se los encuentra en las partes estructurales de los vegetales y también en los tejidos animales, como glucosa o glucógeno. Estos sirven como fuente de energía para todas las actividades celulares vitales.

En los organismos vivos los hidratos de carbono tienen funciones estructurales y de almacenamiento de energía. En la función estructural tenemos como ejemplo: la *celulosa* que es el principal glúcido estructural en las plantas, hasta un 40% en las paredes celulares.

Los carbohidratos forman un grupo de compuestos que contienen carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O). Son los compuestos orgánicos más abundantes en la naturaleza. Los carbohidratos se clasifican según el número de carbonos que contenga su molécula en:

Monosacáridos. Estos azúcares se caracterizan por poseer grupos hidroxilos (OH) y un grupo aldehído o cetona. Se describen con la fórmula $(CH_2O)_n$, donde n es un número entero no menor de tres y no mayor de ocho ($3 < n < 8$). El más importante es la glucosa.

Disacáridos. Estos compuestos están constituidos por la unión de dos monosacáridos. Siendo el más importante la sacarosa.

Polisacáridos. Los polisacáridos son monosacáridos unidos entre sí por uniones glucosídicas en largas cadenas. Pueden o no tener el mismo tipo de monosacárido como eslabón en esas cadenas. Los principales son: celulosa, glucógeno y almidón.

Para nuestro caso de estudio, se utilizaron los desechos de maíz, trigo y sorgo, los cuales se componen principalmente por tres polímeros naturales: celulosa (polisacárido), lignina y hemicelulosas. La celulosa y las hemicelulosas son polímeros de hidratos de carbono formados a partir de moléculas de monosacáridos y la lignina es un polímero de unidades fenilpropanicas¹³.

La celulosa es un polímero de la glucosa de cadena larga que únicamente se diferencia del almidón, que es también un polímero glucósico, por la configuración de las moléculas glucósicas. La celulosa es una hexosa compuesta principalmente por fructosa y glucosa¹⁴. En la figura 2.3 se muestra una parte de la estructura química de la celulosa. Para formar la celulosa se requiere de varias moléculas como la de la figura 2.3 unidas entre sí.

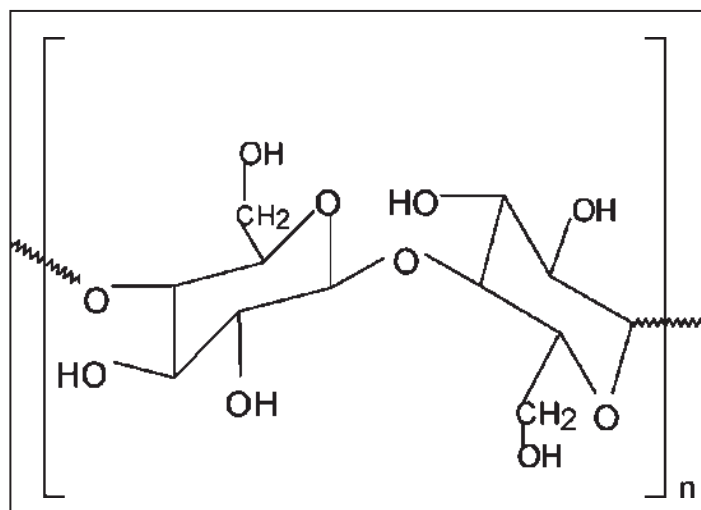


Figura 2.3 Estructura química de la celulosa.

A continuación, en la figura 2.4 podemos observar una fotografía microscópica de la celulosa.

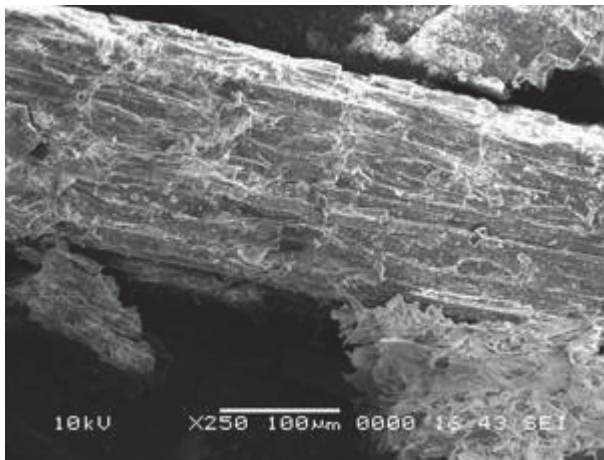


Figura 2.4 Fotografía de la estructura celulósica.

Las hemicelulosas son polímeros de cadena más corta o ramificada de sacáridos con cinco átomos de carbono (pentosas), tales como la xilosa y la arabinosa¹³. Son de naturaleza amorfa y sirven, con la lignina, para formar la matriz en la cual se incrustan las fibrillas de celulosa. Aunque la estructura de la celulosa es la misma en las diferentes especies las hemicelulosas varían considerablemente entre especies.

La lignina, que es el tercer componente de la membrana celular, es un polímero tridimensional que se forma a partir de las unidades fenilpropánicas que se han desarrollado aleatoriamente formando una molécula grande y compleja con muchas diferentes clases de ligamentos entre los bloques estructurales. La estructura de la lignina también varía según se trate de una especie.

En la figura 2.5 se observa su estructura química. La lignina actúa de cemento entre las fibras leñosas. Algunas hemicelulosas se pierden durante la hidrólisis a causa de su menor peso molecular y mayor solubilidad.

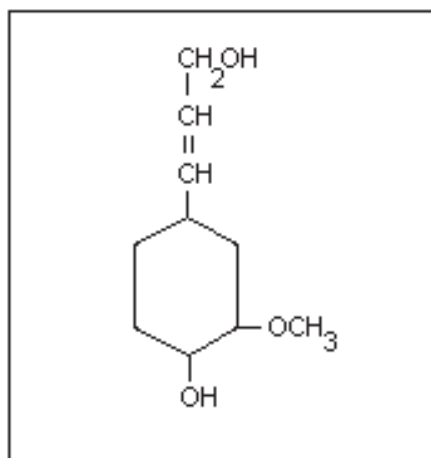


Figura 2.5 Estructura química de la lignina.

En la figura 2.6 se presenta la fotografía de un material lignocelulósico visto al microscopio.



Figura 2.6 Fotografía de material lignocelulósico.

2.1.5 PROCESOS DE SEPARACIÓN.

La separación de la biomasa la podemos definir como el conjunto de procesos físicos y/o químicos, que conducen a la separación de sus polímeros. Los polisacáridos, celulosa y hemicelulosa, son hidrolizables en medio ácido con obtención de azúcares principalmente. La hemicelulosa es la fracción más fácilmente atacable mientras que la lignina se ve poco alterada por los ácidos y permanece como residuo sólido. Tratamientos alcalinos, o con agua caliente en condiciones moderadas, solubilizan solamente las hemicelulosas. Los polisacáridos son difíciles de oxidar, mientras que la lignina sí se degrada fácilmente por métodos oxidativos.

Existen ya muchos procesos en los cuales se utilizan materiales lignocelulósicos para producir etanol. El proceso para la producción de etanol como ya se mencionó consta principalmente de tres etapas: La hidrólisis del material lignocelulósico hacia azúcares, la fermentación de estos azúcares hacia el combustible líquido y finalmente la purificación del combustible líquido obtenido. La diferencia principal entre las diferentes tecnologías radica en la manera en como se realiza la primera etapa.

Actualmente existen cinco plataformas tecnológicas para la producción de azúcares a partir de la biomasa.

- 1. Hidrólisis ácida concentrada.** Este proceso se basa en la descristalización ácida de la celulosa seguida por una hidrólisis ácida diluida de los azúcares. En el se lleva a cabo un pretratamiento con ácido diluido cuyo objetivo inicial era remover la hemicelulosa antes de la descristalización y la hidrólisis de la celulosa ya que los azúcares hemicelulósicos no eran fermentables; después de este proceso ambos azúcares son fermentables, este paso aún se conserva. Después del pretratamiento la biomasa es secada para concentrar el ácido absorbido antes de la adición del ácido sulfúrico concentrado; el ácido concentrado rompe los enlaces de hidrógeno entre las cadenas de celulosa, dejándolas en un estado completamente amorfo. Cuando la

celulosa se ha descristalizado, forma una gelatina homogénea con el ácido y esta lista para ser hidrolizada; la hidrólisis se da por dilución con agua a temperaturas modestas, consiguiéndose una hidrólisis rápida y completa de la glucosa con poca degradación a compuestos fenólicos¹⁵.

2. **Hidrólisis ácida diluida.** La hidrólisis ocurre en dos etapas para maximizar el rendimiento de azúcar de las fracciones hemicelulósicas y celulósicas de la biomasa. La primera etapa se opera a condiciones suaves para mejorar el rendimiento de hidrólisis de hemicelulosa; la segunda etapa es optimizada para hidrolizar la fracción de celulosa más resistente. Los líquidos hidrolizados son recuperados de cada etapa, neutralizados y fermentados a etanol. Los residuos de celulosa y lignina en los sólidos de los reactores de hidrólisis sirven como combustible para la producción de electricidad o vapor¹⁶.
3. **Hidrólisis enzimática.** Las enzimas son las nuevas perspectivas con respecto al procesamiento de biomasa a etanol. Mientras la química de producción de azúcares a partir de madera tiene casi dos siglos de investigación y 100 años de desarrollo de procesos de las enzimas, para la hidrólisis de la biomasa solo se puede hablar de 50 años de serios esfuerzos. La primera aplicación de enzimas para hidrólisis de biomasa en un proceso de etanol, se hizo reemplazando el paso de hidrólisis ácida con un paso de hidrólisis enzimática. Esta configuración, ahora conocida como hidrólisis y fermentación separadas (SHF), requiere un pretratamiento de la biomasa. Para hacer más accesible la celulosa a las enzimas, con este fin se han considerado muchas opciones químicas y térmicas¹⁷.
4. **Explosión a vapor e hidrólisis.** El objeto de la explosión a vapor como un pretratamiento de la biomasa consiste en mejorar la accesibilidad de la celulosa a la acción de biocatalizadores en los procesos de obtención de bio-etanol. El proceso de explosión a vapor consiste en un tratamiento termomecánico de la biomasa lignocelulósica con vapor. En él se combinan los efectos sobre el material lignocelulósico de altas presiones y temperaturas junto con una descompresión

brusca posterior. El efecto de este pretratamiento es una combinación de modificaciones físicas (degradación y ruptura de las fibras lignocelulósicas) y químicas (despolimerización y rotura de los enlaces C-O-C) en la estructura lignocelulósica que produce la degradación y separación controlada de sus componentes poliméricos¹⁸.

- 5. Amonólisis e hidrólisis.** La amonólisis es usada para pre-tratar la biomasa lignocelulósica, en donde inicialmente esta es molida en pequeñas partículas para luego infundirle amoniaco a alta presión por unos 30 minutos en un rango de temperaturas de 20-90° C. En este proceso, el amoniaco infundido a elevada presión y temperatura hincha y rompe los cristales del complejo de celulosa y hemicelulosa de tal manera que la biomasa es accesible para la enzima. Cuando se despresuriza el sistema, el amoniaco virtualmente es desalojado y es entonces recapturado en un tanque agitado y recirculado¹⁸.

2.1.6 CROMATOGRAFÍA LÍQUIDA DE ALTA RESOLUCIÓN.

La cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) es actualmente la técnica de separación más ampliamente utilizada debido a su versatilidad y amplio campo de aplicación. Los componentes de la muestra, previamente disueltos en un disolvente adecuado (fase móvil), son forzados a atravesar la columna cromatográfica gracias a la aplicación de altas presiones. El material interno de la columna, fase estacionaria, está constituido por un relleno capaz de retener de forma selectiva los componentes de la mezcla. La resolución de esta separación depende de la interacción entre la fase estacionaria y la fase móvil, pudiendo ser manipulada a través de la elección de diferentes mezclas disolventes y distintos tipos de relleno. Como resultado final los componentes de la mezcla salen de la columna separados en función de sus tiempos de retención en lo que constituye el cromatograma. A través del cromatograma se puede realizar la identificación

cualitativa y cuantitativa de las especies separadas. En la figura 2.7 se muestra un cromatograma obtenido por el HPLC.

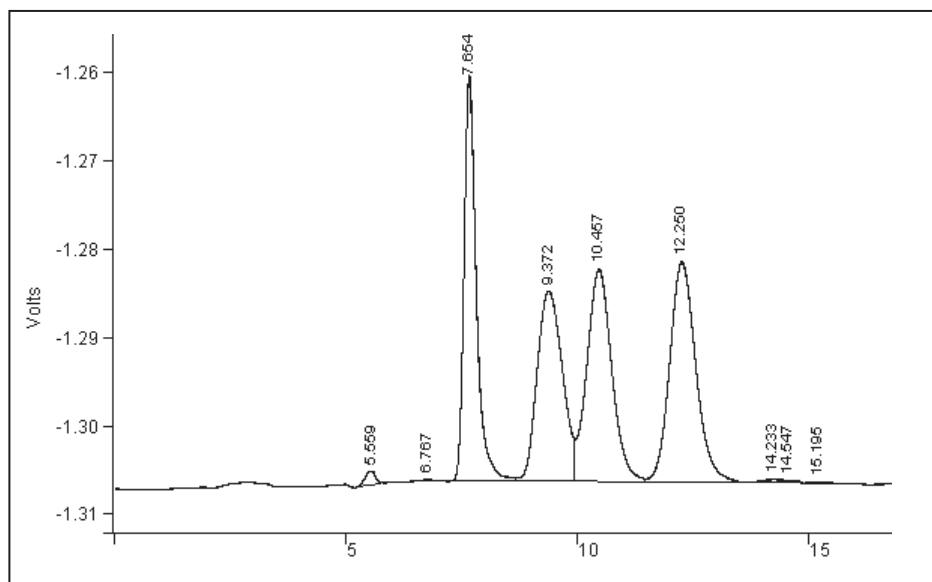


Figura 2.7 Cromatograma modelo.

El HPLC puede operar a presiones mayores a las 5000 psi y con tiempos de análisis comparables a los de la cromatografía de gases. La clave del uso de tales presiones fue el desarrollo de materiales de soporte capaces de resistir estas presiones altas, de aquí, la disminución de la distancia de las partículas del soluto a través del recorrido. En un principio el HPLC usaba una columna en un soporte de cristales con una capa de resina de intercambio iónico y con una capa delgada de sílica gel. Además, el incremento en la eficiencia y resolución de la cromatografía se obtuvo con partículas pequeñas (5 μm de diámetro) y otras fases unidas químicamente sobre la superficie de las partículas.

Debido a las altas presiones usadas en HPLC, los tipos de soporte de fase estacionaria son limitados y la separación es llevada a cabo por la variación en la composición de la fase móvil. Con volúmenes pequeños en la columna y velocidades de flujo relativamente altas, se pueden realizar fácilmente cambios en el solvente.

2.2 JUSTIFICACIÓN.

De acuerdo a las reservas probadas de fuentes fósiles de energía en el 2002 quedaban entre 990,000 millones y 1,1 billones de barriles de petróleo crudo por extraer y al ritmo de consumo de energéticos en el mundo, se estima que las reservas se agotarían hacia el año 2043, pudiendo ser mas cercana si el consumo de energía aumentara, como se prevé que ocurrirá en los países en vías de desarrollo¹⁹.

Tabla 2.3 Reservas mundiales de petróleo.

Reservas de petróleo mundiales ** (2001)	
Arabia Saudita,	265.3
Irak	115.0
Kuwait	98.0
Irán	96.4
Emiratos Árabes Unidos	62.8
Rusia	54.3
Venezuela	47.6
China	46.6
Libia	30.0
México	26.9
Nigeria	24.1
Estados Unidos	22.0
Argelia	12.7
Noruega	10.1
** Miles de millones de barriles	

En la figura 2.8 se muestran las reservas de petróleo en México, en la figura se observa con claridad la tendencia a la baja de las reservas nacionales de esta fuente no renovable de energía¹⁹.

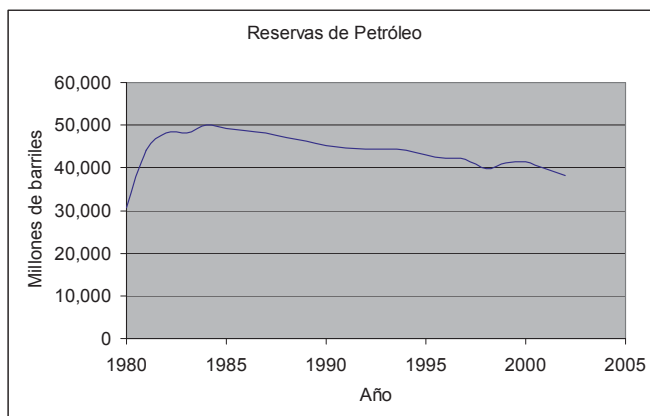


Figura 2.8 Reservas de Petróleo en México.

Debido a lo anterior es urgente y necesario estudiar las diferentes alternativas de producción de energéticos a partir de las fuentes alternas y sobre todo renovables de energía. Quizás la única fuente que reúne estas características sea la biomasa, es decir los materiales lignocelulósicos, por lo cual en el presente trabajo se investiga la posibilidad de reutilizar los desechos agrícolas.

Por otro lado la utilización desmedida de las gasolinas ha ocasionado que la contaminación ambiental aumente por la emisión de gases de combustión, principalmente el CO₂ que provoca el efecto invernadero, estos gases absorben la energía infrarroja que debe salir del planeta tierra calentando tanto la superficie de la Tierra como el aire que la rodea, contribuyendo con esto al calentamiento global que hace que los casquetes polares se fundan y aumente el nivel del agua, lo cual ocasionaría inundaciones catastróficas.

2.3 OBJETIVOS.

El objetivo general de este trabajo consistió en desarrollar y optimizar un proceso para la producción de azúcares fermentables a partir de materiales desechos agrícolas como son los rastrojos de maíz, trigo y sorgo.

Los objetivos específicos fueron:

- Caracterización química de los rastrojos de maíz, trigo y sorgo para cuantificar el contenido de polisacáridos.
- Realizar la hidrólisis ácida de estos rastrojos hacia azúcares fermentables utilizando ácido sulfúrico, como catalizador para investigar la influencia de las variables del proceso (concentración de ácido, temperatura y tiempo) sobre los azúcares obtenidos y el rendimiento del proceso.

2.4 HIPÓTESIS.

Los materiales lignocelulósicos como los rastrojos de maíz, trigo y sorgo tienen un potencial energético que es posible utilizarlo como una fuente alterna y renovable de energía, utilizando un proceso que consta de tres etapas principales, primero hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa para obtener sus respectivos monómeros, glucosa y xilosa principalmente, segundo fermentación de estos azúcares y tercero separación y purificación del etanol en vías de su utilización como combustible.

En el presente trabajo se realiza el primer paso de esta secuencia.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA.

3.1 MATERIA PRIMA.

El rastrojo de cada uno de los materiales fue comprado en una forrajera, el material ya se encontraba seco, por lo cual se prosiguió al triturado y posteriormente al molido de cada uno de los materiales, utilizando un molino manual. Una vez que la muestra estaba molida se utilizó un tamiz malla 40, con el cual se tiene una partícula de 0.5 mm de diámetro. Se homogeneizó y se guardó en bolsas plásticas cerradas para que la humedad se mantenga constante en el transcurso de la experimentación.

3.2 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD.

Todos los materiales tienen cierta humedad, modificada por las condiciones ambientales, en particular, los materiales lignocelulósicos presentan propiedades higroscópicas. Para determinar la humedad de cada uno de los tres materiales, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

Se colocaron tres crisoles de tamaño pequeño en una estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante (24 h). Enseguida se trasladaron a un desecador conteniendo gel de sílice, se dejaron enfriar y se determinó su peso en una balanza analítica. Posteriormente se pesó dentro del crisol una cantidad aproximada a 2 g de rastrojo molido y tamizado y se volvió a

introducir en la estufa a 105 °C. Al alcanzar peso constante (24 h) se retira al desecador, donde se enfría y se pesa.

El contenido de humedad se calcula de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$H = \frac{W_H - W_S}{W_H}$$

Donde:

W_H es el peso de la muestra húmeda.

W_S es el peso de la muestra seca.

3.3 HIDRÓLISIS ÁCIDA CUANTITATIVA.

La determinación de la cantidad de polisacáridos (celulosa y hemicelulosa) y de lignina presentes en las muestras de materiales lignocelulósicos se realiza a través de una hidrólisis ácida cuantitativa (HAC) de acuerdo al diagrama de flujo mostrado en la figura 3. Se hidrolizan todos los polisacáridos a monómeros de un modo cuantitativo para poder determinar tanto los azúcares presentes en la materia prima como la lignina (correspondiente al residuo sólido que se obtenga).

A continuación se describe el procedimiento realizado:

1. Los polisacáridos se hidrolizan mediante ácido sulfúrico concentrado a temperatura baja, obteniéndose una disolución compuesta mayormente por monómeros y oligómeros y un residuo sólido que corresponde a lignina de Klason.

Se toman 0.5 g de la muestra con contenido de humedad ya conocida y se depositan en frascos autoclaves en un baño de agua a 30 °C, añadiéndose a cada uno de ellos 5 ml de ácido sulfúrico al 72 % preparado siguiendo las normas estándar. Se mantienen durante 1 h

con agitación, con el fin de asegurar que se produzca una buena mezcla con el material lignocelulósico.

2. Se trata el contenido de cada tubo de ensayo en medio ácido diluido a una temperatura de 121 °C con el propósito de romper todos los oligómeros a monómeros.

Se le añade agua hasta obtener un peso total de disolución de 148.67 g (lo que conduce a una concentración de H_2SO_4 del 4%). Se tapan los recipientes y se introducen en una autoclave durante 1 h a 1 atm de presión. Finalizada esta segunda etapa de hidrólisis se retiran los recipientes de la autoclave, se enfrían en chorro de agua y se reponen las posibles pérdidas. Dichas pérdidas van de 0 a 5 gr. aproximadamente.

Tras la hidrólisis se obtiene una suspensión (hidrolizados), en que la fase sólida corresponde a la lignina de Klason y la fase acuosa contiene los productos de hidrólisis de los polisacáridos (monómeros).

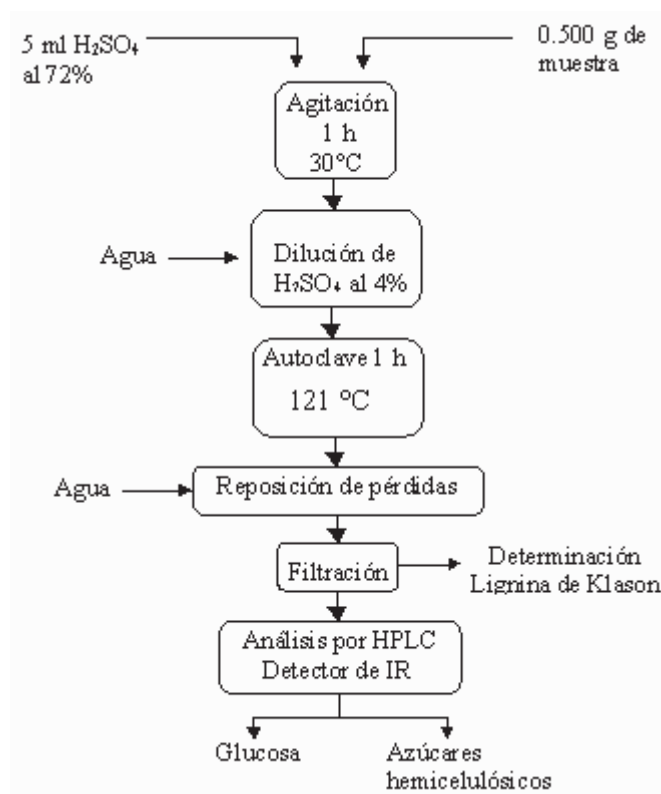


Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso de la hidrólisis ácida cuantitativa.

3.4 DETERMINACIÓN DE LIGNINA.

El peso del residuo insoluble que queda tras la hidrólisis ácida cuantitativa se denomina lignina de Klason.

El residuo se filtra en embudos Buchner con papel filtro a peso constante, se lava con agua y se mantiene en la estufa a 105 °C durante 24 h. Transcurrido el tiempo se retiran, se enfrían en un desecador conteniendo gel de sílice y se determina su peso.

El contenido porcentual en lignina de Klason en base seca (LK) se calcula según la ecuación:

$$LK = \frac{W_r}{W_h(1-H)} * 100$$

Donde:

W_r es el peso en g del residuo seco.

W_h es el peso inicial total de la muestra antes de la HAC (g muestra húmeda).

H es la humedad de la muestra.

3.5 DETERMINACIÓN DE CELULOSA Y HEMICELULOSAS.

En el filtrado obtenido se cuantifican los azúcares existentes por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC)²⁰. Previamente se hicieron patrones de glucosa, xilosa, arabinosa y fructosa. Los azúcares de seis carbonos se consideran originados por el rompimiento de la celulosa, con lo cual, conociendo la cinética de la reacción y la estequiometría de la misma se deduce la cantidad original de celulosa en la muestra. De la misma forma, con los azúcares de cinco unidades de carbono en su estructura, obtenemos la hemicelulosa en la muestra.

3.6 HIDRÓLISIS DE RASTROJO DE MAÍZ, TRIGO Y SORGO.

Para establecer las condiciones óptimas de obtención de hidrolizados, se estudiaron tres variables: concentración de ácido, temperatura y tiempo de hidrólisis. Se utilizó ácido sulfúrico en concentraciones de 2, 4 y 6 % y temperaturas de 80, 100 y 121° C a 0, 20, 40, 60, 180 y 300 minutos. Los hidrolizados se obtuvieron con 5 g de materia prima (ácido, agua y muestra sólida de maíz, trigo y sorgo, respectivamente), manteniendo constante la relación líquido/sólido a 10/1. La fracción líquida estuvo compuesta por el peso correspondiente al agua, al ácido sulfúrico (densidad 1.634) y el contenido de humedad de la muestra.

A continuación se presenta el diagrama de flujo del proceso:

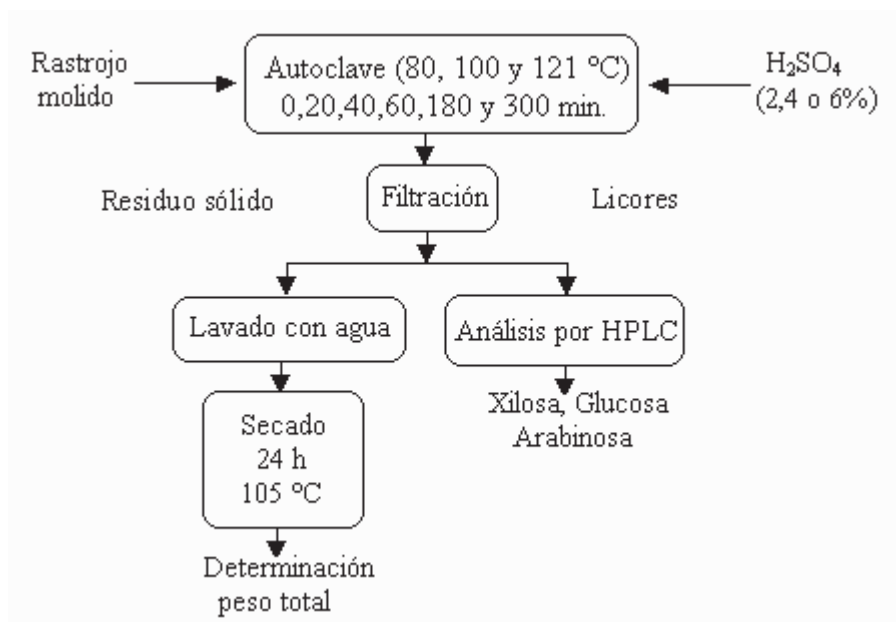


Figura 3.2 Diagrama de flujo de la hidrólisis del rastrojo de maíz, trigo y sorgo.

El material se pesó en una balanza analítica marca Sartorius modelo BP61S, con capacidad de 61g. Dicho material se colocó en frascos de vidrio esterilizables con tapa de rosca. La hidrólisis se realizó en autoclave Felisa (Modelo FE-399). Los hidrolizados se filtraron en papel filtro de tamaño de poro promedio 50 x 50.

Para cuantificar el total de sólidos, se enjuagaron los frascos con agua destilada y se filtró a través del papel filtro. Las muestras se secaron a 105° C por 24 horas. El líquido fue recolectado y se analizó mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

3.7 ANÁLISIS DE LOS HIDROLIZADOS.

Una parte del líquido recolectado de los hidrolizados se filtra a través de membranas de 0.45 micras de diámetro de poro y se analiza por Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC).

Para nuestro estudio se ha utilizado una columna empacada MetaCarb 87C que contiene resinas de poliestireno sulfonado, tiene una longitud de 150 mm con diámetro interno de 4.6 mm y diámetro externo de 1/4 in, recomendada para separación de carbohidratos, capaz de resolver como picos separados, los monosacáridos de nuestro estudio.

Las especificaciones del equipo utilizado son las siguientes:

- Bomba Cromatográfica Cuaternaria Varian 350.
- Detector diferencial de índice de refracción Varian 800.
- Control de Temperatura del HPLC Varian
- Automuestreador Varian 410.

Las condiciones de operación utilizadas fueron:

- Presión aproximada: 170-200 atm.
- Caudal de la fase móvil: 0.6 ml/min.
- Fase móvil: Agua HPLC
- Temperatura 70°C
- Volumen de inyección: 20 μ L.

Se realizaron patrones de los principales azúcares, glucosa, xilosa y arabinosa, con los cuales se determinaron las cantidades presentes de éstas en los hidrolizados.

En la figura 3.3 se muestra un cromatograma en el cual se indican los picos correspondientes a los azúcares determinados, corresponde a un cromatograma de patrones.

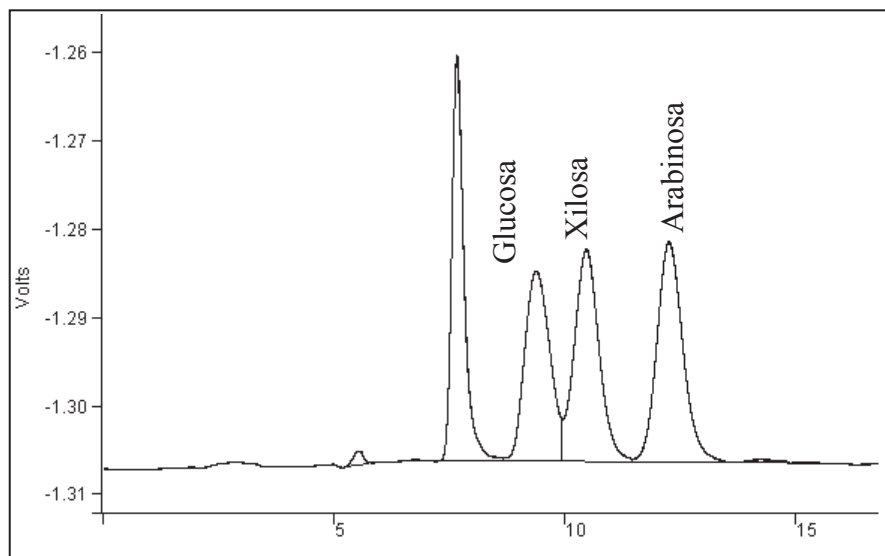


Figura 3.3 Cromatograma modelo.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 MAÍZ

COMPOSICIÓN INICIAL DE MAÍZ

Se determinó la presencia de azúcares iniciales, para lo cual se utilizó 0.5 g de maíz con una humedad previamente cuantificada, debido a que eran azúcares iniciales no se utilizó catalizador, simplemente agua e inmediatamente fue filtrada y analizada. En la tabla 4.1 se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 4.1 Contenido de azúcares iniciales en el maíz.

Azúcares	Concentración g/l
Glucosa	0.193
Xilosa	0.042
Arabinosa	0.137

La concentración de azúcares iniciales es poco considerable, así que para fines prácticos se tomará la consideración de que para tiempo inicial la concentración es cero. Más adelante podremos corroborar que éstas concentraciones iniciales son prácticamente nulas con respecto a las concentraciones obtenidas de los hidrolizados.

CROMATOGRAMA OBTENIDO EN LA HIDRÓLISIS DE MAÍZ.

Una vez teniendo los filtrados de las hidrólisis realizadas a distintas condiciones, concentración del catalizador de 2, 4 y 6%, temperaturas de 80, 100 y 121°C y tiempos de reacción de 20, 40, 60, 180 y 300 minutos, eran analizados en el HPLC, obteniéndose cromatogramas como el que se muestra en la figura 4.1.

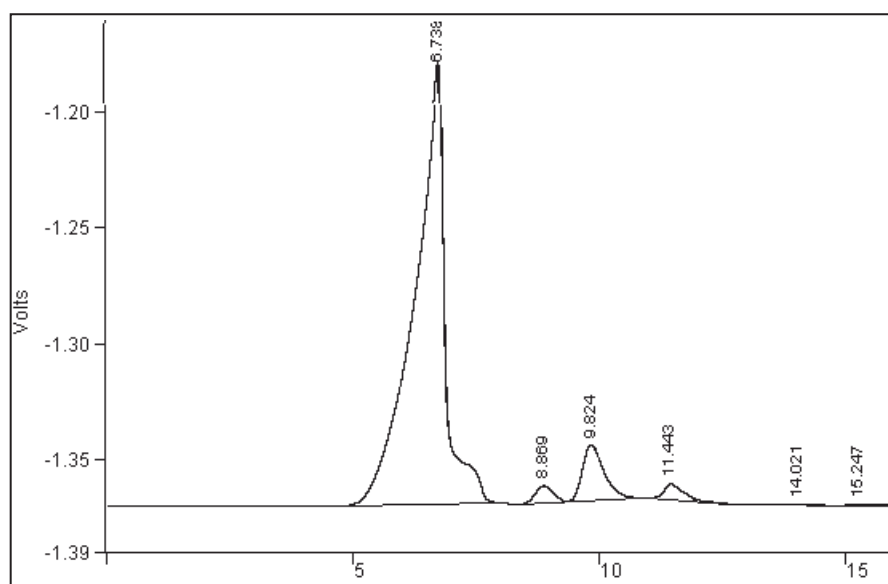


Figura 4.1 Cromatograma de la hidrólisis de maíz.

CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

La caracterización del material tiene como finalidad conocer las cantidades aproximadas de polímeros existentes en nuestra muestra para así hacer una determinación preliminar de la viabilidad del proceso, es decir, si obtendremos resultados adecuados que nos permitan pensar en llevar las muestras a procesos fermentativos. Para llevar a cabo la caracterización se utilizó el procedimiento de análisis ácida cuantitativa, obteniendo los resultados presentados en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Caracterización del maíz

Componente	%
Celulosa	17.26
Hemicelulosa	30.19
Lignina de Klason	32.21

PRODUCTOS DE LA HIDRÓLISIS

El maíz se sometió a hidrólisis ácida bajo diferentes condiciones. Se estudiaron 3 concentraciones de ácido sulfúrico (2, 4 y 6 %), seis tiempos de reacción (0 min., 20 min., 40 min., 1 h, 3 h y 5 h) y tres temperaturas (80, 100 y 121°C). Los azúcares analizados fueron glucosa, xilosa y arabinosa. Los resultados obtenidos fueron comparados con los patrones para así obtener las concentraciones de azúcares presentes en los hidrolizados.

En la tabla 4.3 se presentan los resultados experimentales obtenidos para glucosa y en la tabla 4.4 para la xilosa y arabinosa, se presentan juntos por ser ambas azúcares de cinco carbonos.

Tabla 4.3 Obtención de glucosa (g/l) en la hidrólisis de maíz.

TIEMPO min.	80 ° C			100 ° C			121 ° C		
	2%	4%	6%	2%	4%	6%	2%	4%	6%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1.105	4.484	0.813	4.672	3.406	3.193	5.934	2.912	2.564
40	0.723	0.943	1.171	3.979	3.208	4.389	11.492	14.971	14.055
60	3.378	3.402	1.535	5.011	4.113	4.465	10.952	17.559	18.275
180	4.295	3.462	---	6.763	14.356	19.757	12.039	16.768	13.621
300	2.541	5.426	2.999	1.691	4.872	3.915	14.796	10.588	15.110

Tabla 4.4 Obtención de xilosa y arabinosa (g/l) en la hidrólisis de maíz.

TIEMPO min.	80 ° C			100 ° C			121 ° C		
	2%	4%	6%	2%	4%	6%	2%	4%	6%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0.782	2.342	3.182	1.775	2.630	2.972	1.922	3.564	5.302
40	0.848	0.622	0.584	2.275	1.904	3.753	10.02	8.941	12.188
60	0.908	1.632	2.145	1.847	2.036	2.762	5.927	8.245	9.449
180	3.862	2.587	---	7.687	10.367	11.175	11.50	14.438	10.038
300	3.816	8.671	11.42	7.798	7.465	6.299	11.87	8.886	10.552

RENDIMIENTO DE LA HIDRÓLISIS

Se determinó el porcentaje de material hidrolizado por diferencia de peso. Se aprecia que para concentración del 2% de catalizador y tiempos cortos de reacción el rendimiento es bajo y los rendimientos más altos se alcanzan cuando se tiene temperatura alta, concentración de catalizador del 6% y a tiempos de reacción más altos. En la tabla 4.5 se muestran los resultados de los rendimientos obtenidos en la hidrólisis de maíz.

Tabla 4.5 Rendimiento del material hidrolizado.

TIEMPO min.	A 80 °C en %			A 100 °C en %			A 121 °C en %		
	2%	4%	6%	2%	4%	6%	2%	4%	6%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	18.823	20.217	18.705	30.069	32.667	34.015	33.753	41.54	61.221
40	10.417	14.319	17.166	31.65	31.79	33.077	45.395	49.188	49.657
60	23.779	26.368	29.865	32.6	31.088	35.048	51.065	53.08	59.93
180	33.436	35.609	40.839	47.54	49.918	50.037	46.616	47.269	49.316
300	43.712	46.011	45.868	43.428	45.451	46.944	50.266	51.117	50.29

De manera tabular es difícil observar con claridad el comportamiento del rendimiento en el tiempo, temperatura y respecto al catalizador, para lo cual los datos anteriormente tabulados se presentan en forma gráfica para observar con mayor rapidez el perfil del rendimiento.

En la figura 4.2 se muestran gráficamente el rendimiento con respecto al tiempo, temperatura y concentración del catalizador.

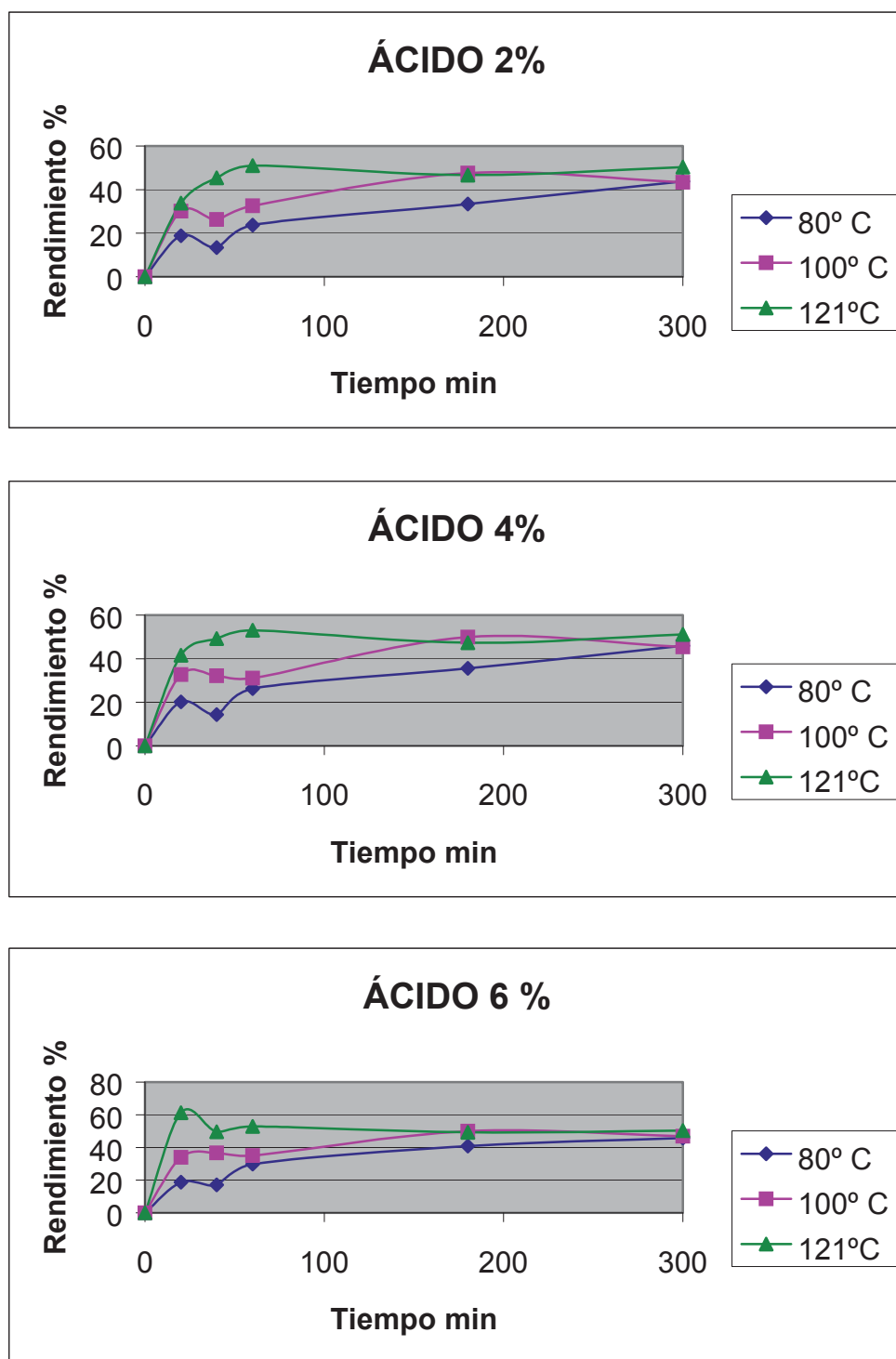


Figura 4.2 Rendimiento en la hidrólisis de maíz.

EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO

Con el objeto de analizar y explicar el comportamiento en el tiempo de cada una de las especies presentes en el proceso de hidrólisis ácida del maíz con respecto a la concentración de ácido sulfúrico y de la temperatura se presentan por separado los resultados experimentales para los azúcares estudiados que fueron glucosa, xilosa y arabinosa. La separación se hizo de manera tal que el comportamiento de los azúcares de cinco carbonos fueran analizados juntos y por separado de los azúcares de seis carbonos.

COMPORTAMIENTO DE LA GLUCOSA

Para analizar de manera más clara el comportamiento de la glucosa en la hidrólisis de maíz para las temperaturas utilizadas, las diferentes concentraciones de ácido sulfúrico utilizado como catalizador y a través del tiempo se presenta el comportamiento en forma gráfica. Se puede apreciar que para los tres niveles de temperatura, la velocidad de producción de glucosa es proporcional a la concentración de ácido sulfúrico. Es posible observar que para baja concentración del ácido sulfúrico prácticamente la producción de glucosa se lleva a cabo después de una hora. De igual manera se puede observar que para 80°C la producción de glucosa es baja respecto a las concentraciones alcanzadas a mayor temperatura. La máxima concentración obtenida fue de 20 g/l a una temperatura de 100°C y utilizando el ácido sulfúrico con una concentración del 6%.

En la figura 4.3 se observa el comportamiento de la glucosa a través del tiempo, a diferentes temperaturas y utilizando tres concentraciones de catalizador.

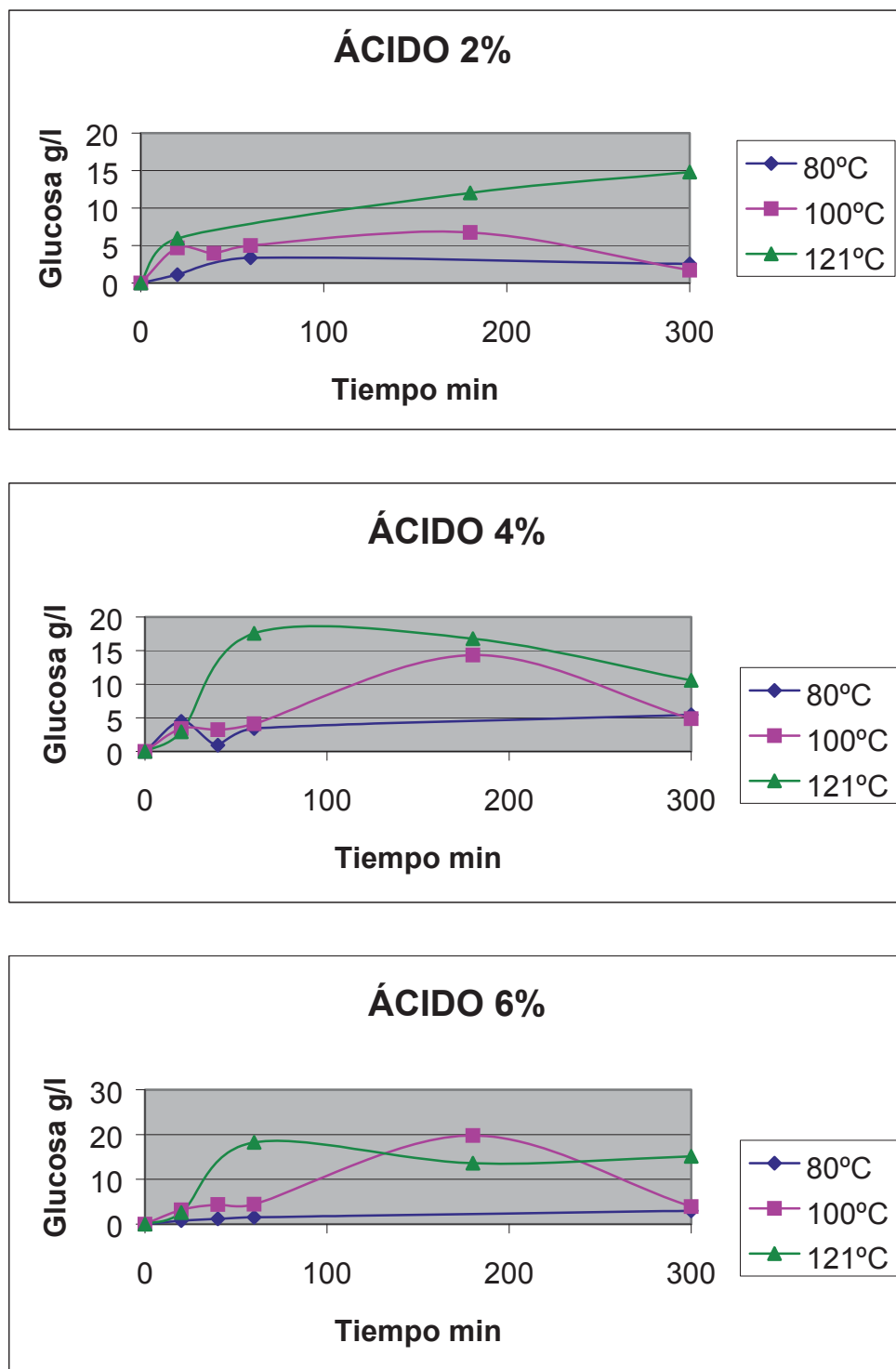


Figura 4.3 Obtención de glucosa en la hidrólisis de maíz.

COMPORTAMIENTO DE LA XILOSA

En la figura 4.4 se muestran los perfiles de la xilosa y arabinosa con respecto a la temperatura, concentración de catalizador y tiempos de reacción.

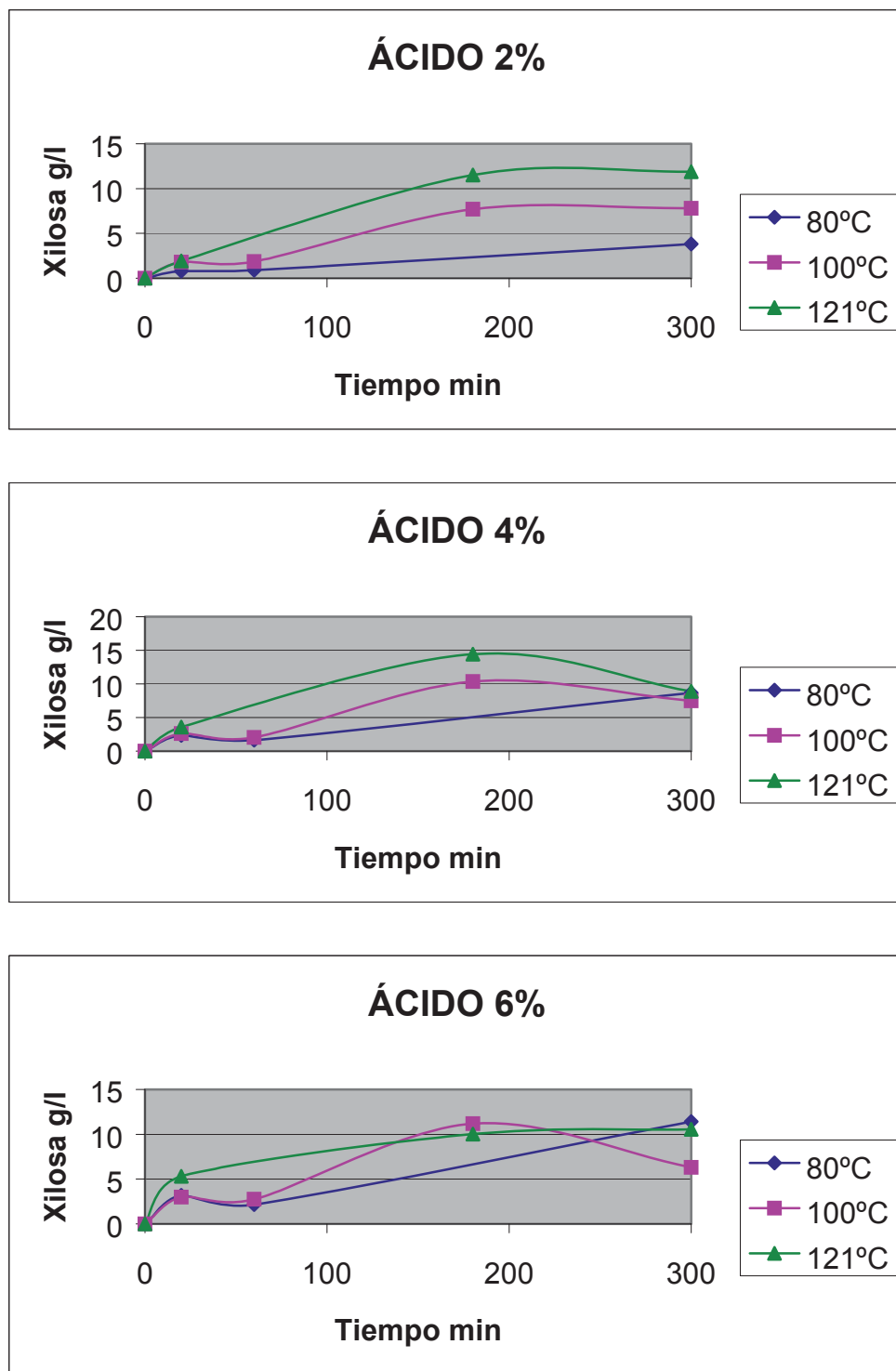


Figura 4.4 Obtención de xilosa y arabinosa en la hidrólisis de maíz.

4.2 SORGO

COMPOSICIÓN INICIAL DE SORGO

Se determinó la composición de azúcares iniciales en la muestra de sorgo. Es decir, se llevó a cabo para un tiempo cero, para lo cual no se utilizó catalizador y el filtrado se analizó inmediatamente para no dar tiempo a que la reacción transcurriera. La determinación de azúcares iniciales se realizó utilizando 0.5 g de sorgo con una humedad conocida y agua con la misma relación sólido-líquido que la utilizada posteriormente con catalizador.

En la tabla 4.6 se presentan los resultados obtenidos de azúcares iniciales de interés en la muestra de sorgo.

Tabla 4.6 Contenido de azúcares iniciales en el sorgo.

Azúcares	Concentración g/l
Glucosa	0.197
Xilosa	0
Arabinosa	0.189

De los resultados obtenidos anteriormente es posible observar que la concentración inicial de glucosa y arabinosa es baja y no hay presencia de xilosa, por lo cual no se considerarán azúcares iniciales.

CROMATOGRAMA OBTENIDO EN LA HIDRÓLISIS DE SORGO.

Los filtrados resultado de las diferentes hidrólisis del sorgo fueron analizados mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), el cromatógrafo arroja los resultados en forma de gráficos, en la figura 4.5 se muestra un cromatograma obtenido para el sorgo.

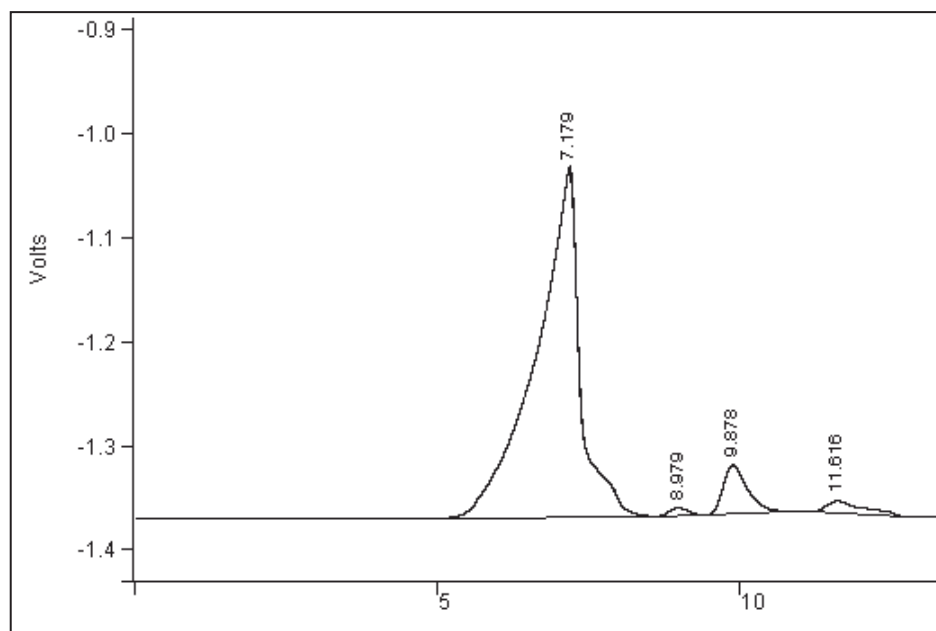


Figura 4.5 Cromatograma de la hidrólisis de sorgo.

CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

La caracterización del material se llevó a cabo mediante la hidrólisis ácida cuantitativa (HAC), con ésta técnica la muestra recibe un ataque fuerte del catalizador, en este procedimiento se utilizan condiciones de operación muy altas. Se utilizan 0.5 g de muestra sólida con humedad conocida, catalizador a muy alta concentración y alta temperatura.

En la tabla 4.7 se presentan los porcentajes de los polisacáridos presentes en el sorgo, siendo éstos resultados de suma importancia, ya que indican las cantidades de azúcares que es posible obtener de dicho material.

Tabla 4.7 Caracterización del sorgo.

Componente	%
Celulosa	8.13
Hemicelulosa	9.12
Lignina de Klason	31.18

PRODUCTOS DE LA HIDRÓLISIS

La hidrólisis ácida de la muestra de sorgo se llevó a cabo a concentraciones de 2, 4 y 6% de ácido sulfúrico, a temperatura de 80,100 y 121°C durante seis tiempos de reacción (0,20,40,180 y300 min.). De las muestras hidrolizadas se analizaron los azúcares (glucosa, xilosa y arabinosa).

En la tabla 4.8 se concentran los resultados obtenidos de glucosa existente en los hidrolizados del sorgo y en la tabla 4.9 se observa la concentración de xilosa y arabinosa presentes en cada uno de los hidrolizados.

Tabla 4.8 Obtención de glucosa (g/l) en la hidrólisis de sorgo.

TIEMPO min.	80 ° C			100 ° C			121 ° C		
	2%	4%	6%	2%	4%	6%	2%	4%	6%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	12.66	11.99	9.043	4.898	5.124	4.283	5.765	5.2	6.468
40	6.255	7.159	3.114	4.427	6.104	4.283	14.186	19.010	13.810
60	6.895	5.526	2.976	5.049	5.784	4.597	11.172	15.976	14.620
180	6.066	7.856	8.377	5.934	9.288	9.972	24.813	19.631	23.739
300	4.653	4.283	4.747	19.01	48.98	56.898	18.143	17.691	16.127

Tabla 4.9 Obtención de xilosa y arabinosa (g/l) en la hidrólisis de sorgo.

TIEMPO min.	80 ° C			100 ° C			121 ° C		
	2%	4%	6%	2%	4%	6%	2%	4%	6%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1.129	2.350	1.521	1.909	3.521	6.143	3.856	4.840	6.413
40	0.878	1.152	1.446	1.515	1.623	2.023	13.599	10.605	12.549
60	0.837	0.723	0.876	1.913	4.227	3.336	7.310	7.868	7.964
180	3.897	7.531	9.331	4.184	8.352	8.248	14.533	10.571	13.746
300	1.780	2.510	4.326	1.248	2.387	1.901	11.699	12.844	12.482

RENDIMIENTO DE LA HIDRÓLISIS

Para obtener las condiciones óptimas de operación es necesario conocer el rendimiento de la reacción, el rendimiento se obtuvo por diferencia de pesos del material antes de la hidrólisis y después pero nuevamente seco.

En la tabla 4.10 se presentan los resultados obtenidos experimentalmente del rendimiento del los hidrolizados de sorgo.

Tabla 4.10 Rendimiento del material hidrolizado.

TIEMPO min.	A 80 °C en %			A 100 °C en %			A 121 °C en %		
	2%	4%	6%	2%	4%	6%	2%	4%	6%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	14.814	15.422	19.878	29.857	29.453	33.686	30.779	37.573	48.575
40	14.61	15.382	14.367	25.688	32.597	30.075	39.895	42.546	47.808
60	18.155	19.095	21.405	23.784	35.272	29.755	44.443	46.612	47.485
180	29.568	36.83	37.822	30.058	38.795	36.487	44.259	46.498	44.899
300	24.859	30.511	36.845	38.784	40.923	42.065	46.9954	47.511	41.303

Para apreciar de manera gráfica estos resultados, se presenta el comportamiento del rendimiento a través del tiempo de reacción, concentración del ácido sulfúrico y temperaturas.

En la figura 4.6 se presentan gráficamente los resultados de rendimiento en los hidrolizados de sorgo.

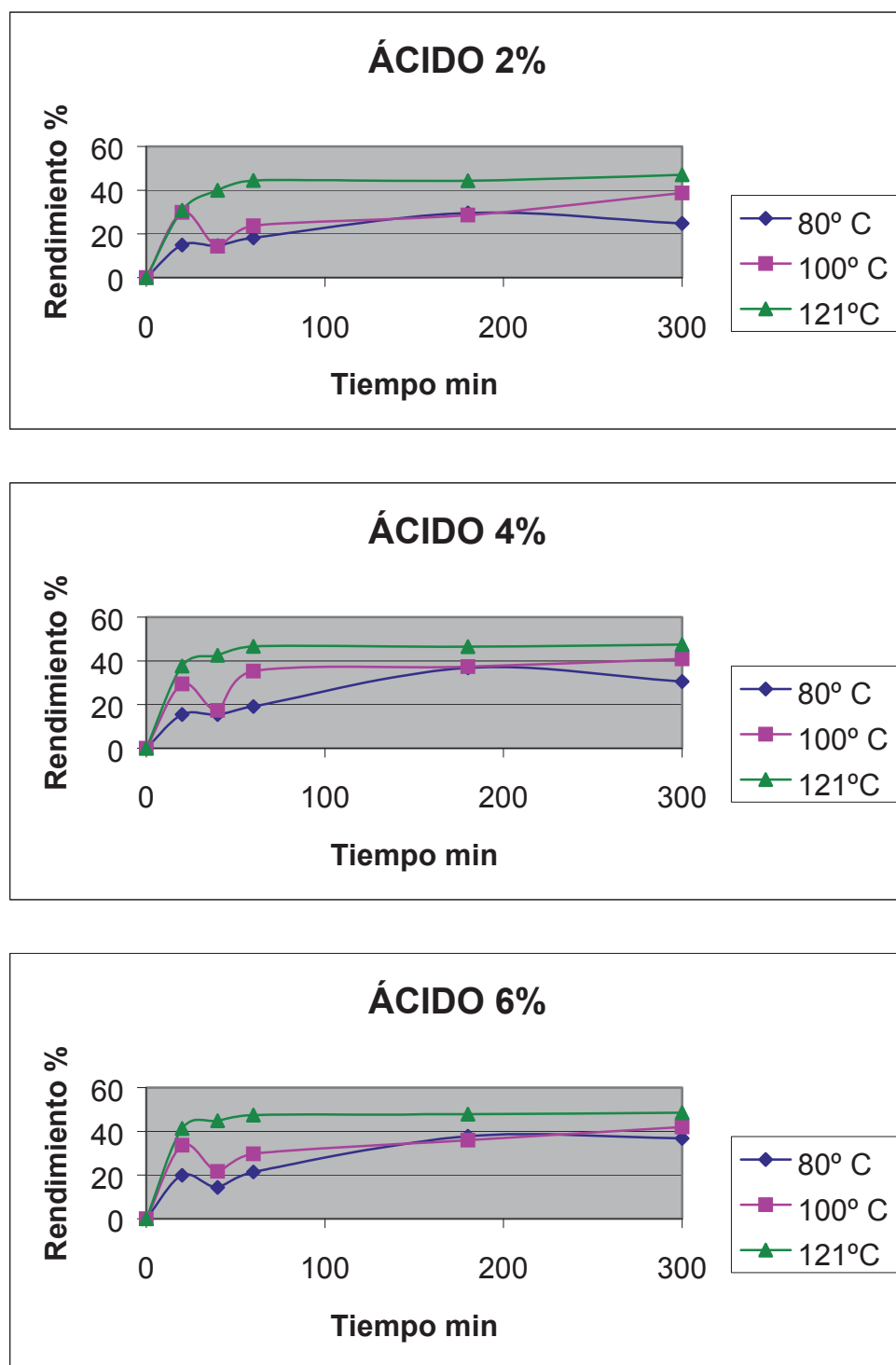


Figura 4.6 Rendimiento en la hidrólisis de sorgo.

EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO

Para analizar el comportamiento de la muestra de sorgo en la hidrólisis con respecto al tiempo, temperatura y concentración del catalizador, los resultados de los azúcares analizados se presentan por separado. Presentándose los azúcares de cinco carbonos juntos y en otro apartado de seis carbonos.

COMPORTAMIENTO DE LA GLUCOSA

Anteriormente se presentaron tabulados los resultados obtenidos en la hidrólisis de sorgo, con la finalidad de observar la tendencia de las concentraciones obtenidas para este azúcar, se presentaran gráficamente. En dichos gráficos podremos observar y analizar el comportamiento de la glucosa para las diferentes temperaturas y concentraciones de ácido a través del tiempo.

En éstos gráficos es posible notar que para bajas concentraciones de catalizador la producción de glucosa se lleva a cabo aproximadamente después de una hora.

Las condiciones óptimas para la obtención de glucosa son de 60 g/l a una temperatura de 100°C y utilizando el ácido sulfúrico con una concentración del 6%.

En la figura 4.7 se presenta el comportamiento de la glucosa con respecto a la concentración del catalizador.

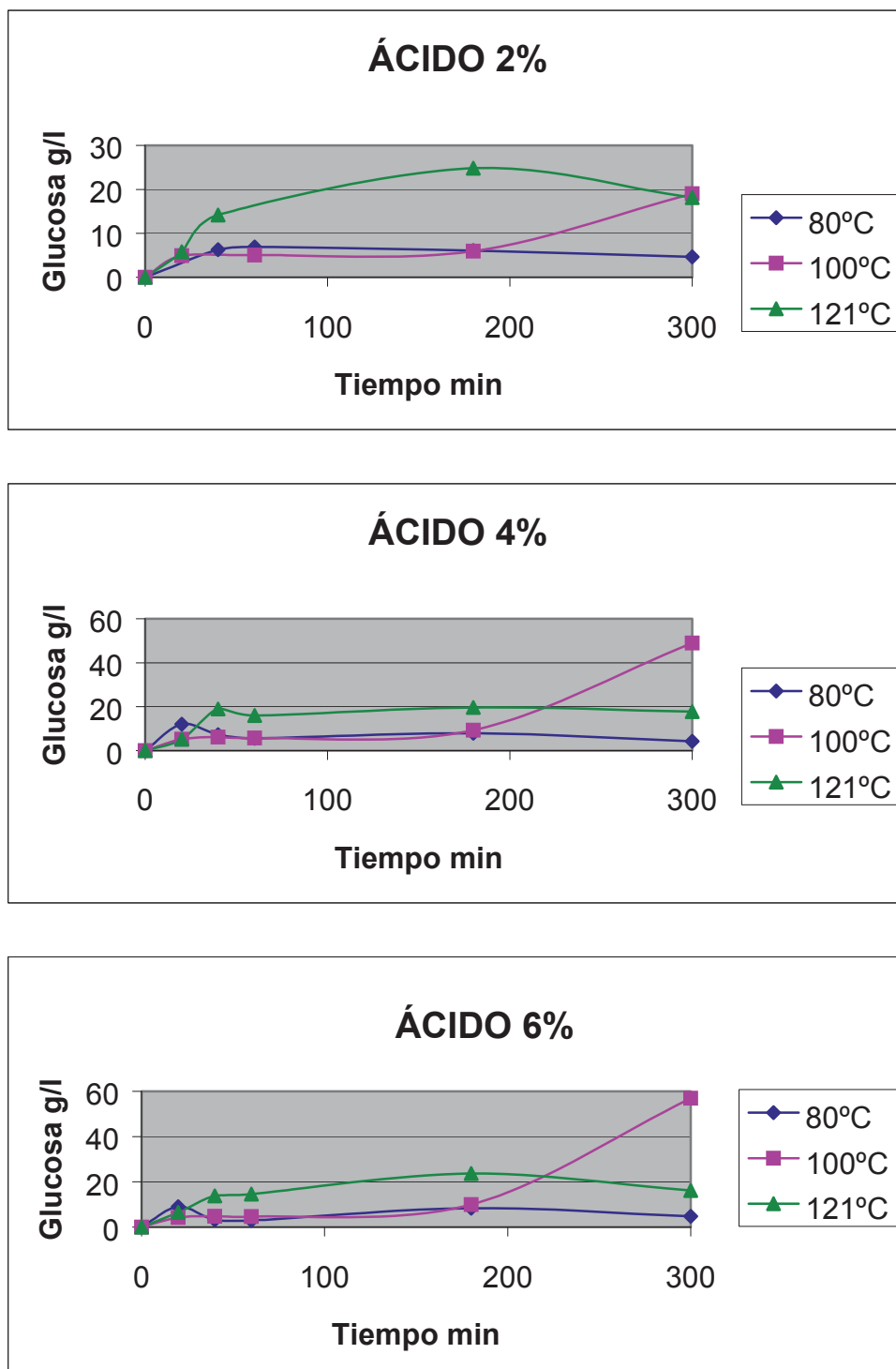


Figura 4.7 Obtención de glucosa en la hidrólisis de sorgo.

COMPORTAMIENTO DE LA XILOSA

En la figura 4.8 se muestra el comportamiento de la xilosa con respecto al catalizador. La concentración máxima fue de 15 g/l, 121°C y catalizador al 2%.

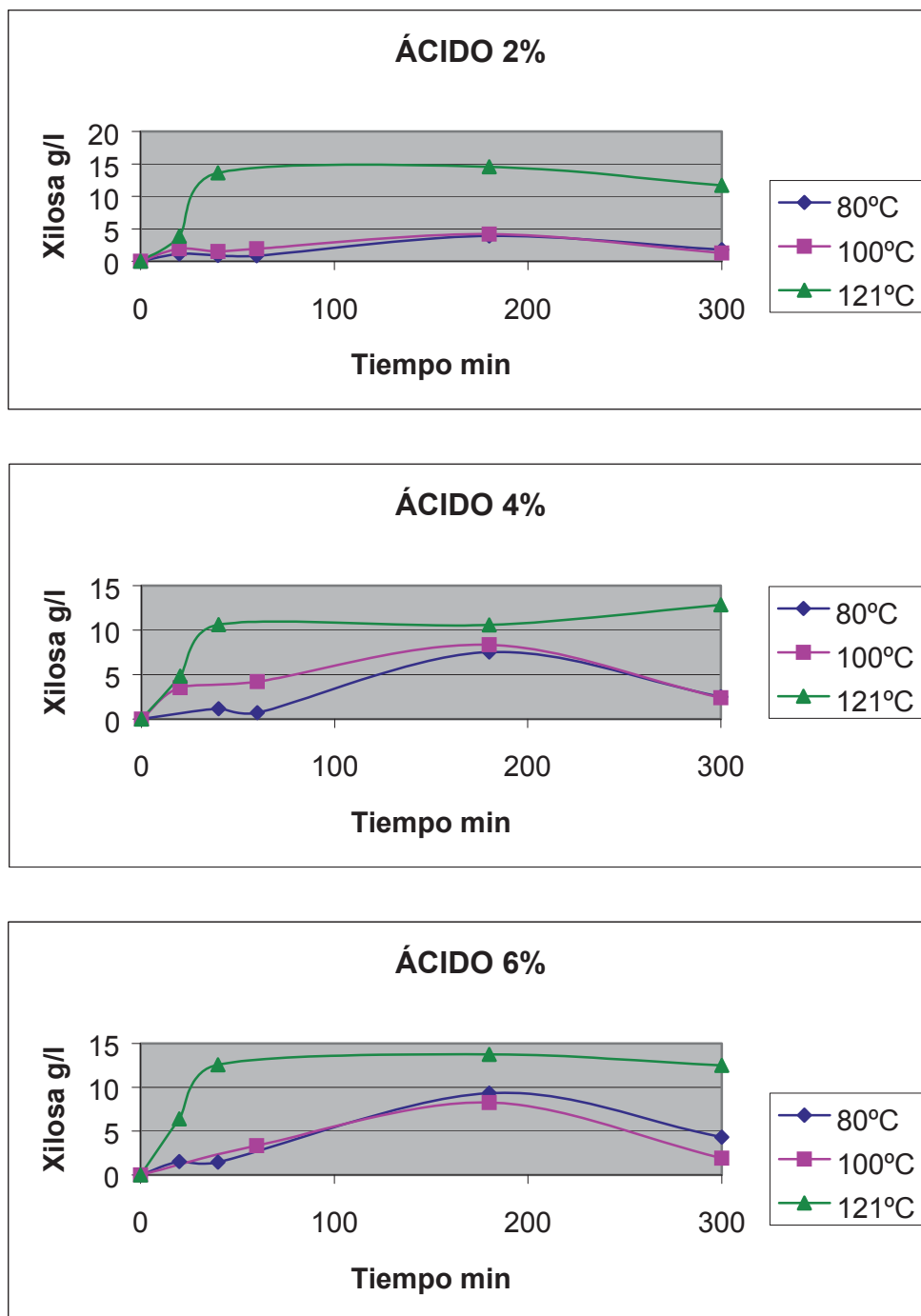


Figura 4.8 Obtención de xilosa en la hidrólisis de sorgo.

4.3 TRIGO

COMPOSICIÓN INICIAL DE TRIGO

La determinación de la composición inicial del trigo se llevó a cabo de la misma manera que la hidrólisis, únicamente sin utilizar catalizador y analizándose la muestra de inmediato para que así fuera la composición del tiempo de reacción cero. Se realizó utilizando 0.5 g de la muestra de trigo y agua sin catalizador.

En la tabla 4.11 se presentan los azúcares iniciales obtenidos mediante cromatografía líquida de alta resolución.

Tabla 4.11 Contenido de azúcares iniciales en el trigo.

Azúcares	Concentración g/l
Glucosa	0.276
Xilosa	0
Arabinosa	0.450

De acuerdo con los resultados mostrados anteriormente es posible notar que inicialmente no hay xilosa y que la concentración de los otros azúcares es baja, entonces se tomará la consideración de que no hay azúcares iniciales.

CROMATOGRAMA OBTENIDO EN LA HIDRÓLISIS TRIGO.

El análisis de los filtrados productos de la hidrólisis se realizó por cromatografía líquida de alta resolución, obteniéndose los resultados en forma gráfica. En la figura 4.9 se muestra un cromatograma como ejemplo de los obtenidos en la hidrólisis de trigo.

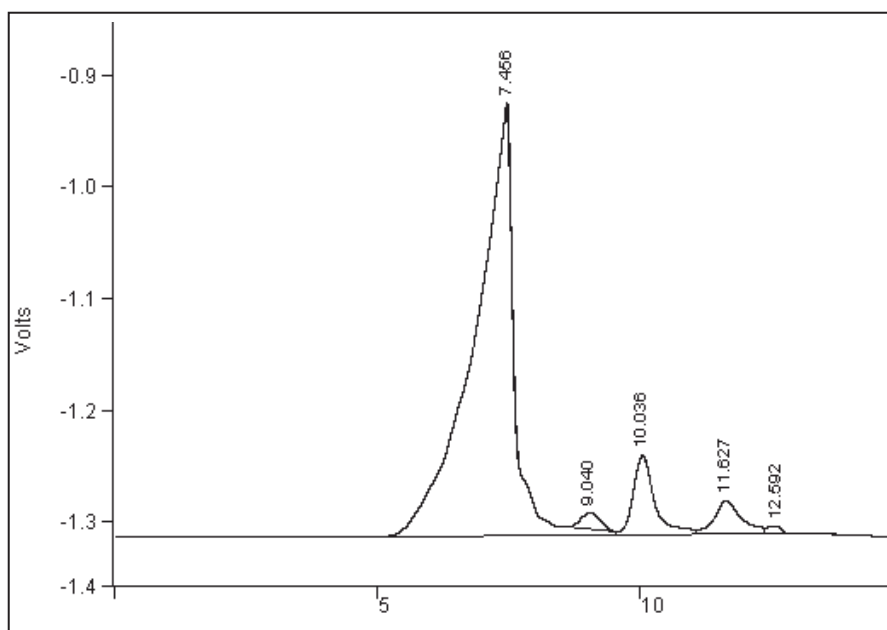


Figura 4.9 Cromatograma de la hidrólisis de trigo.

CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Para realizar la caracterización del trigo se siguieron todos los pasos descritos de la hidrólisis ácida cuantitativa. La caracterización del material es una prueba preliminar para conocer si hay presencia de azúcares en la muestra a analizar así como la cantidad para determinar si el material pudiera utilizarse para obtener alcohol. En la tabla 4.12 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del trigo.

Tabla 4.12 Caracterización del trigo

Componente	%
Celulosa	14.84
Hemicelulosa	17.94
Lignina de Klason	15.39

PRODUCTOS DE LA HIDRÓLISIS

La hidrólisis de la muestra de trigo se realizó para tres niveles de concentración de catalizador (2, 4 y 6%), con temperaturas de 80, 100 y 121°C, y tiempo de reacción de 20, 40, 60, 180 y 300 min. Mediante cromatografía líquida de alta resolución HPLC. se determinó la cantidad de glucosa, xilosa y arabinosa presentes en los filtrados resultados de la hidrólisis, esto en comparación con patrones de los azúcares analizados.

En la tabla 4.13 se presentan las concentraciones de glucosa en la hidrólisis del trigo para diferentes concentraciones de catalizador, temperaturas y tiempos de reacción. En la tabla 4.14 se presentan las concentraciones de xilosa y arabinosa.

Tabla 4.13 Obtención de glucosa (g/l) en la hidrólisis de trigo.

TIEMPO min.	80 ° C			100 ° C			121 ° C		
	2%	4%	6%	2%	4%	6%	2%	4%	6%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	10.00	6.669	1.330	5.633	5.746	4.955	4.936	7.24	7.837
40	11.58	9.583	6.028	5.476	5.991	5.501	15.618	20.68	19.57
60	7.046	7.705	7.762	5.727	5.878	6.160	21.685	20.47	16.50
180	6.669	7.762	4.295	4.346	7.950	4.793	18.708	21.21	20.49
300	28.58	39.655	22.68	4.346	7.950	4.793	27.281	14.18	14.03

Tabla 4.14 Obtención de xilosa y arabinosa (g/l) en la hidrólisis de trigo.

TIEMPO min.	80 ° C			100 ° C			121 ° C		
	2%	4%	6%	2%	4%	6%	2%	4%	6%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1.872	1.788	2.912	1.618	2.578	3.308	2.105	4.062	5.528
40	2.230	2.145	2.380	1.989	3.227	2.723	9.649	13.605	12.643
60	1.814	1.473	1.484	2.825	4.488	5.788	9.398	6.487	7.584
180	2.663	2.742	3.078	3.923	10.51	7.951	8.052	11.347	8.761
300	4.731	8.179	5.547	3.560	4.550	5.991	12.96	12.837	11.371

RENDIMIENTO DE LA HIDRÓLISIS

En la tabla 4.15 se muestran los porcentajes de la muestra que fue hidrolizada. El rendimiento se calculó por diferencia de pesos de la muestra sólida. Se observa que conforme aumenta el tiempo de reacción y la concentración del ácido el rendimiento aumenta, así mismo, con respecto a la temperatura a la cual se lleva a cabo la hidrólisis. En los datos tabulados tenemos que el rendimiento más alto fue aproximadamente del 61% para temperatura de 121 °C, tiempo de reacción de 3 horas y concentración media (4%) de catalizador.

Tabla 4.15 Rendimiento del material hidrolizado.

TIEMPO min.	A 80 °C en %			A 100 °C en %			A 121 °C en %		
	2%	4%	6%	2%	4%	6%	2%	4%	6%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	21.553	22.675	23.159	30.753	35.693	36.138	48.997	52.118	57.764
40	24.491	24.748	27.732	29.786	33.653	35.449	50.314	51.244	49.621
60	24.771	23.986	29.281	24.843	33.633	39.703	52.705	55.416	55.474
180	28.558	33.698	38.757	41.231	45.777	48.083	49.299	61.497	52.924
300	39.479	41.105	45.787	43.487	46.102	51.423	53.392	54.171	53.391

Resulta más fácil analizar los resultados de manera gráfica, en la figura 4.10 se presentan los gráficos del rendimiento, mostrando más claramente los resultados más altos.

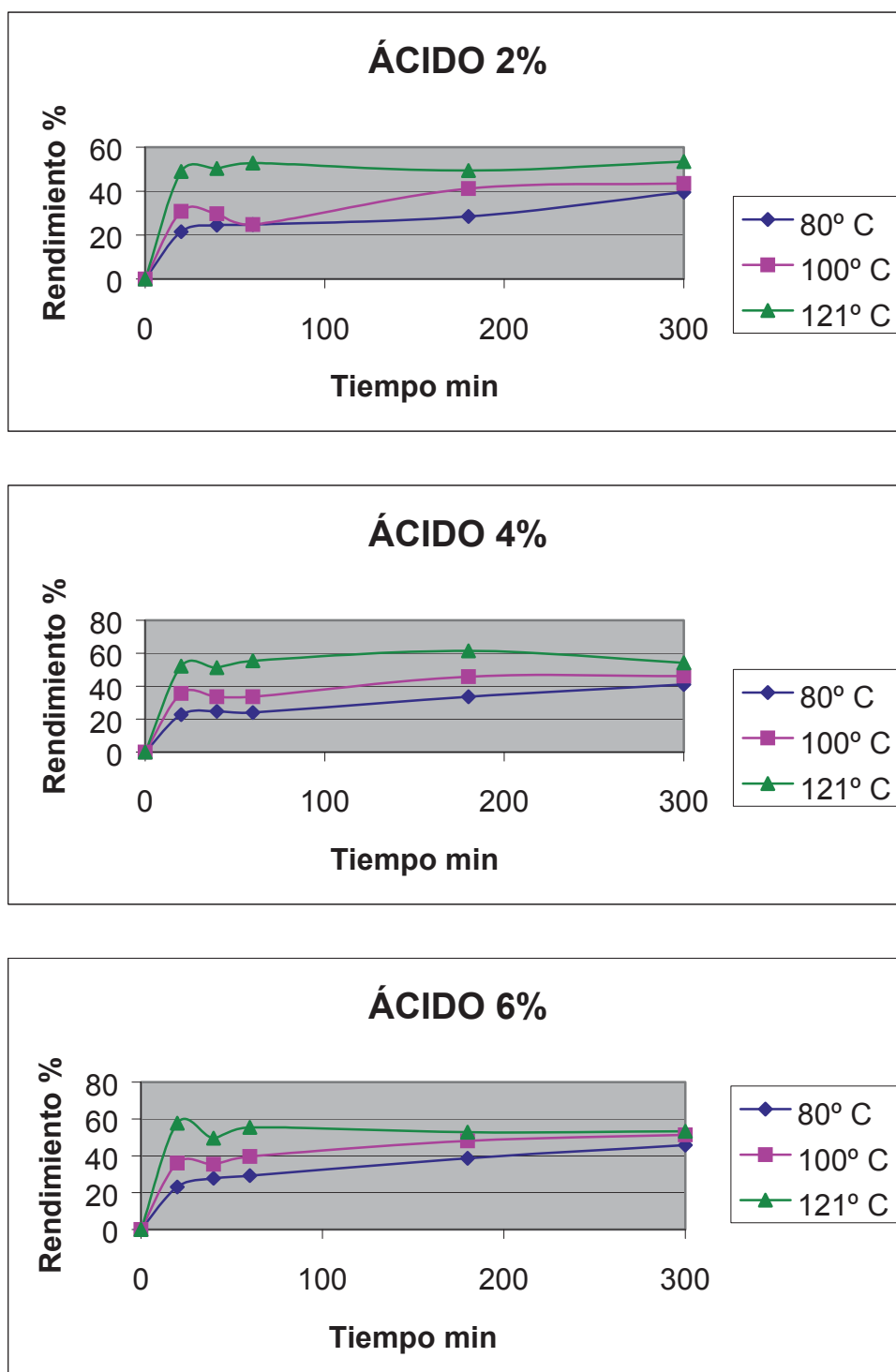


Figura 4.10 Rendimiento en la hidrólisis de trigo.

EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO

A continuación se presentan por separado el comportamiento de la glucosa con respecto al catalizador y el comportamiento de la xilosa y arabinosa con respecto al catalizador por separado, para así analizarlos de manera más sencilla.

COMPORTAMIENTO DE LA GLUCOSA

En este apartado se presenta gráficamente el comportamiento de la glucosa con respecto a la concentración del ácido sulfúrico. Claramente es posible también observar el comportamiento con respecto al tiempo de reacción y a la temperatura a la que se lleva a cabo la reacción.

Tenemos que, si la concentración de ácido es baja casi no hay producción de glucosa hasta después de una hora. Las condiciones óptimas son temperatura de 80°C, concentración de catalizador del 4% y tiempo de 5 horas, obteniendo 40 g/l.

En la figura 4.11 se observa gráficamente el comportamiento de la glucosa con respecto al ácido, de ésta manera se observan rápidamente las más altas concentraciones.

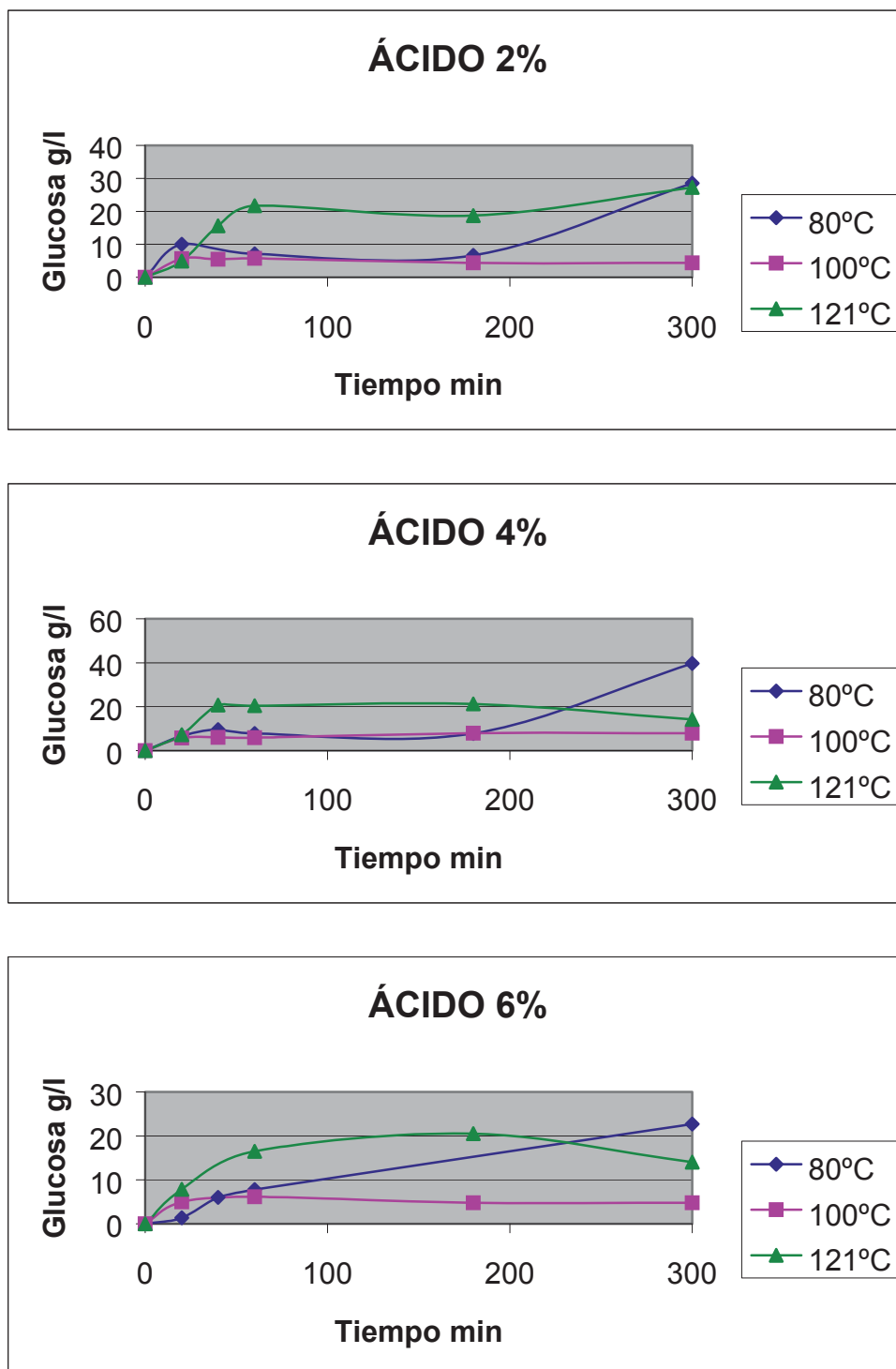


Figura 4.11 Obtención de glucosa en la hidrólisis de trigo.

COMPORTAMIENTO DE LA XILOSA

En la figura 4.12 se muestra el comportamiento de la xilosa, donde se observar que la concentración máxima es de 13.6 g/l para 121°C, concentración del 4%, y 40 minutos.

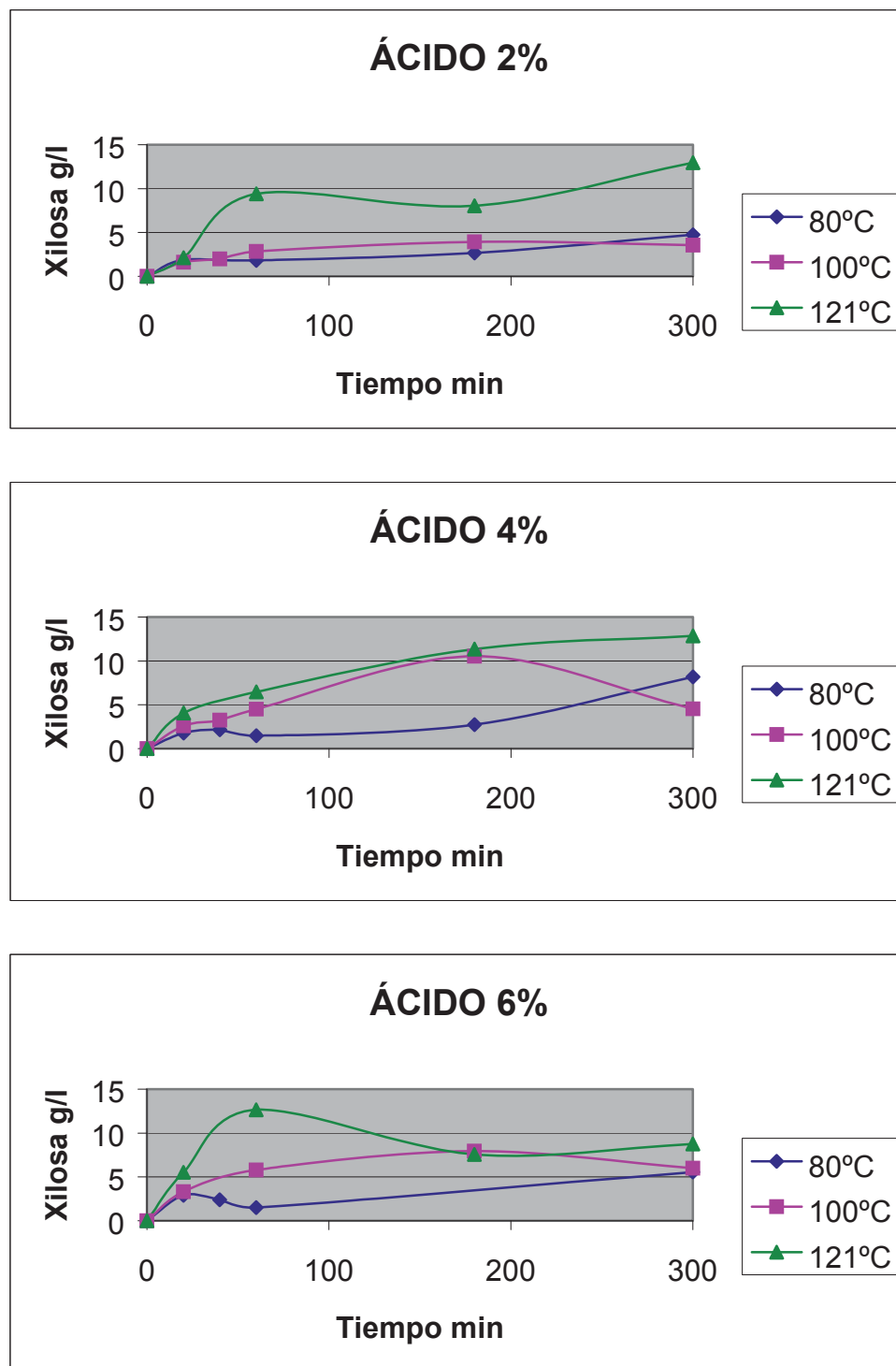


Figura 4.12 Obtención de xilosa en la hidrólisis de trigo.

CONCLUSIONES.

Los residuos agrícolas en la actualidad se utilizan como alimento para animales o simplemente se convierten en desechos inservibles.

Por esta razón es viable llevarlos a procesos fermentativos donde tengan una mejor utilización. Por otro lado habría la necesidad de desarrollar y utilizar alimentos balanceados con mayores rendimientos para los animales.

Para el caso del maíz las condiciones óptimas de operación son 100 °C, 3 horas y con ácido al 6% como catalizador, obteniéndose así 19.75 g/L de glucosa, 11.17 g/L de xilosa y arabinosa y rendimiento de 50%.

Las condiciones óptimas de operación para el sorgo son 121 °C, 3 horas y 2% de concentración de ácido sulfúrico, con dichas condiciones se obtienen 24.81 g/L de glucosa, 14.53 g/L de xilosa y arabinosa con rendimiento del 44.25%

Para el trigo los mejores resultados se obtienen a 121 °C, 5 horas y concentración de ácido del 2%, obteniendo una concentración de glucosa de 27.28 g/L, xilosa y arabinosa 12.96 g/L y se tiene un rendimiento del 53.39%.

Por estos resultados es posible considerar que es factible utilizar estos materiales en un proceso fermentativo para la obtención de etanol.

RECOMENDACIONES.

1. Analizar el factor de dilución o relación líquido/sólido en la preparación de la muestra y encontrar las mejores condiciones.
2. Realizar pruebas de hidrólisis con volúmenes mayores en donde se incluya agitación de la muestra, ya que existen trabajos anteriores donde se observa el efecto de la agitación²¹.
3. Hacer hidrólisis utilizando otro catalizador con fines comparativos de rendimiento.

REFERENCIAS

1. Murria Danielle, “Earth Policy Institute”,
2. 2005Secretaría de Energía, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía.
3. Office of Transportation Technology, <http://www.ott.doe.gov/ofd/ethanol.html>
4. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Sistema Integral reinformación Agroalimentaria y Pesquera.
5. Gómez-Vázquez, P., Grajeda-Cabrera, O., Cuestionarios, (investigación de campo) INIFAP, Campo experimental Bajío, Celaya Guanajuato.
6. Badui, S. (1994) Hidratos de carbono. Química de los alimentos. Editorial Alhambra Mexicana. México, D.F. cap 2. 45-84.
7. Guillén Solís, Fernando. (2005) “El uso de cultivos energéticos en México”
8. Sebastián Fernando, Royo Javier. Noviembre de 2001. “La biomasa como fuente de energía renovable” Universidad de Zaragoza, España.
9. Berzin Isaac, Febrero 2006, “Algas que funcionan como pastillas para el aliento en las chimeneas”, The Christian Science Monitor.
10. Año 2005, “Los ciclos orgánicos y niveles tróficos en los océanos” , La ciencia para todos.
11. Año 2005, “El sol fuente básica de energía”, Revista ambientum Octubre/Noviembre.
12. Fernández Jesús. 2003. “Los vegetales, base de la sostenibilidad de la biosfera”, España.
13. Browning, B.L. 1963, ed. The chemistry of wood Interscience, 687 p. Nueva York.
14. Urbaneja-G.; Ferrer- JR.; Páez-G; (1997). Hidrólisis ácida y caracterización de carbohidratos de la pulpa de café. Revista de la Facultad de Agronomía Universidad del Zulia; Maracaibo, Venezuela.

15. Wooley-R.; Glassner-D.; Sheehan-J. (1995). “Process Design and costing of bioethanol Technology: A tool for determining the status and direction of Research and Development”. Biotechnol. Prog.
16. Shleser, R., “Ethanol Production in Hawaii”, <http://www.hawaii.gov/dbedt/ert/ethanol/ethanol.html> Hawaii, July 1994.
17. Montoya- M.I.; Quintero-J.A. (2004) “Tecnologías aplicadas al procesamiento de biomasa celulósica, hemicelulósica y lignocelulósica para la producción de etanol” Revista punto crítico; Departamento de Ingeniería Química Universidad Nacional de Colombia.
18. McMillan-J.D. (1997) “Bioethanol Production Status and Prospects”; Renewable energy.
19. PEMEX, Exploración y producción “Las reservas de Hidrocarburos de México” y Anuario Estadístico PEMEX, varios años.
20. Saucedo Luna Jaime, (Agosto 2004) “Hidrólisis del lirio con ácido sulfúrico”, Tesis Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Facultad de Ingeniería Química.
21. Farias García de León Nancy, (Junio 2005) “Efecto de la velocidad de agitación en la Hidrólisis Ácida del Lirio Acuático”, Tesis de Licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Facultad de Ingeniería Química